

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของ
เม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง



นายวรรณภย์ บุญรอง

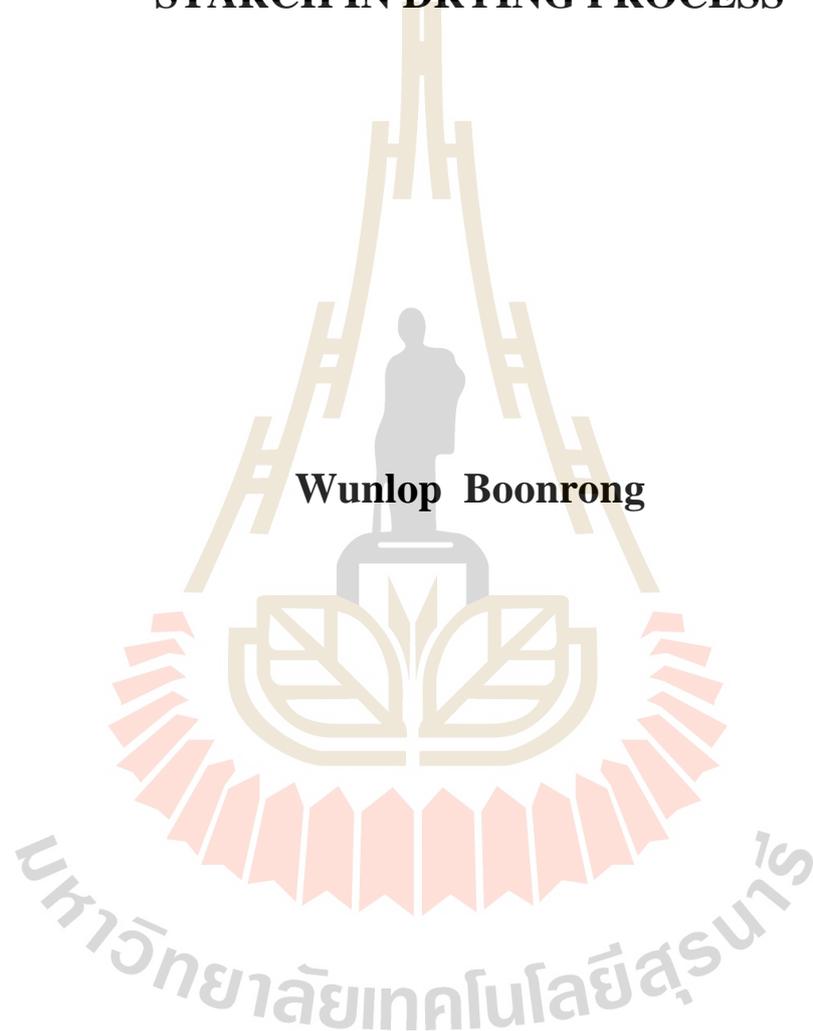
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2562

**THE STUDY OF PARAMETERS AFFECTING ON
PARTICLE SIZE REDUCTION OF TAPIOCA
STARCH IN DRYING PROCESS**



Wunlop Boonrong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Doctor of Philosophy in Manufacturing Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของ
เม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง

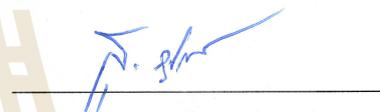
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



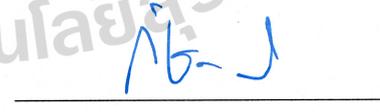
(ผศ. ดร.วรรณนัช บุ่งสุด)

กรรมการ



(อ. ดร.สมศักดิ์ สิวดำรงพงศ์)

กรรมการ



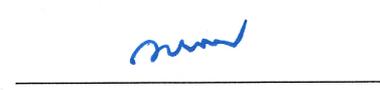
(ผศ. ดร.กัญชลา สุตตาชาติ)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรรณลภย์ บุญรอง : การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมัน
สำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง (THE STUDY OF PARAMETERS AFFECTING ON
PARTICLE SIZE REDUCTION OF TAPIOCA STARCH IN DRYING PROCESS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์, 167 หน้า.

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง
มันสำปะหลัง และการออกแบบ สร้าง รวมถึงติดตั้งใช้งานเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง
ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้กำหนดอัตราการไหลของมวลอากาศผ่านเครื่องลดขนาดไว้
คงที่เท่ากับ 60,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และกำหนดปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย คือ ชนิดแป้งมันสำปะหลัง
อัตราการป้อน ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง รูปแบบใบพัด, และความเร็วปลายใบพัด ในงานวิจัยนี้เครื่อง
ลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะถูกติดตั้งในกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งใช้วัตถุดิบ
เป็นแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ในการทดลองได้วัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วย
เครื่องกิโลวัตต์มิเตอร์ ค่าความหนาแน่นของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นรวมแบบเคาะ
และขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐาน โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง
แบบแฟคทอเรียลในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ จากการทดลองพบว่า ผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อ
การลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมากที่สุด คือ รูปแบบของใบพัด ตามด้วยความเร็วปลาย
ใบพัด ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง และความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการป้อน
เป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อการขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังน้อยที่สุด ซึ่งขนาดอนุภาคของ
เม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบหลังผ่านเครื่องลดขนาดมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง D80 ลดลงจากเดิม 69.1
ไมโครเมตร เป็น 54.7 ไมโครเมตร และค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นจาก 575.1 เป็น 720.5 กิโลกรัมต่อ
ลูกบาศก์เมตร ในส่วนของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรหลังผ่านเครื่องลดขนาดมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง
D80 ลดลงจากเดิม 56.7 ไมโครเมตร เป็น 49.9 ไมโครเมตร และค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นจาก 575.1 เป็น
703.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ค่าดัชนีการใช้พลังงานพบว่า ผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่า
ดัชนีการใช้พลังงานมากที่สุด คือ ความเร็วปลายใบพัด รองลงมาคือรูปแบบของใบพัด ชนิดของแป้งมัน
สำปะหลัง และอัตราการป้อน ตามลำดับ ในขณะที่ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังเป็นผลกระทบหลักที่
ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานน้อยที่สุด โดยแป้งมันสำปะหลังดิบมีค่าดัชนีการใช้พลังงานเพื่อลดขนาด
อนุภาคเท่ากับ 9.5 – 12.9 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง และแป้งมันสำปะหลังคัดแปรมีค่าดัชนีการใช้
พลังงานอยู่ในช่วง 9.2 – 12.5 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

WUNLOP BOONRONG.: THE STUDY OF PARAMETERS AFFECTING
ON PARTICLE SIZE REDUCTION OF TAPIOCA STARCH IN DRYING
PROCESS THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUPAKIT ROOPPAKHUN,
Ph.D., 167 PP.

PARTICLE SIZE REDUCTION/TAPIOCA STARCH/TIP SPEED/ENERGY
INDEX/FRACTIONAL FACTORIAL DESIGN

The objective of this research was to determine the parameter affect to a particle size reduction of tapioca starch. Involved with design, fabrication and installation on factory to produce tapioca starch. For test method the flow of air through with reducing machine is constant of $60,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. In addition, this machine was installed on drying process. The test material used as native tapioca starch and modified tapioca starch. The energy was measured by kilowatt - hour meter. A bulk density to analysis with tapped bulk density equipment and analysis a particle size with sieve analyzer. This research was conducted under a factorial design, which is the most commonly used method for screening the primary and the combined effect of each factor. It was found that the strongest main factor influence to a particle size reduction was type of blade, followed by tip speed of blade, type of tapioca starch, moisture of material and feed rate respectively. It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off on D80 were decrease from 69.1 micron to 54.7 micron and the tapped bulk density increased from 575.1 to 720.5 kg m^{-3} . And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80

were decrease from 56.7 micron to 49.9 micron and the tapped bulk density increased from 575.1 to 703.7 kg m⁻³. On the energy consumption was found that tip speed has to significant influence followed by type of blade, type of tapioca starch, feed rate and moisture of material respectively. And the energy index for native tapioca starch was 9.5 - 12.9 kW - hr ton⁻¹ and modified tapioca starch was 9.2 - 12.5 kW - hr ton⁻¹



School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และชี้แนะแนวทางการออกแบบเครื่องจักรในงานวิจัยนี้ และคอยสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ รองคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำ ปรึกษา กระตุ้นเตือน ติดตาม ช่วยแก้ไขปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิษ ่มงสุด หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุดตาชาติ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำด้านวิชาการ และติดตามความคืบหน้าวิทยานิพนธ์โดยตลอด

ขอขอบคุณคุณทัศนีย์ ทิพย์สาคร เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไปประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยให้กำลังใจ และติดตามความคืบหน้าวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบคุณคุณณัฐชัย หวังหลี่ กรรมการผู้จัดการบริษัท สยาม มอดิไฟด์ สตาร์ช จำกัด ที่เปิดให้โอกาสในการศึกษา และสนับสนุนด้านการเงิน ด้านเวลา เพื่อให้การศึกษาสำเร็จตามที่คาดหวังไว้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

วรรณภย์ บุญรอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ.....	4
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 สถานที่ทำงานวิจัย.....	5
1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 กระบวนการอบแห้งแบบพลาสม่า (Pneumatic flash drying process).....	7
2.2.1 บทนำ.....	7
2.2.2 หลักการพื้นฐานการทำงานของกระบวนการอบแห้งแบบพลาสม่า.....	8
2.2.3 กลไกการระเหยน้ำของระบบเครื่องอบแห้งแบบพลาสม่า.....	11
2.3 ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (Particle size).....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 คุณสมบัติของอนุภาค	13
2.3.2 ลักษณะของเม็ดแป้ง	14
2.3.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง	16
2.4 ความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง (Bulk density)	17
2.4.1 นิยาม และความหมาย	17
2.4.2 การหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density)	18
2.4.3 การหาค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped Bulk density)	19
2.4.4 ความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง (Bulk density)	19
2.5 การคัดขนาดผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis)	20
2.5.1 นิยาม และความหมาย	20
2.6 ทฤษฎีการลดขนาดอนุภาคของวัสดุ	24
2.6.1 นิยาม และความหมาย	24
2.6.2 ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการลดขนาด	25
2.6.3 กฎของคิก (Kick)	27
2.6.4 กฎของริทิงเจอร์ (Rittinger)	28
2.7 หลังการทำงานของเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง	33
2.7.1 กฎของบอนด์	33
2.8 การออกแบบทดลองแบบแฟรคชั่นนัลแฟลทอเรียล	34
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการลดขนาดอนุภาคของวัสดุ	37
2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชั่นนัล แฟลทอเรียล	41
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	44
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	45
3.2 การออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง	46
3.2.1 ข้อมูลแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังคัดแปร	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 เครื่องลดขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลัง.....	46
3.3 เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	59
3.3.1 เครื่องลดขนาดอนุภาคของเมล็ดแป้งมันสำปะหลัง	59
3.3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้.....	60
3.4 การกำหนดปัจจัย และวิธีทดสอบ.....	64
3.4.1 การกำหนดปัจจัยในการทดสอบ	64
3.4.2 วิธีการทดสอบ	66
3.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล.....	67
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	68
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ ของแป้งมันสำปะหลัง.....	69
4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าใน การลดขนาดอนุภาคของเมล็ดแป้งมันสำปะหลัง	75
4.3 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ ของแป้งมันสำปะหลัง.....	78
4.4 การวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าใน การลดขนาดอนุภาคของเมล็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	79
4.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคเมล็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	80
4.5.1 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบเรียบ และทดลองกับแป้งมันสำปะหลัง ดิบ	81
4.5.2 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบกลม และทดลองกับแป้งมันสำปะหลัง ดิบ	82
4.5.3 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบเรียบ และทดลองกับแป้งมันสำปะหลัง แบบคัดแปร	83
4.5.4 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบกลม และทดลองกับแป้งมันสำปะหลัง แบบคัดแปร	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของเบ็งมันสำปะหลัง	85
4.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดเบ็งมัน สำปะหลัง.....	86
4.8 การวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของเบ็งมันสำปะหลังดิบและเบ็งมันสำปะหลังตัดแปร ก่อนและหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค	87
4.9 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งเบ็งมันสำปะหลัง กรณีการเดินและ ไม่เดินผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค.....	89
5 บทสรุป.....	90
5.1 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการลดขนาดอนุภาคเม็ดเบ็งมันสำปะหลัง.....	92
5.2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ด เบ็งมันสำปะหลัง.....	93
5.3 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของเบ็งมัน สำปะหลัง.....	94
5.4 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาด อนุภาคของเม็ดเบ็งมันสำปะหลัง	94
5.5 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของเบ็งมัน สำปะหลัง และค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดเบ็งมัน สำปะหลัง.....	95
5.6 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป	95
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	98
ภาคผนวก ข. มาตรฐานการทดสอบ และวิเคราะห์ต่าง ๆ	128
ภาคผนวก ค. ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ยี่ห้อ ABB ขนาด 110 kW., 3 phase, 50 Hz., 1,500 rpm., Type : M2BAX 315SMA 4	163
ประวัติผู้เขียน	167

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	Performance data od Pneumatic dryers..... 13
2.2	ขนาดทั่วไปของสินค้า โภคภัณฑ์อาหาร 14
2.3	ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ 15
2.4	ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของแป้งชนิดต่าง ๆ 20
2.5	เปรียบเทียบขนาดตะแกรง U.S. MESH กับ MICRON..... 23
2.6	ค่าดัชนีงาน (W_p) ของวัสดุต่าง ๆ 32
2.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง 37
2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยที่สนใจและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง 37
3.1	ค่าความหนาแน่นรวมแบบเกาะของแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังคัดแปร . 46
3.2	การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) 46
3.3	คุณสมบัติ และการใช้งานอุปกรณ์ในการลดขนาดอนุภาค 51
3.4	คุณสมบัติทางกลของ AISI 304 55
3.5	คุณสมบัติทางเคมีของ AISI 304 56
3.6	พารามิเตอร์ในการทดลอง 65
4.1	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง และระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง..... 69
4.2	การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง 70
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง 74
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง..... 78
4.5	การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ก่อนและหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค . 84
4.6	ค่าความหนาแน่นรวมแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ก่อนและหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค 85
4.7	ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง 86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบ	88
4.9 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร	88
4.10 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งแป้งมันสำปะหลัง กรณีการเดินทางและไม่เดินทางผ่านเครื่องลด ขนาดอนุภาค.....	90

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	ระบบอบแห้งแบบ Flash drying8
2.2	กระบวนการอบแห้งแป้งมันสำปะหลัง..... 11
2.3	กลไกการระเหยน้ำของระบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 11
2.4	ลักษณะการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์หรือไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง..... 16
2.5	เปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเนื้อ 18
2.6	อุปกรณ์สำหรับหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) 18
2.7	แผนภาพของเครื่องวัดความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) 20
2.8	เครื่องร่อนเม็ดแป้ง (Sieve analysis) 21
2.9	ขนาดของช่องตะแกรง..... 22
2.10	วิธีการลดขนาดอนุภาคของวัสดุ 25
2.11	แสดงส่วนประกอบของเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง 34
2.12	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล 35
2.13	อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล..... 35
2.14	ตัวอย่างแสดงการออกแบบเชิงแพคทอเรียล 2 ปัจจัย 36
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 45
3.2	เครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill)..... 48
3.3	เครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) 49
3.4	พัดลม (Blower) แบบใบพัด Backward Curved ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 50
3.5	เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง..... 50
3.6	ใบพัดแบบเรียบ (Flat blade)..... 54
3.7	ใบพัดแบบกลม (Round blade)..... 55
3.8	Simulation ใบพัดแบบเรียบคู่ค่า Yield Strength..... 57
3.9	Simulation ใบพัดแบบเรียบคู่ค่า Displacement 57
3.10	Simulation ใบพัดแบบกลมคู่ค่า Yield Strength 58
3.11	Simulation ใบพัดแบบกลมคู่ค่า Displacement 58

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ตำแหน่งของเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง	59
3.13 เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังพร้อมอุปกรณ์	60
3.14 เครื่องวัดค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density)	61
3.15 เครื่องร่อนเม็ดแป้ง (Sieve analysis)	61
3.16 เครื่องวัดค่าความชื้นของแป้ง (Moisture analysis).....	62
3.17 เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh meter).....	62
3.18 เครื่องวัดความเร็วลม	63
3.19 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล	63
3.20 เครื่องวัดความหนืดแป้ง.....	64
4.1 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมัน สำปะหลัง	71
4.2 กราฟแสดงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมัน สำปะหลัง	72
4.3 กราฟแสดงผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมัน สำปะหลัง	72
4.4 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดของ อนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	75
4.5 กราฟแสดงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาด อนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	76
4.6 กราฟแสดงผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาด อนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	76
4.7 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมัน สำปะหลัง	79
4.8 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลด ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง	79
4.9 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลด ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง	80

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบ ตีแบบเรียบ ที่ค่า D80	81
4.11 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบ ตีแบบเรียบ ที่ค่า D50	81
4.12 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบ ตีแบบกลม ที่ค่า D80.....	82
4.13 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบ ตีแบบกลม ที่ค่า D50.....	82
4.14 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลด ขนาดใบตีแบบเรียบ ที่ค่า D80	83
4.15 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลด ขนาดใบตีแบบเรียบ ที่ค่า D50	83
4.16 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลด ขนาดใบตีแบบกลม ที่ค่า D80.....	84
4.17 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลด ขนาดใบตีแบบกลม ที่ค่า D50.....	85
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง กับค่าดัชนีการ ใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง.....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

d_F	=	ขนาดเฉลี่ยของสารป้อน
d_p	=	ขนาดเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์
E	=	พลังงานที่ต้องใช้เพื่อบดวัตถุ
E_m	=	ประสิทธิภาพของมอเตอร์
E_b	=	ประสิทธิภาพของเครื่องลดขนาด
F	=	แรงกระทำ
GPa	=	จิกกะปาสกาล
K_k	=	ค่าคงที่ของคิก
K_R	=	ค่าคงที่ของริททิงเจอร์
K_b	=	ค่าคงที่ของบอนด์
Kg/h	=	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
kWh	=	กิโลวัตต์-ชั่วโมง
kWh/ton	=	กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตันแห้ง
M	=	มวลของวัสดุ
MPa	=	เมกกะปาสกาล
m/s	=	เมตรต่อวินาที
m	=	เมตร
N	=	นิวตัน
P_1	=	ความดันสมบูรณ์ด้านเข้า
P_2	=	ความดันสมบูรณ์ด้านออก
P_w	=	พลังงานที่ต้องใช้
Q_{air}	=	อัตราการไหลของอากาศ
RR	=	Reductive ratio
R	=	รัศมีของรอบการหมุนเนื่องจากแรงกระทำ
T_N	=	แรงบิด
v	=	ปริมาตรของภาชนะบรรจุ
V	=	อัตราความเร็วของวัสดุ

W_i	=	ค่าดัชนีงาน
ρ	=	ความหนาแน่นรวม
S_p	=	พื้นที่จำเพาะของผลิตภัณฑ์
S_F	=	พื้นที่จำเพาะของวัสดุป้อน



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมมันสำปะหลังของประเทศไทย ประกอบด้วยการผลิตมันสำปะหลัง อุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลัง และอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากการแปรรูป ผลผลิตหลักของอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลัง คือ มันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง ในปี 2558 มีการส่งออกผลิตภัณฑ์หลักมูลค่าสูงถึง 115,786 ล้านบาท และผลิตภัณฑ์หลักที่ใช้ในประเทศทำให้เกิดอุตสาหกรรมต่อเนื่องมูลค่ามากกว่า 300,000 ล้านบาท เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมนมผง อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้อุตสาหกรรมมันสำปะหลังยังเกี่ยวข้องกับเกษตรกรมากกว่า 2.6 ล้านคน มีการจ้างงานในอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกกว่าหนึ่งล้านคน จึงนับได้ว่าอุตสาหกรรมมันสำปะหลังมีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยเป็นอย่างมาก

นอกจากเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเดิมที่มีอยู่ ความต้องการมันสำปะหลังเพื่อผลิตพลังงาน และผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เช่น ไบโอดีเซล กรดแล็กติก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงห้าปีที่ผ่านมาประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง 7 - 8 ล้านไร่ สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตหัวมันสำปะหลังได้ถึง 20 - 32 ล้านเมตริกตันต่อปี แต่เนื่องด้วยนโยบาย และข้อจำกัดในพื้นที่เพาะปลูก ทำให้ไม่สามารถขยายพื้นที่ปลูกได้ การเพิ่มผลผลิตมันสำปะหลัง เพื่อป้อนอุตสาหกรรมเดิม และอุตสาหกรรมใหม่ที่เกิดขึ้น จึงขึ้นกับความสามารถของประเทศในการใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่ ทั้งด้วยการคิดค้นพันธุ์มันสำปะหลังที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูง เทคนิคการเพาะปลูกแบบน้ำหยด การให้แร่ธาตุสารบำรุงดิน และการ ใช้น้ำในพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น

ในปี 2558 ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตมันสำปะหลังคิดเป็น 32.40 ล้านเมตริกตัน คิดเป็นมูลค่า 2,212 ล้านบาท หรือประมาณ 77,420 ล้านบาท มีส่วนแบ่งการตลาดร้อยละ 67 เป็นอันดับหนึ่งของโลก และคาดการณ์ว่าในปี 2559 ความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในประเทศจะเพิ่มขึ้นจากปี 2558 โดยเฉพาะอย่างยิ่งความต้องการใช้มันสำปะหลังเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลจะเพิ่มขึ้น รวมถึงความต้องการใช้เพื่อผลิตเป็นมันเส้น และแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยคาดว่า การส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังจะใกล้เคียง หรือเพิ่มขึ้น

เล็กน้อยจากปี 2558 เนื่องจากคู่ค้ายังมีความต้องการผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังทั้งในรูปของมันเส้น และแป้งมันสำปะหลังอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะประเทศจีน ซึ่งเป็นผู้นำเข้าหลักของประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นอันดับสามของโลก โดยมีผลผลิตต่อปีประมาณ 22.2 ล้านเมตริกตัน การผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified starch) ในปัจจุบันประเทศไทย (ข้อมูลปี 2558) มีโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด 90 โรงงาน แบ่งเป็น โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ 75 โรงงาน โรงงานแป้งมันสำปะหลังดิบดัดแปร 27 โรงงาน โรงงานผลิตแป้งสาकु 2 โรงงาน โรงงานผลิตสารทดแทนความหวาน 3 โรงงาน และ โรงงานผลิตพลังงาน 1 โรงงาน ทั้งนี้ยังรวมถึงโรงงานที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังมากกว่า 2 รายการขึ้นไป

ในปี 2558 ผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง มีปริมาณการส่งออก 3.84 ล้านเมตริกตัน คิดเป็นมูลค่า 1,795 ล้านดอลลาร์ หรือประมาณ 62,850 ล้านบาท โดยตลาดหลักของแป้งมันสำปะหลังดิบ ได้แก่ จีน อินโดนีเซีย ใต้หวัน มาเลเซีย และญี่ปุ่น ส่วนแป้งมันสำปะหลังดัดแปร มีตลาดหลัก ได้แก่ จีน อินโดนีเซีย ญี่ปุ่น และเกาหลีใต้

จากมูลค่าการส่งออกผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังที่มีมูลค่าสูงถึง 62,850 ล้านบาทต่อปี หากสามารถเพิ่มน้ำหนักการขนส่งต่อตู้ให้สูงขึ้น โดยวิธีการเพิ่มความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) ของแป้งมันสำปะหลังให้สูงขึ้น จะช่วยให้สามารถเพิ่มน้ำหนักการบรรจุต่อตู้ได้มากขึ้นด้วยถุงบรรจุภัณฑ์ขนาดเท่าเดิม ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการส่งออกได้ลดร้อยละ 9.66 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 545 ล้านบาทต่อปี รวมถึงช่วยลดปริมาณบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในบรรจุได้ลดร้อยละ 10.53 คิดเป็นมูลค่าประมาณ 214 ล้านบาทต่อปี ทั้งยังช่วยลดภาระการจำกัดของเสียที่เกิดขึ้นหลังการใช้งานบรรจุภัณฑ์อีกทางหนึ่งด้วย

การเพิ่มความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) ของแป้งมันสำปะหลังให้สูงขึ้น โดยที่คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังทั้งด้านกายภาพ และด้านเคมียังคงเหมือนเดิมทุกประการ มีปัจจัยหลักที่สนับสนุน คือ การลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังให้มีขนาดเล็กลง และมีความสม่ำเสมอ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงนำมาสู่การวิจัยในหัวข้อ “การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง (The Study of Parameters Affecting On Particle Size Reduction of Tapioca Starch in Drying Process)”

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง
- 1.2.3 เพื่อออกแบบ สร้าง และติดตั้งเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง จะทำการออกแบบ สร้าง ติดตั้ง และทดสอบเครื่องลดขนาดในกระบวนการผลิตจริง โดยติดตั้งเครื่องดังกล่าวในกระบวนการอบแห้งแป้งของโรงงานทั้งหมดสองเครื่อง ในสองไลน์ผลิต ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาของโรงงานที่ประสบปัญหาความยากลำบากในการบรรจุแป้ง การจัดการแป้งที่มีขนาดเม็ดแป้งขนาดใหญ่ (Over size) การจับแป้งสำเร็จรูป การขนถ่าย และการลำเลียงแป้งเข้าสู่คอนเทนเนอร์ โดยมีขอบเขตการวิจัย ดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ออกแบบ สร้าง ติดตั้ง และทดสอบเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic flash drying process)
- 1.3.2 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native tapioca starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified tapioca starch)
- 1.3.2 กำหนดค่าอัตราการไหลของมวลอากาศผ่านเครื่องลดขนาดไว้คงที่เท่ากับ 60,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- 1.3.3 กำหนดรูปแบบใบพัด (Rotor) 2 รูปแบบ คือ แบบเรียบ และแบบกลม
- 1.3.4 กำหนดระยะห่างของใบพัด (Rotor) กับใบนิ่ง (Static) ของเครื่องลดขนาดไว้คงที่เท่ากับ 35 มิลลิเมตร
- 1.3.5 ปรับเปลี่ยนค่าอัตราการป้อนมวลวัสดุเข้าเครื่องลดขนาด ดังนี้
 - 1) อัตราป้อนมวลวัสดุที่ 7,000 kg/h
 - 2) อัตราป้อนมวลวัสดุที่ 8,000 kg/h
- 1.3.6 ปรับเปลี่ยนค่าความชื้นของวัสดุเข้าเครื่องลดขนาด ดังนี้
 - 1) ความชื้นของวัสดุที่ 11.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง
 - 2) ความชื้นของวัสดุที่ 12.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง
- 1.3.7 ปรับเปลี่ยนค่าความเร็วปลายใบ (Tip speed velocity) ของเครื่องลดขนาด ดังนี้
 - 1) ค่าความเร็วปลายใบ ที่ 76 m/s
 - 2) ค่าความเร็วปลายใบ ที่ 88 m/s

1.3.8 ประเมินผลลัพธ์จากการทดสอบ ดังนี้

- 1) ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) ก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาด
- 2) ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบวัดด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) ก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาด
- 3) วัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ

1.3.9 ข้อมูลที่ใช้การออกแบบเครื่องลดขนาด ประกอบด้วย

- 1) ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบในหน่วยไมโครเมตร
- 2) ปริมาณของวัตถุดิบที่หาได้ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis)
- 3) กำลังการผลิตของกระบวนการอบแห้ง
- 4) อัตราการไหลของมวลอากาศ

1.3.10 ประเมินค่าพลังงานที่ใช้เทียบกับทฤษฎีเพื่อหาค่าดัชนีงาน (work index) ตามกฎของบอนด์

1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

1.4.1 ตัวแปรต้นประกอบด้วย

- 1) ความเร็วปลายใบของใบพัด (Tip speed velocity)
- 2) อัตราการป้อนมวลวัตถุดิบเข้าเครื่องลดขนาด
- 3) ค่าความชื้นของวัตถุดิบเข้าเครื่องลดขนาด

1.4.2 ตัวแปรตามประกอบด้วย

- 1) ค่าดัชนีการใช้พลังงานในการลดขนาด (kWh/ton)
- 2) ความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง (Tapped Bulk density)
- 3) ขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลัง (Particle size)
- 4) ปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง (Sieve analysis)

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.5.1 สืบค้น ศึกษาองค์ความรู้ทางทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 กำหนดขอบเขตงานวิจัย

1.5.3 วิเคราะห์ข้อมูลแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified starch) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องจักร ดังนี้

- 1) ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped Bulk density)

- 2) ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (Particle size)
- 3) ปริมาณเม็ดแป้งที่หาได้ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis)

1.5.4 ทำการออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง และทำการ Simulated ด้วยโปรแกรม Solid works เพื่อดูลักษณะการไหลของเม็ดแป้งมันสำปะหลังผ่านเครื่องลดขนาด

1.5.5 สร้าง และติดตั้งเครื่องลดขนาดในกระบวนการอบแห้งแบบพาสเจอร์ (Pneumatic flash drying process)

1.5.6 ทำการทดสอบเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นรวมแบบเคาะ และขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

1.5.7 เก็บรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบ

1.5.8 สรุปผลการดำเนินงาน เสนอข้อเสนอนะ และจัดทำรายงานการวิจัย

1.5.9 เผยแพร่งานวิจัย

1.6 สถานที่ทำงานวิจัย

บริษัท สยาม ควอลิตี้ สตาร์ช จำกัด เลขที่ 222 หมู่ 10 ตำบลโคกเริงรัมย์ อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ 36160 โทรศัพท์ 044-815-555

1.7 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1.7.1 วัสดุที่ใช้ทดสอบเป็นแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native tapioca starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified tapioca starch)

1.7.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย

1) เครื่องวัดค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) ยี่ห้อ ERWERA รุ่น SVM-121/221

2) เครื่องร่อนเม็ดแป้ง (Sieve analysis) ยี่ห้อ RETSCH รุ่น AS 200

3) เครื่องวัดค่าความชื้นของแป้ง (Moisture analysis) ยี่ห้อ SARTURIUS รุ่น

4) เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh meter) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น PW 3360

5) เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ SMART SENSOR รุ่น AS 856

6) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ยี่ห้อ SARTURIUS รุ่น BSA3202S - CW

1.7.3 เครื่องจักรที่ใช้ในการทดสอบ

1) เครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้ง (Size reducing machine)

2) เครื่องปรับเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของมอเตอร์ (Inverter) ยี่ห้อ ABB

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.8.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อขนาด (Particle size) ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) และปริมาณ (Quantity) อนุภาคของเม็ดแป้งสำปะหลังดิบ (Native tapioca starch) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (Modified tapioca starch)

1.8.2 ทราบถึงความเร็วปลายใบ (Tip speed velocity) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

1.8.3 ทราบถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

1.8.4 สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรจุแป้งต่อถุงเพิ่มขึ้นด้วยถุงบรรจุขนาดเท่าเดิม



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดขนาดอนุภาควัสดุต่าง ๆ โดยสนใจในส่วนของวัสดุจำพวกสลิแวนด์ ชิวมวล และผงแป้ง เป็นต้น ซึ่งเมื่อผ่านการลดขนาดอนุภาคแล้ว จะทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุลดลงต่ำกว่า 100 ไมโครเมตร

ทั้งนี้ได้แบ่งเนื้อหาเป็น 2 ส่วนหลัก ประกอบด้วย

2.1 บทนำ

2.2 กระบวนการอบแห้งแบบพลาสม่า (Pneumatic flash drying process)

2.3 ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (Particle size)

2.4 ความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง (Tapped bulk density)

2.5 การคัดขนาดผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis)

2.6 ทฤษฎีการลดขนาดอนุภาคของวัตถุ (Size reducing)

2.7 หลักการทำงานของเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคชันนัลแฟคทอเรียล

2.9 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยเรื่อง “การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง (The Study of Parameters Affecting on Particle Size Reduction of Tapioca Starch in Drying Process)” มีความเกี่ยวข้องกับทฤษฎีการลดขนาดอนุภาคของวัตถุ รวมถึงกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งในกระบวนการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังมีความเกี่ยวข้องทั้งในด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อน เพื่อผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพ และสามารถบรรจุ จัดเก็บ ขนส่งได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ซึ่งจะสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน รวมถึงลดปริมาณการใช้บรรจุภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นการติดตั้งเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง จะช่วยให้ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดเล็กลงและสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ปัญหาการบรรจุ จัดเก็บ และการขนส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากขนาดถุงแป้ง

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic flash drying process)

2.2.1 บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการแยกของแข็งเปียก ของแข็งกึ่งเปียก หรือของเหลว เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง โดยการระเหยของเหลวให้กลายเป็นสถานะของไอด้วยการใช้ความร้อน คุณสมบัติที่สำคัญของการอบแห้งคือ การเปลี่ยนสถานะ (phase) และการผลิตของแข็ง โดยการอบแห้งด้วยความร้อนเป็นกระบวนการที่สำคัญที่มีการใช้งานแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันส่วนมากใช้การอบแห้งเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการผลิต

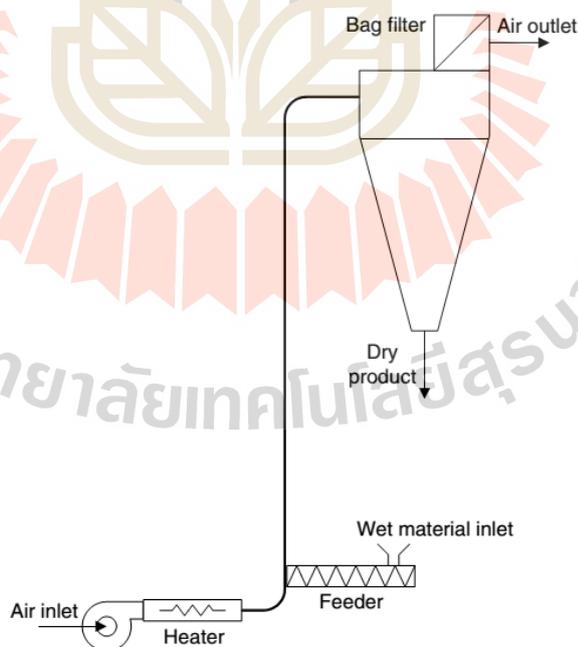
การอบแห้งเป็นกระบวนการที่จำเป็นในภาคอุตสาหกรรมเคมี เกษตร เทคโนโลยีชีวภาพ อาหาร โพลีเมอร์ เซรามิก ยา เชื้อ และกระดาษ และการแปรรูปไม้ การอบแห้งใช้พลังงานค่อนข้างสูง โดยเฉพาะพลังงานความร้อนที่ใช้สำหรับการอบแห้ง ซึ่งได้รับโดยตรงจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการออกแบบอุปกรณ์อบแห้งให้ทันสมัยใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานความร้อนให้สูงขึ้น และลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงรวมถึงการใช้เชื้อเพลิงหมุนเวียน

หนึ่งในระบบอบแห้งที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การอบแห้งแบบแฟลช (Flash drying) หรือที่รู้จักกันอีกอย่างหนึ่ง คือ การอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic drying) ระบบการอบแห้งแบบนี้ใช้ความร้อนในการอบโดยตรง หรือที่รู้จักกันว่าเป็นเครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียน เป็นการขนถ่ายมวลวัสดุด้วยลมพร้อมกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน และแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างต่อเนื่อง ลมร้อนที่ใช้ อาจผลิตได้จากเผาไหม้โดยตรง หรือใช้ตัวกลางในพาความร้อน การอบแห้งจะเกิดขึ้นโดยกระแสลมร้อนจะขนส่งอนุภาคของแข็งผ่านระบบ และความร้อนจะสัมผัสโดยตรงกับวัสดุ ทำให้ของแข็ง และน้ำได้รับความร้อน ส่งผลให้น้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอได้ ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) สามารถใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง ซึ่งในบางครั้งก็ให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และรวมถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้นด้วย

พื้นที่ผิวขนาดใหญ่สำหรับถ่ายเทความร้อน และการขนถ่ายมวล การพาความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่สูงเกิดขึ้นในการอบแห้ง ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้ง และความสามารถในการอบแห้งสูงโดยขนาดอนุภาคที่อบแห้งแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 10 - 500 ไมโครเมตร คุณสมบัติสำคัญของเครื่องอบแห้งแบบนี้ คือ เวลาในการอบแห้งระหว่างลมร้อน และมวลวัสดุจะสั้นประมาณ 0.5 - 10 วินาที ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิของมวลวัสดุจะมีค่าต่ำเสมอในขณะที่อบแห้ง

2.2.2 หลักการพื้นฐานการทำงานของกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม

หลักการพื้นฐานการทำงานของกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม ตามรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงระบบซึ่งจะทำให้อนุภาคของมวลวัสดุมีความแห้งในช่วงการขนส่งด้วยกระแสลมร้อน ระบบอบแห้งแบบพาหะลมมี 6 ส่วนประกอบพื้นฐาน คือ เครื่องทำความร้อนก๊าซ หรือหม้อไอน้ำ วัสดุนำเข้าเปียก ท่ออบแห้ง ชุดแยกฝุ่น พัดลมดูดอากาศ และถังเก็บผลิตภัณฑ์แห้ง ชุดอุปกรณ์ป้อนมวลวัสดุเปียกเข้าสู่ระบบ ทั้งนี้อาจจะติดตั้งอุปกรณ์ผสมพิเศษเพิ่มเพื่อประสิทธิภาพในการผสม โดยการทำงานเริ่มต้นที่กระแสลมร้อนจะไหลขึ้นผ่านท่ออบแห้งพร้อมกับป้อนวัสดุเปียกเข้าสู่ระบบด้วยพัดลมดูดอากาศ โดยความเร็วของลมร้อน ต้องมากกว่าความเร็วของการตกอิสระของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่จะอบแห้ง ความเร็วของลมร้อนมีความสัมพันธ์กันอย่างสูงกับความเร็วของอนุภาค การสัมผัสกันของความร้อนระหว่างลมร้อนกับมวลวัสดุที่ขนถ่ายจะสั้นมาก ดังนั้นระบบกาอบแห้งแบบนี้จึงเหมาะสมที่สุดสำหรับการลดความชื้นภายนอก (ความชื้นที่พื้นผิว) และไม่เหมาะสำหรับการลดความชื้นภายในเนื้อของมวลวัสดุ ในตอนท้ายของขั้นตอนการอบแห้งเป็นวิธีการแยกฝุ่น คือ การแยกลมร้อนออกจากมวลวัสดุ การติดตั้งชุดแยกฝุ่นต้องเป็นไปตามข้อบังคับสำหรับการควบคุมมลพิษ ซึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ได้แก่ ไซโคลน ผ่ากรองแบบ ไฟฟ้าสถิต และชุดดักจับฝุ่นแบบเปียก เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ระบบอบแห้งแบบ Flash drying (Irene Borde and Avi Levy, 2006)

อัตราค่าระเหยของน้ำในการอบแห้งแบบแบบพาหะลม จะทำให้อุณหภูมิของมวลวัสดุแห้งลดลงอย่างมากซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการอบแห้งจำพวกเม็ด ผลึก แป้ง และผลิตภัณฑ์แป้ง ฯลฯ การอบแห้งแบบนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น สารเคมี ยา เซรามิก ยิปซัม ไม้ และเหมืองแร่ รวมถึงเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ยังสามารถสร้าง ประกอบ ติดตั้งได้ง่าย และมีต้นทุนต่ำ รวมถึงปราศจากปัญหาในการใช้งาน

ในส่วนของระยะเวลาการอบแห้ง และการหมุนเวียนมวลวัสดุกลับเข้าสู่ระบบใหม่อีกครั้ง จำนวนครั้งในการหมุนเวียนส่งผลต่อขนาดอนุภาคของมวลวัสดุ และระยะเวลาที่อนุภาควิ่งอยู่ในระบบจะไม่เหมือนกันทุกครั้ง ซึ่งสามารถสรุปข้อได้เปรียบของการอบแห้งแบบแบบพาหะลม ได้ดังนี้

- 1) ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น และการไหลแบบขนานทำให้เป็นไปได้ว่าจะได้วัสดุที่แห้งแบบไม่คงตัวในความร้อน
- 2) เครื่องอบแห้งแบบแบบพาหะลม ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งขนาดไม่มาก และสามารถติดตั้งภายนอกอาคารได้ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์บำบัดมลพิษทางอากาศต้องถูกติดตั้งไว้อย่างเหมาะสม
- 3) เครื่องอบแห้งสามารถควบคุมได้ง่าย วัสดุที่มีปริมาณต่ำในเครื่องทำให้มีความสมดุลความร้อนที่ถูกดึงใช้งานสามารถปรับปริมาณได้อย่างรวดเร็ว
- 4) เนื่องจากชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่มีจำนวนน้อย ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอยู่ในระดับต่ำ
- 5) ต้นทุนการลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบอื่น ๆ
- 6) เป็นการอบแห้งพร้อมกับขนถ่ายวัสดุ มีประโยชน์สำหรับมากสำหรับกระบวนการจัดการวัสดุ

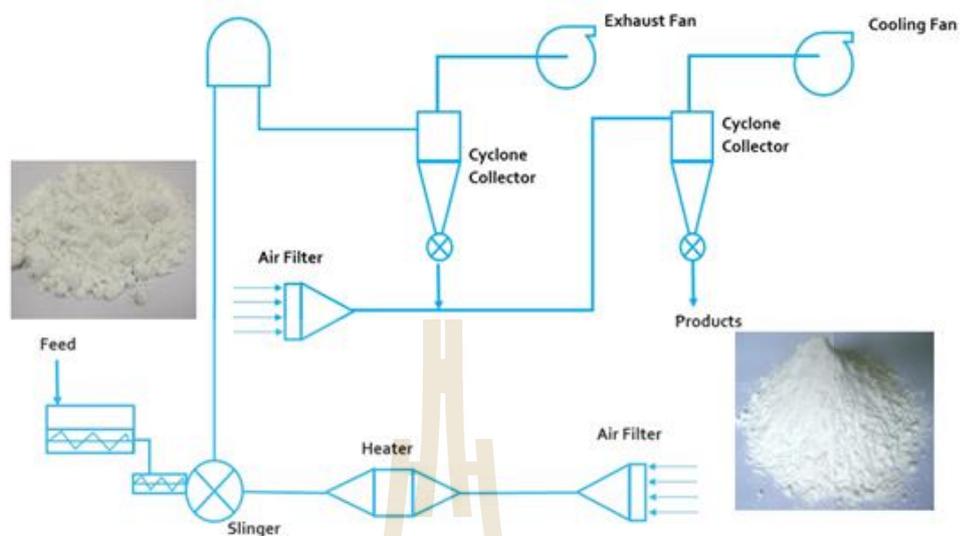
ส่วนข้อเสียเปรียบของระบบอบแห้งแบบพาหะลม มีดังต่อไปนี้

- 1) ต้องมีอุปกรณ์ทำความสะอาดลมร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง
- 2) กรณีที่วัสดุป้อนเป็นฝุ่นผงที่มีการปล่อยสารพิษ วัสดุที่ใช้ทำเครื่องอบแห้งไม่สามารถป้องกันสารพิษได้
- 3) ในบางกรณีสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ไอน้ำร้อนขจัดยังเป็นตัวกลางในการอบแห้งได้
- 4) สำหรับวัสดุที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ ระบบอบแห้งไม่สามารถลำเลียงและอบแห้งได้
- 5) มีความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้และการระเบิด ดังนั้นต้องระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการติดไฟของมวลวัสดุป้อน

6) โดยทั่วไปจำนวนครั้งของการหมุนเวียนวัสดุกลับมาป้อนใหม่ จะทำให้ได้วัสดุที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน และระยะเวลาที่อยู่ในเครื่องอบแห้งไม่เท่ากัน

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic drying) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Flash dryer เป็นเครื่องอบแห้งวัสดุของแข็งที่มีอนุภาคเล็ก เช่น ผง ฟูน หรือเม็ดขนาดเล็ก ที่สามารถถูกพาไปกับลมร้อนได้ โดยวัสดุจะถูกป้อนให้ผสม และไหลตามไปพร้อมกับลมร้อนในท่อ บางครั้งถูกเรียกว่า ท่ออบ ท่ออบนี้โดยทั่วไปมักติดตั้งท่อในแนวตั้งให้มีการไหลของลมร้อนในแนวตั้ง ช่วยให้วัสดุกระจายไหลในท่อทั่วพื้นที่หน้าตัดได้ดีขึ้น ทั้งนี้วัสดุบางประเภทที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เล็กน้อยมีแนวโน้มจะกองที่ท้องท่อได้ง่าย ถ้าไหลในแนวนอน หรือเมื่อมีการไหลผ่านช่องอ การอบแห้งแบบนี้ทำการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ประมาณ 0.5 - 10 วินาที ขึ้นอยู่กับวัสดุ และความเร็วลม ดังนั้นขนาดวัสดุจึงมีความสำคัญ และเป็นปัจจัยสำคัญ 2 ประการ ที่ส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ คือ ข้อที่หนึ่งวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็กช่วยให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับลมร้อนได้มากกว่า จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อน ไปยังเนื้อวัสดุที่อบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบนี้สูงมาก ข้อที่สองการที่วัสดุมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ดังนั้นระยะทางการแพร่ของน้ำภายในเนื้อวัสดุมายังผิวด้านนอกของวัสดุจึงสั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความต้านทานในการแพร่ของน้ำจากด้านในออกมาสู่พื้นที่ผิวนอกของวัสดุต่ำมากจนแทบไม่มีผล หรือมีผลน้อยต่ออัตราการระเหยของน้ำอันเนื่องมาจากการควบคุมโดยการแพร่ของน้ำภายในวัสดุเลย อัตราการระเหยของน้ำจึงขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนมาที่วัสดุเป็นหลัก จึงเป็นจุดเด่นหรือหัวใจของเครื่องอบแห้งแบบนี้ และเป็นที่มาของการใช้ชื่อเรียกว่า Flash dryer สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมอยู่ในช่วง 3,500 - 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ของน้ำที่ระเหย หรือประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 28 - 64 เปอร์เซ็นต์

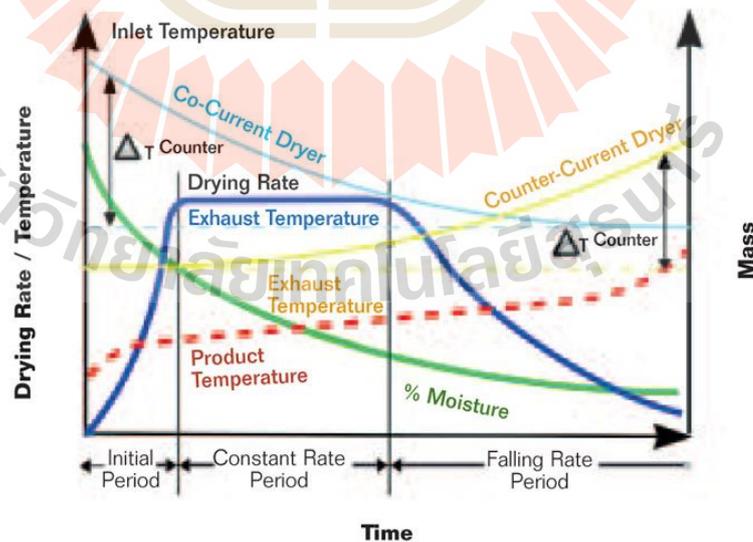
การออกแบบการลำเลียงของเครื่องอบเป็นแบบส่วนผสมระหว่างวัสดุกับอากาศแบบเจือจาง หรือคิดอัตราส่วนวัสดุต่ออากาศ (โดยน้ำหนัก) ไม่เกิน 6 : 1 สำหรับการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังอัตราส่วนวัสดุต่ออากาศโดยประมาณ 0.4 : 1 โดยทั่วไปความเร็วของวัสดุอยู่ที่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของความเร็วอากาศ สำหรับกระบวนการอบแห้งแป้งมันสำปะหลัง แสดงตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการอบแห้งแป้งมันสำปะหลัง (บริษัท สยาม ควอลิตี้ สตาร์ช, 2014)

2.2.3 กลไกการระเหยน้ำของระบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ทำหน้าที่ 2 อย่างในเวลาเดียวกัน คือ การลดความชื้นของวัสดุ และการขนถ่ายวัสดุ ซึ่งในส่วนของกลไกการลดความชื้นสามารถอธิบายกลไกการระเหยน้ำตามรูปที่ 2.3 ดังนี้



รูปที่ 2.3 กลไกการระเหยน้ำของระบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Darren A. Traub, 2002)

จากรูปที่ 2.3 พบว่า กลไกการระเหยน้ำแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ในช่วงแรก หรือช่วงเริ่มต้น ความร้อนจากลมร้อนจะถูกถ่ายเทสู่กับวัสดุอย่างมาก ซึ่งอัตราการระเหยน้ำจะสูงมาก และความชื้นของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน และอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มเพิ่มขึ้น โดยน้ำที่ระเหยออกจะเป็นน้ำที่เกาะตัวอยู่ระหว่างเนื้อวัสดุ ต่อมาในช่วงระยะที่สอง หรือช่วงอัตราระเหยคงที่ ความชื้นที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของวัสดุจะระเหยออก และอัตราการระเหยจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นที่ลดลง ทั้งอุณหภูมิของวัสดุเริ่มสูงขึ้นต่อเนื่อง การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะถูกใช้ไปกับการระเหยน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของวัสดุเป็นหลัก และสุดท้าย คือ ระยะที่สาม หรือช่วงอัตราการระเหยลดลง เป็นช่วงการระเหยความชื้นออกจากภายในเนื้อวัสดุไปยังพื้นผิวด้านนอก ซึ่งมีอัตราการระเหยน้อยมาก ความชื้นจะลดลงจนถึงจุดอิ่มตัว และอุณหภูมิของเนื้อวัสดุจะเพิ่มขึ้นสูงสุด

ทั้งนี้กระบวนการอบแห้งเป่าด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic drying) มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่อตันแห้งต่ำ ทำให้ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปมันสำปะหลัง โดยประสิทธิภาพของระบบดังกล่าวนี้ เมื่อกับการอบแห้งวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน แสดงตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Performance data of Pneumatic dryers

Detail	Point	Metallic stearate	Starch	Adipic acid	Fiber
Method feed		Sling	Sling	Screw	Distributor
Material size		Fine	Fine	30 Mesh	6 mm
Product rate kg/hr.		127	6005	4537	1184
Moisture %	Initial	66.7	51.5	11.1	165.9
(bone dry basis)	Final	0.5	14.9	0.2	11.1
Air temperature °C	Initial	140	150	160	400
	Final	54.4	50	65	110
Method of heating		Steam	Steam	Steam	Oil
Heat consumption, kcal/kg. Evpn.		1205	1014	1333	955
Air circulation		No	No	No	No
Material circulation		Yes	Yes	Yes	Yes
Fan Capacity std. m ³ /hr		2448	45058	16153	21254
Installed Fan HP		15	220	65	60
Product Exit Temp. °C		40	35	48.9	60

ที่มา : (Bureau of Energy Efficiency, 2006)

2.3 ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (Particle size)

2.3.1 คุณสมบัติของอนุภาค

คุณสมบัติของอนุภาคหลายชนิดมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ (Davies, 1984) ซึ่งประกอบด้วย ขนาดของอนุภาค รูปร่าง พื้นผิว ความหนาแน่น ความแข็ง คุณสมบัติการดูดซับ ฯลฯ โดยคุณสมบัติเหล่านี้ของอนุภาคมีความสำคัญ และสำคัญมากที่สุด คำว่า "size" ของผงหรืออนุภาคเป็นการบ่งบอกถึง "ขนาด" มักใช้ในการจำแนกจัดหมวดหมู่ หรือระบุลักษณะของผง การประชุมสามัญพิจารณาว่าสำหรับวัสดุอนุภาคจะถือว่าเป็นผง ขนาดมัชฐานโดยประมาณควรมีน้อยกว่า 1.0 มม. (50 % ของวัสดุมีขนาดเล็กกว่าขนาดกลาง และ 50 % มีขนาดใหญ่) นอกจากนี้ยังกล่าวถึง "ความละเอียด (Fine)" และ "ความหยาบ (Coarse)" สำหรับผง (power) มีความพยายามในการสร้างมาตรฐานการจำแนกอนุภาคในบางผลิตภัณฑ์ ตามตารางที่ 2.1 แสดงขนาดของอนุภาคตามขนาดของตะแกรง ซึ่งกำหนดโดย British Pharmacopoeia referring to standard อนุภาคหยาบอาจวัด

ในหน่วยเซนติเมตร หรือมิลลิเมตร อนุภาคละเอียดถึงละเอียดมากวัดในหน่วยไมโครเมตร หรือนาโนเมตร เนื่องจากข้อเสนอแนะขององค์การระหว่างประเทศ เพื่อการมาตรฐาน (ISO) หน่วย SI ได้รับการรับรองในหลายประเทศ ดังนั้นขนาดอนุภาคอาจแสดงเป็นเมตรเมื่อทำการคำนวณทางวิศวกรรม หรือในหน่วยไมโครเมตร โดยจำแนกตามช่วงเล็ก ๆ ที่ครอบคลุมไปตามปกติ หรือเมื่อสร้างกราฟ ความมีนัยสำคัญจำนวนของอาหารผง อาจได้รับการพิจารณาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม บางค่ามัธยฐานของขนาดทั่วไปของสินค้าโภคภัณฑ์อาหารแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขนาดทั่วไปของสินค้าโภคภัณฑ์อาหาร

Commodity	B.S.mesh	Microns
Rice and barley grains	6-8	2,800-2,000
Granulated sugar	30-34	500-355
Table salt	52-72	300-210
Cocoa	200-300	75-53
Icing sugar	350	45

ที่มา : (British Pharmacopoeia referring to standard, 2000)

2.3.2 ลักษณะของเม็ดแป้ง

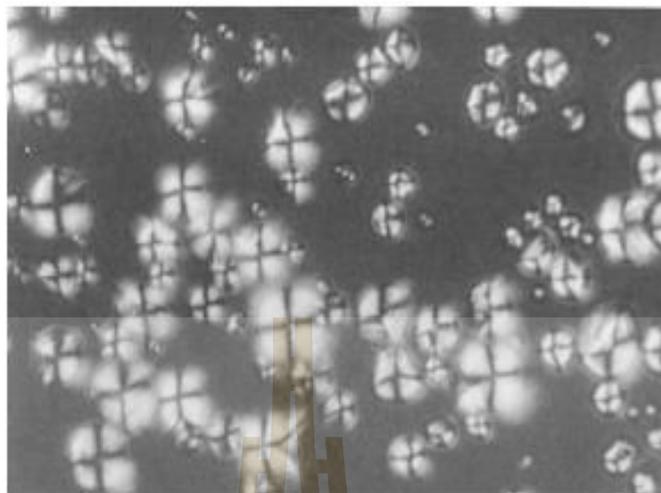
แป้งที่พบทั่วไปในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ขนาดเล็ก เมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน พบว่าเม็ดแป้งมีขนาดรูปร่าง และลักษณะที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ

แหล่งแป้ง	ขนาด (ไมโครเมตร)	รูปร่าง
ข้าวสาลี	2-35	กลม ก่อนข้างรี
ข้าวโพด	5-25	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม รูปร่างคล้ายแท่ง
ข้าวเจ้า	3-5	แบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวบาร์เลย์	2-35	กลม คล้ายโซ่
ข้าวฟ่าง	15-35	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวโอ๊ต	5-8	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
ข้าวไรน์	10-50	กลม ก่อนข้างรี
ลูกเดือย	8-20	กลมแบน มีหลายเหลี่ยม
Triticale	2-35	กลม ก่อนข้างรี
มันฝรั่ง	15-121	กลม รูปไข่วงคล้ายเปลือกหอย
มันสำปะหลัง	5-35	กลม คล้ายไข่มีรอยตัด
ท้าวขาม่อม	13-70	รูปไข่
สาเก	15-65	รูปไข่มีรอยตัด

ที่มา : (Maningat and Seib, 2006)

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของแป้ง คือ เม็ดแป้งจะมีโครงสร้าง หรือลักษณะที่เรียกว่า ไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ตามรูปที่ 2.4 ซึ่งมีความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ และเกิดเงากากบาทภายใต้แสงโพลาไรซ์ จุดตัดของกากบาทจะตัดกันที่ตำแหน่ง hilum ของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพคติน จะเรียงตัวกันในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดแป้ง เมื่อส่องดูเม็ดแป้งภายใต้แสงโพลาไรซ์พื้นที่มืดภายในเม็ดแป้งจะเป็นตำแหน่งเฉลี่ยของสายพอลิเมอร์ เมื่ออยู่ในลักษณะตั้งฉาก หรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ แต่เนื่องจากพื้นผิวของเม็ดแป้งเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจะมีสายพอลิเมอร์บางสายที่ไม่อยู่ในลักษณะตั้งฉากหรือขนานกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ทำให้สามารถบิดระนาบแสง และเห็นการส่องสว่างของแสงผ่านทาง nicol prism ตัวที่สอง ความเข้มของไบรีฟรินเจนซ์ขึ้นอยู่กับความหนาของเม็ดแป้ง จำนวน และการจัดเรียงตัวของ crystallite



รูปที่ 2.4 ลักษณะการบิเคราะห์แสงโพลาไรซ์หรือไบรีฟรินเจนซ์ของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

2.3.3 ลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง

เนื่องจากเม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็น semi-crystalline คือ มีทั้งส่วนที่เป็นผลึก และส่วนที่เป็นอสัณฐาน เมื่อสายพอลิเมอร์มาเรียงขนานกันจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายอะไมโลส 2 สาย โดยตรง หรือเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายอะไมโลสผ่านน้ำ (hydrate bridge) เกิดเป็นพื้นที่ส่วนที่เรียกว่าผลึก หรือ micelle ส่วนที่เป็นผลึกนี้เกิดจากอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลในหลาย ๆ micelle เชื่อมกันเป็นร่างแหสามมิติด้วยพันธะไฮโดรเจน ความแข็งแรงของร่างแหขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลที่มาเชื่อมต่อกัน และการจัดเรียงโมเลกุลของเม็ดแป้ง กล่าวได้ว่า ผลึกเกิดจากการเรียงตัวของเกลียวอะไมโลเพคตินที่วางขนานกัน ซึ่งในการศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างผลึกของแป้ง จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer เป็นเครื่องมือวิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่าง เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมใน โมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ โดยอาศัยการเลี้ยวเบน การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก โดยทั่วไป เม็ดแป้งในธรรมชาติ (Native starch) จะมีรูปแบบของ X-ray diffraction เป็น 4 ลักษณะ ดังนี้ Hizukuri (1986)

- 1) A - type ส่วนใหญ่แป้งชนิดนี้มักจะมี ความยาวสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพคตินสั้น (short branch chain length) เป็นแป้งที่มาจากธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด และข้าวสาลี
- 2) B - type แป้งกลุ่มนี้มีความยาวสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพคตินยาว เป็นแป้งจากราก และหัว เช่น มันฝรั่ง พุทธรักษา และทิวลิป รวมทั้ง amylo maize ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสมากกว่า 40 – 45 %

3) C - type มีลักษณะ X - ray pattern ที่ผสมระหว่าง A - type และ B - type เช่น แป้งจากมันสำปะหลัง แป้งจากถั่วชนิดต่าง ๆ

4) V - type ได้แก่ แป้งที่มีลักษณะเพิ่มจาก A - type และ B - type ได้จากสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้ว Zobel (1964)

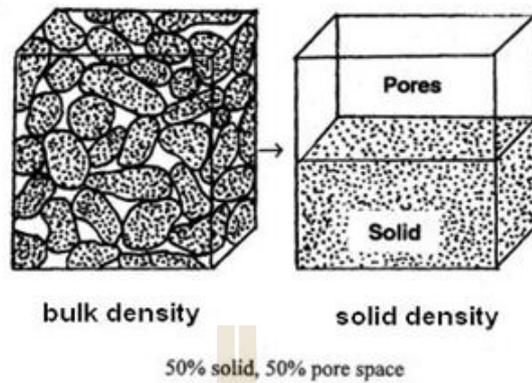
ในแป้งดิบ เม็ดแป้งจะมีโครงสร้างเป็นแบบ semi - crystalline คือ มีส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน โดยสายโพลีเมอร์ของกลูโคสในส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพคติน จะสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นผลึกที่มีความแข็งแรง ลักษณะเช่นนี้ของเม็ดแป้งจะทำให้เอนไซม์ย่อยแป้งได้น้อยลง โดยแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ซึ่งเป็นแป้งที่มีลักษณะผลึกภายในเป็นแบบ A - type พบว่า มีรู หรือช่องรอบ ๆ เม็ดแป้ง ซึ่งทำให้เอนไซม์สามารถแทรกผ่านเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้ และเกิดการย่อยของแป้งจากภายในสู่ภายนอก Benmoussa และคณะ (2006), Fannon และคณะ (1992)

ในขณะที่แป้งมันฝรั่ง และแป้งที่มีลักษณะผลึกภายในเป็นแบบ B - type พบว่าส่วนใหญ่เม็ดแป้งจะถูกย่อยจากผิวด้านนอกเข้าสู่ด้านใน Gallant และคณะ (1997) ดังนั้นแป้งที่ได้จากธัญพืชจึงมักจะถูกย่อยได้ง่ายกว่าแป้งที่สกัดจากหัว (tuber) Jane และคณะ (1997) Srichuwong และคณะ (2005) และ Zhang และคณะ (2006) รายงานว่า แป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A - type จะถูกย่อยได้ง่ายกว่า แป้งชนิด B - type

2.4 ความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง (Bulk density)

2.4.1 นิยาม และความหมาย

ความหนาแน่นรวม (bulk density) เป็นสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของวัสดุ หมายถึง ความหนาแน่น (density) ของวัสดุปริมาณมวล (bulk material) เช่น แป้ง (flour) สตาร์ช (starch) เมล็ดธัญพืช (cereal grain) กาแฟผง นมผง อาหารสัตว์ ขนมอบบี้ และลูกกวาด เป็นต้น ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่รวมช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุด้วย ต่างจากความหนาแน่นเนื้อ (solid density) ซึ่งเป็นความหนาแน่นของชิ้นวัสดุแต่ละชิ้น และจะไม่รวมช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ วัสดุนิดเดียวกันอาจพิจารณาความหนาแน่นเป็นความหนาแน่นเนื้อ (solid density) และความหนาแน่นรวม (bulk density) เช่น การวัดความหนาแน่นของมันฝรั่งแต่ละหัว ได้ค่าเป็น solid density แต่หากวัดความหนาแน่นของมันฝรั่งขณะกองอยู่ หรืออยู่ในถังเก็บ จะได้ค่าเป็น bulk density เป็นต้น ดังนั้นความหนาแน่นรวมจะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นเนื้อเสมอ แสดงตามรูปที่ 2.5



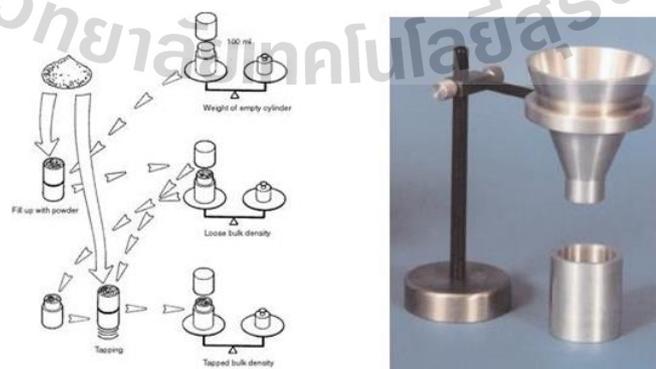
รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นเนื้อ

ความหนาแน่นรวม คำนวณได้จาก มวล (mass) ของวัสดุหารด้วยปริมาตร (volume) ของวัสดุ ซึ่งรวมช่องว่าง (pore) ระหว่างวัสดุด้วย ตามสมการที่ 2.1

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.1)$$

2.4.2 การหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density)

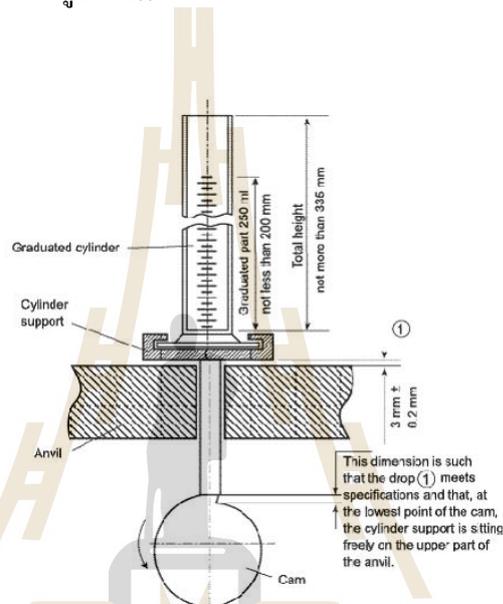
การหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density) ทำได้โดยการบรรจุวัสดุลงในภาชนะที่ทราบปริมาตร เพื่อลดความผิดพลาดควรใช้ภาชนะขนาดใหญ่พอสมควร เช่น ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปชั่ง ปาด หรือเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการหาค่าความหนาแน่นรวม ได้แก่ ความชื้นของวัสดุ (moisture content) ความสูงของระดับที่เทวัสดุลงในภาชนะ การอัดแน่นซึ่งขึ้นอยู่กับวัสดุประสงค์ การนำไปใช้งาน การบอกรูวิธีการ และสถานะที่วัดค่ากำกับไว้ด้วย ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์สำหรับหาค่าความหนาแน่นรวม (Bulk density)

2.4.3 การหาค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density)

การหาค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) ทำได้โดยการบรรจุวัสดุลงในเครื่องมือวัดความหนาแน่นแบบเคาะ (Tapped density tester) หลักการ คือ ต้องการค่าความหนาแน่นรวมที่มีการอัดตัวภายในระยะเวลาที่กำหนดด้วยการกระแทก ซึ่งค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะจะมีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นรวมเสมอ โดยเครื่องมือวัดความหนาแน่นแบบเคาะ (Tapped density tester) แสดงตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพของเครื่องมือวัดความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density)

(ASTM D6393 : Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices, 2008)

2.4.4 ความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง (Bulk density)

จากการศึกษาข้อมูลของหนังสือ FOOD POWDERS : Physical Properties Processing and Functionality (2005) พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง มีค่าอยู่ระหว่าง 690 - 810 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของแป้งชนิดต่าง ๆ

Powder	Moisture (%)	Poured bulk density (kg/L)	Compressibility	Cohesion (g/cm ²)
Glass beads(175u)	Dry	1.72	0	0
	1.0	1.20	0.23	15
Powder salt (100/200 mesh)	Dry	1.26	0.02	0
	0.6	0.78	0.12	50
Powdered sucrose (60/80 mesh)	Dry	0.62	0.152	10
	0.1	0.50	0.185	14
Starch	Dry	0.81	0.12	6
	18.5	0.69	0.15	13
Powdered onion (80/120 mesh)	Dry	0.51	0.03	5
	5.2	0.51	0.05	15
Baby formula (commercial)	Dry	0.52	0.08	37
	2.4	0.41	0.08	Too cohesive
Coffee creamer (commercial)	Dry	0.46	0.19	49
	7.0	0.45	0.05	32
Active dry	5.2	0.52	0.05	0
Baker's yeast	8.4	0.52	0.058	14
	13.0	0.49	0.26	Too cohesive

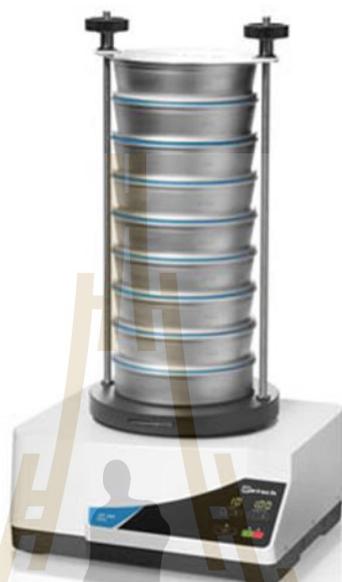
ที่มา : (FOOD POWDERS : Physical Properties Processing and Functionality, 2005)

2.5 การคัดขนาดผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis)

2.5.1 นิยามและความหมาย

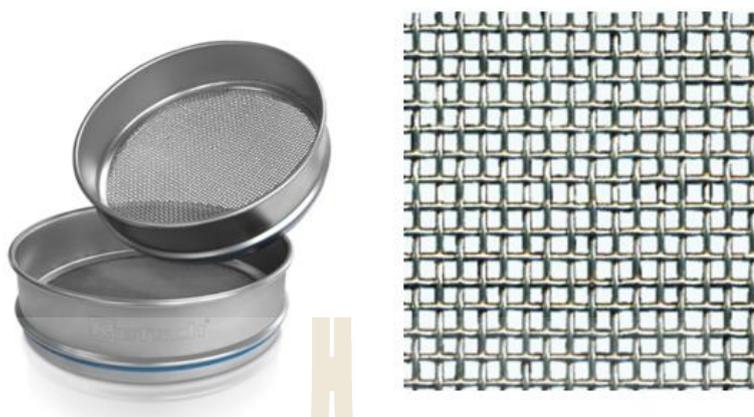
การคัดขนาดผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) คือ วิธีการวิเคราะห์หาค่าของอนุภาคของแข็งหรือความละเอียด (fineness) โดยการร่อนผ่านของแข็งที่ทราบน้ำหนักบนชุด

ตะแกรงทดสอบ (test sieves) ซึ่งมีช่องขนาดต่าง ๆ กัน โดยจัดเรียงตะแกรงตามลำดับช่องที่ต้องการ ตะแกรงเหล่านี้อาจติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้ตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องร่อนเม็ดแป้ง (Sieve analysis) (RETSCH,2015)

ช่องบนตะแกรง (sieve) เกิดจากการนำลวดขนาดต่างกันมาสานเป็นช่อง และบอกความกว้างของช่องตะแกรงเป็นเมช (mesh) ซึ่งหมายถึง จำนวนช่องของตะแกรงที่มีอยู่ในความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงขนาด 10 เมช ในความยาว 1 นิ้ว จะมีช่องอยู่ 10 ช่อง และช่องหนึ่งจะมีความยาวกว้าง 0.1 นิ้ว หักออกด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด ดังนั้น เมชขนาดเดียวกัน อาจแตกต่างกัน ถ้าทำจากเส้นลวดที่ต่างกันจึงต้องบอกขนาดช่องหรือ aperture size ควบคู่กับขนาดเมชของตะแกรงด้วย ตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขนาดของช่องตะแกรง (RETSCH,2015)

ตะแกรงมาตรฐานที่นิยมใช้ ประกอบด้วย

- 1) ตะแกรงแบบอังกฤษ (British standard)
- 2) ตะแกรงแบบไทเลอร์ (Tyler standard)
- 3) ตะแกรงแบบอเมริกัน (ASTM)

โดยในเมชเบอร์เดียวกันของตะแกรงมาตรฐานแต่ละแบบอาจจะมีขนาดของช่อง (aperture size) ที่ต่างกันก็ได้ ตัวอย่างเช่น ตะแกรงขนาดเมช 10 แบบไทเลอร์มีขนาดช่อง 0.147 มิลลิเมตร แบบอังกฤษมีขนาดช่อง 0.152 มิลลิเมตร และแบบอเมริกันมีขนาดช่อง 0.149 มิลลิเมตร ดังนั้นในตะแกรงมาตรฐานทุกแบบจะต้องแสดงรายละเอียด ทั้งขนาดเมช และขนาดช่องในแผ่นป้ายด้านข้างตะแกรง

การคัดขนาดผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) ทำได้ 2 วิธี คือ แบบแห้ง (dry) และแบบใช้น้ำช่วย (wet) ซึ่งจะเติมน้ำลงไปเพื่อช่วยให้ของแข็งที่มีขนาดเล็กลอดผ่านช่องตะแกรงได้ดีกว่าแบบแห้ง

ของแข็งที่มีขนาดใหญ่เกินขนาด (oversize) จะค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนของแข็งที่เล็กเกินขนาด (undersize) จะลอดผ่านช่องตะแกรงไปได้ การใช้เครื่องมือช่วยให้ตะแกรงเคลื่อนไหว หรือสั่น (sieve shaker) จะช่วยให้การร่อนมีประสิทธิภาพดีขึ้น และในเวลาที่น้อยลง แต่จะต้องไม่ใช้ตัวอย่างมากเกินไปในการทดลองแต่ละครั้งหนึ่ง เพราะจะทำให้ของแข็งไปอุดตันตามช่อง หรืออาจทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตย์และของแข็งรวมตัวเป็นก้อนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดไปและความชื้นในของแข็งต้องทำให้มีน้อยที่สุด ขนาดของตะแกรงที่ใช้เปรียบเทียบระหว่าง U.S. mesh กับ Micron ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบขนาดตะแกรง U.S.MESH กับ MICRONS

U.S.MESH	INCHES	MICRONS	MILLIMETERS
3	0.2650	6730	6.730
4	0.1870	4760	4.760
5	0.1570	4000	4.000
6	0.1320	3360	3.360
7	0.1110	2830	2.830
8	0.0937	2380	2.380
10	0.0787	2000	2.000
12	0.0661	1680	1.680
14	0.0555	1410	1.410
16	0.0469	1190	1.190
18	0.0394	1000	1.000
20	0.0331	841	0.841
25	0.0280	707	0.707
30	0.0232	595	0.595
35	0.0197	500	0.500
40	0.0165	400	0.400
45	0.0138	354	0.354
50	0.0117	297	0.297
60	0.0098	250	0.250
70	0.0083	210	0.210
80	0.0070	177	0.177
100	0.0059	149	0.149
120	0.0049	125	0.125
140	0.0041	105	0.105
170	0.0035	88	0.088
200	0.0029	74	0.074
230	0.0024	63	0.063
270	0.0021	53	0.053
325	0.0017	44	0.044
400	0.0015	37	0.037

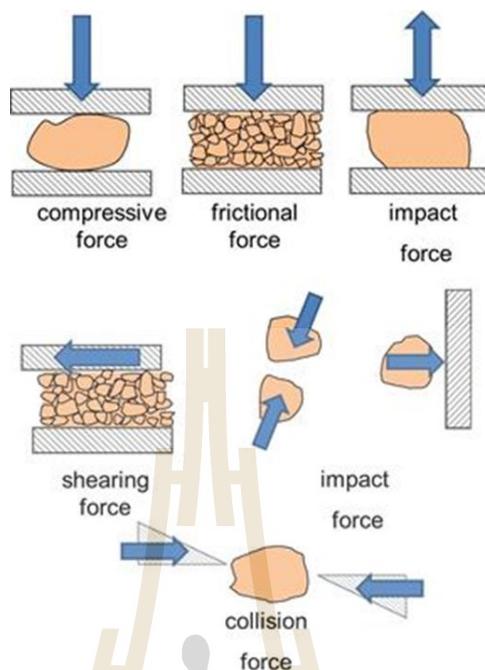
ที่มา : (ASTM E11-17, ISO 565-1990 and ISO 3310-1:2016 sieve specifications., 2016)

2.6 ทฤษฎีการลดขนาดอนุภาคของวัสดุ

2.6.1 นิยามและความหมาย

การลดขนาด ภาษาอังกฤษนิยมใช้คำว่า “Comminution” ซึ่งนอกจากจะหมายถึง การลดขนาด (size reduction) และยังมีจุดประสงค์อีก 2 ประการ คือ เพื่อผลิตอนุภาคขนาด หรือช่วงขนาดที่ต้องการ และทำให้วัสดุแตกออกจากกัน การลดขนาดเป็นกระบวนการที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การแต่งแร่ การทำซีเมนต์ หลักการของการลดขนาดมีการพิจารณาในเชิงวิทยาศาสตร์ เพื่อให้เกิดความรู้ที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับกลไกที่เกิดขึ้นในการลดขนาด และเป็นประโยชน์ในการออกแบบอุปกรณ์

โดยภาพรวมสามารถทำให้ของแข็งมีขนาดเล็กลงได้โดยการกดอัด (compression) การเฉือน (shear) การฟาดกระทบ (impact) การถู (attrition หรือ rubbing) หรือการตัด (cutting หรือ tearing) แสดงตามรูปที่ 2.10 ซึ่งแต่ละวิธีสามารถใช้ได้ในข้อจำกัดต่าง ๆ กันการกดอัดการฟาดกระทบ หรือการเฉือน สามารถใช้ได้ผลกับวัสดุที่เปราะ เช่น ถ่านหิน และสินแร่ต่าง ๆ ในขณะที่วัสดุจำพวกเส้นใย เช่น ไม้ หรือใยแก้ว ต้องใช้วิธีตัด เป็นต้น ในกระบวนการลดขนาดก่อนของแข็งมักจะถูกดบเป็นชิ้น โดยให้กระทบกับตัวกลางการบด (grinding media) ซึ่งอาจเป็นลูกเหล็กกล้า หรือแท่งเหล็กกล้า หรือให้กระทบกันระหว่างอนุภาคด้วยกันเอง หรือกับส่วนที่เคลื่อนไหวของเครื่องบดในขณะที่ขนาดวัสดุเล็กลง และจำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นจำนวนครั้งการชนต่อหน่วยมวล จึงต้องเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดการลดขนาดต่อไปได้ ความจุของเครื่องลดขนาด จึงต้องลดลงหากต้องการอนุภาคขนาดเล็กวัสดุต้องอยู่ในเครื่องเป็นเวลานาน และต้องมีจำนวนครั้งการชนสูงในอุตสาหกรรม การลดขนาดจึงมีหลายขั้นตอนอย่างน้อย 3 ขั้นตอนได้แก่ การบดหยาบ (ใช้กับวัสดุขนาด 50 - 250 mm) การบดขั้นกลาง (ใช้กับวัสดุขนาด 25 - 75 mm) และการบดละเอียด (ใช้กับวัสดุขนาด 5 - 15 mm)



รูปที่ 2.10 วิธีการลดขนาดอนุภาคของวัสดุ (Attila Devay , 2013)

2.6.2 ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อการลดขนาด

1) สมบัติของวัสดุ ได้แก่ ความแข็งความทนแรงฟาดกระทบความเป็นผลึก และอื่น ๆ ล้วนมีผลต่อความสามารถในการบด เช่น ความแข็งของหินแร่ โดยทั่วไปจะวัดด้วยสเกลโมร์ (Mohr scale) ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ วัสดุอ่อน (เลขสเกลโมร์ 1 - 3) เช่น talc ยิปซัม (gypsum) และอื่น ๆ กลุ่มที่สอง คือ วัสดุแข็งปานกลาง (เลขสเกลโมร์ 4 - 6) เช่น หินปูน (limestone) แมกนีไตต์ (magnetite) เฟลสปาร์ (feldspar) อิลมานไนต์ (ilmanite) และอื่น ๆ ส่วนกลุ่มที่สาม คือ กลุ่มวัสดุแข็ง (เลขสเกลโมร์ > 7) เช่น เพชร (diamond) แซปไฟร์ (sapphire) และควอตซ์ (quartz) ความทนแรงฟาดกระทบจะผกผันกับความเปราะ สิ่งที่ควรระวัง เพราะมักเกิดความเข้าใจผิด คือ วัสดุแข็งไม่ใช่วัสดุที่ทนแรงฟาดกระทบได้ดีเสมอไป เช่น ยิปซัม หรือพลาสติก เป็นวัสดุอ่อน แต่ทนแรงฟาดกระทบสูง ในขณะที่ถ่านเป็นวัสดุที่ทั้งอ่อน และเปราะ เป็นต้น วัสดุต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างผลึก และมีระนาบแตกเรียบ (cleavage) จะเกิดการแตกร้าวง่าย โดยแนวการแตกร้าวที่เกิดขึ้นกับวัสดุเหล่านี้ จะเกิดบนระนาบ อะตอมแตกต่างกันรูปร่างของวัสดุ หลังจากแตกร้าว จึงมีสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึก เช่น กาลีนา (galena) จะแตกในลักษณะที่เป็นลูกบาศก์ไมกา (mica) จะแตกเป็นแผ่นบาง และแมกนีไตต์ (magnetite) จะแตกเป็นทรงกลมส่วนวัสดุที่เป็นเส้นใย เช่น ไม้ และใยแก้ว ซึ่งไม่มีโครงสร้างผลึก และไม่มีระนาบแตกเรียบจึงเกิดการแตกร้าวยาก

2) ความชื้น หากในหิน หรือแร่มีความชื้นมากกว่า 3 – 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (binding agent) ทำให้เกิดการจับตัวของอนุภาค และขัดขวางการบดของเครื่องบด ดังนั้นวัสดุเหล่านี้ จึงควรมีความชื้นต่ำกว่า 3 - 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม หากมีปริมาณน้ำผสมอยู่กับอนุภาคของแข็งมากเกินไปเกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอนุภาคจะกระจายตัวในน้ำ และทำให้การบดสะดวกขึ้นได้ซึ่งเรียกว่า การบดเปียก (wet grinding) ซึ่งจะนิยมใช้ในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ในรูปสารแขวนลอย (suspension) หรือสารเหลวข้น (slurry)

3) อัตราส่วนการลดขนาด (Reductive Ratio, RR) นิยามว่าเป็น อัตราส่วนของขนาดเฉลี่ยของสารป้อน (dF) ต่อขนาดเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ (dP) ซึ่งแสดงตามสมการที่ 3.2 นั่นคือ

$$(RR) = \left[\frac{d_F}{d_P} \right] \quad (3.2)$$

ค่า RR สำหรับเครื่องบดหยาบ จะอยู่ในช่วง 3 - 7 เท่า แต่ในเครื่องบด อาจสูงถึง 100 เท่าก็ได้

4) วิธีการและกระบวนการบดวัสดุที่มีการดึงเอาผลิตภัณฑ์ออกอย่างต่อเนื่อง เรียกว่า การบดอิสระ (Free crushing) ในการดึงเอาผลิตภัณฑ์ออกอาจอาศัยแรงโน้มถ่วง อากาศอัด หรือระบบนิวแมติก ระบบไฮดรอลิก หรือแรงเหวี่ยง เครื่องบดแบบนี้จะมีความจุมาก และใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กในปริมาณมาก ในทางตรงกันข้าม เครื่องบดที่มีการป้อนจากถังพัก (hopper) จะไม่มีการดึงผลิตภัณฑ์ออกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกการป้อนแบบนี้ว่า Choke feeding เครื่องบดแบบนี้มีความจุต่ำ และใช้ในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กในปริมาณมาก

5) การใช้พลังงาน (power consumption) เป็นดั่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องบด และเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ต้องพิจารณาในการบด หรือการลดขนาดเมื่ออนุภาคมีขนาดลดลงพื้นที่ผิวจำเพาะ (พื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยมวล) จะเพิ่มขึ้น จึงกล่าวได้ว่า การลดขนาด คือ การเพิ่มพื้นที่ผิว อย่างไรก็ตามในพลังงานทั้งหมดที่ให้กับเครื่องบด มีเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ใช้ไปในการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุ อีกส่วนหนึ่งจะใช้ไปเพื่อเอาชนะความเฉื่อย ความฝืด หรือแรงเสียดทานในส่วนที่ต้องเคลื่อนไหวนของเครื่องบด เช่น ในตลับลูกปืน (bearing) และใช้ไปกับสิ่งที่เรียกว่า การเคลื่อนไหวนสูญเปล่า (inefficient blows) ซึ่งเป็นการเคลื่อนไหวนที่ไม่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวเพิ่ม ส่วนที่เหลือของพลังงานจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจึงนิยามได้ว่า คือ สัดส่วนของพลังงานที่ใช้ไปเพื่อสร้างพื้นที่ผิวต่อพลังงานที่ให้กับเครื่องบดทั้งหมด ซึ่งปกติเครื่องบดที่ใช้กันทั่วไปจะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ นักคิดหลายคนได้เสนอวิธีการประมาณค่าพลังงานที่จะใช้ในการบด หรืออีกนัยหนึ่ง ก็คือ พลังงานเพื่อสร้างพื้นที่ผิว

ใหม่ สมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่มีการนำเสนอ ก็มีข้อสมมติฐานต่าง ๆ กัน บางสมการไม่ได้คำนึงถึงการสูญเสียเชิงกล และทุกความสัมพันธ์ที่มีอยู่ไม่ได้คำนึงถึงการเคลื่อนไหวสูญเปล่า (inefficient blows) สมการที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ แก่กฎของคิก (Kick) กฎของริททิงเจอร์ (Rittinger) และกฎของบอนด์ (Bond)

2.6.3 กฎของคิก (Kick)

กฎของคิก แต่เดิมไม่ได้ใช้สำหรับการลดขนาด แต่ใช้กับการเสีรูปลถารของของแข็ง โดยมีสมมติฐานว่า "พลังงานที่ใช้เพื่อการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะของวัตถุที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกันจะแปรผันตามปริมาตรหรือมวลของวัตถุนั้น" สมมติฐานดังกล่าวยังคงเป็นอยู่จริงในกรณีที่ทำให้วัตถุเกิดการเสีรูปลถารจนมีรูปร่างเปลี่ยนไปหรือพื้นที่ผิวเปลี่ยนแปลง แต่ในกรณีการบดซึ่งวัตถุนั้นใหญ่ไม่ได้เสีรูปลถาร แต่แตกย่อยลงเป็นชิ้นเล็ก ๆ และมีพื้นที่ผิวใหม่เกิดขึ้น สมมติฐานดังกล่าวไม่สามารถใช้ได้

จึงมีการปรับเปลี่ยนสมมติฐานตามแนวคิดของคิกเสียใหม่เพื่อประยุกต์กับงานบดว่า "งานที่ต้องใช้ในการบดวัตถุปริมาณหนึ่ง ๆ จะมีค่าคงที่สำหรับอัตราส่วนการลดขนาดหนึ่ง ๆ (reduction ratio, RR) ไม่ว่าวัตถุบดจะมีขนาดเท่าใดก็ตาม" ในเชิงคณิตศาสตร์กฎนี้สามารถเขียนเป็นสมการ ตามสมการที่ 3.3

$$\left(\frac{E}{M}\right) = K_k \log \left[\frac{d_F}{d_P}\right] \quad (3.3)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานที่ต้องใช้เพื่อบดวัตถุมวล M
	M	คือ	มวลของวัตถุ
	K_k	คือ	ค่าคงที่ของคิก
	d_f/d_p	คือ	อัตราส่วนการลดขนาด (RR)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามกฎนี้ พลังงานที่ใช้ในการบดจะแปรผันตามอัตราส่วนการลดขนาดเท่านั้น ไม่ขึ้นกับขนาดเดิมของวัตถุบด ซึ่งไม่เป็นความจริง พลังงานที่ใช้ในการลดขนาดวัตถุเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. เป็นวัตถุนั้นขนาด 50 มม. จะไม่เท่ากับที่ใช้ในการลดขนาดวัตถุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 มม. เป็นวัตถุนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มม. โดยทั่วไปขนาดของวัตถุยิ่งเล็ก ยิ่งต้องการพลังงานมากขึ้นในการลดขนาดให้เล็กลง กฎของคิกจะไม่ผิดพลาดมากนักในการบดหยาบซึ่งวัสดุบดมีขนาดใหญ่ และมีอัตราส่วนการลดขนาดต่ำ

2.6.4 กฎของริททิงเจอร์ (Rittinger)

ริททิงเจอร์ได้เสนอสมมติฐานที่ถูกต้องมากกว่ากฎของคิก คือ "งานที่ต้องใช้ในการลดขนาดวัตถุจะแปรผันตามปริมาณของพื้นที่ผิวที่ถูกสร้างขึ้นใหม่" ในเชิงคณิตศาสตร์เขียนสมการได้ตามสมการที่ 3.4

$$\left(\frac{E}{M}\right) = K_R [S_p - S_f] \quad (3.4)$$

เมื่อ	S_p	คือ	พื้นที่ผิวจำเพาะของผลิตภัณฑ์
	S_f	คือ	พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุป้อน
	K_R	คือ	ค่าคงที่ของริททิงเจอร์

ส่วนกลับของ K_R นิยมเรียกว่า เลขริททิงเจอร์ (Rittinger's Number) ดังนั้นสมการที่ 3.5 อาจเขียนได้อีกแบบว่า

$$\left(\frac{E}{M}\right) = \left[\frac{S_p - S_f}{\text{Rittinger's Number}} \right] \quad (3.5)$$

หรือเลขริททิงเจอร์ตามสมการที่ 3.6

$$(\text{Rittinger's Number}) = \left[\frac{S_p - S_f}{\frac{E}{M}} \right] \quad (3.6)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.6 เลขริททิงเจอร์จึงบ่งบอกถึงพื้นที่ผิวใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นต่อหน่วยงานเชิงกลที่ให้กับวัตถุในการบด ค่าเลขริททิงเจอร์ส่วนมากมาจากการทดสอบการบดด้วยวิธีตุ้มน้ำหนักตกกระทบ (Drop Weight Method) โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานหนัก m ซึ่งปกติจะหนัก 3 กก. ตกกระทบลงบนวัตถุป้อนที่ทราบมวลแน่นอน จากระยะความสูง h ซึ่งปกติมีค่า 0.787 ม. หรือ 31 นิ้ว ดังนั้นสามารถหาค่าพลังงานที่ใช้ในการบด ได้ว่า พลังงานที่ให้กับวัตถุเท่ากับ mgh คุณจำนวนครั้งที่ปล่อยตุ้มกระทบกับวัตถุป้อน

พื้นที่ผิวจำเพาะของผลิตภัณฑ์ และวัตถุป้อนจะถูกวิเคราะห์โดยใช้ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน และเลขริททิงเจอร์สามารถคำนวณจากสมการที่ 3.6 ในทางปฏิบัติจะเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุมวล 100 กรัม โดยให้ตุ้มน้ำหนักตกกระทบ 5, 10, 15 และ 20 ครั้ง แล้วเขียนกราฟระหว่างพื้นที่ผิวที่

เพิ่มขึ้นกับพลังงานที่ให้กับวัตถุ ความชันของกราฟ คือ ค่าเลขริททิงเจอร์ ตัวอย่างเลขริททิงเจอร์ของวัสดุต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เลขริททิงเจอร์ของวัสดุต่างๆ

Material	Rittinger's Number (m ² /J)
Galena	0.09570
Sphalerite	0.05730
Pyrite	0.02303
Quartz	0.01790
Calcite	0.07745

ที่มา : (Rittinger's, 1941)

ยิ่งตัวเลขริททิงเจอร์มีค่าสูง ความสามารถในการบด (grind ability) ก็จะสูงตามไปด้วย ถ้า $\rho d_{vs,P}$ และ $\rho d_{vs,F}$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเชิงปริมาตร - พื้นที่ผิว (volume-surface diameter) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเส้นผ่านศูนย์กลางชอเตอร์ (Sauter diameter) ของผลิตภัณฑ์ และวัตถุดิบ ตามลำดับจากสมการที่ 3.7

$$\zeta = \frac{6}{\rho d_{vs}} \quad (3.7)$$

สามารถเขียนสมการที่ 3.4 ได้ใหม่เป็น

$$\left(\frac{E}{M}\right) = \frac{6K_R}{\rho} \left[\frac{1}{d_{vs,p}} - \frac{1}{d_{vs,F}} \right] \quad (3.8)$$

หรือ

$$\left(\frac{E}{M}\right) = K'_R \left[\frac{1}{d_{vs,p}} - \frac{1}{d_{vs,F}} \right] \quad (3.9)$$

เมื่อ

$$K'_R = \left(\frac{6K_R}{\rho}\right) \quad (3.10)$$

เนื่องจากเลขริททิงเจอร์ หรือค่าคงที่ของริททิงเจอร์ (K_R) ได้จากการทดสอบโดยใช้วิธีต้อน้ำหนักตกกระทบ (Drop Weight Method) การทดสอบแบบนี้ไม่ได้ครอบคลุมถึงผลของการสูญเสียงานเนื่องจากแรงเสียดทาน ความเฉื่อย การเคลื่อนไหวสูญเสียเปล่าและการสูญเสียในรูปความร้อนของเครื่องบดที่ใช้จริง แต่กฎของริททิงเจอร์ก็ใช้ได้ดีกับการบดหยาบและการบดชั้นกลาง

$$\left(\frac{E}{M}\right) = K_b \left[\frac{1}{\sqrt{d_P}} - \frac{1}{\sqrt{d_F}} \right] \quad (3.11)$$

เมื่อ K_b คือ ค่าคงที่ของบอนด์

การใช้ความสัมพันธ์ของบอนด์ ค่าคงที่ของบอนด์ (K_b) หาได้จากค่าที่เรียกว่าดัชนีงาน (Work index, W_i) "ซึ่งนิยามว่าเป็นพลังงานทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในการลดขนาดวัตถุป้อนขนาดใหญ่มากเป็นอนันต์ (∞ , infinity) ให้มีขนาดเล็กลงจนร้อยละ 80 ของผลิตภัณฑ์ลอดผ่านตะแกรงขนาด 0.1 มม." ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองบดวัตถุในเครื่องบดมาตรฐาน ในเชิงคณิตศาสตร์เขียนได้เป็น

$$\left(\frac{E}{M}\right) = W_i \left[\frac{kWh}{ton\ feed} \right] \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.12 โดยพลังงานอยู่ในหน่วย kWh/ton feed และเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในหน่วย มม. จะได้รูปสมการเป็นตามสมการที่ 3.13

$$W_i = \frac{K_b}{a} = \frac{K_b}{\sqrt{0.1}} \quad (3.13)$$

หรือ

$$K_b = aW_i = \sqrt{0.1}W_i = 0.3162W_i \quad (3.14)$$

สิ่งที่ควรระวัง คือ ค่าคงที่ a ในสมการที่ 3.14 ซึ่งค่า a เท่ากับ 0.3162 จะเปลี่ยนแปลงไปตามหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ ดังนั้นสมการที่ 3.13 จะใช้ได้เมื่อแทนค่าพลังงานในหน่วย kWh / Ton feed และเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในหน่วยมิลลิเมตรเท่านั้น

ดังนั้นถ้าร้อยละ 80 ของวัตถุดิบขนาด d_f มม. และร้อยละ 80 ของผลิตภัณฑ์ลอดผ่านตะแกรงขนาด d_p มม. ตามสมการบอนด์ จะได้ว่าตามสมการที่ 3.15 และค่าดัชนีงาน (W_i) ของวัสดุต่าง ๆ แสดงได้ตามตารางที่ 2.6

$$\left(\frac{E}{M}\right) = 0.3162w_i \left[\frac{1}{\sqrt{d_P}} - \frac{1}{\sqrt{d_F}} \right] \quad (3.15)$$

เนื่องจากค่าดัชนีงาน W_i ทดลองหาจากพลังงานทั้งหมดที่ใช้เครื่องบดแบบที่ใกล้เคียงกับที่ใช้จริง จึงครอบคลุมการสูญเสียพลังงานเชิงกลไปแล้ว และถือได้ว่ากฎของบอนด์ได้ครอบคลุมพลังงานทั้งหมดในการบด ต่างจากกฎของริททิงเจอร์ซึ่งครอบคลุมเฉพาะพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิวเท่านั้น ยังไม่รวมพลังงานที่สูญเสียจากการเอาชนะความฝืดของเครื่องและอื่นๆ ดังนั้นกฎของบอนด์จึงใช้ได้ดีสำหรับการบดละเอียด



ตารางที่ 2.6 ค่าดัชนีงาน (W_i) ของวัสดุต่างๆ

Material	No. of tests	Specific gravity	Work index kWh/ton	Material	No. of tests	Specific gravity	Work index kWh/ton
Andesite	6	2.84	22.13	Taconite	66	3.52	14.87
Barite	11	4.28	6.24	Kyanite	4	3.23	18.87
Basalt	10	2.89	20.41	Lead ore	22	3.44	11.40
Bauxite	11	2.38	9.45	Lead-zinc ore	27	3.37	11.35
Cement clinker	60	3.09	13.49	Limestone	119	2.69	11.61
Cement raw material	87	2.67	10.57	Limestone for cement	62	2.68	10.18
Chrome ore	4	4.06	9.60	Manganese ore	15	3.74	12.48
Clay	9	2.23	7.10	Magnesite, dead burned	1	5.22	16.80
Clay, calcined	7	2.32	1.43	Mica	2	2.89	134.50
Coal	10	1.63	11.37	Molybdenum	6	2.70	12.97
Coke	12	1.51	20.70	Nickle ore	11	3.32	11.88
Coke,fluid,petroleum	2	1.63	38.60	Oil shale	9	1.76	18.10
Coke,petroleum	2	1.78	73.80	Phosphate fertilizer	3	2.65	13.03
Copper ore	306	3.02	13.13	Phosphate rock	27	2.66	10.13
Coral	5	2.70	10.16	Potash ore	8	2.37	8.88
Dionite	6	2.78	19.40	Potash salt	3	2.18	8.23
Dolomite	18	2.82	13.31	Pumice	4	1.96	11.93
Emery	4	3.48	58.18	Pyrite ore	4	3.48	8.90
Feldspar	8	2.59	11.67	Pyrrhotite ore	3	4.04	9.57
Ferrochrome	18	6.75	8.87	Quartzite	16	2.71	12.18
Ferromanganese	10	5.91	7.77	Quartz	17	2.64	12.77
Ferrosilicon	15	4.91	12.83	Rutile ore	5	2.84	12.12
Flint	5	2.65	26.16	Sandstone	8	2.68	11.53
Fluorspar	8	2.98	18.45	Shale	13	2.58	16.40
Gabbro	4	2.83	18.45	Silica	7	2.71	13.53
Galena	7	5.39	10.19	Silica sand	17	2.65	16.46
Gamet	3	3.30	12.37	Silicon carbide	7	2.73	26.17
Glass	5	2.58	3.08	Silver ore	6	2.72	17.30
Goeiss	3	2.71	20.13	Sinter	9	3.00	8.77
Gold ore	209	2.86	14.83	Slag	12	2.93	15.76
Granice	74	2.68	14.39	Slag,iron blast furnace	6	2.39	12.16
Graphite	6	1.73	45.03	Slate	5	2.48	13.83
Gravel	42	2.70	25.17	Sodium silicate	3	2.10	13.00
Gypsum rock	5	2.69	8.16	Spodumene ore	7	2.75	13.70
Iimerite	7	4.27	13.11	Syenite	3	2.73	14.90
Iron ore	8	3.96	15.44	Tile	3	2.59	15.53
Hematite	79	3.76	12.68	Tin ore	9	3.94	10.81

ที่มา : (Bond, 1985)

2.7 หลักการทำงานของเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแข็งมันลำปะหลัง

2.7.1 กฎของบอนด์

บอนด์ และคณะ ได้เสนอกฎต่างๆ เพื่อใช้ในการประมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการบด โดยกฎที่ได้รับความนิยมมากเรียกว่า กฎข้อที่ 3 ของบอนด์ (Bond's Third Law) หรือกฎทั่วไป (Universal Law) ซึ่งกล่าวว่า งานทั้งหมดซึ่งให้แก่กลุ่มอนุภาคเนื้อเดียวที่มีน้ำหนักแน่นอนค่าหนึ่ง ส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อการทำให้วัตถุแตก จะเป็นปฏิภาคผกผันกับรากที่สองของขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผลิตภัณฑ์ แปรผันตรงกับความยาวของรอยแตกที่เกิดขึ้น และแปรผันตรงกับรากที่สองของพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นใหม่ ในเชิงคณิตศาสตร์เขียนได้ตามสมการที่ 3.16

$$\left(\frac{E}{M}\right) = k_b \left[\frac{1}{\sqrt{d_P}} - \frac{1}{\sqrt{d_F}} \right] \quad (3.16)$$

เมื่อ K_b คือ ค่าคงที่ของบอนด์

การใช้ความสัมพันธ์ของบอนด์ ค่าคงที่ของบอนด์ (K_b) หาได้จากค่าที่เรียกว่า ดัชนีงาน (Work index, W_i)" ดังนั้นสมการที่ 3.13 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\left(\frac{E}{M}\right) = W_i \left[\frac{1}{\sqrt{d_P}} - \frac{1}{\sqrt{d_F}} \right] \quad (3.17)$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่ต้องใช้เพื่อลดขนาดวัสดุมวล M , (kWh)

M คือ มวลของวัสดุ (Ton)

W_i คือ ดัชนีงาน

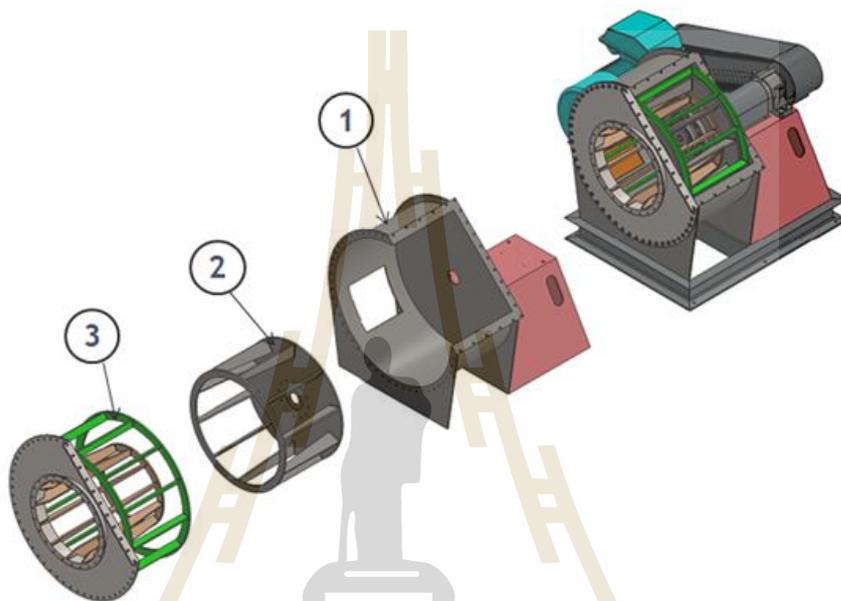
d_P คือ ขนาดของวัตถุหลังลดขนาด (mm)

d_F คือ ขนาดของวัตถุก่อนลดขนาด (mm)

จากข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเม็ดแข็งมันลำปะหลัง ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) พบว่า ร้อยละ 80 ของอนุภาคเม็ดแข็งมันลำปะหลัง มีขนาด 63 ไมครอน โดยต้องการลดขนาดอนุภาคให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25 ไมครอน ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.6 จะได้ค่าพลังงานที่ใช้ต่อตันป้อน เท่ากับ 74.02 W_i (กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันป้อน)

เมื่อทราบค่าพลังงานที่ต้องใช้ในการลดขนาดอนุภาคเม็ดแข็งมันลำปะหลังแล้ว ลำดับต่อไป คือ การออกแบบเครื่องลดขนาด โดยการกำหนดความเร็วปลายใบของใบพัด (Tip speed velocity) ซึ่ง

จากการทบทวนวรรณกรรมของ Venkata S.P. Bitra และคณะ (2009) พบว่าความเร็วปลายใบที่เหมาะสมในการลดขนาดอนุภาคของผงแป้งมีค่าเท่ากับ 80 - 120 เมตรต่อวินาที โดยการทำงานของเครื่องลดขนาด มีการตัดแปลงมาจากเครื่องบด (Pin mill) ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ โครงตัวเครื่อง (Body) ใบพัด (Rotor) และใบอยู่กับที่ (Stator) แสดงตามรูปที่ 2.11

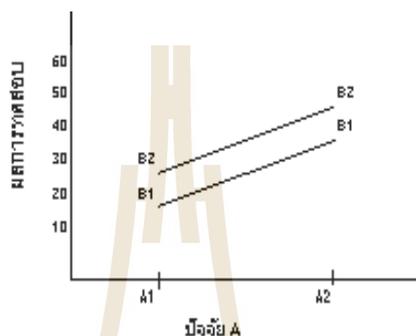


รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

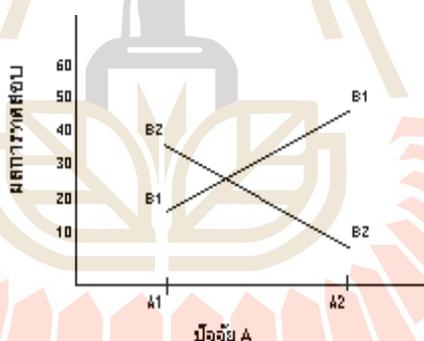
2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล

เป็นการทดลองที่มีลักษณะเฉพาะ คือ ทริทเมนต์ประกอบด้วยการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ทริทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัย ซึ่งเป็นการทดลองที่มีหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 Replicate จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเนื่องจากมีปัจจัย (Factor) มากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย

อิทธิพลของปัจจัยร่วม คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปแล้วมีผลทำให้อิทธิพล (Effect) ของปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่าง การเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม หรือ ปฏิสัมพันธ์ แสดงดังรูป ซึ่งเมื่อไม่มีอิทธิพลของปัจจัยร่วมตามรูปที่ 2.12 และเมื่อมีอิทธิพลของปัจจัยร่วมตามรูปที่ 2.13 โดย A และ B คือ ปัจจัย 2



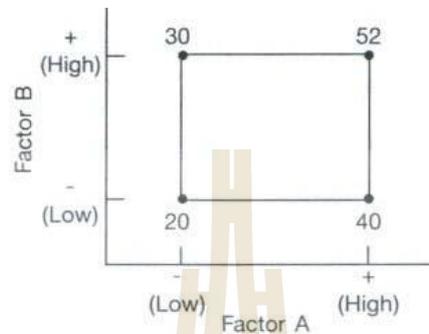
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่ไม่มีผล



รูปที่ 2.13 อิทธิพลของปัจจัยร่วมที่มีผล

การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย คือ A และ B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกจัดให้อยู่ในรูปของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล นั่นคือ ในแต่ละเรพลิเคตของการทดลอง จะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมด ab การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลิเคตทั้งหมด n ครั้ง จากรูปที่ 2.14 เป็นตัวอย่างการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ และสูง โดยถูกแทนด้วยเครื่องหมาย

“-” และ “+” ตามลำดับ ผลหลักของปัจจัย A ในการทดลองนี้ คือ ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ระดับต่ำ และระดับสูงของปัจจัย A ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างแสดงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย

$$A = (40 + 52) / 2 - (20 + 30) / 2 = 21 \quad (3.18)$$

หมายความว่า ในการเพิ่มขึ้นของปัจจัย A จากระดับต่ำไปสู่ระดับสูง จะทำให้ผลตอบเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 21 หน่วย ทำนองเดียวกัน จะสามารถคำนวณหาค่าผลหลักของปัจจัย B ได้ คือ

$$B = (30 + 52) / 2 - (20 + 40) / 2 = 11 \quad (3.19)$$

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่สนใจที่จะศึกษา ซึ่งมีอยู่หลายตัวและจะต้องเข้าใจถึงผลกระทบร่วมกันของปัจจัยเหล่านั้นบนตัวแปรตามที่สนใจอยู่การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับสูง หรือต่ำของปัจจัยเหล่านั้น ใน 1 เวกเตอร์ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ดังนั้น การออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลถ้าหากสนใจศึกษาผลของปัจจัย 2 ปัจจัย จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลองทั้งสิ้น 4 การทดลอง (2^2 , $k=2$ ปัจจัย) เงื่อนไขการทดลอง ตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยและจำนวนเงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

แต่ถ้าจำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษาในการทดลองเพิ่มขึ้น จำนวนเงื่อนไขการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล (2^k) ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษา และจำนวนเงื่อนไขการทดลอง

จำนวนปัจจัยที่สนใจศึกษา (k)	เงื่อนไขการทดลอง
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128
8	256
:	:
K	2^k

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการลดขนาดอนุภาคของวัสดุ

จากการทบทวนวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การศึกษาเรื่องการลดขนาดอนุภาคแป้งมันสำปะหลังมีน้อยมาก หรือแทบไม่มีเลย ส่วนใหญ่จะเน้นเรื่องการนำไปใช้งาน และการละลายน้ำ เพื่อผสมให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการ สำหรับการลดขนาดอนุภาควัสดุจะ

เน้นศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจำพวกหินแร่ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เชื้อเพลิงชีวมวล อาหารสัตว์ และ พืชสมุนไพร เป็นต้น ทั้งนี้จากการสืบค้นพบวารสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับนำมา ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้ดังนี้

Venkata S.P. Bitra และคณะ (2009) ได้ศึกษาเรื่อง การวัดกำลังงานเชิงกลของ เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) เพื่อลดขนาดของหนุ่้าอเมริกา ฟางข้าวสาธิต และซัง ข้าวโพด และวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาควัสดุแต่ละชนิด โดยการป้อนวัสดุเข้าเครื่องที่อัตราการ ป้อนคงที่เท่ากับ 2.5 กิโลกรัมต่อนาที และปรับเปลี่ยนตัวแปรประกอบด้วย ความเร็วรอบที่ 2000, 2400, 2800, 3200 และ 3600 รอบต่อนาที และรูปแบบของใบตีมี 2 แบบ คือ แบบ 90 องศา (dull) และ 30 องศา(sharp) ผ่านตะแกรงขนาดรู 3.2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการวัดค่ากำลังงานที่ใช้ และการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ว่า เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยงมีการใช้ พลังงานสำหรับเดินเครื่องตัวเปล่าเท่ากับ 1.72 กิโลวัตต์ ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที และ 5.06 กิโลวัตต์ ที่ความเร็ว 3500 รอบต่อนาที เพิ่มขึ้น 66 เปอร์เซ็นต์ ในลักษณะเชิงเส้น โค้งตรง ส่วนค่า พลังงานจำเพาะรวม (Total specific energy) ของหนุ่้าอเมริกา ฟางข้าวสาธิต และซังข้าวโพด เพิ่มขึ้น 30, 37 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่ความเร็วรอบ 2000 - 3000 รอบต่อนาที สำหรับใบตีแบบ 90 องศา(dull) และค่าพลังงานจำเพาะรวม (Total specific energy) ของใบตีแบบ 30 องศา (sharp) จะ เพิ่มขึ้นมากกว่าใบตีแบบ 90 องศา (dull) ทั้งนี้ค่าพลังงานจำเพาะรวม (Total specific energy) ที่ เหมาะสมสำหรับหนุ่้าอเมริกา ฟางข้าวสาธิต และซังข้าวโพด คือ 114.4, 125.1 และ 103.7 เมกะวัตต์ ต่อเมกะกรัม ตามลำดับ ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 2.5 กิโลกรัมต่อนาที ขนาดรู ตะแกรง 3.2 มิลลิเมตร ใช้ใบตีแบบ 90 องศา (dull) และค่าพลังงานจำเพาะรวม (Total specific energy) ที่เหมาะสมสำหรับการลดขนาดเท่ากับ 14.9, 19.7 และ 13.5 เมกะวัตต์ต่อเมกะกรัม - มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนการกระจายตัวของอนุภาควัสดุ พบว่า ความเร็วรอบสูงขึ้นจะทำให้อนุภาค ของวัสดุลดลง

Youn Ju Lee และคณะ (2013) ได้ศึกษาเรื่อง ผลกระทบความชื้นในเมล็ดถั่วเหลือง ต่อแรงบด ผลผลิต และคุณภาพของน้ำมันถั่วเหลือง โดยการปรับเปลี่ยนความชื้นของเมล็ดถั่วเหลือง ที่ 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์ และระยะเวลาในการบด (Grinding time) ทำการทดลองด้วยเมล็ดถั่ว เหลืองครั้งละ 100 กรัม ที่ความชื้น 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ผ่านเครื่องบด (Grinder) ขนาด 220 วัตต์ ใช้เวลาในการบด 5, 15, 20, 30, 40, 60, 75, 90, 120 และ 180 วินาที จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 2.0, 1.4, 1.18, 1.06, 0.425, 0.25 และ 0.15 มม.ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดค่าพลังงานที่ใช้บด เทียบกับกฎของคิก (Kick) กฎของริทิงเจอร์ (Rittinger) และกฎของบอนด์(Bond) จากการวิจัยสรุป ได้ว่า ความแข็ง (Hardness) ของเมล็ดถั่วเหลือง จะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นลดลง และการใช้พลังงานจะ ลดลง เมื่อความชื้นลดลง โดยค่าพลังงานที่ใช้ตามกฎของคิก (Kick) จะเท่ากับ 0.182, 0.199 และ

0.219 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตัน ตามกฎของริททิงเจอร์ (Rittinger) เท่ากับ 0.367, 0.469 และ 0.549 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตัน กฎของบอนด์ (Bond) เท่ากับ 0.246, 0.288 และ 0.377 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันกรัม ที่ความชื้น 6, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนระยะเวลาในการบด พบว่าเมื่อใช้เวลาในการบดเพิ่มขึ้น จะทำให้ขนาดอนุภาคของเมล็ดถั่วเหลืองเล็กลง โดยความชื้นต่ำจะบดได้ละเอียดมากกว่าความชื้นสูง และผลผลิตในการสกัดน้ำมันถั่วเหลือง พบว่า ขนาดอนุภาคขนาดเล็กจะทำให้การสกัดน้ำมันทำได้สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

A. D. Srikanth. Tanggirala และคณะ(2014) ได้ศึกษาเรื่อง แบบจำลองการลดขนาด การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค และคุณลักษณะการไหลของผงพะโล้ที่ผ่านเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดลองมี 3 ชนิด ประกอบด้วย ขมิ้นชัน (Turmeric) อบเชย (Cinnamon) และเม็ดผักชี (Coriander) ที่ความชื้นเฉลี่ย 10.22 ± 0.3 เปอร์เซ็นต์แห้ง โดยใช้เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) กำหนดอัตราป้อนวัสดุที่ 2.5 กรัมต่อวินาที ใช้ตัวอย่าง 200 กรัมต่อการทดลอง ใช้เวลาทดลอง 10 นาทีต่อตัวอย่าง และใช้ตะแกรงขนาดรู 354 ไมครอน สำหรับบดผ่านเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และใช้ความเร็วรอบ 1300 รอบต่อนาที จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ด้วยแบบจำลองของ RRSB (Rosin – Rammler – Sperling – benet) และ RR (Rosin – Rammler) สรุปผลการวิจัยได้ว่า แบบจำลองของ RRSB และ RR ใช้ได้ดีในการหาค่าดีกรีของความเป็นแบบเดียวกัน (Degree of uniformity) และค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางสถิติ โดยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) เหมาะสำหรับการบดอบเชย (Cinnamon) และเม็ดผักชี (Coriander) ส่วนเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) เหมาะสำหรับการบดขมิ้นชัน (Turmeric) ทั้งนี้พบว่า ขนาดเฉลี่ยของวัสดุ (Mean size) ค่าดัชนีงานของบอนด์ (Bond's work index) ค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy) และคุณลักษณะการไหลของอบเชย (Cinnamon) และเม็ดผักชี (Coriander) ที่ผ่านเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) มีค่าน้อยกว่าขมิ้นชัน (Turmeric) ที่ผ่านเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ซึ่งการศึกษาดังกล่าวนี้จะช่วยในการตัดสินใจเลือกใช้เครื่องบดที่เหมาะสมกับการบดขมิ้นชัน (Turmeric) อบเชย (Cinnamon) และเม็ดผักชี (Coriander)

Murlidhar meghwal และ T. K Goswami (2014) ได้วิจัยเรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบ ที่บรรยากาศปกติ และการแห้งแข็งของลูกซัด (Fenugreek) และพริกไทยดำ (black pepper) ด้วยเครื่องบดแบบหมุนเหวี่ยง (Rotor mill) เครื่องบดด้วยลูกบอล (Ball mill) เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดลองมี 2 ชนิด คือ ลูกซัด (Fenugreek) และพริกไทยดำ (black pepper) โดยที่บรรยากาศปกติวัสดุมีอุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส และทำการลดอุณหภูมิโดยการแช่เย็นด้วยไนโตรเจนเหลว จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องบดทั้ง 4 แบบ ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วย อัตราการป้อนวัสดุเข้า ระยะเวลาในการ

บด อุณหภูมิของวัสดุ ความเร็วของเครื่องบด เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดขนาด คือ พลังงานจำเพาะ (Specific power consumption) การกระจายตัวของอนุภาค (Sieve size analysis) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) จากการวิจัยสรุปได้ว่า เครื่องบดทั้ง 4 แบบ ใช้งานได้ดีในการทดลอง Lab scale และสามารถประยุกต์ใช้งานใน Large scale ได้ อีกทั้งยังพบว่า อัตราการป้อน การสร้างพื้นผิวใหม่ มีนัยสำคัญมากกว่าเวลาที่ใช้บด และพลังงานจำเพาะ จะมีค่าน้อยเมื่อทำการลดอุณหภูมิ ก่อนการบด ทั้งนี้เครื่องบดที่ใช้งานได้ดีเรียงตามลำดับ ประกอบด้วย ด้วยเครื่องบดแบบหมุนเหวี่ยง (Rotor mill) เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) เครื่องบดด้วยลูกบอล (Ball mill) และเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ส่วนการบดโดยลดอุณหภูมิก่อนจะช่วยในเรื่องของการรักษา Volatile สีของผงแป้ง (powder Color) รวมถึงคงไว้ซึ่ง Hygienic เป็นต้น และในทั้งหมดของเครื่องบด พบว่า เครื่องบดด้วยลูกบอล (Ball mill) มีความเหมาะสมในการบดวัสดุทั้งสองชนิดมากที่สุด

Thirupathihalli Pandurangappa, Krishna Murthy และ Balaraman Manohar (2013) ได้วิจัยเรื่อง กรณีศึกษาการบดขมิ้นขาว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) และพลังงานที่ใช้ (Energy consumption) ซึ่งวัสดุเป็นขมิ้นขาว (Mango ginger) ความชื้น 8 % บดผ่านเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ขนาดรูตะแกรง 3.0, 1.6 และ 0.5 mm. และเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ที่อัตราการป้อน 5.7 kg/hr จากนั้นทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) และพลังงานที่ใช้ ตามสมการทางคณิตศาสตร์ จากการทดลองสรุปได้ว่า ขนาดอนุภาค (Particle size) มีความสำคัญต่อคุณลักษณะของวัสดุที่จำเป็นต่อการหาค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) เพื่อหาวิธีการบดที่เหมาะสม โดยสมการ Rosin Rammer Bennet มีความเหมาะสมในการหาค่าการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size distribution) ทั้งนี้ยังพบว่าขนาดรูตะแกรงของเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ หากรูตะแกรงเล็กลงจะทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้น และเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) มีการลดขนาดอนุภาคได้สูงกว่าเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) แต่ใช้พลังงานในการลดขนาดสูงกว่า

J. S. Tumuluru และคณะ (2013) ได้ศึกษาเรื่อง กำลังงานในการบด และคุณสมบัติทางกายภาพของฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley) ฟางข้าวสาลี (Wheat) ฟางข้าวโอ๊ต (Oat) และชังต้นคาโนลา (canola straws) หลังผ่านเครื่องสับ (Chopped) และเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ซึ่งทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ ความเร็วรอบ และขนาดรูตะแกรง (19.05, 25.4 และ 31.75 mm.) เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหลังการลดขนาด ประกอบด้วย พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ความหนาแน่นรวม (loose bulk density) ความหนาแน่นจำเพาะ (Tapped density) ความหนาแน่นอนุภาค (particle density) ขนาดของอนุภาค (Geometric mean particle size) ค่า Hausner ratio และ Carr index ซึ่งสรุปผลได้ว่า ชังต้นคาโนลา (canola straws) ใช้

พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) ต่ำที่สุด คือ 1.96 kWh/t ที่เครื่องสับ (Chopped) และ 3.94 kWh/t ที่เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ด้วยขนาดรูตะแกรง 19.05 mm. ในขณะที่ ฟางข้าวโอ๊ต (Oat) ฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley) ใช้พลังงานสูงกว่า และค่าการใช้พลังงานจำเพาะ จะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดรูตะแกรงเล็กลง ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหลังการลดขนาด พบว่า ขนาดของอนุภาค (Geometric mean particle size) มีค่า 0.988 - 4.22 mm. ความหนาแน่นรวม (loose bulk density) มีค่า 36 - 80 kg/m³ ความหนาแน่นจำเพาะ (Tapped density) มีค่า 49 - 119 kg/m³ ความหนาแน่นอนุภาค (particle density) มีค่า 600 - 1220 kg/m³ ค่าความพรุน (porosity) มีค่า 0.90 - 0.96 สำหรับฟางข้าวบาร์เลย์ (Barley) ฟางข้าวสาลี (Wheat) ฟางข้าวโอ๊ต (Oat) และซังต้นคาโนลา (canola straws) ตามลำดับ และที่สำคัญ คือ ขนาดของอนุภาค (particle size) มีผลต่อความหนาแน่นรวม (loose bulk density) และความหนาแน่นจำเพาะ (Tapped density) กล่าวคือ หากวัสดุมีขนาดเล็กลง จะทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

Ladan Jafari naimi (2008) ได้ทดลองเกี่ยวกับแบบจำลองการลดขนาดหญ้าอเมริกา (Switchgrass) ในห้องแล็บด้วยเครื่อง Rotary knife mill โดยกำหนดความเร็วของเครื่องไว้คงที่ 1690 รอบต่อนาที และทำการปรับเปลี่ยนขนาดรูตะแกรง ซึ่งรูปแบบรูตะแกรงมี 2 แบบ คือ แบบรูกกลม และแบบช่องสี่เหลี่ยม รวมถึงระยะในการลดขนาด วัสดุที่ผ่านเครื่องแล้วจะทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค และหาค่าพลังงานที่ใช้ จากการทดลองสรุปได้ว่า พลังงานในการใช้จะเพิ่มขึ้นเมื่อต้องการลดขนาดให้มีอนุภาคเล็กลง และเมื่อเพิ่มเวลาในการบดเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลง

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล

ชุตินา ภูมิวนิชชา และคณะ (2550) ได้ศึกษาการพัฒนามะขามป้อมแช่เย็น ด้วยวิธีแฟคทอเรียล 3 x 3 สรุปได้ว่า ในแผนการทดลองแบบสุ่มโดยตลอด (factorial 3 x 3 in CRD) มี 2 ปัจจัยที่ศึกษา คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเนื้อมะขามป้อมแช่เย็น 3 ระดับ (40 : 60, 50 : 50 และ 60 : 40) ปริมาณแป้งสาลีเนกประสงค์ 3 ระดับ (ร้อยละ 3, 6 และ 9 ของปัจจัยที่ศึกษา) ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งสาลีเนกประสงค์มีผลทำให้มะขามป้อมแผ่นมีค่าความสว่าง และความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และพบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเนื้อมะขามป้อมแช่เย็นมีผลต่อคะแนนความชอบในทกคุณลักษณะที่ทำการศึกษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่ออัตราส่วนของน้ำต่อเนื้อมะขามป้อมแช่เย็นมีผลทำให้คะแนนความชอบด้านสี และด้านความสม่ำเสมอของผิวหน้าสูงขึ้น สูตรที่เหมาะสมในการผลิตมะขามป้อมแผ่นที่ทำมาจากมะขามป้อมแช่เย็นมีส่วนประกอบ คือ น้ำ ร้อยละ 34.47 เนื้อมะขามป้อมแช่เย็น ร้อยละ 29.37 แป้งสาลีเนกประสงค์ ร้อยละ 4.08 น้ำตาล ร้อยละ 24.32 กูลโครสไซร์ป ร้อยละ 3.65 เกลือ ร้อยละ 0.46 และน้ำผึ้ง ร้อยละ 3.65 ตามลำดับ

รัตนภรณ์ วงษ์ทอง (2554) ได้ศึกษาเรื่องการทดลองเพื่อประเมินอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อ Artificial aging ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟคชันนัลแฟคทอเรียล ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่า ปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญนอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาอบจริง อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิอบจริง และเวลากับอุณหภูมิอบจริงต่างก็มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และค่าความแข็งแรงในเชิงเส้นโค้งด้วยสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 91.7% และ R^2_{adj} เท่ากับ 90.5 % แสดงว่าโมเดลมีความเหมาะสมสามารถประมาณค่าความแข็งแรงที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 7.64 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95 % และจากการตรวจสอบค่าความผิดพลาด (errors หรือ residuals) พบว่า เป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบการทดลอง คือ มีการแจกแจงแบบปกติ และมีการกระจายตัวเป็นแบบสุ่มสม่ำเสมอที่แต่ละระดับของปัจจัยหลัก นอกจากนั้นจากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังการทดลองพบว่า เป็นไปตามหลักทฤษฎีการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกผลึก

สมศักดิ์ แก้วพลอย และกลยุทธ บุญแข่ง (2554) ได้ศึกษา การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพารา โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมมินิแทปรู่น 16 ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา และการเปิด - ปิดในกระบวนการอบ เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานที่กำหนด การทดลองนี้ใช้ยางพาราขนาดหน้าไม้ 2 นิ้ว ที่ผ่านกระบวนการอัดน้ำยามาแล้ว โดยใช้การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบทั่วไป พบว่า ปัจจัยอุณหภูมิ และเวลาในการอบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากนั้นทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพาราโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์ - เบห์เคน เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าสามารถกำหนดสภาวะในการอบไม้ยางพาราด้วยสมการถดถอย คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น เท่ากับ $343.640 - 0.788A - 42.464B + 1.339B^2 + 0.053AB$ ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้ และกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ในช่วง 8 - 12 %

อรรถกร เก่งพล (2556) ได้ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีศึกษาบริษัทผลิตน้ำอัดลม โดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลการสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเทคนิคพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะเหมาะสมผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าสู่สายการผลิตที่ 3 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของเครื่องบรรจุน้ำอัดลมที่ระดับ 1,300 กระทบต่อนาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเดิมได้ร้อยละ 48.35 สามารถลดต้นทุนการสูญเสีย 390,508 บาทต่อเดือนที่ระดับการผลิตเดียวกัน

ฉัตรพล พิมพา (2558) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการหมุนขึ้นรูปที่ส่งผลต่อความหนาของถ้วยอลูมิเนียม โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน ซึ่งพบว่ามีปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อความหนาของแผ่นโลหะมี 2 ปัจจัยคือ (A) ความเร็วรอบ (B) อัตราป้อน จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวนเพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของชิ้นงานในการขึ้นรูปถ้วยอลูมิเนียม และมีการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางเพื่อตรวจสอบความเป็นส่วนโค้งของแบบจำลอง โดยใช้ระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ ซึ่งผลจากการคัดกรองปัจจัยพบว่าปัจจัยที่ส่งผล คือ (B) อัตราป้อน โดยผลจากการออกแบบการทดลองนั้น สามารถนำแปลงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตทำงานดังนี้ คือ การปรับความเร็วรอบควรปรับระดับต่ำสุดคือ 200 รอบต่อนาที ค่าอัตราการป้อนเป็นระดับสูงคือ 0.7



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ในกระบวนการอบแห้ง ด้วยการติดตั้งเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic flash drying process) ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ชนิดแป้งมันสำปะหลัง รูปแบบใบพัด อัตราการป้อน ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และความเร็วปลายใบพัด โดยปัจจัยเหล่านี้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยในระดับที่มีค่านัยสำคัญทางสถิติ

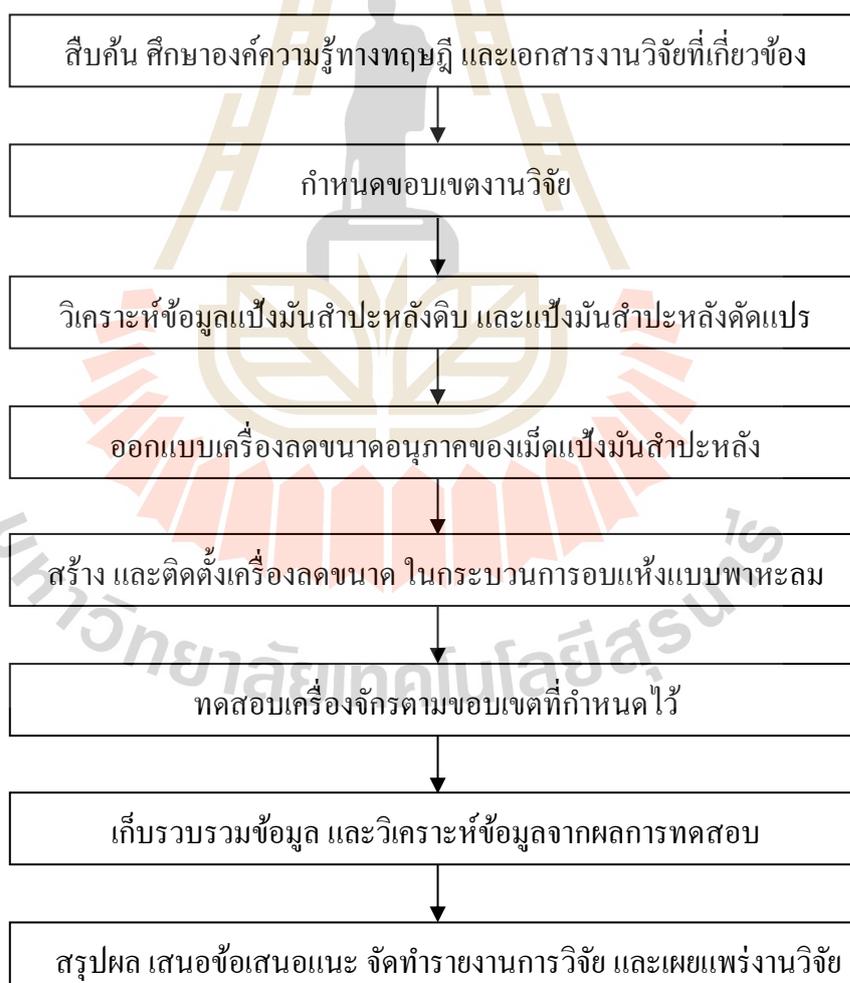
ปัจจัยหลักทั้ง 5 ปัจจัย ได้มีการศึกษาจากนักวิชาการหลายท่าน โดยใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกัน และปรับเปลี่ยนปัจจัยในแต่ละการทดลอง ทั้งนี้การศึกษาของ Venkata S.P. Bitra และคณะ(2008) พบว่าเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยงที่มีรูปแบบของใบตีและความเร็วรอบของใบตีแตกต่างกัน ส่งผลต่อค่าการใช้พลังงาน และการกระจายตัวของอนุภาคหยาบอเมริกา ฟางข้าวสาลี และซังข้าวโพด โดยเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุลดลง ในขณะที่เดียวกันจะทำให้ค่าการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น Youn Ju Lee และคณะ(2013) ได้ศึกษาผลกระทบความชื้นในเมล็ดถั่วเหลืองต่อแรงบด ผลผลิต และคุณภาพของน้ำมันถั่วเหลือง พบว่า ค่าการใช้พลังงานลดลงเมื่อความชื้นลดลง และเวลาที่ใช้บดเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาคของเมล็ดถั่วเหลืองเล็กลง ความชื้นต่ำจะบดได้ละเอียดมากกว่าความชื้นสูง รวมถึงอนุภาคของเมล็ดถั่วเหลืองขนาดเล็กจะทำให้การสกัดน้ำมันทำได้ดีกว่า อนุภาคขนาดใหญ่ J.S. Tumuluru และคณะ (2013) ได้ศึกษาเรื่องกำลังงานในการบด และคุณสมบัติทางกายภาพของฟางข้าวบาร์เลย์ ฟางข้าวสาลี ฟางข้าวไธ้ค และซังต้นคาโนลา หลังผ่านเครื่องสับ และเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง พบว่า ค่าการใช้พลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดรูตะแกรงเล็กลง ที่สำคัญคือ ขนาดของอนุภาคมีผลต่อความหนาแน่นรวม และความหนาแน่นจำเพาะ กล่าวคือ หากขนาดอนุภาคของวัสดุเล็กลงจะทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น Ladan Jafari naimi (2008) ได้ทดลองเกี่ยวกับแบบจำลองการลดขนาดอนุภาคอเมริกาในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องบดแบบใบมีด พบว่า ค่าการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อต้องการลดขนาดให้อนุภาคมีขนาดเล็ก และเมื่อเพิ่มเวลาในการบดเพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของอนุภาคเล็กลงด้วยเช่นกัน

ในบทนี้จะมีเนื้อหาหลัก 5 ส่วน ประกอบด้วย

- 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย
- 3.2 การออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาค
- 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้การทดสอบ
- 3.4 การกำหนดปัจจัย และวิธีการทดสอบ
- 3.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมาย ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนและวางแผนการดำเนินงานวิจัยได้ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

3.2.1 ข้อมูลแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

ก่อนทำการออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง จำเป็นต้องทราบถึงข้อมูลที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องจักร ดังนี้

1. ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง (Tapped bulk density)

ข้อมูลค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ผลิตได้จากโรงงานชัยภูมิ แสดงตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

Parameter	Unit	Native Tapioca Starch	Modified Tapioca Starch
Tapped bulk density	kg/m ³	564.71-573.41	563.04-571.60

2. การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่หาได้ด้วยวิธีตะแกรง

มาตรฐาน (Sieve analysis)

ข้อมูลการกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่หาได้ด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน สำหรับแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ผลิตได้จากโรงงานชัยภูมิ แสดงตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis)

Starch type	Sieve distribution								
	250u	180u	150u	106u	90u	63u	45u	25u	<25u
Native	1.38	2.14	1.45	5.00	3.17	14.69	48.59	20.25	3.34
Modified	0.38	0.94	0.89	2.41	3.02	7.53	44.78	35.968	4.11

3.2.2 เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังถือว่าเป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ เพื่อให้เครื่องลดขนาดอนุภาคสามารถใช้งานได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ จึงจำเป็นต้องออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคให้ถูกต้อง และได้มาตรฐานตามหลักการทางวิศวกรรม โดยผู้วิจัยได้เป็นผู้

คิดค้น และออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคนี้ด้วยตัวเอง ซึ่งการออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคดังกล่าวมีทฤษฎี และการคำนวณทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1) กฎของบอนด์ (Bond's Law)
- 2) รูปแบบของเครื่องลดขนาดอนุภาค
- 3) การคำนวณขนาดฟัดด์มอเตอร์เพื่อใช้งานกับเครื่องลดขนาดอนุภาค
- 4) การออกแบบรูปแบบใบพัด
- 5) การเลือกใช้วัสดุสำหรับทำใบพัดและตัวเครื่อง
- 6) การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของใบพัด

1) กฎของบอนด์ (Bond's Law)

บอนด์ และคณะ ได้เสนอกฎต่าง ๆ เพื่อใช้ในการประมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการบด โดยกฎที่ได้รับความนิยมมากเรียกว่า "กฎข้อที่ 3 ของบอนด์ (Bond's Third Law) หรือกฎทั่วไป (Universal Law) ซึ่งกล่าวว่า "งานทั้งหมดซึ่งให้แก่กลุ่มอนุภาคเนื้อเดียวที่มีน้ำหนักแน่นอนค่าหนึ่ง ส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อการทำให้วัตถุแตกจะเป็นปฏิภาคผกผันกับรากที่สองของขนาดเฉลี่ยของอนุภาคผลิตภัณฑ์ แปรผันตรงกับความยาวของรอยแตกที่เกิดขึ้น และแปรผันตรงกับรากที่สองของพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นใหม่" ในเชิงคณิตศาสตร์เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\left(\frac{E}{M}\right) = w_i \left[\frac{1}{\sqrt{d_P}} - \frac{1}{\sqrt{d_F}} \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานที่ต้องใช้เพื่อลดขนาดวัสดุมวล M, (kWh)
	M	คือ	มวลของวัสดุ (Ton)
	W_i	คือ	ดัชนีงาน
	d_p	คือ	ขนาดของวัตถุหลังลดขนาด (mm)
	d_f	คือ	ขนาดของวัตถุก่อนลดขนาด (mm)

จากข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ด้วยวิธีการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน (Sieve analysis) ตามตารางที่ 3.2 พบว่า ร้อยละ 80 ของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังคัดแปร มีขนาด 45 ไมโครเมตร โดยต้องการลดขนาดอนุภาคให้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25 ไมโครเมตร กำหนดค่า $W_i = 8.0$ และอัตราการบ่อนวัตถุเท่ากับ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นเมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.1 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อตันแป้งดังนี้

$$\left(\frac{kWh}{t}\right) = w_i \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{25}{1000}}} - \frac{1}{\sqrt{\frac{45}{1000}}} \right]$$

จากการคำนวณตามสมการที่ 3.1 ได้ค่าอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 103.07 กิโลวัตต์ และได้ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าตามกฎของบอนด์เท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง

2) รูปแบบของเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

เครื่องลดขนาดอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง เป็นการออกแบบโดยประยุกต์หลักการทำงานของเครื่องบดแบบเข็ม (Pin Mill) และเครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ผสมผสานกับหลักการทำงานของพัลคมเข้าด้วยกัน โดยมีรายละเอียดของเครื่องจักรดังนี้

เครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ตามรูปที่ 3.2 ทำหน้าที่ในการลดขนาดวัตถุดิบเล็ก 100 ไมโครเมตร ให้ลดขนาดเป็นผงฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร ส่วนประกอบหลักของเครื่องมี 2 ส่วน คือ ไบนิ่ง (Fixed pin) และไบหมุน (Rotor pin) สำหรับความเร็วของไบหมุนโดยทั่วไปประมาณ 80 - 160 เมตรต่อวินาที (Loncin and Merson, 1979) โดยทั้งไบนิ่ง และไบหมุนจะมีเข็ม (Pin) ลักษณะเป็นแท่งกลม หรือแท่งเหลี่ยมยึดติดกับแผ่น ซึ่งการออกแบบจำนวนเข็มอาจมีมากกว่าหนึ่งแถว เพื่อทำหน้าที่ในการบดให้เกิดแรงเฉือน และแรงกระทบเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3.2 เครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ยี่ห้อ MUNSON รุ่น CIM-34-SS (MUNSON, 2019)

เครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ตามรูปที่ 3.3 ทำหน้าที่ในการลดขนาดวัตถุที่มีลักษณะเป็นชิ้นหยาบขนาดปานกลางถึงใหญ่ที่ 10 - 50 มิลลิเมตร ให้ลดขนาดเล็กลงหรือละเอียดมากขึ้นที่ 0.1 - 1.0 มิลลิเมตร ส่วนประกอบหลักของเครื่องมี 2 ส่วน คือ ใบสับ (Hammer) และตะแกรง (Grate plate) โดยใบสับติดตั้งบนแกนเพลลาของจานหมุนพร้อมมี Stopper ช่วยในขณะหยุดหมุน ส่วนตะแกรง สามารถปรับเปลี่ยนขนาดของรูได้ตามขนาดวัตถุที่ต้องการลดขนาด หลักการของเครื่อง คือ การตี หรือฟาดกระทบ เพื่อให้อนุภาคเกิดการแตกออก และเมื่อวัตถุเคลื่อนผ่านช่องแคบระหว่างค้อน กับรูตะแกรง จะทำให้ลดขนาดของวัตถุลงได้ ทั้งนี้เครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) จะมีระบบดูดอากาศเพื่อช่วยในการระบายอากาศด้วย โดยทั่วไปความเร็วของจานหมุนประมาณ 40 - 50 เมตรต่อวินาที (Loncin and Merson, 1979)



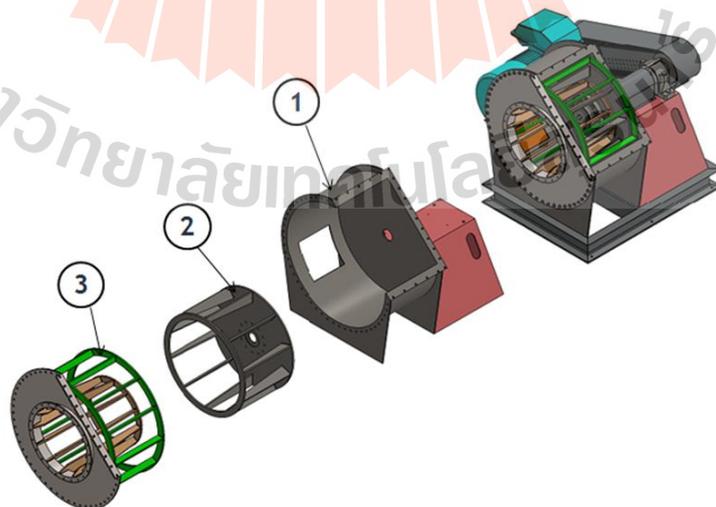
รูปที่ 3.3 เครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ยี่ห้อ STEDMAN (STEDMAN, 2019)

พัดลม (Blower) ทำหน้าที่ในการสร้างกระแสลมหรืออากาศให้เกิดการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยการเอาชนะแรงเสียดทานของระบบ ซึ่งส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ใบพัด (Impeller) กับตัวเครื่อง (Case) สำหรับรูปแบบใบพัดมีการออกแบบที่หลากหลายกับลักษณะการใช้งาน อัตราการไหล และความดันสถิตที่ต้องการ ตัวอย่างพัดลม (Blower) ที่ใช้งานในอุตสาหกรรม ตามรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 พัดลม (Blower) แบบใบพัด Backward Curved ที่ใช้งานในอุตสาหกรรม (HARTZELL, 2019)

เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เป็นการออกแบบโดยผสมผสานรูปแบบโครงสร้างของเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) เครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และพัดลม (Blower) เข้าด้วยกัน ตามรูปที่ 3.5 โดยออกแบบให้การป้อนวัตถุดิบเข้าตรง Center ของเครื่อง คล้ายกับเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) และพัดลม (Blower) ส่วนด้านขาออกวัตถุดิบจะอยู่ทางด้านบนคล้ายกับพัดลม (Blower) โดยส่วนประกอบหลักมี 3 ส่วน คือ โครง (Case) ใบพัด (Blade) และใบนิ่ง (Fixed blade) ทั้งนี้รูปแบบใบพัดจะออกแบบโดยประยุกต์ใบพัดของ Pin mill และใบพัดของ Hammer mill เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.5 เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (วรรณลภย์ บุญรอง, 2558)

การเลือกความเร็วปลายใบพัด เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาค เพื่อใช้ในการกำหนดความเร็วรอบของแกนเพลลาใบพัด ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ขนาดกำลังการผลิต 5 กิโลกรัม ต่อนาที โดยอ้างอิงความเร็วรอบจากตารางของ Loncin and Merson ที่ศึกษาไว้ในเรื่องการคุณสมบัติและการใช้งานอุปกรณ์ในการลดขนาดอนุภาค ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติ และการใช้งานอุปกรณ์ในการลดขนาดอนุภาค (Loncin and Merson,1979)

Type of equipment	Types of force	Peripheral velocity (m/s)	Typical products
Pin and disc mill	Impact	80 - 160	Sugar, starch, cocoa powder, nutmeg, pepper, roasted nuts, cloves
Wing beater mill	Impact and shear	50 - 70	Alginates, pepper, pectin, paprika, dried vegetables
Disc beater mill	Impact and shear	70 - 90	Milk powder, lactose, cereals, dried whey
Vertical toothed disc mill	Shear	4 - 8 17	Frozen coffee extract, Plastic materials Coarse grinding of rye, maize, wheat, fennel, pepper, juniper berry
Cutting granulator	Impact and shear	5 - 18	Fish meal, pectin, dry fruit and vegetables
Hammer mill	Impact	40 - 50	Sugar, tapioca, dry vegetables, extracted bones, dried milk, spices pepper

จากตารางที่ 3.3 พบว่า ความเร็วปลายใบพัดในการลดขนาดอนุภาคของแป้งเมล็ดมันสำปะหลังมีค่า 80 - 160 เมตรต่อวินาที เมื่อบดด้วยเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ดังนั้นการทดลองในปฏิบัติการ ผู้วิจัยเลือกทดลองบดแป้งมันสำปะหลังที่ความเร็วปลายใบพัด 4 ค่า คือ 60, 70, 80 และ 90 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วทั้งหมดสามารถลดขนาดอนุภาค

ของเม็ดแป้งสาลีได้ และที่ความเร็วปลายใบพัด 90 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้การลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งสาลีได้มากที่สุด

ดังนั้นการออกแบบเครื่องลดขนาดอนุภาคของแป้งเม็ดมันสำปะหลัง ผู้วิจัยจึงกำหนดความเร็วปลายใบพัดไว้เท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าจากผลการทดลองด้วยเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ที่ให้ผลดีที่สุด

3) การคำนวณขนาดพัดลมมอเตอร์เพื่อใช้งานกับเครื่องลดขนาดอนุภาค

เครื่องลดขนาดอนุภาคถูกออกแบบด้วยการผสมผสานระหว่างเครื่องบด และพัดลม ดังนั้นการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องคำนึงถึงอัตราการไหล และแรงดันของอากาศที่ไหลผ่านด้วยเครื่อง ในขณะเดียวกันต้องมีแรงกระทบของมวลวัตถุจากการตีของใบพัดส่งผ่านไปกระทบกับใบนิ่ง และตัวโครงของเครื่อง ในการคำนวณจึงคิดทั้งสองส่วนเพื่อให้ถูกต้องตามหลักทางวิศวกรรมดังนี้

คำนวณโดยใช้หลักการของพัดลม (Blower) ตามสมการของ Burton (2002)

ดังนี้

$$P_w = \frac{Q_{air} P_1}{17.4 e_m e_B} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.283} - 1 \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ	P_w	คือ	พลังงานที่ต้องใช้ (kW)
	Q_{air}	คือ	อัตราการไหลของอากาศ (m^3/min)
	e_m	คือ	ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)
	e_B	คือ	ประสิทธิภาพของเครื่องลดขนาด (%)
	P_1	คือ	ความดันสัมบูรณ์ด้านเข้า (kPa)
	P_2	คือ	ความดันสัมบูรณ์ด้านออก (kPa)

กำหนดให้มวลอากาศไหลเท่ากับ 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ประสิทธิภาพของมอเตอร์ 80 % ประสิทธิภาพของเครื่องลดขนาด 80 % ความดันสัมบูรณ์ด้านเข้า 0.78 กิโลปาสกาล ความดันสัมบูรณ์ด้านออก 2.45 กิโลปาสกาล เมื่อแทนค่าในสมการที่ 3.2 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าดังนี้

$$P_w = \frac{1,000(0.78)}{7.4(80\%)(80\%)} \left[\left(\frac{2.45}{0.78} \right)^{0.283} - 1 \right] = 96.66 \text{ kW} \quad (3.3)$$

คำนวณจากพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นกับวัตถุกำลังเคลื่อนทำให้มีพลังงานสะสมอยู่ในวัตถุจากอัตราเร็วของวัตถุซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วที่ของวัตถุ ใช้สัญลักษณ์ E_k หาพลังงานจลน์ได้จากปริมาณงานที่ทำได้ที่ทั้งหมดของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ไปทำงานอย่างหนึ่งจนกระทั่งวัตถุหยุดนิ่ง ในที่นี้ คือ มวลของแป้งที่เกิดแรงกระทบของใบพัด โดยคำนวณตามสมการที่ 3.4 โดยกำหนดอัตราการป้อนวัตถุเท่ากับ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.4)$$

เมื่อ	E_k	คือ	พลังงานจลน์ (J)
	M	คือ	มวลของวัตถุ (kg)
	V	คือ	อัตราเร็วของวัตถุ (m/s)

แทนค่าตามสมการที่ 3.4 จะได้ค่าแรงกระทำต่อพื้นที่และคำนวณกลับจะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 84.41 กิโลวัตต์

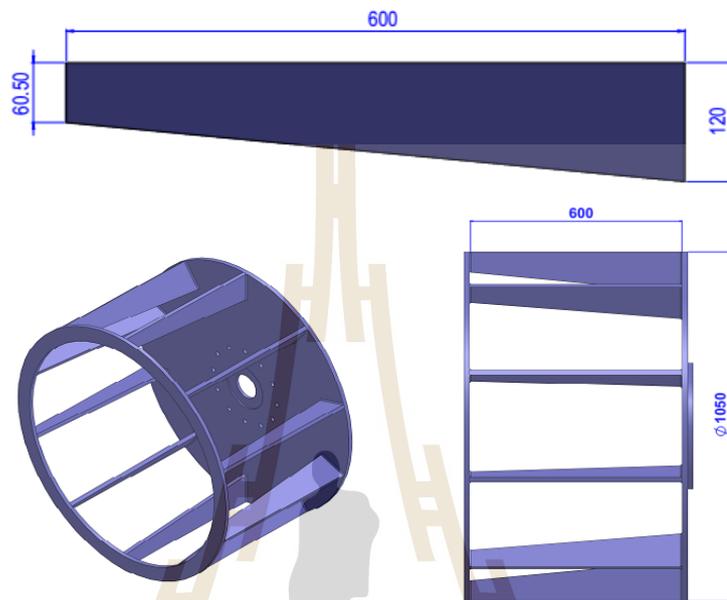
จากการคำนวณทั้งสองส่วน พบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้กับเครื่องลดขนาดอนุภาคมีค่า 84.41- 96.66 กิโลวัตต์ เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ตามหลักการทางวิศวกรรมอย่างน้อย 1.10 เท่า ดังนั้นในการใช้งานจริงเลือกมอเตอร์ขนาด 110 กิโลวัตต์ ได้ค่าความปลอดภัย (Safety factor) เท่ากับ 1.13 – 1.30 เท่า ซึ่งถูกต้องตามหลักการทางวิศวกรรม

4) การออกแบบรูปแบบใบพัด

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า เครื่องลดขนาดอนุภาคถูกออกแบบด้วยการผสมผสานระหว่างเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) เครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และพัดลม (Blower) ดังนั้นการออกแบบใบพัดจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อให้เครื่องลดขนาดอนุภาคสามารถใช้งานได้ตามเป้าหมาย และตอบโจทย์ในฐานะที่เป็นปัจจัยตัวหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบรูปแบบใบพัดไว้ 2 แบบ คือ ใบพัดแบบเรียบ และใบพัดแบบกลม โดยใบพัดแบบเรียบ เป็นการจำลองจากรูปแบบใบพัดของเครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) และใบพัดแบบกลมเป็นการจำลองจากรูปแบบใบพัดของเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill)

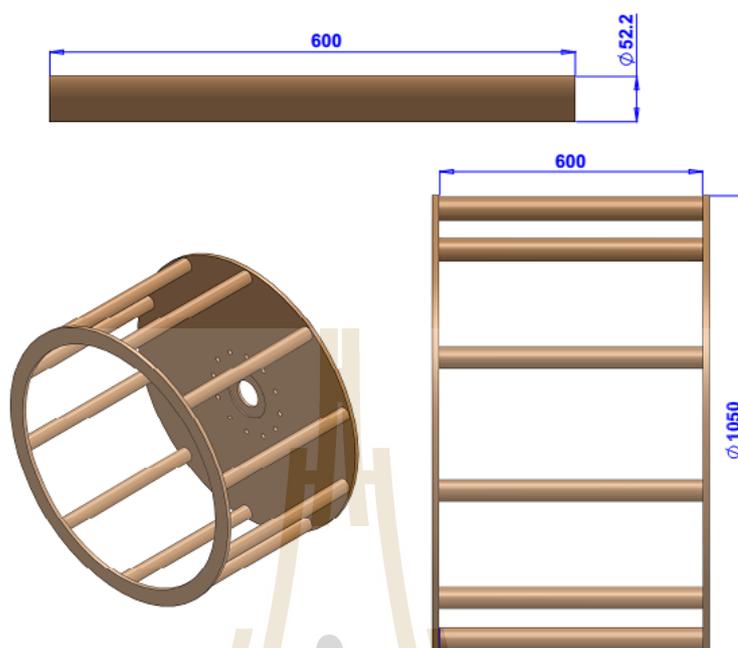
ใบพัดแบบเรียบ ตามรูปที่ 3.6 ถูกออกแบบคล้ายกับใบพัด (Impeller) ของพัดลม และรูปแบบของใบพัดเป็นสันมีเหลี่ยมเหมือนกับใบพัดของเครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการไหลของมวลการอากาศ รวมถึงเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในแนวระนาบ ซึ่งจะ

ช่วยเพิ่มแรงกระทบของเม็ดแป้งขณะเคลื่อนที่ผ่านตัวเครื่อง โดยใบพัดแบบเรียบมีพื้นที่หน้าในแนวระนาบเท่ากับ 53,640 ตารางมิลลิเมตร และความหนา 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.6 ใบพัดแบบเรียบ (Flat blade) (วรรณภักย์ บุญรอง, 2558)

ใบพัดแบบเรียบ ตามรูปที่ 3.7 ถูกออกแบบคล้ายกับเข็ม (Pin) ของเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ซึ่งเป็นท่อนกลมตันผิวเรียบโค้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52.20 มิลลิเมตร เพื่อช่วยลดแรงเสียดทานของอากาศ และเพิ่มอัตราการไหลเวียนของอากาศมากขึ้น ใบพัดแบบเรียบมีพื้นที่หน้าในแนวระนาบเท่ากับ 44,277 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.7 ใบพืดแบบกลม (Round blade) (วรรณลกษย์ นุญรอง, 2558)

5) การเลือกใช้วัสดุสำหรับทำใบพืดและตัวเครื่อง

เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เป็นเครื่องจักรที่ถูกติดตั้งและใช้งานในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังเกรดสูงสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งต้องผ่านตามมาตรฐานระบบความปลอดภัยด้านอาหาร (Foods safety) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้วัสดุเป็นสแตนเลสตามมาตรฐาน AISI 304 เพื่อใช้สร้างใบพืด และตัวเครื่อง ซึ่งสแตนเลสตามมาตรฐาน AISI 304 หรือ IS 1.4301 มีคุณสมบัติทางกล ตามตารางที่ 3.4 และคุณสมบัติทางเคมี ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกลของ AISI 304

Properties	Unit	Value
Density	Kg/m ³	7,900
Young's Modulus (Modulus of elasticity) at 20°C	GPa	200
Tensile Strength	MPa	520-720
Yield Strength	MPa	210
Shear Modulus	GPa	79
Poisson's Ratio		0.28

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติทางเคมีของ AISI 304

Steel Name	Number	C	Si	Mn	P	Cr	Ni
X5CrNi18-10	1.4301	0.07%	1.0%	2.0%	0.045%	17.5%-19.5%	8.0%-10.5%

6) การวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของใบพัด

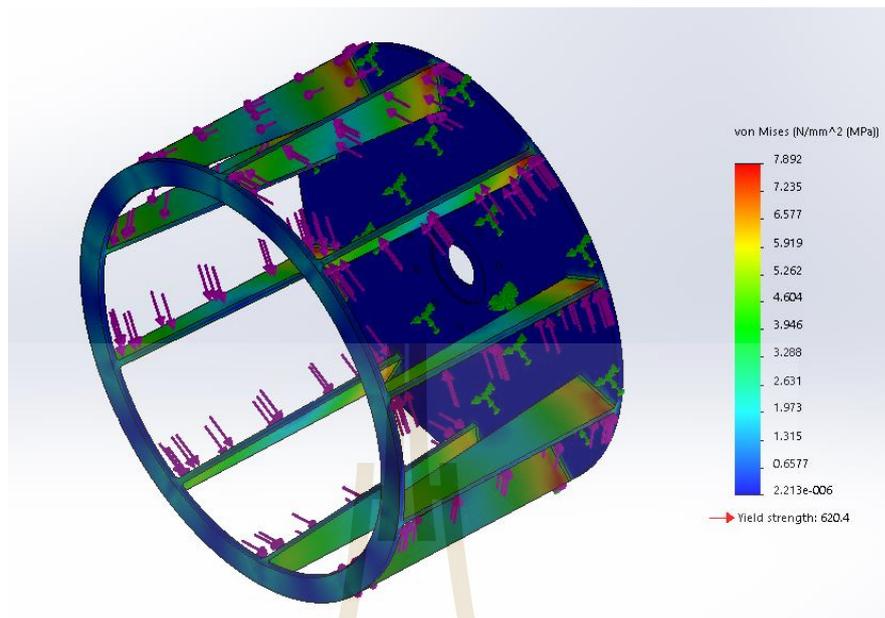
ก. ใบพัดแบบเรียบ

ในขั้นตอนการออกแบบได้ทำการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของใบพัด เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ถึงจุดอ่อนต่าง ๆ ของใบพัดทั้งแบบเรียบ และแบบกลม เมื่อกำหนดอัตราการป้อน แป้งเท่ากับ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที และค่าพลังงาน ไฟฟ้าติดตั้งจริงที่ 110 kW จากข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ที่เลือกใช้งานคือ มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด Induction motor ยี่ห้อ ABB ขนาด 110 kW., 3 phase, 50 Hz., 1,500 rpm., TypeM2BAX 315SMA 4, (ตามภาคผนวก ก) จะได้ค่าแรงบิดเท่ากับ 706 N-m. และค่าระยะรัศมีของวงใบพัดเท่ากับ 0.525 เมตร ดังนั้นสามารถคำนวณหาแรงกระทำต่อใบพัดในแนวระนาบตามสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$T_N = F * r \quad (3.5)$$

เมื่อ	T_N	คือ	แรงบิด (N.m)
	F	คือ	แรงกระทำ (N)
	r	คือ	รัศมีของรอบการหมุนเนื่องจากแรงกระทำ(m)

แทนค่าในสมการที่ 3.5 จะได้ค่าแรงกระทำต่อใบพัดในแนวระนาบเท่ากับ 1.344 kN เมื่อกำหนดค่า Safety factor เท่ากับ 1.5 เท่า ดังนั้นค่าแรงกระทำต่อใบพัดในแนวระนาบเท่ากับ 2.016 kN จากนั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป คือ Solid Works ในฟังก์ชันการ Simulation พบว่า ใบพัดแบบเรียบมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน โดยมีค่า Yield Strength สูงสุดเท่ากับ 7.892 MPa ซึ่งน้อยกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุที่เท่ากับ 210 MPa สำหรับผลการ Simulation ซึ่งจุดที่เกิดแรงกระทำมากที่สุดอยู่บริเวณ โคนใบพัดด้านในแสดงตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Simulation ใบบัดแบบเรียบดูค่า Yield Strength

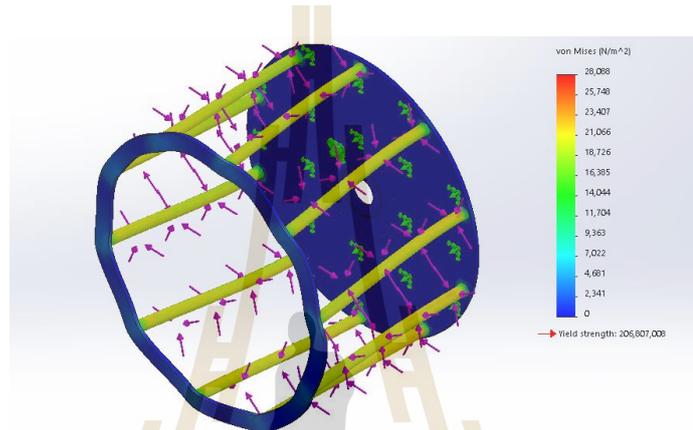
และการบิดตัวของใบบัดเมื่อรับแรงกระทบ พบว่า ด้านปลายใบบัดจะเกิดการบิดออกจากแนวตรงที่ระยะสูงสุดเท่ากับ 0.283 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Simulation ใบบัดแบบเรียบดูค่า Displacement

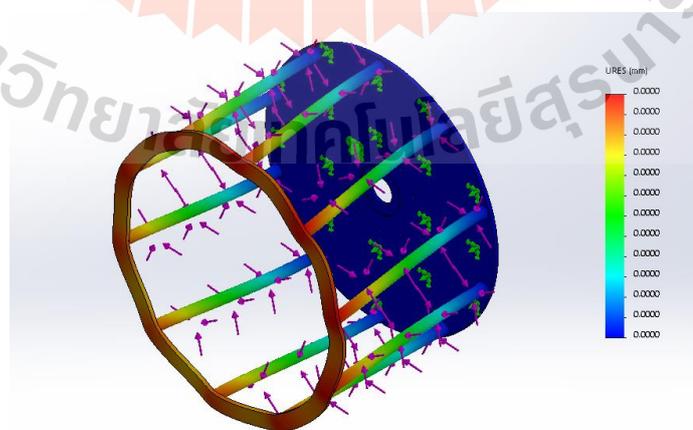
ข. ไบพัตแบบกลม

ได้กำหนดแรงกระทำต่อพื้นที่ในแนวระนาบทั้งหมดของไบพัตเท่ากับ 2.016 kN เท่ากับไบพัตแบบเรียบ และทำการ Simulation พบว่า ไบพัตแบบกลมมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน โดยมีค่า Yield Strength สูงสุดเท่ากับ 28.088 MPa ซึ่งน้อยกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุที่เท่ากับ 210 MPa สำหรับผลการ Simulation แสดงตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Simulation ไบพัตแบบกลมดูค่า Yield Strength

และการบิดตัวของไบพัตเมื่อรับแรงกระทำ จะเกิดการบิดตัวของไบพัตน้อยมาก เมื่อเทียบกับไบพัตแบบเรียบ โดยมีค่าการบิดตัวออกจากแนวตรงที่ระยะสูงสุดเท่ากับ 0.000 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.11

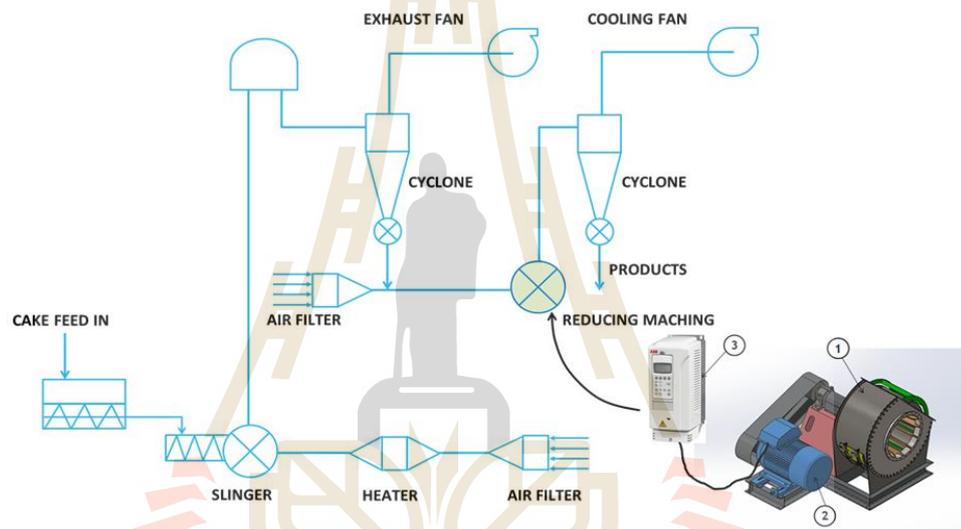


รูปที่ 3.11 Simulation ไบพัตแบบกลมดูค่า Displacement

3.3 เครื่องจักร เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

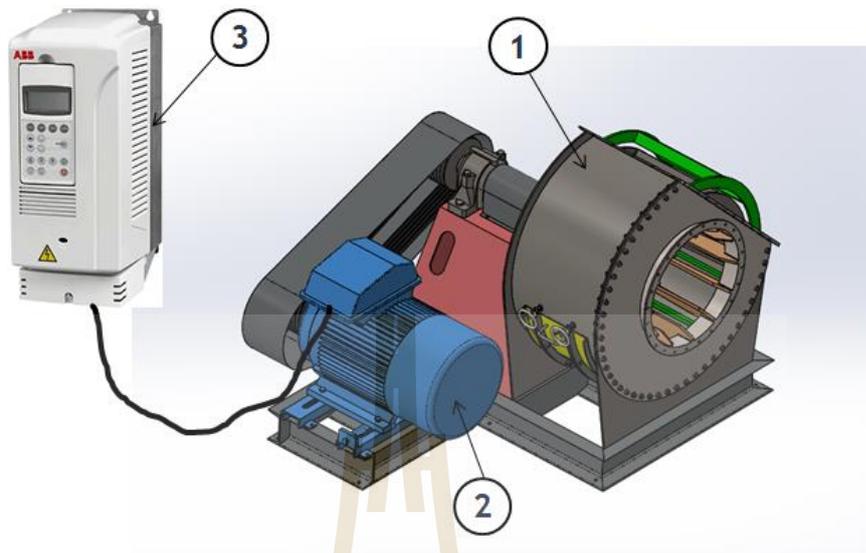
ภายหลังการออกแบบและสร้างเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง จำนวน 2 เครื่อง คือ เครื่องลดขนาดอนุภาคที่มีรูปแบบใบพัดแบบเรียบ และใบพัดแบบกลม โดยเครื่องดังกล่าวพร้อมอุปกรณ์มีมูลค่าประมาณเครื่องละ 2.5 ล้านบาท ได้ถูกติดตั้งในกระบวนการอบแห้งแป้งแบบพาหะลม (Pneumatic Flash dryer) ในโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีตำแหน่งการติดตั้งตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง

สำหรับเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ได้ติดตั้งอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถเดินเครื่อง และทำการทดสอบต่อไป ทั้งนี้มีอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน ตามรูปที่ 3.13 ประกอบด้วย

- 1) เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง วัสดุเป็นสแตนเลส AISI 304
- 2) มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด Induction motor ยี่ห้อ ABB ขนาด 110 kW 3 phase 50 Hz.
- 3) ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter) ยี่ห้อ ABB รุ่น ACH 580-01-206A-1



รูปที่ 3.13 เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังพร้อมอุปกรณ์

3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

หลังจากติดตั้งเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังพร้อมอุปกรณ์เข้าในกระบวนการอบแห้งตามตำแหน่ง ได้วางแผนทำการทดสอบและเก็บข้อมูล ซึ่งใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลดังนี้

- 1) เครื่องวัดค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density) ยี่ห้อ ERWERA รุ่น SVM-121/221 ตามรูปที่ 3.14
- 2) เครื่องร่อนเม็ดแป้ง (Sieve analysis) ยี่ห้อ RETSCH รุ่น AS 200 ตามรูปที่ 3.15
- 3) เครื่องวัดค่าความชื้นของแป้ง (Moisture analysis) ยี่ห้อ SARTURIUS รุ่น MA 35 - 4 ตามรูปที่ 3.16
- 4) เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh meter) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น PW3360 ตามรูปที่ 3.17
- 5) เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ SMART SENSOR รุ่น AS 856 ตามรูปที่ 3.18
- 6) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ยี่ห้อ SARTURIUS รุ่น BSA3202S - CW ตามรูปที่ 3.19
- 7) เครื่องวัดความหนืดแป้ง ยี่ห้อ BRABENDER Viscograph - E ตามรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ (Tapped bulk density)
ยี่ห้อ ERWERA รุ่น SVM - 121/221 (ERWERA,2012)



รูปที่ 3.15 เครื่องร่อนเมล็ดแป้ง (Sieve analysis) ยี่ห้อ RETSCH รุ่น AS 200 (RETSCH, 2015)



รูปที่ 3.16 เครื่องวัดค่าความชื้นของแป้ง (Moisture analysis)
ยี่ห้อ SARTURIUS รุ่น MA 35 - 4 (SARTURIUS, 2015)



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดค่าพลังงานไฟฟ้า (kWh meter) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น PW3360 (HIOKI, 2016)



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ SMART SENSOR รุ่น AS 856



รูปที่ 3.19 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ยี่ห้อ SARTURIUS รุ่น BSA3202S - CW (SARTURIUS, 2015)



รูปที่ 3.20 เครื่องวัดความเหนียว ยี่ห้อ BRABENDER ViscoGraph - E

3.4 การกำหนดปัจจัย และวิธีการทดสอบ

3.4.1 การกำหนดปัจจัยในการทดสอบ

ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย ชนิดแป้งมันสำปะหลัง รูปแบบใบพัด อัตราการปั่น ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และความเร็วปลายใบพัด และได้กำหนดพารามิเตอร์อีก 2 ตัวที่ไม่ต้องทำการปรับเปลี่ยนค่า คืออัตราการไหลมวลอากาศ และระยะห่างใบพัดกับใบนิ่ง แสดงตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	หน่วย	ไม่ปรับค่า	ปรับค่า
อัตราการไหลมวลอากาศ	kg/h	60,000	-
ระยะห่างใบพัดกับใบนิ่ง	mm	35	-
ชนิดเบี่ยงมันสำปะหลัง	-	-	เบี่ยงมันสำปะหลังดิบ เบี่ยงมันสำปะหลังดัดแปร
รูปแบบใบพัด	-	-	แบบเรียบ แบบกลม
อัตราการป้อน	Kg/h	-	7,000 8,000
ความชื้นของเบี่ยงมันสำปะหลัง	%	-	11.4 12.4
ความเร็วปลายใบพัด	m/s	-	76 88

จากตารางที่ 3.6 ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ไม่ต้องต้องทำการปรับเปลี่ยนค่า คือ อัตราการไหลมวลอากาศ และระยะห่างใบพัดกับใบนิ่ง ด้วยเหตุผลดังนี้

1) อัตราการไหลมวลอากาศ เนื่องจากระบบอบแห้งแบบพาหะลม ทำหน้าที่ 2 อย่างในเวลาเดียวกัน คือ การทำให้แห้งและการขนถ่ายแป้ง ดังนั้นหากทำการปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลมวลอากาศจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของขนถ่ายแป้งขึ้นไปเก็บในไซโล และหากทำการปรับลดจะทำให้แป้งเกิดการอุดตันในท่อขนถ่ายได้ รวมถึงประสิทธิภาพดัดจับฝุ่นแป้งของไซโคลอน จะลดลงส่งผลให้มีแป้งสูญเสียออกจากระบบปริมาณมากจนไม่สามารถควบคุมได้

2) ระยะห่างใบพัดกับใบนิ่ง เนื่องจากเครื่องลดขนาดอนุภาคถูกติดตั้งในกระบวนการผลิตจริง ซึ่งมีความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยน และส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิตโดยตรง ดังนั้นเมื่อติดตั้งแล้วจึงไม่สามารถเข้าไปปรับเปลี่ยนระยะได้จึงต้องออกแบบ และกำหนดค่าไว้ที่ 35 มิลลิเมตร สำหรับที่มาของค่าดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้กำหนดตามระยะห่างใบพัดกับใบนิ่งของเครื่อง Denigrator ที่มีใช้งานในกระบวนการผลิตของโรงงาน

และกำหนดปัจจัยที่ทำการปรับเปลี่ยนทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย ชนิดเบี่ยงมันสำปะหลัง รูปแบบใบพัด อัตราการป้อน ความชื้นของเบี่ยงมันสำปะหลัง และความเร็วปลายใบพัด สาเหตุที่ต้องปรับเปลี่ยนค่ามีเหตุผลดังนี้

1) ชนิดแป้งมันสำปะหลัง ทางโรงงานมีการผลิตแป้งมันสำปะหลัง 2 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่โรงงานผลิตจึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยดังกล่าว อีกทั้งแป้งมันสำปะหลังทั้ง 2 ชนิด ยังมีขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้ปัจจัยนี้คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

2) รูปแบบใบพืด มี 2 รูปแบบคือ ใบพืดแบบเรียบ ซึ่งออกแบบตามใบสับของเครื่องสับแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ที่ให้แรงฟาดกระทบสูง และใบพืดแบบเรียบซึ่งออกแบบตามใบบดของเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ที่ให้แรงเสียดสูง ดังนั้นจึงปรับเปลี่ยนค่าของปัจจัยดังกล่าว เพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นจากใบพืดทั้งสองรูปแบบ

3) อัตราการป้อน กำหนดไว้ 2 ค่าคือ ที่อัตราการป้อน 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการป้อนสูงสุดที่กระบวนการผลิตสามารถทำได้ และที่ 7,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการป้อนที่ประมาณ 90 % ของกำลังการผลิตที่กระบวนการผลิตสามารถทำได้

4) ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง กำหนดไว้ 2 ค่า คือ ที่ 11.4 % ที่เป็นค่าลิมิตทางด้านต่ำที่กระบวนการผลิตตั้งไว้ตาม Products Specification ที่ 11.0 % และที่ 12.5 % เป็นค่าลิมิตทางด้านสูงของ Products Specification ที่ 13.0 %

5) ความเร็วปลายใบพืด กำหนดไว้ 2 ค่า คือ ที่ความเร็ว 76 เมตรต่อวินาที เป็นค่าจากการทดลองด้วยเครื่องบดแบบเข็ม (Pin mill) ซึ่งพบว่าเป็นความเร็วต่ำที่สุดที่ยังสามารถลดขนาดอนุภาคของเม็ดมันสำปะหลังได้ และที่ความเร็ว 88 เมตรต่อวินาที เป็นค่าที่ให้ผลการลดขนาดอนุภาคของเม็ดมันสำปะหลังได้สูงสุด

3.4.2 วิธีการทดสอบ

1) สถานที่ทดสอบ คือ บริษัท สยาม ควอลิตี้ สตาร์ช จำกัด เลขที่ 222 หมู่ 10 ตำบลโคกเริงรัมย์ อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ 36160

2) ระยะเวลาทดสอบ

ก. แป้งมันสำปะหลังดิบ ทดสอบเป็นระยะเวลา 20 วัน เติมน้ำทดสอบ 1,000 ตัน

ข. แป้งมันสำปะหลังคัดแปร ทดสอบเป็นระยะเวลา 20 วัน เติมน้ำทดสอบ 1,000 ตัน

3) ขั้นตอนการทดสอบ ทำการปรับตั้งพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต สำหรับอบแห้งมันสำปะหลังดิบและมันสำปะหลังคัดแปร ให้ได้ตามเงื่อนไขการทดสอบดังนี้

ก. อัตราป้อนมวลวัตถุดิบที่ 7,000 และ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ข. ความชื้นของวัตถุดิบที่ 11.4 และ 12.4 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง

ค. ปรับเปลี่ยนค่าความเร็วปลายใบพืดที่ 76 และ 88 เมตรต่อวินาที

4) เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมงในแต่ละเงื่อนไข และวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดเพื่อเก็บข้อมูลการทดสอบ ดังนี้

- วัดค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะตามวิธีการวิเคราะห์ (ภาคผนวก ก.) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D6393 : Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices
- วัดค่าความชื้นตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน (ภาคผนวก ข.) อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 4317 : 2011(E) The Karl - Fischer method for determining water content.
- วัดค่าปริมาณวัตถุติดตามวิธีตะแกรงมาตรฐาน (ภาคผนวก ค.) อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 3310 - 1:2016 : Test sieves - Technical requirements and testing - Part 1: Test sieves of metal wire cloth
- วัดค่าความหนืดของน้ำแป้งตามวิธีมาตรฐาน (ภาคผนวก ง.) อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 7973 : Starch - Determination of viscosity

3.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย ชนิดแป้งมันสำปะหลัง รูปแบบใบพัด อัตราการป้อน ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และความเร็วปลายใบพัด โดยที่ผู้วิจัยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

หลังจบการทดลอง และรวบรวมข้อมูลครบตามวิธีการทางสถิติ ผู้วิจัยจะใช้โปรแกรมมินิแทป (Minitab) เป็นเครื่องมือที่ใช้ประมวลผลการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ค่าปัจจัยหลักหลักที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่วางแผนไว้ในบทที่ 3 และมีการบันทึกผลการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ สำหรับในบทนี้จะแสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานตามขั้นตอนการดำเนินวิจัยในบทที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดในการดำเนินงานวิจัย และผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

4.2 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

4.3 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

4.4 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

4.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

4.6 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

4.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการใช้พลังงานในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

4.8 การวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรก่อนและหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค

4.9 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งแป้งมันสำปะหลัง กรณีการเดินและไม่เดินผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค

งานวิจัยนี้ทดลองด้วยการออกแบบทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล 2 ระดับ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับศึกษาคัดกรองผลกระทบหลักจากแต่ละปัจจัย และผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัย ทั้งนี้ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย 5 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ชนิดแป้งมันสำปะหลัง รูปแบบใบพัด อัตราการป้อน ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และความเร็วปลายใบพัด โดยทำการทดลองทั้งหมด (2^5) เท่ากับ 32 การทดลอง ซึ่งปัจจัย และระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.1 ทั้งนี้ใช้ปริมาณแป้งมันสำปะหลังในการทดลองเท่ากับ 60 ตันแป้งต่อการทดลอง รวมทั้งหมดใช้แป้งมันสำปะหลังประมาณ 2,000 ตัน โดยมีระยะเวลาการทดลองประมาณ 1 เดือน

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง และระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

Parameters	Unit	Levels	
		Low	High
Type of starch	-	Native	Modified
Blade type	-	Round	Flat
Feed rate	Kg.h ⁻¹	7000	8000
Moisture	%	11.4	12.4
Tip speed	m.s ⁻¹	76	88

4.1 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าความความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง

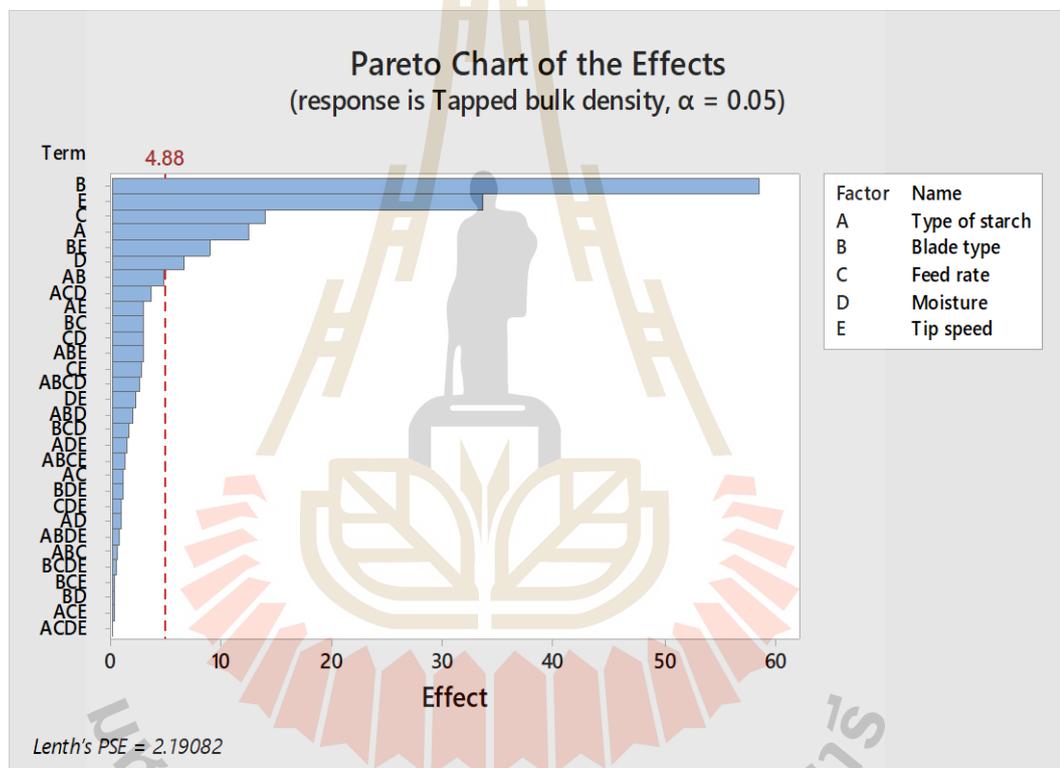
ผลการวิจัยนี้ได้จากการเดินทดสอบกับเครื่องจักรจริงในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ในขั้นตอนของการอบแห้งแป้ง โดยนำปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ 1) ชนิดแป้งมันสำปะหลัง 2) รูปแบบใบพัด 3) อัตราการป้อน 4) ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และ 5) ความเร็วปลายใบพัด ได้ออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) โดยทำการทดลองที่ 2 ระดับ เพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลอย่างนัยสำคัญต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเกาะของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งผลการทดลองแสดงตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

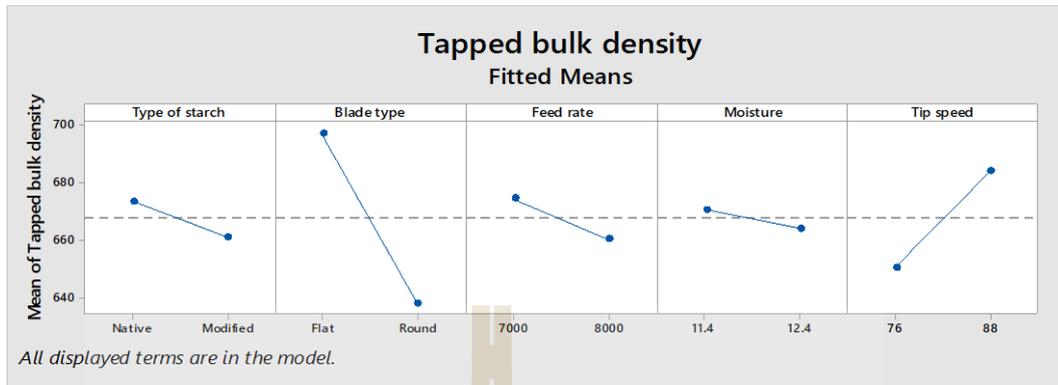
Std order	Type of starch	Blade type	Feed rate (kg/h)	Moisture (%)	Tip speed (m/s)	Tap bulk density(kg/m ³)	Power consumption(kWh)
1	Native	Flat	7000	11.4	76	695.01	73.57
2	Native	Flat	7000	12.4	76	680.57	75.41
3	Native	Flat	8000	11.4	76	681.31	76.14
4	Native	Flat	8000	12.4	76	688.74	77.29
5	Native	Round	7000	11.4	76	645.23	62.24
6	Native	Round	7000	12.4	76	640.58	63.48
7	Native	Round	8000	11.4	76	642.39	64.42
8	Native	Round	8000	12.4	76	640.87	65.06
9	Modified	Flat	7000	11.4	76	672.15	71.27
10	Modified	Flat	7000	12.4	76	668.76	72.70
11	Modified	Flat	8000	11.4	76	665.36	73.76
12	Modified	Flat	8000	12.4	76	658.28	74.50
13	Modified	Round	7000	11.4	76	641.18	60.51
14	Modified	Round	7000	12.4	76	631.71	61.72
15	Modified	Round	8000	11.4	76	642.15	62.63
16	Modified	Round	8000	12.4	76	631.24	63.25
17	Native	Flat	7000	11.4	88	720.54	90.49
18	Native	Flat	7000	12.4	88	699.25	88.23
19	Native	Flat	8000	11.4	88	705.12	89.85
20	Native	Flat	8000	12.4	88	702.87	90.15
21	Native	Round	7000	11.4	88	658.49	75.56
22	Native	Round	7000	12.4	88	650.58	74.28
23	Native	Round	8000	11.4	88	653.51	76.21
24	Native	Round	8000	12.4	88	651.64	75.89
25	Modified	Flat	7000	11.4	88	703.70	87.66
26	Modified	Flat	7000	12.4	88	701.73	85.05
27	Modified	Flat	8000	11.4	88	698.57	87.26
28	Modified	Flat	8000	12.4	88	691.47	86.90
29	Modified	Round	7000	11.4	88	655.57	74.43
30	Modified	Round	7000	12.4	88	646.23	72.21
31	Modified	Round	8000	11.4	88	649.23	74.09
32	Modified	Round	8000	12.4	88	641.28	73.78

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Minitab สร้างกราฟพารेटโต และเส้นนัยสำคัญบนกราฟพารेटโตที่ระดับนัยสำคัญที่เราต้องการ เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล และกรองปัจจัยที่เหลือเฉพาะปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากกราฟพารेटโต

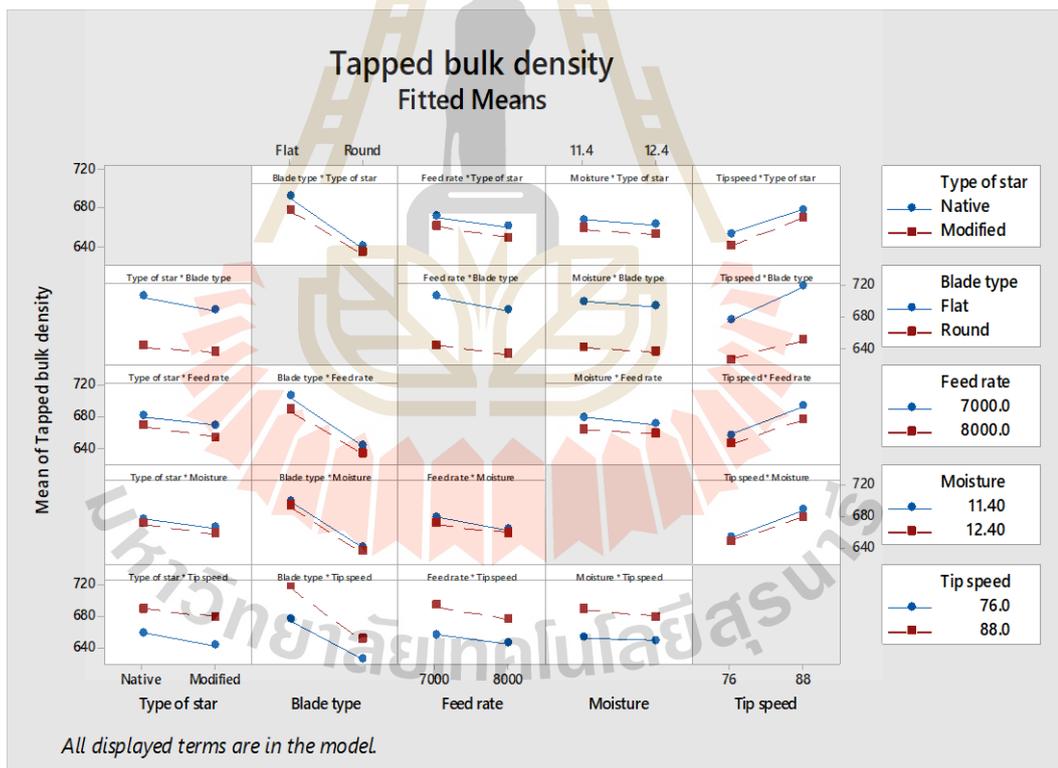
เมื่อพรีตกราฟพารेटโตที่ระดับ $\text{Alpha} = 0.05$ จะได้กราฟพารेटโตแสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง ตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.3 กราฟผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า รูปแบบใบพัด ความเร็วปลายใบพัด ชนิดของแป้งมันสะปะหลัง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และผลกระทบร่วมระหว่างรูปแบบใบพัดกับความเร็วปลายใบพัด ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังมากตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง คือ รูปแบบใบพัด ทั้งนี้ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแสดงผลกระทบเกินกว่าเส้นสีแดง (Standardized Effect) และรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าผลกระทบหลักของความเร็วยปลายใบพัด ชนิดแป้งมันสำปะหลัง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และอัตราการป้อน มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ โดยเมื่อทดลองตามเงื่อนไขการใช้ใบพัดแบบเรียบ ความเร็วยปลายใบพัดเท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนที่ 7,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เติมน้ำมันสำปะหลังดิบ และความชื้นของแป้งที่ 11.4 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะสูงสุดเท่ากับ 720.54 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตามรูปภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ารูปแบบใบพัดมีผลกระทบร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ทั้งหมด 2 ปัจจัย ประกอบด้วย ผลกระทบร่วมระหว่างรูปแบบใบพัดกับความเร็วยปลายใบพัด และรูปแบบใบพัดกับชนิดแป้งมันสำปะหลัง เป็นการยืนยันว่ารูปแบบของใบพัดเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นๆ ทั้งนี้ได้นำปัจจัยไปวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่า P - Value ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าค่า P - Value ของปัจจัยทั้งหมดข้างต้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูปแบบใบพัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบมากที่สุด รองลงมา คือ ความเร็วยปลายใบ ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และอัตราการป้อน ตามลำดับ

ผลกระทบร่วมกับปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง คือ รูปแบบใบพัดกับความเร็วยปลายใบพัด เมื่อใช้ใบพัดแบบเรียบและความเร็วยปลายใบพัดเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงกระทำต่อรอบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีโอกาสที่จะถูกฟาดกระทบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงในปริมาณสูงกว่าที่ความเร็วต่ำ เมื่ออนุภาคขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเช่นกัน รองลงมาคือ รูปแบบใบพัดกับชนิดแป้งมันสำปะหลัง เมื่อใช้ใบพัดแบบเรียบ และเติมน้ำมันสำปะหลังดิบ ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะจะเพิ่มสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังคัดแปร เนื่องจากมันสำปะหลังดิบไม่ได้เติมสารเคมี ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลังคัดแปรที่เติมสารเคมี ทำให้อนุภาคหลุดออกจากกันได้ง่ายกว่า เมื่อใช้แรงกระทำเท่ากัน

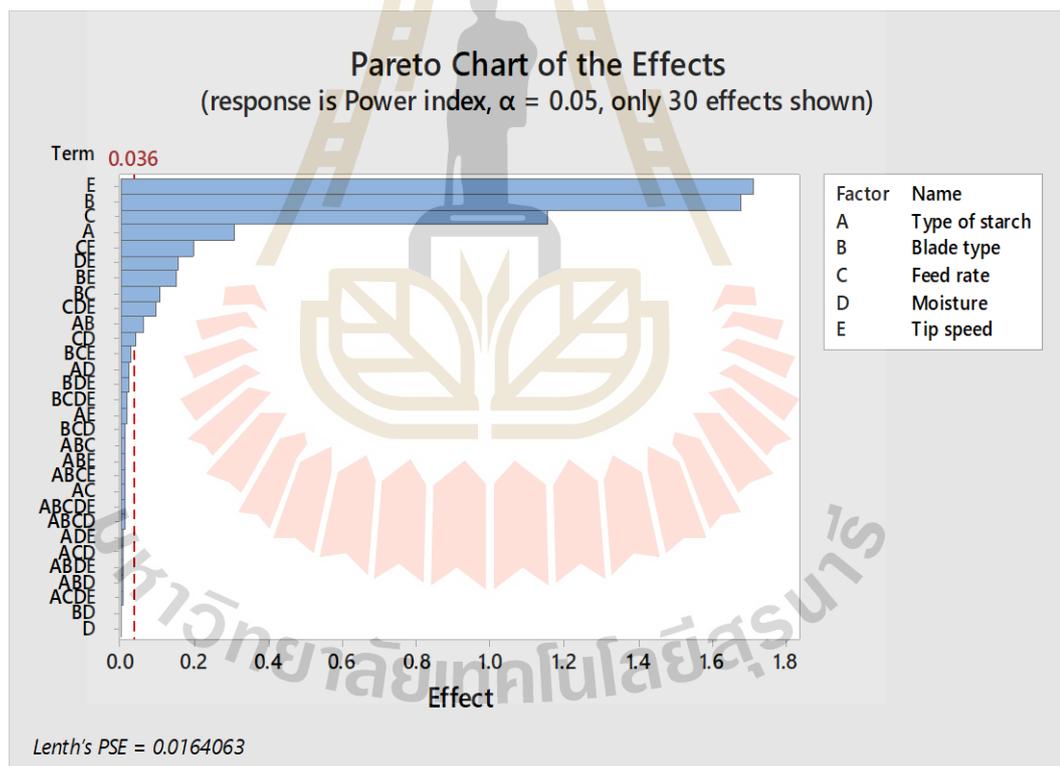
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	20781.8	1385.5	66.86	0.000
Linear	5	19973.2	3994.6	192.78	0.000
Type of starch	1	781.0	781.0	37.69	0.000
Blade type	1	15822.0	15822.0	763.58	0.000
Feed rate	1	141.3	141.3	6.82	0.019
Moisture	1	336.1	336.1	16.22	0.001
Tip speed	1	2892.8	2892.8	139.61	0.000
2-Way Interactions	10	808.6	80.9	3.90	0.008
Type of starch*Blade type	1	147.4	147.4	7.12	0.017
Type of starch*Feed rate	1	12.1	12.1	0.58	0.457
Type of starch*Moisture	1	3.6	3.6	0.17	0.683
Type of starch*Tip speed	1	77.0	77.0	3.72	0.072
Blade type*Feed rate	1	33.5	33.5	1.62	0.222
Blade type*Moisture	1	0.4	0.4	0.02	0.893
Blade type*Tip speed	1	464.3	464.3	22.41	0.000
Feed rate*Moisture	1	53.1	53.1	2.56	0.129
Feed rate*Tip speed	1	9.6	9.6	0.46	0.505
Moisture*Tip speed	1	7.7	7.7	0.37	0.552
Error	16	331.5	20.7		
R-sq = 100% R-sq(adj) = 99.98% R-sq(pred) = 99.55%					

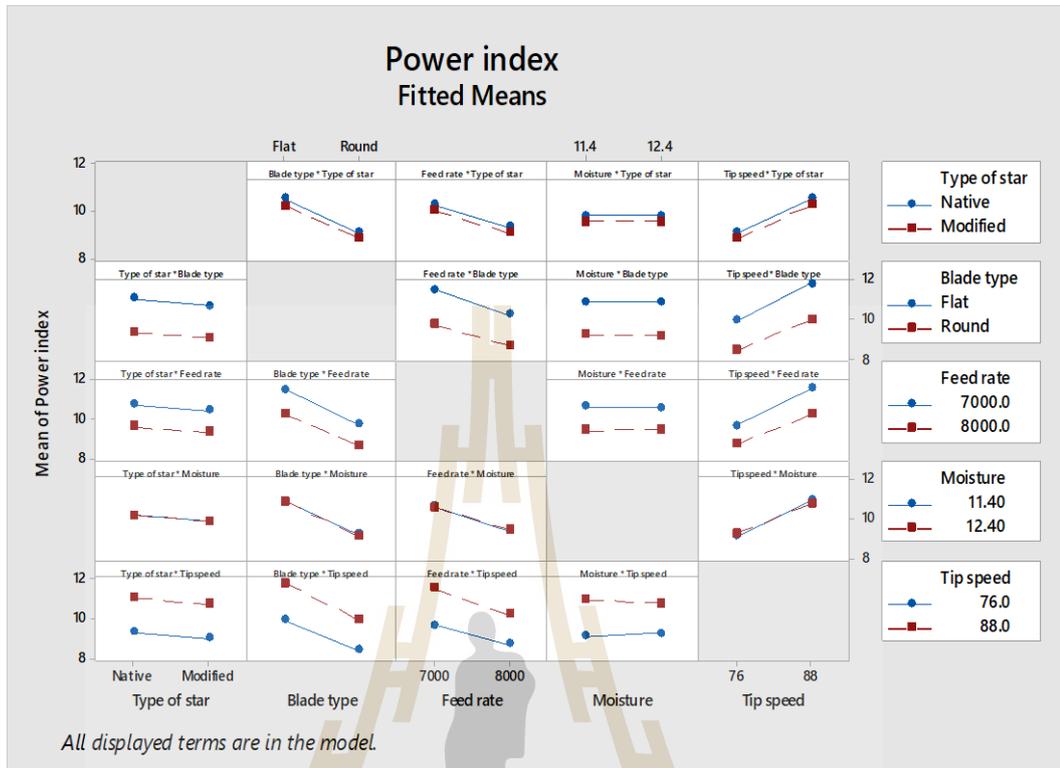
4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.2 เมื่อได้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ผู้วิจัยใช้โปรแกรมมินิแทป (Minitab) สร้างกราฟพารेटโต และเส้นนัยสำคัญบนกราฟพารेटโตที่ระดับนัยสำคัญที่ต้องการ เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลและกรองปัจจัยที่เหลือ เฉพาะปัจจัยหลักที่มีส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากกราฟพารेटโต

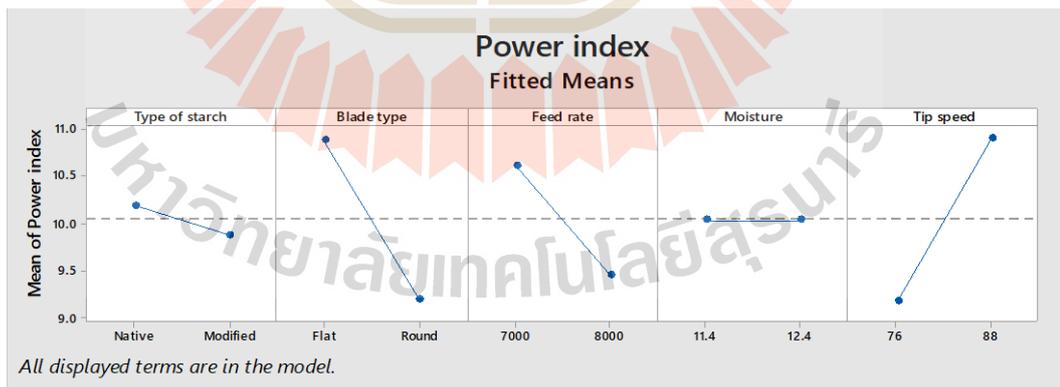
เมื่อพร้อมกราฟพารेटโตที่ระดับ $\alpha = 0.05$ จะได้กราฟพารेटโตแสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟพารेटโตแสดงผลกระทบที่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า ในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า ในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ พบว่า ความเร็วปลายใบพัด รูปแบบใบพัด ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง อัตราการป้อน โดยที่ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า และผลกระทบร่วมระหว่างรูปแบบใบพัดกับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมากที่สุด คือ ความเร็วปลายใบพัด รองลงมา คือ รูปแบบใบพัด ตามมาด้วยชนิดของแป้งมันสำปะหลัง อัตราการป้อน และสุดท้ายคือความชื้นของแป้งมันสำปะหลังที่สุด

และรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ผลกระทบหลักของความเร็วปลายใบพัด รูปแบบใบพัด อัตราการป้อน และชนิดแป้งมันสำปะหลังมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า ในขณะที่ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังไม่ส่งผลต่อค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยเมื่อทดลองตามเงื่อนไขที่ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 76 เมตรต่อวินาที ใบพัดแบบกลม อัตราการป้อนที่ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เติมน้ำมันสำปะหลังคัดแปร จะทำให้ได้ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีค่าต่ำที่ 9.26 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง

ตามรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าความเร็วปลายใบพัดมีผลกระทบร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วปลายใบพัดกับอัตราป้อน รองลงมา คือ ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วปลายใบพัดกับความชื้นแป้งมันสำปะหลัง อันดับสุดท้าย คือ ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วปลายใบพัดกับรูปแบบใบพัด ซึ่งตอกย้ำว่าความเร็วปลายใบพัดเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าการใช้พลังงานเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่น

ผลกระทบร่วมกับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย คือ ความเร็วปลายใบพัดกับอัตราป้อน หมายความว่า หากเพิ่มความเร็วปลายใบพัดและอัตราป้อน จะทำให้ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณแป้งที่เข้าสู่เครื่องลดขนาดเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีแรงกระทำต่อใบพัดมากขึ้น ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้น ต่อมาความเร็วปลายใบพัดกับความชื้นแป้งมันสำปะหลัง อธิบายได้เมื่อความชื้นของแป้งสูงขึ้นจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้นเช่นกันทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้น และสุดท้ายคือ ความเร็วปลายใบพัดกับรูปแบบใบพัด จะเห็นว่าเมื่อใบพัดเป็นแบบเรียบจะใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดสูงกว่าแบบกลม ทำให้มีแรงกระทำมากกว่าซึ่งจะใช้พลังงานในการลดขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	2643.00	176.20	666.12	0.000
Linear	5	2616.20	523.24	1978.09	0.000
Type of starch	1	44.06	44.06	166.58	0.000
Blade type	1	1243.38	1243.38	4700.58	0.000
Feed rate	1	14.27	14.27	53.95	0.000
Moisture	1	0.04	0.04	0.17	0.688
Tip speed	1	1314.43	1314.43	4969.18	0.000
2-Way Interactions	10	26.80	2.68	10.13	0.000
Type of starch*Blade type	1	1.32	1.32	5.01	0.040
Type of starch*Feed rate	1	0.00	0.00	0.00	0.965
Type of starch*Moisture	1	0.10	0.10	0.39	0.543
Type of starch*Tip speed	1	0.28	0.28	1.07	0.316
Blade type*Feed rate	1	0.08	0.08	0.29	0.597
Blade type*Moisture	1	0.09	0.09	0.32	0.578
Blade type*Tip speed	1	8.83	8.83	33.38	0.000
Feed rate*Moisture	1	1.17	1.17	4.41	0.052
Feed rate*Tip speed	1	3.73	3.73	14.11	0.002
Moisture*Tip speed	1	11.20	11.20	42.33	0.000
Error	16	4.23	0.26		
R-sq = 100 % R-sq(adj) = 99.95 % R-sq(pred) = 99.50 %					

4.3 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

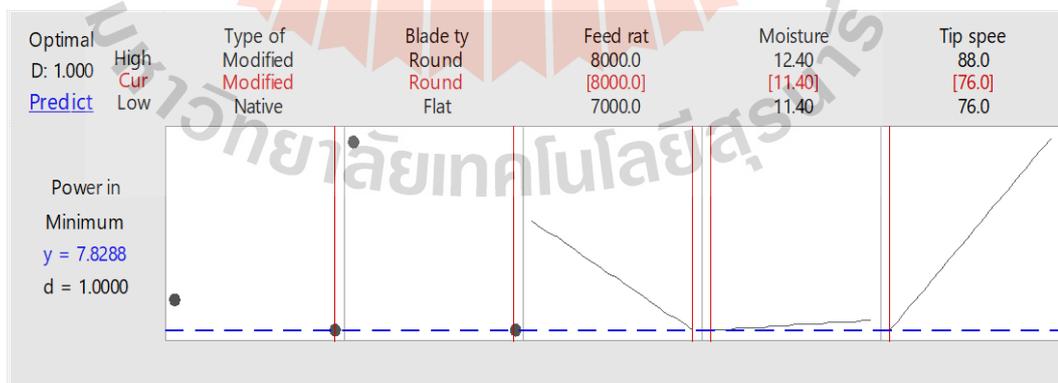
เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังสูงสุด โดยการใช้โปรแกรม Minitab ในการ Optimized ค่าของปัจจัยแต่ละปัจจัยตัวว่าค่าที่ดีที่สุดเหมาะสมที่สุด ตามรูปที่ 4.7 พบว่า ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนที่ 7,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เติมน้ำแป้งมันสำปะหลังดิบ และความชื้นของแป้งที่ 11.4 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะสูงสุดเท่ากับ 720,540.54 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.7 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

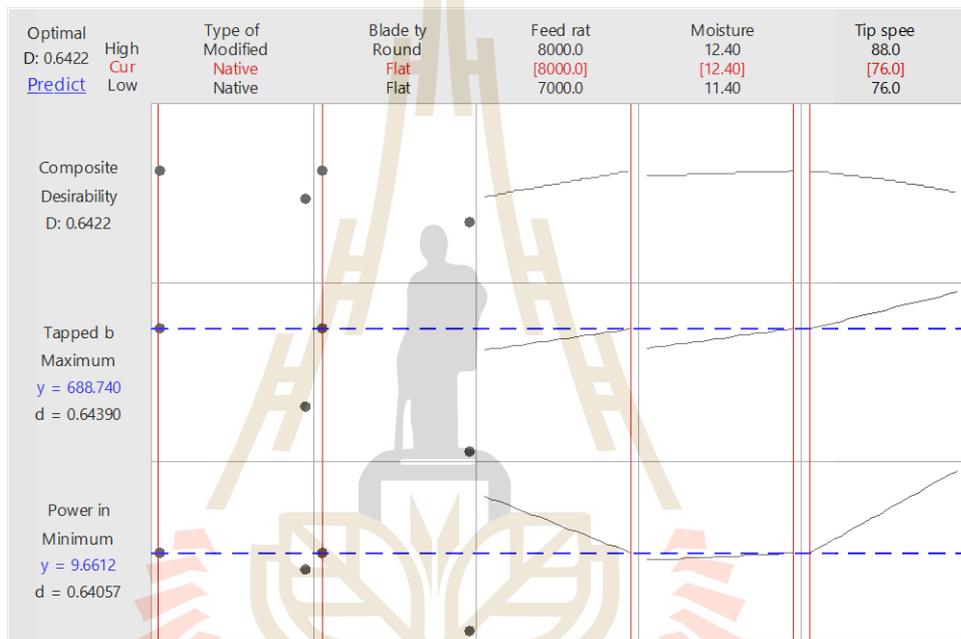
4.4 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

เพื่อให้ได้ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังต่ำที่สุด โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการ Optimized ค่าของปัจจัยแต่ละปัจจัยตัว ว่าค่าที่ดีที่สุดเหมาะสมที่สุด ตามรูปที่ 4.8 พบว่า ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 76 เมตรต่อวินาที ใบพัดแบบกลม อัตราการป้อนที่ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เติมน้ำแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จะทำให้ได้ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีค่าต่ำที่ 7.82 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง



รูปที่ 4.8 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

นอกจากนี้ยังได้ทำการ Optimized ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง และค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสม ตามรูปที่ 4.9 พบว่า ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 76 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนที่ 7,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เติมน้ำแป้งมันสำปะหลังดิบ และความชื้นของแป้งที่ 11.4 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะเท่ากับ 688.74 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 9.66 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง



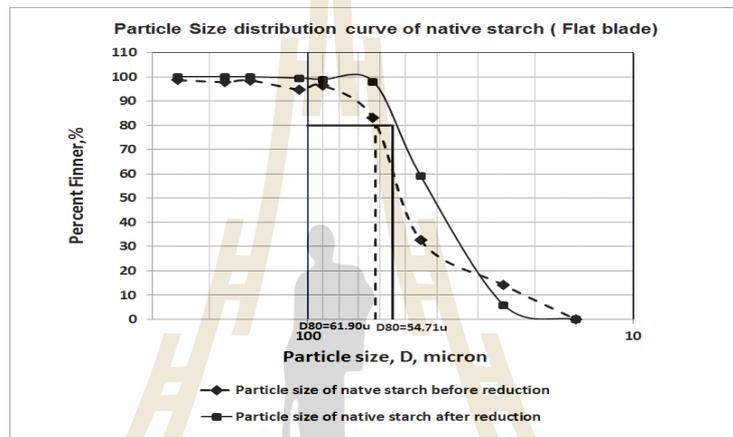
รูปที่ 4.9 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

4.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

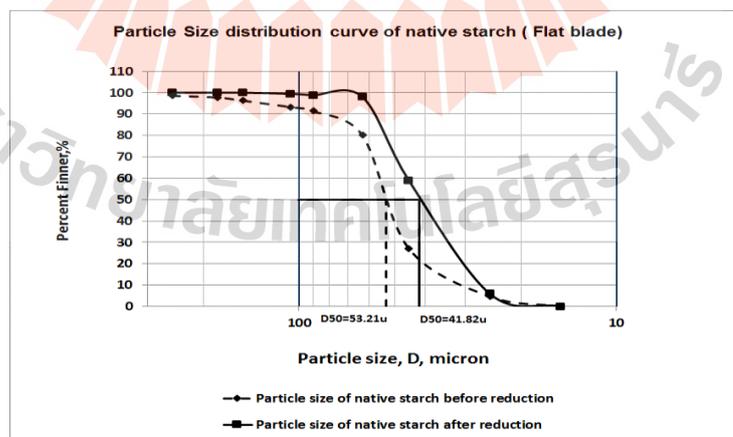
ผลจากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังคัดแปร เพื่อดูแนวโน้ม และเปรียบเทียบของอนุภาคเม็ดแป้งหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาคด้วยใบตี 2 แบบ คือ ใบตีแบบเรียบ และใบตีแบบกลม โดยเครื่องลดอนุภาคถูกติดตั้งใช้งานในกระบวนการอบแห้งแป้ง จากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างแป้งเพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อหาปริมาณน้ำหนักของเม็ดแป้งแต่ละขนาด และแสดงผลรวมขนาดของอนุภาคตามลำดับ

4.5.1 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบเรียบ และทดลองกับแป้งมันสำปะหลังดิบ

ตามรูปที่ 4.10 พบว่า ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบก่อนผ่านเครื่องลดขนาด ใบตีแบบเรียบ มีค่า D80 เท่ากับ 61.90 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D80 ลดลงเหลือเท่ากับ 54.71 ไมโครเมตร และเปรียบเทียบที่ค่า D50 ตามรูปที่ 4.11 พบว่า ก่อนผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 เท่ากับ 53.21 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 ลดลงเหลือเท่ากับ 41.82 ไมโครเมตร



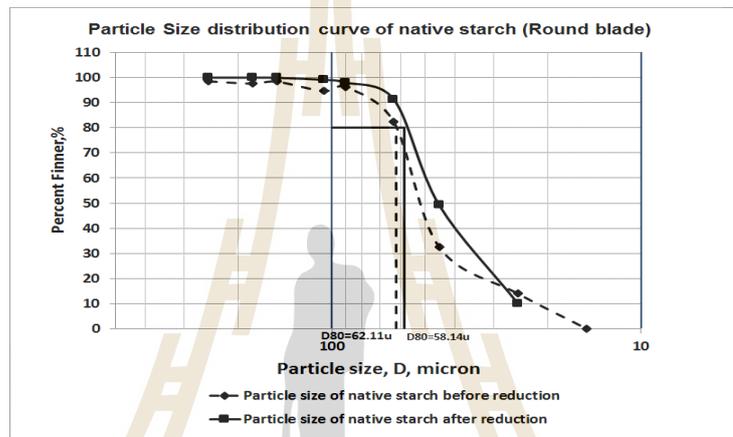
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อน และหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบเรียบ ที่ค่า D80



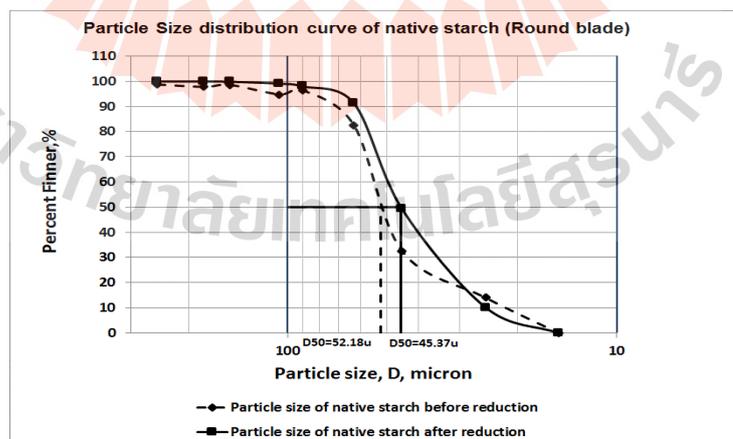
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบเรียบ ที่ค่า D50

4.5.2 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบกลม และทดลองกับแป้งมันสำปะหลังดิบ

ตามรูปที่ 4.12 พบว่า ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบก่อนผ่านเครื่องลดขนาด ใบตีแบบกลม มีค่า D80 เท่ากับ 62.11 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D80 ลดลงเหลือเท่ากับ 58.14 ไมโครเมตร และเปรียบเทียบที่ค่า D50 ตามรูปที่ 4.13 พบว่า ก่อนผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 เท่ากับ 52.18 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 ลดลงเหลือเท่ากับ 45.37 ไมโครเมตร

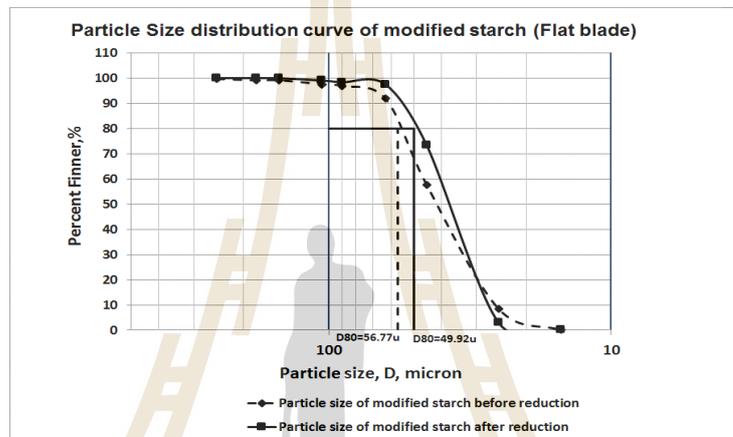


รูปที่ 4.12 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบกลม ที่ค่า D80

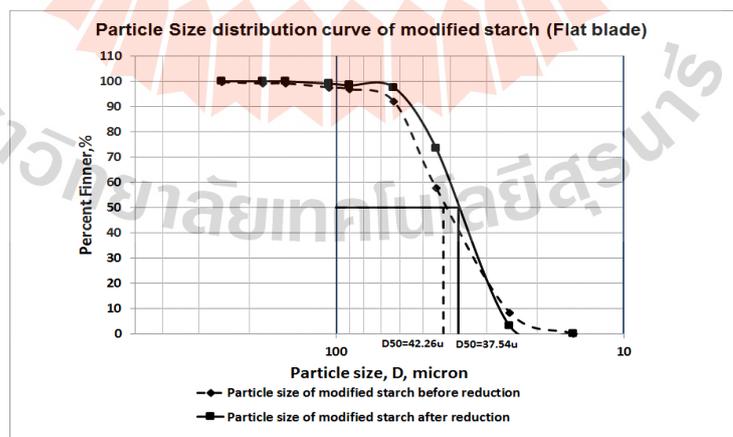


รูปที่ 4.13 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบกลมที่ค่า D50

4.5.3 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบเรียบ และทดลองกับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ตามรูปที่ 4.14 พบว่า ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรก่อนผ่านเครื่องลดขนาด ใบตีแบบเรียบ มีค่า D80 เท่ากับ 56.77 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D80 ลดลงเหลือเท่ากับ 49.92 ไมโครเมตร และเปรียบเทียบที่ค่า D50 ตามรูปที่ 4.15 พบว่า ก่อนผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 เท่ากับ 42.26 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 ลดลงเหลือเท่ากับ 37.54 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบเรียบ ที่ค่า D80



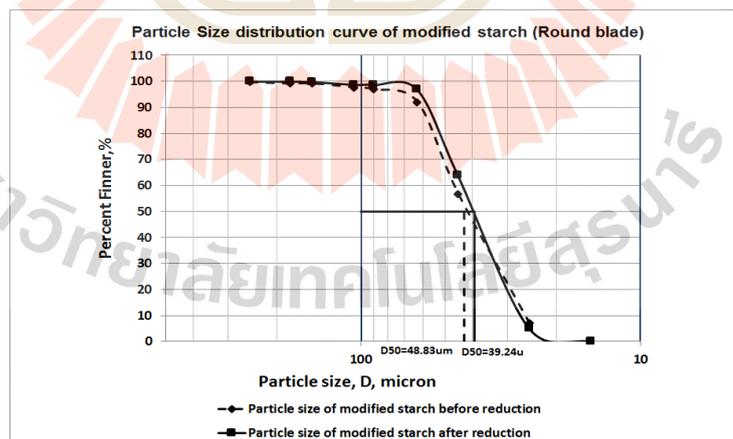
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบเรียบ ที่ค่า D50

4.5.4 เครื่องลดขนาดอนุภาคใส่ใบตีแบบกลม และทดลองกับแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปตามรูปที่ 4.16 พบว่า ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปก่อนผ่านเครื่องลดขนาด ใบตีแบบกลม มีค่า D80 เท่ากับ 56.85 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D80 ลดลงเหลือเท่ากับ 52.62 ไมโครเมตร และเปรียบเทียบที่ค่า D50 ตามรูปที่ 4.17 พบว่า ก่อนผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 เท่ากับ 48.83 ไมโครเมตร และหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีค่า D50 ลดลงเหลือเท่ากับ 39.24 ไมโครเมตร

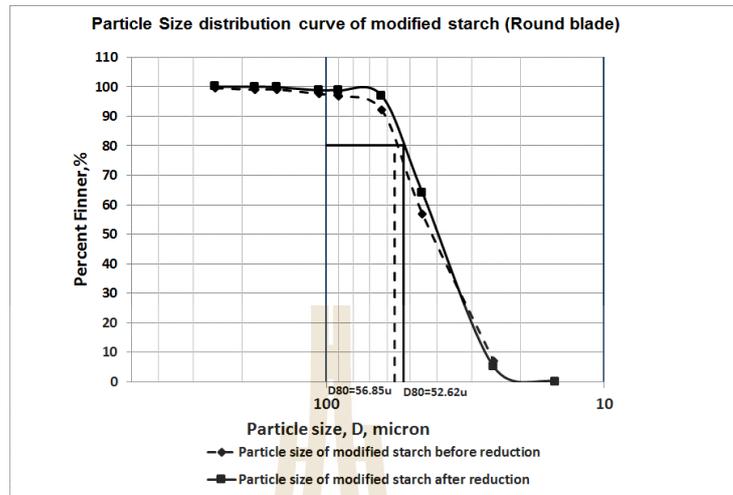
ซึ่งสรุปภาพรวมผลการทดลองการกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ก่อนและหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค

รูปแบบใบตี	ชนิดแป้งมันสำปะหลัง	ขนาด D80 (ไมโครเมตร)		ขนาด D50 (ไมโครเมตร)	
		ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	ก่อนผ่าน	หลังผ่าน
ใบเรียบ	แป้งมันสำปะหลังดิบ	61.90	54.71	53.21	41.82
	แป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป	56.77	49.92	42.26	37.54
ใบกลม	แป้งมันสำปะหลังดิบ	62.11	58.41	52.18	45.37
	แป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป	56.85	52.62	48.83	39.24



รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดใบตีแบบกลม ที่ค่า D80



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร ก่อนและหลังการผ่านเครื่องลดขนาดไบตีแบบกลม ที่ค่า D50

4.6 การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นรวมของแป้งมันสำปะหลัง ทำการสุ่มตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันมันสำปะหลังตัดแปรร หลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาคเม็ดแป้ง เพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นรวมด้วยเครื่อง Tapped bulk density ตามวิธีมาตรฐานตาม ASTM D6393 : Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices ได้แสดงผลตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นรวมแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร ก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค

รูปแบบไบตี	ชนิดแป้งมันสำปะหลัง	ค่าความหนาแน่นรวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)		เพิ่มขึ้น (ร้อยละ)
		ก่อนผ่าน	หลังผ่าน	
ไบเรียบ	แป้งมันสำปะหลังดิบ	575.12	720.54	25.29
	แป้งมันสำปะหลังตัดแปรร	575.14	703.70	22.35
ไบกลม	แป้งมันสำปะหลังดิบ	573.41	658.49	14.84
	แป้งมันสำปะหลังตัดแปรร	571.60	655.57	14.69

ตามตารางที่ 4.6 พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมเบ็งมันสำปะหลังดิบและเบ็งมันสำปะหลังคัดแปร เมื่อผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาคด้วยรูปแบบใบพัดแบบใบเรียบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเบ็งมันสำปะหลังดิบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 575.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 720.54 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 25.29 และเบ็งมันสำปะหลังคัดแปร มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 575.14 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 703.70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 22.35

เมื่อใช้รูปแบบใบพัดแบบใบกลม พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมเบ็งมันสำปะหลังดิบ และเบ็งมันสำปะหลังคัดแปร มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเบ็งมันสำปะหลังดิบมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 573.41 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 658.49 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.84 และเบ็งมันสำปะหลังคัดแปร มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 571.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 655.57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.69

4.7 การวิเคราะห์ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดเบ็งมันสำปะหลัง

ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดเบ็งมันสำปะหลัง วัดด้วยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Power meter) โดยวัดพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องลดขนาดอนุภาค จากการทดลองได้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าตามตารางที่ 4.7

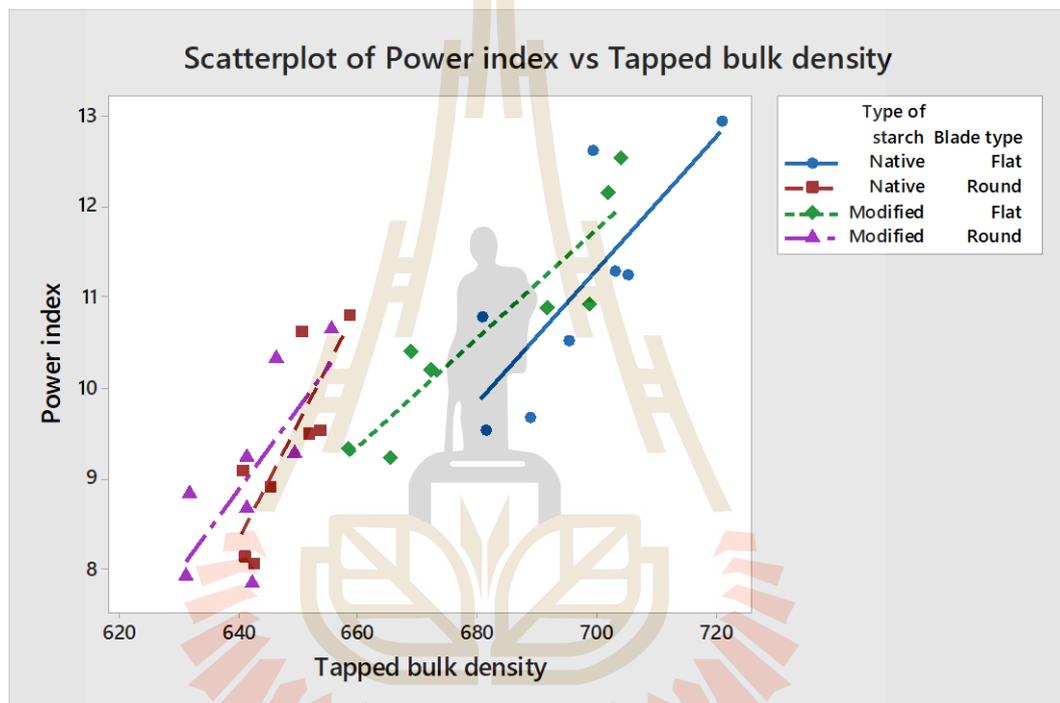
ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดเบ็งมันสำปะหลัง

รูปแบบใบ ตี	ชนิดเบ็งมันสำปะหลัง	อัตราบ่อน (ton/h)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ค่าดัชนีการใช้ พลังงานไฟฟ้า (kWh/ton)
ใบเรียบ	เบ็งมันสำปะหลังดิบ	7	90.49	12.93
	เบ็งมันสำปะหลังคัดแปร	7	87.66	12.52
ใบกลม	เบ็งมันสำปะหลังดิบ	7	76.56	10.94
	เบ็งมันสำปะหลังคัดแปร	7	74.43	10.63

ตามตารางที่ 4.7 พบว่า ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดเบ็งมันสำปะหลังดิบ ด้วยเครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใบพัดแบบเรียบ มีค่า 12.93 กิโลวัตต์ - ชม.ต่อตันเบ็ง และเบ็งมันสำปะหลังคัดแปร มีค่า 12.52 กิโลวัตต์ - ชม.ต่อตันเบ็ง และเมื่อเดินเครื่องลดขนาดอนุภาคแบบใบพัดแบบกลมสำหรับเบ็งมันสำปะหลังดิบ มีค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ

10.94 กิโลวัตต์ - ชม.ต่อตันแป้ง และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีค่า 10.63 กิโลวัตต์ - ชม.ต่อตันแป้งตามลำดับ

เมื่อนำค่าความหนาแน่นรวมแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พล็อตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง พบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นเช่นกันแสดงตามรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังกับค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

4.8 การวิเคราะห์ผลคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรก่อนและหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค

ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ไปทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแป้ง เพื่อยืนยันผลคุณสมบัติของแป้งว่าคงเหมือนเดิม ทั้งก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค ซึ่งผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของแป้งมันสำปะหลังดิบ แสดงตามตารางที่ 4.8 และผลการวัดค่าพารามิเตอร์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร แสดงตามตารางที่ 4.9 ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบ

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบ

Parameter	unit	Specification	Before	After
Moisture (%w/w)	%	13.0 Max.	11.4	11.4
pH		5.0-7.0	5.5	5.5
Viscosity	BU	700 Min.	800	801
Whiteness		90 Min	94	94
Residue on 325 mesh (%w/w)	%	0.100 Max	0.055	0.055
Conductivity 21 Be'	μ S	300 Max	280	280
Residue on filter paper (%w/w)	%	0.15 Max.	0.13	0.13

จากตารางที่ 4.8 พบว่า คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบยังคงมีค่าใกล้เคียง หรือเหมือน
ทั้งก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค ซึ่งเป็นการยืนยันผลการว่าการเดินเครื่องลดขนาด
อนุภาคไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดิบ

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

Parameter	unit	Specification	Before	After
Moisture (%w/w)	%	11.5-14.5	12.4	12.4
pH		4.5-6.5	5.5	5.5
Viscosity	BU	600 Min.	790	792
Whiteness		92 Min	92.5	92.5
Degree of substitution	mol/AGU	0.015-0.020	0.0186	0.0186
Residue on 325 mesh (%w/w)	%	0.05 Max	0.04	0.04
Conductivity 21 Be'	μ S	300 Max	280	280
Residue on filter paper (%w/w)	%	0.20 Max.	0.15	0.15

จากตารางที่ 4.9 พบว่า คุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรยังคงมีค่าใกล้เคียง หรือ
เหมือน ทั้งก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค ซึ่งเป็นการยืนยันผลการว่าการเดินเครื่องลด
ขนาดอนุภาคไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

4.9 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งเบ็งมันสำปะหลัง กรณีการเดินและไม่เดินผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเดินเบ็งมันสำปะหลังส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีค่าเฉลี่ย 564.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 631.24-720.54 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้สามารถบรรจุเบ็งได้น้ำหนักต่อถุงเพิ่มขึ้นจากขนาดบรรจุ 850 กิโลกรัม เป็น 900 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อนำเบ็งดังกล่าวบรรจุเข้าตู้ขนาด 20 ฟุต ได้เพิ่มขึ้นจากเดิม 17 ตัน เป็น 18 ตัน ในส่วนของเบ็งขนาดบรรจุ 25 กิโลกรัม สามารถบรรจุเข้าตู้ขนาด 20 ฟุต ได้เพิ่มขึ้นจากเดิม 17 ตัน เป็น 20 ตัน ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเบ็งมันสำปะหลังลดลง โดยได้ทำการเปรียบเทียบกรณีขนส่งจากโรงงานที่อำเภอบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ ไปลงเรือที่ท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี และมีปลายทางที่ท่าเรือเมืองเซียงไฮ้ ประเทศจีน ทั้งนี้แสดงรายละเอียดเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งเบ็งมันสำปะหลังได้ตามตารางที่ 4.10

จากตารางที่ 4.10 พบว่า เมื่อเดินเบ็งมันสำปะหลังผ่านเครื่องลดขนาดอนุภาค จะทำให้มีค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าเท่ากับ 46.55 บาทต่อตันเบ็ง แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถบรรจุเบ็งเข้าตู้ได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเบ็งมันสำปะหลังต่อตู้ขนาด 20 ฟุต ลดลง โดยเบ็งมันสำปะหลังขนาดบรรจุถุง 25 กิโลกรัม ค่าใช้จ่ายในการขนส่งลดลงจากเดิม 1,470 บาทตันเบ็ง เหลือ 1,296.05 บาทต่อตันเบ็ง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ 173.95 บาทต่อตันเบ็ง และเบ็งมันสำปะหลังขนาดบรรจุถุง 850 กิโลกรัม ค่าใช้จ่ายในการขนส่งลดลงจากเดิม 1,470 บาทต่อตันเบ็ง เหลือ 1,434.88 บาทต่อตันเบ็ง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้ 35.12 บาทต่อตันเบ็ง ในปี 2561 ทางโรงงานส่งออกเบ็งมันสำปะหลังรวมทั้งหมด 270,000 ตัน ส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งได้สูงถึง 28,224,540 ล้านบาท

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการขนส่งแป้งมันสำปะหลัง กรณีการเดินและไม่เดินผ่าน
เครื่องลดขนาดอนุภาค

Item	Detail	Unit	Before Milling	After Milling
1	Electrical cost			
1.1	Power index	kWh/ton	0.00	12.93
1.2	Electrical price	Baht/kWh	3.60	3.60
1.3	Electrical cost	Baht/ton	0.00	46.55
2	Transferring cost for 25 kg			
2.1	Loading to container 20 ft for 25kg	Ton/container	17.00	20.00
2.2	Transferring cost	Baht/container	24,990.00	24,990.00
		Baht/ton	1,470.00	1,249.50
2.3	Total cost	Baht/ton	1,470.00	1,296.05
2.4	Cost saving	Baht/ton	0.00	-173.95
3	Transferring cost for 850 kg			
3.1	Loading to container 850 ft for 25kg	Ton/container	17.00	18.00
3.2	Transferring cost	Baht/container	24,990.00	24,990.00
		Baht/ton	1,470.00	1,388.33
3.3	Total cost	Baht/ton	1,470.00	1,434.88
3.4	Cost saving	Baht/ton	0.00	-35.12
4	Total cost saving			
4.1	Year 2018 SMS Group Exported	Ton/year	270,000	270,000
4.2	Transferring cost per year	Baht/year	396,900,000	368,675,460
4.3	Transferring cost saving per year	Baht/year	0	-28,224,540

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะแปรผันตรงต่อความหนาแน่นรวม โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล 2 ระดับ ประกอบด้วย 5 ปัจจัย ได้แก่ รูปแบบใบพัด ความเร็วปลายใบพัด ชนิดแป้งมันสำปะหลัง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และอัตราการป้อน จากนั้นวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เพื่อคัดกรองผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการลดขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

5.2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

5.3 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

5.4 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

5.5 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังและค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

5.6 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

5.1 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการลดขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล 2 ระดับ พบว่าผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ รูปแบบใบพัดเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมากที่สุด รองลงมาคือความเร็วปลายใบพัด และปัจจัยอันดับที่สามคือ ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง โดยใบพัดแบบเรียบ (Flat type) ส่งผลกระทบต่อขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งได้มากกว่าใบพัดแบบกลม (Round type) นั้นแสดงว่าใบพัดแบบเรียบซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าสามารถส่งผ่านแรงฟาดกระทบได้มากกว่าใบพัดแบบกลมที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า ทำให้ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดเล็กลง ซึ่งขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบหลังผ่านเครื่องลดขนาดแบบใบพัดเรียบ มีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 22.9 เป็นร้อยละ 53.4 ในส่วนของแป้งมันสำปะหลังคัดแปรหลังผ่านเครื่องลดขนาดมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 ไมโครเมตร เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 46.2 เป็นร้อยละ 67.5 และค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะเพิ่มขึ้นจาก 575.1 เป็น 720.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในส่วนของปัจจัยด้านความเร็วปลายใบพัด สรุปได้ว่าความเร็วที่ 88 เมตรต่อวินาที ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งได้มากกว่าที่ความเร็ว 76 เมตรต่อวินาที เนื่องจากแรงกระทำต่อเม็ดแป้งที่เกิดจากความเร็วเชิงมุมมีมากกว่านั่นเอง และปัจจัยสุดท้ายที่ส่งผลกระทบต่อขนาด คือ ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งมันสำปะหลังดิบมีหลังผ่านเครื่องลดขนาด มีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ทั้งนี้เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยกว่าจากการที่ไม่ได้เติมสารเคมี

ในขณะที่ผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ผลกระทบร่วมระหว่างรูปแบบใบพัด และความเร็วปลายใบพัด กล่าวคือ เมื่อใช้ใบพัดแบบเรียบ และเดินที่ความเร็วรอบ 88 เมตรต่อวินาที จะส่งผลให้การลดขนาดอนุภาคได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีแรงกระทำต่อเม็ดแป้งมากขึ้น รองลงมาคือผลกระทบร่วมระหว่างรูปแบบใบพัด และชนิดของแป้งมันสำปะหลัง กล่าวคือ เมื่อใช้ใบพัดแบบเรียบ และเดินด้วยแป้งมันสำปะหลังดิบ จะส่งผลให้การลดขนาดอนุภาคได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากมีแรงกระทำมากขึ้น และแป้งมันสำปะหลังดิบมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลังคัดแปรนั่นเอง

5.2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล 2 ระดับ พบว่าผลกระทบหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ความเร็วปลายใบพัด รองลงมาคือ รูปแบบใบพัด ชนิดแป้งมันสำปะหลัง และอัตราการป้อน ตามลำดับ โดยค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังไม่มีผลกระทบต่อค่าการใช้พลังงานในการลดขนาด โดยที่ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที จะใช้พลังงานในการลดขนาดมากกว่าที่ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 76 เมตรต่อวินาที เนื่องจากความแรงกระทำต่อเม็ดแป้งมีมากกว่าทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าเช่นกัน

โดยผลกระทบร่วมของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วปลายใบพัด และอัตราการป้อน ตามด้วยความเร็วปลายใบพัด และความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และสุดท้ายเป็นความเร็วปลายใบพัด และรูปแบบใบพัด ตามลำดับ

ในส่วนการกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ก่อน และหลังผ่านเครื่องลดขนาด พบว่า เครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบเรียบส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ได้ดีกว่าเครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบกลม โดยการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อนำไปร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเพื่อคัดขนาดอนุภาค พบว่า แป้งมันสำปะหลังดิบมีค่า D80 ลดลงจาก 61.90 ไมโครเมตร เหลือ 54.71 ไมโครเมตร และที่ขนาด D50 แป้งมันสำปะหลังดิบมีค่าลดลงจาก 53.21 ไมโครเมตร เหลือ 41.82 ไมโครเมตร สำหรับแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีค่า D80 ลดลงจาก 56.77 ไมโครเมตร เหลือ 49.92 ไมโครเมตร และที่ขนาด D50 แป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีค่าลดลงจาก 42.26 ไมโครเมตร เหลือ 37.54 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะ และค่าการใช้พลังงาน พบว่า เครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบเรียบ มีความสามารถในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ได้สูงกว่าเครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบกลม เนื่องจากค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังดิบมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 564.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เป็น 720.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 27.5 และค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร มีค่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ 563.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็น 703.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 24.9 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาคุณสมบัติทางกลของแป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี และแป้งมันฝรั่ง โดย Mateusz STASIAK และคณะ (2013) พบว่า อนุภาคของเม็ดแป้ง

ที่มีขนาดเล็กประมาณ 11.95 - 22.90 ไมโครเมตร ทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของแป้งมีค่าประมาณ 725 - 986 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

สำหรับค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบเรียบ ใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดมากกว่าเครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบกลม โดยเครื่องลดขนาดแบบใบตีแบบเรียบใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 12.9 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง สำหรับแป้งมันสำปะหลังดิบ และใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 12.5 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง สำหรับแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ladan Jafari naimi (2015) ได้ทดลองเกี่ยวกับแบบจำลองการลดขนาดหลู้อเมริกาในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องบดแบบใบมีด พบว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อต้องการลดขนาดของอนุภาคให้มีขนาดเล็กลง

ตามผลงานวิจัยของ Yakubu Fuseini Juuna (2017) ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของแป้งข้าวสาลีมีค่า 10.37 - 13.52 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง ซึ่งขนาดอนุภาคของแป้งข้าวสาลีมีขนาดใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังที่ขนาด 10 - 30 ไมโครเมตร ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าของแป้งมันสำปะหลังมีค่า 7.28 - 12.93 กิโลวัตต์ - ชั่วโมงต่อตันแป้ง

5.3 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง

สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะมากที่สุดเท่ากับ 720.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คือ เติบด้วยแป้งมันสำปะหลังดิบ ใช้ใบพัดแบบเรียบ อัตราการบด 7,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 11.4 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 88 เมตรต่อวินาที

5.4 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เพื่อให้ได้ค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังต่ำที่สุดเท่ากับ 7.82 กิโลวัตต์ - ชม.ต่อตันแป้ง คือ เติบด้วยแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ใช้ใบพัดแบบกลม อัตราการบด 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 11.4 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 76 เมตรต่อวินาที

5.5 สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังและค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง

สถานะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยต่อค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะของแป้งมันสำปะหลังและค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง คือ เติมน้ำมันสำปะหลังดิบ ด้วยใบพัดแบบเรียบ ที่ความเร็วปลายใบพัดเท่ากับ 76 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนที่ 8,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความชื้นของแป้งที่ 12.4 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะเท่ากับ 688.74 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าดัชนีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 9.66 กิโลวัตต์ – ชั่วโมงต่อตันแป้ง

5.6 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยหลักไว้ทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย รูปแบบใบพัด ความเร็วปลายใบพัด ชนิดแป้งมันสำปะหลัง ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง และอัตราการป้อน ทั้งนี้หากกระบวนการอบแห้งแป้งมันสำปะหลังมีหลักการที่เปลี่ยนแปลงจากระบบอบแห้งแบบ Flash dryer และรวมถึงชนิดของแป้งมันสำปะหลังที่อาจมีหลากหลายเพิ่มขึ้นในอนาคต ดังนั้นการศึกษาถึงปัจจัยหลักอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามบริบทที่กล่าวมาข้างต้น

รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 292 หน้า
- กล้าณรงค์ ศรีรอด, กาญจนา ภูโรจนวงศ์ และ วิไล สันติโสภาศรี. (2541). โครงสร้างของอะไมโลส อะไมโลเพกตินและคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้จากเกษตรศาสตร์ 50 ในอายุ ต่างๆกัน. ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 36, 3-5 กุมภาพันธ์ 2541, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จรัญ จันทลักขณา. (2523). สถิติวิธีวิเคราะห์และวางแผนงานวิจัย. กรุงเทพฯ บริษัท สำนักพิมพ์ไทย วัฒนาพานิชจำกัด.
- A.D. Srikanth, Tangirala, K. Charithkumar and T.K. Goswami.(2014). **Modeling of size reduction, Particle size analysis and flow characterization of spice powders ground in hammer and pin mills.** International Journal of Research in Engineering and Technology. 296 – 300.
- Advances in Potato Chemistry and Technology. (2009), Elsevier Inc., 2009. 273–318.
- Banu Koç, Ismail Eren, Figen Kaymak Ertekin. (2008). **Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying.** The effect of drying method. Original Research Article. Journal of Food Engineering, Volume 85, Issue 3. 340-349
- Bule'on A., Colonna P., Planchot V., and Ball S.(1998). **Starch granules: structure and biosynthesis.** International Journal of Biological Macromolecules 23. 85 - 112.
- Carr RL.(1965). **Evaluating the flow properties of solids.** Chemical Engineering.163 - 168.
- Chetchuda chuasuwan. (2017). **Business and industry trends for tapioca starch of year 2018-2020.** [Online]. Available: <https://www.krungsri.com>
- Cochran, W.G. and G.M. Cox. (1963). **Experimental designs. reprinted edition.** Japan, Charles E. Tuttle Company
- E. Li, S. Dhital and J. Hasjim.(2014). **Effects of grain milling on starch structures and flour/starch properties.** Starch - Stärke. 1 – 10.
- L. Vogel and W. Peukert. (2005). **From single particle impact behaviour to modelling of impact mills.** Chemical Engineering Science. 5164 – 5176.

- K.S. Narasimhan, M.O.H. Amuda. (2001). **Powder Characterization. Encyclopedia of Materials : Science and Technology (Second Edition)**. Module in Materials Science and Materials Engineering. 7781 - 7788.
- L. Wang, P. Wang, A. S. M. Saleh, Q. Yang, Y. Ge, N. Wang, S. Yang and Z. Xiao. (2018). **Influence of fluidized bed jet milling on structural and functional properties of normal maize starch**. *Starch - Stärke*, vol. 70. 1 – 11.
- Montgomery. (2005). **Design and Analysis of Experiments**. 6th ed. The United States of America: John Wiley & Sons, INC.
- M. D. Torres, R. Moreira, F. Chenlo, M. H. Morel and C. Barron. (2014). **Physicochemical and structural properties of starch isolated from fresh and dried chestnuts and chestnut flour properties of chestnut starch**. *Food Technology and Biotechnology*. 135 – 139.
- P. Fellows. (2002). **Food Processing Technology**. 2nd ed. Woodhead Publishing Limited. 98–116.
- Pablo Juliano. (2005). **Food Engineering Series. Size Reduction**. Springer, Boston, MA. 157 – 173
- Outlook, biannual report on global food markets. *Global Market Analysis*. [Online]. Available: <http://www.fao.org>
- Levy A. and Borde. (1999). **Steady-state one-dimensional flow for a pneumatic dryer**. *Chemical Engineering and Proceedings*. 121 – 130.
- Thorpe G.R. (1975). **Pneumatic Conveying Driers**. Chemical Industry Development, Incorporating CP&E. 13 – 19.
- Silva M.A. and Correa J.L.G. (1998). **Using DryPak to simulate drying process in Drying'98**. *Proceedings of the 11th International Drying Symposium*. Vol. A. 303 – 310



ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

วรรณภย์ บุญรอง, สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ และสุภกิจ รูปจันทร์. (2563). ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 30 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2563.

Wunlop Boonrong, Somsak Siwadamrongpong. (2019). **THE STUDY OF PARAMETER AFFECT PARTICLE SIZE REDUCTION OF TAPIOCA STARCH ON DRYING PROCESS.** The 19th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. March 14 - 15 2019, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam.

Wunlop Boonrong, Somsak Siwadamrongpong, Supakit Rooppakhun. (2019). **The Study Of Parameter Affecting on Particle Size Reduction Of Tapioca Starch And In Drying Process.** The 3rd International Conference on Innovative Engineering Materials ICIEM 2019. 25 April, 2019. Bali, Indonesia.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการอบแห้ง

วรรณภรณ์ บุญรอง และ สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุภกิจ รูปจันทร์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 8165 82770 อีเมล: somsaksi@sut.ac.th

รับเมื่อ 28 พฤษภาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 19 กรกฎาคม 2562 ตอรับเมื่อ DD MMMM YYYY

DOI: 10.14416/j.kmutnb.YYYY.MM.NO.© 2015 King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

All Rights Reserved

บทคัดย่อ

ในปี 2561 ประเทศไทยมีการส่งออกแป้งมันสำปะหลังดิบ 3.1 ล้านตัน มูลค่า 1,037.0 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 1.0 ล้านตัน มูลค่า 617.8 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ และคาดการณ์มูลค่าการส่งออกจะเพิ่มขึ้นทุกปี ดังนั้นการผลิตขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นรวม สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรจุด้วยถุงบรรจุภัณฑ์ขนาดเท่าเดิม ทำให้ปริมาณขนส่งต่อสูงขึ้นซึ่งจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการส่งออกได้ จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง โดยออกแบบ สร้าง รวมถึงติดตั้งใช้งานเครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้กำหนดอัตราการไหลของมวลอากาศผ่านเครื่องลดขนาดไว้คงที่เท่ากับ 60,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และกำหนดปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย คือ ชนิดแป้งมันสำปะหลัง, อัตราการป้อน, ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง, รูปแบบใบพัด, และความเร็วปลายใบพัด ในงานวิจัยนี้เครื่องลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะถูกติดตั้งในกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งใช้วัตถุดิบเป็นแป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ในการทดลองได้วัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกิโลวัตต์มิเตอร์ ค่าความหนาแน่นของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นรวม และขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐาน โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการวิเคราะห์ผลทางสถิติ จากการทดลองพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังมากที่สุดคือรูปแบบของใบพัด ตามด้วยความเร็วปลายใบพัด, ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง, ความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการป้อนเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังน้อยที่สุด ซึ่งขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบหลังผ่านเครื่องลดขนาดมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง D80 ลดลงจากเดิม 61.90 ไมโครเมตร เป็น 54.71 ไมโครเมตร ที่ D50 ลดลงจากเดิม 53.21 ไมโครเมตร เป็น 41.82 ไมโครเมตร และค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นจาก 575.12 เป็น 720.54 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรหลังผ่านเครื่องลดขนาดมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง D80 ลดลงจากเดิม 56.77 ไมโครเมตร เป็น 49.92 ไมโครเมตร ที่ D50 ลดลงจากเดิม 42.26 ไมโครเมตร เป็น 37.54 ไมโครเมตรและค่าความหนาแน่นรวมเพิ่มขึ้นจาก 575.14 เป็น 703.70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งนี้ค่าดัชนีการใช้พลังงานพบว่าผลกระทบของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานมากที่สุดคือความเร็วปลายใบพัด รองลงมาคือรูปแบบของใบพัด, ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง, อัตราการป้อน ตามลำดับ ในขณะที่ความชื้นของแป้งมันสำปะหลังเป็นผลกระทบหลักที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการใช้พลังงานน้อยที่สุด โดยแป้งมันสำปะหลังดิบมี

ค่าดัชนีการใช้พลังงานเพื่อลดขนาดอนุภาคเท่ากับ 9.52-12.92 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อตันแป้ง และแป้งมันสำปะหลังตัดแปรร
มีค่าดัชนีการใช้พลังงานอยู่ในช่วง 9.22-12.52 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อตันแป้ง

คำสำคัญ: การลดขนาด, แป้งมันสำปะหลัง, ความเร็วปลายใบ, ดัชนีการใช้พลังงาน, การออกแบบการทดลองแบบ
แฟคทอเรียล



Parameters Affecting Particle Size Reduction of Tapioca Starch in Drying

Process

Wunlop Boonrong and Somsak Siwadamrongpong*

School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima, Thailand

Supakit Rooppakhun

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon
Ratchasima, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 0 8165 82770, E-mail : somsaksi@sut.ac.th

Received 28 May 2019 ; Revised 19 July 2019 ; Accepted DD MMMM YYYY

DOI: 10.14416/j.kmutnb.YYYY.MM.NO.© 2015 King Mongkut's University of Technology North
Bangkok. All Rights Reserved

Abstract

In 2018, Thailand exported 3.1 million tons of native tapioca starch, worth 1,037.0 million US dollars. And modified tapioca starch, 1.0 million tons, worth 617.8 million US dollars. And forecast the export value will increase every year. Therefore, reducing the particle size of tapioca starch helps increase tapped bulk density. Can increase the weight with the same size packaging bag. Resulting in higher transportation volumes which will help save on export costs. The objective of this research was to determine the parameter affect to a particle size reduction of tapioca starch. Involved with design, fabrication and installation on factory to produce tapioca starch. For test method the flow of air through with reducing machine is constant of $60,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. In addition, this machine was installed on drying process. The test material used as native tapioca starch and modified tapioca starch. The energy was measured by kilowatt-hour meter. A bulk density to analysis with tapped bulk density equipment and analysis a particle size with sieve analyzer. This research was conducted under a factorial design, which is the most commonly used method for screening the primary and the combined effect of each factor. It was found that the strongest main factor influence to a particle size reduction was type of blade, followed by tip speed of blade, type of tapioca starch, moisture of material and feed rate respectively. It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off on D80 were decrease from 61.90 micron to 54.71 micron and on D50 were decrease from 53.21 micron to 41.82 micron and the tapped bulk density increased from 575.12 to 720.54 kg m^{-3} . And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80 were decrease from 56.77 micron to 49.92 micron and on D50 were decrease from 42.26 micron to 37.54 micron and the tapped bulk density increased from 575.14 to 703.70 kg m^{-3} . On the energy consumption was found that tip speed have to significant influence followed by type of blade, type of tapioca starch, feed rate and moisture of material respectively. And the energy index for native tapioca starch was 9.52 - $12.92 \text{ kWh ton}^{-1}$ and modified tapioca starch was 9.22 - $12.52 \text{ kWh ton}^{-1}$.

Keywords : Particle size reduction, Tapioca starch, Tip speed, Energy index, Fractional factorial design.



1. Introduction

Tapioca Industry of Thailand consist of tapioca starch production, tapioca processing industry and the continuous industry that uses the products of processing. The main products of the tapioca processing industry are tapioca chips and tapioca starch. Exports amounted to 3.84 million metric tons. It is worth 1,795 million dollar. [1] The export value of tapioca starch is likely to increase, respectively. If you can increase the weight of transportation to the cabinet. By the method of increasing total density of tapioca starch. This makes it can increase the weight of the package by the same size, reduce the cost of export by 9.7 %, or about 16.5 million dollar per year, and reduce amount of packaging by 10.5 % or about 6.5 million dollar per year.[2] It also reduces the burden of waste that occurs after use of the packaging.

Particle size reduction is the process by which smaller particles are compressed by compression, shear, impact, rubbing, and cutting. It is found that each method can be used in different constraints, depending on the type and size of the material. [3] Reduction of particle size of tapioca starch, The average particle size was 45-63 micron at 10-14% of moisture base on dry basis. [4] The appropriate method is to strike by centrifugal force from the blades, tapioca starch has the right angular velocity. The impact force against the impact plate or wall of the machine. Then the particles of tapioca starch are broken down and separated from each other until the particle size decreases. Average diameter of 5-35 micron according to standard size of tapioca starch. [5]

The purpose of this research is to study the factors affecting the reduction of tapioca starch particle size as well as to design and install the particle size reduction system of tapioca starch installed at the tapioca starch factory. The scope of this research is determination of factors expected to affect the reduction of particle size of tapioca starch. The type of tapioca starch, tip speed of blade, type of blade, feed rate and moisture content of tapioca starch. The results from tapped density, cumulative distribution and the particle size of tapioca starch were evaluated. Because the particle size of the tapioca starch varies with tapped bulk density.

2. Methodology

2.1 Experiment apparatus

This research was designed by using a 3D program (Solid works), which has a different type of blade. They have round and flat type blade, as shown in Figure 1, and then installed in a drying process in a starch factory. The main components consist of three phase induction motor, 110 kW, a speed control with variable speed drive (VSD) as shown in Figure 2. The machine was experimented with the system as planned.

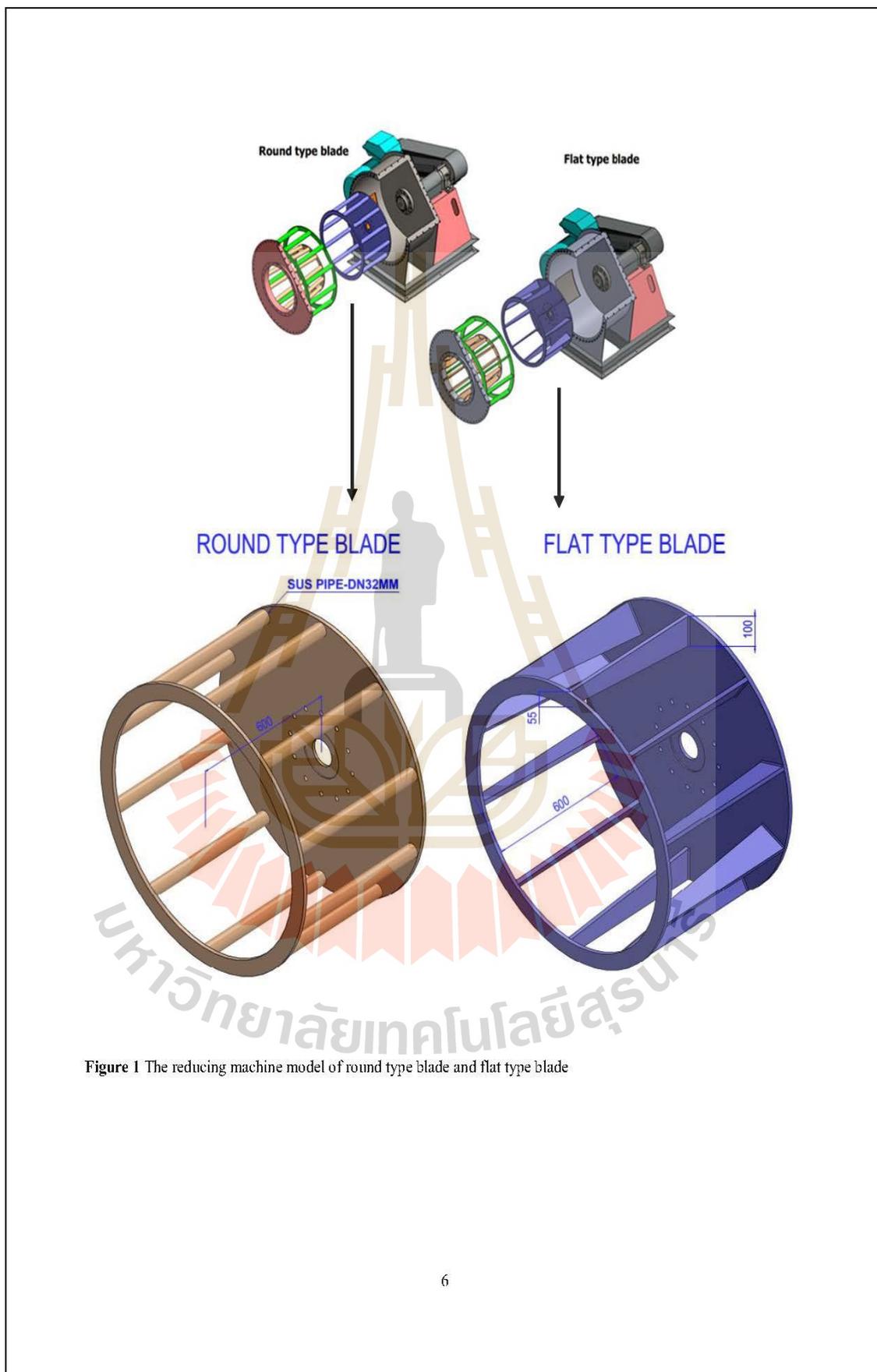


Figure 1 The reducing machine model of round type blade and flat type blade

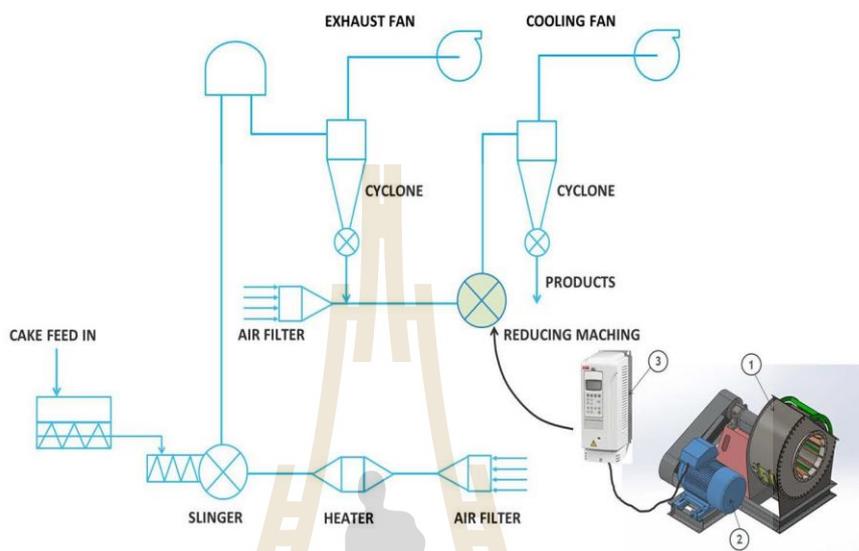


Figure 2 Install location and components of the reducing machine

2.2 Technique

This research was conducted under a factorial design, which is the most commonly used method for screening the primary effects of each factor and the combined effect of each factor. Which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. All trials (2^5) as 32 experiments. The production volume of 1,000 tons of starch was tested. And Table 1 was experimental design and experimental results.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Table 1 Experimental design and experimental results.

Std order	Type of starch	Blade type	Feed rate (kg h ⁻¹)	Moisture (%)	Tip speed (m s ⁻¹)	Tapped bulk density (kg m ⁻³)	Power consumption (kW-hr)
1	Native	Flat	7000	11.4	76	695.01	73.57
2	Native	Flat	7000	12.4	76	680.57	75.41
3	Native	Flat	8000	11.4	76	681.31	76.14
4	Native	Flat	8000	12.4	76	688.74	77.29
5	Native	Round	7000	11.4	76	645.23	62.24
6	Native	Round	7000	12.4	76	640.58	63.48
7	Native	Round	8000	11.4	76	642.39	64.42
8	Native	Round	8000	12.4	76	640.87	65.06
9	Modified	Flat	7000	11.4	76	672.15	71.27
10	Modified	Flat	7000	12.4	76	668.76	72.70
11	Modified	Flat	8000	11.4	76	665.36	73.76
12	Modified	Flat	8000	12.4	76	658.28	74.50
13	Modified	Round	7000	11.4	76	641.18	60.51
14	Modified	Round	7000	12.4	76	631.71	61.72
15	Modified	Round	8000	11.4	76	642.15	62.63
16	Modified	Round	8000	12.4	76	631.24	63.25
17	Native	Flat	7000	11.4	88	720.54	90.49
18	Native	Flat	7000	12.4	88	699.25	88.23
19	Native	Flat	8000	11.4	88	705.12	89.85
20	Native	Flat	8000	12.4	88	702.87	90.15
21	Native	Round	7000	11.4	88	658.49	75.56
22	Native	Round	7000	12.4	88	650.58	74.28
23	Native	Round	8000	11.4	88	653.51	76.21
24	Native	Round	8000	12.4	88	651.64	75.89
25	Modified	Flat	7000	11.4	88	703.70	87.66
26	Modified	Flat	7000	12.4	88	701.73	85.05
27	Modified	Flat	8000	11.4	88	698.57	87.26
28	Modified	Flat	8000	12.4	88	691.47	86.90
29	Modified	Round	7000	11.4	88	655.57	74.43
30	Modified	Round	7000	12.4	88	646.23	72.21
31	Modified	Round	8000	11.4	88	649.23	74.09
32	Modified	Round	8000	12.4	88	641.28	73.78

3. Results

3.1 Analysis of impact factors the affecting of tapped bulk density.

Data analysis was performed using the Minitab V16 Variance Table. The Variance Table shows the main effects and the effect of any factors that affected the response at significant level 0.05. Analysis of impact factors the affecting of tapped bulk density. The ANOVA in Table 2 shows the main effects of factors affecting total density, Which are consisted of type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. The P-value of this factor is less than 0.05 and R-square (adj) is 99.98%. There is just enough to acceptable for data fitting.

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) for tapped bulk density.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	20781.8	1385.5	66.86	0.000
Linear	5	19973.2	3994.6	192.78	0.000
Type of starch	1	781.0	781.0	37.69	0.000
Blade type	1	15822.0	15822.0	763.58	0.000
Feed rate	1	141.3	141.3	6.82	0.019
Moisture	1	336.1	336.1	16.22	0.001
Tip speed	1	2892.8	2892.8	139.61	0.000
2-Way Interactions	10	808.6	80.9	3.90	0.008
Type of starch*Blade type	1	147.4	147.4	7.12	0.017
Type of starch*Feed rate	1	12.1	12.1	0.58	0.457
Type of starch*Moisture	1	3.6	3.6	0.17	0.683
Type of starch*Tip speed	1	77.0	77.0	3.72	0.072
Blade type*Feed rate	1	33.5	33.5	1.62	0.222
Blade type*Moisture	1	0.4	0.4	0.02	0.893
Blade type*Tip speed	1	464.3	464.3	22.41	0.000
Feed rate*Moisture	1	53.1	53.1	2.56	0.129
Feed rate*Tip speed	1	9.6	9.6	0.46	0.505
Moisture*Tip speed	1	7.7	7.7	0.37	0.552
Error	16	331.5	20.7		
R-sq = 100% R-sq(adj) = 99.98% R-sq(pred) = 99.55%					

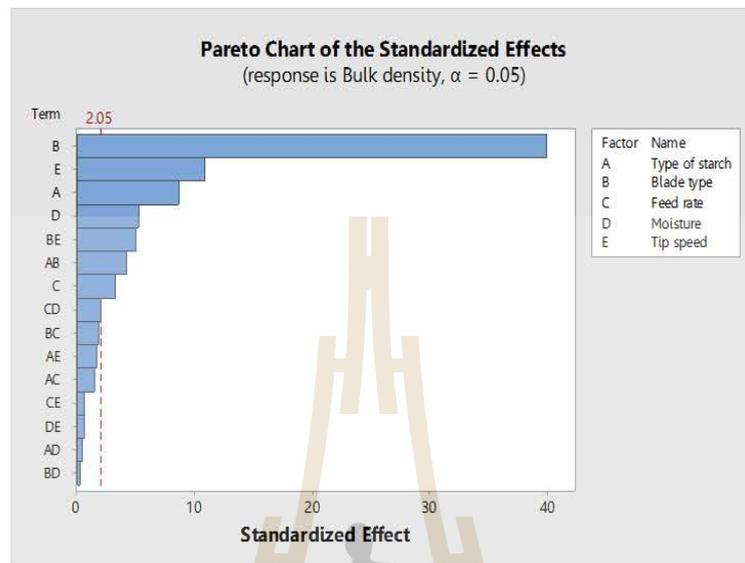


Figure 3 Pareto graph showing the proportions of the main effects and the combined effect of the factors affecting tapped density.

Figure 3 shows the proportion of major impacts and the combined effects of factors affecting tapped bulk density of tapioca starch. It is obvious that the propeller pattern is the main effect that results in the highest tapped bulk density.

3.2 Analysis of impact factors affecting the energy consumption.

The ANOVA in Table 3 shows the main effects of factors affecting the energy consumption, which are consisted of type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. The P-value of this factor is less than 0.05 and R-square (adj) is 99.95%. There is just enough to acceptable the data.

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for energy consumption

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	2643.00	176.20	666.12	0.000
Linear	5	2616.20	523.24	1978.09	0.000
Type of starch	1	44.06	44.06	166.58	0.000
Blade type	1	1243.38	1243.38	4700.58	0.000
Feed rate	1	14.27	14.27	53.95	0.000
Moisture	1	0.04	0.04	0.17	0.688
Tip speed	1	1314.43	1314.43	4969.18	0.000
2-Way Interactions	10	26.80	2.68	10.13	0.000
Type of starch*Blade type	1	1.32	1.32	5.01	0.040
Type of starch*Feed rate	1	0.00	0.00	0.00	0.965
Type of starch*Moisture	1	0.10	0.10	0.39	0.543
Type of starch*Tip speed	1	0.28	0.28	1.07	0.316
Blade type*Feed rate	1	0.08	0.08	0.29	0.597
Blade type*Moisture	1	0.09	0.09	0.32	0.578
Blade type*Tip speed	1	8.83	8.83	33.38	0.000
Feed rate*Moisture	1	1.17	1.17	4.41	0.052
Feed rate*Tip speed	1	3.73	3.73	14.11	0.002
Moisture*Tip speed	1	11.20	11.20	42.33	0.000
Error	16	4.23	0.26		

R.sq = 100% R.sq(adj) = 99.95% R.sq(pred) = 99.50%

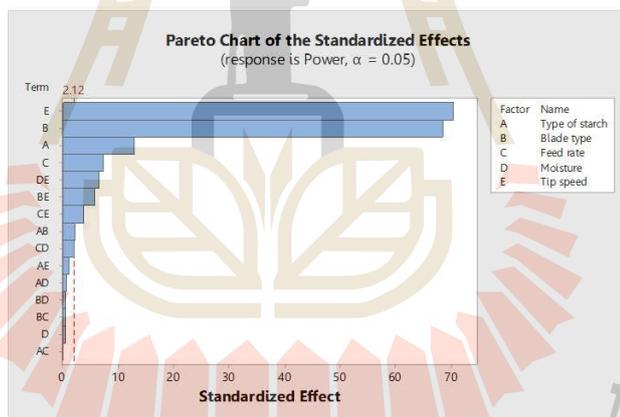


Figure 4 Pareto graph showing the proportion of major impacts and the combined effect of factors affecting energy consumption.

Figure 4 shows the proportion of major impacts and the combined effects of factors influencing energy consumption on the reduction of particle size of tapioca starch. It is clear that the tip speed of blade is the main effect that results in the most energy consumption. Secondly, similar to the type of blade Which can be do that both the tip

speed and the blade type are the main factors that affect the energy consumption index in reducing the particle size of tapioca starch.

3.3 Analysis of powder particle distribution.

Analysis of particle distribution by sieving through a standard sieve to determine the weight of each granule. The particle size of tapioca starch (D80) was decreased after using flat blade from 69.10 to 54.71 micron as shown in Figure 5. And D50 was decreased after using flat blade from 53.21 to 41.82 micron as shown in Figure 6. Similarly, using round blade D80 was decreased from 62.11 to 58.14 micron as shown in Figure 7. And D50 was decreased after using round blade from 53.21 to 41.82 micron as shown in Figure 8. The result showed the ability of flat blade to reduce particle size of native tapioca starch was better than round blade, respectively.

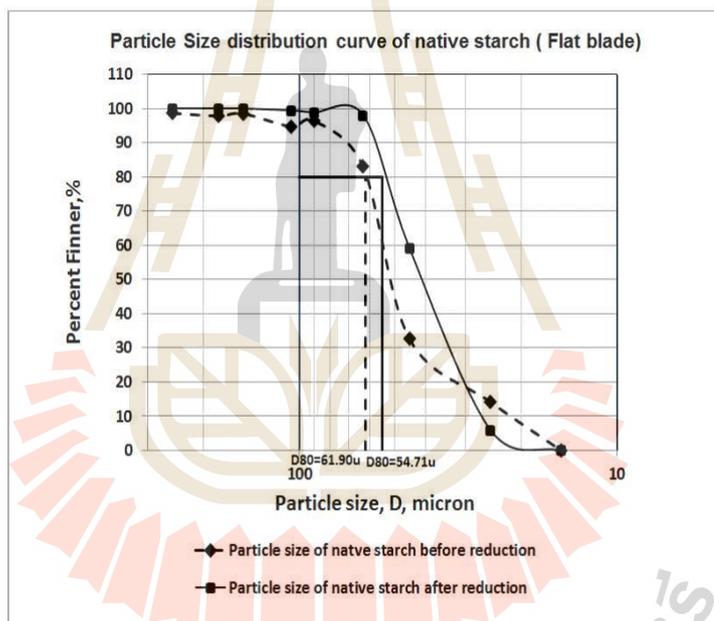


Figure 5 Distribution of native tapioca starch granules on D80 Before and after using flat blade cutter.

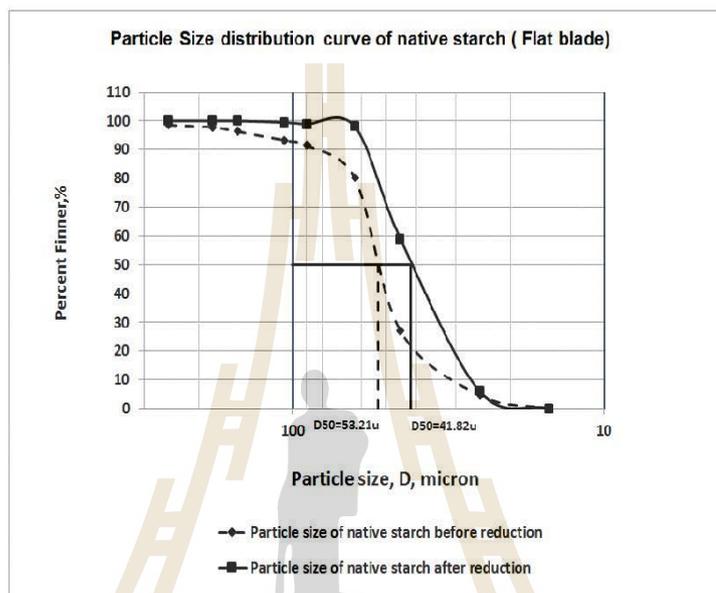


Figure 6 Distribution of native tapioca starch particles on D50. Before and after using flat blade cutter

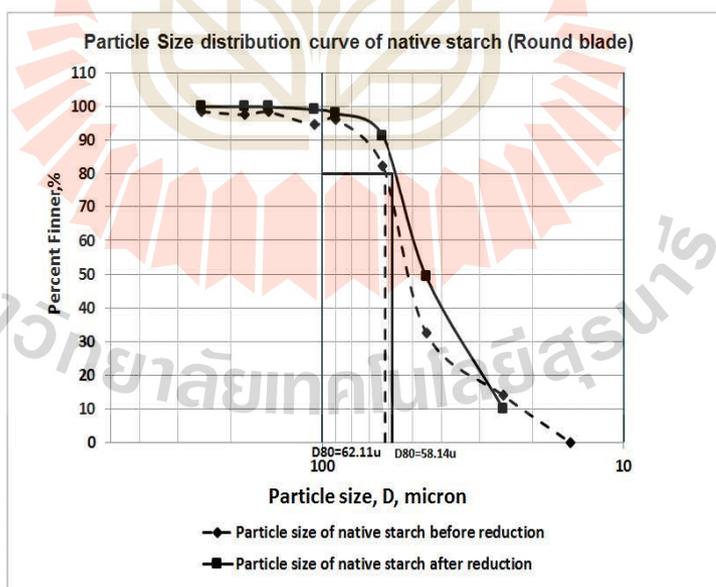


Figure 7 Distribution of native tapioca starch particles on D80. Before and after using round blade cutter

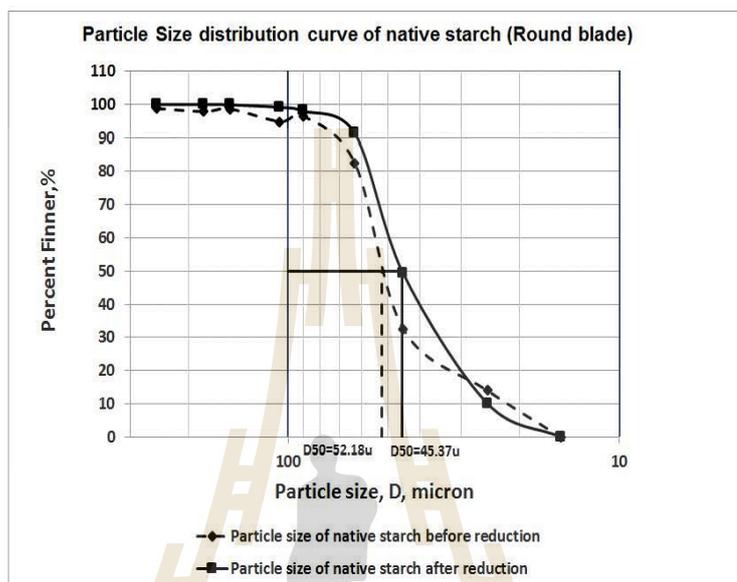


Figure 8 Distribution of native tapioca starch particles on D50. Before and after using round blade cutter

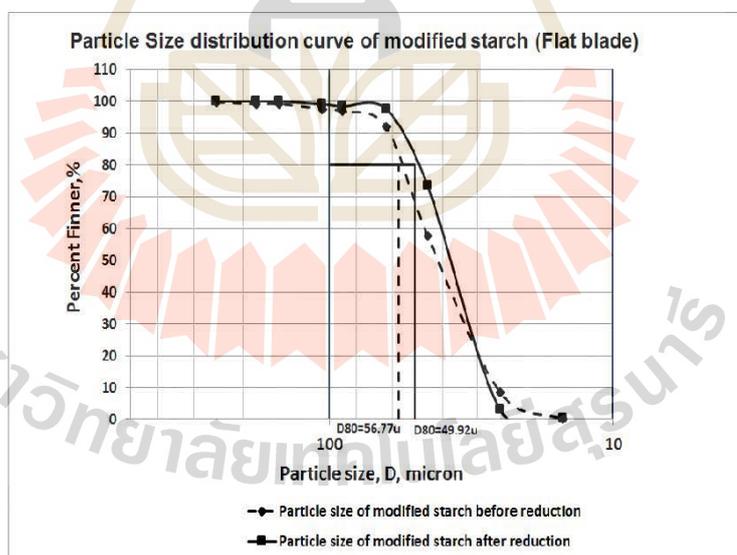


Figure 9 Distribution of modified tapioca starch particles on D80. Before and after using flat blade cutter

Figure 9 show the particle size of modified tapioca starch (D80) was decreased after using flat blade from 56.77 to 49.92 micron. And D50 was decreased after using flat blade from 42.26 to 37.54 micron as shown in Figure 10. Similarly, after using round blade D80 was decreased from 56.85 to 52.62 micron as shown in Figure 11. And D50 was decreased after using flat blade from 48.83 to 39.24 micron as shown in Figure 12. These result supports to the ability of flat blade to reduce particle size of modified tapioca starch was better than round blade as same as tapioca starch in previous test.

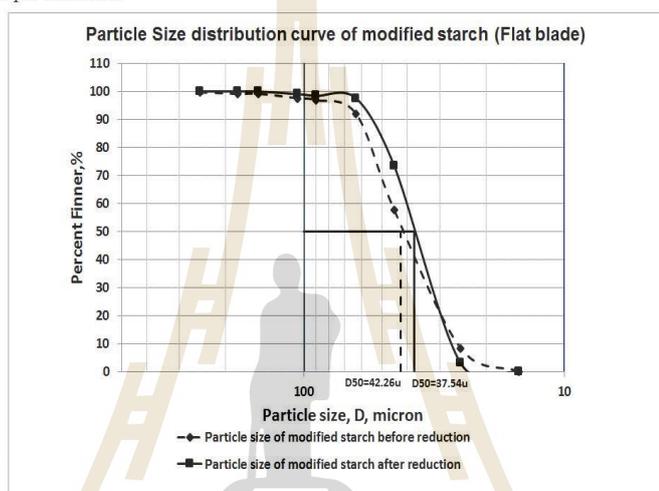


Figure 10 Distribution of modified tapioca starch particles on D50. Before and after using flat blade cutter

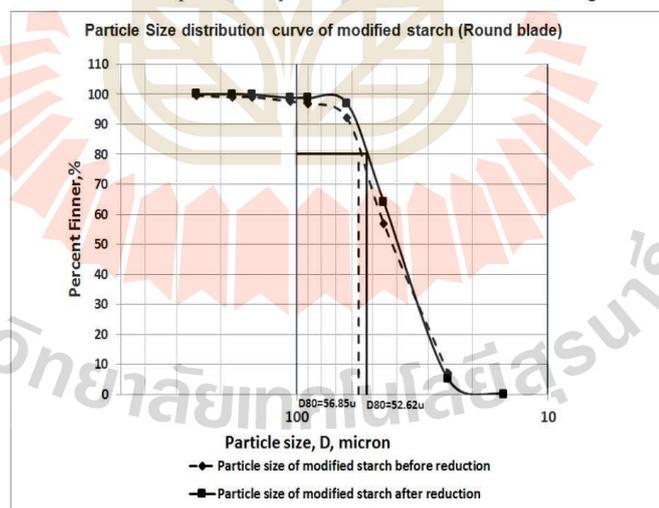


Figure 11 Distribution of modified tapioca starch particles on D80. Before and after using round blade cutter

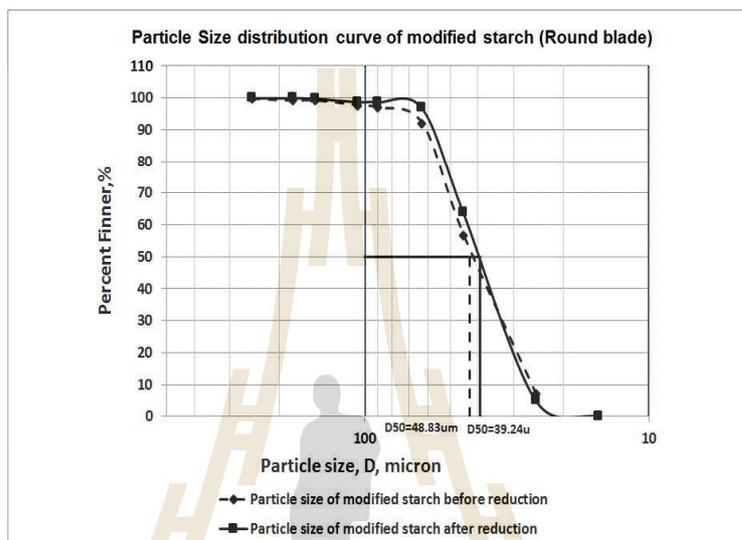


Figure 12 Distribution of modified tapioca starch granules on D50. Before and after using round blade cutter.

3.4 Analysis of Tapped Bulk Density and Energy Consumption

Tapped bulk density is determined by the Digital Tapped Density Apparatus and the energy measured by the Power Meter. According to Table 4 and Figure 13 showed the tapped bulk density of tapioca starch after using flat blade increased from 575.12 to 720.54 kg m⁻³. The power consumption was used 12.93 kW-hr ton⁻¹. Similarly, using round blade was showed the tapped bulk density increased from 573.41 to 658.49 kg m⁻³. The power consumption was 10.94 kWh ton⁻¹.

Similar experiments were performed for modified tapioca starch and similar trend of the results was observed. Tapped bulk density after using flat blade increased from 575.14 to 703.70 kg m⁻³. The power consumption was used 12.52 kW-hr ton⁻¹. Similarly, using round blade was showed the tapped bulk density increased from 571.60 to 655.57 kg m⁻³. The power consumption was 10.63 kWh. ton⁻¹.

Table 4 Tapped bulk Density and Energy Consumption

Type of starch	Blade type	Tapped Bulk density (kg per cubic meter)		%Increase	Net energy (kWh ton^{-1})
		Before	After		
Native starch	Flat	575.12	720.54	27.59%	12.93
	Round	573.41	658.49	14.84%	10.94
Modified starch	Flat	575.14	703.70	24.98%	12.52
	Round	571.60	655.57	14.69%	10.63

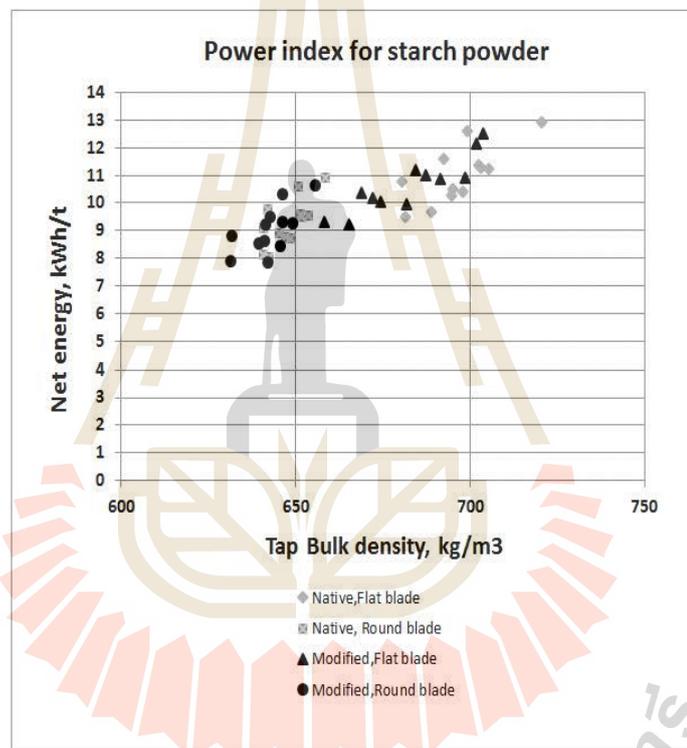


Figure 13 The total density and energy consumption to reduce the particle size of tapioca starch and modified tapioca starch.

4. Discussion

This study investigates the factors that are expected to affect the particle size reduction of tapioca starch. The particle size of the tapioca starch is varied with the tapped bulk density [7]. Two

factorial design experiments were used. Five factors were used: type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade.

From the experiment, it was found that the propeller pattern was the main factor affecting the

particle size reduction of the most tapioca starch. Followed by the tip speed And the third factor is Types of Tapioca Starch The flat type blade has a greater impact on the reduction of the size of the powder particles than the round type. This means that the rotor blades, which have a more exposed surface area, can pass over the impact force more than round blade with less exposed surfaces Causing the particle size of the tapioca starch to be smaller Which the particle size of tapioca starch after reduce with reducer The particle size of 25 micron of starch granules increased from 22.9 percent to 53.4 percent and the tapped bulk density increased from 575.1 to 720.5 kg.m^{-3} . In the modified tapioca starch after reducing, the particle size of 25 micron of starch granules increased from 46.2 percent to 67.5 percent and the tapped bulk density increased from 575.1 to 703.7 kg.m^{-3} [6]. The next factor is the tip speed of 88 m.s^{-1} . Affecting the particle size reduction of starch granules at a speed of 76 m.s^{-1} , due to the high force impact on starch granules caused by angular velocity[8] And the lasted factor affecting the size reduction is the type of tapioca starch Found that the native tapioca starch has passed through the reducing machine With particle size of starch granules smaller than modified tapioca starch this is because the bond strength between the particles is less than that of not adding chemicals[9].

The factors influencing the energy consumption in reducing the particle size of tapioca starch were: tip speed of blade, type of blade, type of tapioca starch and feed rate, respectively. And the moisture of material did not affect to energy

consumption of tapioca starch. The result indicated that energy of reducing the particle size of tapioca starch relatively to tip speed of blade.

Distribution of tapioca starch and modified tapioca starch before and after using reduction process, Flat type blades have greater effect than round type blades for dispersion of tapioca starch and modified tapioca starch. The D80 was 54.17 micron for tapioca starch and D80 was 49.92 micron for modified tapioca starch, respectively.

In conclusion, we have utilized the reducing machine to give the smaller particle size of tapioca starch. The flat type blade could be reduced the particle size with high capacity for the relatively smooth blade, which exhibited more forceful impact than round blade. The tapped bulk density of tapioca starch and modified tapioca starch up to 27.59 % and 24.98 %, respectively. In terms of power consumption, the reducing machine in the presence of flat type blade used more energy than round type blade in 12.93 and 12.52 kW-hr ton^{-1} , respectively for modified tapioca starch.

5. Conclusion

In this study was found that the strongest main factor influence to a particle size reduction was type of blade, followed by tip speed of blade, type of tapioca starch, moisture of material and feed rate respectively. It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off D80 were decrease from 61.90 micron to 54.71 micron and on D50 were decrease from 53.21 micron to 41.82

micron and the tapped bulk density increased from 575.12 to 720.54 kg m⁻³. And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80 were decrease from 56.77 micron to 49.92 micron and on D50 were decrease from 42.26 micron to 37.54 micron and the tapped bulk density increased from 575.14 to 703.70 kg m⁻³. On the energy consumption was found that tip speed have to significant influence followed by type of blade, type of tapioca starch, feed rate and moisture of material respectively. And the energy index for native tapioca starch was 9.51-12.92 kWh.ton⁻¹ and modified tapioca starch was 9.22-12.52 kWh.ton⁻¹.

6. Acknowledgements

I would like to take this opportunity to express my sincere appreciation and gratitude to my company, the Siam Modified Starch Co., Ltd. and Institute of Engineering, Suranaree University of Technology for partial support on funding and laboratory.

7. References

- [1] Adam Prakash. (2017, November 10). *Food Outlook, biannual report on global food markets. Global Market Analysis*. [Online]. Available: <http://www.fao.org>
- [2] Chetchuda chuasuwan. (2017, August 15). *Business and industry trends for tapioca starch of year 2018-2020*. [Online]. Available: <https://www.krungsri.com>
- [3] P. Fellows, *Food Processing Technology*. 2nd ed., Woodhead Publishing Limited. 2000, pp. 98–116.
- [4] A.D. Srikanth, Tangirala, K. Charithkumar and T.K. Goswami, "Modeling of size reduction, Particle size analysis and flow characterization of spice powders ground in hammer and pin mills," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 1, no. 12, pp. 296–300, 2014.
- [5] M. D. Torres, R. Moreira, F. Chenlo, M. H. Morel and C. Barron, "Physicochemical and structural properties of starch isolated from fresh and dried chestnuts and chestnut flour properties of chestnut starch," *Food Technology and Biotechnology*, vol. 52, no. 1, pp. 135–139, 2014.
- [6] L. Vogel and W. Peukert, "From single particle impact behaviour to modelling of impact mills," *Chemical Engineering Science*, vol. 60, no. 18, pp. 5164–5176, 2005.
- [7] L. Wang, P. Wang, A. S. M. Saleh, Q. Yang, Y. Ge, N. Wang, S. Yang and Z. Xiao, "Influence of fluidized bed jet milling on structural and functional properties of normal maize starch," *Starch - Stärke*, vol. 70, no. 11–12, pp. 1–11, 2018.
- [8] E. Li, S. Dhital and J. Hasjim, "Effects of grain milling on starch structures and flour/starch properties," *Starch - Stärke*, vol. 66, no. 1–2, pp. 1–10, 2014.
- [9] *Advances in Potato Chemistry and Technology*, 1st ed., 2009 Elsevier Inc., 2009, pp. 273–318.

THE STUDY OF PARAMETER AFFECT PARTICLE SIZE REDUCTION OF TAPIOCA STARCH ON DRYING PROCESS

Wunlop Boonrong⁽¹⁾, Somsak Siwadamrongpong⁽²⁾

⁽¹⁾⁽²⁾ School of Manufacturing Engineering : Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

*Corresponding author: somsaksi@sut.ac.th

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the parameter affect to a particle size reduction of tapioca starch. Involved with design, fabrication and installation on factory to produce tapioca starch. For test method the flow of air through with reducing machine is constant of 60,000 cubic meter per hour. which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. In addition, this machine was installed on drying process. The test material used as native tapioca starch and modified tapioca starch. A bulk density to analysis with tapped bulk density equipment and analysis a particle size with sieve analyzer. It was found that the strongest main factor influence to a particle size reduction was type of blade, followed by tip speed of blade, type of tapioca starch, moisture of material and feed rate respectively. It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off on D80 were decrease from 69.1 micron to 54.7 micron and the Tapped density increased from 575.1 to 720.5 kg per cubic meter. And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80 were decrease from 56.7 micron to 49.9 micron and the tapped bulk density increased from 575.1 to 703.7 kg per cubic meter.

Keywords: Particle size reduction, Tapioca starch, Tapped bulk density, Tip speed, and Fractional factorial design.

1. INTRODUCTION

Tapioca Industry of Thailand consist of tapioca starch production, tapioca processing industry and the continuous industry that uses the products of processing. The main products of the tapioca processing industry are tapioca chips and tapioca starch. Exports amounted to 3.84 million metric tons. It is worth 1,795 million dollar or approximately 62,850 million baht. [1] The export value of tapioca starch is likely to increase, respectively. If you can increase the weight of transportation to the cabinet. By the method of increasing total density of tapioca starch. This makes it can increase the weight of the package by the same size, reduce the cost of export by 9.7 percent, or about 545 million baht per year, and reduce amount of packaging by 10.5 percent or about 214 million baht per year [2]. It also reduces the burden of waste that occurs after use of the packaging.

Particle size reduction is the process by which smaller particles are compressed by compression, shear, impact, rubbing, and cutting. It is found that each method can be used in different constraints, depending on the type and size of the material. [3] Reduction of particle size of tapioca starch, The average particle size was 45-63 micron at 10-14% basis. [4] The appropriate method is to strike by centrifugal force from the blades, tapioca starch has the right angular velocity. The impact force against the impact plate or wall of the machine. Then the particles of tapioca starch are broken down and separated from each other until the particle size decreases. Average diameter of 5-35 micron according to standard size of tapioca starch. [5]

The purpose of this research is to study the factors affecting the reduction of tapioca starch particle size as well as to design and install the particle size reduction

system of tapioca starch installed at the tapioca starch factory. The scope of this research is determination of factors expected to affect the reduction of particle size of tapioca starch. The type of tapioca starch, tip speed of blade, type of blade, feed rate and moisture content of tapioca starch. The results from total density, cumulative distribution and the particle size of tapioca starch were evaluated. Because the particle size of the tapioca starch varies with total density. When we have the smaller particle size of the tapioca starch, tapped bulk density will increase[7].

2. EXPERIMENT

2.1 Experiment apparatus

This research was designed by using a 3D program (Solid works), which has a different type of blade, as shown in Fig.1, and then installed in a drying process in a starch factory. The main components consist of three phase induction motor, 110 kW, a speed control with variable speed drive (VSD) as shown in Fig.2. The machine was experimented with the system as planned.

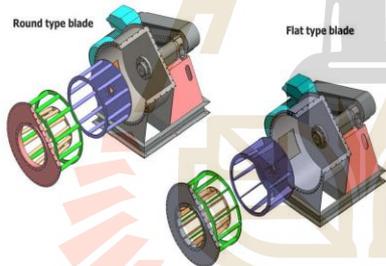


Fig.1. The reducing machine model of round type blades and flat type blades.

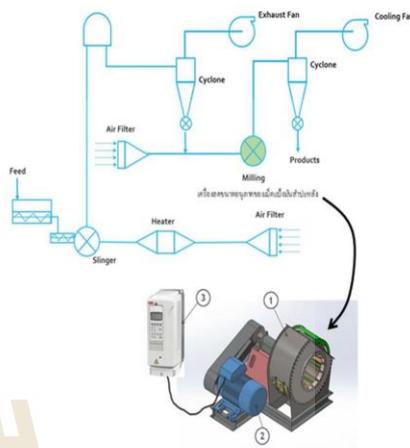


Fig.2. Installation location and components of the tapioca starch granulator.

2.2 Technique

This research was conducted under a factorial design, which is the most commonly used method for screening the primary effects of each factor and the combined effect of each factor. Which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. All trials (2⁵) as 32 experiments. The factors and levels of factors used in the experiments are shown in Table 1. The production volume of 200 tons of starch was tested.

Table 1. Factors of machining and level of factors used in the experiment.

Cutting parameters	Unit	Levels	
		Low	High
Type of starch	-	Native	Modified
Blade type	-	Round	Flat
Feed rate	kg/h	7000	8000
Moisture	%	11.4	12.4
Tip speed	m/s	76	88

3. ANALYSIS

Data analysis was performed using the Minitab V16 Variance Table. The Variance Table shows the main effects and the effect of any factors that affected the response at significant level 0.05.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of impact factors the affecting of Tapped bulk density.

The ANOVA in Table 3 shows the main effects of factors affecting total density, Which are consisted of type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. The P-value of this factor is less than 0.05 and R-square (adj) is 99.98%. There is just enough to acceptable for data fitting.

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) for tapped density Factors of machining and level of factors used in the experiment.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	20781.8	1385.5	66.86	0.000
Linear	5	19973.2	3994.6	192.78	0.000
Type of starch	1	781.0	781.0	37.69	0.000
Blade type	1	15822.0	15822.0	763.58	0.000
Feed rate	1	141.3	141.3	6.82	0.019
Moisture	1	336.1	336.1	16.22	0.001
Tip speed	1	2892.8	2892.8	139.61	0.000
2-Way Interactions	10	808.6	80.9	3.90	0.008
Type of starch*Blade type	1	147.4	147.4	7.12	0.017
Type of starch*Feed rate	1	12.1	12.1	0.58	0.457
Type of starch*Moisture	1	3.6	3.6	0.17	0.683
Type of starch*Tip speed	1	77.0	77.0	3.72	0.072
Blade type*Feed rate	1	33.5	33.5	1.62	0.222
Blade type*Moisture	1	0.4	0.4	0.02	0.893
Blade type*Tip speed	1	464.3	464.3	22.41	0.000
Feed rate*Moisture	1	53.1	53.1	2.56	0.129
Feed rate*Tip speed	1	9.6	9.6	0.46	0.505
Moisture*Tip speed	1	7.7	7.7	0.37	0.552
Error	16	331.5	20.7		
R-sq = 100% R-sq(adj) = 99.98% R-sq(pred) = 99.55%					

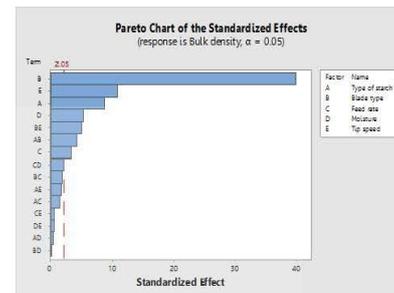


Fig.3. Pareto graph showing the proportions of the main effects and the combined effect of the factors affecting total density.

Analysis of particle distribution by sieving through a standard sieve to determine the weight of each granule. The particle size cut off on D80 of tapioca starch was decreased after using flat blade from 69.1 micron to 54.7 micron as shown in Fig.4. Similarly, using round blade find a particle size cut off on D80 was decreased from 62.1 micron to 58.1 micron as shown in Fig.5.

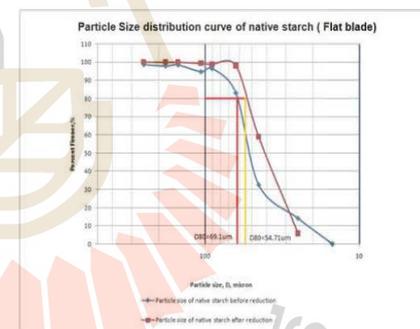


Fig.4. Distribution of tapioca starch granules. Before and after using flat blade cutter.

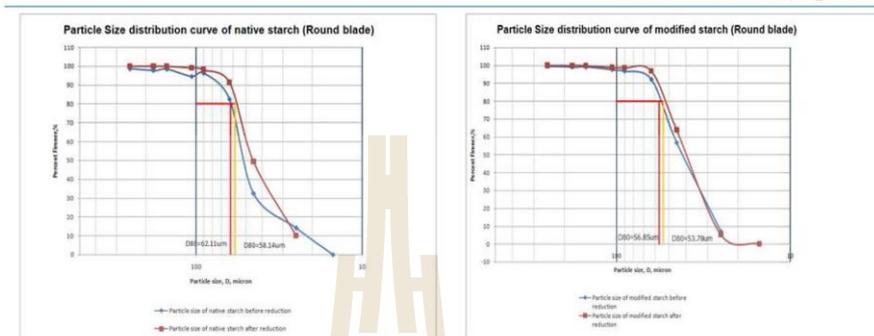


Fig.5. Distribution of tapioca starch granules. Before and after using round blade.

Fig.7. Distribution of modified tapioca starch granules. Before and after using round blade.

The result showed the ability of flat blade to reduce particle size of tapioca starch was better than round blade, respectively. **Fig.6.** show the particle size cut off on D80 of modified tapioca starch was decreased after using flat blade from 56.7 micron to 49.9micron. And after using round blade D80 was decreased from 56.8 micron to 53.7 micron as shown in **Fig.7.** These result supports to the ability of flat blade to reduce particle size of modified tapioca starch was better than round blade as same as tapioca starch in previous test.

5. CONCLUSIONS

This study investigates the factors that are expected to affect the particle size reduction of tapioca starch. The particle size of the tapioca starch is varied with the total density. Two factorial design experiments were used. Five factors were used: type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade.

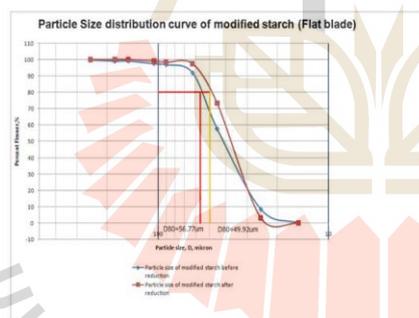


Fig.6. Distribution of modified tapioca starch granules. Before and after using flat blade.

The experiments, it was found that the type of blade was the most significant factor affecting tapped bulk density and second, tip speed of blade. Flat type blades have a greater effect on tapped bulk density than round shape blades, which means that smooth blades are more forceful impact than round blades. Indicating the smaller size of tapioca starch particles was achieved after using the flat blade cutters. As a result, It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off on D80 were decreased from 69.1 micron to 54.7 micron and the particle size diameter 25 micron increased from 22.9% to 53.4% and the Tapped density increased from 575.1 to 720.5 kg per cubic meter. And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80 were decreased from 56.7 micron to 49.9 micron. and the particle size diameter 25 micron increased from 46.2% to 67.5% and tapped bulk density increased from 575.1 to 703.7 kg per cubic meter.

Distribution of tapioca starch and modified tapioca starch before and after using reduction process, Flat type blades have greater effect than round type blades for dispersion of tapioca starch and modified tapioca starch. The particle size cut off on D80 was 54.1 micron for tapioca starch and D80 was 49.9 micron for modified tapioca starch, respectively.

ACKNOWLEDGMENT

I would like to take this opportunity to express my sincere appreciation and gratitude to my company, the Siam Modified Starch Co., Ltd. and Institute of Engineering, Suranaree University of Technology for partial support on funding and laboratory.

REFERENCES

A.D.Srikanth Tangirala, Modeling of size reduction, Particle size analysis and flow characterization of spice powders ground in hammer and pin mills, *Acharya N.G.Ranga Agricultural Univ.*, vol. 3, Issue: 12, 2014.

J.S.Tumuluru, Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws, *Energy Systems & Technologies Division, Idaho National Laboratory*, vol. 60, pp. 58-67, 2014.

Lutz Vogel, From single particle impact behaviour to modelling of impact mills, *Friedrich-Alexander-University of Erlangen-Nürnberg.*, vol. 60, pp. 4957-5182, 2005

Ladan jafari naimi, Experiments and modeling of size reduction of switchgrass in a laboratory rotary knife mill, *University of British Columbia*, 2008

PHOTOS AND INFORMATION**Wunlop Boonrong**

received the B.E. (1998) in Mechanical engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi, M.E. (2014) in Energy Management Engineering from Suranaree University of Technology. He is studying in Ph.D. degree, School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology.

**Somsak Siwadamrongpong**

received the B.E. (1995) in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology

The Study Of Parameter Affecting on Particle Size Reduction Of Tapioca Starch And In Drying Process

Wunlop Boonrong, Somsak Siwadamrongpong, Supakit Rooppakhun
School of Manufacturing Engineering : Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

Abstract— The objective of this research was to determine the parameter affect to a particle size reduction of tapioca starch. Involved with design, fabrication and installation on factory to produce tapioca starch. For test method the flow of air through with reducing machine is constant of 60,000 cubic meter per hour, which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. In addition, this machine was installed on drying process. The test material used as native tapioca starch and modified tapioca starch. A bulk density to analysis with tapped bulk density equipment and analysis a particle size with sieve analyzer. It was found that the strongest main factor influence to a particle size reduction was type of blade, followed by tip speed of blade, type of tapioca starch, moisture of material and feed rate respectively. It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off on D80 were decrease from 69.1 micron to 54.7 micron and the Tapped density increased from 575.1 to 720.5 kg per cubic meter. And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80 were decrease from 56.7 micron to 49.9 micron and the tapped bulk density increased from 575.1 to 703.7 kg per cubic meter.

Index Terms— Particle size reduction, Tapioca starch, Tapped bulk density, Tip speed, and Fractional factorial design.

I. INTRODUCTION

Tapioca Industry of Thailand consist of tapioca starch production, tapioca processing industry and the continuous industry that uses the products of processing. The main products of the tapioca processing industry are tapioca chips and tapioca starch. Exports amounted to 3.84 million metric tons. It is worth 1,795 million dollar. [1] The export value of tapioca starch is likely to increase, respectively. If you can increase the weight of transportation to the cabinet. By the method of increasing total density of tapioca starch. This makes it can increase the weight of the package by the same size, reduce the cost of export by 9.7 percent, or about 16.5 million dollar per year, and reduce amount of packaging by 10.5 percent or about 6.5 million dollar per year [2]. It also reduces the burden of waste that occurs after use of the packaging.

Particle size reduction is the process by which smaller particles are compressed by compression, shear, impact, rubbing, and cutting. It is found that each method can be used in different constraints, depending on the type and size of the material. [3] Reduction of particle size of tapioca starch, The average particle size was 45-63 micron at 10-14% of moisture base on dry basis. [4] The appropriate method is to strike by centrifugal force from the blades, tapioca starch has the right angular velocity. The impact force against the

impact plate or wall of the machine. Then the particles of tapioca starch are broken down and separated from each other until the particle size decreases. Average diameter of 5-35 micron according to standard size of tapioca starch. [5]

The purpose of this research is to study the factors affecting the reduction of tapioca starch particle size as well as to design and install the particle size reduction system of tapioca starch installed at the tapioca starch factory. The scope of this research is determination of factors expected to affect the reduction of particle size of tapioca starch. The type of tapioca starch, tip speed of blade, type of blade, feed rate and moisture content of tapioca starch. The results from tapped density, cumulative distribution and the particle size of tapioca starch were evaluated. Because the particle size of the tapioca starch varies with tapped bulk density. When we have the smaller particle size of the tapioca starch, tapped bulk density will increase. [6]

II. EXPERIMENT

A. Experiment apparatus

This research was designed by using a 3D program (Solid works), which has a different type of blade, as shown in Fig.1, and then installed in a drying process in a starch factory. The main components consist of three phase induction motor, 110 kW, a speed control with variable speed drive (VSD) as shown in Fig.2. The machine was experimented with the system as planned.

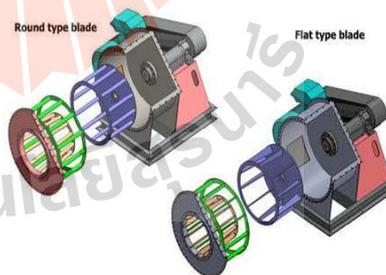


Fig.1. The reducing machine model of round type blades and flat type blades.

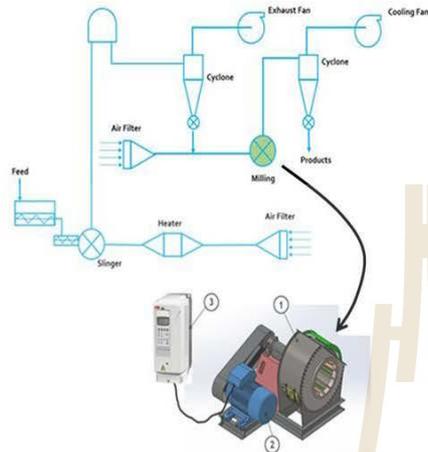


Fig.2. Installation location and components of the tapioca starch reducing machine.

B. Technique

This research was conducted under a factorial design, which is the most commonly used method for screening the primary effects of each factor and the combined effect of each factor. Which are consisted of five parameters; type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. All trials (2⁵) as 32 experiments. The factors and levels of factors used in the experiments are shown in Table 1. The production volume of 200 tons of starch was tested.

TABLE 1. FACTORS OF MACHINING AND LEVEL OF FACTORS USED IN THE EXPERIMENT

Cutting parameters	Unit	Levels	
		Low	High
Type of starch	-	Native	Modified
Blade type	-	Round	Flat
Feed rate	kg/h	7000	8000
Moisture	%	11.4	12.4
Tip speed	m/s	76	88

USED IN THE EXPERIMENT

III. ANALYSIS

Data analysis was performed using the Minitab V16 Variance Table. The Variance Table shows the main effects and the effect of any factors that affected the response at significant level 0.05.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of impact factors the affecting of tapped bulk density.

The ANOVA in Table 2 shows the main effects of factors affecting total density, Which are consisted of type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade. The P-value of this factor is less than 0.05

and R-square (adj) is 99.98%. There is just enough to acceptable for data fitting.

TABLE 2. ANALYSIS OF VARIANCE (ANOVA) FOR TAPPED DENSITY FACTORS OF MACHINING AND LEVEL OF FACTORS USED IN THE EXPERIMENT.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	20781.8	1385.5	66.86	0.000
Linear	5	19973.2	3994.6	192.78	0.000
Type of starch	1	781.0	781.0	37.69	0.000
Blade type	1	15822.0	15822.0	763.58	0.000
Feed rate	1	141.3	141.3	6.82	0.019
Moisture	1	336.1	336.1	16.22	0.001
Tip speed	1	2892.8	2892.8	139.61	0.000
2-Way Interactions	10	808.6	80.9	3.90	0.008
Type of starch*Blade type	1	147.4	147.4	7.12	0.017
Type of starch*Feed rate	1	12.1	12.1	0.58	0.457
Type of starch*Moisture	1	3.6	3.6	0.17	0.683
Type of starch*Tip speed	1	77.0	77.0	3.72	0.072
Blade type*Feed rate	1	33.5	33.5	1.62	0.222
Blade type*Moisture	1	0.4	0.4	0.02	0.893
Blade type*Tip speed	1	464.3	464.3	22.41	0.000
Feed rate*Moisture	1	53.1	53.1	2.56	0.129
Feed rate*Tip speed	1	9.6	9.6	0.46	0.505
Moisture*Tip speed	1	7.7	7.7	0.37	0.552
Error	16	331.5	20.7		
R-sq = 100% R-sq(adj) = 99.98% R-sq(pred) = 99.55%					

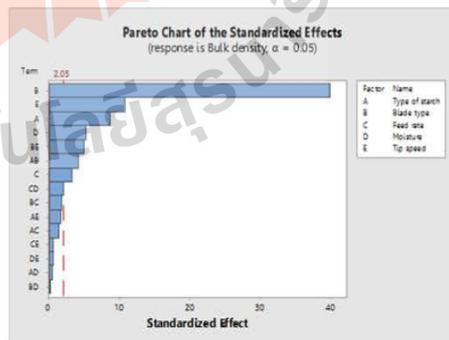


Fig. 3. Pareto graph showing the proportions of the main effects and the combined effect of the factors affecting tapped density.

Analysis of particle distribution by sieving through a standard sieve to determine the weight of each granule. The particle size cut off on D80 of tapioca starch was decreased after using flat blade from 69.1 micron to 54.7 micron as shown in Fig.4. Similarly, using round blade find a particle size cut off on D80 was decreased from 62.1 micron to 58.1micron as shown in Fig.5.



Fig. 4. Distribution of tapioca starch granules. Before and after using flat blade.

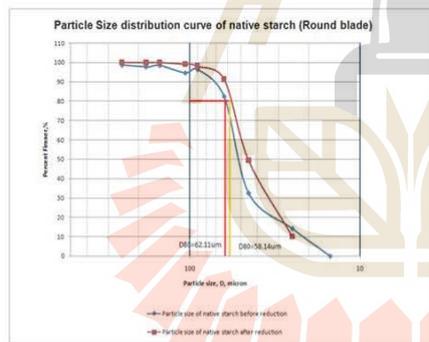


Fig. 5. Distribution of tapioca starch granules. Before and after using round blade.

The result showed the ability of flat blade to reduce particle size of tapioca starch was better than round blade, respectively. Fig. 6. show the particle size cut off on D80 of modified tapioca starch was decreased after using flat blade from 56.7 micron to 49.9 micron. And after using round blade D80 was decreased from 56.8 micron to 53.7 micron as shown in Fig. 7. These result supports to the ability of flat blade to reduce particle size of modified tapioca starch was better than round blade as same as tapioca starch in previous test.

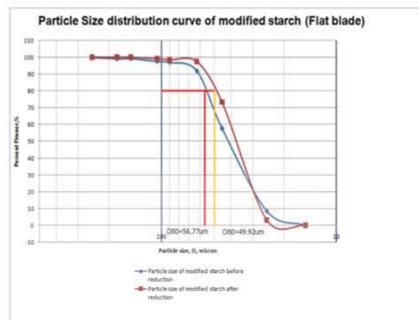


Fig 6. Distribution of modified tapioca starch granules. Before and after using flat blade.

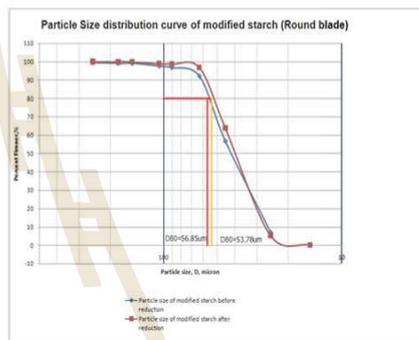


Fig. 7. Distribution of modified tapioca starch granules. Before and after using round blade.

V. CONCLUSION

This study investigates the factors that are expected to affect the particle size reduction of tapioca starch. The particle size of the tapioca starch is varied with the tapped bulk density. Two factorial design experiments were used. Five factors were used: type of tapioca starch, feed rate, moisture of material, type of blade and tip speed of blade.

The experiments, it was found that the type of blade was the most significant factor affecting particle size of tapioca starch and second, tip speed of blade. Flat type blades have a greater effect on affecting particle size of tapioca starch than round shape blades, which means that smooth blades are more forceful impact than round blades. Indicating the smaller size of tapioca starch particles was achieved after using the flat blade cutters. As a result, It was found that a particle size of native tapioca starch after through from reducing machine with flat blade type, particle size cut off on D80 were decreased from 69.1 micron to 54.7 micron and the particle size diameter 25 micron increased from 22.9% to 53.4% and the Tapped density increased from 575.1 to 720.5 kg per cubic meter. And modified tapioca starch was found particle size cut off on D80 were decreased from 56.7 micron

to 49.9 micron. and the particle size diameter 25 micron increased from 46.2% to 67.5% and tapped bulk density increased from 575.1 to 703.7 kg per cubic meter.

Distribution of tapioca starch and modified tapioca starch before and after using reduction process, Flat type blades have greater effect than round type blades for dispersion of tapioca starch and modified tapioca starch. The particle size cut off on D80 was 54.1 micron for tapioca starch and D80 was 49.9 micron for modified tapioca starch, respectively.

ACKNOWLEDGMENT

I would like to take this opportunity to express my sincere appreciation and gratitude to my company, the Siam Modified Starch Co., Ltd. and Institute of Engineering, Suranaree University of Technology for partial support on funding and laboratory.

REFERENCES

- [1,2] Adam Prakash. (November 2013). Food Outlook, bianual report on global food markets. Global Market Analysis. [Online]. pp. 32. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/i3473e/i3473e.pdf>.
- [3] P. Fellows, *Food Processing Technology*, 2nd ed. Boston, USA: Woodhead Publishing Limited, 2000, ch. 4, pp. 98-116.
- [4] A.D.Srikanth Tangirala, *Modeling of size reduction, Particle size analysis and flow characterization of spice powders ground in hammer and pin mills*, Acharya N.G.Ranga Agricultural Univ., vol. 3, Issue: 12
- [5] Maria Dolores Torres, *Physicochemical and Structural Properties of Starch Isolated from Fresh and Dried Chestnuts and Chestnut Flour Properties of Chestnut Starch*, Food Technol. Biotechnol. 52 (1) 135-139 (2014).
- [6] Lutz Vogel, From single particle impact behaviour to modelling of impact mills, Friedrich-Alexander-University of Erlangen-Nürnberg., vol. 60, pp. 4957-5182, 2005



Wunlop Boonrong

Birth of date : December 3, 1975
received the B.E. (1998) in Mechanical engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi.
M.E. (2014) in Energy Management Engineering from Suranaree University of Technology.
I 'm studying in Ph.D.degree, School of ManufacturingEngineering, Suranaree university of Technology.



Somsak Siwadamrongpong

received the B.E. (1995) in Mechanical Engineering from Chulalongkom University,
M.E. (2001) in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) in Energy Nagaoka University of Technology.
He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.



Supakit RooppakhunSomsak

received the B.E. (1999) in Mechanical Engineering from Khon Kaen University University,
M.E.(2003) in Mechanical Engineering from Khon Kaen University University,
and D.E. (2009) in Mechanical Engineering from Khon Kaen University University,
He is a lecturer, School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology



ภาคผนวก ข

มาตรฐานการทดสอบ และวิเคราะห์ต่าง ๆ

รายชื่อมาตรฐานการทดสอบ และการวิเคราะห์ต่าง ๆ

การวัดค่าความหนาแน่นรวมแบบเคาะตามวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM

D6393 : Standard Test Method for Bulk Solids Characterization by Carr Indices.

การวัดค่าความชื้นตามวิธีการทดสอบมาตรฐานอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 4317 : 2011(E) The

Karl - Fischer method for determining water content.

การวัดค่าปริมาณ วัสดุคืบตามวิธีตะแกรงมาตรฐานอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM B214-07 :

Standard Test Method for Sieve Analysis Of Metal Powder

วัดค่าความหนืดของน้ำแป้งตามวิธีมาตรฐาน อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 7973 : Starch -

Determination of viscosity





S.3.6. BULK DENSITY AND TAPPED DENSITY OF POWDERS

Final text for addition to *The International Pharmacopoeia*

This monograph was adopted at the Forty-sixth WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations in October 2011 for addition to the 4th Edition of the International Pharmacopoeia

The text, reproduced with the permission of the European Pharmacopoeia with appropriate editorial modifications, is one that has undergone pharmacopoeial harmonization by the Pharmacopoeial Discussion Group (PDG) of the European Pharmacopoeia (Ph.Eur), the Japanese Pharmacopoeia (JP) and the United States Pharmacopoeia (USP). It is intended to be included in the Supplementary Information section of the Ph.Int.

S.3.6. BULK DENSITY AND TAPPED DENSITY OF POWDERS

BULK DENSITY

The bulk density of a powder is the ratio of the mass of an untapped powder sample and its volume including the contribution of the interparticulate void volume. Hence, the bulk density depends on both the density of powder particles and the spatial arrangement of particles in the powder bed. The bulk density is expressed in grams per millilitre (g/ml) although the international unit is kilogram per cubic metre ($1 \text{ g/ml} = 1000 \text{ kg/m}^3$) because the measurements are made using cylinders.

It may also be expressed in grams per cubic centimetre (g/cm^3).

The bulking properties of a powder are dependent upon the preparation, treatment and storage of the sample, i.e. how it was handled. The particles can be packed to have a range of bulk densities and, moreover, the slightest disturbance of the powder bed may result in a changed bulk density. Thus, the bulk density of a powder is often very difficult to measure with good reproducibility and, in reporting the results, it is essential to specify how the determination was made.

Document QAS/11.450 FINAL
page 2

The bulk density of a powder is determined by measuring the volume of a known mass of powder sample, that may have been passed through a sieve, into a graduated cylinder (Method A), or by measuring the mass of a known volume of powder that has been passed through a volumeter into a cup (Method B) or a measuring vessel (Method C).

Method A and Method C are favoured.

Method A. Measurement in a graduated cylinder

Procedure. Pass a quantity of powder sufficient to complete the test through a sieve with apertures greater than or equal to 1.0 mm, if necessary, to break up agglomerates that may have formed during storage; this must be done gently to avoid changing the nature of the material. Into a dry graduated cylinder of 250 ml (readable to 2 ml), gently introduce, without compacting, approximately 100 g of the test sample (m) weighed with 0.1% accuracy. Carefully level the powder without compacting, if necessary, and read the unsettled apparent volume (V_0) to the nearest graduated unit. Calculate the bulk density in (g/ml) using the formula m/V_0 . Generally, replicate determinations are desirable for the determination of this property.

If the powder density is too low or too high, such that the test sample has an untapped apparent volume of either more than 250 ml or less than 150 ml, it is not possible to use 100 g of powder sample. Therefore, a different amount of powder has to be selected as test sample, such that its untapped apparent volume is 150 ml to 250 ml (apparent volume greater than or equal to 60% of the total volume of the cylinder); the mass of the test sample is specified in the expression of results.

For test samples having an apparent volume between 50 ml and 100 ml a 100 ml cylinder readable to 1 ml can be used; the volume of the cylinder is specified in the expression of results.

Method B. Measurement in a volumeter

Apparatus. The apparatus¹ (Figure 1) consists of a top funnel fitted with a 1.0 mm sieve. The funnel is mounted over a baffle box containing four glass baffle plates over which the powder slides and bounces as it passes. At the bottom of the baffle box is a funnel that collects the powder and allows it to pour into a cup mounted directly below it. The cup may be cylindrical (25.00 ± 0.05 ml volume with an inside diameter of 30.00 ± 2.00 mm) or cubical (16.39 ± 0.20 ml volume with inside dimensions of 25.400 ± 0.076 mm).

¹ The apparatus (the Scott Volumeter) conforms to the dimensions in ASTM 329 90.

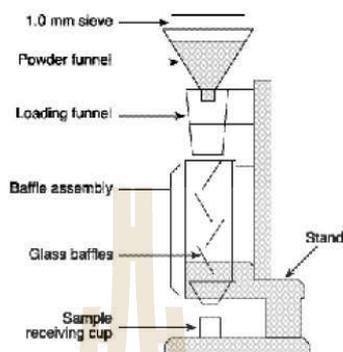


Figure 1. Volumeter

Procedure. Allow an excess of powder to flow through the apparatus into the sample receiving cup until it overflows, using a minimum of 25 cm³ of powder with the cubical cup and 35 cm³ of powder with the cylindrical cup. Carefully, scrape excess powder from the top of the cup by smoothly moving the edge of the blade of a spatula perpendicular to and in contact with the top surface of the cup, taking care to keep the spatula perpendicular to prevent packing or removal of powder from the cup. Remove any material from the side of the cup and determine the mass (M) of the powder to the nearest 0.1%. Calculate the bulk density (g/ml) using the formula M/V_0 in which V_0 is the volume of the cup and record the average of three determinations using three different powder samples.

Method C. Measurement in a vessel

Apparatus. The apparatus consists of a 100 ml cylindrical vessel of stainless steel with dimensions as specified in Figure 2.

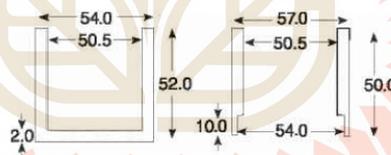


Figure 2. – Measuring vessel (left) and cap (right) – Dimensions in mm

Procedure. Pass a quantity of powder sufficient to complete the test through a 1.0 mm sieve, if necessary, to break up agglomerates that may have formed during storage and allow the obtained sample to flow freely into the measuring vessel until it overflows. Carefully scrape the excess powder from the top of the vessel as described for Method B. Determine the mass (M_0) of the powder to the nearest 0.1% by subtraction of the previously determined mass of the empty measuring vessel. Calculate the bulk density (g/ml) using the formula $M_0/100$ and record the average of three determinations using three different powder samples.

Document QAS/11.450 FINAL
page 4

TAPPED DENSITY

The tapped density is an increased bulk density attained after mechanically tapping a container containing the powder sample.

The tapped density is obtained by mechanically tapping a graduated measuring cylinder or vessel containing the powder sample. After observing the initial powder volume or mass, the measuring cylinder or vessel is mechanically tapped, and volume or mass readings are taken until little further volume or mass change is observed. The mechanical tapping is achieved by raising the cylinder or vessel and allowing it to drop, under its own mass, a specified distance by either of three methods as described below. Devices that rotate the cylinder or vessel during tapping may be preferred to minimize any possible separation of the mass during tapping down.

Method A

Apparatus. The apparatus (Figure 3) consists of the following:

- a 250 ml graduated cylinder (readable to 2 ml) with a mass of 220 ± 44 g; and
- a settling apparatus capable of producing, in 1 minute, either nominally 250 ± 15 taps from a height of 3 ± 0.2 mm, or nominally 300 ± 15 taps from a height of 14 ± 2 mm. The support for the graduated cylinder, with its holder, has a mass of 450 ± 10 g.

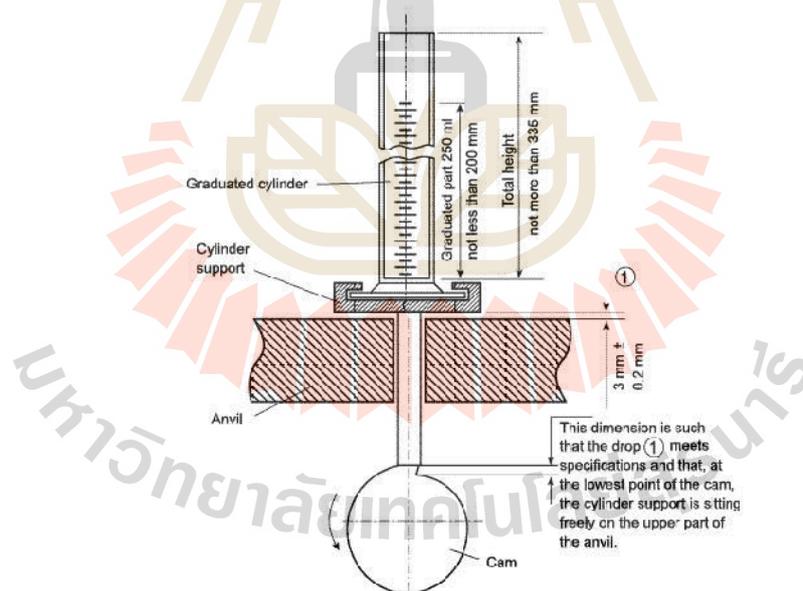


Figure 3

Procedure. Proceed as described above for the determination of the bulk volume (V_0). Secure the cylinder in the holder. Carry out 10, 500 and 1250 taps on the same powder sample and read the corresponding volumes V_{10} , V_{500} and V_{1250} to the nearest graduated unit. If the difference between V_{500} and V_{1250} is less than or equal to 2 ml, V_{1250} is the tapped volume. If the difference between V_{500} and V_{1250} exceeds 2 ml, repeat in increments such as 1250 taps, until the difference between succeeding measurements is less than or equal to 2 ml. Fewer taps may be appropriate for some powders, when validated. Calculate the tapped density (g/ml) using the formula m/V_f in which V_f is the final tapped volume. Generally, replicate determinations are desirable for the determination of this property. Specify the drop height with the results.

If it is not possible to use a 100 g test sample, use a reduced amount and a suitable 100 ml graduated cylinder (readable to 1 ml) weighing 130 ± 16 g and mounted on a holder weighing 240 ± 12 g. The modified test conditions are specified in the expression of the results.

Method B

Procedure. Proceed as directed under Method A except that the mechanical tester provides a fixed drop of 3 ± 0.2 mm at a nominal rate of 250 taps per minute.

Method C

Procedure. Proceed as described in Method C for measuring the bulk density using the measuring vessel equipped with the cap shown in Figure 2. The measuring vessel with the cap is lifted 50-60 times per minute by the use of a suitable tapped density tester. Carry out 200 taps, remove the cap and carefully scrape excess powder from the top of the measuring vessel as described in Method C for measuring the bulk density. Repeat the procedure using 400 taps. If the difference between the two masses obtained after 200 and 400 taps exceeds 2%, carry out a test using 200 additional taps until the difference between succeeding measurements is less than 2%. Calculate the tapped density (g/ml) using the formula $M_f/100$ where M_f is the mass of powder in the measuring vessel. Record the average of three determinations using three different powder samples. The test conditions including tapping height are specified in the expression of the results.

MEASURES OF POWDER COMPRESSIBILITY

Because the interparticulate interactions influencing the bulking properties of a powder are also the interactions that interfere with powder flow, a comparison of the bulk and tapped densities can give a measure of the relative importance of these interactions in a given powder. Such a comparison is often used as an index of the ability of the powder to flow, for example the Compressibility index or the Hausner ratio.

The Compressibility index and Hausner ratio are measures of the propensity of a powder to be compressed as described above. As such, they are measures of the powder ability to settle and they permit an assessment of the relative importance of interparticulate interactions. In a free-flowing powder, such interactions are less significant, and the bulk and tapped densities will

Document QAS/11.450 FINAL
page 6

be closer in value. For poorer flowing materials, there are frequently greater interparticulate interactions, and a greater difference between the bulk and tapped densities will be observed. These differences are reflected in the Compressibility Index and the Hausner Ratio.

Compressibility index :

$$\frac{100(V_0 - V_f)}{V_0}$$

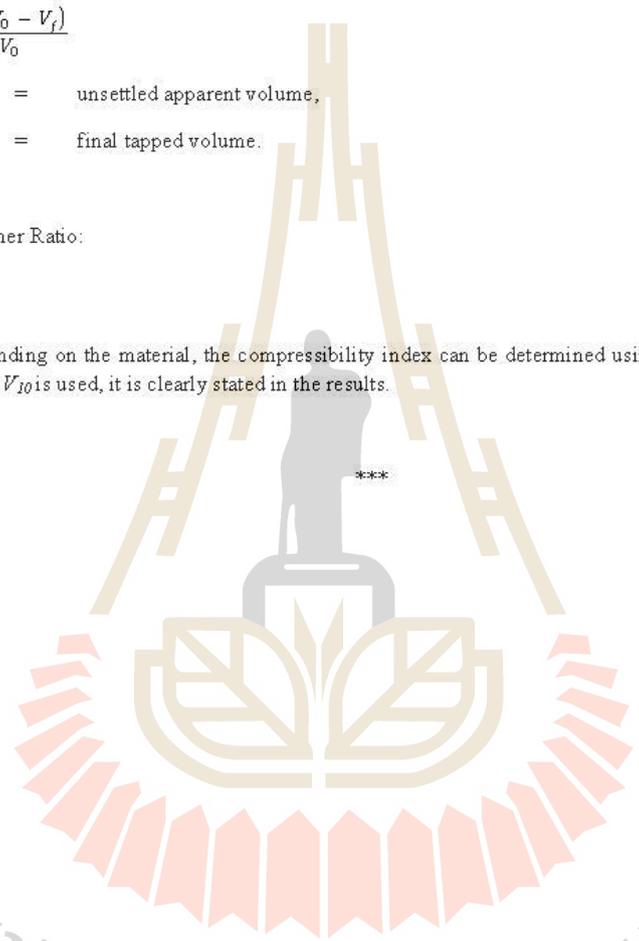
V_0 = unsettled apparent volume,

V_f = final tapped volume.

Hausner Ratio:

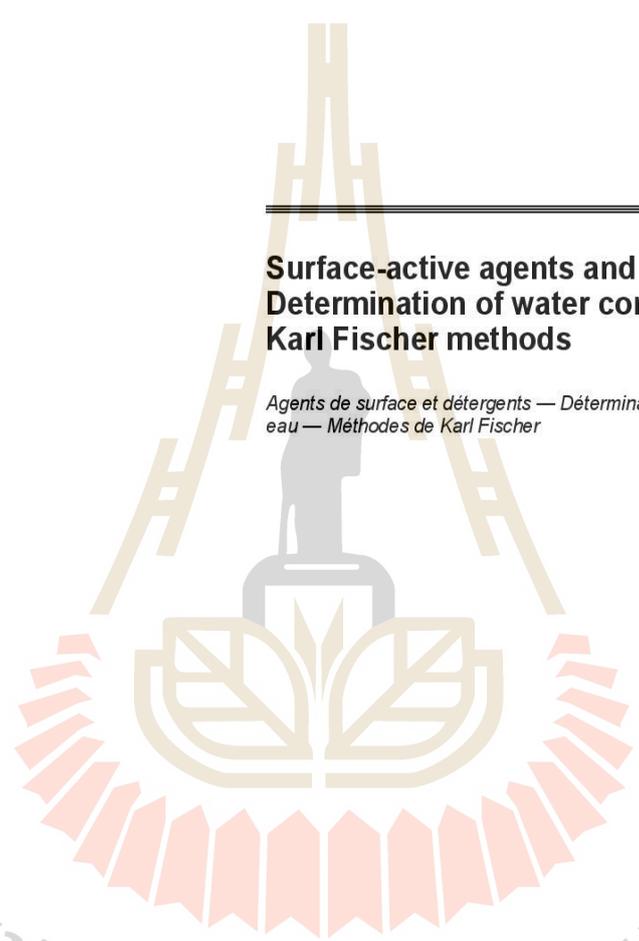
$$\frac{V_0}{V_f}$$

Depending on the material, the compressibility index can be determined using V_{10} instead of V_0 . If V_{10} is used, it is clearly stated in the results.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Provläsningsexemplar / Preview

**INTERNATIONAL
STANDARD****ISO
4317**Third edition
2011-12-01**Surface-active agents and detergents —
Determination of water content —
Karl Fischer methods***Agents de surface et détergents — Détermination de la teneur en
eau — Méthodes de Karl Fischer*

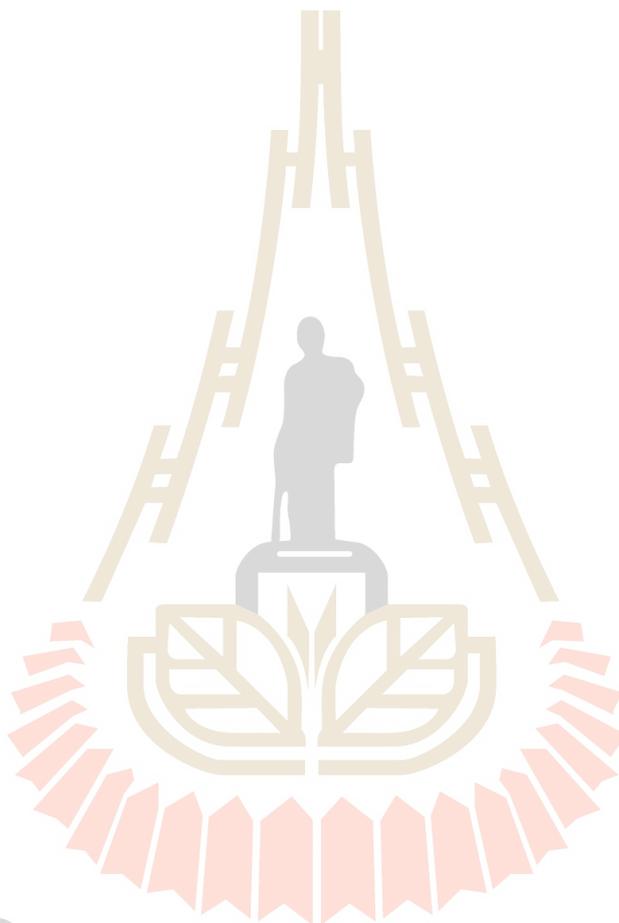
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Reference number
ISO 4317:2011(E)

© ISO 2011

Provläsningsexemplar / Preview

ISO 4317:2011(E)

**COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT**

© ISO 2011

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either ISO at the address below or ISO's member body in the country of the requester.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Published in Switzerland

Contents	Page
Foreword	iv
1 Scope	1
2 Normative references	1
3 Terms and definitions	1
4 Principle	1
5 Test methods	2
5.1 General	2
5.2 Volumetric titration method	2
5.3 Coulometric titration method	6
6 Precision	9
6.1 Precision of the volumetric titration method	9
6.2 Precision of the coulometric titration method	9
7 Test report	10
Annex A (informative) Preparation of Karl Fischer reagent containing pyridine	11
Annex B (informative) Interlaboratory test results	12
Bibliography	14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ISO 4317:2011(E)

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

International Standards are drafted in accordance with the rules given in the ISO/IEC Directives, Part 2.

The main task of technical committees is to prepare International Standards. Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights. ISO shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

ISO 4317 was prepared by Technical Committee ISO/TC 91, *Surface active agents*.

This third edition cancels and replaces the second edition (ISO 4317:1991), which has been technically revised to incorporate the following changes:

- the coulometric titration method in 5.3 has been added;
- the former Annex B has been deleted;
- interlaboratory test results have been added in a new Annex B;
- the Bibliography has been added.

Surface-active agents and detergents — Determination of water content — Karl Fischer methods

1 Scope

This International Standard specifies two titration methods (volumetric and coulometric) using Karl Fischer reagent for the determination of the water content of surface active agents and detergents.

These methods are applicable to products in the form of powders, pastes and solutions.

They are applicable only if so indicated in the specific standard for each product.

As alkaline compounds react with Karl Fischer reagent, the methods give values which are too high in the case of samples containing alkali metal silicates, carbonates, hydroxides or borates. Therefore, samples need to be analysed for the presence of such alkali metal salts prior to the determination of the water content.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 607, *Surface active agents and detergents — Methods of sample division*

ISO 3696:1987, *Water for analytical laboratory use — Specification and test methods*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

water content

mass fraction of free water, water of crystallization, absorbed water or occluded water, calculated from the amount of Karl Fischer reagent used in accordance with this International Standard

NOTE The water content is expressed as a percentage by mass.

4 Principle

The water content of a test portion is determined on the basis of the reaction of water with Karl Fischer reagent.

ISO 4317:2011(E)

5 Test methods**5.1 General**

Two titration methods using Karl Fischer reagent are described: a volumetric titration method and a coulometric titration method.

The volumetric titration method shall be used for samples with a water content of 2 % or more; the coulometric titration method shall be used for samples with a water content of 0,1 % or less. Both methods may be used for water contents in the range of 0,1 % to 2 %.

5.2 Volumetric titration method**5.2.1 Principle**

Any water present in a test portion is reacted with a solution of iodine and sulfur dioxide in an appropriate mixture (Karl Fischer reagent), previously standardized by titration with an exactly known mass of water. The water content is calculated as a percentage by mass from the amount of reagent used.

5.2.2 Reagents

During the analysis, use only reagents of recognized analytical grade and only grade 2 distilled water (5.2.2.1).

5.2.2.1 Distilled water or water of at least equivalent purity, complying with the requirements of ISO 3696 for grade 2.

5.2.2.2 Karl Fischer reagent, preferably commercially prepared.

A reagent containing pyridine may be prepared as described in Annex A for information purposes. A non-pyridine reagent can be used if it has been shown to be suitable; if so, this shall be indicated in the test report.

NOTE A suitable non-pyridine-containing reagent containing iodine, sulfur dioxide and an amine dissolved in 2-methoxyethanol is commercially available.

5.2.2.3 Disodium tartrate dihydrate or **oxalic acid dihydrate**, to be used as the primary standard for Karl Fischer reagent, or **water** (5.2.2.1).

5.2.2.4 Solvent, e.g. 2-methoxyethanol, propan-1-ol or methanol.

If it is known that these solvents interfere with the determination (e.g. for the determination of water in aldehydes or ketones), trichloromethane or dichloromethane may be used; if so, this shall be indicated in the test report.

WARNING — Trichloromethane and dichloromethane are harmful if inhaled or swallowed, and are irritating to the skin, with the risk of irreversible effects and the danger of serious damage to health in the event of prolonged exposure.

5.2.3 Apparatus

Use usual laboratory apparatus and, in particular, the following.

5.2.3.1 Karl Fischer apparatus, fully automatic or semi-automatic, consisting of

- a titrator with double platinum electrode,
- a 20 ml piston burette,

- drying tubes containing activated silica gel, calcium chloride or magnesium perchlorate,
- a titration vessel,
- a magnetic stirring apparatus.

5.2.3.2 **Micrometer syringe**, capacity 100 μl .

5.2.3.3 **Graduated pipette**, capacity 20 ml.

5.2.3.4 **Syringe**, consisting of a glass tube of nominal capacity about 10 ml, having an internal diameter of 2 mm to 4 mm, with a movable needle attached to the syringe by suitable means.

5.2.3.5 **Balance**, accurate to 0,1 mg.

5.2.4 Sampling

The laboratory sample of surface-active agent or detergent shall have been prepared and stored in accordance with the instructions given in ISO 607.

5.2.5 Procedure

5.2.5.1 General

Atmospheric moisture is the biggest source of interference in Karl Fischer titration. Take care to thoroughly dry the apparatus used and to handle the test portions and solvents speedily. To use the Karl Fischer apparatus, follow the manufacturer's instructions.

5.2.5.2 Determination of the water equivalent of Karl Fischer reagent (5.2.2.2)

Determine the water equivalent of the reagent on each new container of reagent and repeat at least weekly.

It is necessary to check the titre of Karl Fischer reagent, as the titre of standard solutions is subject to change. The type of apparatus used and desired analytical accuracy govern the frequency of such titre checks.

Place the magnetic stirring bar into the titration vessel of the Karl Fischer apparatus (5.2.3.1) using pincers, and transfer 10 ml of one of the solvents (5.2.2.4) used for the determination into the titration vessel and titrate with Karl Fischer reagent (5.2.2.2).

Where absolutely necessary, e.g. for the determination of water in aldehydes or ketones, use chloroform or dichloromethane (see 5.2.2.4) as solvent.

Either:

Weigh 200 mg to 250 mg of disodium tartrate dihydrate or oxalic acid dihydrate (5.2.2.3) in a weighing scoop to the nearest 0,1 mg. Transfer the tartrate or oxalic acid to the titration vessel and reweigh the weighing scoop. Dissolve the tartrate or oxalic acid in the solvent by gentle stirring.

Or:

Introduce approximately 40 mg of water (5.2.2.1) from a dropping bottle, weighed before and after introducing the water into the titration vessel.

The amount of solvent used shall be such as to immerse the electrode by 2 mm to 3 mm.

Add Karl Fischer reagent until the electrometric end point has been reached, that is, is when, after adding Karl Fischer reagent drop by drop, the observed value remains constant for 30 s.

ISO 4317:2011(E)

The water equivalent, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$, expressed in milligrams of water per millilitre of reagent, is given by one of the following equations:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_1 \times w_{\text{H}_2\text{O}}}{100V_1}$$

or

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_2}{V_1}$$

where

m_1 is the mass, in milligrams, of disodium tartrate dihydrate or oxalic acid dihydrate (5.2.2.3) used;

m_2 is the mass, in milligrams, of water (5.2.2.1) used;

$w_{\text{H}_2\text{O}}$ is the water content, expressed as a percentage by mass, of the primary standard (5.2.2.3) used, i.e. 15,66 for sodium tartrate dihydrate or 28,57 for oxalic acid dihydrate;

V_1 is the volume, in millilitres, of Karl Fischer reagent (5.2.2.2) used in the titration.

5.2.5.3 Determination of water content**5.2.5.3.1 General**

Depending on the characteristics of the laboratory sample, one of the following two methods shall be chosen: the general method (5.2.5.3.2) or the dissolution method (5.2.5.3.3).

The general method is suitable for samples which are homogeneous and easy to dispense into the titration vessel.

The dissolution method shall be used for samples for which homogeneity is questionable and/or for samples that are difficult to dispense into the titration vessel.

5.2.5.3.2 General method**5.2.5.3.2.1 Determination**

Place 20 ml of solvent (5.2.2.4) and the magnetic stirring bar (using pincers) in the titration vessel of the Karl Fischer apparatus (5.2.3.1). Whilst stirring, add Karl Fischer reagent (5.2.2.2) until the end point is reached as indicated by the instrument reading. Do not record the amount of reagent used.

Add the test portion. Check the amount to the nearest 0,1 mg by difference of masses, m_0 . Choose the amount so as to consume a volume of Karl Fischer reagent corresponding to more than 50 % of the capacity of the piston burette. Stir to dissolve and titrate to the same end point. Record the volume of Karl Fischer reagent used, V_2 .

Carry out a second determination by adding another test portion and repeating the titration.

Sieve Analysis

Overview

Sieve analysis is a technique used to determine the particle size distribution of a powder. This method is performed by sifting a powder sample through a stack of wire mesh sieves, separating it into discrete size ranges. A sieve shaker is used to vibrate the sieve stack for a specific period of time. Vibration allows irregularly shaped particles to reorient as they fall through the sieves. Additionally, agitation of the sieves serves to break apart weak agglomerates, allowing for a more reliable measurement of the particle size distribution. Care should be taken to choose an appropriate agitation time, so that particle fracture does not occur. The particle size distribution of a powder serves as an indication of flowability. Powders with a broad size distribution tend to be poorer flowing than those with a narrow size distribution.



Figure 1: Example image of sieve shaker equipment and wire cloth sieves

ASTM Standard Testing Procedure

ASTM B214-07: Standard Test Method for Sieve Analysis of Metal Powders details sample preparation, procedure, and results reporting specifications for sieve analysis of metal powders. These specifications can be extended for use with testing of pharmaceutical excipients.

Test Specimen

The ASTM standard provides a recommendation on the size of the sample used in sieve analysis. If the apparent density of the powder is larger than 1.50 g/cm^3 , a sample size between 90-110g should be used. Otherwise, a smaller sample between 40-60g may be used.

Procedure

1. Record the mass of the sample to be used.
2. Stack sieves in order from smallest to largest, starting at the bottom, with the pan below the smallest sieve.
3. Add the powder sample to the top sieve.
4. Tighten the equipment to ensure that the sieve stack is held firmly in the shaker assembly.
5. Set the sieve shaker to vibrate for 15 minutes. A shorter time may be required for brittle materials.

Results

1. Carefully weigh the mass retained on each sieve and in the pan.
2. Organize the results in a table which provides columns for sieve number, sieve size, mass fraction retained.
 - a. The mass fraction is defined as the mass retained on a particular sieve divided by the initial sample mass.

Sieve Number	Sieve Size	Mass Percentage Retained (%)
14	1400	2.837
18	1000	8.815

25	710	32.016
35	500	20.770
40	425	1.520
Pan	0	34.043

Figure 2: Example Data

USP-NF Standard Testing Procedure

Chapter <786> of USP32-NF27 provides a description of the testing method for the measurement of particle size distribution of a powder by the sieve analysis method. While this standard does not provide a specific testing procedure, it does specify requirements for operating parameters and the selection of a dispersant fluid. These requirements are as follows.

1. This method is appropriate for particle sizes larger than 75 μm . Smaller particle sizes may be used through the addition of an agitation method such as air jet or sonic sieving. In addition, if particle sizes smaller than this value are used, a validation of the method for use with the target particle size should be provided in the results report.
2. Sample mass should be between 25 and 100g.
3. Temperature and humidity should be controlled such that the moisture content of the material remains constant.
4. Appropriate sieve sizes should be selected to cover the range of particle sizes in the sample.
5. Sieves should be inspected for cleanliness and defects prior to use.
6. Test sieves should be 200mm in diameter.
 - a. For smaller samples, smaller sieves may be used.
 - b. Small samples may need to be used for particles with low apparent density.
7. An appropriate agitation method should be selected based on the material under consideration.

Reporting

The USP-NF standard requires that the following information be reported for this test method:

1. Sample mass
2. Sieve time
3. Sieve method
4. Mass retained on each sieve
5. If it is necessary to calculate a cumulative size distribution finer, an upper sieve should be selected through which the entire sample will pass (0% retained).

Calculation of Distributions and Associated Parameters

The frequency distribution and the cumulative frequency distribution are two widely used methods of representing particle size data. The following outlines the method of calculating these two distributions from sieve analysis data, as well as several associated parameters.

Frequency Distribution

A frequency distribution derived from sieve analysis data consists of a plot of the frequency by mass of discrete size intervals (f_{mi}) against the midpoint of the interval size (x_{mid}). This plot can be represented either as a scatter plot or as a histogram. The following is a description of how to calculate the frequency distribution of a powder from sieve analysis data.

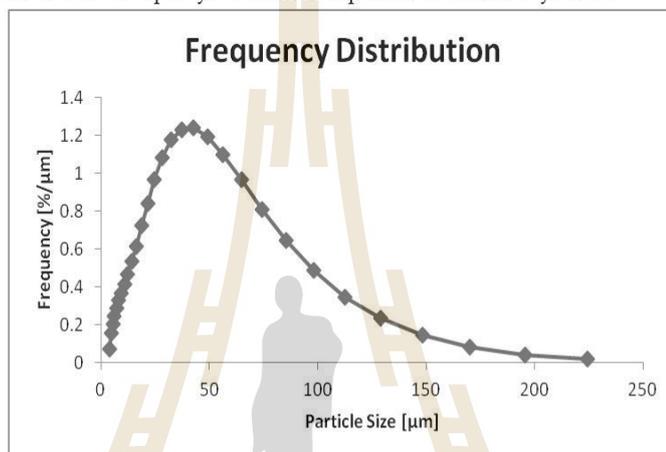


Figure 3

Notation

1. f_{mi} – the frequency, by mass, of interval i [%/ μm]
2. y_{ami} – the mass percentage retained in size interval i [%]
3. x_{midi} – the midpoint of size interval i [μm]
4. Δx_i – the width of size interval i [μm]
5. x_i – the size of the current sieve [μm]

Equations

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Cumulative Distribution

A cumulative distribution derived from sieve analysis data consists of plotting the cumulative mass percentage finer against the midpoint of each size interval. This type of plot is typically represented as a scatter plot. The cumulative mass percentage finer is the sum of all mass percentages in size ranges smaller than and including the current size range. The following is a description of the calculations required to obtain this distribution from sieve analysis data.

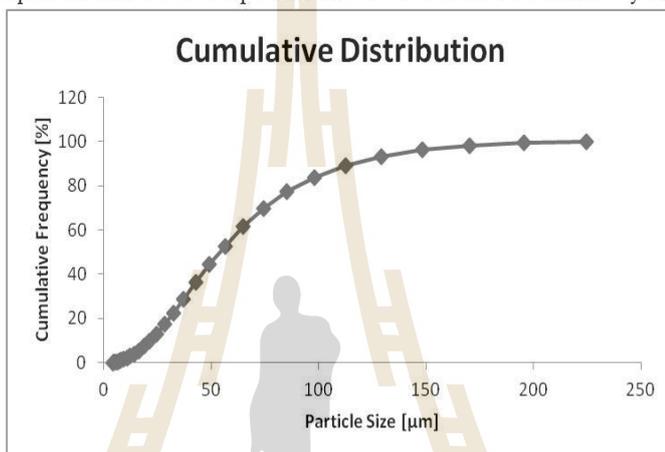


Figure 4

Notation

1. C_{mi} – Cumulative mass percentage finer in size interval i [%]
2. $y_{%mi}$ – the mass percentage retained in size interval i [%]
3. x_{midi} – the midpoint of size interval i [μm]
4. Δx_i – the width of size interval i [μm]
5. x_i – the size of the current sieve [μm]

$$C_{mi} = \sum_{j=0}^i y_{%mj}$$



Sieve Size (μm)	Midpoint of Size Interval (μm)	Mass Percentage Retained (%)	Cumulative Mass Percentage Finer (%)
1400	1600	2.837	100.000
1000	1200	8.815	97.163
710	855	32.016	88.349
500	605	20.770	56.332

425	462.5	1.520	35.562
0	212.5	34.043	34.043

Table 1: Example Data

Mass Mean Diameter ($x_{4,3}$)

Notation

1. \bar{x}_i – the midpoint of the size range in a (size, frequency) pair [μm]
2. $y_{\%mi}$ – mass percentage in size range [%]

Sauter Mean Diameter ($x_{3,2}$)

$$\bar{x}_{3,2} = \frac{1}{\frac{\sum y_{\%mi}}{100} \bar{x}_i}$$

Notation

1. \bar{x}_i – the midpoint of the size range in a (size, frequency) pair [μm]
2. $y_{\%mi}$ – mass percentage in size range [%]

 x_{10}

This quantity is often found by interpolation, using the cumulative size distribution. The 10th percentile size is defined as the particle size at which 10% of particles are smaller.

Notation

1. $f(x)$ – frequency distribution [%/ μm]
2. – cumulative distribution [%]

Median (x_{50})

This quantity is often found by interpolation, using the cumulative size distribution. The 50th percentile size is the particle size at which 50% of particles are smaller.

Notation

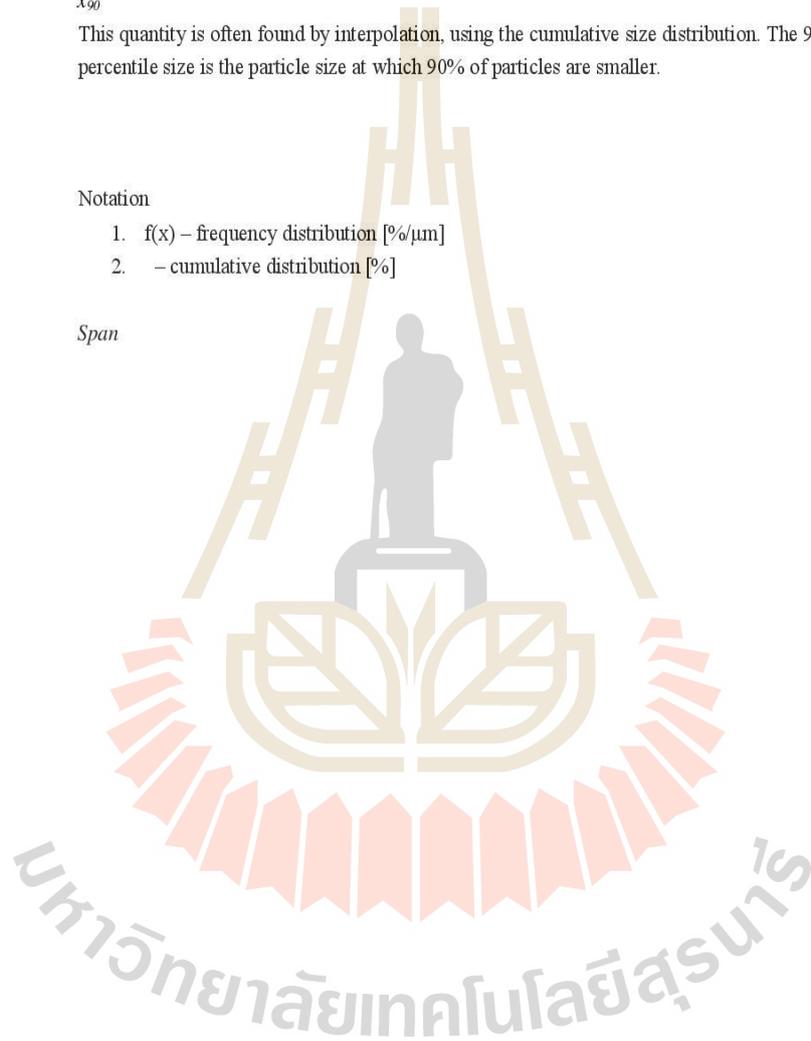
1. $f(x)$ – frequency distribution [%/ μm]
2. – cumulative distribution [%]

 x_{90}

This quantity is often found by interpolation, using the cumulative size distribution. The 90th percentile size is the particle size at which 90% of particles are smaller.

Notation

1. $f(x)$ – frequency distribution [%/ μm]
2. – cumulative distribution [%]

Span

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
7973

First edition
1992-12-01

**Cereals and milled cereal products —
Determination of the viscosity of flour — Method
using an amylograph**

*Céréales et produits de mouture des céréales — Détermination de la
viscosité de la farine — Méthode utilisant un amylographe*



LICENCED TO PUNJAB AGRICULTURAL UNIVERSITY, LUDHIANA FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY. SUPPLIED BY BSI ON BEHALF OF ISO/TC 34/SC 14 BUREAU



Reference number
ISO 7973:1992(E)

ISO 7973:1992(E)**Foreword**

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

International Standard ISO 7973 was prepared by Technical Committee ISO/TC 34, *Agricultural food products*, Sub-Committee SC 4, *Cereals and pulses*.

This International Standard takes into account Standard No. 126 of the International Association for Cereal Science and Technology (ICC).

Annex A forms an integral part of this International Standard. Annexes B and C are for information only.

© ISO 1992

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization
Case Postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland
Printed in Switzerland

Cereals and milled cereal products — Determination of the viscosity of flour — Method using an amylograph

1 Scope

This International Standard specifies a method using an amylograph for determining the viscosity of a suspension of flour in water, in which the starch is gelatinized by heating, in order to assess the conditions of gelatinization of the flour and so judge whether there is any alpha-amylase activity.

This method is applicable to wheat and rye flour and also to wheat and rye grain.

NOTES

1 This International Standard has been prepared on the basis of the Brabender-type amylograph.

2 This method applies strictly to an amylograph and not to a viscograph, since an amylograph possesses the following characteristics:

- it is possible to change the torque-measuring head;
- the heating coils are located around the bowl of the apparatus and at the bottom;
- there is no cooling rod for lowering the gel temperature.

2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 712:1985, *Cereals and cereal products — Determination of moisture content (Routine reference method)*.

ISO 3093:1982, *Cereals — Determination of falling number*.

3 Definition

For the purposes of this International Standard, the following definition applies.

3.1 amylograph viscosity: Maximum viscosity reached by a suspension of flour and water which is gelatinized by heating under the conditions set out in this International Standard.

It is expressed as an arbitrary unit: amylograph unit (AU).

4 Principle

Preparation of a suspension of flour in water, followed by recording of the viscosity of the suspension which is heated at a constant rate from 30 °C to the temperature corresponding to the moment at which viscosity starts to decrease, having reached its maximum (approximately 95 °C).

The increase in viscosity due to gelatinization of the starch is dependent upon the increase in temperature, the mechanical action of stirring and the activity of alpha-amylase already present or added to the flour.

5 Reagent

5.1 **Distilled water**, or water of equivalent purity.

6 Apparatus

Usual laboratory equipment and, in particular, the following.

ISO 7973:1992(E)

6.1 Amylograph, having the following characteristics:

Speed of rotation of the spindle	(75 ± 1) rev/min
Torque exerted per amylograph unit (AU), using a standard measuring cartridge	$(6,86 \pm 0,14) \times 10^{-5}$ N.m/AU [(0,700 ± 0,015) gf.cm/AU]
Rate of temperature rise	(1,50 ± 0,03) °C/min
Linear speed of the recorder	(0,50 ± 0,01) cm/min

Position the sensing pins and the pins of the bowl so that they penetrate freely into the jig provided by the manufacturer.

Adjust the pressure of the pen on the paper as follows. Remove the pen, fill it with ink and weigh it. At the end of the arm which normally holds the pen, place a mass 0,5 g to 1 g less than that of the completely filled pen. Adjust the position of the counterweight to obtain equilibrium then remove the mass and replace the pen.

6.2 Analytical balance, accurate to within 0,1 g.**6.3 Burette**, of 450 ml capacity, with an automatic zeroing system.**6.4 Shallow beaker**, of capacity 600 ml to 1000 ml, or a **conical flask with stopper**.**6.5 Spatula**, with a rubber or plastic end.**6.6 Mill¹⁾**, complying with the requirements of ISO 3093 in the case of wheat and rye grains; i.e. capable of grinding a product of moisture content up to 30 % (m/m) and with adjustment to obtain a meal meeting the requirements of table 1.

Table 1 — Particle size requirements

Mesh opening of sieve µm	Meal passing through the sieve %
710	100
500	95 to 100
210 to 200	80 or less

1) Kamas Slago 200 A and Falling Number type KT 120 mills are examples of suitable commercially available products. This information is given for the convenience of users of this International Standard and does not constitute an endorsement by ISO of the products named. Equivalent products may be used if they can be shown to lead to the same results.

7 Sampling

It is important that the laboratory receive a sample which is truly representative and has not been damaged or changed during transport and storage.

Sampling is not part of the method specified in this International Standard. Recommended sampling methods are given in ISO 950 (for grains) and ISO 2170 (for milled products).

8 Procedure**8.1 Preparation of test sample****8.1.1 Flour**

Use the laboratory sample as provided, after thorough mixing, taking test samples as required.

8.1.2 Grain

Remove dust and coarse impurities from the laboratory sample and then take approximately 300 g of grain.

Grind the sample carefully in the mill (6.6), avoiding heating or overloading.

Continue grinding for 30 s to 40 s after the last of the sample has been fed into the mill. Bran particles up to 1 % remaining on the screen may be discarded.

Thoroughly mix the milled product.

8.2 Preliminary operations**8.2.1 Determination of the moisture content of the test sample**

Determine the moisture content of the test sample (8.1) in accordance with ISO 712.

8.2.2 Adjustment of the amylograph and no-load test

Manually adjust the starting temperature of the temperature regulator to 30 °C, with the clutch in the neutral position. Fill the pen with ink. Place the spindle in the bowl, connect the spindle to the shaft and lower the amylograph head into position. Start the motor and check that the pen moves over the baseline of the recording paper. If necessary, adjust the position of the pen on its arm. Stop the motor, disconnect the spindle, lift and turn the head of the apparatus. Remove the spindle.

CAUTION — Refer to annex A for the calibration of the amylograph. Particular care shall be taken when adjusting the contact thermometer as its position has a marked influence on the results.

8.3 Test portion

8.3.1 For flour

Weigh, to the nearest 0,1 g, the equivalent of 80,0 g of flour with a moisture content of 14,0 % (*m/m*). This mass, *m*, in grams, is also given in table 2 as a function of moisture content.

8.3.2 For grain

Adjust the mass of the test portion so that 90,0 g of milled product corresponds to a moisture content of 14,0 % (*m/m*). This mass, *m*, in grams, is also given in table 2 as a function of moisture content.

8.4 Preparation of suspension

8.4.1 Fill the burette (6.3) with distilled water up to the zero mark.

8.4.2 Place the test portion in the beaker (6.4) and add 100 ml of water from the burette. Mix with the spatula (6.5) for approximately 20 s in order to obtain a uniform suspension.

NOTE 3 A longer mixing time may be necessary for rye flour.

While continuing to stir, gradually add the water (in four stages) until there are approximately 100 ml remaining in the burette and check that the suspension is free from lumps and there is as little foaming as possible, then pour the suspension into the amylograph bowl.

8.4.3 Using the spatula, scrape up any residue of suspension which might be sticking to the sides and bottom of the beaker and dilute with half the water remaining in the burette. Pour all of this suspension into the amylograph bowl.

Pour the remaining water into the beaker to rinse it and collect a quantity of rinsing solution in the amylograph bowl, such that the total mass of the suspension is $530,0 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$.

8.4.4 It is important that operations 8.4.1, 8.4.2 and 8.4.3 be completed within 2 min.

8.4.5 In the case of grain, the mass of the test portion plus the mass of water should equal $540,0 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ (corresponding to 90 g of flour and 450 g of water).

8.5 Amylograph test

8.5.1 Place the spindle in the amylograph bowl. Connect it to the shaft and carefully lower the head of the apparatus.

8.5.2 Start the motor and switch on the heater and timer. As soon as the heater cuts out (automatically), mark the next line up on the recording paper. At the moment that this line passes under the pen, place the clutch in the up position.

Set the timer to ring at the desired time. For wheat the time taken to obtain the viscosity curve is 40 min to 45 min or less, and for rye it is 30 min to 40 min or less.

8.5.3 When the curve has reached its maximum and has started to drop again, stop the motor, switch off the heater and read the temperature on the thermometer. Disconnect the spindle from its shaft. Raise the head of the apparatus, leaving the spindle in the bowl. Remove and clean the bowl and spindle under running water from the tap. Clean the thermoregulator with a warm damp cloth.

8.5.4 If a viscosity in excess of 1 000 AU is reached, add a supplementary weight provided for this purpose, so increasing the recording range of the curve by 500 AU or 1 000 AU.

If this is not possible, repeat the procedure from 8.3, using a smaller test portion (e.g. 70 g).

9 Calculation

9.1 Determination of the maximum amylograph viscosity

The maximum amylograph viscosity, expressed in amylograph units (AU), is given by the y-axis of the curve at its maximum (see figure 1).

Express this viscosity to the nearest 5 AU.

ISO 7973:1992(E)

Table 2 — Mass of the test portion, in grams, corresponding to 80 g and 90 g, at 14 % (m/m) moisture content

Moisture content % (m/m)	Mass of the test portion corresponding to		Moisture content % (m/m)	Mass of the test portion corresponding to	
	80 g	90 g		80 g	90 g
9,0	75,6	85,1	13,6	79,6	89,6
9,1	75,7	85,1	13,7	79,7	89,7
9,2	75,8	85,2	13,8	79,8	89,8
9,3	75,9	85,3	13,9	79,9	89,9
9,4	75,9	85,4	14,0	80,0	90,0
9,5	76,0	85,5	14,1	80,1	90,1
9,6	76,1	85,6	14,2	80,2	90,2
9,7	76,2	85,7	14,3	80,3	90,3
9,8	76,3	85,8	14,4	80,4	90,4
9,9	76,4	85,9	14,5	80,5	90,5
10,0	76,4	86,0	14,6	80,6	90,6
10,1	76,5	86,1	14,7	80,7	90,7
10,2	76,6	86,2	14,8	80,8	90,8
10,3	76,7	86,3	14,9	80,8	91,0
10,4	76,8	86,4	15,0	80,9	91,1
10,5	76,9	86,5	15,1	81,0	91,2
10,6	77,0	86,6	15,2	81,1	91,3
10,7	77,0	86,7	15,3	81,2	91,4
10,8	77,1	86,8	15,4	81,3	91,5
10,9	77,2	86,9	15,5	81,4	91,6
11,0	77,3	87,0	15,6	81,5	91,7
11,1	77,4	87,1	15,7	81,6	91,8
11,2	77,5	87,2	15,8	81,7	91,9
11,3	77,6	87,3	15,9	81,8	92,0
11,4	77,7	87,4	16,0	81,9	92,1
11,5	77,7	87,5	16,1	82,0	92,3
11,6	77,8	87,6	16,2	82,1	92,4
11,7	77,9	87,7	16,3	82,2	92,5
11,8	78,0	87,8	16,4	82,3	92,6
11,9	78,1	87,9	16,5	82,4	92,7
12,0	78,2	88,0	16,6	82,5	92,8
12,1	78,3	88,1	16,7	82,6	92,9
12,2	78,4	88,2	16,8	82,7	93,0
12,3	78,4	88,3	16,9	82,8	93,1
12,4	78,5	88,4	17,0	82,9	93,3
12,5	78,6	88,5	17,1	83,0	93,4
12,6	78,7	88,6	17,2	83,1	93,5
12,7	78,8	88,7	17,3	83,3	93,6
12,8	78,9	88,8	17,4	83,3	93,7
12,9	79,0	88,9	17,5	83,4	93,8

Moisture content % (m/m)	Mass of the test portion corresponding to		Moisture content % (m/m)	Mass of the test portion corresponding to	
	80 g	90 g		80 g	90 g
13,0	79,1	89,0	17,6	83,5	93,9
13,1	79,2	89,1	17,7	83,6	94,0
13,2	79,3	89,2	17,8	83,7	94,2
13,3	79,4	89,3	17,9	83,8	94,3
13,4	79,4	89,4	18,0	83,9	94,4
13,5	79,5	89,5			

NOTE — The values in this table have been calculated using the formula

$$m = m' \times 86 / (100 - H)$$

where

- m is the mass of the test portion, in grams;
 H is the moisture content of the sample, expressed as a percentage by mass;
 m' is the mass, in grams, of a test portion of moisture content 14 % ($m' = 80$ g or $m' = 90$ g).

9.2 Determination of temperature at maximum viscosity

The temperature θ , at maximum viscosity, expressed in degrees Celsius, is given by the formula

$$\theta = 30,0 + (t - 30,0) \times a/b$$

where

- t is the temperature, in degrees Celsius, read from the thermometer at the end of the test (approximately 95 °C);
 a is the length, in centimetres, of the recording from the mark made at the start of the test to maximum viscosity;
 b is the length, in centimetres, of the recording from the mark made at the start of the test to the end of the test.

Express the temperature θ to the nearest 0,5 °C.

If the apparatus is correctly adjusted

$$(t - 30,0)/b = (3,0 \pm 0,1) \text{ } ^\circ\text{C/cm}$$

and thus $\theta = 30,0 + 3a$.

NOTE 4 It may also be of interest to note the temperature at which gelatinization starts (marked change in the slope of the recorded curve), and then use a formula similar to the above.

10 Precision

NOTE 5 The results of an inter-laboratory test are given in annex B.

10.1 Repeatability

The absolute difference between two independent single test results, within the range 197 AU to 693 AU, obtained using the same method on identical test material in the same laboratory by the same operator using the same equipment within a short interval of time, should not be greater than 27 AU.

10.2 Reproducibility

The absolute difference between two single test results, within the range 197 AU to 693 AU, obtained using the same method on identical test material in different laboratories with different operators using different equipment, should not be greater than 231 AU.

11 Test report

The test report shall specify

- the method in accordance with which sampling was carried out (if known),
- the method used,
- the mass of the test portion if different from that specified in 8.3,
- the test result(s) obtained, and
- if the repeatability has been checked, the final quoted result obtained.

It shall also mention all operating details not specified in this International Standard, or regarded as optional, together with details of any incidents which may have influenced the test result(s).

The test report shall include all information necessary for the complete identification of the sample.

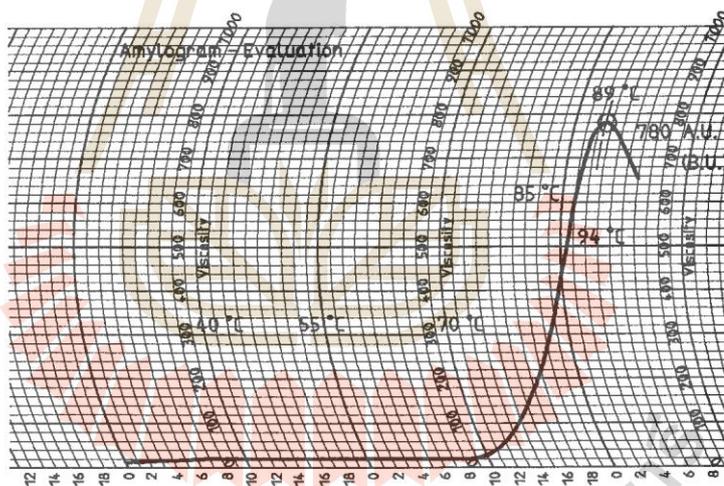


Figure 1 — Typical amylogram

Annex A (normative)

Calibration of the amylograph

Each apparatus shall be compared with another using a range of flours. It is permissible for the amylograph to be calibrated by the manufacturer using his own standard equipment. However, this may not be possible with old or over-used equipment. Frequent checks are necessary in order to maintain correct correspondence between apparatus.

The curve measured with a standard flour shall be such that the maximum viscosity at 500 AU does not vary by ± 20 AU and above 500 AU by ± 30 AU in relation to the standard curve for the standard flour, and the starting time for the rise of the curve does not vary by $\pm 0,5$ min in relation to this standard curve.

If these tolerances are not observed, the following adjustments are possible in each particular case.

a) The curve is too high

In this case, raise the spindle to reduce the depth of plunge. To do this, remove the spindle and unscrew the coupling-retaining screw. Then, with the left hand, hold the top knob of the measuring shaft so that the pen is at approximately 500 AU. Then, with the right hand, push the spindle coupling up by approximately 2 mm, turning it slightly. Retighten the coupling-retaining screw and replace the spindle.

Carry out a new test to check the result obtained.

b) The curve is too low

In this case, lower the spindle in order to increase the depth of plunge. To do this, remove the spindle and unscrew the coupling-retaining screw. Then, with the left hand, hold the top knob of the measuring shaft so that the pen is at approximately 500 AU. Then, with the right hand,

push the spindle coupling down by approximately 1 mm to 2 mm, turning it slightly. Retighten the coupling-retaining screw and replace the spindle.

Check that the rods do not touch the bottom of the measuring bowl by lowering the measuring head and spindle and then briefly turning on the apparatus. Any friction between the rods of the spindle and the bottom of the measuring bowl can be identified from the noise.

Carry out a new test to check the result obtained.

c) The starting time for the rise of the curve is too short

In this case, move the contact thermometer towards the front of the apparatus. To do this, using both hands, simultaneously unscrew the knurled screws to the right and left of the contact thermometer beneath the measuring head of the apparatus, which allows the contact thermometer to be moved 1 mm to 2 mm towards the front of the apparatus. Retighten the screws.

Carry out a new test to check the result obtained.

d) The starting time for the rise of the curve is too long

In this case, move the contact thermometer towards the rear of the apparatus, that is towards the centre of the measuring bowl. To do this, using both hands, simultaneously unscrew the knurled screws to the right and left of the contact thermometer beneath the measuring head of the apparatus, which allows the contact thermometer to be moved 1 mm to 2 mm towards the rear of the apparatus. Retighten the screws.

Carry out a new test to check the result obtained.

Annex B
(informative)

Results of inter-laboratory test

An inter-laboratory test carried out by BIPEA in 1988, in which eight laboratories participated, each of which carried out two determinations on each sample, gave the statistical results (evaluated in accordance with ISO 5725) shown in table B.1.

Table B.1

Sample	Wheat 1	Wheat 2
Number of laboratories retained after eliminating outliers	8	8
Mean viscosity (AU)	197	693
Standard deviation of repeatability s_r (AU)	3,46	9,41
Coefficient of variation of repeatability (%)	1,8	1,4
Repeatability, $2,83 s_r$ (AU)	10	27
Standard deviation of reproducibility s_R (AU)	32,11	81,68
Coefficient of variation of reproducibility (%)	16	12
Reproducibility, $2,83 s_R$ (AU)	91	231

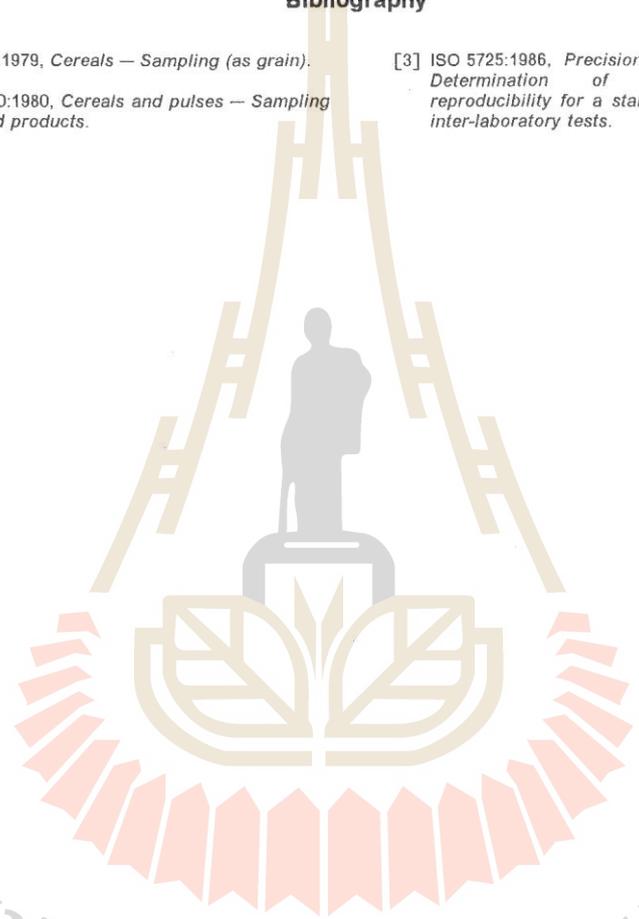


ISO 7973:1992(E)

Annex C
(informative)

Bibliography

- [1] ISO 950:1979, *Cereals — Sampling (as grain)*.
[2] ISO 2170:1980, *Cereals and pulses — Sampling of milled products*.
[3] ISO 5725:1986, *Precision of test methods — Determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests*.

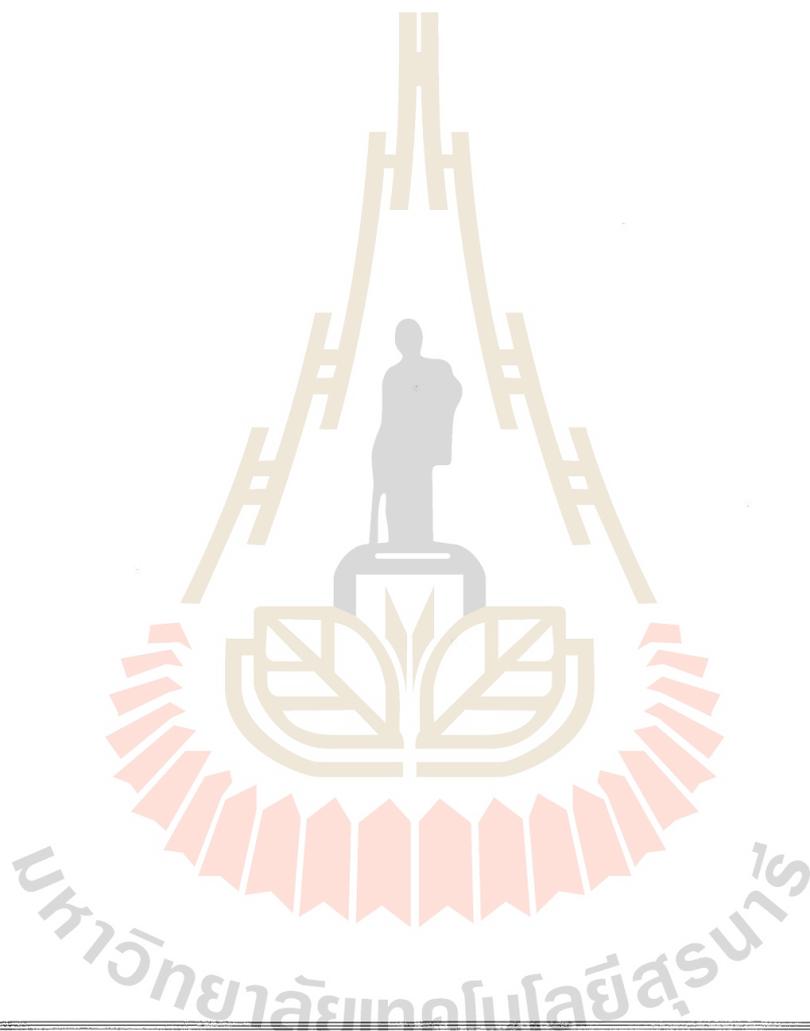


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



This page intentionally left blank

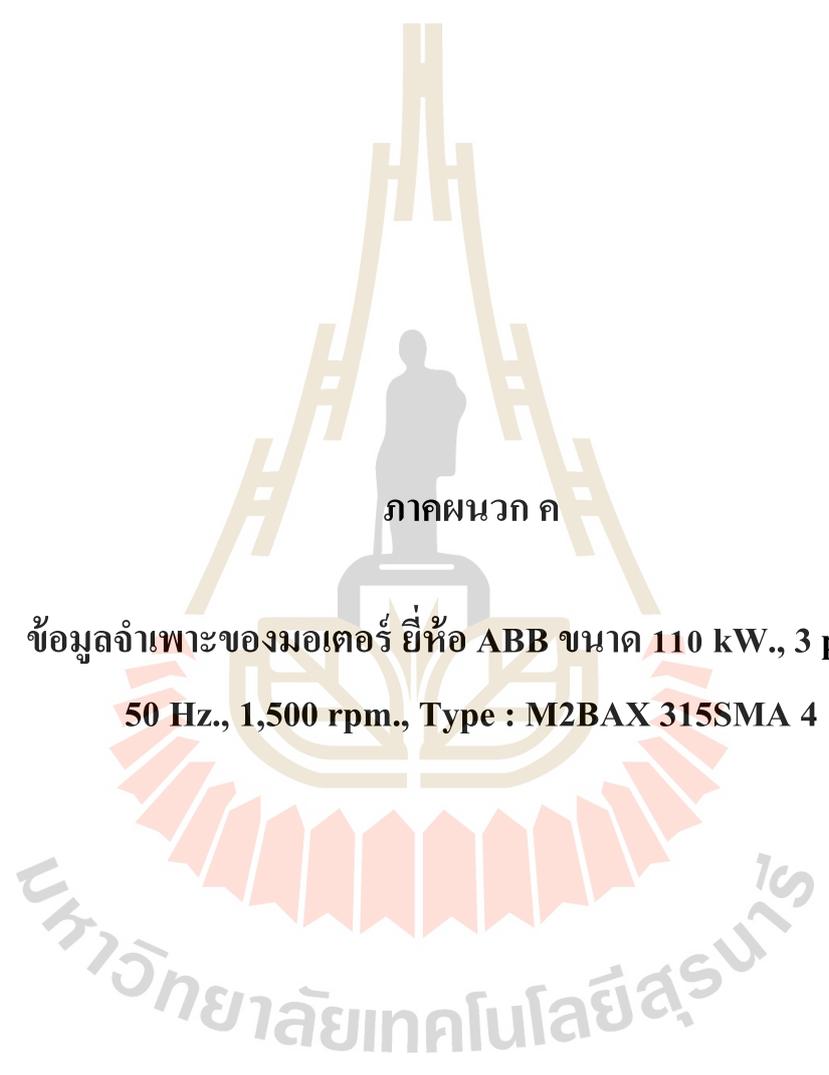
ISO 7973:1992(E)



UDC [633.1 + 664.641.1]:532.13

Descriptors: agricultural products, plant products, grains (food), food products, cereal products, flours (food), wheat flour, rye flour, tests, determination, viscosity, viscosity measurement.

Price based on 8 pages



ภาคผนวก ค

ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ ยี่ห้อ ABB ขนาด 110 kW., 3 phase,
50 Hz., 1,500 rpm., Type : M2BAX 315SMA 4

รายชื่อข้อมูลจำเพาะ

ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ ซีรี่ส์ ABB ขนาด 110 kW., 3 phase, 50 Hz., 1,500 rpm., Type : M2BAX
315SMA 4.



Technical data IE2 General performance cast iron motors, 1500 r/min

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B
IE2 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cos φ	Current		Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure Level L _{pa} dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _n A	I _g /I _n	T _n Nm	T _g /T _n	T _g /I _n			
1500 r/min = 4 poles															
400 V 50 Hz															
GENELEC-design															
0.25	M2BAX 71MA 4	3GBA072310-●●C	1415	87,0	83,1	86,6	0,73	0,74	4,4	1,88	2,1	2,8	0,000590	9	49
0.37	M2BAX 71MB 4	3GBA072320-●●C	1407	89,5	89,0	84,4	0,77	1,0	4,2	2,5	1,9	2,7	0,000590	10	49
0.55	M2BAX 80MA 4	3GBA082310-●●C	1413	73,5	73,2	69,2	0,76	1,4	4,7	3,7	2,0	2,9	0,00156	13	54
0.75	M2BAX 80MB 4	3GBA082320-●●C	1462	79,6	78,5	74,4	0,71	1,9	6,2	5,0	3,1	3,9	0,00247	17	53
1.1	M2BAX 90SA 4	3GBA092110-●●C	1447	81,4	80,7	77,2	0,73	2,7	6,3	7,4	3,2	4,3	0,00372	21	51
1.5	M2BAX 90LA 4	3GBA092510-●●C	1441	82,8	82,6	79,8	0,74	3,5	6,6	10,0	3,1	4,2	0,00462	23	55
2.2	M2BAX 100LA 4	3GBA102510-●●C	1445	84,3	84,2	81,9	0,78	4,8	6,7	14,5	2,6	3,8	0,00759	31	55
3	M2BAX 100LB 4	3GBA102520-●●C	1443	85,5	85,4	83,3	0,79	6,4	7,4	19,8	2,8	4,2	0,00939	35	58
4	M2BAX 112MA 4	3GBA112310-●●C	1442	86,8	86,2	84,6	0,79	8,4	7,5	26,5	4,0	4,3	0,0120	41	57
5.5	M2BAX 132SA 4	3GBA132110-●●C	1457	87,7	87,5	86,2	0,78	11,6	6,9	36,0	2,5	3,4	0,0267	57	66
7.5	M2BAX 132MA 4	3GBA132310-●●C	1457	89,7	89,6	87,5	0,78	15,6	7,2	49,1	2,6	3,8	0,0320	68	67
11	M2BAX 160MLA 4	3GBA162410-●●C	1466	89,8	89,9	89,2	0,79	22,4	7,0	71,5	3,2	3,2	0,0794	110	67
15	M2BAX 160MLB 4	3GBA162420-●●C	1488	90,6	91,1	90,5	0,82	29,1	8,0	97,7	3,2	3,7	0,10	125	66
18.5	M2BAX 180MLA 4	3GBA182410-●●C	1470	91,2	91,5	90,6	0,80	36,6	8,6	120	3,7	4,2	0,120	155	65
22	M2BAX 180MLB 4	3GBA182420-●●C	1472	91,6	91,3	90,2	0,78	44,4	9,2	143	4,1	4,6	0,139	168	66
30	M2BAX 200MLA 4	3GBA202410-●●C	1476	92,3	92,4	92,0	0,81	57,9	6,8	194	3,0	3,2	0,236	222	68
37	M2BAX 225SMA 4	3GBA222210-●●C	1479	92,7	92,7	92,2	0,82	70,3	7,4	239	3,1	3,3	0,350	263	69
45	M2BAX 225SMB 4	3GBA222220-●●C	1481	93,1	93,0	92,3	0,81	86,1	7,9	290	3,5	3,5	0,416	290	69
55	M2BAX 250SMA 4	3GBA262210-●●C	1480	93,5	93,4	92,7	0,83	102	7,6	365	3,3	3,3	0,533	339	77
75	M2BAX 280SA 4	3GBA282110-●●C	1484	94,2	94,2	93,5	0,85	135	6,9	482	2,5	2,8	1,250	515	71
90	M2BAX 280SMB 4	3GBA282220-●●C	1483	94,4	94,6	94,1	0,86	160	7,2	579	2,5	2,7	1,50	575	71
110	M2BAX 315SMA 4	3GBA312210-●●C	1487	94,7	94,6	93,8	0,86	194	7,2	706	2,0	2,5	2,30	775	78
132	M2BAX 315SMB 4	3GBA312220-●●C	1487	95,0	95,0	94,3	0,86	233	7,1	847	2,3	2,7	2,60	830	78
160	M2BAX 315SMC 4	3GBA312230-●●C	1487	95,2	95,3	94,6	0,85	285	7,2	1027	2,4	2,9	2,90	870	78
200	M2BAX 315MLA 4	3GBA312410-●●C	1488	95,3	95,4	94,9	0,86	352	7,0	1285	2,3	2,8	3,50	995	78
250	M2BAX 355SMA 4	3GBA352210-●●C	1488	95,2	95,2	94,4	0,85	445	6,7	1604	2,0	2,6	5,40	1400	82
315	M2BAX 355SMB 4	3GBA352220-●●C	1488	95,5	95,5	94,8	0,85	560	7,3	2021	2,2	2,7	6,90	1570	82
355	M2BAX 355SMC 4	3GBA352230-●●C	1487	95,5	95,7	95,2	0,86	623	6,8	2279	2,4	2,7	7,20	1650	82

Notel Please check the availability for sizes 280-355 with ABB

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B IE3 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cosφ	Current Torque					Moment of Inertia J = 1/4 GD ² kgm ²	Weight kg	Sound pressure Level L _{PA} dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I _n A	I ₁ /I _n	T _n Nm	I ₁ /I _n	T ₁ /T _n			
1500 r/min = 4 poles				400 V 50 Hz				CENELEC-design							
0.25	M2BAX 71 MB	3GBA072320--D	1440	73,5	70,1	63,8	0,64	0,78	6,1	1,67	2,7	3,5	0,000750	11	41
0.37	M2BAX 71 MLA	3GBA072410--D	1441	77,3	74,9	69,8	0,66	1,06	6,8	2,47	2,7	3,8	0,000980	13	50
0.55	M2BAX 80 MC	3GBA082330--D	1446	80,8	80,7	78,0	0,74	1,32	8,0	3,64	2,7	3,9	0,00228	15	48
0.75	M2BAX 80 MLA	3GBA082410--D	1445	82,5	81,2	77,6	0,70	1,84	7,8	4,88	3,8	4,6	0,00295	24	49
1.1	M2BAX 90 SB	3GBA092120--D	1438	84,1	83,4	80,9	0,73	2,59	7,9	7,28	3,6	4,2	0,00394	22	48
1.5	M2BAX 90 SLA	3GBA092010--D	1439	85,3	84,4	82,1	0,73	3,52	7,8	9,95	3,9	4,5	0,00485	24	44
2.2	M2BAX 100 LB	3GBA102520--D	1450	86,7	86,1	84,1	0,78	4,74	8,4	14,5	3,4	4,4	0,00863	35	50
3	M2BAX 100 LKA	3GBA102810--D	1448	87,7	87,7	86,5	0,79	6,25	8,6	19,9	3,6	4,5	0,0115	43	57
4	M2BAX 112 MLA	3GBA112410--D	1443	88,6	88,9	88,1	0,81	8,11	8,5	26,5	3,6	4,4	0,0152	53	57
5.5	M2BAX 132SMA 4	3GBA132210--D	1463	89,6	90,4	90,2	0,77	11,5	7,9	35,89	2,6	3,3	0,0297	68	68
7.5	M2BAX 132SME 4	3GBA132250--D	1465	90,4	90,7	90,3	0,78	15,5	7,4	49,0	2,5	4,0	0,0370	77	60
11	M2BAX 160MLA 4	3GBA162410--D	1477	91,4	91,8	91,1	0,82	21,1	7,6	71,3	2,6	3,3	0,110	134	61
15	M2BAX 160MLB 4	3GBA162420--D	1477	92,1	92,4	91,6	0,82	28,5	8,2	97,0	3,0	3,7	0,135	159	61
18.5	M2BAX 180MLA 4	3GBA182410--D	1481	92,6	93,2	92,9	0,83	34,9	7,2	119,3	2,8	3,0	0,219	192	60
22	M2BAX 180MLB 4	3GBA182420--D	1481	93,0	93,6	93,3	0,82	41,4	6,5	142,0	3,0	3,2	0,243	205	60
30	M2BAX 200MLA 4	3GBA202410--D	1483	93,6	93,8	93,4	0,84	54,8	7,5	193,2	2,7	3,2	0,385	259	63
37	M2BAX 225SMA 4	3GBA222210--D	1482	93,9	94,1	93,8	0,83	68,9	7,2	238,6	3,1	3,1	0,427	274	67
45	M2BAX 225SMB 4	3GBA222220--D	1482	94,2	94,4	94,0	0,84	82,3	8,0	290,0	3,2	3,5	0,525	307	66
55	M2BAX 250SMA 4	3GBA252210--D	1482	94,6	94,7	94,0	0,84	100,0	7,1	354,2	2,9	3,4	0,694	358	68
75	M2BAX 280SMB 4	3GBA282220--M	1485	95,0	95,2	94,8	0,86	133,0	6,4	483,0	2,3	2,8	1,380	573	75
90	M2BAX 280SMC 4	3GBA282230--M	1485	95,2	95,3	94,8	0,86	159,0	7,1	588,0	2,5	2,9	1,730	636	75
110	M2BAX 315SMB 4	3GBA312220--M	1489	95,4	95,4	94,8	0,85	196,0	7,0	705,0	2,1	3,0	2,430	823	71
132	M2BAX 315SMC 4	3GBA312230--M	1488	95,6	95,8	95,3	0,86	231,0	6,7	847,0	2,2	2,9	2,90	892	71
160	M2BAX 315SMD 4	3GBA312240--M	1488	95,8	96,0	95,8	0,85	282,0	6,9	1026,0	2,2	3,0	3,20	933	71
200	M2BAX 315MLB 4	3GBA312420--M	1487	96,0	96,4	96,4	0,86	351,0	6,8	1284,0	2,4	3,0	3,90	1091	74
250	M2BAX 355SMA 4	3GBA352210--M	1491	96,0	96,0	95,6	0,86	435,0	6,4	1601,0	2,1	2,9	5,90	1445	78
315	M2BAX 355SMB 4	3GBA352220--M	1491	96,0	96,0	95,6	0,86	545,0	6,7	2018,0	2,3	3,0	6,90	1595	78
355	M2BAX 355SMC 4	3GBA352230--M	1490	96,0	96,2	95,8	0,86	616,0	6,3	2273,0	2,3	2,8	7,20	1635	78

Temperature rise class F



ประวัติผู้เขียน

นายวรรณลภย์ บุญรอง เกิดเมื่อวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2518 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านกุดปราสาท ชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 - 6 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 3 ที่โรงเรียนปรางค์กู๋ ชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) และชั้นประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ที่วิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปี พ.ศ. 2541 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล และเริ่มทำงานที่ บริษัท ธนากรผลิตภัณฑ์น้ำมันพืช จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ตำแหน่งวิศวกรโครงการ ต่อมาในปี พ.ศ. 2547 ได้ย้ายมาทำงานที่ บริษัท สยาม คออลดีตี้ สตาร์ช จำกัด จังหวัดชัยภูมิ ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล และในปี พ.ศ. 2558 ได้ย้ายมาทำงานที่บริษัท สยาม มอดิฟายด์ สตาร์ช จำกัด จังหวัดบุรีรัมย์ จนถึงปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยผู้จัดการส่วนผลิต

ปี พ.ศ.2549 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชารัฐประศาสนศาสตร์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ (ศูนย์การศึกษาอำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา) และปี พ.ศ. 2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาโทได้ทำโครงการวิจัย เรื่อง การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพด้วยการแยกน้ำเพื่อเพิ่มค่าความร้อน กรณีศึกษา บริษัท สยาม คออลดีตี้ สตาร์ช จำกัด

ผลงานวิจัย ได้เสนอบทความเข้าร่วมการประชุมในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 จัดขึ้นในวันที่ 15 - 17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น และนำเสนอบทความวิชาการในการประชุมวิชาการ SEATUC 2015 ครั้งที่ 9 จัดขึ้นในวันที่ 27 - 30 กรกฎาคม 2558 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา รวมถึงเสนอบทความวิชาการในการประชุมวิชาการ SEATUC 2017 ครั้งที่ 11 จัดขึ้นในวันที่ 13 - 14 มีนาคม 2560 ที่ Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City ประเทศเวียดนาม