



การผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการพ่นละออง
Polyethylene Wax Powder Production by Atomization Process

อุบลวรรณ มะเดื่อ

Ubonwan Madua

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University**

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการฟ้นละเอง
 ผู้เขียน นางสาวอุบลวรรณ มะเดื่อ
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณาฐ ประเสริฐสิทธิ์) (รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณาฐ ประเสริฐสิทธิ์)

.....กรรมการ
 (ดร.สุธรรม สุขมณี)

.....กรรมการ
 (ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มี
ส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ _____
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุศลนาฐ ประเสริฐสิทธิ์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ _____
(นางสาวอุบลวรรณ มะเต๋อ)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ _____

(นางสาวอุบลวรรณ มะเคื่อ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการฟ่นละเอง
ผู้เขียน	นางสาวอุบลวรรณ มะเดื่อ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

พอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (Byproduct) ของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันในการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวขุ่นที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเพิ่มมูลค่าและความสะดวกในการนำพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปใช้งาน ลักษณะและขนาดของผงที่ได้จะต้องเป็นทรงกลมขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้สนใจการปรับปรุงคุณภาพของพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการฟ่นละเองเพื่อลดขนาดผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ให้มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน

ในงานวิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องฟ่นละเองแนวตั้ง โดยมีความสูง 2.6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 เมตร และใช้หัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle จากนั้นศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ ซึ่งประกอบด้วย ความดัน อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว โดยทำการฟ่นละเองพอลิเอทิลีนแวกซ์ 3 ชนิด คือ ชนิด A ชนิด B และชนิด C จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeters พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้ง 3 ชนิด อยู่ในช่วง 110-120 องศาเซลเซียส และ 60-80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นจึงดำเนินการฟ่นละเองที่ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 120-180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1-7 บาร์ โดยทดลองกับหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเป็น 3.0:0.5 ถึง 3.0: 1.5 การวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาด จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อบอกรูปร่างและการกระจายขนาด จากการศึกษาพบว่า ความดันมีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มากที่สุด โดยการฟ่นละเองที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว 3.0:1.5 สามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ได้มากที่สุดถึง 76.33 เปอร์เซ็นต์ของผลได้และมีค่า Bulk density สูงที่สุด (0.512 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการฟ่นละเอง
ผู้เขียน	นางสาวอุบลวรรณ มะเดื่อ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

พอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (Byproduct) ของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันในการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวขุ่นที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเพิ่มมูลค่าและความสะดวกในการนำพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปใช้งาน ลักษณะและขนาดของผงที่ได้จะต้องเป็นทรงกลมขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้สนใจการปรับปรุงคุณภาพของพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการฟ่นละเองเพื่อลดขนาดผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ให้มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน

ในงานวิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องฟ่นละเองแนวตั้ง โดยมีความสูง 2.6 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 เมตร และใช้หัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle จากนั้นศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ ซึ่งประกอบด้วย ความดัน อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว โดยทำการฟ่นละเองพอลิเอทิลีนแวกซ์ 3 ชนิด คือ ชนิด A ชนิด B และชนิด C จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeters พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้ง 3 ชนิด อยู่ในช่วง 110-120 องศาเซลเซียส และ 60-80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นจึงดำเนินการฟ่นละเองที่ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 120-180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1-7 บาร์ โดยทดลองกับหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเป็น 3.0:0.5 ถึง 3.0: 1.5 การวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาด จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000 และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อบอกรูปร่างและการกระจายขนาด จากการศึกษาพบว่า ความดันมีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มากที่สุด โดยการฟ่นละเองที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว 3.0:1.5 สามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ได้มากที่สุดถึง 76.33 เปอร์เซ็นต์ของผลได้และมีค่า Bulk density สูงที่สุด (0.512 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

Thesis Title	Polyethylene wax powder production by atomization process
Author	Miss Ubonwan Madua
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2012

ABSTRACT

Polyethylene wax (PE wax) is byproduct of high density polyethylene (HDPE) polymerization, with be a solid phase at room temperature. For value added and easily using, PE wax should be sphere and the particle size smaller than 200 micron. Therefore, the purpose of this work is to produce smaller than 200 micron of PE wax powder by atomization process. The design and construction of a vertical atomizer was done with the dimension of 2.6 m high and 0.75 m diameter. External mixing two fluid nozzle was used. Effect of air pressure, melting temperature and air to liquid diameter ratio (D_A/D_L) were studied on PE wax powder properties (size, size distribution, shape and bulk density). Three types of PE wax such as A, B and C were studied. Because the melting and crystallizing temperatures of three types analyzed by Differential Scanning Calorimeters method were 110-120 °C and 60-90 °C, respectively, the studied conditions for atomizing PE wax were temperatures from 120-180 °C, air pressures from 1-7 bars, and air to liquid diameter ratio (D_A/D_L) from 3.0:0.5 to 3.0:1.5. The particle size and size distribution were determined by Particle Sizing Unified System (Mastersizer2000). Spherical shape of particle and size distribution can be showed by scanning electron microscope.

From the study, the air pressure plays the most effect on PE wax powder properties. And the optimum condition was 1 bar air pressure, 140 °C of melting temperature and 3.0:1.5 of D_A/D_L . This condition provided yield smaller than 200 micron with highest bulk density (0.512 g/cm³) maximum at 76.33%.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพบุลย์ อินนาจิตร และคุณชนากร เกียรติขวัญบุตร ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ ดร.สุธรรม สุขมณี และ ดร.พรศิริ แก้วประดิษฐ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาใช้เวลาในการสอบ เสนอแนะ และแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับ ภาคอุตสาหกรรม (NUI-RC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และ บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนสนับสนุนการทำวิจัยและทุนสนับสนุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คุณสมคิด จีนาพงษ์ บุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเคมีและภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้กำลังใจและทุนทรัพย์ในการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนช่วยเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัย และให้คำแนะนำทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

อุบลวรรณ มะเต๋อ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเอทิลีนแวกซ์ (polyethylene wax: PE wax)	4
2.1.1 สมบัติทั่วไป	4
2.1.2 การใช้งานของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในอุตสาหกรรม	6
2.2 กระบวนการพ่นละออง (Atomization process)	8
2.2.1 ข้อดีของการผลิตผงวัสดุโดยวิธีการพ่นละออง	8
2.2.2 อิทธิพลของสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อกระบวนการพ่นละออง	9
2.2.3 กลไกในกระบวนการพ่นละออง	10
2.2.3.1 การเกิดละอองของเหลว	11
2.2.3.2 การสัมผัสของละอองของเหลวกับอากาศ	13
2.2.3.3 การระเหยของละอองของเหลว	16
2.2.3.4 การแยกผงวัสดุ	16
2.2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคผงวัสดุ	18

เรื่อง	หน้า
2.2.4.1 เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน	19
2.2.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง	19
2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.3.1 การออกแบบห้องฟ้นละออง	20
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของผงวัสดุในกระบวนการฟ้นละออง	23
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องฟ้นละอองต้นแบบ	28
3.1.1 ออกแบบส่วนให้ความร้อนแก่พอลิเอทิลีนแวกซ์	29
3.1.2 ออกแบบส่วนฟ้นละออง	29
3.1.3 ออกแบบส่วนรองรับผง	30
3.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องฟ้นละออง และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาดการกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้	30
3.2.1 การศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์	31
3.2.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว	32
3.2.3 การศึกษาการฟ้นละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C	32
3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	32
3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการทำนายตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์	33
3.3 การวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	34
4.1 ผลการออกแบบและสร้างห้องฟ้นละออง	34
4.1.1 ผลการออกแบบส่วนให้ความร้อนแก่พอลิเอทิลีนแวกซ์	34
4.1.2 ผลการออกแบบส่วนฟ้นละออง	38
4.1.3 ผลการออกแบบส่วนรองรับผง	41
4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ในกระบวนการฟ้นละออง	42
4.2.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์	42
4.2.1.1 ขนาด และการกระจายขนาด	42

เรื่อง	หน้า
4.2.1.2 รูปร่างและการกระจายตัว	49
4.2.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว	55
4.2.2.1 ขนาดและการกระจายขนาด	55
4.2.2.2 รูปร่างและการกระจายตัว	59
4.2.3 ผลการศึกษากระบวนการฟั่นละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B	63
และชนิด C	
4.2.3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีผล	63
ต่อขนาด และการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C	
4.2.3.2 ผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีผล	68
ต่อรูปร่าง การกระจายตัวและพื้นผิว ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C	
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการทำนายตัวแปรที่มีผลต่อ	71
ขนาด การกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์	
4.3 ผลการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการทดลอง	79
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	86
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์	97
ภาคผนวก ค การตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงาน	132
ประวัติผู้เขียน	138

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ความต้องการใช้เม็ดพลาสติกของประเทศไทย	1
2-1 การจำแนกข้อดีและข้อเสียของลักษณะของห้องฟั่นละออง	16
3-1 ตัวแปรที่ศึกษาในการทดลอง	30
4.1 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ค้ำบนตะแกรงร่อนขนาดรูเปิดต่างๆ	43
4-2 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่วิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อน	44
4-3 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่ฟั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ	46
4-4 ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ	48
4-5 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x	50
4-6 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200x 800x และ 1500x	51
4-7 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 อุณหภูมิต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200x 800x และ 1500x	53

ตารางที่	หน้า
4-8 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่พื้นละอองด้วยอนุภาคน้ำเท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1.4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวขนาดต่างๆ	55
4-9 รูปร่างและการกระจายตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พื้นละอองด้วยความดันเท่ากับ 1.4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 อนุภาคน้ำของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x	60
4-10 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พื้นละอองด้วยอนุภาคน้ำพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ความดันเท่ากับ 1 และ 7 บาร์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200x 800x และ 1500x	61
4-11 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่พื้นละอองด้วยอนุภาคน้ำเท่ากับ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1.4 และ 7 บาร์ และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5	64
4-12 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่พื้นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอนุภาคน้ำต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x	68
4-13 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่พื้นละอองด้วย อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอนุภาคน้ำต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x	69
4-14 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ชนิด B และชนิด C ที่พื้นละอองด้วยอนุภาคน้ำเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายเท่ากับ 200x 800x และ 1500x	70

ตารางที่	หน้า
4-15 ผลการทดลองด้วยมาตรฐานของทากูชิ (Orthogonal Array) L4 (2^3) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้กระบวนการปั่นละออง	72
4-16 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยตารางมาตรฐานของทากูชิ	73
4-17 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีผลต่อค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยตารางมาตรฐานของทากูชิ	75
4-18 ปริมาณและมูลค่าของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ได้จากการปั่นละอองที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ	77
4-19 ค่าใช้จ่ายในการขนส่งผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ ระยะทางมากกว่า 200 กิโลเมตร ความจุ 20 ลูกบาศก์เมตร	78
ข-1 ความเร็วและอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากหัวฉีดและห้องปั่นละอองที่ความดันต่างๆ	97
ข-2 อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์ปริมาณ 150 กรัม เมื่อปั่นละอองที่สภาวะต่างๆ	98
ข-3 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ในกระบอกตวงสแตนเลสที่มีปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม	99
ข-4 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ปั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ในกระบอกตวงสแตนเลสปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม	101
ข-5 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ปั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ในกระบอกตวงสแตนเลสที่มีปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม	102
ข-6 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองที่ปั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่สภาวะต่างๆ	103

ตารางที่	หน้า
ข-7 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 และ 3.0: 1.0 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ	105
ข-8 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ	106
ข-9 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ	107
ข-10 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พ่นละอองด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่าง ๆ	109
ข-11 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พ่นละอองด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่อ อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่าง ๆ	112
ข-12 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พ่นละอองด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ	115
ข-13 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พ่นละอองด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ	118
ข-14 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พ่นละอองด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและ ท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 ที่ความดัน 1 บาร์	121
ข-15 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พ่นละอองด้วย อุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและ ท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ที่ความดันต่างๆ	122

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
2-1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	4
2-2 ลักษณะทั่วไปของพอลิเอทิลีนแวกซ์	5
2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและระดับผลึกต่อคุณลักษณะ ทางภาพภาพของพอลิเอทิลีน	5
2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์	6
2-5 การประยุกต์ใช้งานพอลิเอทิลีนแวกซ์ในอุตสาหกรรม	7
2-6 ขั้นตอนการดำเนินการในกระบวนการพ่นละออง	10
2-7 กลไกการแตกกระจายของของเหลวในกระบวนการพ่นละออง	11
2-8 ภาพตัดขวางของหัวฉีดชนิดใช้อากาศ	12
2-9 ส่วนประกอบของหัวฉีดชนิดใช้อากาศ	12
2-10 ลักษณะของห้องพ่นละอองแบบแนวนอนที่ใช้หลักการกาลักน้ำ	13
2-11 ลักษณะของห้องพ่นละอองแบบแนวนอนที่ใช้การปล่อยของเหลวจากด้านบน	14
2-12 ลักษณะของห้องพ่นละอองแบบแนวตั้ง	15
2-13 การกระจายตัวของผงวัสดุภายในห้องพ่นละออง	17
2-14 ลักษณะรูปร่างของผงวัสดุที่ได้จากกระบวนการพ่น	18
2-15 กระบวนการพ่นละอองที่ออกแบบในระดับอุตสาหกรรม	22
2-16 เครื่องพ่นละอองที่ออกแบบและสร้างในการทดลอง	23
2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะวะในการดำเนินการและขนาดของผงวัสดุใน กระบวนการพ่นละออง	26
2-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ALR และขนาดของผงวัสดุในกระบวนการพ่นละออง	27
3-1 Flow diagram ของกระบวนการพ่นละอองเพื่อผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์	31
4-1 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A	35
4-2 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B	35
4-3 กราฟแสดงอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C	36
4-4 ชุดหลอมพอลิเอทิลีนแวกซ์	37

ภาพประกอบที่	หน้า
4-5 ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องพ่นละอองที่ใช้ในการทดลอง	37
4-6 ลักษณะภายในของหัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle	38
4-7 ลักษณะการเกิดละอองของเหลวที่ออกจากหัวฉีด เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดห้องพ่นละออง	39
4-8 ห้องพ่นละอองแบบ 3 มิติที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solid work	40
4-9 ห้องพ่นละอองที่สร้างเพื่อใช้ในการทดลอง	41
4-10 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 7 บาร์และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5	44
4-11 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ค้ำบนตะแกรงร้อนขนาดรูเปิดขนาดต่างๆ	45
4-12 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ	47
4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และความดันเมื่อพ่นละอองด้วยอุณหภูมิ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียสอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5	54
4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว ที่พ่นละอองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1 บาร์	56
4-15 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์เมื่อพ่นละอองด้วยความดันเท่ากับ 14 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ที่อุณหภูมิต่างๆ	57
4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว ที่พ่นละอองด้วยอุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1 บาร์ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x	58

ภาพประกอบที่	หน้า
4-17 รูปร่างและการกระจายตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละองด้วยความดันเท่ากับ 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส	59
4-18 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละองด้วยความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่างๆ	59
4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุน (Porosity) และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว	62
4-20 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟั่นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ	65
4-21 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟั่นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ	66
4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bulk density และอุณหภูมิของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟั่นละองด้วยความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5	67
4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bulk density และอุณหภูมิของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟั่นละองด้วยความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5	67
4-24 ค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ชนิด B และชนิด C ที่ฟั่นละองด้วยความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5	71
ก-1 ลักษณะ Riffle splitter ที่ใช้ในการทดลอง	86
ก-2 เทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งสี่	87
ก-3 Pycnometer ขนาด 25 มิลลิลิตร	88
ก-4 ชุดตะแกรงร่อนพร้อมเครื่องสั่นที่ใช้คัดแยกขนาดผงพอลิเอทิลีนแวกซ์	90

ภาพประกอบที่	หน้า
ก-5 เครื่อง Particle size analyzer Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์	92
ก-6 เอทานอลที่ใช้เป็นสารละลายตัวกลางในการวัดการกระจายขนาด	93
ก-7 แท่นกวนและใบพัดกวนของระบบป้อนสาร	93
ก-8 ปุ่มปรับความเร็วรอบ เวลาในการกวน และรูปแบบการกวนผสมสาร	94
ก-9 คอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลการวัดการกระจายขนาด	94
ก-10 กระจกตวงสแตนเลสที่ใช้หาค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์	96

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำสั้นเรื่อง

อุตสาหกรรมพลาสติกนับได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนให้กับภาคการผลิตอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมการก่อสร้าง และอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ในปี พ.ศ. 2553 อุตสาหกรรมพลาสติกสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศได้กว่า 2.2 แสนล้านบาท และแนวโน้มความต้องการใช้เม็ดพลาสติกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี ดังแสดงในตารางที่ 1-1 ดังนั้นอุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกจึงจำเป็นต้องขยายกำลังการผลิตเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2555)

ตารางที่ 1-1 ความต้องการใช้เม็ดพลาสติกของประเทศไทย หน่วย: พันตัน

ปริมาณการใช้เม็ดพลาสติก	2551	2552	2553	2554*
PE, PP, PVC, PS+EPS, ABS/SAN และอื่น ๆ	2998	2954	3431	3561

ที่มา: สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย

หมายเหตุ * ปี 2554 เป็นตัวเลขประมาณการ

โดย PE = Polyethylene, PP = Polypropylene, PVC = Poly Vinyl Chloride, PS/EPS =

Polystyrene และ ABS/SAN = Acrylonitrile Butadiene Styrene

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่มีความต้องการในการใช้งานสูง โดยพบว่าบริษัทผู้ผลิตแต่ละที่จะต้องผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ในปริมาณไม่น้อยกว่า 140000 ตันต่อปี ทั้งนี้ในระหว่างกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จะเกิดพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นผลผลิตข้างเคียง (By product) ในปริมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ของกระบวนการ คิดเป็น 2800-4200 ตันต่อปี (บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน, 2555) พอลิเอทิลีนแวกซ์จะมีมวลโมเลกุลต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ลักษณะทั่วไปเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น แข็งแต่เปราะ โดยพบว่า พอลิเอทิลีนแวกซ์ได้รับความนิยมไปใช้ในอุตสาหกรรมนานาประเภท เช่น ใช้เป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมการผลิตเทียนไข สีทาบ้าน และอาคาร รวมถึงกระบวนการผลิตยางพาราแผ่น และอื่นๆ อีกมากมาย (wiwax. Ltd, 2012) แม้ว่ากระบวนการบดละเอียดจะสามารถผลิตผงวัสดุที่มีขนาดเล็ก แต่พบว่า ผงวัสดุที่ได้จากกระบวนการดังกล่าวไม่เป็นทรงกลม เนื่องจากเกิดการกีดกันระหว่างผงวัสดุและอุปกรณ์ในระหว่างดำเนินการ อีกทั้งกระบวนการบดละเอียดเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายสูง มีความซับซ้อน จึงไม่เหมาะสำหรับใช้ในการผลิตผงวัสดุ (Otaigbe.J และ Mcavoy.J, 1997) งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะทำการลดขนาดพอลิเอทิลีนแวกซ์จากที่เป็นเกล็ดให้มีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดเล็กลงกว่า 200 ไมครอน เพื่อเพิ่มมูลค่าและเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน โดยในการทดลองเลือกศึกษากระบวนการพ่นละออง (Atomization process) เพื่อใช้แทนกระบวนการบดละเอียดแบบเก่า (Grinding process)

ทั้งนี้กระบวนการพ่นละอองเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สามารถดำเนินการได้ง่าย เริ่มจากการป้อนของเหลวเข้าไปในระบบเพื่อสัมผัสกับอากาศที่อัดเข้ามาด้วยความดันสูงภายในหัวฉีด จากนั้นของเหลวจะแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็ก และเมื่ออุณหภูมิของละอองของเหลวลดลงก็จะเปลี่ยนสถานะจากละอองของเหลวเป็นของแข็งภายในห้องพ่นละอองที่ความดันบรรยากาศ และตกลงสู่ภาชนะรองรับผงด้วยแรงโน้มถ่วงและเข้าสู่กระบวนการคัดแยกขนาดต่อไป การดำเนินการพ่นละอองจะสามารถผลิตได้ในระบบที่ต่อเนื่อง อัตราการผลิตสูง ปริมาณการสูญเสียต่ำ ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยต่ำลงมาก ผลผลิตที่ได้มีสมบัติเชิงกลสม่ำเสมอ ลดปัญหาเรื่องการกระจายตัวของส่วนประกอบภายใน และการดำเนินการค่อนข้างสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถใช้ผลิตกับวัสดุใหม่ๆ ได้อีกด้วย (BETE Fog Nozzle, Inc., 2011)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยในการดำเนินการพ่นละอองที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์
2. ออกแบบและสร้างเครื่องพ่นละอองต้นแบบ (Pilot Plant)
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ เช่น ความดัน อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว เป็นต้น
4. เพื่อการพัฒนาและประยุกต์ใช้กระบวนการพ่นละอองกับวัสดุอื่นๆ ตามความต้องการ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้พื้นฐานที่ได้จากการทดลองไปใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องพ่นละอองเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตผงวัสดุในระดับอุตสาหกรรม
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุชนิดอื่นๆ ตามความต้องการ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างเครื่องพ่นละอองต้นแบบ (Pilot plant) ความดันสูงสุดในการดำเนินการเท่ากับ 7 บาร์ และอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์สูงสุดไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส
2. สภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการจะพิจารณาจากขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ โดยจะทำการผลิตให้ได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีรูปร่างกลมและมีการกระจายขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน

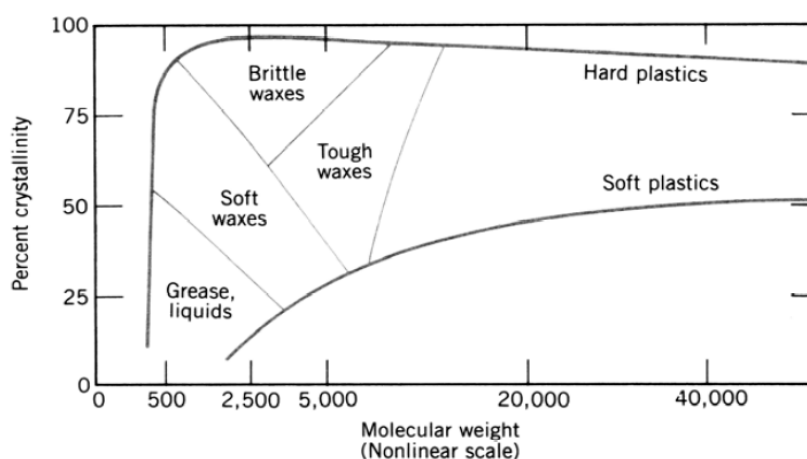
2. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) พอลิเอทิลีนที่ได้จะมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์

3. กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard Oil process) กระบวนการนี้จะคล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก พอลิเอทิลีนที่ได้จะมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์เช่นเดียวกับกระบวนการฟิลลิปส์

ทั้งนี้เมื่อกระบวนการไม่สามารถดำเนินการให้มีผลได้ (Yield) 100 เปอร์เซ็นต์ ก็เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือพอลิเอทิลีนแวกซ์ ซึ่งมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น ลื่นมัน ไม่มีกลิ่นและรสชาติ ความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-2

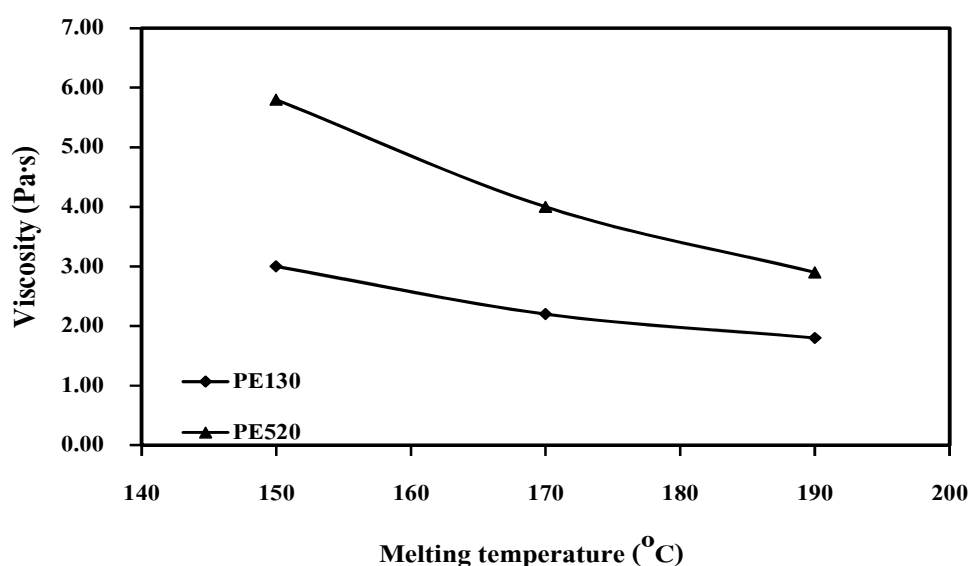


ภาพประกอบที่ 2-2 ลักษณะทั่วไปของพอลิเอทิลีนแวกซ์



ภาพประกอบที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและระดับผลึกต่อคุณลักษณะทางภาพของพอลิเอทิลีน

จากภาพประกอบที่ 2-3 จะเห็นได้ว่า น้ำหนักโมเลกุลมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเอทิลีน โดยจะพบว่า คุณสมบัติของพอลิเอทิลีนจะเปลี่ยนแปลงตามร้อยละของความเป็ผลึกกับน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งพอลิเอทิลีนแวกซ์จะจัดอยู่ในประเภท Brittle waxes โดยจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเอทิลีน และจะมีความแข็งแต่เปราะ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์พบว่า ความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหลอม และจะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมต่อไปเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์
(Otaigbe.J และ Mcavoy. J, 2001)

2.1.2 การใช้งานของพอลิเอทิลีนแวกซ์ในอุตสาหกรรม

เมื่อพอลิเอทิลีนแวกซ์มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ต้องมีการจัดการผลผลิตเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ ปัจจุบันพบว่า มีการนำพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปใช้งานในหลายอุตสาหกรรม ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-5 ลักษณะที่นำไปใช้งานมีหลายรูปแบบ เช่น ก้อนแข็งขรุขระ ก้อนกลมเกล็ด และผงละเอียดขนาดเล็กลง ถึงระดับไมโครเมตร (wiwax. Ltd., 2012) ทั้งนี้การนำไปใช้งานจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและลักษณะเฉพาะของอุตสาหกรรมนั้นๆ



ภาพประกอบที่ 2-5 การประยุกต์ใช้งานพอลิเอทิลีนแวกซ์ในอุตสาหกรรม

ที่มา : <http://www.kerax.co.uk/index.htm>, 10 กันยายน 2555

1. การผลิตเทียนไข : ในกระบวนการผลิตเทียนไขมีการใช้กระบวนการผลิตที่หลากหลาย ทั้งนี้ในการใช้งานพอลิเอทิลีนแวกซ์จะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของกระบวนการนั้นๆ โดยทั่วไปจะนำพอลิเอทิลีนแวกซ์ไปใช้ในการชุบไส้เทียน และเนื้อเทียน ซึ่งจะมีส่วนช่วยในเรื่องของความแข็งและความต้านทานความร้อน รวมถึงช่วยเพิ่มระยะเวลาในการหลอมละลายของเนื้อเทียน
2. การผลิตสีเทียน : ในกระบวนการผลิตสีเทียนจะใช้พอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อช่วยในเรื่องของความเงางามของเนื้อสีเทียน ป้องกันหรือต้านทานการอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูง เพิ่มความแข็งให้กับเนื้อสีเทียน และปรับปรุงการกระจายของเนื้อสีให้สม่ำเสมอ
3. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ : ในอุตสาหกรรมประเภทบรรจุภัณฑ์จะมีการนำพอลิเอทิลีนแวกซ์มาใช้ในการเคลือบผิววัสดุให้เกิดความเงางาม เพิ่มความแข็งแรงทนทาน ป้องกันน้ำ ป้องกันรอยขีดข่วน อีกทั้งพอลิเอทิลีนแวกซ์ยังช่วยในการเกาะติดแน่นของผิวหน้าวัสดุและกระดาษ
4. อุตสาหกรรมยาง : ในอุตสาหกรรมทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ จะใช้พอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของยาง ทั้งนี้จะช่วยในเรื่องของสารหล่อลื่น ซึ่งพบว่า สารผสมเข้ากันได้ดีกับเนื้อยาง โดยเติมพอลิเอทิลีนแวกซ์ลงไป ปริมาณเล็กน้อยเพื่อลดความหนืดและความยึดติดแน่น นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในเรื่องของการผสมให้เกิดได้ดี ทำให้ใช้เวลาในกระบวนการน้อยลง

5. อุตสาหกรรมสีทาบ้านและอาคาร : ในอุตสาหกรรมสีทาบ้านและอาคารจะมีการเติมพอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อเป็นตัวกลางในการช่วยให้เนื้อสีผสมเข้ากันได้ดีและมีความมันวาว
6. สารเติมแต่งในการทำยางมะตอยราดถนนเพื่อเพิ่มความมันวาวและการผสมกันที่ดี
7. สารเติมแต่งในการทำหมึกปรี้นและสี : ในการผลิตหมึกปรี้นและสีที่ใช้ในงานพิมพ์นั้น จะมีการเติมพอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อเป็นสารเคลือบเนื้อกระดาษเพื่อให้มีความมันวาว สามารถกันน้ำ และเพิ่มความสวยงามให้กับงานพิมพ์
8. ตัวประสานในกระบวนการผสมโลหะร้อนและการผลิตสายเคเบิล
9. สารเติมแต่งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ : ในอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีการเติมพอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อช่วยเพิ่มความมันวาว รวมถึงสามารถยืดอายุการใช้งานให้กับผลิตภัณฑ์ ทำให้เป็นที่พึงพอใจของผู้บริโภค
10. สารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) : ในการผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์จะมีการเติมพอลิเอทิลีนแวกซ์ประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อช่วยในการแข็งตัวที่ดี ช่วยทำให้พื้นผิวเรียบและป้องกันความเสียหายของ PVC ที่อาจจะเกิดการเสียดสีกันระหว่าง PVC กับโลหะ

2.2 กระบวนการฟั่นละออง (Atomization process)

ปัจจุบันกระบวนการฟั่นละอองเป็นกระบวนการหนึ่งที่น่าสนใจและขยายวงกว้างในอุตสาหกรรมหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมผลิตนมผง น้ำผลไม้ผงพร้อมดื่ม อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง รวมไปถึงการผลิตผงวัสดุานาประเภทเพื่อส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักในการดำเนินการคือความต้องการที่จะผลิตผงวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสม และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยที่สุด

2.2.1 ข้อดีของการผลิตผงวัสดุโดยวิธีการฟั่นละออง (BETE Fog Nozzle, Inc., 2011)

1. กระบวนการฟั่นละอองเป็นกระบวนการแบบขั้นตอนเดียว (Single step) โดยการเปลี่ยนสถานะของวัสดุจากของเหลวเป็นผงของแข็ง ทำให้สามารถลดขั้นตอนอื่นในการดำเนินการออกไปได้ เช่น การตกผลึก การกรอง การบด และการอัดเม็ด เป็นต้น
2. กระบวนการฟั่นละอองเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ดังนั้น เมื่อพิจารณาต้นทุนในการดำเนินการพบว่า มีต้นทุนต่ำกว่ากระบวนการแบบกะ (Batch processing)

3. ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงต่ำ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องจักรกลน้อย
4. ค่าใช้จ่ายในส่วนของแรงงานต่ำ เพราะไม่จำเป็นต้องใช้คนงานจำนวนมากในดำเนินการ
5. การกักกรองอนุภาคในกระบวนการมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เพราะเมื่อหลังจากที่ระบบเริ่มดำเนินการไปแล้ว พงวัสดุจะไม่เกาะติดผนังของห้องฟั่นละอองจนกระทั่งเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งแล้วตกลงสู่ภาชนะรองรับ ทำให้ความเป็นอันตรายหรือปัญหาการกักกรองของวัสดุลดลง สามารถลดปัญหาการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์
6. ความไวต่อความร้อนของวัสดุ (Heat sensitive) สามารถควบคุมได้ เนื่องจากกระบวนการฟั่นละอองนั้น พงวัสดุที่ผลิตจะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งสามารถปรับลดอุณหภูมิในการดำเนินการได้ตามข้อกำหนดของวัสดุแต่ละชนิด
7. พงวัสดุที่ผลิตได้จะมีลักษณะเหมือนกันเป็นส่วนใหญ่ (Uniformed particle) เนื่องจากพงที่เกิดในกระบวนการสามารถลอยได้อย่างอิสระภายในห้องฟั่นละออง
8. เนื่องจากพงที่ได้จากกระบวนการฟั่นละอองมีขนาดที่ใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้การนำไปใช้งาน อาทิเช่น นมผง หรือกาแฟผง สามารถละลายในน้ำได้ดี

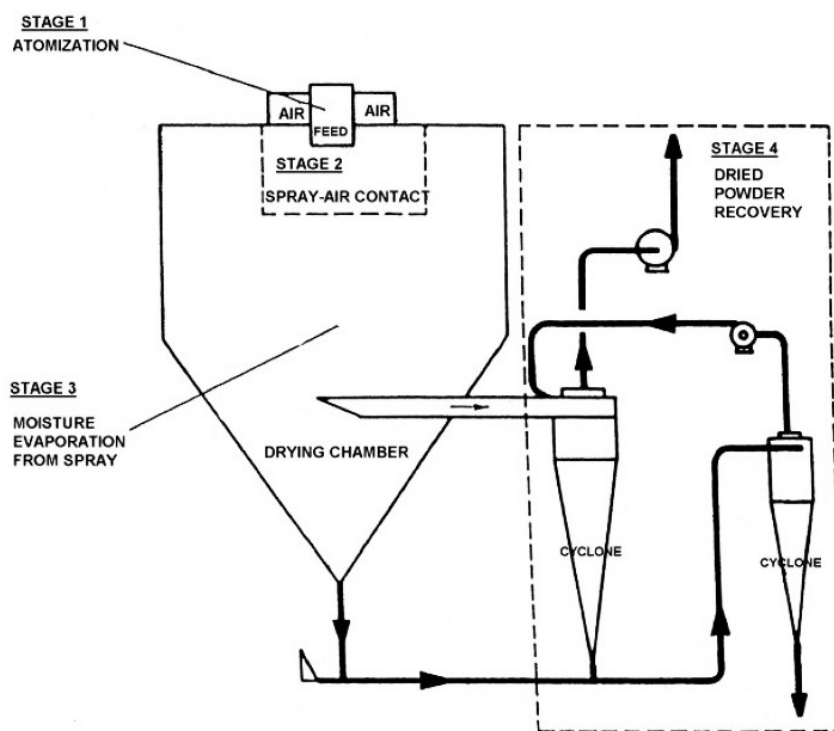
2.2.2 อิทธิพลของสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อกระบวนการฟั่นละออง

1. ความตึงผิวของของเหลว (Surface tension) โดยทั่วไปความตึงผิวของของเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งพบว่า เมื่อของเหลวมีความตึงผิวมากจะทำให้อนุภาคที่ได้มีขนาดใหญ่
2. ความหนืดของของเหลว (Viscosity) ความหนืดของของเหลวเป็นปัจจัยที่สำคัญที่บอกได้ว่าของเหลวมีความสามารถในการไหลตัวได้ดีหรือไม่ หากของเหลวมีความหนืดสูงแสดงว่าการไหลตัวจะเกิดได้ช้า การแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กจะเกิดขึ้นได้ยาก อนุภาคที่ได้จึงมีขนาดใหญ่
3. ความหนาแน่นของของเหลว (Density) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับปัจจัยของความตึงผิวและความหนืด เมื่อของเหลวมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคที่ได้ก็จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

2.2.3 กลไกในกระบวนการพ่นละออง

กลไกพื้นฐานในกระบวนการพ่นละอองประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-6 ซึ่งประกอบด้วย

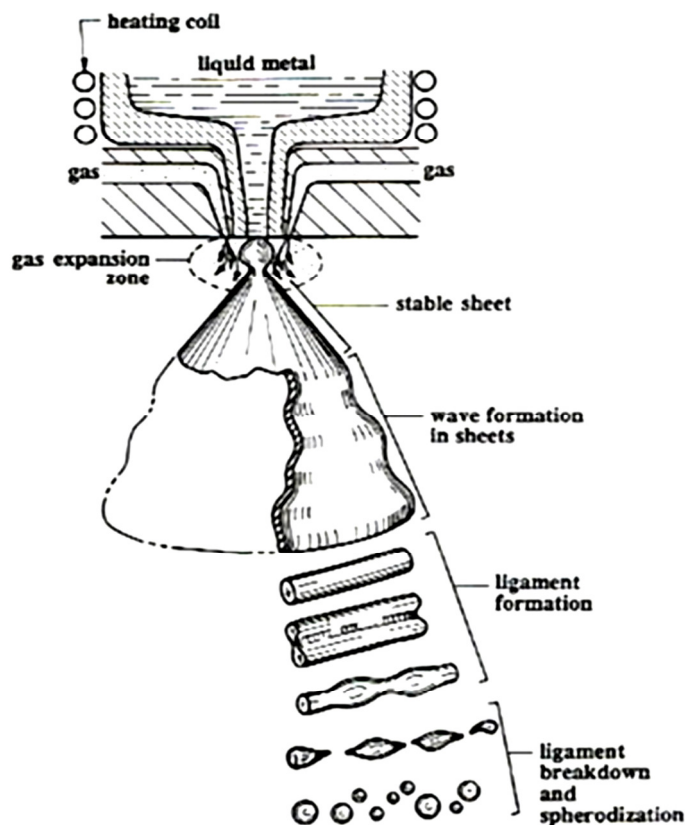
- การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละออง (Atomization of feed)
- การสัมผัสของละอองฝอยกับอากาศ (Spray-air contact)
- การระเหยของละอองฝอย (Evaporation)
- การแยกผงแห้งออกจากอากาศ (Product collection)



ภาพประกอบที่ 2-6 ขั้นตอนการดำเนินการในกระบวนการพ่นละออง
(BETE Fog Nozzle, Inc., 2011)

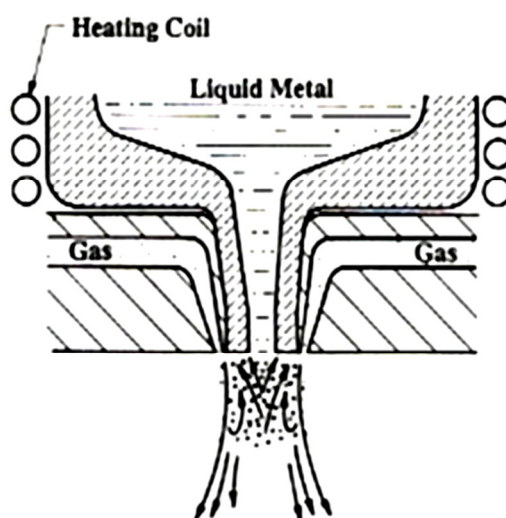
2.2.3.1 การเกิดละอองของเหลว (สุชาติ เข็นวิเศษ, 2547)

ในกระบวนการผลิตผงวัสดุโดยใช้วิธีการพ่นละออง เริ่มจากการป้อนของเหลวและอากาศเพื่อไปสัมผัสกันที่ที่ปลายด้านนอกหัวฉีด จากนั้นของเหลวจะแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็ก และเย็นตัวกลายเป็นผงขนาดต่างๆ โดยการทำให้ของเหลวแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กนั้น จะต้องมีแรงมากระทำต่อของเหลว ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ แรงกระแทกจากของไหล แรงจากการหมุนเหวี่ยงของเหลว และแรงที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันของเหลวกับบริเวณที่ของเหลวเกิดการแตกตัว เมื่อของเหลวอากาศจะสัมผัสกันจะเกิดเป็นละอองของเหลวรูปทรงต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-7 ขั้นตอนของการทำให้ของเหลวแตกกระจายออกเป็นละออง ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด รูปร่างและขนาดของผงวัสดุที่ได้จะขึ้นอยู่กับการดำเนินการในขั้นตอนนี้



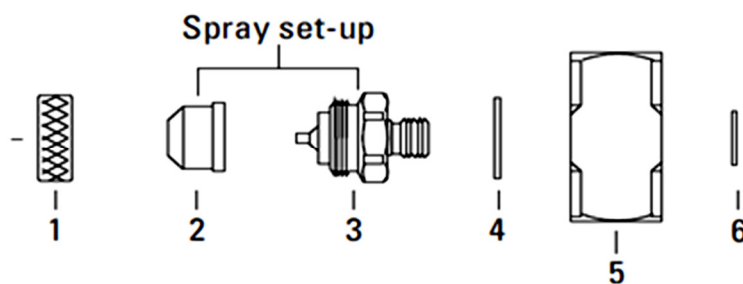
ภาพประกอบที่ 2-7 กลไกการแตกกระจายของของเหลวในกระบวนการพ่นละออง (Bose, A, 1995)

จากภาพประกอบที่ 2-7 เป็นการพ่นละอองโดยใช้หัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle การปรับอัตราการไหลของอากาศจะมีส่วนช่วยในการกระจายเป็นละอองของของเหลว ในการดำเนินการสามารถปรับอัตราการไหลของของเหลวและอากาศได้โดยการปรับขนาดรูเปิดของของไหลทั้ง 2 ชนิด ซึ่งจะเป็นอิสระต่อกันสูง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-8 สามารถใช้งานได้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง และลดปัญหาการอุดตันภายในหัวฉีด (Spraying systems Co., 2011)



ภาพประกอบที่ 2-8 ภาพตัดขวางของหัวฉีดชนิดใช้อากาศ (Bose. A, 1995)

ใน 1 ชุด Spray set-up ของหัวฉีดชนิดใช้อากาศจะประกอบด้วยชิ้นส่วนดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-9 โดยหมายเลข 1 2 3 4 5 และ 6 แสดงถึง Retainer ring, Air cap, Fluid cap, gasket, Nozzle body และ Back seal gasket ตามลำดับ



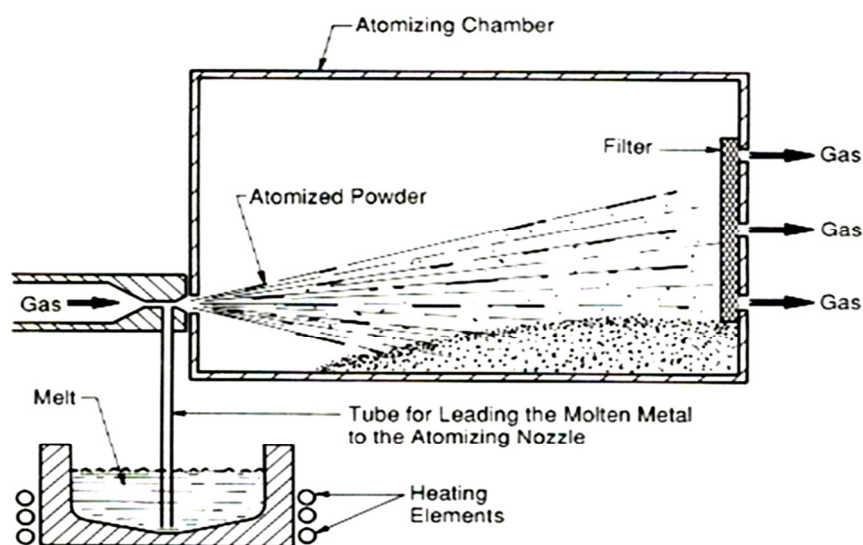
ภาพประกอบที่ 2-9 ส่วนประกอบของหัวฉีดชนิดใช้อากาศ (Spraying systems Co., 2011)

2.2.3.2 การสัมผัสของละอองของเหลวกับอากาศ (สุชาติ เข็นวิเศษ, 2547)

การสัมผัสกันระหว่างของเหลวกับอากาศจะมีผลต่อการการออกแบบห้องพ่นละออง (Atomizing chamber) โดยจะพิจารณาจากตำแหน่งของหัวฉีดกับอากาศแห้งขาเข้า ซึ่งจะแบ่งเป็น การไหลผ่านทางเดียวกัน (Co-current flow) การไหลผ่านสวนทางกัน (Counter-current flow) และการไหลผ่านแบบผสม (Mixed flow) โดยทั่วไปห้องพ่นละอองจะออกแบบตามความเหมาะสมตามลักษณะในการใช้งาน จะแบ่งตามลักษณะการวางแนวห้องพ่นละอองออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ห้องพ่นละอองแบบแนวนอนและห้องพ่นละอองแบบแนวตั้ง

1. ห้องพ่นละอองแบบแนวนอน

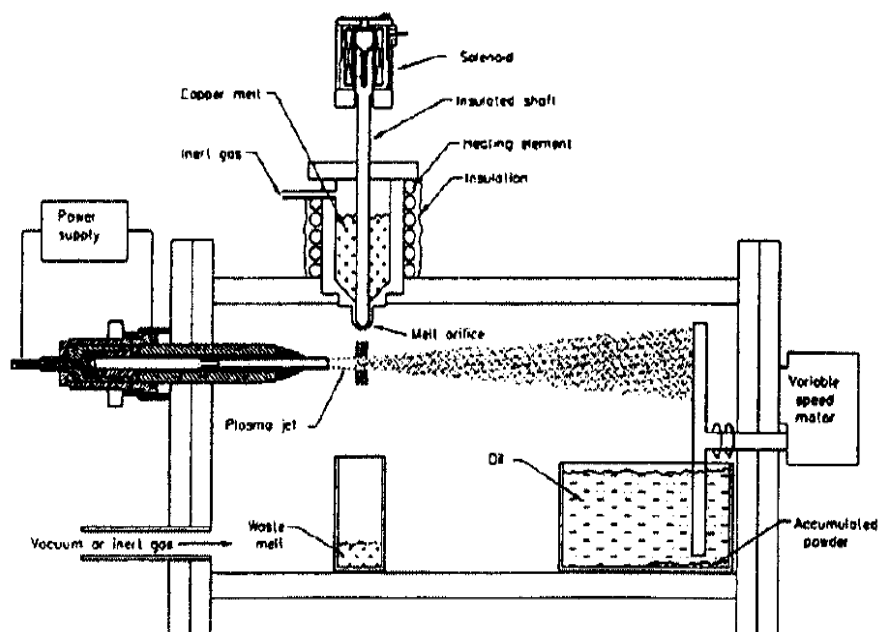
ในภาพประกอบที่ 2-10 แสดงลักษณะของห้องพ่นละอองแนวนอนแบบอาศัยหลักการกาลักน้ำ (Siphon) โดยของเหลวร้อนจะถูกดึงขึ้นมาจากด้านล่างผ่านท่อในแนวตั้งซึ่งเกิดจากการไหลผ่านของแก๊สความเร็วสูงไปสู่บริเวณที่มีการขยายตัวของแก๊สที่มีความเร็วสูงซึ่งจะช่วยเสริมให้กลไกการแตกเป็นละอองของของเหลวมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นละอองของเหลวเกิดการถ่ายเทความร้อนกับแก๊สจนกระทั่งแข็งตัวในที่สุด



ภาพประกอบที่ 2-10 ลักษณะของห้องพ่นละอองแบบแนวนอนโดยใช้หลักการกาลักน้ำ

(Bose. A, 1995)

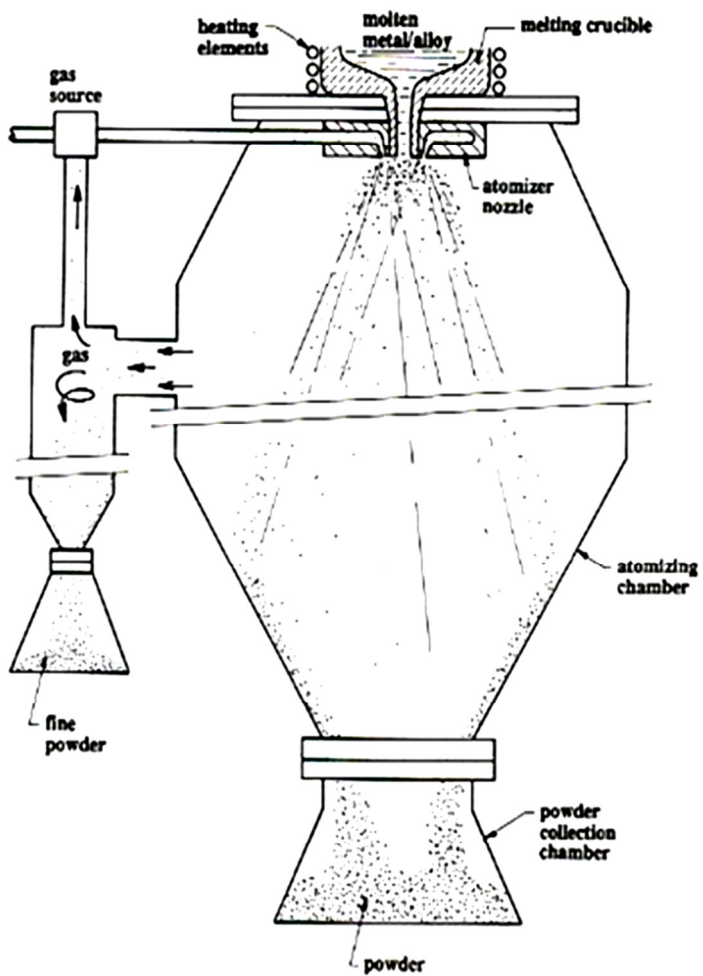
ในภาพประกอบที่ 2-11 แสดงลักษณะของห้องฟั่นละองแบบที่อาศัยแรงโน้มถ่วง (gravity) ของเหลวจะถูกปล่อยจากเตาหลอมหรือเบ้าจ่ายโลหะเหลวผ่านท่อลงไปสู่ด้านล่าง โดยมีหัวฟั่นแก๊สแรงดันสูงฟั่นแก๊สไปกระแทกของเหลวในแนวราบ แก๊สความเร็วสูงจะช่วยให้ของเหลวเกิดการแตกกระจายได้ดีขึ้น



ภาพประกอบที่ 2-11 ลักษณะของห้องฟั่นละองแบบแนวนอนที่ใช้การปล่อยของเหลวจากด้านบน (สุชาติ เข็นวิเศษ, 2547)

2. ห้องฟั่นละองของเหลวแบบแนวตั้ง

ลักษณะห้องฟั่นละองแบบแนวตั้งแสดงในภาพประกอบที่ 2-12 ภายในระบบจะอาศัยไซโคลนในการคัดแก๊สทิ้งและขณะเดียวกันก็จะเก็บผงวัสดุที่ผลิตได้ลงสู่ด้านล่างของไซโคลน ดังนั้นขนาดของห้องฟั่นละองในลักษณะนี้จึงต้องใหญ่พอที่จะทำให้ละอองของเหลวแข็งตัวก่อนที่จะพุ่งชนผนังหรือตกลงสู่ด้านล่าง



ภาพประกอบที่ 2-12 ลักษณะของห้องพ่นละอองแบบแนวตั้ง (Bose. A, 1995)

ในการพิจารณาการออกแบบห้องพ่นละอองจะต้องอาศัยข้อมูลประกอบการคำนวณ ในตารางที่ 2-1 แสดงข้อดีและข้อเสียของห้องพ่นละอองลักษณะต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ออกแบบ

ตารางที่ 2-1 การจำแนกข้อดีและข้อเสียของลักษณะของห้องพ่นละออง (สุชาติ เย็นวิเศษ, 2545)

ลักษณะการวาง	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบแนวนอน	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าลงทุนต่ำ 2. ประหยัดพื้นที่ในการปฏิบัติงาน 3. การปฏิบัติงานค่อนข้างสะดวกเนื่องจากตัวเครื่องและอุปกรณ์ต่างๆ จัดวางในแนวราบ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีข้อจำกัดกับวัสดุบางชนิดเนื่องจากไม่สามารถใช้งานกับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง 2. การจัดเก็บและการลำเลียงผลผลิตออกจากห้องพ่นไม่สะดวก
แบบแนวตั้ง	<ol style="list-style-type: none"> 1. เหมาะกับการผลิตผงวัสดุหลายชนิดทั้งที่มีจุดหลอมเหลวสูงและต่ำ 2. สามารถปรับปรุงหัวฉีดได้หลากหลาย 3. การจัดเก็บและลำเลียงผลผลิตออกจากห้องพ่นสะดวกเพราะมีอุปกรณ์เสริมมารองรับวัสดุได้ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง 2. ใช้พื้นที่ในการปฏิบัติงานมาก 3. การปฏิบัติงานมีความซับซ้อนเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ จัดวางอยู่ในระดับที่สูง

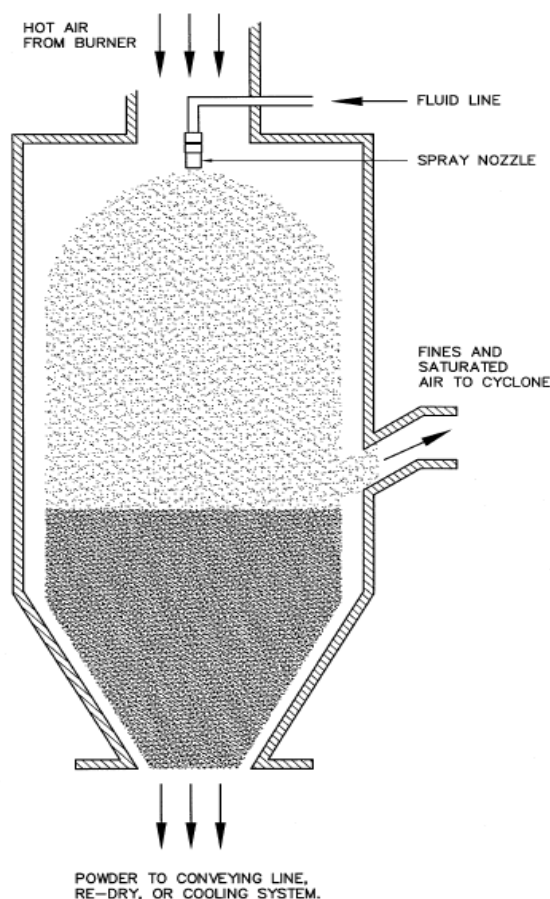
2.2.3.3 การระเหยของละอองของเหลว

เมื่อละอองสัมผัสกับอากาศร้อน จะทำให้ปริมาณความชื้นของละอองของเหลวลดลง และจะลดลงจนกระทั่งละอองของเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นผงแห้งขนาดต่างๆ กระจายอยู่ในห้องพ่นละออง

2.2.3.4 การแยกผงวัสดุ

ผงวัสดุที่ผลิตได้จะฟุ้งกระจายภายในห้องพ่นละอองจนกระทั่งเย็นตัวลงแล้วตกลงสู่ด้านล่างของห้องพ่นละออง ผงที่มีขนาดใหญ่ก็จะตกลงมาด้านล่างได้ง่ายและเร็วกว่าผงที่มีขนาดเล็ก การเก็บผงวัสดุที่ตกลงมายังด้านล่างของห้องพ่นละอองจะเก็บได้ง่ายเพราะผงวัสดุสามารถตกลงสู่ภาชนะรองรับได้โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง ส่วนผงที่มีขนาดเล็กกว่าจะฟุ้งกระจายและลอยตัวในระดับที่สูงภายในห้องพ่นละออง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-13 จึงต้องมีการติดตั้งไซโคลนเพื่อ

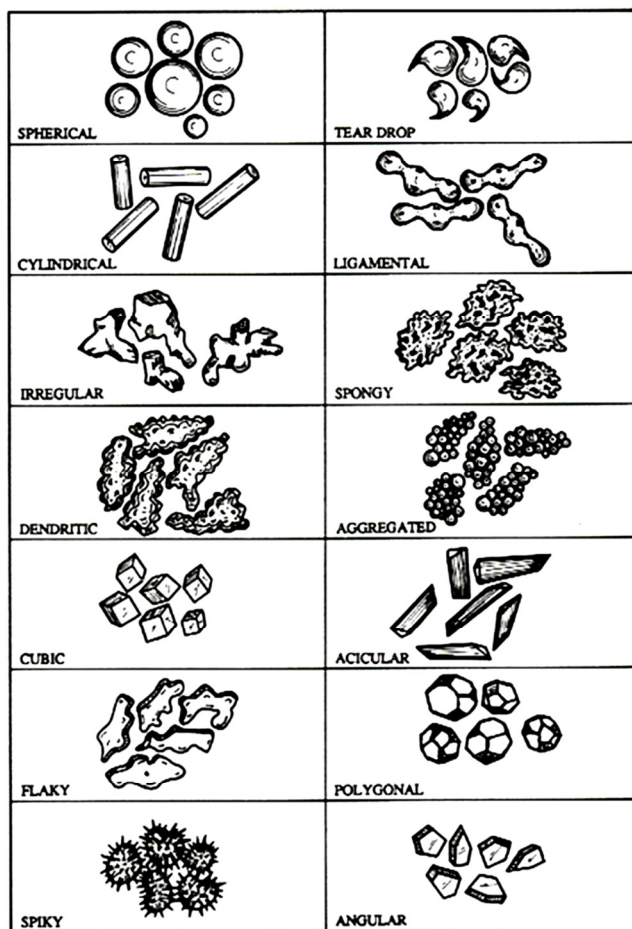
ดูดเอาอากาศและฝุ่นละอองออกจากห้องฟ่นละออง ผงวัสดุที่มีขนาดใหญ่จะตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลน ส่วนอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็กจะออกทางส่วนบนของไซโคลนแล้วผ่านไปยังตัวเก็บชิ้นสุดท้ายทั้งนี้อาจเป็น Wet scrubber, Bag filter หรือ Electrostatic precipitator ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผงที่เกิดขึ้นและประสิทธิภาพการนำกลับมา



ภาพประกอบที่ 2-13 การกระจายตัวของผงวัสดุภายในห้องฟ่นละออง

(BETE Fog Nozzle, Inc., 2011)

ผงวัสดุที่ได้จากกระบวนการฟ่นละอองจะมีการกระจายขนาดและลักษณะรูปร่างของที่แตกต่างกัน ดังภาพประกอบที่ 2-14 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อาทิเช่น คุณสมบัติของของเหลวที่นำมาฟ่นละออง และสภาวะที่ใช้ในการดำเนินการไม่ว่าจะเป็น อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาในการดำเนินการ ประเภทของหัวฉีดที่ใช้และอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งล้วนแล้วแต่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผงวัสดุที่ผลิตได้ทั้งสิ้น



ภาพประกอบที่ 2-14 ลักษณะรูปร่างของผงวัสดุที่ได้จากกระบวนการพ่นละออง (Bose, A, 1995)

2.2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคผงวัสดุ (อารี ชนบุญสมบัติ และคณะ, 2553)

ในการเลือกเทคนิคหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคจะต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นราคา ช่วงขนาดของอนุภาคที่ต้องการวิเคราะห์ การเตรียมตัวอย่าง และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมทั้งความยืดหยุ่นในการทำงาน ความยากง่ายในการปฏิบัติการ การซ่อมบำรุง และรูปแบบผลการวิเคราะห์ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งสำคัญและเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ เครื่องมือแต่ละเครื่อง สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การสุ่มตัวอย่างที่ดีในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถได้ตัวแทนที่ใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาทดสอบ นอกจากนั้นในการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคต้องตระหนักอยู่เสมอว่า การสุ่มและเคลื่อนย้ายตัวอย่างอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของวัสดุทดสอบ

2.2.4.1 เทคนิคการแยกขนาดด้วยตะแกรง (Sieving Techniques)

เทคนิคนี้เป็นการแยกขนาดของอนุภาคโดยพิจารณาจากความสามารถของอนุภาคในการลอดผ่านรูเปิดที่มีการควบคุมขนาดของตะแกรงลาด โดยที่ขนาดของตะแกรงจะระบุด้วยขนาดเมช (Mesh size) ซึ่งสามารถแยกขนาดอนุภาคได้เล็กถึง 44 ไมครอน เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 44 ไมครอน จะเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคอย่างหลวม (Agglomeration) และมีผลให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ ในบางกรณีการวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงแบบแห้ง (Dry sieve analysis) สามารถใช้ในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่ากับ 20 ไมครอน โดยการผสมสารดูดความชื้นที่ทราบขนาดและปริมาณลงในผงทดสอบที่แห้ง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงอาจจะทำแบบเปียก (Wet analysis) โดยนำมาผงทดสอบใส่ลงในของเหลว เพื่อป้องกันการเกาะตัวกันของอนุภาค อย่างไรก็ตาม สำหรับการวิเคราะห์อนุภาคโดยใช้ตะแกรงแบบเปียกนี้ ถ้าใช้ในการแยกขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 37 ไมครอน จำเป็นต้องใช้บีมดูดอากาศเพื่อช่วยดูดของเหลวและอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากผ่านรูเปิด นอกจากนี้ยังสามารถใช้อ่างอัลตราโซนิกหรือเครื่องสั่นทางกลช่วยการไหลผ่านของอนุภาคได้

อาจกล่าวได้ว่าเทคนิคทางตะแกรงนี้เป็นกรรมวิธีทางสถิติในการบันทึกโอกาสของอนุภาคที่จะผ่านหรือไม่ผ่านรูเปิดของตะแกรง ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่สามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถของอนุภาคนี้ เช่น การกระจายขนาดอนุภาคของผง ปริมาณของผงทดสอบบนตะแกรง สมบัติทางกายภาพของอนุภาค (พื้นผิว) กรรมวิธีการสั่นตะแกรง รูปร่างและลักษณะของอนุภาค รูปทรงทางเรขาคณิตของผิวหน้าตะแกรง (พื้นที่รูเปิดต่อพื้นที่ทั้งหมด) เป็นต้น เทคนิคการวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงนี้เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากวิธีใช้ที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และราคาถูก แต่ผลวิเคราะห์อาจเกิดความผิดพลาดได้มากอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้น และการย้อนกลับทำซ้ำให้ได้ผลเดิม (Reproducibility) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเป็นไปได้ยาก

2.2.4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser Diffraction)

เทคนิคทางแสงนี้เป็นเทคนิคที่สามารถวัดขนาดของอนุภาคได้อย่างรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างทดสอบในปริมาณน้อย และเมื่อทำการทดสอบตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้หลายครั้ง ผลการทดสอบในแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกัน (Reproducibility) เทคนิคนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคในช่วง

0.1-1000 ไมครอน (10^{-6} เมตร) เทคนิคนี้อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนของแสง (แหล่งกำเนิด เลเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมครอน) เมื่อมีอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงชั่วระยะเวลาหนึ่ง โดยการใช้สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสง ร่วมกับคอมพิวเตอร์ ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ สิ่งหนึ่งที่ต้องระลึกอยู่เสมอ คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินช่วงความสามารถของเครื่องตรวจจับจะไม่ได้รับการบันทึก สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์มีข้อจำกัดตรงที่อนุภาคต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้วัด (ถ้าใช้เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน อนุภาคควรมีขนาดใหญ่กว่า 25 ไมครอน) อนุภาคต้องทึบแสง และอนุภาคทุกขนาดต้องกระเจิงแสงออกไปอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน จากข้อจำกัดเหล่านี้ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กใกล้ความยาวคลื่นของแสง ปัจจุบันได้มีการใช้ทฤษฎีของมี (Mie Theory) เพื่อให้สามารถวัดขนาดของอนุภาคในช่วง 0.1-2000 ไมครอน ได้อย่างถูกต้อง แต่ทฤษฎีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่จำเป็นต้องรู้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ของวัสดุที่นำมาทดสอบ และตัวกลาง รวมทั้งค่าดูดซับแสง (Absorption) ของทั้งสองชนิดด้วย

2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

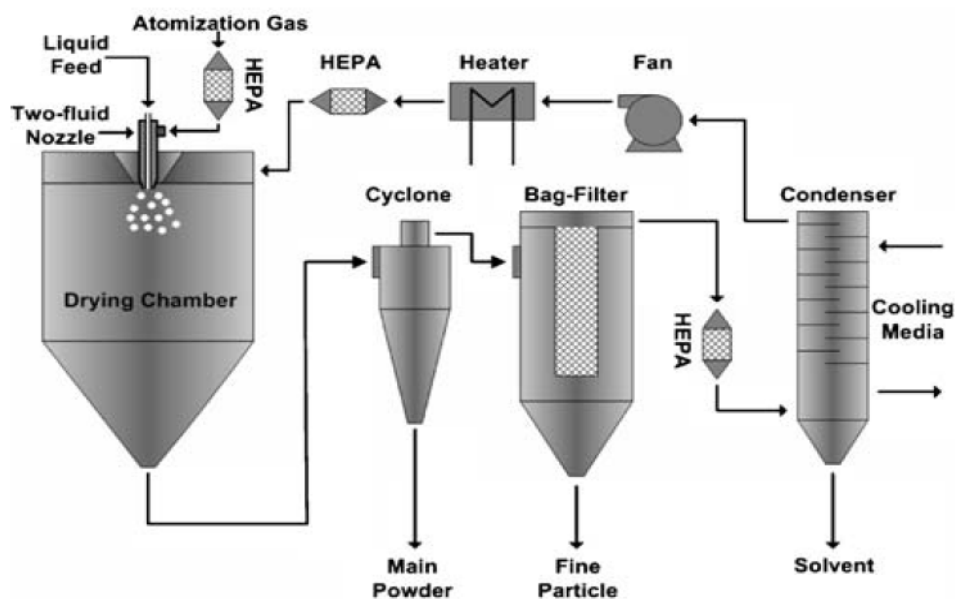
2.3.1 การออกแบบห้องฟันละออง

วสันต์ ค้วงคำจันทร์ (2546) ศึกษาและออกแบบเพื่อสร้างเครื่องฟันละอองเพื่อใช้ในการผลิตกระเจี๊ยบผง โดยได้ออกแบบส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ชุดหัวฉีด หอฟันละออง และระบบดักเก็บผง จากการคำนวณและออกแบบได้เส้นผ่านศูนย์กลางห้องฟันละอองเท่ากับ 0.50 เมตร สูง 1.50 เมตร จากนั้นทำการทดลองอบแห้งกระเจี๊ยบภายใต้สภาวะการอบแห้งแตกต่างกันคือ อัตราการป้อนสารละลายวัตถุดิบคงที่เท่ากับ 2.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของสารละลายวัตถุดิบมี 3 ระดับคือ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้ามี 5 ระดับคือ 130 140 150 160 และ 170 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของอากาศมี 5 ระดับคือ 0.0148 0.0213 0.0277 0.0345 และ 0.0410 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะ

มีผลทำให้ปริมาณความชื้นของกระเจี๊ยบผงเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิอากาศร้อนเข้า หรือลดความเข้มข้นของสารละลายวัตถุคิบ

สุชาติ เย็นวิเศษ (2547) ออกแบบและสร้างเครื่องฟั่นละอองเพื่อผลิตผงโลหะ รวมถึงศึกษาตัวแปรควบคุมที่มีอิทธิพลต่อขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของอนุภาคผงโลหะที่ผลิตได้ โดยทำการทดลองกับโลหะชนิดที่มีจุดหลอมเหลวไม่เกิน 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งได้แก่ ทองแดง ทองแดงผสม อะลูมิเนียม ดีบุก และดีบุกผสม ใช้หัวฉีด (nozzle) แบบ Confined (closed) nozzle I จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของผงโลหะได้แก่ แรงดันแก๊สที่ใช้ อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลวของโลหะเหลว และอัตราการไหลของโลหะเหลว เมื่อใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลวระดับสูงสุดคือ 150 องศาเซลเซียส จะสามารถทำให้การแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กได้มากกว่าการใช้อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อโลหะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากระดับจุดหลอมเหลวจะทำให้ความหนืดลดลง การไหลตัวดี สามารถแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กเมื่อถูกแรงกระแทกจากแก๊ส จากการพิจารณาอัตราการไหลของโลหะหลอมพบว่า มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณและแรงดันของแก๊สที่ใช้ โดยพบว่า เมื่อใช้อัตราการไหลของโลหะเหลวน้อยสุด (วัดได้จากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวจ่ายโลหะเหลว) จะมีผลทำให้การแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กของโลหะเหลวเกิดขึ้นได้มากกว่าการใช้อัตราการไหลของโลหะเหลวที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งเมื่อศึกษาถึงผลของแรงดันแก๊สที่ใช้ฟั่นโลหะจะพบว่า แรงดันของแก๊สที่ใช้ในการฟั่นเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากเป็นอันดับหนึ่ง

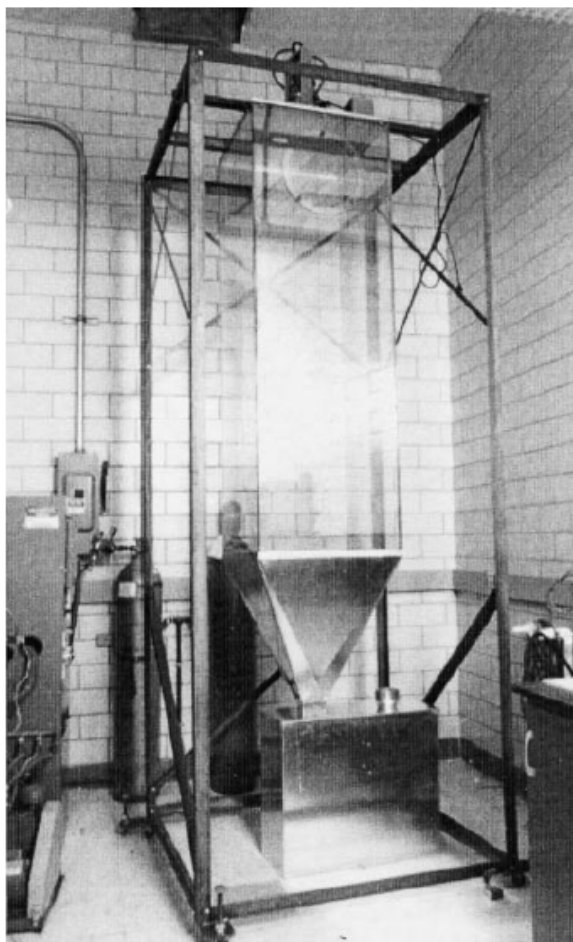
Thybo. P และคณะ (2008) ศึกษาการออกแบบเครื่องฟั่นละอองเพื่อขยายกำลังการผลิตจากระดับเล็กสู่ระดับอุตสาหกรรมโดยเริ่มต้นจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลในการดำเนินการเพื่อผลิตผงวัสดุ ได้แก่ ความเข้มข้นและอัตราการไหลของของเหลว อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของของเหลวและอากาศ เป็นต้น ผลการออกแบบแสดงดังภาพประกอบที่ 2-15



ภาพประกอบที่ 2-15 กระบวนการพ่นละอองที่ออกแบบในระดับอุตสาหกรรม
(Thybo.P *et al.*, 2008)

Otigbe. J และ Mcavoy. J (1997) ออกแบบและสร้างเครื่องพ่นละอองเพื่อผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อใช้ในการพ่นละอองที่ความดันสูง (7.6 เมกกะปาสกาล) ผลการออกแบบแสดงดังภาพประกอบที่ 2-16 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- The heating zone ประกอบด้วยเตาหลอมพอลิเอทิลีนแวกซ์ ชุดควบคุมอุณหภูมิ และอุปกรณ์ควบคุมการไหล
- The atomization zone ประกอบด้วยหัวฉีดและห้องพ่นละออง
- The collection zone ประกอบด้วย ถังเก็บผงและท่อปล่อยอากาศ



ภาพประกอบที่ 2-16 เครื่องพ่นละอองที่ออกแบบและสร้างในการทดลอง
(Otigbe. J และ Mcavoy. J, 1997)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของผงวัสดุในกระบวนการพ่นละออง

ณัฐสินี แสงใส (2555) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตผงพาราฟินแวกซ์ด้วยกระบวนการพ่นละอองโดยใช้กระบวนการแบบอัลตราโซนิก และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัว ขนาดเฉลี่ย และรูปร่างของผงพาราฟินแวกซ์ที่ผลิตได้ ในการทดลองได้ทำการศึกษาผลจากตัวแปรต่างๆ เช่น ผลของอุณหภูมิซูเปอร์ฮีตของพาราฟินแวกซ์ อัตราการป้อนน้ำพาราฟินแวกซ์ แอมพลิจูดหรืออัตราการสั่นของหัวโพรบ โดยทำการลำเลียงพาราฟินแวกซ์เหลวจากเตาหลอม อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ปลดปล่อยแรงดัน 0.2 บาร์ ไหลผ่านหัวฉีดน้ำพาราฟินแวกซ์ไปยังหัวโพรบ เทคนิคนี้อาศัยการสั่นของคลื่นอัลตราโซนิกส่งไปยังหัวโพรบ ส่งผลให้พาราฟินเหลวบนหัวโพรบ

สั้นและเกิดเป็นคลื่นเล็กๆ เมื่อคลื่นดังกล่าวเอาชนะแรงตึงผิวของน้ำพาราฟินแว็กซ์ จะทำให้เกิดเป็นหยดออกมา ภายในถังอะตอมไมเซอร์จะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มอัตราการเย็นตัวของพาราฟินแว็กซ์และรักษาอุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์ จากการศึกษาพบว่า แอมพลิจูด อัตราการป้อนน้ำพาราฟินแว็กซ์ และอุณหภูมิซูปเปอร์ฮีทมีผลต่อผงที่ผลิตได้ เมื่ออุณหภูมิซูปเปอร์ฮีทสูงขึ้น อัตราการป้อนน้ำพาราฟินแว็กซ์และแอมพลิจูดต่ำ พาราฟินแว็กซ์ที่ได้จะมีลักษณะกลม ขนาดเฉลี่ยเล็กลง มีการกระจายตัวที่แคบลงและมีผลผลิตสูงขึ้น

Reverchon E และ Antonacci. A. (2007) ศึกษาวิธีการผลิตผงพอลิเมอร์โดยใช้วิธีการพ่นละอองแบบใหม่ที่เรียกว่า Supercritical Assisted Atomization, SAA โดยเป็นการใช้ของเหลวเหนือจุดวิกฤติที่เป็นสสารที่อยู่ในสถานะที่มีสมบัติร่วมกันระหว่างของเหลวและแก๊สจึงสามารถละลายสารต่างๆ ได้ รวมถึงมีความหนืดต่ำและมีสมบัติการไหลคล้ายแก๊ส ทำให้แทรกผ่านสารต่างๆ ได้ดี ในการทดลองจะใช้ CO₂ เนื่องจากจุดวิกฤติค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นการผลิตผงพอลิเมอร์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมครอน โดยใช้ Poly (Methyl methacrylate) หรือ PMMA และ Poly-Lactiden หรือ PLLA ทั้งนี้จะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดของผงพอลิเมอร์ที่ได้ ประกอบด้วยอัตราส่วนของการไหลเชิงมวลระหว่าง CO₂ และของเหลว อุณหภูมิในการตกลงมาของอนุภาคและความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งพบว่า สามารถผลิตผงพอลิเมอร์ที่มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วงที่แคบ โดยผงของ PMMA และ PLLA ที่ผลิตได้จะอยู่ในช่วง 0.05-1.6 ไมครอน และ 0.1-3.0 ไมครอน ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่า พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่งที่ดีในการดำเนินการเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนั้นค่อนข้างแตกต่างจากอุณหภูมิสภาพแก้วของพอลิเมอร์ (Glass transition temperature) แต่ยังคงมีค่าสูงพอที่จะทำให้ของเหลวระเหยออกไปได้อย่างรวดเร็ว

Basel Mulhem และคณะ (2006) ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการที่จะควบคุมกระบวนการแตกกระจายเป็นละอองในกระบวนการพ่นละอองของสารละลายแขวนลอย (Suspension หรือ Slurry) โดยของเหลวที่ใช้ได้แก่ น้ำ กลีเซอรอล สารละลายกลีเซอรอล-น้ำ Carboxymethyl cellulose (CMC) และ CMC-น้ำ ส่วนอนุภาคของแข็งที่ใช้ได้แก่ พอลิเมอร์ แก้ว และผง kaolin ที่มีขนาดตั้งแต่ 5-20 ไมครอนและใช้อะตอมไมเซอร์ชนิด Two fluid nozzle การกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากกระบวนการพ่นละอองที่ได้จะวัดจากเครื่อง Laser-diffraction particle analyzer โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคของแข็งในสารแขวนลอยที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง จากการศึกษาพบว่า เมื่อทดลองกับสารแขวนลอยที่มีอนุภาคของแข็งใหญ่กว่า 50 ไมครอน จะพบว่า การกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีได้มากกว่า 1 รูปแบบ

(bimodal) แบบแรกจะเป็นการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเดียวกับขนาดของอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ และแบบที่สองจะเป็นการกระจายขนาดที่มีลักษณะเป็นผกของของเหลวบริสุทธิ์เท่านั้น แต่เมื่อทดสอบกับสารแขวนลอยที่มีอนุภาคของแข็งขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน จะพบว่าลักษณะของการกระจายขนาดของอนุภาคจะมีเพียงลักษณะเดียว (monomodal) ขนาดของอนุภาคที่ได้จากการบวมการอะตอมไมเซชันจะมีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับขนาดของของเหลวบริสุทธิ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนืดของของเหลวที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาดที่เพิ่มขึ้นด้วย

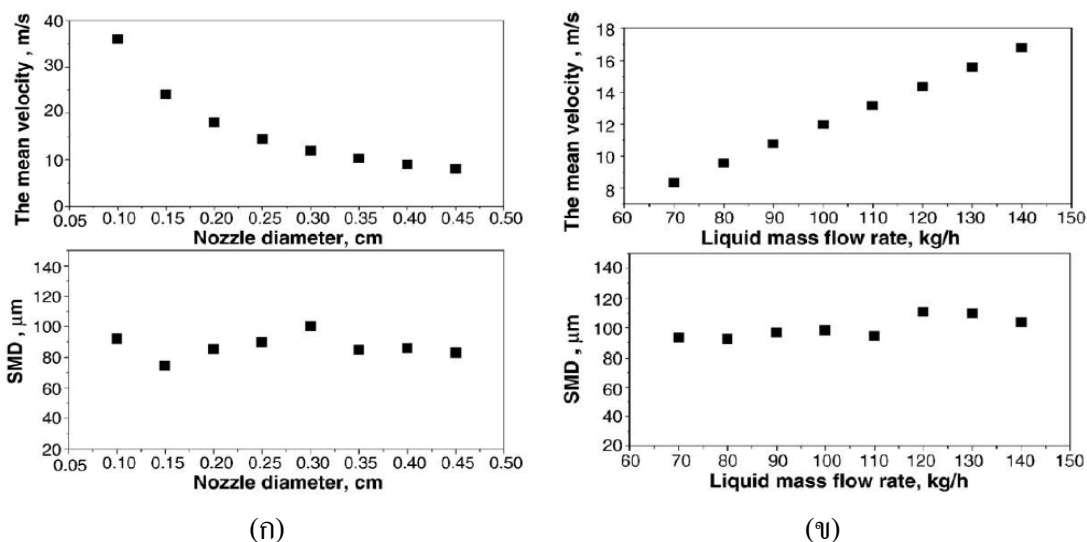
Czisch, C และ Fritsching, U (2007) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของผงโลหะที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นละออง ได้แก่ อุณหภูมิและความดันแก๊ส รวมถึงอุณหภูมิของโลหะเหลว จากการศึกษาพบว่า กระบวนการพ่นละอองประกอบด้วยสองขั้นตอนที่สำคัญคือ ช่วงการพ่นละอองโดยใช้อะตอมไมเซชัน และช่วงการไหลของแก๊สและผงโลหะลงสู่อุปกรณ์รองรับ ในกระบวนการพ่นละอองโลหะเหลวที่มีความหนืดสูงและแรงตึงผิวต่ำๆ ผงโลหะที่ได้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibre) ทั้งนี้เกิดจากความหนืดของโลหะที่เพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในการดำเนินการ จึงไม่สามารถทำให้เกิดการแตกกระจายของผงโลหะให้เป็นละอองขนาดเล็กได้ จึงได้ศึกษาวิธีการป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว โดยการเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สหรือใช้แก๊สเฉื่อยและไอน้ำร้อน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะปรับอุณหภูมิแก๊สให้อยู่ในช่วง 300-1270 เคลวิน ความดัน 6 บาร์ อัตราการไหล 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากการทดลองพ่นละอองเซรามิกเหลวแบบใช้แก๊สร้อนพบว่า อัตราส่วนระหว่างผงต่อเส้นใย (Particle to fibre ratio, PFR) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันแก๊สเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนเชิงมวลของผง (Powder mass fraction) สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และค่า Exponential factor = -0.39 นอกจากนี้ยังพบว่า อนุภาคเซรามิกที่มีขนาดใหญ่ จะมีความหนาแน่นลดลงเนื่องจากเกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากภายในเนื้อของผงเซรามิก

Otigbe, J และ Mcavoy, J (1997) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ในกระบวนการพ่นละอองแทนที่กระบวนการบดละเอียดแบบดั้งเดิม เพื่อลดปัญหาผงวัสดุเกาะติดอุปกรณ์ ในการทดลองใช้แก๊สไนโตรเจนความดันประมาณ 7.6 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ระหว่าง 170-220 องศาเซลเซียส ผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีการกระจายขนาดอยู่ในช่วง 0-200 ไมครอน จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 205 องศาเซลเซียส และขนาดรูเปิดของท่อของเหลวเท่ากับ 3.175 มิลลิเมตร สามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีการกระจายขนาดเล็กกว่า 53 ไมครอน ได้สำเร็จ ทั้งนี้ยังพบว่า กระบวนการพ่นละอองเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตผงพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนัก

โมเลกุลต่ำซึ่งก่อนหน้านี้ไม่สามารถผลิตได้กับเครื่องบดแบบละเอียด อีกทั้งกำลังการผลิตแต่ละครั้งค่อนข้างสูง ปลอดภัยและอ่อนโยนต่อสิ่งแวดล้อม

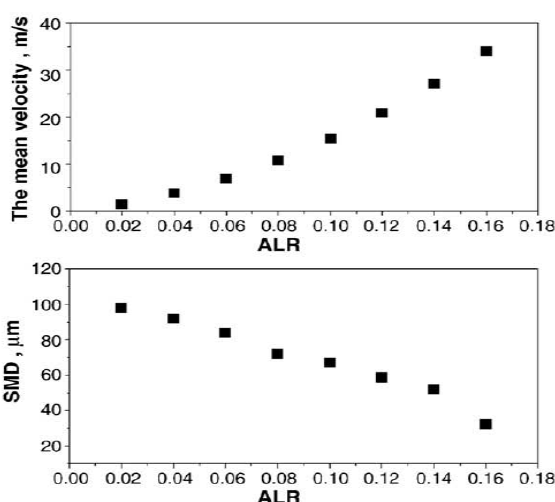
Justin. L และคณะ (1995) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาด และการกระจายขนาดของผงวัสดุในกระบวนการพ่นละออง ได้แก่ ความดันอากาศ (P) อัตราการไหล (F) และความเข้มข้นของของเหลวที่นำมาพ่นละออง (C) โดยใช้หัวฉีดชนิด Pneumatic nozzle จากนั้นดำเนินการทดลองแบบ 3^3 แฟกทอเรียล และศึกษาการกระจายขนาดของผงวัสดุที่ได้โดยใช้เทคนิค Laser diffractometry จากนั้นวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรทั้งหมดด้วยวิธี Multilinear stepwise regression analysis จากโปรแกรม Design-Expert โดยพบว่า ความดันอากาศในการพ่นละอองมีผลต่อมุมของเหลวที่ออกจากหัวฉีด การเพิ่มความดันอากาศในการพ่นละออง จะทำให้มุมของเหลวกว้างขึ้นและสามารถแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กได้ดี แต่จะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความเข้มข้นของของเหลว ทั้งนี้ยังพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ผงวัสดุที่ได้มีการกระจายขนาดที่กว้างขึ้นแต่จะไม่มีผลมากต่อรูปร่างของผงวัสดุ

Lin. J และคณะ (2009) ศึกษาอิทธิพลของสภาวะที่ดำเนินการในกระบวนการพ่นละอองที่มีผลต่อขนาดของผงวัสดุที่ได้ จากการศึกษาพบว่า รูเปิดของหัวฉีด (Nozzle diameter) อัตราการไหลของของเหลว (Liquid mass flow rate) และอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศและของเหลว (Air to liquid ratio, ALR) มีผลต่อขนาดของผงวัสดุ



ภาพประกอบที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการดำเนินการและขนาดของผงวัสดุในกระบวนการพ่นละออง ขนาดรูเปิดของหัวฉีด (ก) อัตราการไหลของของเหลว (ข) (Lin.J et al., 2009)

จากภาพประกอบที่ 2-17 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มขนาดรูเปิดของหัวฉีดจะทำให้ความเร็วในการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับของเหลวลดลง ทั้งนี้เมื่อเพิ่มขนาดรูเปิดของหัวฉีดในช่วงแรกขนาดของวัสดุจะลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆ คงที่ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวพบว่า ขนาดของผงวัสดุยังคงมีขนาดคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นพร้อมๆ กันระหว่างอัตราการไหลของของเหลวและอัตราการไหลของอากาศ ทำให้ ALR ยังคงเท่าเดิม แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศหรือของเหลวเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง จะมีผลทำให้ขนาดของวัสดุเปลี่ยนไปดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-18 โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของ ALR จะทำให้ผงวัสดุที่ผลิตได้มีขนาดเล็กลง



ภาพประกอบที่ 2-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ALR และขนาดของผงวัสดุ
ในกระบวนการพ่นละออง (Lim.J *et al.*, 2009)

Lagutkin, S และคณะ (2004) ศึกษาถึงกระบวนการผลิตผงดีบุกและโลหะบางชนิดโดยใช้การพ่นละออง ซึ่งเป็นการประยุกต์การใช้งานร่วมกันระหว่างหัวฉีดแบบความดันชนิด Centrifugal hydraulic atomizer และแบบแก๊ส จุดประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อลดการกระจายขนาดของผงโลหะให้อยู่ในช่วงที่แคบ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในกระบวนการพ่นละอองแบบดั้งเดิม นำไปสู่การลดมูลค่าในการดำเนินการ จากการทดลองพบว่า โลหะเหลวที่ออกจากหัวฉีดจะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า Prefilming-step หลังจากนั้นกระแสดังกล่าวและของเหลวสัมผัสกันและเกิดการแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็ก เมื่อลดอัตราการไหลของแก๊สและเพิ่มความดันจะทำให้ผงโลหะที่ได้มีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ในช่วง 20-100 ไมครอน

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือออกแบบและสร้างเครื่องพ่นละอองต้นแบบเพื่อใช้ในการผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีการกระจายขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน รวมถึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความดันที่ใช้ในการพ่นละออง (Air pressure) อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (Melting temperature) และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว (D_A/D_L)

ขั้นตอนการดำเนินการแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ออกแบบและสร้างเครื่องพ่นละอองต้นแบบ
2. ทดสอบการทำงานของเครื่องพ่นละออง และหาสภาวะการดำเนินการที่ดีที่สุดในการผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

3.1 ออกแบบและสร้างเครื่องพ่นละอองต้นแบบ

เครื่องพ่นละอองที่ออกแบบในการทดลองนี้เป็นเครื่องพ่นละอองแบบแนวตั้ง เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ประหยัดพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (สุชาติ เย็นวิเศษ, 2547) ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

- ส่วนให้ความร้อน (Heating zone)
- ส่วนพ่นละออง (Atomizing zone)
- ส่วนรองรับผง (Collection zone)

3.1.1 ออกแบบส่วนให้ความร้อนแก่พอลิเอทิลีนแวกซ์

อุปกรณ์ในส่วนให้ความร้อนประกอบด้วยหม้อบรรจุพอลิเอทิลีนแวกซ์ ท่อสแตนเลสขนาด $\frac{1}{4}$ นิ้ว และวาล์วควบคุมการไหล โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะติดตั้งชุดให้ความร้อนเพื่อหลอมพอลิเอทิลีนแวกซ์ เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่นำมาพ่นละอองในการทดลองจะแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง จึงต้องให้ความร้อนจนหลอมละลายเป็นของเหลวก่อนที่จะทำการพ่นละออง พอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ชนิด A ชนิด B และชนิด C ซึ่งจะแบ่งตามสมบัติเฉพาะ เช่น ความหนืด ความหนาแน่นและองค์ประกอบภายใน จากนั้นวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว (Melting temperature) และจุดตกผลึก (Crystallization temperature) ของพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeters (DSC) เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้กำหนดสภาวะการดำเนินการ

3.1.2 ออกแบบส่วนพ่นละออง

ในการออกแบบห้องพ่นละออง จะทำการทดลองเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้กำหนดขนาดของห้องพ่นละออง ปัจจัยสำคัญที่ศึกษาได้แก่ ความดัน อุณหภูมิและอัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์

3.1.2.1 ความดัน

ในการทดลองเพื่อกำหนดขนาดของห้องพ่นละอองจะทำการทดลองที่ความดันเท่ากับ 7 บาร์ ซึ่งเป็นความดันสูงสุดในการพ่นละออง และมีมุมที่ของเหลวทางออกจากหัวฉีดกว้างที่สุด ทำให้ละอองของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางที่ไกล (สุชาติ เย็นวิเศษ, 2547) จึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของห้องพ่นละอองได้

3.1.2.2 อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์

อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ใช้ในการกำหนดขนาดของห้องพ่นละอองจะดำเนินการที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว โดยจะทดลองที่อุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส

3.1.2.3 อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์

ในการทดลองจะกำหนดขนาดของห้องฟนละอง โดยใช้รูเปิดท่อของเหลวเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขนาดที่ใหญ่ที่สุดที่ทำการศึกษานี้

3.1.3 ออกแบบส่วนรองรับผง

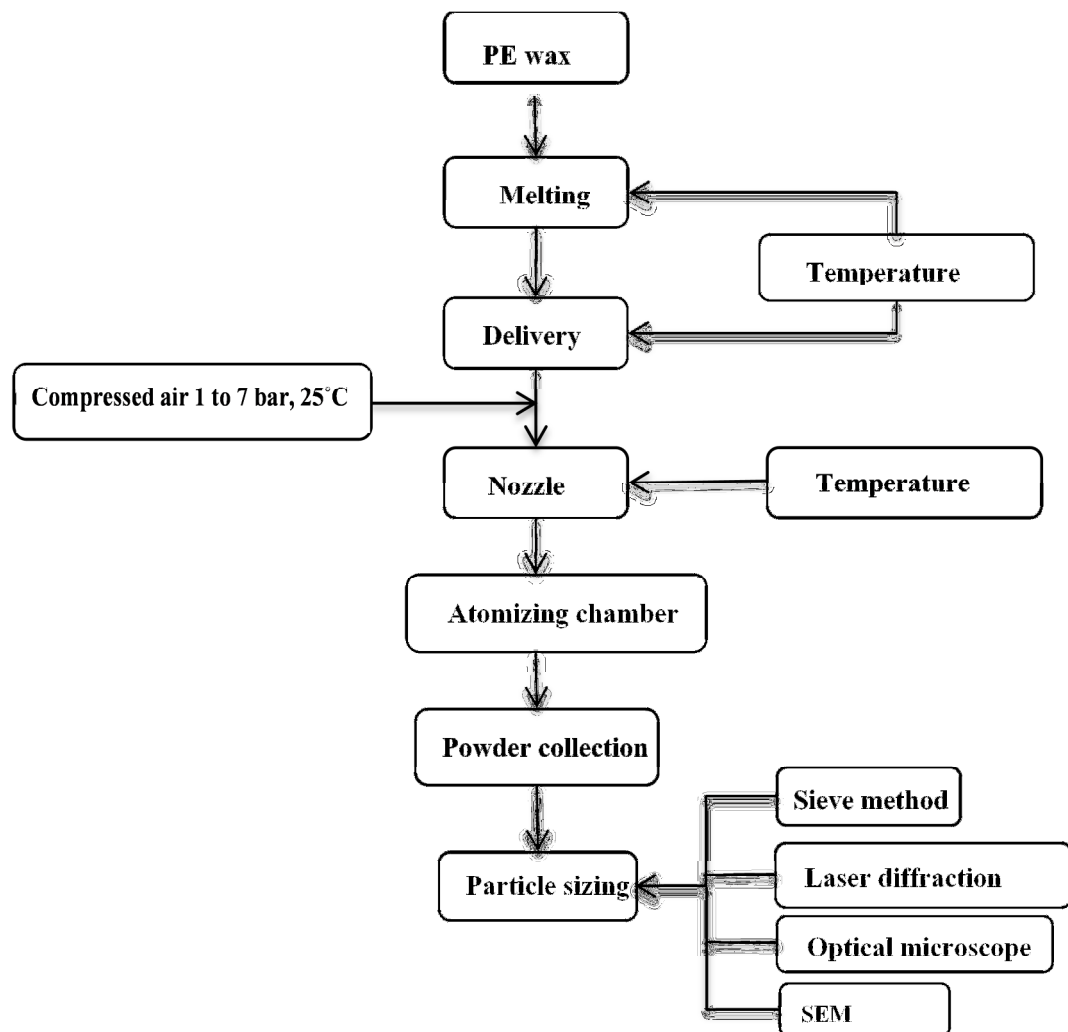
เนื่องจากการฟนละองที่ความดันเท่ากับ 7 บาร์ และหัวฉีดที่มีขนาดรูเปิดของท่ออากาศเท่ากับคือ 3.0 มิลลิเมตร พบว่า มีความเร็วลมที่ออกจากห้องฟนละองเพียง 2.3 เมตรต่อวินาที รวมถึงผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟนละองได้สามารถตกลงสู่ภาชนะรองรับผงได้โดยไม่ต้องใช้ลมเป่า ดังนั้นจึงออกแบบภาชนะรองรับผงที่มีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมโดยที่บริเวณท่อทางออกจะติดตั้งอุปกรณ์กรองฝุ่นขนาดเล็กเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ

3.2 การทดสอบการทำงานของเครื่องฟนละอง และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและรูปร่าง ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้

เมื่อดำเนินการออกแบบและสร้างเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในส่วนนี้จะเป็นขั้นตอนการผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความดันที่ใช้ในการฟนละอง อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว โดยได้กำหนดสภาวะและขั้นตอนการดำเนินการดังแสดงในตารางที่ 3-1 และภาพประกอบที่ 3-1 ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 สภาวะที่ศึกษาในการทดลอง

ตัวแปรที่ศึกษา	หน่วย	ค่าที่กำหนด
ความดัน	บาร์	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์	องศาเซลเซียส	120, 140, 160, 180
อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว	มิลลิเมตร	3.0:0.5, 3.0:1.0, 3.0:1.5



ภาพประกอบที่ 3-1 Flow diagram ของกระบวนการพ่นละอองเพื่อผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

3.2.1 การศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์

เพื่อศึกษาผลของดันและอุณหภูมิในการผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยกระบวนการพ่นละออง ในการทดลองได้กำหนดอัตราส่วนระหว่างรูเปิดที่อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 เพื่อทดลองพ่นละอองผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่อุณหภูมิเท่ากับ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะทำการพ่นละอองที่ความดัน 1 2 3 4 5 6 และ 7 บาร์ ตามลำดับ

3.2.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว

การทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและรูเปิดท่อของเหลวจะดำเนินการพ่นละอองที่ความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ โดยแต่ละความดันจะให้ความร้อนพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่อุณหภูมิเท่ากับ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส เพื่อพ่นละอองด้วยหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 3.0:1.0 และ 3.0:1.5 ตามลำดับ

3.2.3 การศึกษาการพ่นละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C

ในการทดลองจะทำการศึกษากระบวนการพ่นละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์อีก 2 ชนิด คือ B และชนิด C โดยจะศึกษาที่อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเท่ากับ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส

3.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.4.1. การวิเคราะห์ขนาด และการกระจายขนาดด้วยตะแกรงร่อน (sieve method)

3.2.4.2. การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดด้วยเทคนิค Laser diffraction ด้วยเครื่อง Mastersizer2000

3.2.4.3. การวิเคราะห์ค่า Bulk density

3.2.4.4. การวิเคราะห์รูปร่างและการกระจายตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)

3.2.4.5. การวิเคราะห์รูปร่างและพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

3.2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการทำนายตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

3.2.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

คำนวณทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS for Windows 13.0 วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ตามวิธีของ Duncan's Multiple Range Test ที่ค่าความเชื่อมั่น $P < 0.05$

3.2.5.2 ระเบียบวิธีทาคุชิ (Taguchi method)

ใช้วิธีการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ด้วยหลักการของทาคุชิ ซึ่งจะกำหนดระดับตัวแปร 2³ ระดับ คือ กำหนดตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ 3 ตัวแปร คือ ความดัน (P) อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (T) และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว (F) และกำหนดระดับของตัวแปรที่ 2 ระดับ และทำการทดลอง 4 ครั้ง

3.3 การวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์

บทที่ 4

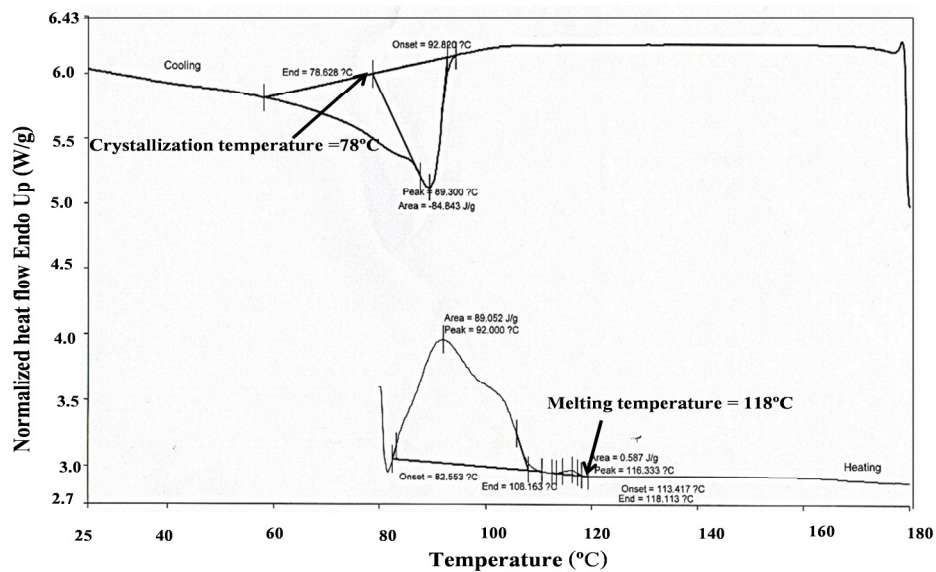
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดผลการออกแบบเครื่องฟั่นละอองและผลการวิเคราะห์หัตถิพลของความดัน อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลว ที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้

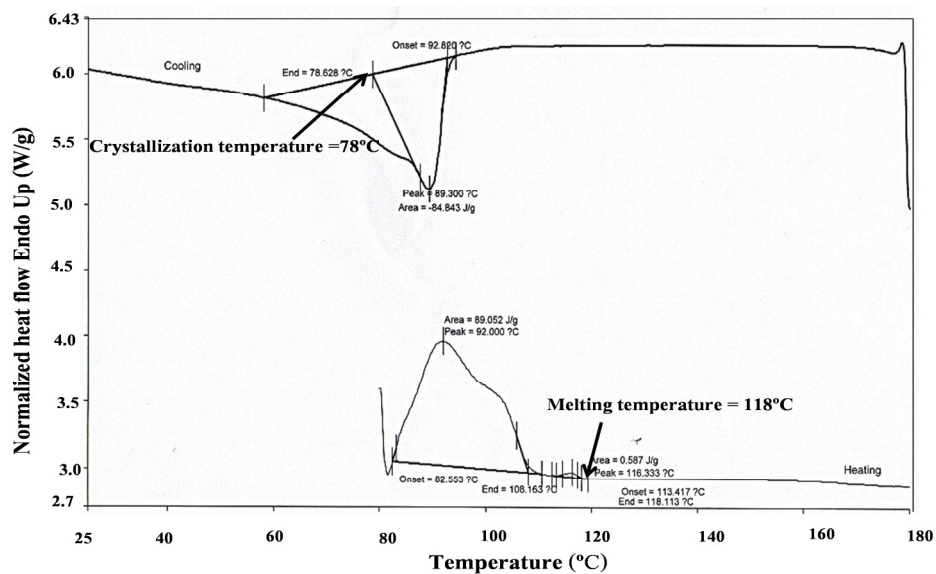
4.1 ผลการออกแบบและสร้างห้องฟั่นละออง

4.1.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่พอลิเอทิลีนแวกซ์

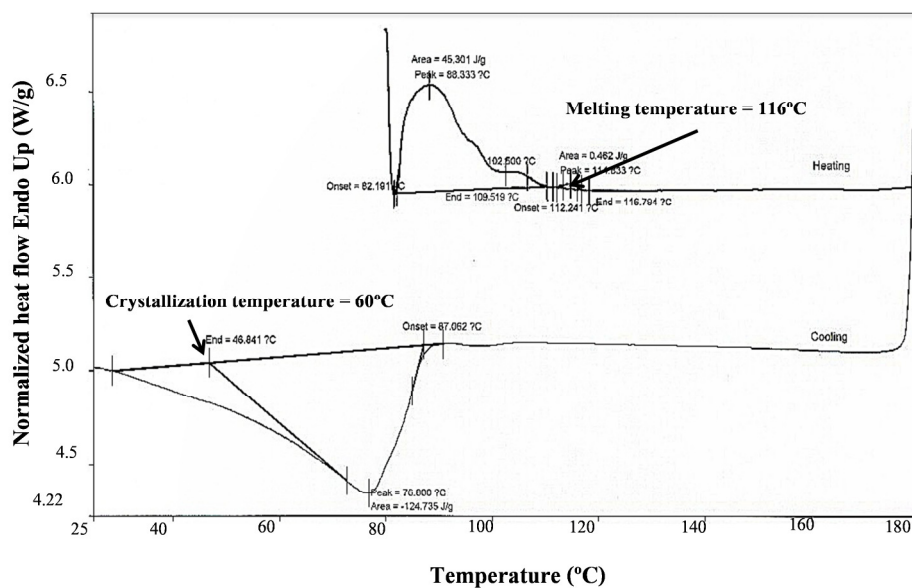
จากการวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด ชนิด A ชนิด B และ และชนิด C จากเครื่อง Differential Scanning Calorimeters ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 ถึง 4-3 โดยพบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้ง 3 ชนิด จะอยู่ระหว่าง 110-120 องศาเซลเซียส และ 60-80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A และชนิด B วิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ในช่วง 1-30 cP และชนิด C ซึ่งเป็นชนิดที่มีความหนืดสูงที่สุดเท่ากับ 31-100 cP ดังนั้นในการทดลองจึงดำเนินการให้ความร้อนแก่พอลิเอทิลีนแวกซ์จนมีอุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 4-1 อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A



ภาพประกอบที่ 4-2 อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B



ภาพประกอบที่ 4-3 อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิแข็งตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C

เนื่องจากกระบวนการพ่นละอองเป็นการดำเนินการแบบต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้ สเตนเลส ชนิด 304 เพื่อป้องกันการเกิดสนิม และความคงทนในการใช้งาน (สุธรรม สุขมณี, 2552) โดยได้ออกแบบหม้อบรรจุพอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาดความจุ 1 ลิตร มีความหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และสูง 13 เซนติเมตร เพื่อใช้หลอมพอลิเอทิลีนแวกซ์ให้มีอุณหภูมิตามแผนการทดลอง และป้องกันการแข็งตัวและอุดตันในระหว่างการดำเนินการ โดยในภาพประกอบที่ 4-4 และ 4-5 แสดงชุดหลอมพอลิเอทิลีนแวกซ์และชุดควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองซึ่งสามารถให้ความร้อนได้สูงสุดถึง 400 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 4-4 ชุดหม้อต้มพอลิเอทิลีนแวกซ์



(ก) ชุดควบคุมอุณหภูมิของหม้อหลอม
และท่อลำเลียงพอลิเอทิลีนแวกซ์



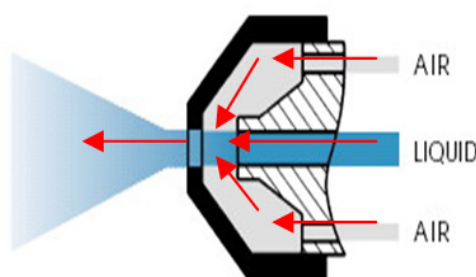
(ข) ชุดควบคุมอุณหภูมิของหัวฉีด

ภาพประกอบที่ 4-5 ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฟั่นละอองที่ใช้ในการทดลอง

4.1.2 ผลการออกแบบส่วนพ่นละออง

4.1.2.1 ผลการเลือกชนิดหัวฉีด

การทดลองได้เลือกใช้หัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle เนื่องจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งตัวที่อุณหภูมิประมาณ 60-80 องศาเซลเซียส จึงต้องดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส โดยหัวฉีดชนิดดังกล่าวมีลักษณะพิเศษ คือลดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของเหลวกับอากาศได้เป็นอย่างดี เนื่องจากอากาศและของเหลวจะสัมผัสกันที่ปลายรูเปิดของหัวฉีดเพียงตำแหน่งเดียว ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-6



ภาพประกอบที่ 4-6 ลักษณะของหัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle
(Spraying systems Co., 2011)

4.1.2.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์

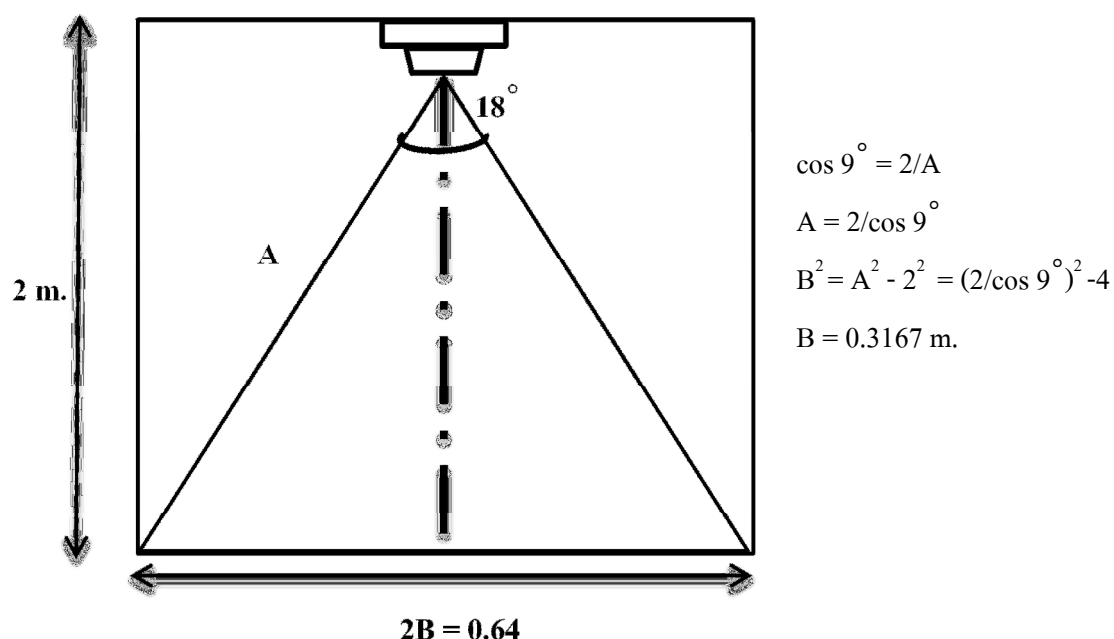
เนื่องจากการทดลองนี้เลือกใช้หัวฉีดชนิด External mixing two fluid nozzle ทำให้อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ความดันต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนี้

1. การพ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดที่อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จะมีอัตราการไหลเท่ากับ 8.82 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
2. การพ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดที่อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 จะมีอัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเท่ากับ 0.9-1.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3. การพ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 และ 1.5:0.5 อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวจะมีค่าประมาณ 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรูเปิดต่อของเหลวขนาด 0.5 และ 1.0 มิลลิเมตร เนื่องจากรูเปิดของท่อของเหลวมีขนาดเล็กจึงอุดตันได้ง่าย

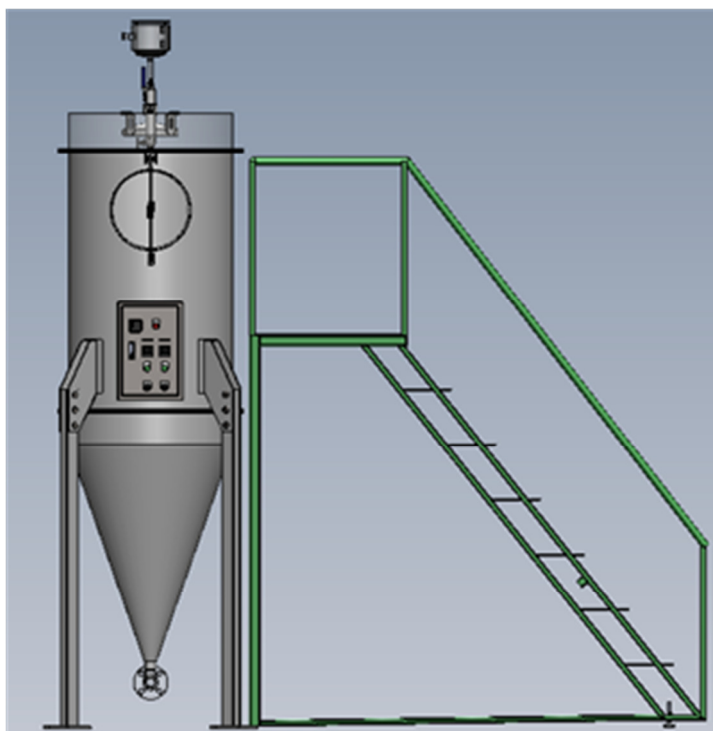
4.1.2.3 ผลการกำหนดขนาดห้องพ่นละออง

จากผลการทดลองเพื่อกำหนดขนาดห้องพ่นละอองพบว่าที่ความสูงในการพ่นละอองเท่ากับ 2 เมตร ละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองได้จะแข็งตัวและตกลงสู่ด้านล่างโดยไม่เกาะติดอุปกรณ์รองรับผง ในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องพ่นละออง พบว่าอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ทำให้เกิดมุมที่ของเหลวออกจากหัวฉีดจะกางมากที่สุดเท่ากับ 18 องศา ผลการคำนวณแสดงดังภาพประกอบที่ 4-7 (สุชาติ เย็นวิเศษ, 2547)



ภาพประกอบที่ 4-7 ลักษณะการเกิดละอองของเหลวที่ออกจากหัวฉีด
เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดห้องพ่นละออง

จากผลการคำนวณจะได้ว่า ห้องฟ่นละอองจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ 0.64 เมตร จึงไม่ทำให้ละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์เกาะติดผนังห้องฟ่นละออง ทั้งนี้ในการทดลองได้กำหนดให้ห้องฟ่นละอองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเป็น 0.75 เมตร และมีความสูงของห้องฟ่นละอองเท่ากับ 2.6 เมตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการเกาะติดผนังของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาดเล็ก โดยห้องฟ่นละอองที่ออกแบบในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นทรงกระบอกและกรวยซึ่งสามารถถอดแยกชิ้นส่วนออกจากกันได้ เพื่อความสะดวกในการซ่อมแซมและทำความสะอาด ผลการออกแบบห้องฟ่นละอองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-8 และ 4-9 ทั้งนี้เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเย็นตัวของละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ ก่อนที่จะตกลงมากระทบกับผนังของห้องฟ่นละออง จึงออกแบบให้ห้องฟ่นละอองส่วนที่เป็นทรงกระบอกมีความสูง 1.6 เมตร และส่วนที่เป็นกรวยสูง 1 เมตร ปริมาตรรวมของห้องฟ่นละอองเท่ากับ 0.85 ลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบที่ 4-8 ห้องฟ่นละอองแบบ 3 มิติที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidwork



ภาพประกอบที่ 4-9 ห้องฟ่นละอองที่สร้างเพื่อใช้ในการทดลอง

4.1.3 ผลการออกแบบส่วนรองรับผง

จากผลการทดลองหาความเร็วและอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากห้องฟ่นละอองพบว่า ความเร็วลมที่มากที่สุดที่ออกจากห้องฟ่นละอองเท่ากับ 3.07 เมตรต่อวินาที ทำให้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่แข็งตัวแล้วสามารถออกจากห้องฟ่นละอองได้อย่างอิสระและไม่ฟุ้งกระจาย ดังนั้นจึงออกแบบอุปกรณ์รองรับผงในลักษณะที่เป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยม โดยที่ท่อทางออกจะติดตั้งอุปกรณ์กรองฝุ่นขนาดเล็กเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายสู่ภายนอก

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ในกระบวนการฟั่นละออง

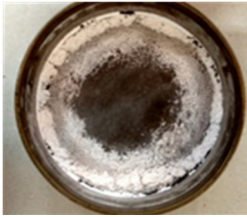


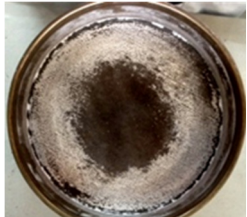


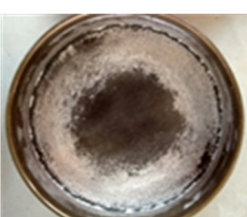


4.2.1. ผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์

4.2.1.1. ขนาด และการกระจายขนาด

1. ผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้ตะแกรงร่อนและเครื่อง Mastersizer2000

ในการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการร่อนผงพอลิเอทิลีนแวกซ์เพื่อการวิเคราะห์การกระจายขนาดด้วยตะแกรงร่อน จะนำผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 มาทำการร่อนเป็นเวลาเท่ากับ 5 10 และ 15 นาที ที่ความเร็วรอบเท่ากัน เพื่อดูปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ค้างบนตะแกรงร่อนแต่ละชั้น ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ค้างบนตะแกรงร้อนขนาดรูเปิดต่างๆ

เวลาในการ ร้อน	ขนาดรูเปิดตะแกรงร้อน (ไมครอน)		
	425	212	Pan
5 นาที			
10 นาที			
15 นาที			

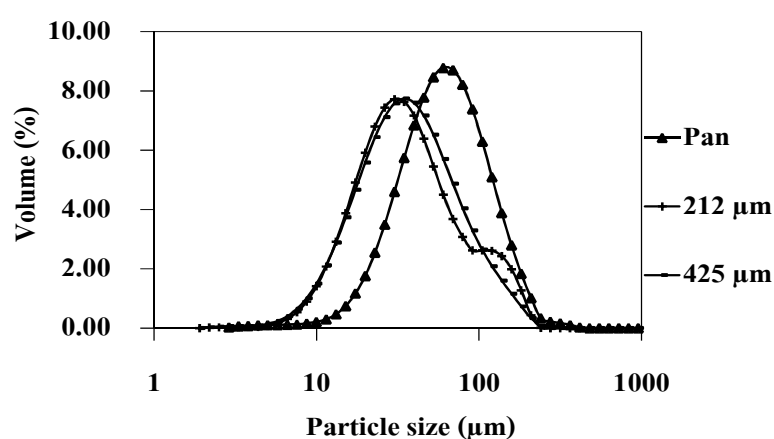
จากตารางที่ 4-1 พบว่า การร้อนตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาดผงพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็นเวลา 10 นาที จะมีปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาดเล็กค้างอยู่บนตะแกรงร้อนน้อยกว่าการร้อนโดยใช้เวลาเพียง 5 นาที แต่ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์บางส่วนเริ่มเกาะตัวกันเป็นกลุ่มแบบหลวมๆ และเมื่อเพิ่มเวลาในการร้อนเป็น 15 นาที พบว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์จะเกาะตัวกันมากขึ้น เนื่องจากการร้อนที่ใช้เวลานานจะทำให้ผงขนาดเล็กอัดตัวและรวมกลุ่มกันจนไม่สามารถแทรกตัวลอดผ่านรูเปิดของตะแกรงร้อนได้ (อารี ธนบุญสมบัติ และคณะ, 2553) ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกทำการร้อนตะแกรงโดยใช้เวลาในการร้อนเท่ากับ 10 นาที

ผลการร้อนตะแกรงเพื่อคัดแยกขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละองด้วยความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ตะแกรงร้อนมีขนาดรูเปิดตั้งแต่ 0 จนถึง 1700 ไมครอน แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยความดัน 7 บาร์ อุณหภูมิ พอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดต่ออากาศและต่อ ของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่วิเคราะห์ด้วยตะแกรงร่อน

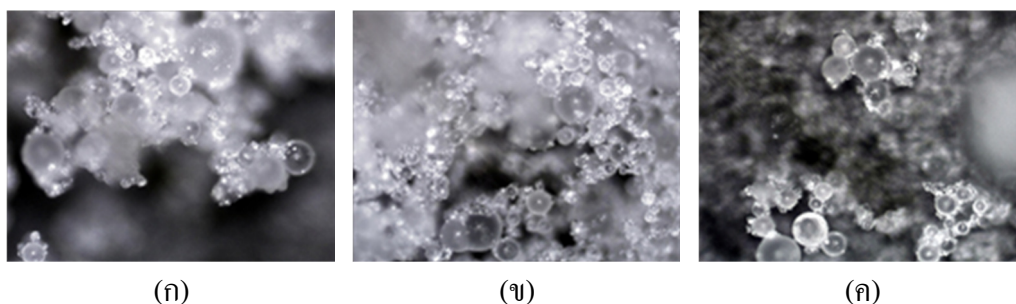
เบอร์ตะแกรง ร่อน	ขนาดรูเปิดตะแกรง (ไมครอน)	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนรูเปิดตะแกรง	เปอร์เซ็นต์ที่ค้างบนรูเปิดตะแกรงสะสม	เปอร์เซ็นต์ผลได้
12	1700	0.52	0.52	0.47
17	850	0.67	1.20	0.61
25	600	3.51	4.70	3.16
35	425	16.58	21.28	14.92
70	212	22.03	43.31	19.82
Pan	0	56.69	100.0000	51.02

การคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนจะได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน เพียง 51 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 4-2 เพื่อเปรียบเทียบ ผลการดำเนินการจึงนำตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาดเล็กที่ค้างบนตะแกรงร่อนขนาดรูเปิด เท่ากับ 425 ไมครอน 212 ไมครอน และ 0 ไมครอน (ถาด) ไปทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดด้วย เครื่อง Master sizer2000 ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-10



ภาพประกอบที่ 4-10 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 7 บาร์และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและต่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ตามลำดับ

จากภาพประกอบที่ 4-10 เมื่อวัดการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้ โดยใช้เครื่อง Mastersizer 2000 จะเห็นได้ว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ค้ำบนตะแกรงรูเปิดขนาดต่างๆ มีการกระจายขนาดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 212 ไมครอน และมีบางส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 44 ไมครอน ผงขนาดเล็กเหล่านั้นจึงเกาะกลุ่มกันแบบหลวมๆ เมื่อทำการคัดแยกขนาดด้วย ตะแกรงร้อนจนไม่สามารถลอดผ่านรูเปิดของตะแกรงร้อนได้ แม้ว่าจะมีขนาดเล็กกว่ารูเปิดของ ตะแกรงร้อนในชั้นดังกล่าวก็ตาม จากนั้น เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสง (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 10x จะพบว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้งที่ค้ำและลอด ผ่านตะแกรงร้อนขนาด 425 ไมครอน และ 212 ไมครอน มีขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยผงขนาดเล็ก และใหญ่เกาะตัวกันอย่างชัดเจน



ภาพประกอบที่ 4-11 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว เท่ากับ 3.0:1.5 ที่ค้ำบนตะแกรงร้อนขนาดรูเปิด 425 ไมครอน (ก) 212 ไมครอน (ข) และ ฉาด (ค) จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x

ผลการวิเคราะห์รูปร่างและพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยายเท่ากับ 10x แสดงดังภาพประกอบที่ 4-11 จะเห็นได้ว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ ส่วนที่ค้ำบนตะแกรงขนาดรูเปิดเท่ากับ 425 ไมครอน 212 ไมครอนและฉาด มีขนาดใกล้เคียงกัน แต่จะเกาะตัวกันทำให้ไม่สามารถลอดผ่านรูเปิดของตะแกรงร้อนได้ ดังนั้นการวัดขนาด และการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ในการทดลองครั้งนี้จึงเลือกใช้วิธี Laser diffraction โดยใช้ เครื่อง Mastersizer 2000 แทนที่การวิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงร้อน

2. ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

ตารางที่ 4-3 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ

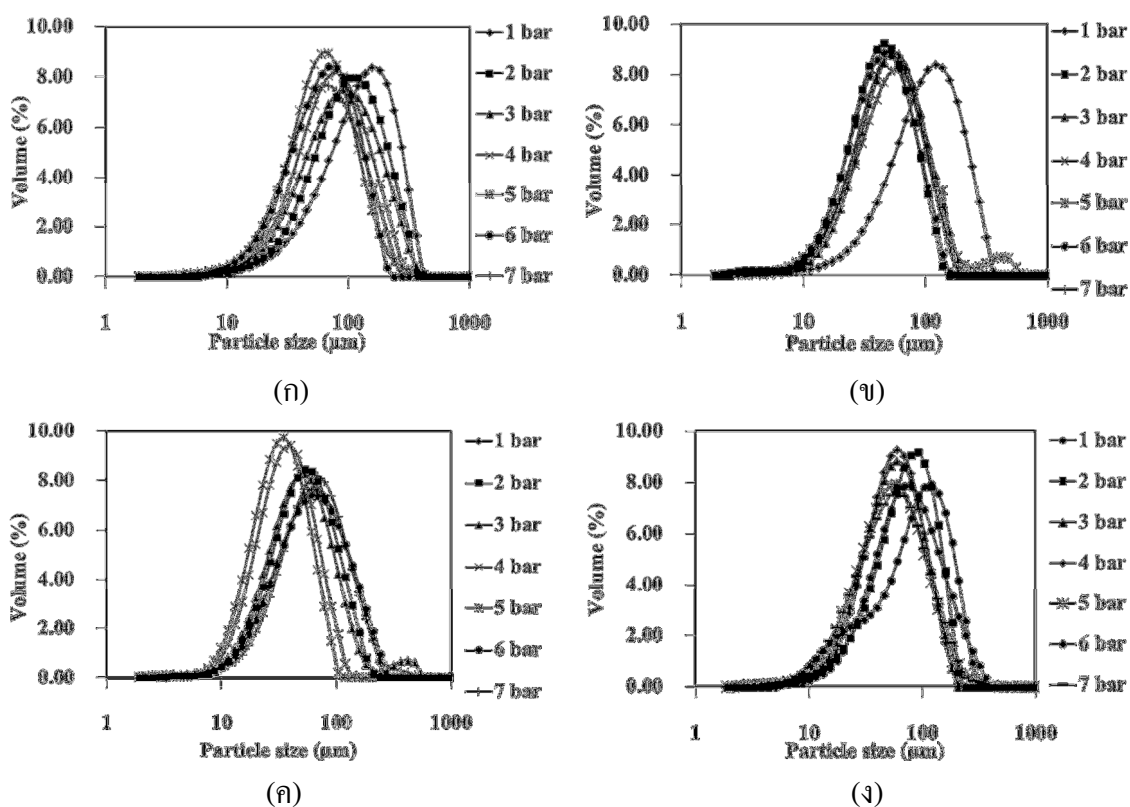
ความดัน (บาร์)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน			
	120 องศาเซลเซียส	140 องศาเซลเซียส	160 องศาเซลเซียส	180 องศาเซลเซียส
1	67.27±0.53 ^{d, d}	76.33±0.77 ^{b, c}	87.27±1.02 ^{a, a}	82.80±0.79 ^{d, b}
2	77.96±0.84 ^{c, b}	89.27±1.00 ^{a, a}	89.03±1.13 ^{a, a}	88.92±0.84 ^{abc, a}
3	79.15±1.05 ^{c, c}	89.99±0.01 ^{a, a}	87.31±0.47 ^{a, b}	89.77±0.32 ^{a, a}
4	86.16±0.86 ^{b, b}	89.49±0.72 ^{a, a}	87.45±0.98 ^{a, ab}	89.54±0.58 ^{ab, a}
5	88.06±0.68 ^{a, b}	89.67±0.46 ^{a, a}	90.00±0.00 ^{a, a}	88.02±0.02 ^{bc, b}
6	89.38±0.36 ^{a, a}	88.60±1.64 ^{a, a}	87.89±0.63 ^{a, a}	88.63±1.31 ^{abc, a}
7	88.34±0.89 ^{a, b}	90.00±0.00 ^{a, a}	86.69±0.02 ^{a, c}	87.84±0.55 ^{c, bc}

ค่าตั้งปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 4$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกตัวแรกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ และอักษรตัวที่ 2 ที่เหมือนกันในแต่ละแถวในแต่ละแถว หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

จากตารางที่ 4-3 จะเห็นได้ว่า การพ่นละอองที่ความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ต่างกันจะมีผลต่อขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ โดยการเพิ่มความดันในการพ่นละอองจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน เพิ่มขึ้น และจะใกล้เคียงกันเมื่อความดันในการพ่นละอองเท่ากับ 4-7 บาร์ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิจะพบว่า เมื่อดำเนินการพ่นละอองที่ความดันต่ำ ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องจากอิทธิพลของความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์จะมีผลต่อความสามารถในการแตกกระจายเป็นละอองของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ โดยพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีอุณหภูมิเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดการสัมผัสกับอากาศที่ความดันต่ำจะไม่สามารถแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กได้หมด ทำให้ละอองของเหลวบางส่วนมีขนาดใหญ่ แต่

เมื่อเพิ่มความดันในการพ่นละอองเป็น 4-7 บาร์ พบว่า อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์จะไม่มีผลต่อปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน เนื่องจากความแรงของอากาศจะเอาชนะอิทธิพลของความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์ทำให้สามารถแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็กได้ง่ายแม้ว่าดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองที่สภาวะต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-12



ภาพประกอบที่ 4-12 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูปเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (ก) 140 องศาเซลเซียส (ข) 160 องศาเซลเซียส (ค) และ 180 องศาเซลเซียส (ง) ที่ความดันต่างๆ

ตารางที่ 4-4 ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ฟ้นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ

คามดัน (บาร์)	ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองที่อุณหภูมิต่างๆ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)			
	120 องศาเซลเซียส	140 องศาเซลเซียส	160 องศาเซลเซียส	180 องศาเซลเซียส
1	0.4474±0.00234 ^a	0.4342±0.00157 ^a	0.3609±0.00228 ^a	0.4056±0.00186 ^a
2	0.1464±0.00209 ^b	0.3074±0.01090 ^b	0.3330±0.00099 ^b	0.3822±0.00130 ^b
3	0.4008±0.00201 ^c	0.3069±0.00471 ^b	0.3167±0.00104 ^c	0.3442±0.00107 ^c
4	0.3965±0.00251 ^c	0.3005±0.00093 ^b	0.2871±0.00224 ^d	0.3120±0.00256 ^c
5	0.3817±0.00502 ^d	0.3068±0.00126 ^b	0.2538±0.01163 ^f	0.3286±0.00216 ^d
6	0.3617±0.00239 ^c	0.2673±0.00063 ^d	0.2649±0.00907 ^e	0.3082±0.00137 ^c
7	0.3298±0.00240 ^f	0.2866±0.00250 ^c	0.2595±0.00071e ^f	0.2944±0.00453 ^f

ค่าดังปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 3$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

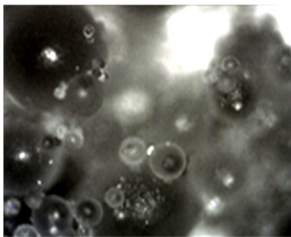
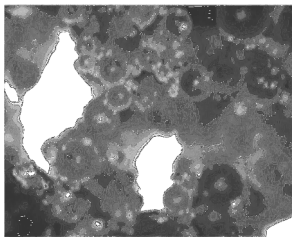
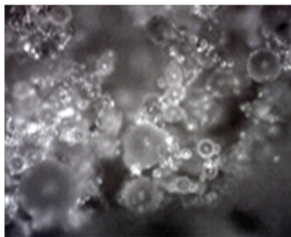
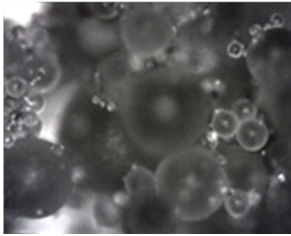
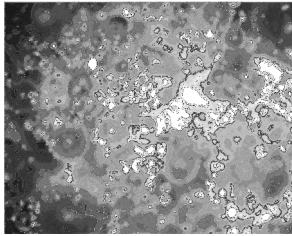
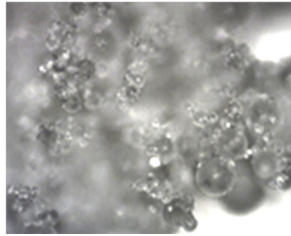
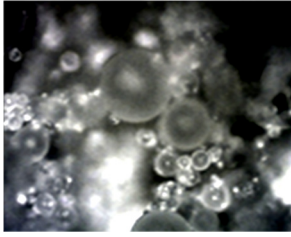
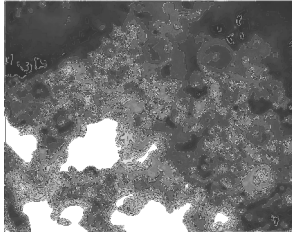
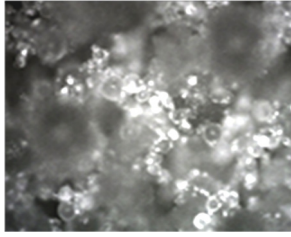
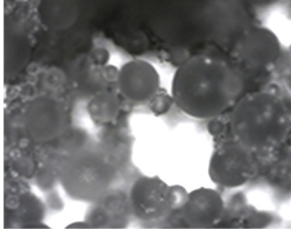
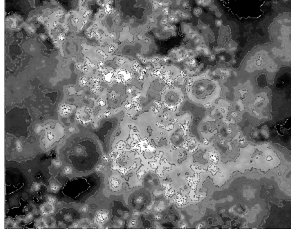
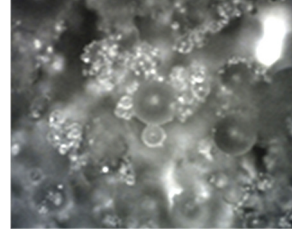
จากตารางที่ 4-4 เมื่อพิจารณาผลของความดันที่ใช้ในการฟ้นละองจะเห็นได้ว่าการฟ้นละองด้วยความดันเท่ากับ 1 บาร์ ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์จะมีค่ามากที่สุดและลดลงเมื่อความดันที่ใช้ในการฟ้นละองเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความดันแตกต่างกัน ความเร็วของอากาศที่เข้าปะทะกับพอลิเอทิลีนแวกซ์ก็จะแตกต่างกันด้วย โดยในการฟ้นละองด้วยความดันสูงจะทำให้ความเร็วและปริมาณของอากาศที่ปะทะกับพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวมีค่าสูง ทำให้ละอองมีขนาดเล็ก แต่ทั้งนี้ปริมาณอากาศที่มาสัมผัสกับละอองมีมากจนเกินไป ทำให้ละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเมื่อเย็นตัวลงจะมีน้ำหนักเบาและเกิดการเกาะกลุ่มกันมากกว่าผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองด้วยความดันต่ำ (Otaigbe, J และ Mcavoy, J, 2001)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์จะเห็นได้ว่า การพ่นละอองที่อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้อุณหภูมิหลอมเหลวที่สุด สามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่า Bulk density สูงที่สุด แต่พบว่าเปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน มีเพียง 67.74 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น แต่เมื่อพ่นละอองที่อุณหภูมิสูงเกินจุดหลอมเหลว เช่น 140 160 และ 180 องศาเซลเซียสพบว่า ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์จะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากความหนืดที่ลดลง (Otaigbe.J และ Mcavoy. J, 2001)

4.2.1.2 รูปร่างและการกระจายตัว

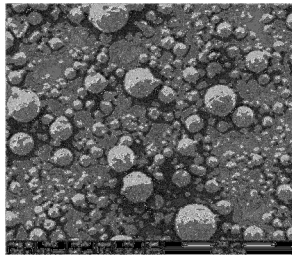
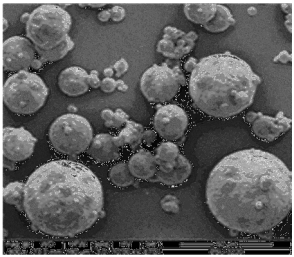
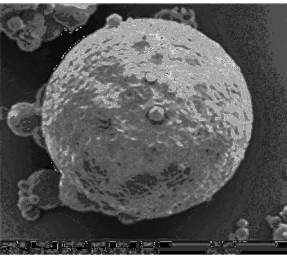
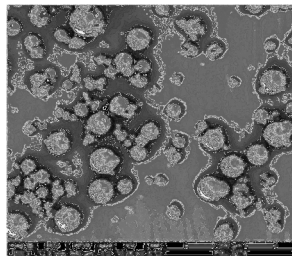
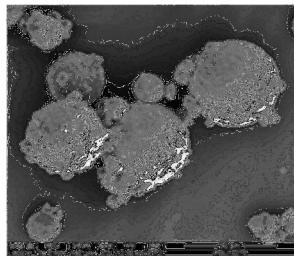
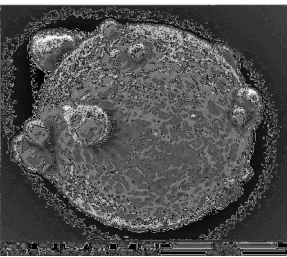
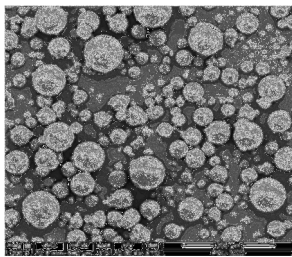
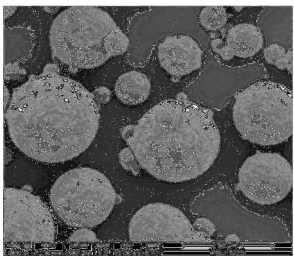
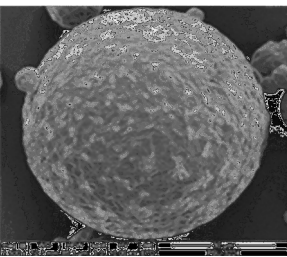
ผลการศึกษาอิทธิพลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีต่อรูปร่างและการกระจายตัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงดังตารางที่ 4-5 4-6 และ 4-7ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 รูปร่างและการกระจายตัวของฟองพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x

อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)		
	1	4	7
120			
140			
160			
180			

จากตารางที่ 4-5 จะเห็นได้ว่า ฟองพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟั่นละองด้วยความดันและอุณหภูมิต่างๆ มีลักษณะกลม รวมถึงมีการกระจายขนาดระหว่างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกัน โดยอนุภาคฟองพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กจะเกาะตัวอยู่บนผิวหน้าของฟองที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในตารางที่ 4-6

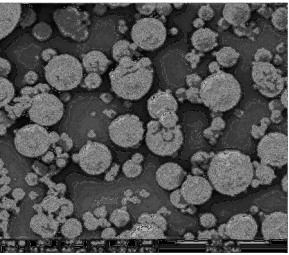
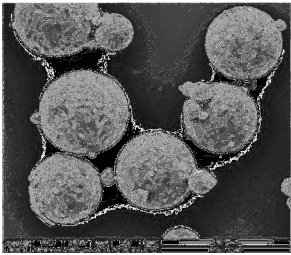
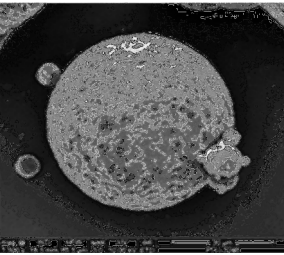
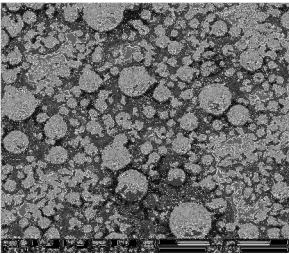
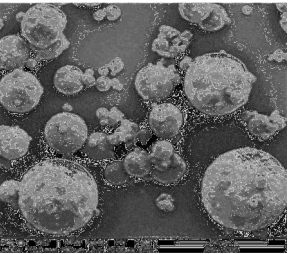
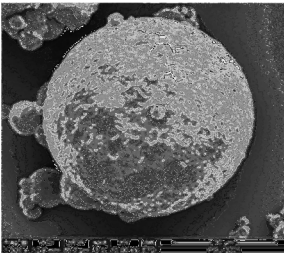
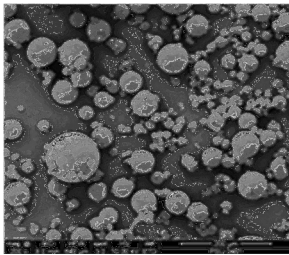
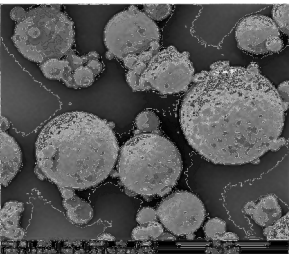
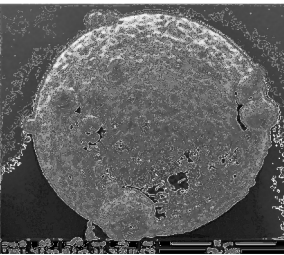
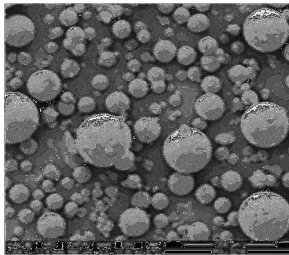
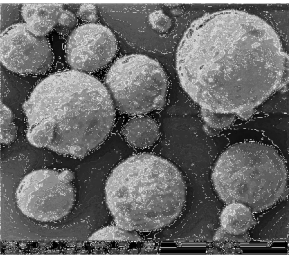
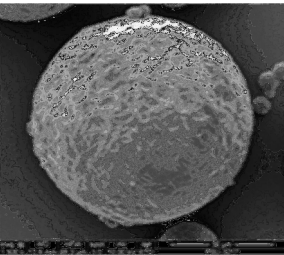
ตารางที่ 4-6 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดที่อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200x 800x และ 1500x

ความดัน (บาร์)	กำลังขยาย		
	200x	800x	1500x
1			
4			
7			

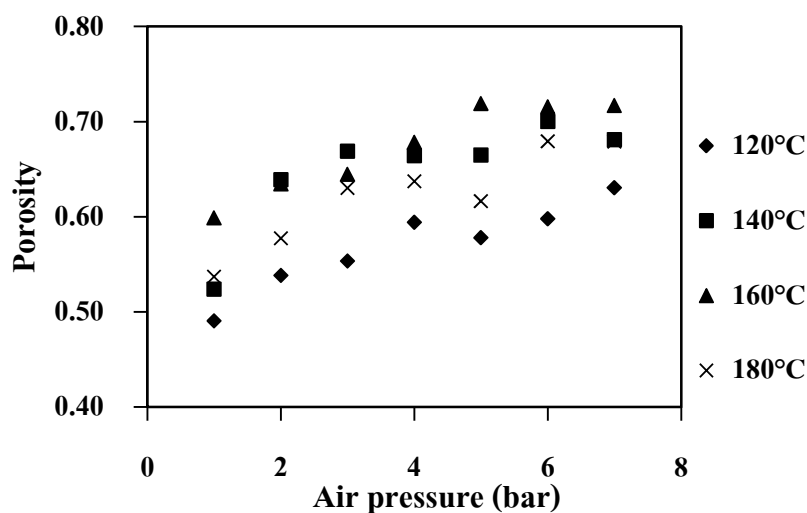
จากตารางที่ 4-6 จะเห็นได้ว่า การฟ้นละองที่ความดันต่างกัน จะทำให้พื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกันด้วย โดยการฟ้นละองที่ใช้ความดันเท่ากับ 1 บาร์ อากาศจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ และมีปริมาณที่ไปสัมผัสกับพอลิเอทิลีนแวกซ์น้อยกว่าการฟ้นละองโดยใช้ความดันเท่ากับ 4 และ 7 บาร์ ทำให้แรงที่กดลงบนผิวของละองพอลิเอทิลีนแวกซ์น้อย เมื่อละองพอลิเอทิลีนแวกซ์เย็นตัวก็จะมีพื้นผิวที่มีความขรุขระ เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยกว่าผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองด้วยความดันเท่ากับ 4 และ 7 บาร์

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ จากตารางที่ 4-7 พบว่า การพ่นละอองที่อุณหภูมิต่างๆ ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จะมีรูปร่างกลม โดยในการพ่นละอองที่อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 120 องศาเซลเซียส จะมีอนุภาคผงขนาดใหญ่ปะปนอยู่มากกว่าที่อุณหภูมิ 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่สุดจึงมีความหนืดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการพ่นละอองที่อุณหภูมิ 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส พบว่า ผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้จะมีลักษณะคล้ายกัน คือจะเป็นรอยขรุขระ แต่ความลึกของรอยเหล่านั้นไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากความหนืดที่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม การพ่นละอองด้วยอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์สูงๆ เช่น 160 และ 180 องศาเซลเซียส พบว่าผนังห้องพ่นละอองมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการที่ใช้เวลาติดต่อกันเป็นเวลานาน

ตารางที่ 4-7 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองด้วยความดัน 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 อุณหภูมิต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200x 800x และ 1500x

อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	กำลังขยาย		
	200x	800x	1500x
120			
140			
160			
180			

ทั้งนี้เมื่อคำนวณค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่างๆ จะพบว่า เมื่อเพิ่มความดันในการฟ้นละออง ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จะมีความพรุนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-13 เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาตรเท่ากัน ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จากการฟ้นละอองที่ความดันต่ำจะมีน้ำหนักมากกว่าผงพอลิเอทิลีนที่ได้จากการฟ้นละอองด้วยความดันสูง จึงทำให้อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตร หรือค่า Bulk density มีค่าสูงกว่าการฟ้นละอองที่ความดันต่ำ (Czisch, C และ Fritsching, U, 2007) เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ใช้ในการฟ้นละอองพบว่า การฟ้นละอองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ความพรุน (Porosity) ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการฟ้นละอองที่อุณหภูมิเกินจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนแวกซ์เพียงเล็กน้อย หรือประมาณ 140 องศาเซลเซียส จะทำให้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มีความพรุนน้อยกว่าการฟ้นละอองที่อุณหภูมิสูง



ภาพประกอบที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และความดันเมื่อฟ้นละอองด้วยอุณหภูมิ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5

4.2.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว

4.2.2.1 ขนาดและการกระจายขนาด

ตารางที่ 4-8 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่ฟ้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวขนาดต่างๆ

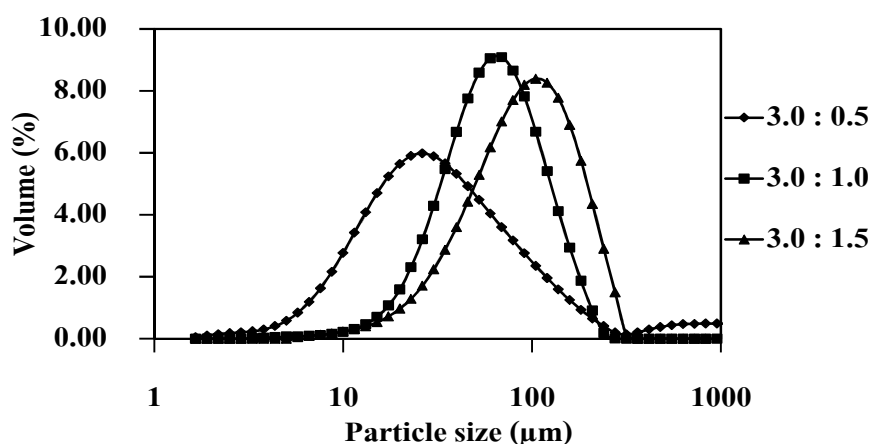
อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว	อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน
3.0:0.5	140	1	84.78±0.63 ^b
3.0:1.0	140	1	88.21±0.33 ^a
		4	88.65±1.17 ^a
		7	82.81±0.73 ^b
	180	1	83.78±0.59 ^b
		4	88.64±1.85 ^a
		7	89.21±0.6 ^a
3.0:1.5	140	1	76.33±0.77 ^c

ค่าดังปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 4$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

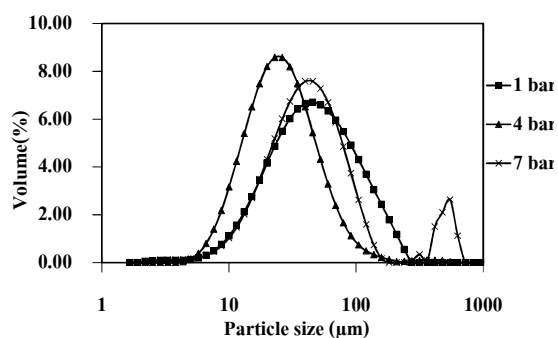
จากตารางที่ 4-8 จะเห็นได้ว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองด้วยหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 และ 3.0:1.0 จะมีเปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยการฟ้นละอองที่อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 จะมีเส้นใยปะปนอยู่ เนื่องจากปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่หัวฉีดมากเกินไป ทำให้พอลิเอทิลีนแวกซ์บางส่วนที่ออกจากหัวฉีดแข็งตัวก่อนแตกกระจายเป็นละออง

ในภาพประกอบที่ 4-14 จะเห็นได้ว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ่นละองด้วยความดัน 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 ในส่วนที่สามารถแตกกระจายเป็นละองได้ จะมีขนาดเล็กกว่าผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ่นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 และ 3.0:1.0 ตามลำดับ เนื่องจากท่อของเหลวมีรูเปิดเพียง 0.5 มิลลิเมตร จึงมีปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ออกจากหัวฉีดน้อย เมื่อสัมผัสกับอากาศทำให้แตกกระจายเป็นละองขนาดเล็กได้ดี ก่อนที่บางส่วนจะแข็งตัวและเกิดเป็นเส้นใย

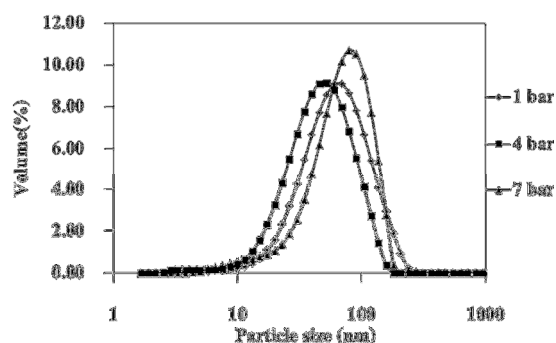


ภาพประกอบที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว ที่ฟ่นละองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1 บาร์

จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ่นละองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ความดันเท่ากับ 1.4 และ 7 บาร์ ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-15



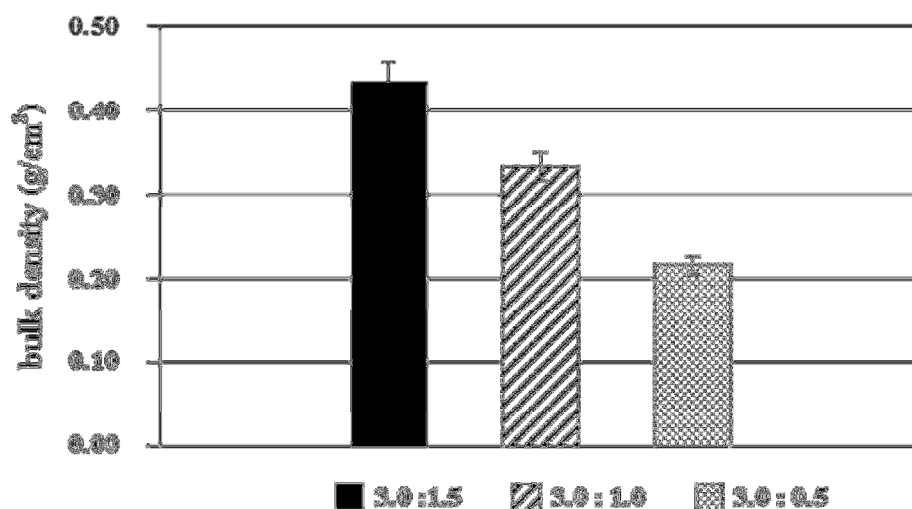
(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-15 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์เมื่อฟ้นละอองด้วยความเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส (ก) และ 180 องศาเซลเซียส (ข)

จากภาพประกอบที่ 4-14 จะเห็นได้ว่า การฟ้นละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ที่ความดันเท่ากับ 1 บาร์ การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้มีการกระจายขนาดที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการฟ้นละอองจะแตกต่างกัน ผลการคำนวณค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองที่อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 3.0:1.0 และ 3.0:1.5 แสดงดังภาพประกอบที่ 4-16

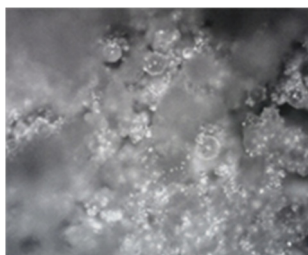


ภาพประกอบที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และอัตราส่วนระหว่างขนาดรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว ที่พ่นละอองด้วยอุณหภูมิจากพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1 บาร์

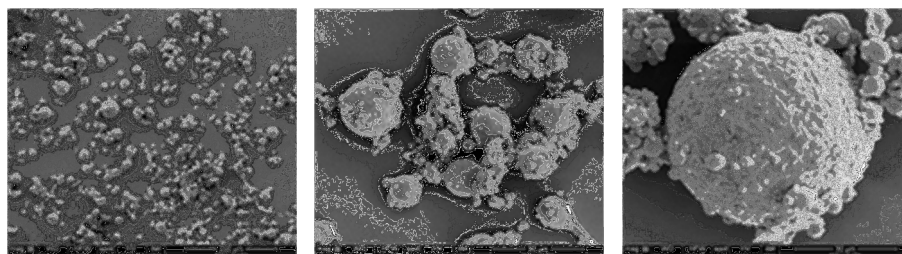
ในการพ่นละอองเมื่อดำเนินการพ่นด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวแตกต่างกัน ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ก็จะแตกต่างกันด้วย จากภาพประกอบที่ 4-16 จะเห็นได้ว่า ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จะมีค่า Bulk density มากที่สุด รองลงมาคือ 3.0:1.0 และ 3.0:0.5 ตามลำดับ โดยเมื่อพ่นละอองด้วยหัวฉีดที่มีรูเปิดของท่อของเหลวเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศและพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวมีความสมดุลกัน ทำให้พอลิเอทิลีนแวกซ์สามารถแตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็ก แต่เมื่อดำเนินการพ่นละอองที่ขนาดรูเปิดของท่อของเหลวมีขนาดเท่ากับ 1.0 และ 0.5 มิลลิเมตร อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์มีปริมาณน้อยเกินไป ไม่สมดุลกับปริมาณอากาศที่ป้อนเข้ามา เมื่อสัมผัสกัน พอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวสามารถแตกกระจายเป็นละอองที่มีขนาดเล็ก แต่จะมีปริมาณอากาศมาสัมผัสบนผิวหน้ามากเกินไป เกิดเป็นรอยลึก ทำให้ค่า Bulk density มีค่าลดลง (Czisch, C และ Fritsching,U, 2007)

4.2.2.2 รูปร่างและการกระจายตัว

ผลการวิเคราะห์รูปร่าง การกระจายตัวและพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงด้วยกำลังขยาย 10x และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-17 และ 4-18 ตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 4-17 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 อุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x



(ก)

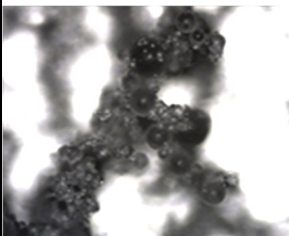
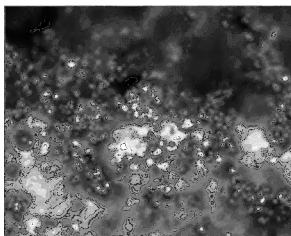
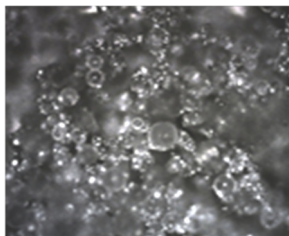
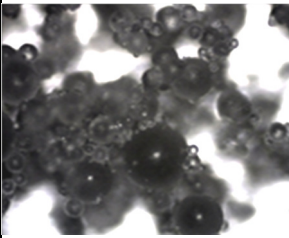
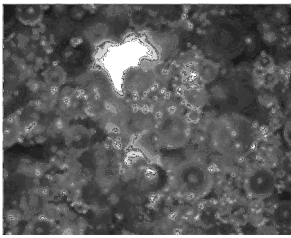
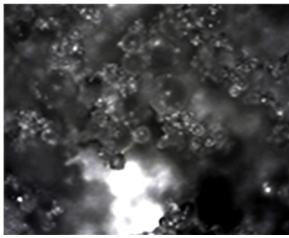
(ข)

(ค)

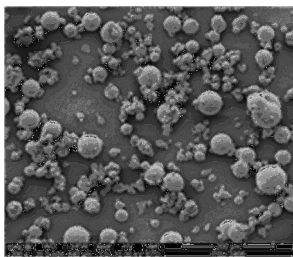
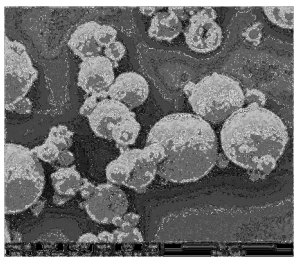
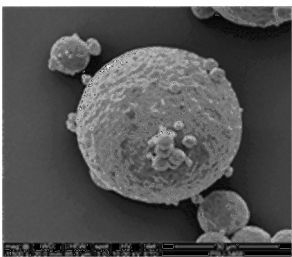
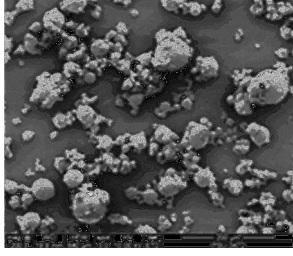
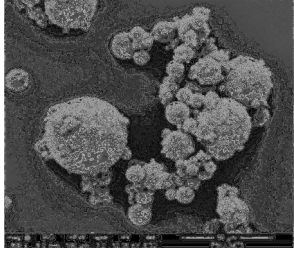
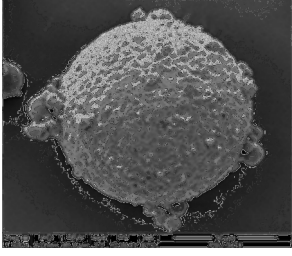
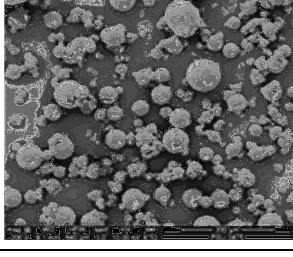
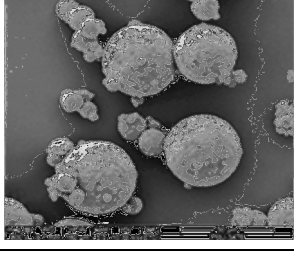
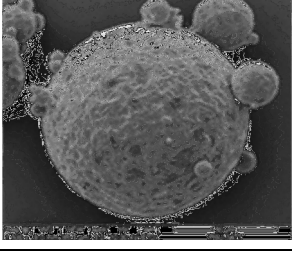
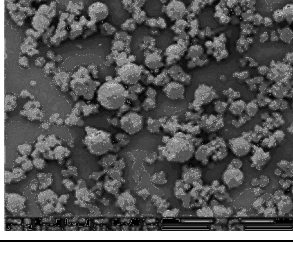
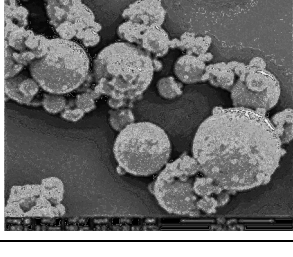
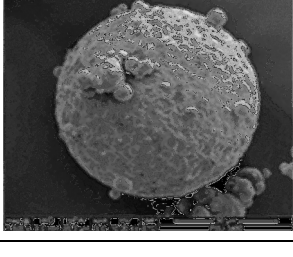
ภาพประกอบที่ 4-18 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 200x (ก) 800x (ข) และ 1500x (ค)

จากภาพประกอบที่ 4-17 จะเห็นได้ว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ่นละองด้วย อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 ที่ความดัน 1 บาร์ จะมีขนาดเล็ก และเกาะกลุ่มกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณารูปร่างและพื้นผิว จากภาพประกอบที่ 4-18 จะเห็นได้ อย่างชัดเจนว่ามีพื้นผิวที่ขรุขระที่เล็กพอสมควร เนื่องจากมีปริมาณอากาศที่เข้ามาสัมผัสมากเกินไป ทำให้พอลิเอทิลีนแวกซ์แตกกระจายเป็นละอองขนาดเล็ก แต่บางส่วนจะเย็นตัวอย่างรวดเร็วจนเกิด เป็นเส้นใย (Lin.J *et al.*, 2009)

ตารางที่ 4-9 รูปร่างและการกระจายตัวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ่นละองด้วยความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 อุณหภูมิของพอลิ เอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x

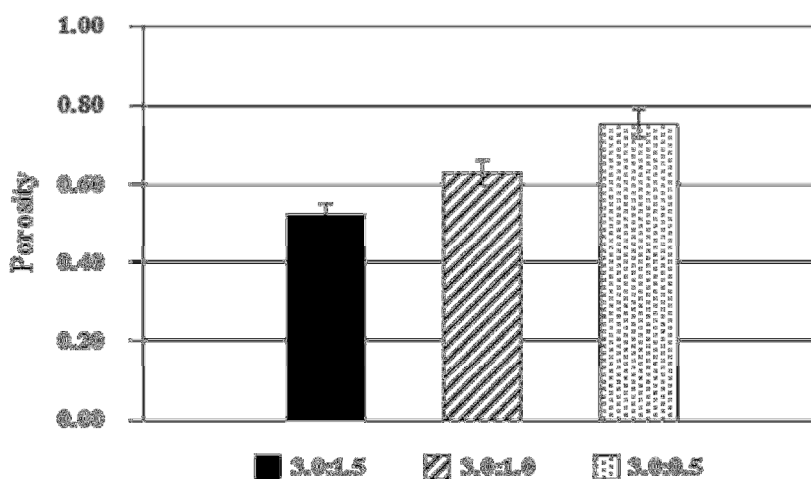
อุณหภูมิพอลิ เอทิลีนแวกซ์ (องศา เซลเซียส)	ความดัน (บาร์)		
	1	4	7
140			
180			

ตารางที่ 4-10 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว 3.0:1.0 ความดัน 1 และ 7 บาร์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 200x 800x และ 1500x

สภาวะ (บาร์/องศา เซลเซียส)	กำลังขยาย		
	200x	800x	1500x
1/140			
7/140			
1/180			
7/180			

จากตารางที่ 4-9 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการฟ้นละองด้วยอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่างๆ ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้มีขนาดเล็กและเกาะตัวกันอย่างเห็นได้ชัด และจะมีการเกาะตัวกันมากขึ้นเมื่อฟ้นละองที่ความดันเท่ากับ 4 และ 7 บาร์ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในตารางที่ 4-10

พบว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์เกาะตัวกันเป็นจำนวนมาก โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะเกาะติดบนผิวของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงทำให้ค่า Bulk density ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ไม่ว่าจะฟ้นละองที่อุณหภูมิเท่ากับ 140 หรือ 180 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำกว่าการฟ้นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5



ภาพประกอบที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพรุนและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว

จะเห็นได้ว่า ในการฟ้นละอง เมื่อใช้หัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 3.0:1.0 และ 3.0:1.5 จะสามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ได้เป็นส่วนใหญ่ แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึง ค่า Bulk density และ ค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์พบว่า การฟ้นละองด้วยหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 สามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่า Bulk density ได้สูงสุด นั่นหมายถึงผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จะมีค่าความพรุนน้อยที่สุด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-19 และยิ่งไปกว่านั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาคือ กำลังการผลิต โดยพบว่า การฟ้นละองโดยใช้หัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 และ 3.0:1.0 แม้ว่าจะสามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดส่วนใหญ่เล็กกว่า 200 ไมครอน ได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกำลังการผลิตกับการฟ้นละองด้วยหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 พบว่า มีกำลังการผลิตที่น้อยมาก และเสี่ยงต่อการอุดตันเมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้ามาในระบบ

4.2.3 ผลการศึกษากระบวนการฟ้นละองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C

ในการทดลองนี้นอกจากจะทำการศึกษาการฟ้นละองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A แล้ว ยังได้ทำการศึกษาการฟ้นละองพอลิเอทิลีนแวกซ์อีก 2 ชนิด คือชนิด B และชนิด C ซึ่งทั้ง 2 ชนิดนี้ มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ใกล้เคียงกับชนิด A แต่จะมีความหนืดที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-2 และ 4-3 ดังนั้นในการทดลองจะศึกษาการฟ้นละองพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิและความดันเช่นเดียวกับ พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A โดยจะฟ้นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 เนื่องจากมีกำลังการผลิตสูงสุด และผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละองได้ส่วนใหญ่มีการกระจายขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน

4.2.3.1 ผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีผลต่อขนาด และการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C

ผลการทดลองฟ้นละองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C ที่อุณหภูมิ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ แสดงดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-11 ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่พ่นละอองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 120 140 160 และ 180 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1.4 และ 7 บาร์ และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5

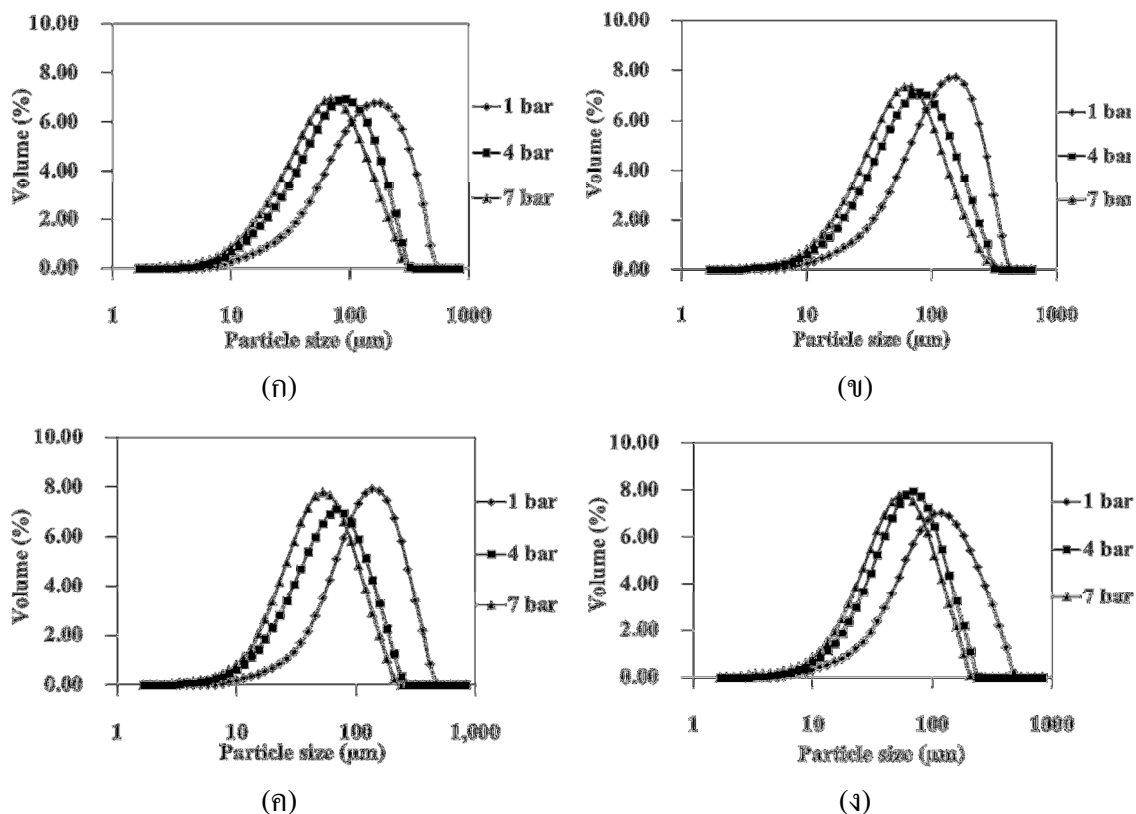
อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน	
		ชนิด B	ชนิด C
120	1	62.89±0.95 ^c	51.52±1.63 ^c
	4	83.45±0.7 ^b	77.25±0.43 ^b
	7	86.17±0.71 ^a	81.35±0.8 ^a
140	1	70.82±0.58 ^c	59.32±0.49 ^c
	4	85.02±0.29 ^b	78.14±0.44 ^b
	7	87.91±0.91 ^a	82.70±0.75 ^a
160	1	68.88±0.34 ^c	52.20±0.6 ^c
	4	82.75±0.91 ^b	82.26±1.53 ^b
	7	88.56±1.59 ^a	86.37±0.66 ^a
180	1	70.91±0.53 ^b	60.10±1.07 ^c
	4	88.10±1.23 ^a	81.39±0.57 ^b
	7	89.22±1.08 ^a	87.60±0.84 ^a

ค่าดังปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 4$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

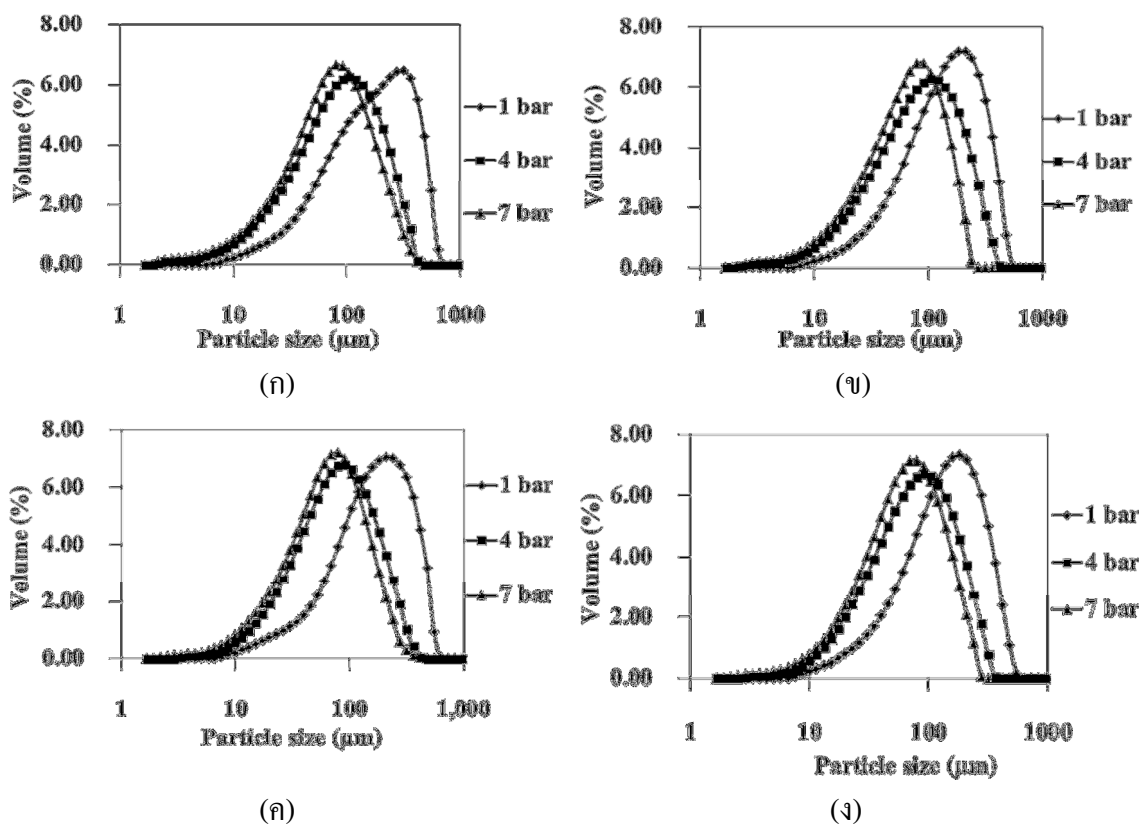
อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

จากตารางที่ 4-11 เมื่อทำการทดลองพ่นละอองพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C จะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน จะอยู่ในช่วง 60-90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การพ่นละอองโดยใช้ความดันและอุณหภูมิสูงจะทำให้เปอร์เซ็นต์ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน เพิ่มขึ้น เนื่องจากความแตกต่างของ

ความเร็วและปริมาณอากาศที่เข้าไปสัมพันธ์กับของเหลวและอิทธิพลของความหนืดที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 (สุชาติ เสนวิเศษ, 2547) กราฟการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C ที่ปั่นละอองด้วยความดันและอุณหภูมิต่างๆ แสดงในภาพประกอบที่ 4-20 และ 4-21 ตามลำดับ

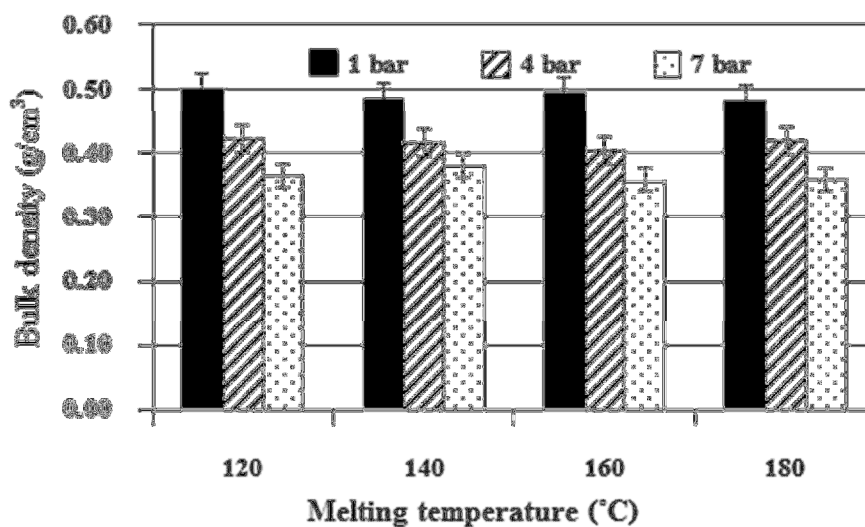


ภาพประกอบที่ 4-20 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ปั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส (ก) 140 องศาเซลเซียส (ข) 160 องศาเซลเซียส (ค) และ 180 องศาเซลเซียส (ง) ที่ความดันต่างๆ

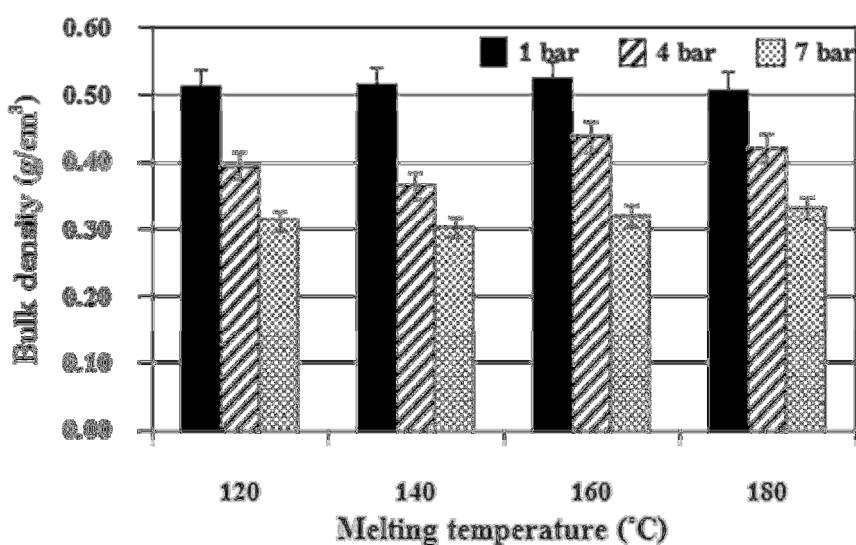


ภาพประกอบที่ 4-21 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟ้นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 120 องศาเซลเซียส (ก) 140 องศาเซลเซียส (ข) 160 องศาเซลเซียส (ค) และ 180 องศาเซลเซียส (ง) ที่ความดันต่างๆ

ในภาพประกอบที่ 4-22 และ 4-23 จะพบว่า การเพิ่มความดันและอุณหภูมิในการฟ้นละอองแม้ว่าจะได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้พบว่า มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A คือการฟ้นละอองที่ความดัน 1 บาร์ จะได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่า Bulk density สูงที่สุด และจะลดลงเมื่อเพิ่มความดันในการฟ้นละออง



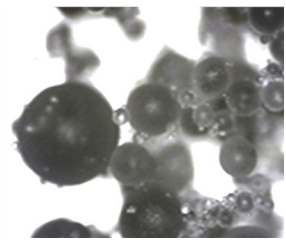
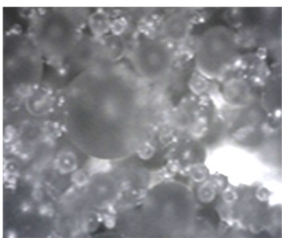
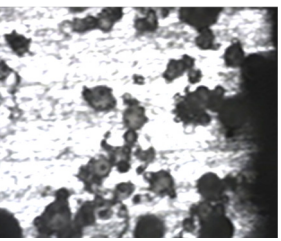
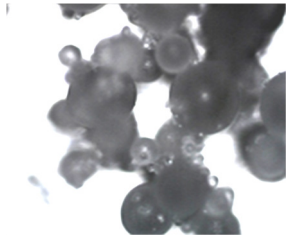
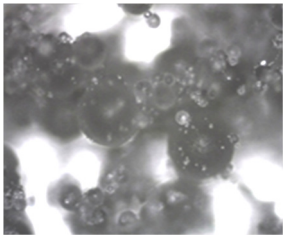
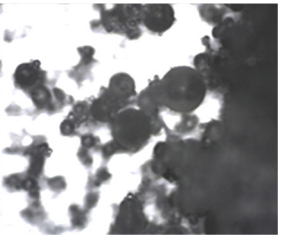
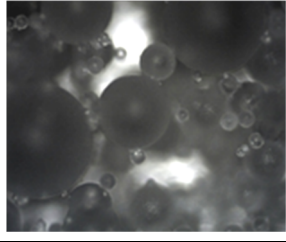
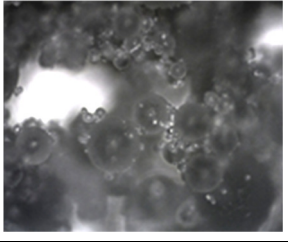
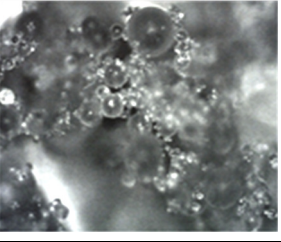
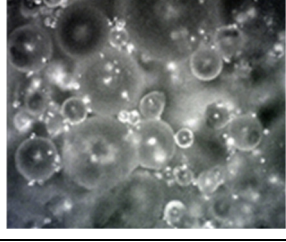
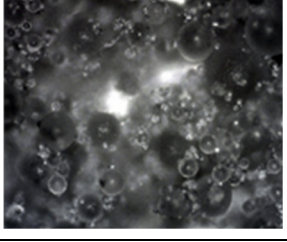
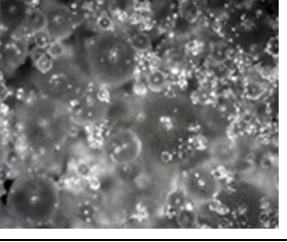
ภาพประกอบที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bulk density และอุณหภูมิของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ ชนิด B ที่พ่นละอองด้วยความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่าง รูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5



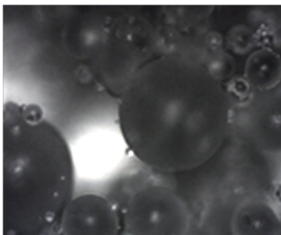
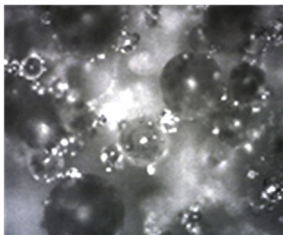
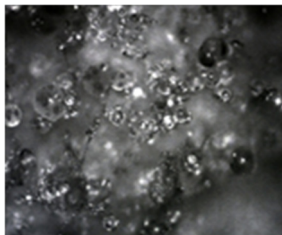
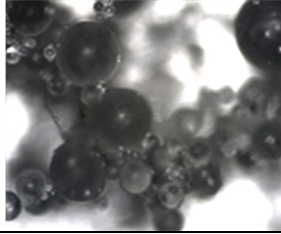
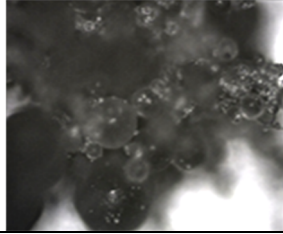
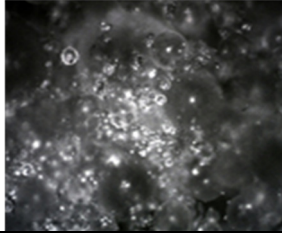
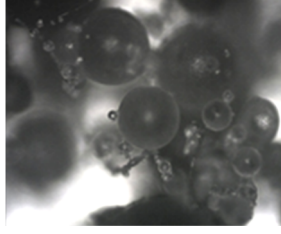
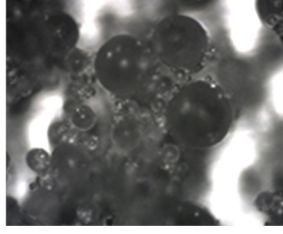
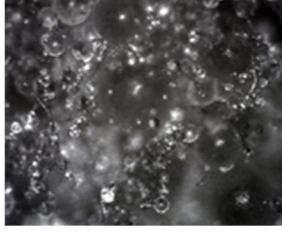
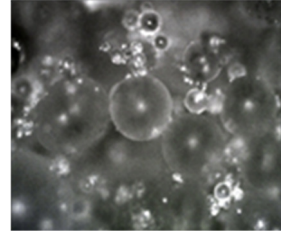
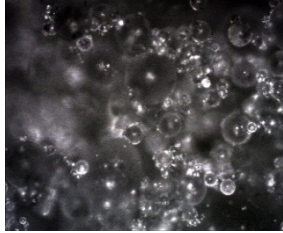
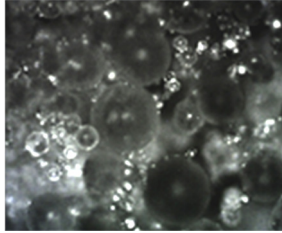
ภาพประกอบที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Bulk density และอุณหภูมิของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ ชนิด C ที่พ่นละอองด้วยความดันเท่ากับ 1 4 และ 7 บาร์ อัตราส่วนระหว่าง รูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5

4.2.3.2 ผลของความดันและอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีผลต่อรูปร่าง การกระจายตัวและพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C

ตารางที่ 4-12 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่พื้นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x

อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)		
	1	4	7
120			
140			
160			
180			

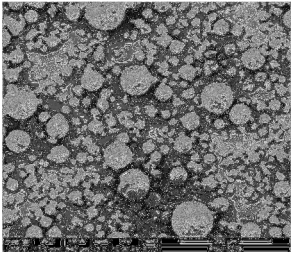
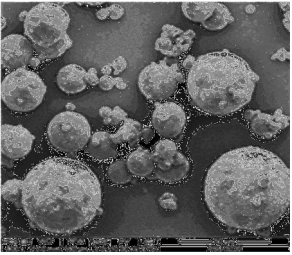
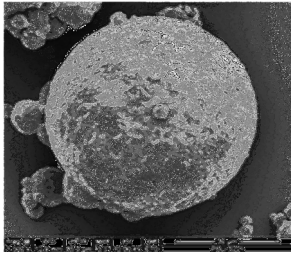
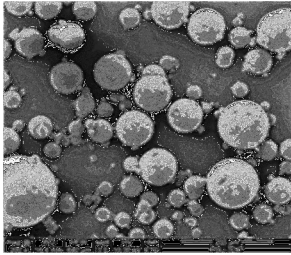
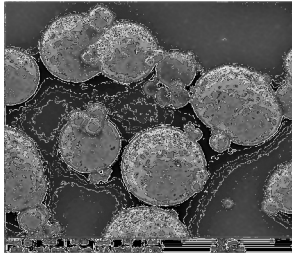
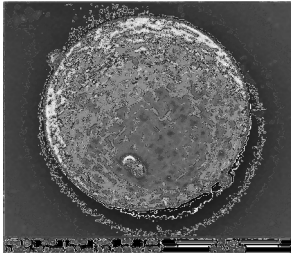
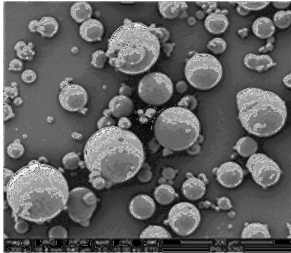
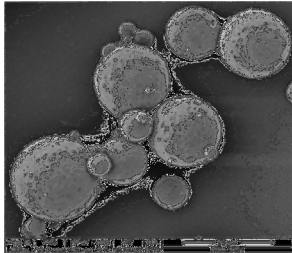
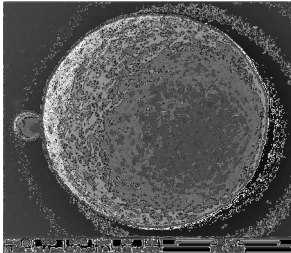
ตารางที่ 4-13 รูปร่างและการกระจายตัวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ปั่นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 10x

อุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)		
	1	4	7
120			
140			
160			
180			

จากตารางที่ 4-12 และ 4-13 จะเห็นได้ว่า ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้ง 2 ชนิด มีรูปร่างและการกระจายตัวเหมือนกัน โดยผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C จะมีการกระจายตัวระหว่างขนาดเล็กและใหญ่ปะปนกันมากกว่าชนิด B ทั้งนี้การปั่นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ พบว่า ผงพอลิเอทิลีน

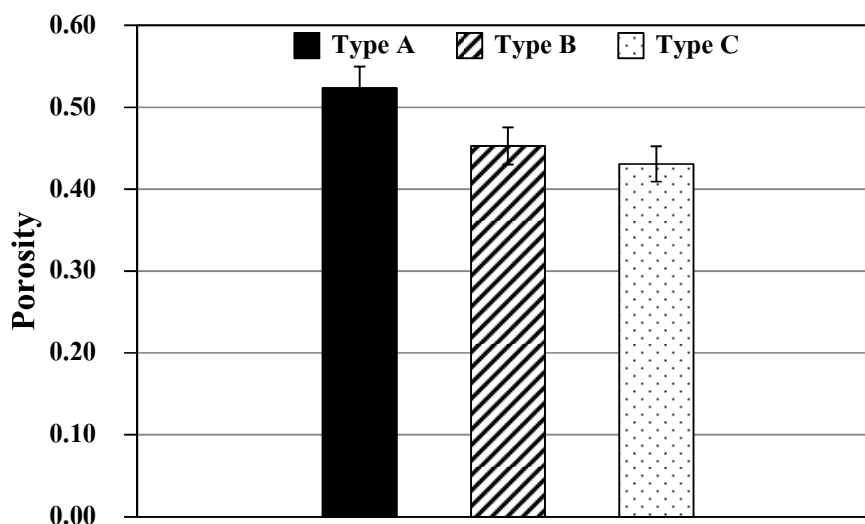
ลีนแวกซ์ทั้ง 2 ชนิดมีการเกาะกลุ่มกันน้อยกว่าการฟั่นละองที่ความดันเท่ากับ 4 และ 7 บาร์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตารางที่ 4-14 ลักษณะพื้นผิวของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ชนิด B และชนิด C ฟั่นละองด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายเท่ากับ 200x 800x และ 1500x

ชนิด	กำลังขยาย		
	200x	800x	1500x
A			
B			
C			

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของพอลิเอทิลีนแวกซ์ทั้ง 3 ชนิดที่ฟั่นละองที่สภาวะเดียวกัน คือที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ดังแสดงในตารางที่ 4-14 จะเห็นได้ว่า พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A มีผิวหน้าเป็นรอยขรุขระและมีหลุมลึกกว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B และชนิด C โดยพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C มีรูปทรงที่กลมและผิวหน้าเรียบที่สุด

เนื่องจากที่อุณหภูมิหลอมเหลวเดียวกัน พอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C จะมีความหนืดสูงที่สุด เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดรอยกดทับบนผิวน้อย จึงมีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกาะกลุ่มกัน เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคและความพรุนน้อยกว่าพอลิเอทิลีนแวกซ์อีก 2 ชนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4-24



ภาพประกอบที่ 4-24 ค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ชนิด B และชนิด C ที่พื้นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเท่ากับ 140 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการทำนายตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

ตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้ มาทำการศึกษาด้วยวิธีทากูชิเพื่อยืนยันผลที่ได้และหาสภาวะที่ดีที่สุดในการดำเนินการรวมทั้งศึกษาว่าสามารถลดหรือเพิ่มปัจจัยใดได้บ้างเพื่อให้การดำเนินการเกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยจะใช้วิธีการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ด้วยหลักการทากูชิ ซึ่งจะกำหนดระดับตัวแปร 2³ ระดับ คือ กำหนดตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ 3 ตัวแปรคือ ความดัน (P) อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (T) และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (F) และกำหนดระดับของตัวแปรที่ 2 ระดับ และทำการทดลอง 4 ครั้ง

เริ่มต้นจากการกำหนดปัจจัยตัวแปรที่ต้องการศึกษา จากนั้นทำตารางแผนการทำงานและทำการพ่นละอองตามแผนที่ได้กำหนดไว้ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-12 โดยกำหนดให้

P = ความดัน (ระดับของตัวแปร: 7 = 1 บาร์, 2 = 7 บาร์)

T = อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวชนิด A (ระดับของตัวแปร: 1 = 180 องศาเซลเซียส, 2 = 140 องศาเซลเซียส)

F = อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว (ระดับของตัวแปร: 1 = 3.0:1.5, 2 = 3.0:1.0)

ตาราง 4-15 ผลการทดลองด้วยมาตรฐานของทากูชิ (Orthogonal Array) L4 (2^3) เพื่อทำนายตัวแปรที่มีผลต่อขนาด การกระจายขนาดและรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

การทดลอง	P	T	F	Bulk density (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	Yield (เปอร์เซ็นต์)
1	7	180	3.0:1.5	434.17	87.84
2	7	140	3.0:1.0	318.15	82.82
3	1	180	3.0:1.0	333.18	83.78
4	1	140	3.0:1.5	318.15	76.33

4.2.4.1 การใช้ตารางมาตรฐานทากูชิเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการพ่นละอองเพื่อให้ได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4-15 พบว่า สภาวะที่ทำการพ่นละอองที่ได้เปอร์เซ็นต์ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน สูงที่สุดคือ การพ่นละอองด้วยความดันเท่ากับ 7 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยกระบวนการพ่นละอองตามมาตรฐานทากูชิ แสดงดังตารางที่ 4-16 โดยคอลัมน์ที่ 2 จะศึกษาถึงผลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อขนาดและการกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ สำหรับคอลัมน์ที่ 3 จะแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีต่อสมบัติของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้

ตารางที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีผลต่อ yield ของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่เล็กกว่า 200 ไมครอน โดยใช้ตารางมาตรฐานของทากูชิ

No.				P	P	T	Response (Yield)	ค่าเฉลี่ย yield	
	P	T	F	x	x	x		$\bar{P}_1 = \frac{y_1 + y_2}{2} = 85.330$	$\bar{P}_2 = \frac{y_3 + y_4}{2} = 80.055$
1	1	1	1	1	1	1	$y_1 = 87.84$	$\bar{T}_1 = \frac{y_1 + y_3}{2} = 85.810$	
2	1	2	2	2	2	1	$y_2 = 82.82$	$\bar{T}_2 = \frac{y_2 + y_4}{2} = 79.575$	
3	2	1	2	2	1	2	$y_3 = 83.78$	$\bar{F}_1 = \frac{y_1 + y_4}{2} = 82.085$	
4	2	2	1	1	2	2	$y_4 = 76.33$	$\bar{F}_2 = \frac{y_2 + y_3}{2} = 83.000$	

$$\overline{P \times T_1} = \frac{y_1 + y_4}{2} = 82.085 \quad \overline{P \times F_1} = \frac{y_1 + y_3}{2} = 85.810 \quad \overline{T \times F_1} = \frac{y_1 + y_2}{2} = 85.330$$

$$\overline{P \times T_2} = \frac{y_2 + y_3}{2} = 83.300 \quad \overline{P \times F_2} = \frac{y_2 + y_4}{2} = 79.575 \quad \overline{T \times F_2} = \frac{y_3 + y_4}{2} = 80.055$$

จากตารางที่ 4-16 จะเห็นได้ว่า

1. การเปลี่ยนแปลงความดัน (P) ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ต่างกัน 5.275 เปอร์เซ็นต์ ($|\bar{P}_1 - \bar{P}_2| = |85.330 - 80.055| = 5.275$)
2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ต่างกัน 6.235 เปอร์เซ็นต์ ($|\bar{T}_1 - \bar{T}_2| = |85.810 - 79.575| = 6.235$)
3. การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว (F) ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ต่างกัน 1.215 เปอร์เซ็นต์ ($|\bar{F}_1 - \bar{F}_2| = |82.085 - 83.300| = 1.215$)
4. การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิ ($P \times T$) ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ต่างกัน 1.215 เปอร์เซ็นต์ ($|\overline{P \times T_1} - \overline{P \times T_2}| = |82.085 - 83.300| = 1.215$)

5. การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (P×F) ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนต่างกัน 6.235 เปอร์เซ็นต์ ($|\overline{P \times F_1} - \overline{P \times F_2}| = |85.810 - 79.575| = 6.235$)

6. การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (T×F) ส่งผลให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนต่างกัน 5.275 เปอร์เซ็นต์ ($|\overline{T \times F_1} - \overline{T \times F_2}| = |85.330 - 80.055| = 5.275$)

จากการวิเคราะห์ด้วยตารางมาตรฐานของทากูชิพบว่า อุณหภูมิ (T) มีผลต่อขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มากที่สุด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการปั่นละอองจะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน แตกต่างกันถึง 6.235 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือการเปลี่ยนแปลงความดัน (P) และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลว (F) ตามลำดับ (5.275 และ 1.215 เปอร์เซ็นต์) สำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสามพบว่า การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (P×F) จะมีผลต่อขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้มากที่สุด (6.235 เปอร์เซ็นต์)

4.2.4.2 การใช้ตารางมาตรฐานทากูชิเพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการปั่นละอองเพื่อให้ได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มี Bulk density สูง

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4-15 พบว่า สถานะที่ทำให้การปั่นละอองที่ได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มีค่า Bulk density สูงที่สุดคือ การปั่นละอองด้วยความดันเท่ากับ 7 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยกระบวนการปั่นละอองตามมาตรฐานทากูชิ แสดงดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่า Bulk density ของพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้ตารางมาตรฐานของทากูชิ

No.	P	T	F	P	P	T	Response (Bulk density)	ค่าเฉลี่ย Bulk density
				x	x	x		$\bar{P}_1 = \frac{y_1 + y_2}{2} = 290.7$
				T	F	T		$\bar{P}_2 = \frac{y_3 + y_4}{2} = 376.2$
1	1	1	1	1	1	1	$y_1 = 294.4$	$\bar{T}_1 = \frac{y_1 + y_3}{2} = 306.3$
2	1	2	2	2	2	1	$y_2 = 287.0$	$\bar{T}_2 = \frac{y_2 + y_4}{2} = 360.6$
3	2	1	2	2	1	2	$y_3 = 318.2$	$\bar{F}_1 = \frac{y_1 + y_4}{2} = 364.3$
4	2	2	1	1	2	2	$y_4 = 434.2$	$\bar{F}_2 = \frac{y_2 + y_3}{2} = 302.6$

$$\overline{P \times T_1} = \frac{y_1 + y_4}{2} = 364.3 \quad \overline{P \times F_1} = \frac{y_1 + y_3}{2} = 306.3 \quad \overline{T \times F_1} = \frac{y_1 + y_2}{2} = 290.7$$

$$\overline{P \times T_2} = \frac{y_2 + y_3}{2} = 302.6 \quad \overline{P \times F_2} = \frac{y_2 + y_4}{2} = 360.6 \quad \overline{T \times F_2} = \frac{y_3 + y_4}{2} = 376.2$$

จากตารางที่ 4-17 จะเห็นได้ว่า

1. การเปลี่ยนแปลงความดัน (P) ส่งผลให้ค่า Bulk density ต่างกัน 85.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($|\bar{P}_1 - \bar{P}_2| = |290.7 - 376.2| = 85.5$)
2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) ส่งผลให้ค่า Bulk density ต่างกัน 54.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($|\bar{T}_1 - \bar{T}_2| = |306.3 - 360.6| = 54.3$)
3. การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (F) ส่งผลให้ค่า Bulk density ต่างกัน 61.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($|\bar{F}_1 - \bar{F}_2| = |364.3 - 302.6| = 61.7$)
4. การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิ (P×T) ส่งผลให้ค่า Bulk density ต่างกัน 61.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($|\overline{P \times T_1} - \overline{P \times T_2}| = |364.3 - 302.6| = 61.7$)

5. การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (P×F) ส่งผลให้ค่า Bulk density ต่างกัน 54.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$|\overline{P \times F_1} - \overline{P \times F_2}| = |306.3 - 360.6| = 54.3$$

6. การเปลี่ยนแปลงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (T×F) ส่งผลให้ค่า Bulk density ต่างกัน 85.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$|\overline{T \times F_1} - \overline{T \times F_2}| = |290.7 - 376.2| = 85.5$$

จากการวิเคราะห์ด้วยตารางมาตรฐานของทากูชิพบว่า การเปลี่ยนแปลงความดัน (P) จะมีผลต่อค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ผลิตได้มีค่าแตกต่างกันมากที่สุด (85.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) รองลงมาคืออัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (F) และอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (T) ตามลำดับ (61.7 และ 54.3 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สำหรับปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสามพบว่า การเปลี่ยนแปลงของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลว (T) และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลว (F) มีผลต่อค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มากที่สุด (85.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยการลดอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เป็น 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จะสามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีค่า Bulk density ได้สูงถึง 434.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4.3 ผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมและความคุ้มค่าตามหลักเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จะพิจารณาจากสภาวะที่ดำเนินการ รายได้ของผลผลิต และค่าขนส่งสินค้าเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและคุ้มค่าที่สุดในการดำเนินการ

ตารางที่ 4-18 ปริมาณและมูลค่าของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ได้จากการฟ่นละอองที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดของท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (บาร์)	เปอร์เซ็นต์ผลได้ (โดยปริมาตร)			มูลค่าผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ต่อ 1 ตันที่ ป้อนเข้ากระบวนการ (บาท)		
	0-200 ไมครอน	50-200 ไมครอน	ผงทั้งหมด	0-200 ไมครอน	50-200 ไมครอน	ผงทั้งหมด
1	76.33	63.47	90.00	40050.35	32045.75	44100.00
2	89.27	47.83	90.00	46839.97	24150.63	44100.00

หมายเหตุ : ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาด 0-200 ไมครอน ราคา กิโลกรัมละ 53 บาท

ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ขนาด 50-200 ไมครอน ราคา กิโลกรัมละ 51 บาท

ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ไม่จำกัดขนาด ราคา กิโลกรัมละ 49 บาท

ที่มา : บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน

ในการจำหน่ายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์จะแบ่งตามขนาดของผงเป็นช่วงขนาดตั้งแต่ 0-200 ไมครอน 50-200 ไมครอน และไม่จำกัดขนาด มีราคาเท่ากับ 53 บาท 51 บาท และ 49 บาท ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 4-18 ทำให้มีแนวทางในการดำเนินการดังนี้

1. กรณีขายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดในช่วง 0-200 ไมครอน ที่ฟ่นละอองด้วยความดัน 2 บาร์ จะทำให้มีรายได้มากกว่าการฟ่นละอองที่ความดัน 1 บาร์ เท่ากับ 6789.62 บาท ต่อตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้ากระบวนการ ทั้งนี้การขายผงพอลิเอทิลีนที่มีขนาดในช่วง 0-200 ไมครอน จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการคัดแยกขนาดของผงที่ใหญ่กว่า 200 ไมครอน และค่าใช้จ่ายจากการเพิ่มความดันในการฟ่นละอองจาก 1 บาร์ มาเป็น 2 บาร์

2. กรณีขายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดในช่วง 50-200 ไมครอน ที่ฟ้นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ จะทำให้มีรายได้มากที่สุด (32045.75 บาท) ซึ่งมากกว่าผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองด้วยความดัน 2 บาร์ ถึง 7894.12 บาทต่อตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้ากระบวนการ โดยการขายผงพอลิเอทิลีนในช่วงขนาด 50-200 ไมครอน จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องทำการคัดแยกขนาดของผงที่เล็กกว่า 50 ไมครอน และใหญ่กว่า 200 ไมครอน

3. กรณีขายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้ทั้งหมดโดยไม่คัดแยกขนาด รายได้จากการขายในลักษณะนี้จะเท่ากันทุกความดันที่ใช้ในการฟ้นละอองคือ 44100 บาทต่อตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้ากระบวนการ ดังนั้นในการฟ้นละอองที่ความดันเพียง 1 บาร์ ก็สามารถมีรายได้จากการดำเนินการเท่ากับการฟ้นละอองที่ความดันสูง (2-7 บาร์) และสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการคัดแยกขนาดได้อีกด้วย

ตารางที่ 19 ค่าใช้จ่ายในการขนส่งผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ ระยะทางมากกว่า 200 กิโลเมตร ความจุ 20 ลูกบาศก์เมตร

ความดัน (บาร์)	bulk density (กิโลกรัม/ ลูกบาศก์เมตร)	น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ (กิโลกรัม/ ตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้า)			ปริมาณที่ ขนส่ง (กิโลกรัม/ เที่ยว)	ค่าใช้จ่าย (บาท/ กิโลเมตร)
		0-200 ไมครอน	50-200 ไมครอน	ผงทั้งหมด		
1	434.2	755.67	628.35	900.00	8684	17.98
2	307.4	883.77	473.54	900.00	6148	12.73

หมายเหตุ : คัดค่าบริการขนส่งตามน้ำหนักในอัตรา กิโลกรัมละ 2.07 บาทต่อตัน ภูมิภาคเป็นที่ราบ พิวลาตยง ที่อำเภอเมือง และการจราจรปกติ ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงโซล่า 31.00-31.99 บาท/ลิตร ราคาของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์แบ่งตามขนาดของผง (www.disaster.go.th., 2012)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าบริการขนส่งตามน้ำหนักวัสดุที่บรรทุก ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ ซึ่งมีค่า Bulk density สูงที่สุด (434.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สามารถขนส่งได้ในปริมาณสูงที่สุด (8684 กิโลกรัม) ซึ่งมีปริมาณมากกว่าผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ฟ้นละอองด้วยความดัน 2 บาร์ ถึง 2536 กิโลกรัม และมีค่าขนส่งสูงกว่าเพียง 5.25 บาทต่อกิโลเมตร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการมีผลสรุปและข้อเสนอแนะซึ่งสามารถแยกเป็นประเด็นต่างๆ ได้ดังนี้

สรุปผลการทดลอง

- ผลของความดัน
- ผลของอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์
- ผลของอัตราส่วนระหว่างเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว
- สถานะที่เหมาะสมในการดำเนินการ

ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของความดัน (Air pressure)

จากการทดลองพบว่า ความดันมีผลต่อขนาด การกระจายขนาด ค่า Bulk density และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์มากที่สุด ข้อมูลดังกล่าวยืนยันด้วยมาตรฐานของทากูชิ (Orthogonal Array) L4 (2^3) โดยพบว่า การเพิ่มความดันในการปั่นละอองจะทำให้ได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนเพิ่มขึ้น แต่ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จะมีค่า Bulk density ลดลง

5.1.2 ผลของอุณหภูมิพอลิเอทิลีนแวกซ์ (Melting temperature)

การเพิ่มอุณหภูมิในการปั่นละอองจะทำให้ได้ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนเพิ่มขึ้น แต่ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จะมีค่า Bulk density ลดลงปริมาณ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 140-180 องศาเซลเซียส ความหนืดของพอลิเอทิลีนแวกซ์จะเริ่มคงที่ ทำให้ขนาด และค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งการดำเนินการปั่น

ละอองที่อุณหภูมิประมาณ 160-180 องศาเซลเซียส ไม่สามารถดำเนินการติดต่อกัน ได้เป็นเวลานาน เนื่องจากอุณหภูมิของห้องพ่นละอองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการพ่นละอองด้วยอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เหลวเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการพ่นละออง

5.1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลว

จากการทดลองพ่นละอองหัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 3.0:1.0 และ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิ พบว่า หัวฉีด 3.0:1.5 สามารถผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน ได้สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้มีค่า Bulk density สูงสุดถึง 0.512 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กำลังการผลิตเท่ากับ 8.82 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

5.1.4 สภาพที่เหมาะสมในการดำเนินการ

เนื่องจากราคาของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์แต่ละขนาดมีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า

1. กรณีขายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดในช่วง 0-200 ไมครอน พบว่า สภาพที่เหมาะสมในการดำเนินการคือ การพ่นละอองด้วยความดัน 2 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จะทำให้มีรายได้ในการดำเนินการสูงถึง 46839.97 บาทต่อตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้ากระบวนการ
2. กรณีขายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดในช่วง 50-200 ไมครอนพบว่า การพ่นละอองด้วยความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จะทำให้มีรายได้ในการดำเนินการสูงถึง 32045.75 บาทต่อตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้ากระบวนการ
3. กรณีขายผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้ทั้งหมด โดยไม่คัดแยกขนาด การพ่นละอองที่ความดันเพียง 1 บาร์ อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์เท่ากับ 140 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวฉีดที่มีอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 จะทำให้มีรายได้ในการดำเนินการสูงถึง 44100 บาทต่อตันของพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้ากระบวนการ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการทดลองนี้ ได้สร้างเครื่องพ่นละอองแนวตั้งต้นแบบ กำลังการผลิตผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จึงมีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรปรับปรุงหรือเปลี่ยนชนิดหรือขนาดของหัวฉีดและขนาดของห้องพ่นละอองเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตและความคุ้มค่าในการดำเนินการมากขึ้น

2. เนื่องจากในการทดลองยังมีผงพอลิเอทิลีนแวกซ์บางส่วนตกค้างอยู่ภายในห้องพ่นละออง ทำให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ (Yield) ในการดำเนินการลดลง จึงควรปรับปรุงและพัฒนาวิธีการดำเนินการเพื่อที่จะลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการผลิต

บรรณานุกรม

- ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. ม.ป.ป. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณัฐสินี แสงใส. 2555. การผลิตผงพาราฟินแวกซ์ด้วยกระบวนการอัลตราโซนิคอะตอมไมเซชัน. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วสันต์ ด้วงคำจันทร์. 2545. The Important Factors for Designing the Spray Dryer: Case Study for Roselle Powder. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุชาติ เอ็นวิเศษ. 2547. การออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สอะตอมไมเซอร์เพื่อผลิตผงโลหะ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อารี ธนบุญสมบัติ, ภัทรารวรรณ คหะวงศ์, และสุภมาส ด้านวิทยากุล. 2553. การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผงศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). <http://www.mtec.or.th>. (สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2555).
- Animesh Bose. 1995. Advance in particle materials. United States of America: Butterworth-Heinemann.
- Basel Mulhem, Günther Schulte and Udo Fritsching. 2006. Solid-liquid separation in suspension atomization. Chemical Engineering Science, Volume 61, Issue 8: 2582-2589.
- Czisch. C and Fritsching. U. Atomizer design for viscous-melt atomization. Materials Science and Engineering: A, Volume 477, Issues 1-2: 21-25.

- Jianzhong Lin, Lijuan Qian, Hongbin Xiong, Tat Leung Chan. 2009. Effects of operating conditions on droplet deposition onto surface of atomization impinging spray. *Surface & Coatings Technology*, 203:1733–1740.
- Joshua U. Otaigbe and Jon M. Mcavoy. 1997. Gas Atomization of Polymers. I. Feasibility Studies and Process Development. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 17, No. 2, 145–160.
- Laura Juslin, Osmo Antikainen, Pasi Merkkü and Jouko Yliruusi. 1995. Droplet size measurement: I. Effect of three independent variables on droplet size distribution and spray angle from a pneumatic nozzle. *Pharmaceutics*, Volume 123: 247–256.
- Pia Thybo, Lars Hovgaard, Jesper Sæderup Lindeløv, Anders Brask,² and Sune Klint Andersen. 2008. Scaling Up the Spray Drying Process from Pilot to Production Scale Using an Atomized Droplet Size Criterion. *Pharmaceutical Research*, Vol. 25, No. 7:1610-1620.
- Reverchon E and Antonacci. A. 2007. Polymer microparticles production by supercritical assisted atomization. *The Journal of Supercritical Fluids*, Volume 39, Issue 3: 444–452.
- Stanislav Lagutkin, Lydia Achelis, Sheikhal Sheikhaliev, Volker Uhlenwinkel and Vikas Srivastava. 2004. Atomization process for metal powder. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 383: 1–6.
- กำลังการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง. 2555. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง. บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด มหาชน. <http://www.irpc.co.th>. (สืบค้นเมื่อ 17 ตุลาคม 2555).
- เทคนิคการสู่มตัวอย่างผงวัสดุ. 2555. การทดสอบคุณสมบัติมวลรวม. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. <http://www.ce.eng.psu.ac.th>. (สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม 2555).

แนวโน้มนำการใช้งานผลิตภัณฑ์เม็ดพลาสติก. 2554. สรุปสถานะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2554 และ
แนวโน้มนำปี 2555. กระทรวงอุตสาหกรรม. <http://www.oie.go.th>. (สืบค้นเมื่อ 10 สิงหาคม
2555).

มวลดโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแวกซ์. 2551. สมบัติทางกลของพอลิเมอร์.
<http://e-book.ram.edu/e-book>. (สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2555).

อัตราค่าขนส่งวัสดุ. 2555. ค่าขนส่งวัสดุด้วยรถบรรทุก 10 ล้อ. <http://www.disaster.go.th>. (สืบค้น
เมื่อ 17 ตุลาคม 2555).

Polyethylene wax applications. 2011. wiwax. Ltd. <http://www.wiwax.eu/en/main>. (accessed
August 1, 2012).

Polyethylene wax applications. 2011. Kerax Limited. <http://www.kerax.co.uk>. (accessed August
1, 2012).

Spray drying manual. 2011. BETE Fog Nozzle, Inc. <http://www.bete.com>. (accessed August 10,
2012).

Two fluid nozzle. 2011. Spraying systems Co. <http://www.spray.com>. (accessed November 3,
2011).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

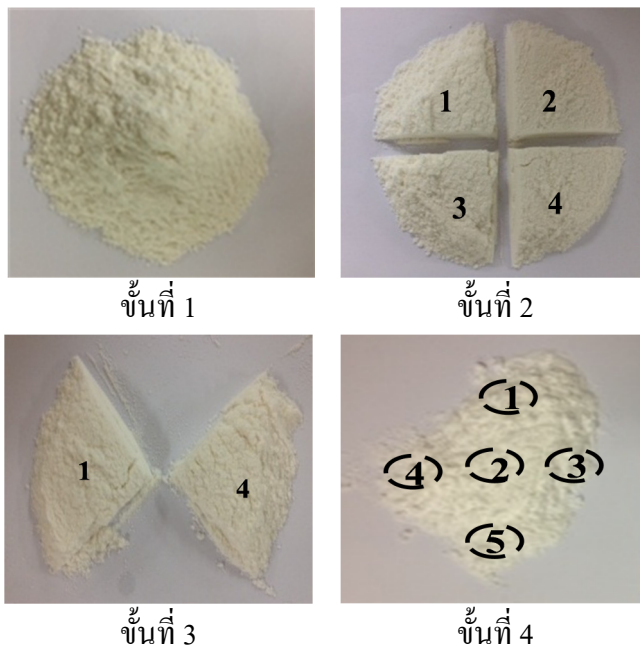
1. การสุ่มตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยวิธีแบ่งสี่

นำผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่พ่นละอองได้ในแต่ละการทดลองมาแบ่งด้วย Riffle splitter โดยเทผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ผ่าน Sample splitter ซึ่งจะแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วนผ่านช่องเปิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ ก-1



ภาพประกอบที่ ก-1 ลักษณะ Riffle splitter ที่ใช้ในการทดลอง

จากนั้นนำตัวอย่างที่แบ่งได้มาทำการสุ่มตัวอย่างด้วยวิธีแบ่งสี่ โดยเริ่มจากการผสมตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ จากนั้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน จากนั้นนำ 2 ส่วนที่อยู่ตรงข้ามกันมาทดสอบ และทิ้ง 2 ส่วนที่เหลือไป จากนั้นนำตัวอย่าง 2 ส่วนที่มีอยู่มาผสมกันแล้วสุ่มตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ (การทดสอบคุณสมบัติมวลรวม, 2555) ดังแสดงภาพประกอบที่ ก-2



ภาพประกอบที่ ก-2 เทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งสี่

2. การวิเคราะห์ความหนาแน่นจริงของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ (True density)

วัสดุอุปกรณ์

1. Pycnometer ขนาด 25 มิลลิลิตร ดังแสดงในภาพประกอบที่ ข-3
2. เอทานอลบริสุทธิ์
3. ซ้อนตักสาร
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล



ภาพประกอบที่ ก-3 Pycnometer ขนาด 25 มิลลิลิตร

วิธีการวิเคราะห์และคำนวณ

1. ชั่งน้ำหนัก Pycnometer เป่า (M_0)
2. ใช้ซ้อนตักสาร ตักตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ตามวิธีแบ่งสี แล้วเติมลงไป
Pycnometer ประมาณ 1-2 กรัม ชั่งน้ำหนักของ Pycnometer + จุก + ตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์
(M_s)
3. เติมเอทานอลบริสุทธิ์ลงไปจนเต็มขวดแล้วค่อยๆ ปิดจุกเพื่อไล่อากาศและเอทานอลส่วนเกินผ่านช่อง Capillary ที่จุก Pycnometer เช็ดจุกและรอบขวดให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนัก
(M_{sl})

4. ทำความสะอาด Pycnometer และจุก อบอุ่นให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส แล้วใส่ใน โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นเติมเอทานอลบริสุทธิ์ลงใน Pycnometer จนเต็มขวด แล้วค่อยๆ ปิดจุกเพื่อไล่อากาศและเอทานอลส่วนเกินผ่านช่อง Capillary ที่จุก Pycnometer เช็ดจุก และรอบขวดให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนัก (M_1)

การคำนวณ

ค่าความหนาแน่นจริงของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์คำนวณจาก

$$\rho_p = \frac{\rho_l(M_s - M_0)}{(M_l - M_0) - (M_{sl} - M_s)}$$

โดย ρ_p = ความหนาแน่นจริงของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

$$\rho_l = \text{ความหนาแน่นของเอทานอลหาจาก } \rho_l = \frac{M_l - M_0}{25}$$

M_0 = น้ำหนักของ Pycnometer เปล่าพร้อมจุก

M_s = น้ำหนักของ Pycnometer เปล่า + จุก + ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

M_{sl} = น้ำหนักของ Pycnometer เปล่า + จุก + ผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ +
เอทานอล

3. การวิเคราะห์ขนาด การกระจายขนาด และรูปร่างของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้ตะแกรงร่อน

วัสดุ อุปกรณ์

1. ตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ต้องการวิเคราะห์
2. ชุดตะแกรงทองเหลืองมาตรฐาน ASTM เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว โดยมีขนาดรูเปิดเท่ากับ เท่ากับ 1700 850 600 425 212 และ 0 ไมครอน
3. เครื่องสั่นตะแกรงร่อน
4. นาฬิกาจับเวลา
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล



ภาพประกอบที่ ก-4 ชุดตะแกรงร่อนพร้อมเครื่องสั่นที่ใช้คัดแยกขนาดผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. จัดเรียงตะแกรงร่อนวางบนเครื่องสั่น โดยตะแกรงที่มีรูเปิดขนาดใหญ่ที่สุดจะอยู่ด้านบนสุด และลดระดับลงมาเรื่อยๆ จนถึงชั้นล่างสุดจะเป็นตะแกรงที่มีขนาดรูเปิดเท่ากับ 0 ไมครอน หรือ ถาด
2. เปิดเครื่องสั่นพร้อมจับเวลาในการร่อน 10 นาที จากนั้นปิดเครื่องสั่นเมื่อร่อนครบตามเวลาที่กำหนด พร้อมกับนำตะแกรงออกจากเครื่องสั่น

3. นำผงพอลิเอทิลีนที่ค้างบนตะแกรงร้อนแต่ละชั้น ไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ที่ค้างอยู่บนตะแกรงร้อนที่รูเปิดต่างๆ จาก

$$\frac{\text{น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ค้างบนตะแกรงรูเปิดใดๆ}}{\text{น้ำหนักรวมของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ตกลงบนตะแกรงร้อนที่เวลาเริ่มต้น}} \times 100$$

4. การวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์โดยใช้เทคนิค Laser diffraction ด้วยเครื่อง Mastersizer 2000



ภาพประกอบที่ ก-5 เครื่อง Particle size analyzer Malvern รุ่น Mastersizer 2000
ที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

วัสดุ อุปกรณ์

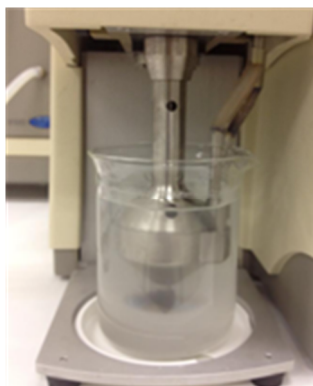
1. ตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ต้องการวิเคราะห์
2. เอทานอลบริสุทธิ์
3. บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 2 ใบ
4. ช้อนตักสาร

วิธีการดำเนินการวิจัยวิจัย

ระบบป้อนสารตัวอย่าง

1. สุ่มตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ตามวิธีแบ่งสี
2. เปิด Power on เครื่องตรวจวัดคลื่นแสง

3. เมื่อเปิด Power on เครื่องตรวจวัดคลื่นแสง หลอดไฟสีม่วงน้ำเงินบนหลังเครื่องจะสว่างขึ้น ควรอุ่นเครื่องก่อนใช้งานประมาณ 15-20 นาที
4. เปิดคอมพิวเตอร์ของระบบประมวลผล
5. เตรียมเอทานอล ประมาณ 800 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร



ภาพประกอบที่ ก-6 เอทานอลที่ใช้เป็นสารละลายตัวกลางในการวัดการกระจายขนาด

6. ยกแท่นกวนของระบบป้อนสารขึ้นช้าๆ นำบีกเกอร์เอทานอลที่เตรียมไว้วางบนแท่นวาง แล้วค่อยๆ กดแท่นกวนกลับที่เดิม



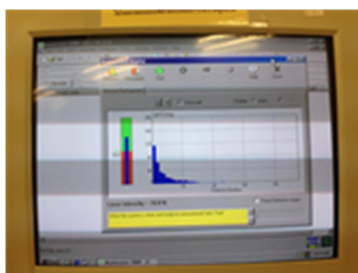
ภาพประกอบที่ ก-7 แท่นกวนและใบพัดกวนของระบบป้อนสาร

7. กด Power on เครื่องระบบป้อนสาร ตั้งความเร็วรอบในการกวน 2500 รอบต่อนาที หากจำเป็นต้องใช้อัลตราโซนิกในการกวนด้วยก็ให้ตั้งเวลาในการกวน ใบพัดตัวกวนจะหมุน ซึ่งในการหมุนนี้ทำให้สารตัวอย่างไหลเข้าไปในช่องแสงผ่าน (Flow cell)



ภาพประกอบที่ ก-8 ปุ่มปรับความเร็วรอบ เวลาในการกวน และรูปแบบการกวนผสมสาร

ระบบประมวลผล



ภาพประกอบที่ ก-9 คอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลการวัดการกระจายขนาด

การทำงานบนซอฟต์แวร์ เริ่มต้นโดยคลิกเมาส์ที่ Mastersizer 2000 แล้วเปิดไฟล์ที่ต้องการใช้งาน ถ้ายังไม่เคยเปิดไฟล์ไว้ ให้ทำการเปิดไฟล์ใหม่ หลังจากนั้นเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์แบบ Manual โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. คลิก Measure manual จะปรากฏ Measurement Display
2. คลิก Option
3. ตั้งค่า Option กรอกค่า Reflective Index, Absorption ของทั้งตัวอย่างและ Dispersion
4. เลือก Model ของการคำนวณ ปกติใช้ Normal (Default)
5. ตั้งเวลาการวัดตัวอย่าง (Default)
6. ตั้งค่าการวัดซ้ำ โดยทั่วไปใช้ 2 ซ้ำและ Average

7. คลิก Document
8. ตั้งชื่อตัวอย่าง รายละเอียดตัวอย่าง อาจจะกรอกหมายเลขสถานะที่วิเคราะห์
9. เมื่อค่า Laser Intensity อยู่ในช่วง 60-80 เปอร์เซ็นต์ ให้กด Start
10. สังเกตแถบสีเหลืองใต้จอ Measurement Display จะมีคำสั่งเมื่อเครื่องพร้อม ผู้วิเคราะห์ทำตามขั้นตอนคำสั่งนั้น
11. เมื่อเครื่องวิเคราะห์เสร็จแล้ว จะบันทึกลงในไฟล์ที่เราทำงานโดยอัตโนมัติ
12. ไปคลิกที่ไฟล์ที่ข้อมูลนั้นบันทึกอยู่ สามารถสั่งพิมพ์ผลการวิเคราะห์ได้ทันที
13. เมื่อวิเคราะห์แล้วให้ทำความสะอาด Flow cell โดยยกเครื่องกวนขึ้น นำตัวอย่างที่วิเคราะห์ออก แล้วให้นำบีกเกอร์น้ำกลั่นประมาณ 700 มิลลิลิตร วางแทนกคเครื่องกวนลงเบาๆ เปิดปุ่มตั้ง Speed ในการกวนเพิ่มขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย เพื่อให้สารที่ค้างอยู่ประมาณ 5 นาที
14. ปิด Laser lamp
15. ปิดปุ่มแล้วถอดเลนส์จาก Flow cell ออกมาทำความสะอาด

5. การคำนวณค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

วัสดุ อุปกรณ์

1. ตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์
2. กระบอกดวงสแตนเลสขนาดความจุ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. กระดาษA4
4. ไม้บรรทัดเหล็ก
5. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล



ภาพประกอบที่ ก-10 กระบอกดวงสแตนเลสที่ใช้หาค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. สุ่มตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ด้วยวิธีแบ่งสี่
2. เทตัวอย่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ลงในกระบอกดวงสแตนเลสและใช้ไม้บรรทัดปาดส่วนที่เกินทิ้งไป
3. ชั่งน้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ และคำนวณค่า Bulk density จาก

$$\text{Bulk density} = \frac{\text{น้ำหนักรวมระหว่างผงพอลิเอทิลีนแวกซ์และกระบอกดวง} - \text{น้ำหนักกระบอกดวง}}{\text{ปริมาตรกระบอกดวง}}$$

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์

1. ความเร็วและอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากหัวฉีดและห้องพ่นละออง

ตารางที่ ข-1 ความเร็วและอัตราการไหลของอากาศที่ออกจากหัวฉีดและห้องพ่นละอองที่ความดันต่างๆ

ALR	ความเร็วของอากาศที่ออกจากหัวฉีด (เมตรต่อวินาที)						
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์	4 บาร์	5 บาร์	6 บาร์	7 บาร์
1.5:0.5	0.00	182.66	730.62	1004.61	1369.92	2009.21	2191.87
3.0:0.5	270.15	363.01	464.31	523.41	607.83	675.37	776.67
3.0:1.0	753.45	1073.10	1210.09	1347.09	1461.25	1826.56	2100.54
3.0:1.5	753.45	1073.10	1210.09	1347.09	1461.25	1826.56	2100.54
ALR	ความเร็วของอากาศที่ออกจากห้องพ่นละอองที่ (เมตรต่อวินาที)						
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์	4 บาร์	5 บาร์	6 บาร์	7 บาร์
1.5:0.5	0±0.000 ^c	0.07±0.057 ^e	0.27±0.057 ^d	0.37±0.057 ^c	0.5±0.000 ^b	0.73±0.057 ^a	0.80±0.000 ^a
3.0:0.5	1.07±0.057 ^e	1.43±0.057 ^f	1.83±0.057 ^c	2.07±0.057 ^d	2.40±0.000 ^c	2.67±0.057 ^b	3.07±0.057 ^a
3.0:1.0	1.10±0.000 ^e	1.57±0.057 ^f	1.77±0.057 ^c	1.97±0.057 ^d	2.13±0.057 ^c	2.67±0.057 ^b	3.07±0.057 ^a
3.0:1.5	1.10±0.000 ^e	1.57±0.057 ^f	1.77±0.057 ^c	1.97±0.057 ^d	2.13±0.057 ^c	2.67±0.057 ^b	3.07±0.057 ^a
ALR	อัตราการไหลของอากาศที่ออกจากหัวฉีดและห้องพ่นละออง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)						
	1 บาร์	2 บาร์	3 บาร์	4 บาร์	5 บาร์	6 บาร์	7 บาร์
1.5:0.5	0.000000	0.000099	0.000395	0.000543	0.000740	0.001085	0.001184
3.0:0.5	0.001579	0.002121	0.002713	0.003059	0.003552	0.003947	0.004539
3.0:1.0	0.001628	0.002319	0.002615	0.002911	0.003157	0.003947	0.004539
3.0:1.5	0.001628	0.002319	0.002615	0.002911	0.003157	0.003947	0.004539

ค่าดังปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 3$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

2. อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์

ตารางที่ ข-2 อัตราการไหลของพอลิเอทิลีนแวกซ์ปริมาณ 150 กรัม เมื่อผ่านตะอองที่สภาวะต่างๆ

ALR	เวลา (วินาที)				อัตราการไหล (กรัมต่อวินาที)
	ความดัน (บาร์)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
3.0:1.5	1	63	62	62.5±0.707 ^a	2.409
	2	74	63	68.5±7.778 ^a	2.197
	3	74	56	65.0±12.727 ^a	2.324
	4	69	60	64.5±6.363 ^a	2.336
	5	68	61	64.5±4.949 ^a	2.331
	6	63	65	64.0±1.414 ^a	2.341
	7	66	63	64.5±2.121 ^a	2.315
3.0:1.0	1	360	600	480±3.234	0.313
3.0:0.5	1	450	1200	825±4.212	0.182

ค่าดังกล่าว คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 2$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

3. น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ในกระบอกตวงขนาด 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ ข-3 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ในกระบอกตวงสแตนเลสที่มีปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม

ALR	อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์+น้ำหนักกระบอกตวง (กรัม)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
3.0:1.5	120	1	96.1471	96.2645	96.2102	96.2073±0.05 ^a
		2	95.4690	95.3703	95.4506	95.4300±0.05 ^b
		3	95.0289	94.9938	95.0932	95.0386±0.05 ^c
		4	94.8975	94.8887	95.0021	94.0294±0.06 ^c
		5	94.5567	94.6873	94.4356	94.5599±0.12 ^d
		6	94.0034	94.1212	94.0423	94.0556±0.06 ^c
		7	93.1858	93.2837	93.2954	93.2550±0.06 ^f
	140	1	95.8854	95.8326	95.9098	95.8758±0.03 ^a
		2	92.5254	93.0084	92.5444	92.6927±0.27 ^b
		3	92.6756	92.8004	92.5642	92.6801±0.11 ^b
		4	92.5001	92.5454	92.5136	92.5197±0.02 ^b
		5	92.6534	92.7134	92.6667	92.6778±0.03 ^b
		6	91.6690	91.7001	91.6889	91.6860±0.01 ^d
		7	92.2122	92.1002	92.2054	92.1826±0.06 ^c
	160	1	94.1001	93.9889	94.0213	94.0368±0.05 ^a
		2	93.3635	93.3145	93.3332	93.3371±0.02 ^b
		3	92.9284	92.8989	92.9508	92.9260±0.02 ^c
		4	92.2003	92.1231	92.2323	92.1852±0.05 ^d
		5	91.6840	91.1589	91.2003	91.3477±0.29 ^f
		6	91.8787	91.5674	91.4353	91.6271±0.22 ^e
		7	91.4842	91.5120	91.4789	91.4917±0.01 ^e

ตารางที่ที่ ข-3 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ในกระบอกตวงสแตนเลสที่มีปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม (ต่อ)

ALR	อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ + น้ำหนักกระบอกตวง (กรัม)			
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
3.0:1.5	180	1	95.2131	95.1325	95.1321	95.1592±0.04 ^a
		2	94.6090	94.5487	94.5567	94.5715±0.03 ^b
		3	93.5898	93.6430	93.6210	93.6179±0.02 ^c
		4	92.8779	92.7502	92.8003	92.8095±0.06 ^c
		5	93.1643	93.2453	93.2665	93.2254±0.05 ^d
		6	92.6898	92.6985	92.7534	92.7139±0.03 ^c
		7	92.4295	92.4354	92.2356	92.3668±0.11 ^f
3.0:0.5	140	1	90.4004	90.3806	90.3821	90.3877±0.011 ^f
3.0:1.0	140	1	93.3209	93.3602	93.3412	93.3408±0.01 ^a
		4	91.5634	91.6163	91.6870	91.6222±0.006 ^c
		7	91.1112	91.1213	91.0998	91.1108±0.01 ^d
	180	1	93.0022	92.9895	92.8990	92.9636±0.05 ^b
		4	90.9304	90.9265	90.9198	90.9256±0.00 ^c
		7	90.0998	90.2049	90.1242	90.1430±0.05 ^g

ค่าตั้งปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 3$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

ตารางที่ ข-4 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟ่นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ในกระบอกดวงสเดนเลสที่มีปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม

อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์+น้ำหนักกระบอกดวง (กรัม)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
120	1	97.4535	97.6289	97.5123	97.5316±0.08 ^a
	4	95.5989	95.6067	95.6102	95.6053±0.00 ^c
	7	94.1521	94.0998	94.1323	94.1281±0.02 ^j
140	1	97.1670	97.1523	97.2002	97.1732±0.02 ^c
	4	95.4356	95.4319	95.4601	95.4425±0.01 ^g
	7	94.4998	94.5102	94.5200	94.5100±0.01 ⁱ
160	1	97.3987	97.4089	97.4106	97.4061±0.00 ^b
	4	95.1232	95.0990	95.1222	95.1148±0.01 ^h
	7	93.9534	93.9606	93.9611	93.9584±0.00 ^k
180	1	97.1021	97.0980	97.1110	97.1037±0.00 ^d
	4	95.5009	95.53243	95.4998	95.5110±0.01 ^f
	7	93.9800	94.0061	93.9600	93.9820±0.02 ^k

ค่าดังปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 3$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

ตารางที่ ข-5 น้ำหนักของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟ่นละองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ในกระบอกดวงสเดนเลสที่มีปริมาตรเท่ากับ 25.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร น้ำหนัก 84.978 กรัม

อุณหภูมิของพอลิเอทิลีนแวกซ์ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)	น้ำหนักผงพอลิเอทิลีนแวกซ์+น้ำหนักกระบอกดวง (กรัม)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	น้ำหนักเฉลี่ย
120	1	97.8430	97.8233	97.7867	97.8177±0.02 ^c
	4	94.8464	94.8745	94.7889	94.8366±0.04 ^g
	7	92.0231	92.1005	91.9998	92.0411±0.05 ⁱ
140	1	97.9085	97.8997	97.8609	97.8897±0.02 ^b
	4	94.1039	94.0993	94.1310	94.1114±0.01 ^h
	7	92.5539	92.5465	92.6102	92.5702±0.03 ^k
160	1	98.0919	98.1212	98.1233	98.1121±0.01 ^a
	4	95.9071	95.9102	96.0001	95.9391±0.05 ^c
	7	92.9935	92.9888	92.9976	92.9933±0.00 ^j
180	1	97.7208	97.7213	97.6990	97.7137±0.01 ^d
	4	95.4895	95.4666	95.5101	95.4887±0.02 ^f
	7	93.275	93.3010	93.2450	93.2737±0.02 ⁱ

ค่าดังปรากฏ คือ ค่าเฉลี่ย ($n = 3$) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

อักษรยกที่เหมือนกันในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตามวิธี One-Way ANOVA และ Duncan's Multiple Range Test ที่ความเชื่อมั่น $P < 0.05$

4. ค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ (Porosity, ϵ)

$$\text{ค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์คำนวณจาก } \epsilon = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_P}$$

โดย ϵ = ค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์
 ρ_B = ค่า Bulk density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์
 ρ_P = ค่า True density ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

ตารางที่ ข-6 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ฟลักของที่ ฟลักของด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ พอลิ เอทิลีน แวกซ์ (°C)	ความ ดัน (bar)	M_0 (g)	M (g)	M_{Is} (g)	M_1 (g)	ρ_1 (g/cm ³)	ρ_p (g/cm ³)	ρ_B (g/cm ³)	ϵ
120	1	20.3189	21.4455	41.1522	41.0916	0.8309	0.8781	0.4474	0.4905
	2	20.3103	21.6943	41.1936	41.0841	0.8310	0.9023	0.4164	0.5385
	3	20.3171	21.6514	41.1752	41.0746	0.8303	0.8980	0.4008	0.5537
	4	20.3157	21.4111	41.1385	41.0656	0.8300	0.8892	0.3606	0.5944
	5	20.3148	21.4168	41.1560	41.0646	0.8300	0.9051	0.3817	0.5782
	6	20.3155	21.2538	41.1306	41.0575	0.8297	0.8998	0.3617	0.5981
	7	20.3131	21.2998	41.1271	41.0576	0.8298	0.8927	0.3298	0.6306
140	1	20.6960	21.6588	41.1022	41.0087	0.8125	0.8999	0.4342	0.5235
	2	20.3396	21.1305	41.0528	40.9782	0.8255	0.9115	0.3074	0.6386
	3	20.3169	20.9829	41.0292	40.9804	0.8265	0.8919	0.3069	0.6686
	4	20.3192	20.9790	41.0183	40.9688	0.8260	0.8930	0.3005	0.6639
	5	20.3210	20.9658	41.0185	40.9630	0.8257	0.9034	0.3068	0.6646
	6	20.2833	21.2137	41.2228	41.1242	0.8336	0.9325	0.2673	0.7000
	7	20.3110	21.2654	41.1957	41.1066	0.8318	0.9175	0.2870	0.6809

ตารางที่ ข-6 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดที่อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่สภาวะต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ พอลิเอทิลีนแวกซ์ (°C)	ความ ดัน (bar)	M_0 (g)	M (g)	M_{is} (g)	M_1 (g)	ρ_1 (g/cm ³)	ρ_p (g/cm ³)	ρ_B (g/cm ³)	ϵ
160	1	20.3180	21.5280	41.0280	40.9120	0.8238	0.9111	0.3609	0.5989
	2	20.3100	21.0950	40.9480	40.9240	0.8246	0.8506	0.3330	0.6346
	3	20.3180	21.0900	40.9760	40.8900	0.8229	0.9260	0.3167	0.6450
	4	20.3180	21.1390	40.9600	40.8950	0.8231	0.8938	0.2871	0.6784
	5	20.3150	21.1110	40.9630	40.8830	0.8227	0.9146	0.2538	0.7191
	6	20.3180	21.1060	40.9790	40.9200	0.8241	0.8908	0.2649	0.7159
	7	20.3140	21.2500	40.9850	40.9060	0.8237	0.8996	0.2595	0.7171
180	1	20.5900	22.1650	40.9410	40.8200	0.8092	0.8765	0.4056	0.5372
	2	20.3070	21.4790	41.0180	40.9140	0.8243	0.9045	0.3822	0.5775
	3	20.3100	21.3800	41.0580	40.9360	0.8250	0.9312	0.3442	0.6304
	4	20.3100	21.7300	40.9790	40.9200	0.8244	0.8601	0.3120	0.6373
	5	20.3100	21.0000	40.9180	40.8910	0.8232	0.8568	0.3286	0.6165
	6	20.5850	21.1900	40.9360	40.8410	0.8102	0.9612	0.3082	0.6793
	7	20.3400	21.0240	40.8930	40.8200	0.8192	0.9171	0.2944	0.6790

ตารางที่ ข-7 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วย อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 และ 3.0: 1.0 ที่ความดันและ อุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5									
อุณหภูมิ พอลิเอทิลีน แวกซ์ (°C)	ความ ดัน (bar)	M ₀ (g)	M (g)	M _{Is} (g)	M ₁ (g)	ρ ₁ (g/cm ³)	ρ _p (g/cm ³)	ρ _B (g/cm ³)	ε
140	1	20.3125	20.8718	41.0184	40.9903	0.8271	0.8709	0.2155	0.7525
อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0									
อุณหภูมิ พอลิเอทิลีน แวกซ์ (°C)	ความ ดัน (bar)	M ₀ (g)	M (g)	M _{Is} (g)	M ₁ (g)	ρ ₁ (g/cm ³)	ρ _p (g/cm ³)	ρ _B (g/cm ³)	ε
140	1	20.3096	21.2817	41.0497	40.9752	0.8266	0.8952	0.3332	0.6278
	4	20.3193	20.8054	41.0179	40.9636	0.8258	0.9296	0.2647	0.7152
	7	20.3065	20.8139	40.9964	40.9348	0.8251	0.9391	0.2443	0.7398
180	1	20.3108	21.3382	41.0515	40.9584	0.8259	0.9082	0.3182	0.6497
	4	20.3082	21.0046	41.0003	40.9490	0.8256	0.8913	0.2370	0.7341
	7	20.3120	21.0010	41.0186	40.9568	0.8258	0.9072	0.2058	0.7732

ตารางที่ ข-8 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่พื้นละอองด้วย อัตราส่วนระหว่างรูเปิดต่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ พอลิเอทิลีนแวกซ์ (°C)	ความ ดัน (bar)	M_0 (g)	M (g)	M_{is} (g)	M_1 (g)	ρ_1 (g/cm ³)	ρ_p (g/cm ³)	ρ_B (g/cm ³)	ϵ
120	1	20.5928	21.5790	41.1376	41.0375	0.8178	0.9102	0.5001	0.4505
	4	20.6289	21.5740	41.1173	41.0319	0.8161	0.8972	0.4234	0.5281
	7	20.6360	21.4670	41.1214	41.0290	0.8157	0.9178	0.3645	0.6028
140	1	20.6328	21.7651	41.1169	41.0252	0.8157	0.8876	0.4859	0.4526
	4	20.6213	21.4363	41.1008	41.0157	0.8158	0.9109	0.4169	0.5423
	7	20.6276	21.4838	41.0763	41.0136	0.8154	0.8799	0.3798	0.5684
160	1	20.6664	21.7107	41.1257	41.0175	0.8140	0.9081	0.4951	0.4548
	4	20.6334	21.4071	41.0656	41.0087	0.8150	0.8797	0.4039	0.5409
	7	20.6325	21.3820	41.0957	41.0085	0.8150	0.9224	0.3578	0.6121
180	1	20.6449	21.5558	41.0864	41.0155	0.8148	0.8836	0.4831	0.4533
	4	20.6241	21.6077	41.0986	41.0256	0.8161	0.8815	0.4196	0.5239
	7	20.6247	21.4208	41.0814	41.0114	0.8155	0.8941	0.3587	0.5988

ตารางที่ ข-9 ความหนาแน่นจริงและค่าความพรุนของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่พื้นละอองด้วยอัตราส่วนระหว่างรูเปิดที่อากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 5 ที่ความดันและอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ พอลิเอทิลีนแวกซ์ (°C)	ความ ดัน (bar)	M ₀ (g)	M (g)	M _{is} (g)	M ₁ (g)	ρ ₁ (g/cm ³)	ρ _p (g/cm ³)	ρ _B (g/cm ³)	ε
120	1	20.6523	21.6888	41.0603	41.0047	0.8141	0.8602	0.5115	0.4054
	4	20.6287	21.6901	41.0743	41.0122	0.8153	0.8660	0.3928	0.5465
	7	20.6282	21.1271	41.0550	41.0100	0.8153	0.8961	0.2814	0.6398
140	1	20.6282	22.1251	41.1479	41.0009	0.8149	0.9036	0.5144	0.4307
	4	20.6353	21.4888	41.0580	41.0055	0.8148	0.8682	0.3639	0.5809
	7	20.6460	21.4073	41.0526	41.0043	0.8143	0.8695	0.3025	0.6521
160	1	20.6362	21.6633	41.0855	40.9933	0.8143	0.8946	0.5233	0.4151
	4	20.6390	21.8940	41.0814	41.0024	0.8145	0.8693	0.4367	0.4976
	7	20.6364	21.1894	41.0540	41.0083	0.8149	0.8883	0.3193	0.6405
180	1	20.6287	22.0090	41.1306	40.9977	0.8148	0.9016	0.5074	0.4372
	4	20.6282	21.8468	41.0969	40.9920	0.8146	0.8913	0.4188	0.5302
	7	20.6303	21.6289	41.1073	41.0049	0.8150	0.9081	0.3305	0.6360

5. ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์

ตั้งแต่ตารางที่ ข-10 ถึง ข-24 เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Laser diffraction โดยใช้เครื่อง Mastersizer2000 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดออกมาในรูปของ $d(0.1)$ $d(0.5)$ และ $d(0.9)$

โดย ขนาดอนุภาคที่ $d(0.1)$ หมายถึงค่ากลางของขนาดของอนุภาคที่ร้อยละ 10 ของตัวอย่าง
 ขนาดอนุภาคที่ $d(0.5)$ หมายถึงค่ากลางของขนาดของอนุภาคที่ร้อยละ 50 ของตัวอย่าง
 (Volume median diameter)
 ขนาดอนุภาคที่ $d(0.9)$ หมายถึงค่ากลางของขนาดของอนุภาคที่ร้อยละ 90 ของตัวอย่าง

Yield หมายถึง เปอร์เซ็นต์ผลได้ของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอน

โดย คำนวณจาก

$$\text{Yield} = \frac{\text{ปริมาณผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมครอนที่ผลิตได้}}{\text{ปริมาณพอลิเอทิลีนแวกซ์ที่ป้อนเข้าเครื่องฟั่นละออง}}$$

ตารางที่ ข-10 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
47.067		137.220		278.480		67.27 \pm 0.53 ^d		39.983		106.715		231.614		77.96 \pm 0.84 ^c		33.903		92.929		216.510		79.15 \pm 1.05 ^c	
1 bar						2 bar						3 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.39	120.226	7.65	1.905	0.00	15.136	0.48	120.226	7.97	1.905	0.00	15.136	0.63	120.226	7.15	1.905	0.00	15.136	0.63	120.226	7.15
2.188	0.00	17.378	0.50	138.038	8.15	2.188	0.00	17.378	0.62	138.038	7.68	2.188	0.00	17.378	0.87	138.038	6.65	2.188	0.00	17.378	0.87	138.038	6.65
2.512	0.00	19.953	0.64	158.489	8.39	2.512	0.00	19.953	0.80	158.489	7.12	2.512	0.00	19.953	1.17	158.489	5.97	2.512	0.00	19.953	1.17	158.489	5.97
2.884	0.00	22.909	0.82	181.970	8.26	2.884	0.00	22.909	1.06	181.970	6.30	2.884	0.00	22.909	1.57	181.970	5.13	2.884	0.00	22.909	1.57	181.970	5.13
3.311	0.00	26.303	1.05	208.930	7.71	3.311	0.00	26.303	1.40	208.930	5.27	3.311	0.00	26.303	2.06	208.930	4.20	3.311	0.00	26.303	2.06	208.930	4.20
3.802	0.00	30.200	1.34	239.883	6.67	3.802	0.00	30.200	1.85	239.883	4.09	3.802	0.00	30.200	2.65	239.883	3.19	3.802	0.00	30.200	2.65	239.883	3.19
4.365	0.00	34.674	1.70	275.422	5.22	4.365	0.00	34.674	2.43	275.422	2.81	4.365	0.00	34.674	3.34	275.422	2.17	4.365	0.00	34.674	3.34	275.422	2.17
5.012	0.00	39.811	2.14	316.228	3.45	5.012	0.00	39.811	3.13	316.228	1.71	5.012	0.01	39.811	4.09	316.228	1.12	5.012	0.01	39.811	4.09	316.228	1.12
5.754	0.00	45.700	2.66	363.078	1.65	5.754	0.01	45.700	3.94	363.078	0.16	5.754	0.07	45.700	4.87	363.078	0.43	5.754	0.07	45.700	4.87	363.078	0.43
6.607	0.04	52.481	3.26	416.869	0.16	6.607	0.08	52.481	4.81	416.869	0.00	6.607	0.09	52.481	5.64	416.869	0.06	6.607	0.09	52.481	5.64	416.869	0.06
7.586	0.08	60.256	3.94	478.630	0.00	7.586	0.12	60.256	5.69	478.630	0.00	7.586	0.13	60.256	6.34	478.630	0.00	7.586	0.13	60.256	6.34	478.630	0.00
8.710	0.12	69.183	4.67	549.541	0.00	8.710	0.17	69.183	6.51	549.541	0.00	8.710	0.17	69.183	6.92	549.541	0.00	8.710	0.17	69.183	6.92	549.541	0.00
10.000	0.17	79.433	5.45	630.957	0.00	10.000	0.22	79.433	7.21	630.957	0.00	10.000	0.24	79.433	7.32	630.957	0.00	10.000	0.24	79.433	7.32	630.957	0.00
11.482	0.22	91.201	6.23	724.436	0.00	11.482	0.29	91.201	7.71	724.436	0.00	11.482	0.34	91.201	7.50	724.436	0.00	11.482	0.34	91.201	7.50	724.436	0.00
13.183	0.30	104.713	6.99	831.764	0.00	13.183	0.38	104.713	7.98	831.764	0.00	13.183	0.46	104.713	7.44	831.764	0.00	13.183	0.46	104.713	7.44	831.764	0.00

ตารางที่ ข-10 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %						
31.311	79.344	174.946	86.16 \pm 0.86 ^b	29.159	66.496	141.826	88.06 \pm 0.68 ^a	26.084	67.450	138.690	89.38 \pm 0.36 ^a						
4 bar						5 bar						6 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.70	120.226	6.79	1.905	0.00	15.136	0.75	120.226	5.12	1.905	0.00	15.136	1.11	120.226	6.20
2.188	0.00	17.378	0.97	138.038	5.86	2.188	0.00	17.378	1.13	138.038	3.80	2.188	0.00	17.378	1.53	138.038	4.82
2.512	0.00	19.953	1.33	158.489	4.84	2.512	0.00	19.953	1.67	158.489	2.64	2.512	0.00	19.953	2.04	158.489	3.28
2.884	0.00	22.909	1.82	181.970	3.77	2.884	0.01	22.909	2.39	181.970	1.70	2.884	0.02	22.909	2.67	181.970	1.69
3.311	0.00	26.303	2.44	208.930	2.72	3.311	0.02	26.303	3.29	208.930	1.05	3.311	0.03	26.303	3.41	208.930	0.40
3.802	0.00	30.200	3.20	239.883	1.65	3.802	0.04	30.200	4.35	239.883	0.64	3.802	0.05	30.200	4.23	239.883	0.00
4.365	0.02	34.674	4.08	275.422	0.57	4.365	0.05	34.674	5.51	275.422	0.42	4.365	0.08	34.674	5.12	275.422	0.00
5.012	0.08	39.811	5.04	316.228	0.02	5.012	0.07	39.811	6.67	316.228	0.29	5.012	0.09	39.811	6.01	316.228	0.00
5.754	0.10	45.700	6.00	363.078	0.00	5.754	0.08	45.700	7.70	363.078	0.22	5.754	0.12	45.700	6.86	363.078	0.00
6.607	0.14	52.481	6.88	416.869	0.00	6.607	0.10	52.481	8.49	416.869	0.07	6.607	0.15	52.481	7.58	416.869	0.00
7.586	0.18	60.256	7.58	478.630	0.00	7.586	0.13	60.256	8.92	478.630	0.01	7.586	0.21	60.256	8.13	478.630	0.00
8.710	0.24	69.183	8.04	549.541	0.00	8.710	0.17	69.183	8.93	549.541	0.00	8.710	0.29	69.183	8.41	549.541	0.00
10.000	0.30	79.433	8.19	630.957	0.00	10.000	0.23	79.433	8.47	630.957	0.00	10.000	0.41	79.433	8.39	630.957	0.00
11.482	0.39	91.201	8.01	724.436	0.00	11.482	0.33	91.201	7.61	724.436	0.00	11.482	0.57	91.201	8.02	724.436	0.00
13.183	0.52	104.713	7.53	831.764	0.00	13.183	0.49	104.713	6.44	831.764	0.00	13.183	0.80	104.713	7.28	831.764	0.00

ตารางที่ ข-10 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %		
25.101	66.566	153.836	88.34 \pm 0.89 ^a		
7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	1.18	120.226	5.60
2.188	0.00	17.378	1.61	138.038	4.71
2.512	0.00	19.953	2.16	158.489	3.76
2.884	0.03	22.909	2.83	181.970	2.76
3.311	0.05	26.303	3.59	208.930	1.76
3.802	0.08	30.200	4.43	239.883	0.76
4.365	0.12	34.674	5.28	275.422	0.02
5.012	0.13	39.811	6.09	316.228	0.00
5.754	0.16	45.700	6.79	363.078	0.00
6.607	0.20	52.481	7.31	416.869	0.00
7.586	0.25	60.256	7.61	478.630	0.00
8.710	0.33	69.183	7.66	549.541	0.00
10.000	0.45	79.433	7.45	630.957	0.00
11.482	0.61	91.201	7.01	724.436	0.00
13.183	0.85	104.713	6.37	831.764	0.00

ตารางที่ ข-11 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
42.302		112.310		232.772		76.33±0.77 ^b		20.298		45.957		91.445		89.27±1.00 ^a		24.32		56.262		117.299		89.99±0.01 ^a	
1 bar						2 bar						3 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.40	120.226	8.39	1.905	0.00	15.136	2.03	120.226	1.78	1.905	0.00	15.136	1.26	120.226	4.01	1.905	0.00	15.136	0.40	120.226	8.39
2.188	0.00	17.378	0.53	138.038	8.26	2.188	0.03	17.378	2.90	138.038	0.39	2.188	0.00	17.378	1.85	138.038	2.79	2.188	0.00	17.378	0.53	138.038	8.26
2.512	0.00	19.953	0.72	158.489	7.77	2.512	0.10	19.953	3.92	158.489	0.00	2.512	0.01	19.953	2.61	158.489	1.72	2.512	0.01	19.953	0.72	158.489	7.77
2.884	0.00	22.909	0.97	181.970	6.90	2.884	0.13	22.909	5.08	181.970	0.00	2.884	0.05	22.909	3.54	181.970	0.64	2.884	0.05	22.909	0.97	181.970	6.90
3.311	0.00	26.303	1.29	208.930	5.74	3.311	0.16	26.303	6.28	208.930	0.00	3.311	0.07	26.303	4.60	208.930	0.00	3.311	0.07	26.303	1.29	208.930	5.74
3.802	0.00	30.200	1.71	239.883	4.35	3.802	0.17	30.200	7.41	239.883	0.00	3.802	0.09	30.200	5.73	239.883	0.00	3.802	0.09	30.200	1.71	239.883	4.35
4.365	0.00	34.674	2.24	275.422	2.90	4.365	0.17	34.674	8.36	275.422	0.00	4.365	0.10	34.674	6.83	275.422	0.00	4.365	0.10	34.674	2.24	275.422	2.90
5.012	0.00	39.811	2.87	316.228	1.50	5.012	0.16	39.811	9.01	316.228	0.00	5.012	0.11	39.811	7.79	316.228	0.00	5.012	0.11	39.811	2.87	316.228	1.50
5.754	0.00	45.700	3.60	363.078	0.12	5.754	0.16	45.700	9.26	363.078	0.00	5.754	0.12	45.700	8.49	363.078	0.00	5.754	0.12	45.700	3.60	363.078	0.12
6.607	0.05	52.481	4.42	416.869	0.00	6.607	0.18	52.481	9.06	416.869	0.00	6.607	0.15	52.481	8.85	416.869	0.00	6.607	0.15	52.481	4.42	416.869	0.00
7.586	0.09	60.256	5.29	478.630	0.00	7.586	0.23	60.256	8.42	478.630	0.00	7.586	0.18	60.256	8.81	478.630	0.00	7.586	0.18	60.256	5.29	478.630	0.00
8.710	0.13	69.183	6.18	549.541	0.00	8.710	0.35	69.183	7.40	549.541	0.00	8.710	0.25	69.183	8.36	549.541	0.00	8.710	0.25	69.183	6.18	549.541	0.00
10.000	0.17	79.433	7.01	630.957	0.00	10.000	0.55	79.433	6.11	630.957	0.00	10.000	0.36	79.433	7.54	630.957	0.00	10.000	0.36	79.433	7.01	630.957	0.00
11.482	0.23	91.201	7.70	724.436	0.00	11.482	0.88	91.201	4.70	724.436	0.00	11.482	0.55	91.201	6.47	724.436	0.00	11.482	0.55	91.201	7.70	724.436	0.00
13.183	0.30	104.713	8.19	831.764	0.00	13.183	1.37	104.713	3.23	831.764	0.00	13.183	0.84	104.713	5.25	831.764	0.00	13.183	0.84	104.713	8.19	831.764	0.00

ตารางที่ ข-11 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
21.968		52.431		109.662		89.49±0.72 ^a		21.573		56.634		128.622		89.67±0.46 ^a		19.421		46.369		94.962		88.60±1.64 ^a	
4 bar						5 bar						6 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	1.68	120.226	3.43	1.905	0.00	15.136	1.76	120.226	3.57	1.905	0.00	15.136	2.17	120.226	2.24	1.905	0.00	15.136	1.68	120.226	3.43
2.188	0.00	17.378	2.34	138.038	2.26	2.188	0.00	17.378	2.28	138.038	3.36	2.188	0.03	17.378	2.96	138.038	0.82	2.188	0.00	17.378	2.34	138.038	2.26
2.512	0.01	19.953	3.14	158.489	1.15	2.512	0.00	19.953	2.90	158.489	1.40	2.512	0.08	19.953	3.89	158.489	0.12	2.512	0.00	19.953	3.14	158.489	1.15
2.884	0.05	22.909	4.08	181.970	0.21	2.884	0.01	22.909	3.62	181.970	0.74	2.884	0.11	22.909	4.94	181.970	0.00	2.884	0.01	22.909	4.08	181.970	0.21
3.311	0.07	26.303	5.10	208.930	0.00	3.311	0.02	26.303	4.42	208.930	0.39	3.311	0.14	26.303	6.02	208.930	0.00	3.311	0.02	26.303	5.10	208.930	0.00
3.802	0.08	30.200	6.16	239.883	0.00	3.802	0.03	30.200	5.29	239.883	0.27	3.802	0.15	30.200	7.06	239.883	0.00	3.802	0.03	30.200	6.16	239.883	0.00
4.365	0.09	34.674	7.15	275.422	0.00	4.365	0.06	34.674	6.17	275.422	0.32	4.365	0.17	34.674	7.95	275.422	0.00	4.365	0.06	34.674	7.15	275.422	0.00
5.012	0.11	39.811	7.98	316.228	0.00	5.012	0.09	39.811	7.01	316.228	0.47	5.012	0.18	39.811	8.58	316.228	0.00	5.012	0.09	39.811	7.98	316.228	0.00
5.754	0.14	45.700	8.55	363.078	0.00	5.754	0.14	45.700	7.69	363.078	0.65	5.754	0.21	45.700	8.87	363.078	0.00	5.754	0.14	45.700	8.55	363.078	0.00
6.607	0.18	52.481	8.76	416.869	0.00	6.607	0.22	52.481	8.13	416.869	0.72	6.607	0.26	52.481	8.75	416.869	0.00	6.607	0.22	52.481	8.76	416.869	0.00
7.586	0.25	60.256	8.56	478.630	0.00	7.586	0.33	60.256	8.23	478.630	0.67	7.586	0.35	60.256	8.23	478.630	0.00	7.586	0.33	60.256	8.56	478.630	0.00
8.710	0.37	69.183	7.98	549.541	0.00	8.710	0.49	69.183	7.92	549.541	0.29	8.710	0.50	69.183	7.34	549.541	0.00	8.710	0.49	69.183	7.98	549.541	0.00
10.000	0.54	79.433	7.05	630.957	0.00	10.000	0.70	79.433	7.21	630.957	0.07	10.000	0.73	79.433	6.16	630.957	0.00	10.000	0.70	79.433	7.05	630.957	0.00
11.482	0.81	91.201	5.90	724.436	0.00	11.482	0.98	91.201	6.16	724.436	0.00	11.482	1.07	91.201	4.87	724.436	0.00	11.482	0.98	91.201	5.90	724.436	0.00
13.183	1.18	104.713	4.65	831.764	0.00	13.183	1.33	104.713	4.89	831.764	0.00	13.183	1.55	104.713	3.51	831.764	0.00	13.183	1.33	104.713	4.65	831.764	0.00

ตารางที่ ข-11 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %		
22.309	52.797	108.677	90.00 \pm 0.00 ^a		
7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	1.60	120.226	3.37
2.188	0.00	17.378	2.23	138.038	2.08
2.512	0.03	19.953	3.02	158.489	0.98
2.884	0.07	22.909	3.96	181.970	0.29
3.311	0.08	26.303	5.01	208.930	0.00
3.802	0.09	30.200	6.11	239.883	0.00
4.365	0.10	34.674	7.16	275.422	0.00
5.012	0.11	39.811	8.05	316.228	0.00
5.754	0.13	45.700	8.68	363.078	0.00
6.607	0.17	52.481	8.93	416.869	0.00
7.586	0.24	60.256	8.75	478.630	0.00
8.710	0.35	69.183	8.15	549.541	0.00
10.000	0.52	79.433	7.19	630.957	0.00
11.482	0.77	91.201	5.99	724.436	0.00
13.183	1.12	104.713	4.66	831.764	0.00

ตารางที่ ข-12 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
24.284		64.373		149.265		87.27 \pm 1.02 ^a		23.006		55.703		119.891		89.03 \pm 1.13 ^a		21.543		52.421		120.645		87.31 \pm 0.47 ^a	
1 bar						2 bar						3 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	1.36	120.226	5.34	1.905	0.00	15.136	1.51	120.226	4.11	1.905	0.00	15.136	1.73	120.226	3.05	1.905	0.00	15.136	1.73	120.226	3.05
2.188	0.00	17.378	1.84	138.038	4.42	2.188	0.00	17.378	2.11	138.038	2.95	2.188	0.00	17.378	2.42	138.038	1.99	2.188	0.00	17.378	2.42	138.038	1.99
2.512	0.00	19.953	2.42	158.489	3.48	2.512	0.02	19.953	2.86	158.489	1.84	2.512	0.06	19.953	3.24	158.489	1.14	2.512	0.06	19.953	3.24	158.489	1.14
2.884	0.02	22.909	3.10	181.970	2.52	2.884	0.06	22.909	3.73	181.970	0.81	2.884	0.10	22.909	4.19	181.970	0.55	2.884	0.10	22.909	4.19	181.970	0.55
3.311	0.03	26.303	3.86	208.930	1.57	3.311	0.07	26.303	4.70	208.930	0.20	3.311	0.12	26.303	5.19	208.930	0.25	3.311	0.12	26.303	5.19	208.930	0.25
3.802	0.05	30.200	4.66	239.883	0.61	3.802	0.08	30.200	5.71	239.883	0.00	3.802	0.13	30.200	6.17	239.883	0.18	3.802	0.13	30.200	6.17	239.883	0.18
4.365	0.07	34.674	5.47	275.422	0.01	4.365	0.09	34.674	6.68	275.422	0.00	4.365	0.13	34.674	7.06	275.422	0.29	4.365	0.13	34.674	7.06	275.422	0.29
5.012	0.08	39.811	6.23	316.228	0.00	5.012	0.10	39.811	7.52	316.228	0.00	5.012	0.14	39.811	7.75	316.228	0.49	5.012	0.14	39.811	7.75	316.228	0.49
5.754	0.10	45.700	6.89	363.078	0.00	5.754	0.11	45.700	8.13	363.078	0.00	5.754	0.16	45.700	8.17	363.078	0.66	5.754	0.16	45.700	8.17	363.078	0.66
6.607	0.14	52.481	7.37	416.869	0.00	6.607	0.15	52.481	8.44	416.869	0.00	6.607	0.18	52.481	8.26	416.869	0.70	6.607	0.18	52.481	8.26	416.869	0.70
7.586	0.21	60.256	7.63	478.630	0.00	7.586	0.21	60.256	8.39	478.630	0.00	7.586	0.24	60.256	8.00	478.630	0.62	7.586	0.24	60.256	8.00	478.630	0.62
8.710	0.31	69.183	7.63	549.541	0.00	8.710	0.31	69.183	7.99	549.541	0.00	8.710	0.35	69.183	7.40	549.541	0.17	8.710	0.35	69.183	7.40	549.541	0.17
10.000	0.47	79.433	7.37	630.957	0.00	10.000	0.47	79.433	7.29	630.957	0.00	10.000	0.53	79.433	6.52	630.957	0.00	10.000	0.53	79.433	6.52	630.957	0.00
11.482	0.68	91.201	6.87	724.436	0.00	11.482	0.71	91.201	6.35	724.436	0.00	11.482	0.81	91.201	5.43	724.436	0.00	11.482	0.81	91.201	5.43	724.436	0.00
13.183	0.98	104.713	6.17	831.764	0.00	13.183	1.05	104.713	5.26	831.764	0.00	13.183	1.20	104.713	4.23	831.764	0.00	13.183	1.20	104.713	4.23	831.764	0.00

ตารางที่ ข-12 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
18.040		39.145		78.385		87.45 \pm 0.98 ^a		16.323		34.682		67.399		90.00 \pm 0.00 ^a		24.384		65.477		155.295		87.89 \pm 0.63 ^a	
4 bar						5 bar						6 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.92	120.226	4.57	1.905	0.00	15.136	1.65	120.226	4.10	1.905	0.00	15.136	1.71	120.226	7.93	1.905	0.00	15.136	1.71	120.226	7.93
2.188	0.00	17.378	1.39	138.038	3.04	2.188	0.00	17.378	2.22	138.038	3.05	2.188	0.00	17.378	1.98	138.038	7.60	2.188	0.00	17.378	1.98	138.038	7.60
2.512	0.02	19.953	2.04	158.489	1.71	2.512	0.02	19.953	2.90	158.489	2.13	2.512	0.00	19.953	2.20	158.489	6.83	2.512	0.00	19.953	2.20	158.489	6.83
2.884	0.05	22.909	2.88	181.970	0.78	2.884	0.06	22.909	3.68	181.970	1.39	2.884	0.00	22.909	2.37	181.970	5.65	2.884	0.00	22.909	2.37	181.970	5.65
3.311	0.06	26.303	3.90	208.930	0.10	3.311	0.08	26.303	4.53	208.930	0.86	3.311	0.00	26.303	2.51	208.930	4.19	3.311	0.00	26.303	2.51	208.930	4.19
3.802	0.09	30.200	5.06	239.883	0.00	3.802	0.09	30.200	5.41	239.883	0.52	3.802	0.00	30.200	2.65	239.883	2.58	3.802	0.00	30.200	2.65	239.883	2.58
4.365	0.13	34.674	6.27	275.422	0.00	4.365	0.10	34.674	6.25	275.422	0.34	4.365	0.00	34.674	2.84	275.422	0.94	4.365	0.00	34.674	2.84	275.422	0.94
5.012	0.15	39.811	7.42	316.228	0.00	5.012	0.12	39.811	6.99	316.228	0.23	5.012	0.00	39.811	3.13	316.228	0.03	5.012	0.00	39.811	3.13	316.228	0.03
5.754	0.17	45.700	8.38	363.078	0.00	5.754	0.15	45.700	7.56	363.078	0.16	5.754	0.08	45.700	3.58	363.078	0.00	5.754	0.08	45.700	3.58	363.078	0.00
6.607	0.19	52.481	9.03	416.869	0.00	6.607	0.20	52.481	7.89	416.869	0.04	6.607	0.22	52.481	4.18	416.869	0.00	6.607	0.22	52.481	4.18	416.869	0.00
7.586	0.21	60.256	9.27	478.630	0.00	7.586	0.28	60.256	7.91	478.630	0.00	7.586	0.37	60.256	4.94	478.630	0.00	7.586	0.37	60.256	4.94	478.630	0.00
8.710	0.24	69.183	9.04	549.541	0.00	8.710	0.40	69.183	7.63	549.541	0.00	8.710	0.57	69.183	5.78	549.541	0.00	8.710	0.57	69.183	5.78	549.541	0.00
10.000	0.30	79.433	8.35	630.957	0.00	10.000	0.59	79.433	7.03	630.957	0.00	10.000	0.83	79.433	6.62	630.957	0.00	10.000	0.83	79.433	6.62	630.957	0.00
11.482	0.41	91.201	7.29	724.436	0.00	11.482	0.84	91.201	6.20	724.436	0.00	11.482	1.11	91.201	7.34	724.436	0.00	11.482	1.11	91.201	7.34	724.436	0.00
13.183	0.61	104.713	5.97	831.764	0.00	13.183	1.19	104.713	5.18	831.764	0.00	13.183	1.42	104.713	7.82	831.764	0.00	13.183	1.42	104.713	7.82	831.764	0.00

ตารางที่ ข-12 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศ และท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %		
27.307	68.442	155.176	86.69 \pm 0.02 ^a		
7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	1.78	120.226	4.44
2.188	0.00	17.378	2.30	138.038	3.43
2.512	0.02	19.953	2.91	158.489	2.51
2.884	0.06	22.909	3.60	181.970	1.71
3.311	0.08	26.303	4.35	208.930	0.99
3.802	0.09	30.200	5.12	239.883	0.37
4.365	0.11	34.674	5.88	275.422	0.25
5.012	0.15	39.811	6.57	316.228	0.19
5.754	0.20	45.700	7.13	363.078	0.11
6.607	0.27	52.481	7.50	416.869	0.03
7.586	0.38	60.256	7.61	478.630	0.00
8.710	0.53	69.183	7.45	549.541	0.00
10.000	0.74	79.433	7.01	630.957	0.00
11.482	1.01	91.201	6.32	724.436	0.00
13.183	1.36	104.713	5.42	831.764	0.00

ตารางที่ ข-13 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
30.879		78.117		188.11		82.80 \pm 0.79 ^d		29.396		77.957		149.813		88.92 \pm 0.84 ^{abc}		24.633		59.319		122.144		89.77 \pm 0.32 ^a	
1 bar						2 bar						3 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.73	120.226	6.16	1.905	0.00	15.136	0.92	120.226	7.82	1.905	0.00	15.136	1.20	120.226	4.58	1.905	0.00	15.136	0.73	120.226	6.16
2.188	0.00	17.378	1.02	138.038	5.29	2.188	0.00	17.378	1.18	138.038	6.35	2.188	0.00	17.378	1.70	138.038	3.27	2.188	0.00	17.378	1.02	138.038	5.29
2.512	0.00	19.953	1.41	158.489	4.40	2.512	0.00	19.953	1.50	158.489	4.55	2.512	0.00	19.953	2.35	158.489	2.03	2.512	0.00	19.953	1.41	158.489	4.40
2.884	0.00	22.909	1.93	181.970	3.53	2.884	0.00	22.909	1.91	181.970	2.50	2.884	0.02	22.909	3.16	181.970	0.72	2.884	0.00	22.909	1.93	181.970	3.53
3.311	0.00	26.303	2.59	208.930	2.74	3.311	0.00	26.303	2.43	208.930	0.57	3.311	0.07	26.303	4.11	208.930	0.00	3.311	0.00	26.303	2.59	208.930	2.74
3.802	0.00	30.200	3.38	239.883	2.02	3.802	0.00	30.200	3.08	239.883	0.00	3.802	0.10	30.200	5.15	239.883	0.00	3.802	0.00	30.200	3.38	239.883	2.02
4.365	0.03	34.674	4.29	275.422	1.40	4.365	0.01	34.674	3.86	275.422	0.00	4.365	0.11	34.674	6.22	275.422	0.00	4.365	0.03	34.674	4.29	275.422	1.40
5.012	0.06	39.811	5.24	316.228	0.84	5.012	0.06	39.811	4.78	316.228	0.00	5.012	0.14	39.811	7.23	316.228	0.00	5.012	0.06	39.811	5.24	316.228	0.84
5.754	0.08	45.700	6.17	363.078	0.35	5.754	0.11	45.700	5.78	363.078	0.00	5.754	0.16	45.700	8.06	363.078	0.00	5.754	0.08	45.700	6.17	363.078	0.35
6.607	0.11	52.481	6.96	416.869	0.03	6.607	0.16	52.481	6.81	416.869	0.00	6.607	0.19	52.481	8.62	416.869	0.00	6.607	0.11	52.481	6.96	416.869	0.03
7.586	0.15	60.256	7.55	478.630	0.00	7.586	0.23	60.256	7.79	478.630	0.00	7.586	0.24	60.256	8.83	478.630	0.00	7.586	0.15	60.256	7.55	478.630	0.00
8.710	0.21	69.183	7.85	549.541	0.00	8.710	0.32	69.183	8.58	549.541	0.00	8.710	0.31	69.183	8.62	549.541	0.00	8.710	0.21	69.183	7.85	549.541	0.00
10.000	0.29	79.433	7.83	630.957	0.00	10.000	0.43	79.433	9.08	630.957	0.00	10.000	0.42	79.433	8.02	630.957	0.00	10.000	0.29	79.433	7.83	630.957	0.00
11.482	0.39	91.201	7.51	724.436	0.00	11.482	0.56	91.201	9.17	724.436	0.00	11.482	0.59	91.201	7.07	724.436	0.00	11.482	0.39	91.201	7.51	724.436	0.00
13.183	0.53	104.713	6.93	831.764	0.00	13.183	0.72	104.713	8.76	831.764	0.00	13.183	0.84	104.713	5.87	831.764	0.00	13.183	0.53	104.713	6.93	831.764	0.00

ตารางที่ ข-13 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่พื้นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %						
26.467	60.347	120.82	89.54±0.58 ^a	22.016	56.970	131.702	88.02±0.02 ^b	22.235	92.863	196.873	88.613±1.31 ^b						
4 bar						5 bar						6 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.92	120.226	4.57	1.905	0.00	15.136	1.65	120.226	4.10	1.905	0.00	15.136	1.71	120.226	7.93
2.188	0.00	17.378	1.39	138.038	3.04	2.188	0.00	17.378	2.22	138.038	3.05	2.188	0.00	17.378	1.98	138.038	7.60
2.512	0.02	19.953	2.04	158.489	1.71	2.512	0.02	19.953	2.90	158.489	2.13	2.512	0.00	19.953	2.20	158.489	6.83
2.884	0.05	22.909	2.88	181.970	0.78	2.884	0.06	22.909	3.68	181.970	1.39	2.884	0.00	22.909	2.37	181.970	5.65
3.311	0.06	26.303	3.90	208.930	0.10	3.311	0.08	26.303	4.53	208.930	0.86	3.311	0.00	26.303	2.51	208.930	4.19
3.802	0.09	30.200	5.06	239.883	0.00	3.802	0.09	30.200	5.41	239.883	0.52	3.802	0.00	30.200	2.65	239.883	2.58
4.365	0.13	34.674	6.27	275.422	0.00	4.365	0.10	34.674	6.25	275.422	0.34	4.365	0.00	34.674	2.84	275.422	0.94
5.012	0.15	39.811	7.42	316.228	0.00	5.012	0.12	39.811	6.99	316.228	0.23	5.012	0.00	39.811	3.13	316.228	0.03
5.754	0.17	45.700	8.38	363.078	0.00	5.754	0.15	45.700	7.56	363.078	0.16	5.754	0.08	45.700	3.58	363.078	0.00
6.607	0.19	52.481	9.03	416.869	0.00	6.607	0.20	52.481	7.89	416.869	0.04	6.607	0.22	52.481	4.18	416.869	0.00
7.586	0.21	60.256	9.27	478.630	0.00	7.586	0.28	60.256	7.91	478.630	0.00	7.586	0.37	60.256	4.94	478.630	0.00
8.710	0.24	69.183	9.04	549.541	0.00	8.710	0.40	69.183	7.63	549.541	0.00	8.710	0.57	69.183	5.78	549.541	0.00
10.000	0.30	79.433	8.35	630.957	0.00	10.000	0.59	79.433	7.03	630.957	0.00	10.000	0.83	79.433	6.62	630.957	0.00
11.482	0.41	91.201	7.29	724.436	0.00	11.482	0.84	91.201	6.20	724.436	0.00	11.482	1.11	91.201	7.34	724.436	0.00
13.183	0.61	104.713	5.97	831.764	0.00	13.183	1.19	104.713	5.18	831.764	0.00	13.183	1.42	104.713	7.82	831.764	0.00

ตารางที่ ข-13 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ปั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกับ 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ (ต่อ)

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %		
20.900	57.933	136.090	87.84 \pm 0.55 ^b		
7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	1.78	120.226	4.44
2.188	0.00	17.378	2.30	138.038	3.43
2.512	0.02	19.953	2.91	158.489	2.51
2.884	0.06	22.909	3.60	181.970	1.71
3.311	0.08	26.303	4.35	208.930	0.99
3.802	0.09	30.200	5.12	239.883	0.37
4.365	0.11	34.674	5.88	275.422	0.25
5.012	0.15	39.811	6.57	316.228	0.19
5.754	0.20	45.700	7.13	363.078	0.11
6.607	0.27	52.481	7.50	416.869	0.03
7.586	0.38	60.256	7.61	478.630	0.00
8.710	0.53	69.183	7.45	549.541	0.00
10.000	0.74	79.433	7.01	630.957	0.00
11.482	1.01	91.201	6.32	724.436	0.00
13.183	1.36	104.713	5.42	831.764	0.00

ตารางที่ ข-14 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ฟั่นลงด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:0.5 ที่ความดัน 1 บาร์

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
11.057		33.342		139.056		84.78 \pm 0.63 ^b	
1 bar							
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.660	0.05	13.183	4.08	104.713	2.35	831.764	0.49
1.905	0.11	15.136	4.70	120.226	1.96	954.993	0.49
2.188	0.15	17.378	5.24	138.038	1.59	1096.478	0.49
2.512	0.18	19.953	5.64	158.489	1.25	1258.925	0.47
2.884	0.21	22.909	5.90	181.970	0.93	1445.44	0.40
3.311	0.24	26.303	5.98	208.930	0.65	1695.587	0.25
3.802	0.30	30.200	5.89	239.883	0.41	1905.461	0.06
4.365	0.41	34.674	5.66	275.422	0.20		
5.012	0.58	39.811	5.32	316.228	0.14		
5.754	0.84	45.700	4.92	363.078	0.21		
6.607	1.19	52.481	4.48	416.869	0.30		
7.586	1.63	60.256	4.04	478.630	0.38		
8.710	2.16	69.183	3.60	549.541	0.44		
10.000	2.77	79.433	3.17	630.957	0.47		
11.482	3.42	91.201	2.76	724.436	0.48		

ตารางที่ ข-15 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ฟั่นลงด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
17.416		48.627		132.628		88.21±0.33 ^a		12.262		26.924		62.438		88.65±1.17 ^a		17.633		45.474		130.606		82.81±0.73 ^b	
1 bar						4 bar						7 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	2.76	120.226	3.69	1.905	0.00	15.136	6.51	120.226	0.49	1.905	0.00	15.136	2.70	120.226	1.60	1.905	0.00	15.136	2.76	120.226	3.69
2.188	0.06	17.378	3.45	138.038	3.05	2.188	0.00	17.378	7.48	138.038	0.33	2.188	0.04	17.378	3.48	138.038	0.73	2.188	0.00	17.378	3.45	138.038	3.05
2.512	0.08	19.953	4.16	158.489	2.43	2.512	0.00	19.953	8.20	158.489	0.22	2.512	0.09	19.953	4.32	158.489	0.17	2.512	0.00	19.953	4.16	158.489	2.43
2.884	0.09	22.909	4.86	181.970	1.79	2.884	0.00	22.909	8.58	181.970	0.13	2.884	0.11	22.909	5.19	181.970	0.00	2.884	0.00	22.909	4.86	181.970	1.79
3.311	0.09	26.303	5.49	208.930	1.17	3.311	0.00	26.303	8.58	208.930	0.04	3.311	0.12	26.303	6.02	208.930	0.00	3.311	0.00	26.303	5.49	208.930	1.17
3.802	0.09	30.200	6.02	239.883	0.55	3.802	0.00	30.200	8.19	239.883	0.05	3.802	0.12	30.200	6.74	239.883	0.00	3.802	0.00	30.200	6.02	239.883	0.55
4.365	0.09	34.674	6.42	275.422	0.01	4.365	0.04	34.674	7.48	275.422	0.07	4.365	0.13	34.674	7.28	275.422	0.08	4.365	0.04	34.674	6.42	275.422	0.01
5.012	0.12	39.811	6.65	316.228	0.00	5.012	0.15	39.811	6.52	316.228	0.09	5.012	0.16	39.811	7.58	316.228	0.34	5.012	0.15	39.811	6.65	316.228	0.00
5.754	0.19	45.700	6.71	363.078	0.00	5.754	0.39	45.700	5.43	363.078	0.11	5.754	0.21	45.700	7.58	363.078	0.08	5.754	0.39	45.700	6.71	363.078	0.00
6.607	0.30	52.481	6.60	416.869	0.00	6.607	0.80	52.481	4.32	416.869	0.11	6.607	0.31	52.481	7.28	416.869	1.50	6.607	0.80	52.481	6.60	416.869	0.00
7.586	0.49	60.256	6.35	478.630	0.00	7.586	1.40	60.256	3.29	478.630	0.09	7.586	0.47	60.256	6.70	478.630	2.10	7.586	1.40	60.256	6.35	478.630	0.00
8.710	0.76	69.183	5.96	549.541	0.00	8.710	2.18	69.183	2.39	549.541	0.03	8.710	0.70	69.183	5.87	549.541	2.63	8.710	2.18	69.183	5.96	549.541	0.00
10.000	1.12	79.433	5.48	630.957	0.00	10.000	3.16	79.433	1.66	630.957	0.00	10.000	1.03	79.433	4.85	630.957	1.12	10.000	3.16	79.433	5.48	630.957	0.00
11.482	1.57	91.201	4.92	724.436	0.00	11.482	4.24	91.201	1.12	724.436	0.00	11.482	1.47	91.201	3.74	724.436	0.00	11.482	4.24	91.201	4.92	724.436	0.00
13.183	2.13	104.713	4.31	831.764	0.00	13.183	5.40	104.713	0.74	831.764	0.00	13.183	2.03	104.713	2.62	831.764	0.00	13.183	5.40	104.713	4.31	831.764	0.00

ตารางที่ ข-16 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด A ที่ฟั่นลงด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.0 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %						
29.615	66.797	138.22	83.78 \pm 0.59 ^b	22.122	50.142	100.929	88.64 \pm 1.85 ^a	18.664	44.693	98.698	89.21 \pm 0.6 ^a						
1 bar						4 bar						7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.71	120.226	5.41	1.905	0.00	15.136	1.59	120.226	2.73	1.905	0.00	15.136	0.76	120.226	7.73
2.188	0.00	17.378	1.07	138.038	4.12	2.188	0.00	17.378	2.33	138.038	1.43	2.188	0.00	17.378	0.88	138.038	5.43
2.512	0.00	19.953	1.59	158.489	2.94	2.512	0.04	19.953	3.25	158.489	0.37	2.512	0.00	19.953	1.06	158.489	2.77
2.884	0.00	22.909	2.31	181.970	1.87	2.884	0.10	22.909	4.34	181.970	0.00	2.884	0.00	22.909	1.37	181.970	0.40
3.311	0.02	26.303	3.21	208.930	0.91	3.311	0.14	26.303	5.53	208.930	0.00	3.311	0.00	26.303	1.85	208.930	0.00
3.802	0.04	30.200	4.29	239.883	0.19	3.802	0.16	30.200	6.72	239.883	0.00	3.802	0.00	30.200	2.56	239.883	0.00
4.365	0.05	34.674	5.47	275.422	0.01	4.365	0.17	34.674	7.79	275.422	0.00	4.365	0.02	34.674	3.53	275.422	0.00
5.012	0.07	39.811	6.67	316.228	0.00	5.012	0.17	39.811	8.62	316.228	0.00	5.012	0.09	39.811	4.77	316.228	0.00
5.754	0.08	45.700	7.75	363.078	0.00	5.754	0.17	45.700	9.10	363.078	0.00	5.754	0.16	45.700	6.19	363.078	0.00
6.607	0.10	52.481	8.58	416.869	0.00	6.607	0.18	52.481	9.16	416.869	0.00	6.607	0.23	52.481	7.70	416.869	0.00
7.586	0.12	60.256	9.05	478.630	0.00	7.586	0.21	60.256	8.78	478.630	0.00	7.586	0.32	60.256	9.09	478.630	0.00
8.710	0.16	69.183	9.08	549.541	0.00	8.710	0.28	69.183	7.98	549.541	0.00	8.710	0.42	69.183	10.17	549.541	0.00
10.000	0.22	79.433	8.65	630.957	0.00	10.000	0.42	79.433	6.85	630.957	0.00	10.000	0.51	79.433	10.70	630.957	0.00
11.482	0.31	91.201	7.82	724.436	0.00	11.482	0.66	91.201	5.54	724.436	0.00	11.482	0.59	91.201	10.50	724.436	0.00
13.183	0.47	104.713	6.68	831.764	0.00	13.183	1.04	104.713	4.13	831.764	0.00	13.183	0.67	104.713	9.52	831.764	0.00

ตารางที่ ข-17 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %						
42.078	141.244	336.853	62.89±0.95 ^c	23.949	78.893	188.108	83.45±0.7 ^b	20.245	64.773	160.932	86.17±0.71 ^a						
1 bar						4 bar						7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.66	0.00	13.183	0.46	104.713	6.07	1.66	0.00	13.183	1.14	104.713	6.84	1.66	0.00	13.183	1.45	104.713	6.00
1.905	0.00	15.136	0.58	120.226	6.42	1.905	0.00	15.136	1.43	120.226	6.52	1.905	0.00	15.136	1.81	120.226	5.32
2.188	0.00	17.378	0.72	138.038	6.67	2.188	0.00	17.378	1.75	138.038	6.00	2.188	0.00	17.378	2.22	138.038	4.54
2.512	0.00	19.953	0.87	158.489	6.78	2.512	0.00	19.953	2.11	158.489	5.30	2.512	0.02	19.953	2.66	158.489	3.73
2.884	0.00	22.909	1.05	181.970	6.76	2.884	0.00	22.909	2.50	181.970	4.42	2.884	0.07	22.909	3.16	181.970	2.91
3.311	0.00	26.303	1.26	208.930	6.59	3.311	0.00	26.303	2.93	208.930	3.39	3.311	0.08	26.303	3.69	208.930	2.09
3.802	0.00	30.200	1.53	239.883	6.24	3.802	0.02	30.200	3.42	239.883	2.23	3.802	0.10	30.200	4.27	239.883	1.27
4.365	0.00	34.674	1.85	275.422	5.70	4.365	0.04	34.674	3.95	275.422	1.06	4.365	0.12	34.674	4.87	275.422	0.43
5.012	0.00	39.811	2.25	316.228	4.91	5.012	0.07	39.811	4.53	316.228	0.05	5.012	0.17	39.811	5.48	316.228	0.01
5.754	0.00	45.700	2.73	363.078	3.87	5.754	0.14	45.700	5.14	363.078	0.00	5.754	0.24	45.700	6.05	363.078	0.00
6.607	0.01	52.481	3.27	416.869	2.63	6.607	0.21	52.481	5.73	416.869	0.00	6.607	0.33	52.481	6.53	416.869	0.00
7.586	0.06	60.256	3.86	478.630	0.94	7.586	0.32	60.256	6.25	478.630	0.00	7.586	0.47	60.256	6.85	478.630	0.00
8.710	0.17	69.183	4.47	549.541	0.01	8.710	0.47	69.183	6.65	549.541	0.00	8.710	0.65	69.183	6.97	549.541	0.00
10.000	0.25	79.433	5.07	630.957	0.00	10.000	0.66	79.433	6.90	630.957	0.00	10.000	0.87	79.433	6.87	630.957	0.00
11.482	0.35	91.201	5.61	724.436	0.00	11.482	0.88	91.201	6.96	724.436	0.00	11.482	1.14	91.201	6.54	724.436	0.00

ตารางที่ ข-18 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
40.631		125.158		268.724		70.82±0.58 ^c		24.062		74.045		178.709		85.02±0.29 ^b		20.756		61.083		147.935		87.91±0.91 ^a	
1 bar 180						4 bar						7 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.66	0.00	13.183	0.45	104.713	7.02	1.66	0.00	13.183	1.05	104.713	6.68	1.66	0.00	13.183	1.40	104.713	5.69	1.66	0.00	13.183	0.45	104.713	7.02
1.905	0.00	15.136	0.57	120.226	7.44	1.905	0.00	15.136	1.34	120.226	6.13	1.905	0.00	15.136	1.78	120.226	4.80	1.905	0.00	15.136	0.57	120.226	7.44
2.188	0.00	17.378	0.71	138.038	7.70	2.188	0.00	17.378	1.69	138.038	5.40	2.188	0.00	17.378	2.24	138.038	3.87	2.188	0.00	17.378	0.71	138.038	7.70
2.512	0.00	19.953	0.88	158.489	7.73	2.512	0.00	19.953	2.10	158.489	4.58	2.512	0.02	19.953	2.76	158.489	2.99	2.512	0.00	19.953	0.88	158.489	7.73
2.884	0.00	22.909	1.08	181.970	7.47	2.884	0.00	22.909	2.58	181.970	3.69	2.884	0.05	22.909	3.35	181.970	2.18	2.884	0.00	22.909	1.08	181.970	7.47
3.311	0.00	26.303	1.33	208.930	6.86	3.311	0.04	26.303	3.13	208.930	2.79	3.311	0.06	26.303	3.99	208.930	1.48	3.311	0.00	26.303	1.33	208.930	6.86
3.802	0.00	30.200	1.64	239.883	5.87	3.802	0.08	30.200	3.73	239.883	1.88	3.802	0.08	30.200	4.68	239.883	0.85	3.802	0.00	30.200	1.64	239.883	5.87
4.365	0.00	34.674	2.04	275.422	4.56	4.365	0.09	34.674	4.37	275.422	1.03	4.365	0.10	34.674	5.38	275.422	0.37	4.365	0.00	34.674	2.04	275.422	4.56
5.012	0.00	39.811	2.52	316.228	2.99	5.012	0.13	39.811	5.02	316.228	0.05	5.012	0.14	39.811	6.07	316.228	0.22	5.012	0.00	39.811	2.52	316.228	2.99
5.754	0.00	45.700	3.10	363.078	1.37	5.754	0.17	45.700	5.66	363.078	0.00	5.754	0.20	45.700	6.67	363.078	0.08	5.754	0.00	45.700	3.10	363.078	1.37
6.607	0.05	52.481	3.74	416.869	0.13	6.607	0.24	52.481	6.24	416.869	0.00	6.607	0.29	52.481	7.12	416.869	0.01	6.607	0.00	52.481	3.74	416.869	0.13
7.586	0.12	60.256	4.43	478.630	0.00	7.586	0.33	60.256	6.71	478.630	0.00	7.586	0.42	60.256	7.35	478.630	0.00	7.586	0.00	60.256	4.43	478.630	0.00
8.710	0.18	69.183	5.13	549.541	0.00	8.710	0.45	69.183	7.02	549.541	0.00	8.710	0.59	69.183	7.33	549.541	0.00	8.710	0.00	69.183	5.13	549.541	0.00
10.000	0.26	79.433	5.82	630.957	0.00	10.000	0.61	79.433	7.14	630.957	0.00	10.000	0.80	79.433	7.02	630.957	0.00	10.000	0.00	79.433	5.82	630.957	0.00
11.482	0.35	91.201	6.46	724.436	0.00	11.482	0.81	91.201	7.02	724.436	0.00	11.482	1.07	91.201	6.46	724.436	0.00	11.482	0.00	91.201	6.46	724.436	0.00

ตารางที่ ข-19 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
46.625		130.864		284.206		68.88±0.34 ^c		23.135		69.554		165.668		82.75±0.91 ^b		19.74		52.553		120.47		88.56±1.59 ^a	
1 bar 180						4 bar						7 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.66	0.00	13.183	0.34	104.713	7.34	1.66	0.00	13.183	1.12	104.713	5.91	1.66	0.00	13.183	1.44	104.713	4.85	1.66	0.00	13.183	0.34	104.713	7.34
1.905	0.00	15.136	0.43	120.226	7.76	1.905	0.00	15.136	1.45	120.226	5.13	1.905	0.00	15.136	2.06	120.226	3.87	1.905	0.00	15.136	0.43	120.226	7.76
2.188	0.00	17.378	0.54	138.038	7.94	2.188	0.00	17.378	1.85	138.038	4.25	2.188	0.00	17.378	2.67	138.038	2.90	2.188	0.00	17.378	0.54	138.038	7.94
2.512	0.00	19.953	0.67	158.489	7.84	2.512	0.00	19.953	2.31	158.489	3.28	2.512	0.01	19.953	3.38	158.489	1.98	2.512	0.00	19.953	0.67	158.489	7.84
2.884	0.00	22.909	0.83	181.970	7.45	2.884	0.02	22.909	2.84	181.970	2.29	2.884	0.06	22.909	4.17	181.970	1.07	2.884	0.02	22.909	0.83	181.970	7.45
3.311	0.00	26.303	1.04	208.930	6.76	3.311	0.06	26.303	3.43	208.930	1.28	3.311	0.08	26.303	4.99	208.930	0.24	3.311	0.06	26.303	1.04	208.930	6.76
3.802	0.00	30.200	1.32	239.883	5.81	3.802	0.08	30.200	4.07	239.883	0.35	3.802	0.10	30.200	5.81	239.883	0.00	3.802	0.08	30.200	1.32	239.883	5.81
4.365	0.00	34.674	1.69	275.422	4.67	4.365	0.10	34.674	4.73	275.422	0.01	4.365	0.12	34.674	6.56	275.422	0.00	4.365	0.10	34.674	1.69	275.422	4.67
5.012	0.00	39.811	2.17	316.228	3.41	5.012	0.13	39.811	5.39	316.228	0.00	5.012	0.15	39.811	7.18	316.228	0.00	5.012	0.13	39.811	2.17	316.228	3.41
5.754	0.00	45.700	2.77	363.078	2.19	5.754	0.17	45.700	6.00	363.078	0.00	5.754	0.20	45.700	7.61	363.078	0.00	5.754	0.17	45.700	2.77	363.078	2.19
6.607	0.00	52.481	3.48	416.869	0.84	6.607	0.24	52.481	6.53	416.869	0.00	6.607	0.28	52.481	7.78	416.869	0.00	6.607	0.24	52.481	3.48	416.869	0.84
7.586	0.05	60.256	4.27	478.630	0.06	7.586	0.34	60.256	6.93	478.630	0.00	7.586	0.41	60.256	7.67	478.630	0.00	7.586	0.34	60.256	4.27	478.630	0.06
8.710	0.12	69.183	5.11	549.541	0.00	8.710	0.47	69.183	7.14	549.541	0.00	8.710	0.58	69.183	7.28	549.541	0.00	8.710	0.47	69.183	5.11	549.541	0.00
10.000	0.18	79.433	5.95	630.957	0.00	10.000	0.64	79.433	6.95	630.957	0.00	10.000	0.82	79.433	6.63	630.957	0.00	10.000	0.64	79.433	5.95	630.957	0.00
11.482	0.26	91.201	6.71	724.436	0.00	11.482	0.85	91.201	6.52	724.436	0.00	11.482	1.14	91.201	5.80	724.436	0.00	11.482	0.85	91.201	6.71	724.436	0.00

ตารางที่ ข-20 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด B ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %						
37.378	114.032	281.621	70.91 \pm 0.53 ^b	23.207	64.281	141.853	88.10 \pm 1.23 ^a	19.875	54.428	122.336	89.22 \pm 1.08 ^a						
1 bar 180						4 bar						7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.66	0.00	13.183	0.52	104.713	6.99	1.66	0.00	13.183	1.13	104.713	6.45	1.66	0.00	13.183	1.48	104.713	5.21
1.905	0.00	15.136	0.64	120.226	7.04	1.905	0.00	15.136	1.47	120.226	5.46	1.905	0.00	15.136	1.93	120.226	4.19
2.188	0.00	17.378	0.79	138.038	6.88	2.188	0.00	17.378	1.90	138.038	4.36	2.188	0.00	17.378	2.49	138.038	3.14
2.512	0.00	19.953	0.98	158.489	6.54	2.512	0.00	19.953	2.40	158.489	3.26	2.512	0.02	19.953	3.14	158.489	2.15
2.884	0.00	22.909	1.21	181.970	6.04	2.884	0.00	22.909	3.00	181.970	2.19	2.884	0.07	22.909	3.88	181.970	1.02
3.311	0.00	26.303	1.51	208.930	5.42	3.311	0.02	26.303	3.68	208.930	1.09	3.311	0.10	26.303	4.67	208.930	0.08
3.802	0.00	30.200	1.90	239.883	4.71	3.802	0.03	30.200	4.44	239.883	0.04	3.802	0.12	30.200	5.49	239.883	0.00
4.365	0.00	34.674	2.37	275.422	3.94	4.365	0.06	34.674	5.24	275.422	0.00	4.365	0.15	34.674	6.27	275.422	0.00
5.012	0.00	39.811	2.94	316.228	3.11	5.012	0.11	39.811	6.05	316.228	0.00	5.012	0.18	39.811	6.96	316.228	0.00
5.754	0.02	45.700	3.59	363.078	2.20	5.754	0.16	45.700	6.80	363.078	0.00	5.754	0.24	45.700	7.49	363.078	0.00
6.607	0.10	52.481	4.30	416.869	1.25	6.607	0.22	52.481	7.41	416.869	0.00	6.607	0.32	52.481	7.78	416.869	0.00
7.586	0.16	60.256	5.02	478.630	0.20	7.586	0.32	60.256	7.82	478.630	0.00	7.586	0.44	60.256	7.80	478.630	0.00
8.710	0.23	69.183	5.70	549.541	0.00	8.710	0.45	69.183	7.94	549.541	0.00	8.710	0.60	69.183	7.52	549.541	0.00
10.000	0.31	79.433	6.29	630.957	0.00	10.000	0.63	79.433	7.75	630.957	0.00	10.000	0.82	79.433	6.96	630.957	0.00
11.482	0.41	91.201	6.73	724.436	0.00	11.482	0.85	91.201	7.25	724.436	0.00	11.482	1.11	91.201	6.17	724.436	0.00

ตารางที่ ข-21 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
47.215		180.993		445.315		51.52±1.63 ^c		23.328		90.953		239.808		77.25±0.43 ^b		20.490		77.170		201.149		81.35±0.8 ^a	
1 bar						4 bar						7 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.49	120.226	5.06	1.905	0.00	15.136	1.29	120.226	6.18	1.905	0.00	15.136	1.46	120.226	5.96	1.905	0.00	15.136	1.46	120.226	5.96
2.188	0.00	17.378	0.60	138.038	5.29	2.188	0.03	17.378	1.54	138.038	5.98	2.188	0.09	17.378	1.73	138.038	5.36	2.188	0.09	17.378	1.73	138.038	5.36
2.512	0.00	19.953	0.73	158.489	5.51	2.512	0.08	19.953	1.82	158.489	5.64	2.512	0.13	19.953	2.04	158.489	4.69	2.512	0.13	19.953	2.04	158.489	4.69
2.884	0.00	22.909	0.87	181.970	5.74	2.884	0.10	22.909	2.13	181.970	5.15	2.884	0.16	22.909	2.40	181.970	3.95	2.884	0.16	22.909	2.40	181.970	3.95
3.311	0.00	26.303	1.04	208.930	5.98	3.311	0.12	26.303	2.47	208.930	4.53	3.311	0.19	26.303	2.81	208.930	3.21	3.311	0.19	26.303	2.81	208.930	3.21
3.802	0.00	30.200	1.26	239.883	6.23	3.802	0.15	30.200	2.86	239.883	3.77	3.802	0.22	30.200	3.29	239.883	2.46	3.802	0.22	30.200	3.29	239.883	2.46
4.365	0.00	34.674	1.52	275.422	6.42	4.365	0.17	34.674	3.29	275.422	2.92	4.365	0.25	34.674	3.81	275.422	1.74	4.365	0.25	34.674	3.81	275.422	1.74
5.012	0.00	39.811	1.85	316.228	6.45	5.012	0.21	39.811	3.76	316.228	1.98	5.012	0.30	39.811	4.39	316.228	1.00	5.012	0.30	39.811	4.39	316.228	1.00
5.754	0.00	45.700	2.23	363.078	6.20	5.754	0.27	45.700	4.26	363.078	1.17	5.754	0.36	45.700	4.98	363.078	0.46	5.754	0.36	45.700	4.98	363.078	0.46
6.607	0.01	52.481	2.66	416.869	5.50	6.607	0.34	52.481	4.76	416.869	0.15	6.607	0.45	52.481	5.55	416.869	0.11	6.607	0.45	52.481	5.55	416.869	0.11
7.586	0.06	60.256	3.13	478.630	4.29	7.586	0.43	60.256	5.23	478.630	0.00	7.586	0.55	60.256	6.06	478.630	0.02	7.586	0.55	60.256	6.06	478.630	0.02
8.710	0.16	69.183	3.59	549.541	2.46	8.710	0.55	69.183	5.65	549.541	0.00	8.710	0.68	69.183	6.44	549.541	0.00	8.710	0.68	69.183	6.44	549.541	0.00
10.000	0.22	79.433	4.04	630.957	0.49	10.000	0.70	79.433	5.97	630.957	0.00	10.000	0.84	79.433	6.64	630.957	0.00	10.000	0.84	79.433	6.64	630.957	0.00
11.482	0.30	91.201	4.43	724.436	0.00	11.482	0.87	91.201	6.17	724.436	0.00	11.482	1.01	91.201	6.62	724.436	0.00	11.482	1.01	91.201	6.62	724.436	0.00
13.183	0.39	104.713	4.78	831.764	0.00	13.183	1.07	104.713	6.25	831.764	0.00	13.183	1.22	104.713	6.39	831.764	0.00	13.183	1.22	104.713	6.39	831.764	0.00

ตารางที่ ข-22 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า 140 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
45.864		154.218		347.322		59.32±0.49 ^c		23.399		89.243		232.400		78.14±0.44 ^b		20.325		74.228		175.718		82.70±0.75 ^a	
1 bar 180						4 bar						7 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.47	120.226	6.23	1.905	0.00	15.136	1.29	120.226	6.22	1.905	0.00	15.136	1.56	120.226	5.90	1.905	0.00	15.136	1.56	120.226	5.90
2.188	0.00	17.378	0.59	138.038	6.66	2.188	0.03	17.378	1.58	138.038	6.03	2.188	0.05	17.378	1.88	138.038	5.12	2.188	0.05	17.378	1.88	138.038	5.12
2.512	0.00	19.953	0.74	158.489	6.99	2.512	0.09	19.953	1.89	158.489	5.68	2.512	0.11	19.953	2.23	158.489	4.09	2.512	0.11	19.953	2.23	158.489	4.09
2.884	0.00	22.909	0.91	181.970	7.18	2.884	0.11	22.909	2.24	181.970	5.17	2.884	0.14	22.909	2.62	181.970	2.89	2.884	0.14	22.909	2.62	181.970	2.89
3.311	0.00	26.303	1.11	208.930	7.19	3.311	0.13	26.303	2.62	208.930	4.49	3.311	0.17	26.303	3.06	208.930	1.57	3.311	0.17	26.303	3.06	208.930	1.57
3.802	0.00	30.200	1.36	239.883	6.96	3.802	0.15	30.200	3.03	239.883	3.66	3.802	0.19	30.200	3.53	239.883	0.23	3.802	0.19	30.200	3.53	239.883	0.23
4.365	0.00	34.674	1.66	275.422	6.43	4.365	0.17	34.674	3.46	275.422	2.73	4.365	0.22	34.674	4.04	275.422	0.01	4.365	0.22	34.674	4.04	275.422	0.01
5.012	0.00	39.811	2.03	316.228	5.57	5.012	0.20	39.811	3.91	316.228	1.72	5.012	0.27	39.811	4.58	316.228	0.00	5.012	0.27	39.811	4.58	316.228	0.00
5.754	0.00	45.700	2.46	363.078	4.35	5.754	0.25	45.700	4.37	363.078	0.83	5.754	0.33	45.700	5.13	363.078	0.00	5.754	0.33	45.700	5.13	363.078	0.00
6.607	0.01	52.481	2.95	416.869	2.83	6.607	0.31	52.481	4.82	416.869	0.09	6.607	0.42	52.481	5.66	416.869	0.00	6.607	0.42	52.481	5.66	416.869	0.00
7.586	0.06	60.256	3.48	478.630	1.08	7.586	0.40	60.256	5.25	478.630	0.00	7.586	0.53	60.256	6.14	478.630	0.00	7.586	0.53	60.256	6.14	478.630	0.00
8.710	0.15	69.183	4.05	549.541	0.06	8.710	0.52	69.183	5.63	549.541	0.00	8.710	0.67	69.183	6.53	549.541	0.00	8.710	0.67	69.183	6.53	549.541	0.00
10.000	0.21	79.433	4.63	630.957	0.00	10.000	0.66	79.433	5.95	630.957	0.00	10.000	0.84	79.433	6.80	630.957	0.00	10.000	0.84	79.433	6.80	630.957	0.00
11.482	0.28	91.201	5.20	724.436	0.00	11.482	0.84	91.201	6.16	724.436	0.00	11.482	1.05	91.201	6.79	724.436	0.00	11.482	1.05	91.201	6.79	724.436	0.00
13.183	0.37	104.713	5.74	831.764	0.00	13.183	1.05	104.713	6.26	831.764	0.00	13.183	1.29	104.713	6.46	831.764	0.00	13.183	1.29	104.713	6.46	831.764	0.00

ตารางที่ ข-23 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ฟั่นละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกับ 160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ

d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %	d(0.1), μm	d(0.5), μm	d(0.9), μm	Yield, %						
50.286	176.406	402.722	52.20±0.6 ^c	25.492	82.154	207.488	82.26±1.53 ^b	20.799	69.203	166.630	86.37±0.66 ^a						
1 bar 180						4 bar						7 bar					
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.50	120.226	5.85	1.905	0.00	15.136	1.23	120.226	6.29	1.905	0.00	15.136	1.61	120.226	5.77
2.188	0.00	17.378	0.62	138.038	6.34	2.188	0.00	17.378	1.55	138.038	5.79	2.188	0.04	17.378	1.96	138.038	4.89
2.512	0.00	19.953	0.73	158.489	6.70	2.512	0.00	19.953	1.92	158.489	5.16	2.512	0.08	19.953	2.34	158.489	3.96
2.884	0.00	22.909	0.85	181.970	6.94	2.884	0.00	22.909	2.33	181.970	4.43	2.884	0.10	22.909	2.78	181.970	3.02
3.311	0.00	26.303	0.98	208.930	7.04	3.311	0.04	26.303	2.80	208.930	3.63	3.311	0.12	26.303	3.27	208.930	2.16
3.802	0.00	30.200	1.13	239.883	7.00	3.802	0.07	30.200	3.32	239.883	2.78	3.802	0.14	30.200	3.82	239.883	1.36
4.365	0.00	34.674	1.30	275.422	6.79	4.365	0.08	34.674	3.88	275.422	1.92	4.365	0.17	34.674	4.43	275.422	0.59
5.012	0.00	39.811	1.53	316.228	6.36	5.012	0.10	39.811	4.47	316.228	1.01	5.012	0.21	39.811	5.08	316.228	0.31
5.754	0.00	45.700	1.84	363.078	5.65	5.754	0.14	45.700	5.06	363.078	0.41	5.754	0.27	45.700	5.74	363.078	0.11
6.607	0.01	52.481	2.23	416.869	4.52	6.607	0.20	52.481	5.63	416.869	0.04	6.607	0.36	52.481	6.35	416.869	0.02
7.586	0.06	60.256	2.72	478.630	3.20	7.586	0.28	60.256	6.13	478.630	0.00	7.586	0.48	60.256	6.84	478.630	0.00
8.710	0.14	69.183	3.29	549.541	0.94	8.710	0.39	69.183	6.51	549.541	0.00	8.710	0.63	69.183	7.14	549.541	0.00
10.000	0.21	79.433	3.94	630.957	0.02	10.000	0.55	79.433	6.74	630.957	0.00	10.000	0.82	79.433	7.20	630.957	0.00
11.482	0.30	91.201	4.61	724.436	0.00	11.482	0.73	91.201	6.78	724.436	0.00	11.482	1.05	91.201	6.98	724.436	0.00
13.183	0.40	104.713	5.26	831.764	0.00	13.183	0.96	104.713	6.63	831.764	0.00	13.183	1.31	104.713	6.48	831.764	0.00

ตารางที่ ข-24 การกระจายขนาดของผงพอลิเอทิลีนแวกซ์ชนิด C ที่ผ่านละอองด้วยอุณหภูมิต่ำกับ 180 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างรูเปิดท่ออากาศและท่อของเหลวเท่ากับ 3.0:1.5 ที่ความดันต่างๆ



d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %		d(0.1), μm		d(0.5), μm		d(0.9), μm		Yield, %	
44.279		149.324		337.229		60.10 \pm 1.07 ^c		24.757		81.679		202.963		81.39 \pm 0.57 ^b		21.072		67.794		160.767		87.60 \pm 0.84 ^a	
1 bar 180						4 bar						7 bar											
Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)	Size (μm)	Volume (%)
1.905	0.00	15.136	0.52	120.226	6.54	1.905	0.00	15.136	1.29	120.226	6.38	1.905	0.00	15.136	1.58	120.226	5.82	1.905	0.00	15.136	1.58	120.226	5.82
2.188	0.00	17.378	0.66	138.038	6.98	2.188	0.00	17.378	1.63	138.038	5.94	2.188	0.03	17.378	1.96	138.038	4.98	2.188	0.03	17.378	1.96	138.038	4.98
2.512	0.00	19.953	0.81	158.489	7.25	2.512	0.00	19.953	2.01	158.489	5.35	2.512	0.08	19.953	2.39	158.489	4.05	2.512	0.08	19.953	2.39	158.489	4.05
2.884	0.00	22.909	0.98	181.970	7.33	2.884	0.05	22.909	2.44	181.970	4.59	2.884	0.10	22.909	2.88	181.970	3.06	2.884	0.10	22.909	2.88	181.970	3.06
3.311	0.00	26.303	1.18	208.930	7.17	3.311	0.07	26.303	2.90	208.930	3.73	3.311	0.12	26.303	3.43	208.930	2.11	3.311	0.12	26.303	3.43	208.930	2.11
3.802	0.00	30.200	1.42	239.883	6.73	3.802	0.08	30.200	3.40	239.883	2.76	3.802	0.14	30.200	4.02	239.883	1.16	3.802	0.14	30.200	4.02	239.883	1.16
4.365	0.00	34.674	1.70	275.422	6.00	4.365	0.09	34.674	3.93	275.422	1.78	4.365	0.17	34.674	4.66	275.422	0.09	4.365	0.17	34.674	4.66	275.422	0.09
5.012	0.00	39.811	2.04	316.228	5.00	5.012	0.11	39.811	4.47	316.228	0.78	5.012	0.21	39.811	5.30	316.228	0.00	5.012	0.21	39.811	5.30	316.228	0.00
5.754	0.00	45.700	2.45	363.078	3.81	5.754	0.14	45.700	5.01	363.078	0.05	5.754	0.27	45.700	5.91	363.078	0.00	5.754	0.27	45.700	5.91	363.078	0.00
6.607	0.01	52.481	2.93	416.869	2.39	6.607	0.20	52.481	5.52	416.869	0.00	6.607	0.35	52.481	6.46	416.869	0.00	6.607	0.35	52.481	6.46	416.869	0.00
7.586	0.09	60.256	3.48	478.630	1.09	7.586	0.29	60.256	5.98	478.630	0.00	7.586	0.46	60.256	6.88	478.630	0.00	7.586	0.46	60.256	6.88	478.630	0.00
8.710	0.15	69.183	4.08	549.541	0.17	8.710	0.40	69.183	6.35	549.541	0.00	8.710	0.60	69.183	7.13	549.541	0.00	8.710	0.60	69.183	7.13	549.541	0.00
10.000	0.22	79.433	4.73	630.957	0.00	10.000	0.56	79.433	6.61	630.957	0.00	10.000	0.78	79.433	7.16	630.957	0.00	10.000	0.78	79.433	7.16	630.957	0.00
11.482	0.30	91.201	5.37	724.436	0.00	11.482	0.76	91.201	6.71	724.436	0.00	11.482	1.00	91.201	6.94	724.436	0.00	11.482	1.00	91.201	6.94	724.436	0.00
13.183	0.41	104.713	5.99	831.764	0.00	13.183	1.00	104.713	6.63	831.764	0.00	13.183	1.27	104.713	6.48	831.764	0.00	13.183	1.27	104.713	6.48	831.764	0.00

ภาคผนวก ค

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

The 10th
International
PSU Engineering Conference
(IPEC-10)
May 14 - 15, 2011

Faculty of Engineering
Prince of Songkla University
<http://www.ipec10.eng.psu.ac.th>

Effect of operating conditions onto the powder size distribution and shape of PE wax powder in Atomization processUbonwan Madua^{1,*}, Kulchanat Prasertsit¹, Paiboon Innachitra¹, Tanakorn Keatkunboot¹.¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: si_myfriendly@hotmail.com***Abstract**

The aim of this work is to study the parameters that effect on the powder size distribution and shape of the Polyethylene wax (PE wax) in the atomization process. The external mixing two fluid nozzle with liquid cap diameter of 0.5, 1.0 and 1.5 mm are used and controlled by heating device at 200°C to avoid freeze-up within the liquid cap. The influence of the air pressure and PE wax melting temperature are considered. The studied in this experiment are the air pressure of 1 to 7 bars and PE wax melting temperature of 140 to 200°C. The study found that, increasing melting temperature and air pressure increases spherical particle to fiber ratio with a particle size distribution from 50 to 200 μm .

Keywords: Spay drying, Atomization process, Polymer powder, Atomizer, Gas Atomization

1. Introduction

Polyethylene wax (PE wax) is a byproduct from the incomplete of polymerization of high density polyethylene (HDPE) production process. The obtained PE wax from polymerization has a lower molecular weight and lower price than HDPE. For the present time, there are many applications of PE wax such as in the manufacture of candle, paints, additive for the rubber sheet production etc. However, these applications require uniform drop with spherical particle size under size 50 to 200 μm . Therefore, the aim of this study is to produce the PE wax powder by atomization process for increasing valuable of PE wax and to support several applications.

In the past few decades, interest has increased in using polymer powder for a variety of applications. The interest in the development process of the polymer powder in a high capacity at relatively low production costs. In general, in the manufacture of polymer powders use traditional methods of grinding. However, as it is expensive, highly energy intensive, and sensitive to contamination from the grinding equipment and from environmental pollution[1]. In addition, grinding is incapable of producing spherical. So grinding is undesirable. The long-term goal of this research aims to develop the production process of

polymer powder with atomization. In this study the external mixing two fluid nozzle was used. Which previous research was found the spray is capable of producing spherical powdered polymer.

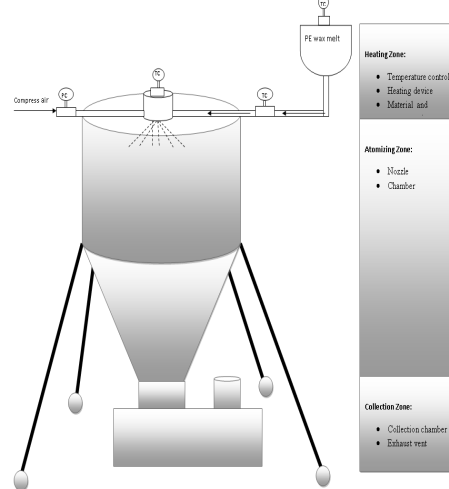


Figure 1. The atomization processing unit.

The atomization process in this study is shown in Figure 1. The stream size of PE wax, PE wax melting temperature and compressed air pressure are the investigated parameters. The atomization process unit is divided into three zones[1]; the heating zone, the atomization zone and the collection zone. The heating zone consists of the heater where the polymer is heated prior to gas atomization and located at the top of the chamber.

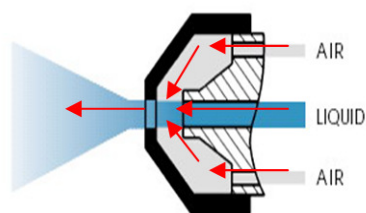


Figure 2. External mixing two fluid nozzles[2].

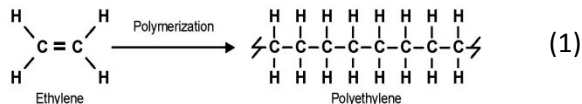
The compressed air at room temperature entered through a stainless tube, to force the liquid stream PE wax. The liquid stream and compressed air flow from each tube eventually and contact at atomization zone, and quickly leave the droplet of PE wax powder. The nozzle used in this experiment is the external mixing two fluids as shown in Figure 2. After that, PE wax powder is stored into the collection zone.

The advantages of the atomization process[3] are consist of 1) Atomization process can operated in a continuous system, 2) High capacity, 3) Low loss of product and unit cost of the production, 4) Products have an uniform particle size distribution and shape, 5) Reducing the problem with the distribution of the internal component, 6) Applied to use in the various material and etc. Accordingly it seems that PE wax powder production by atomization process might be the interesting process to study and developed for produce the novel powder.

2. Experimental methods.

2.1 Polyethylene wax (PE wax)

PE wax used in this experiment is byproduct from the polymerization process, which the process of producing a high density polyethylene (HDPE). Moreover, the PE wax has lower molecular weight than HDPE[4] as show in Equation 1.



Thermal properties of PE wax were analyzed by Differential Scanning Calorimeter (DSC). The melting point is in the range of 110 – 120°C and the crystallization temperature in the range of 80 – 90°C by DSC. Furthermore, the viscosity of PE wax is in the range of 5 – 1000 cp which depend on the temperature. In this experimental, PE wax is heated over the melting temperature to become liquid phase completely, to prevent the plugging in the nozzle.

2.2 Atomization process

2.2.1 The study of effected of melt stream size on PE wax powder shape and size distribution

The stream size of PE wax was controlled by the liquid cap diameter of the nozzle. The experimental used 0.5, 1.0 and 1.5 mm liquid cap diameter of nozzle, 1 bar of air pressure and 180°C of PE wax melting temperature. Before spraying melted PE wax, the external two fluid nozzle was pre-heating for 30 minute at the height of nozzle located above the ground about 170 cm.

2.2.2 The study of effected of PE wax melting temperature on PE wax powder shape and size distribution

The particle size distribution and shape of the PE wax powder are strongly dependent on the melting temperature. Melted PE waxes were atomized at different temperature ranging from 140 to 190 °C (1 bar of the air pressure). This was done to determine the temperature dependence of the PE wax particle size distribution, allowing the optimum temperature in the atomization process. The temperature range of the PE wax melting was used to determine the effects on the particle size distribution.

2.2.3 The study of effected of air pressure on PE wax powder shape and size distribution

The air pressure is one of parameters that essential to the particle size distribution of powder with obtained from the atomization process. From the previous result found that, due to the 180 C of PE wax melting temperature can maximize the fine particle in the process. So, 180°C of PE wax melting temperature was selected to studied at the various air pressure in the range from 1 to 7 bars.

3. Results and discussion

3.1 Influence of the melt stream size.

The initial melt stream size used 0.5 mm of liquid cap diameter due to we hope to minimize the density gradient. The experiment found that, using 0.5 mm liquid cap diameter gave particle to fiber ratio less than using 1.0 and 1.5 mm. Contrary that, the 0.5 mm of liquid cap diameter was produced even more fibers. The reason for the large amount of fibers produced by the 0.5 mm of liquid cap diameter is that the melt stream size is too small to flow out radically in an even manner into the pathway of the air pressure [1]. Therefore, there are thin areas within the melt stream that do not carry enough mass and/or sufficient stress to break-up into spheres when contacted by the compress air, leading to formation of the microfibers already described. When PE wax was atomized with 1.0 and 1.5 mm liquid cap diameter (180°C of PE wax melting temperature and 1 bar of air pressure), the powder size distribution and shape of PE wax powder are satisfactory as illustrated in Figure 3.

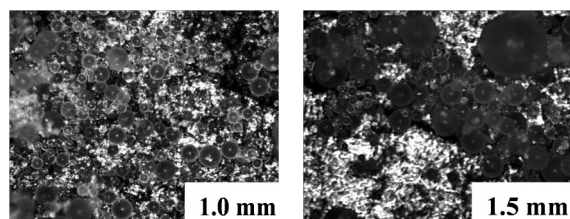


Figure 3. PE wax powder operated with 1.0 mm liquid cap diameter (left) and 1.5 mm (right).

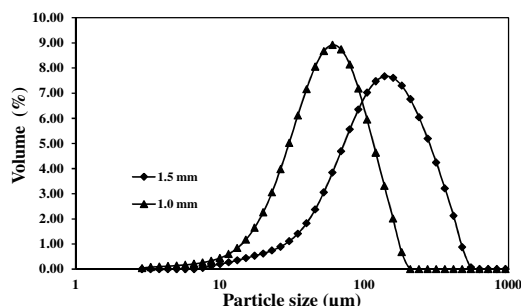


Figure 4. Stream size of PE wax melting dependence on the Particle size distribution of PE waxes powder (1 bar of air pressure).

The comparison between 1.0 and 1.5 mm liquid caps diameter affect on PE wax powder shape and size are shown in Figure. 3 and 4. Suggest that, using 1.0 mm of liquid cap diameter gave the size of PE wax powder smaller than 1.5 mm because of the influence of air to liquid ratio (ALR). The experimental found that, decreasing the liquid cap diameter (Increasing ALR) will increasing the fragmentation of PE wax melt when contact with compress air. However, the surfaces of the powders are smoothly when atomized by external two fluid nozzles. Although, Using 1.0 mm of liquid cap diameter can produce the fine particle. But the particles that larger than 630 μm are mainly obtained in the process. The verification was showed in table 1.

Table 1. Experimental parameter and results.

Stream size (mm)	Bulk density (g/cm^3)	> 630 μm (%)	< 630 μm (%)
1.0	0.5018	46.80	53.20
1.5	0.4901	4.77	95.23

From Table 1 demonstrates that, the 1.0 mm liquid cap diameter can obtained particle size smaller than 1.5 mm. However, amount of particles smaller than 630 μm in two operating conditions are clearly different. The amount of particle which is smaller than 630 μm was up to 95.23% when atomized by 1.5 mm liquid cap diameter. That is the reason, why the 1.5

mm of liquid cap diameter is the convenient for used in this experimental.

3.2 Influence of the PE wax melting temperature.

Melting temperature is the mainly parameters that effect onto the particle size distribution. Figure. 5 shows that, the shape of PE waxes powder at various melting temperature are approximately. Fine particle and narrow particle size distribution of PE wax powder can produce by using the high melting temperature.

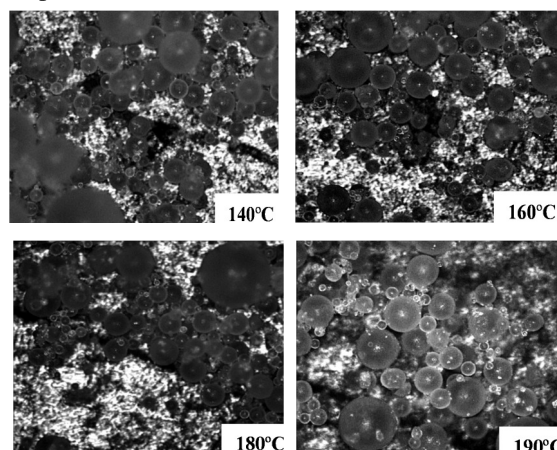


Figure 5. PE wax powder shape at various melting temperature from 140 to 190°C.

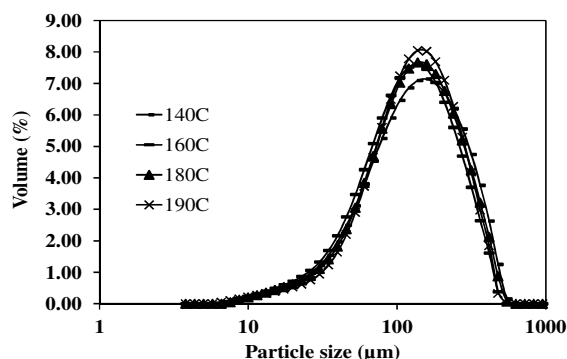


Figure 6. Temperature dependence on the Particle size distribution of PE waxes powder (1 bar of air pressure).

Figure. 6 was use to confirm the particle size distribution of PE wax powder. The particle size distribution of PE wax (1 bar of air pressure) at various PE wax melting temperature analyzed by Mastersizer 2000. The plot indicates that, the mainly particle size distribution of PE wax powder obtained in the range of 50-200 μm is illustrated in Figure. 5.

Table 2. Experimental parameter and results.

Melting Temperature (°C)	Bulk density (g/cm ³)	>630µm (%)	<630 µm (%)
140	0.46675	3.27	96.73
160	0.48145	5.52	94.48
180	0.49015	4.77	95.23
190	0.42915	8.50	91.50

At the PE wax melting temperature 180°C, the fine particle size of the PE wax (< 321 µm) up to 90% and the bulk density up to 0.49015 g/cm³ as show in Table 2. On the contrary, when the PE wax melting temperature is too high, mostly powder stuck in the collection zone. It is undesirable to take place in the atomization process. Suggests that, increasing the PE wax melting temperature) is effective to obtain the narrow particle size distribution of PE wax powder (Figure. 5). It notices that, the bulk density of the PE wax powder was showed in each run. As a result, when used the 180°C of PE wax melting temperature, the PE wax powder obtained with the 95.23% of the powder that smaller than 630 µm, and bulk density equal to 0.49015 g/cm³.

Generally, atomization process required to produce the fine particle and narrow particle size distribution. Heating of the material is the most way to operate until the temperature of the material enough to avoid freeze-up within the nozzle[5]. Due to the influence of the liquid viscosity cause the fragmentation of the PE wax liquid stream. Suggest that, the temperature inverse of the liquid viscosity. Consequently, Increasing the PE wax melting temperature tends to decrease particle size distribution.

3.3 Influence of air pressure

The pressure of the compress air is the strongly parameter that effect onto the particle size distribution. Figure. 7 show that, the sizes of PE wax powder at various pressures are approximately. The spherical and smooth surfaces are obtained in this process.

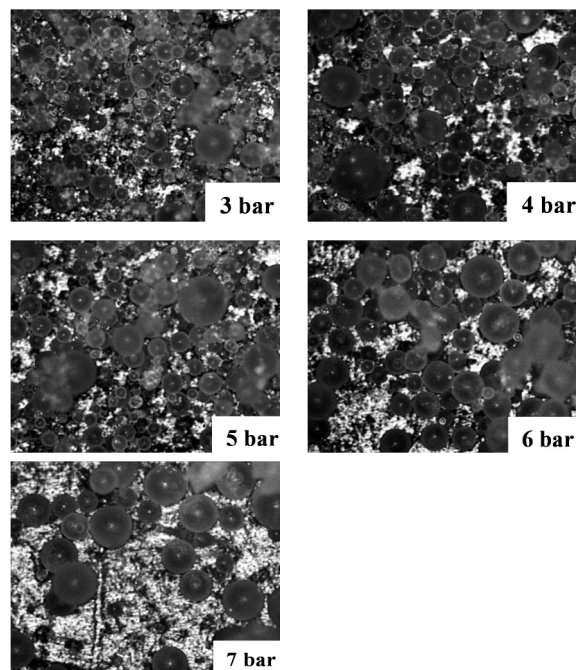
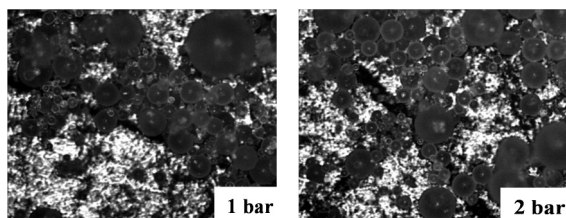


Figure.7. PE wax powder shape at various air pressure from 1 to 7 bar and 180°C of melting temperature.

Figure. 8 shows the plot of particle size distribution of PE wax at 180°C of PE wax melting temperature with various air pressure analyzed by Mastersizer 2000. Figure 8 indicates that, the particle size distributions from experiments are in the narrow range. And the outstanding condition of the process is at 3 bar of air pressure. Suggest that, the powder size distribution is 50-200 µm which be desirable product.

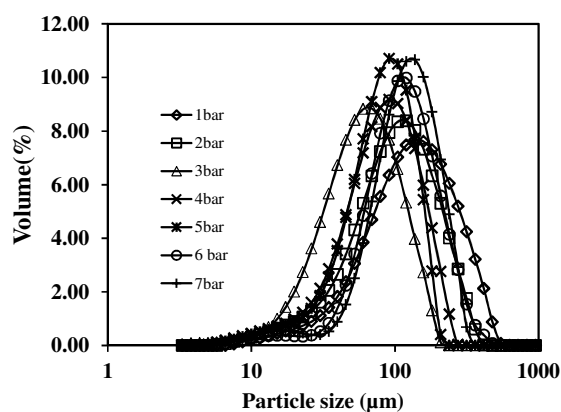


Figure. 8. Air pressure depends on PE wax particle size distribution (180°C of PE wax melting temperature).

Table 2. Experimental parameter and results.

Gas pressure (bar)	Bulk density (g/cm ³)	> 630 μ m (%)	<630 μ m (%)
1	0.49015	4.77	95.23
2	0.4495	4.72	95.28
3	0.4058	4.43	95.57
4	0.3823	20.38	79.62
5	0.4000	58.64	41.36
6	0.3500	73.68	26.32
7	0.3325	81.29	18.71

The result in Table 3 showed the particle size distribution at various air pressures from 1 to 7 bars. The experimental found that, when the gas pressure from 1-3 bar, the PE wax powder size distribution depend on the gas pressure. Notice that the d (0.9) in each run, mostly particle size distribution is in the range from 50-150 μ m. And in condition of 3 bar air pressure, the smaller than 630 μ m up to 95.57 %, amount of 130.888 μ m up to 90% and a bulk density of the PE wax powder equal to 0.4058 g/cm³. On the contrary, when the air pressure is too high, that causing the fibers of PE wax which be undesirable product.

The PE wax powder size distribution is strongly influence by air pressure. The influence of the air pressure on the PE wax powder size distribution is illustrated in Figure. 7 and 8. The experimental found that, when the Air to liquid ratio is in the optimum condition such as in the experimental of air pressure 1-3 bars can produce the fine particle and spherical. Moreover, when the operation air pressure is too high, it affected to the density gradient of the melt stream[6]. To cause the fibers are obtained in this process.

4. Conclusion

Base on the result of this study, it can be concluded that, the atomization process with the external mixing two fluid nozzle can be producing PE wax powders within the size range from 50-200 μ m. The parameters that strongly on particle size distribution and shape of PE wax power are the melt stream size, melting temperature and the air pressure. If the system was operated in the optimize condition, the atomization are able to obtained the desirable contact between the air and PE wax liquid stream. The sphere and fine particle of PE wax powder were produced as well in the process.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the NSTDA University Industry Research Collaboration, (NUI-RC), IRPC Public Company Limited for financial support. And Department of Chemical Engineering under Faculty of Engineering Prince of Songkla University Thailand for their help and advise during this study.

References

- [1]. Otaigbe, J.U. and J.M. McAvoy, *Gas atomization of polymers. I. Feasibility studies and process development*. Advances in Polymer Technology, 1998. **17**(2): p. 145-160.
- [2]. Ejim, C.E., et al., *Effects of liquid viscosity and surface tension on atomization in two-phase, gas/liquid fluid coker nozzles*. Fuel, 2010. **89**(8): p. 1872-1882.
- [3]. Tony Brajdich, M.H., Bob Lind, Glen Muir, *Atomization*. 1995.
- [4]. Strumendo, M., A. Bertuccio, and N. Elvassore, *Modeling of particle formation processes using gas saturated solution atomization*. The Journal of Supercritical Fluids, 2007. **41**(1): p. 115-125.
- [5]. Reverchon, E. and A. Antonacci, *Polymer microparticles production by supercritical assisted atomization*. The Journal of Supercritical Fluids, 2007. **39**(3): p. 444-452.
- [6]. Hani, H., *Single fluid atomization through the application of impulses to a melt*. Materials Science and Engineering: A, 2002. **326**(1): p. 92-100.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวอุบลวรรณ มะเดื่อ

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5310120114

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรศาสตรบัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา

ทุน โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม พ.ศ.
2554-2555

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Madua. U., Prasertsit. K., Innachitra. P., Keatkunboot. T., 2012. Effect of operating conditions onto the powder size distribution and shape of PE wax powder in atomization process. Proceeding of the 10th International PSU Engineering Conference, May 14-15, Songkhla, Thailand.