



การทำแห้งละอองน้ำยางธรรมชาติโดยลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์  
Drying of Natural Rubber Latex Atomization Using Hot Gas  
from Pulse Combustor

ณัฐวุฒิ หัสนะชัย

Nattawoot Hasanachai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การทำแห้งละอองน้ำยางธรรมชาติโดยลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์  
Drying of Natural Rubber Latex Atomization Using Hot Gas  
from Pulse Combustor

ณัฐวุฒิ หัสนะชัย

Nattawoot Hasanachai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ชื่อวิทยานิพนธ์      การทำแห้งละอองน้ำยางธรรมชาติโดยลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์  
 ผู้เขียน              นายณัฐวุฒิ หัสนะชัย  
 สาขาวิชา              วิศวกรรมเครื่องกล

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

..... ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)      (ดร.ฐานันตร์ศักดิ์ เทพญา)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

..... กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

..... กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)      (รองศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

..... กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)      (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

..... กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....  
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทดุสิต)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายณัฐวุฒิ หัสนะชัย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายณัฐวุฒิ หัสนะชัย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การทำห้องละอองน้ำยางธรรมชาติโดยลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์
ผู้เขียน	นายณัฐวุฒิ หัสนะชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2561

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยางภายใต้สภาวะอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยห้องเผาไหม้ที่ใช้เป็นห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ชนิดไร้วาล์ว ที่มีช่องทางเข้าอากาศทางเดียวและมีท่อส่งเป็นแบบท่อเดี่ยว ในการทดลองจะศึกษาลักษณะพฤติกรรมการไหลของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ระยะห่างจากปากทางออกท่อส่งถึงหัววัดเท่ากับ 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D โดยที่ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งเท่ากับ 47 mm และปรับเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 22, 25 และ 29 l/min เพื่อศึกษาคูพฤติกรรมการไหลของลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ และงานวิจัยนี้ได้สนใจที่จะศึกษารูปแบบของหัวฉีดที่สามารถสร้างละอองน้ำยาง โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางประกอบด้วย รูปแบบหัวฉีดที่ระยะช่องทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ อัตราการไหลของอากาศที่ 70, 80 และ 90 l/min และอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20, 40 และ 60 g/min จากนั้นจะศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย และหลังจากอบแห้งโดยได้ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผงแล้ว จะนำอนุภาคยางธรรมชาติมาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานและขนาดของอนุภาคยางธรรมชาติผงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์อิเล็กตรอนแบบจุลภาค ตามลำดับ ทั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง การทดสอบสมบัติของยางดิบและความหนืดมูนิ การทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง รวมถึงการคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมในระบบอบแห้ง

จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยเฉพาะอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง  $X/D$  เพิ่มขึ้น โดยการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ มีการกระจายได้ทั่วห้องอบ ทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพและสามารถอบแห้งละอองน้ำยางได้อย่างรวดเร็ว สำหรับผลของรูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางที่ตำแหน่งช่องทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่ารูปแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งช่องทางเข้าอากาศเอียงทำมุมกับช่องทางเข้าน้ำยาง 40 องศา มีลักษณะการกระจาย

ของละอองน้ำยางได้ดีในทุกกรณีของอัตราการไหลของอากาศ โดยที่เงื่อนไขกรณีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 90 l/min และอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20 g/min มีลักษณะกระจายของละอองน้ำยางเป็นละอองขนาดเล็กได้ดีโดยไม่เกิดการอุดตันของยางในรูหัวฉีด จากการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งละอองน้ำยางคือ เงื่อนไขกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min เมื่อนำยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยผงทัลคัมมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมยึดเกาะติดกันและมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50  $\mu\text{m}$  ถึง 300  $\mu\text{m}$  จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่ามีความเสถียรภาพทางความร้อนอยู่ที่ประมาณ 200  $^{\circ}\text{C}$  จากการทดสอบความหนืดมูนนี้พบว่ายางธรรมชาติผงมีค่าความหนืดมูนนี้เท่ากับ 43.87 และยางธรรมชาติผงมีความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งเท่ากับ 16 MPa และ 55 ตามลำดับ

สำหรับในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยคือ เงื่อนไขกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยในขณะทำการทดลองมีการกระจายอนุภาคน้ำยางได้ทั่วห้องอบ ทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพและอบแห้งละอองน้ำยางได้อย่างรวดเร็ว จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามีการกระจายตัวเป็นอนุภาคทรงกลมโดยที่ไม่ยึดเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 90  $\mu\text{m}$  ถึง 600  $\mu\text{m}$  จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางผง พบว่ามีค่าความเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติประมาณ 200  $^{\circ}\text{C}$  โดยที่ยางธรรมชาติผงมีค่าความหนืดมูนนี้ (Mooney viscosity) เท่ากับ 47.65 จากการทดสอบสมบัติทางกล พบว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าโมดูลัสที่ใกล้เคียงกับกรณีของยางแห้ง STR 5L โดยมีค่าประมาณ 10 และ 0.95 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความแข็งและระยะยืด ณ จุดขาดของยาง มีค่าเท่ากับ 59 และ 755% ตามลำดับ

Thesis Title	Drying of Natural Rubber Latex Atomization Using Hot Gas from Pulse Combustor
Author	Mr. Nattawoot Hasanachai
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2018

### ABSTRACT

The main objective of this research is to study the method for producing natural rubber powder from natural rubber latex by spray drying process under hot gas jet generated from a pulse combustor. The pulse combustor is valvelss Helmholtz type that having single tailpipe and single air inlet. In the experiments, study flow characteristics of hot air jet generated by Helmholtz pulse combustor. The distance from tailpipe outlet was varied at 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D and 8D where D was an inner diameter of tailpipe equal to 47 mm. The flow rate of LPG fuel was varied at 22, 25 and 29 l/min. In addition, the experimental study of spray nozzle configuration consisted of 3 air inlet positions. The flow rate of air inlet into the nozzle was varied at 70, 80 and 90 l/min and the flow rate of latex was varied at 20, 40 and 60 g/min. The rubber latex was sprayed from developed air spray nozzle into the drying chamber. Then the latex droplets was heated by hot air and dried in the chamber. After the drying process, the morphology and particle size of natural rubber powders were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and electron micro analyzer, respectively. The thermal properties of natural rubber powder was analyzed by thermogravimetry. The properties of raw rubber and Mooney viscosity of natural rubber powder were analyzed. The vulcanized rubber was characterized by mechanical analysis. Including the calculation of total energy consumption in the drying process.

The result showed that jet temperature and jet velocity of hot air from the pulse combustor decreased according to increasing of distance from tailpipe outlet. Especially, the jet temperature decreased rapidly. The distributing temperature of the hot air in the drying chamber generated from the pulse combustor. It is distributed throughout the chamber. Drying efficiency and rapid drying of latex. For the

effect of spray nozzle configuration at the different air inlet position. It was found that the spray nozzle configuration at the air inlet position tilt angle of 40 degrees with the latex inlet pipe provided good spraying performance in all cases of air flow rate. At the air flow rate of 90 l/min and the flow rate of latex at 20 g/min, the dispersion of the latex was very small and without the blockage of the rubber in the spray nozzle. From the study of various conditions in the spray drying process, in the case studies using talcum powder as a coating for natural rubber particles. It was found that the optimum condition for drying rubber latex was condition for the supplied flow rate of LPG fuel was 29 l/min, the entrance speed of drying chamber was 12 m/s and the flow rate of latex at 20 g/min. After the drying process, the morphology and particle size of natural rubber powders were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and electron micro analyzer, respectively. The range of particle size was found from a range of 50  $\mu\text{m}$  to 300  $\mu\text{m}$ . To examine the thermal properties of rubber powder, it was found that thermal stability was around 200  $^{\circ}\text{C}$ . From the Mooney viscosity test, it was found that the natural rubber powder had Mooney viscosity equal to 43.87. Natural rubber powder has tensile strength and hardness equal to 16 MPa and 55, respectively.

For studying various conditions in the spray drying process. In the case studies using zinc stearate as a coating of natural rubber particles. It was found that the optimum conditions for spray drying process were the condition for the supplied flow rate of LPG fuel was fixed at 29 l/min, the velocity inlet of drying chamber was 12 m/s and the flow rate of latex at 20, 40 and 60 g/min. At the time of the experiment, the temperature was distributed in the drying chamber. From the study of morphological characteristics of natural rubber particles by electron scanning electron microscope. It was found that the spherical shapes were dispersed without clinging to each other and the particle size was in the range of 90  $\mu\text{m}$  to 600  $\mu\text{m}$ . The rubber powdered has the thermal stability about 200  $^{\circ}\text{C}$ , while, the natural rubber powder having Mooney viscosity equal to 47.65. From mechanical properties testing, it was found that natural rubber powder coated with zinc stearate has the tensile strength and 100% modulus that is close to the case of STR 5L rubber block, with a value of about 10 and 0.95 MPa, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยุต นันทคุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสนอแนวทางการทำวิจัยและเสียสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนถูกต้องสมบูรณ์ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิริยะ ทองเรือง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา Mr. Peter Brenner และรองศาสตราจารย์ ดร.ประसान สถิตย์เรืองศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรภายในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยโดยทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับเครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณบุคลากร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านคำแนะนำเรื่องสารเคมีที่ใช้เคลือบผิวอนุภาคยางและการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ณัฐวุฒิ หัสนะชัย



## สารบัญ

หน้า	
สารบัญ	(10)
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(24)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	<b>4</b>
2.1 ทฤษฎีทางธรรมชาติ	4
2.2 การแปรรูปทางธรรมชาติขั้นต้น	5
2.2.1 การผลิตน้ำยางข้น	6
2.2.2 การผลิตยางแท่ง	6
2.2.3 การผลิตยางแผ่นรมควัน	7
2.3 กลไกการแตกเป็นละอองฝอย	9
2.4 การอบแห้งระบบพ่นฝอย	12
2.4.1 การทำละอองฝอย	13
2.4.2 ลักษณะการสัมผัสของละอองฝอยกับลมร้อน	15
2.4.3 กลไกการระเหยน้ำจากละอองของเหลว	17
2.4.4 การแยกผงผลิตภัณฑ์ออกจากลมร้อน	17
2.5 ห้องเผาไหม้ระบบพัลส์	18
2.6 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพ่นฝอยระบบพัลส์	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง	23
2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวกับยางธรรมชาติผง	23
2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาระบบการเผาไหม้แบบพัลส์	26
2.7.3. การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร	31
<b>บทที่ 3 ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย</b>	<b>36</b>
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	36
3.2 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบพัลส์	38
3.3 รูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง	39
3.4 การศึกษาลักษณะพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์	41
3.5 การศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง	42
3.6 การศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	43
3.7 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการแห้งผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผงและพลังงานที่ใช้ในการอบ	48
3.7.1 การตรวจหาความชื้นของยางแห้งโดยวิธีการอบผลิตภัณฑ์	48
3.7.1 พลังงานที่ใช้ในการอบ	48
3.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัญญาณของอนุภาคยางธรรมชาติผง	49
3.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผง	50
3.10 การทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติ	50
3.11 การทดสอบความเหนียว	51
3.12 การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์	52
3.13 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง	54
3.13.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	54
3.13.2 การทดสอบความแข็ง	55
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b>	<b>56</b>
4.1 ผลการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์	56
4.1.1 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส	56

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลง อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส	57
4.1.3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแก๊ส	58
4.2 ผลการศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง	59
4.2.1 ผลของรูปร่างหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน	59
4.2.2 ผลของรูปร่างหัวฉีดที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน	60
4.2.3 ผลของรูปร่างหัวฉีดที่อัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน	61
4.3 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษา ใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ	63
4.3.1 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	63
4.3.1.1 ผลของความเร็วทางเข้าห้องอบ	63
4.3.1.2 ผลของการปรับเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส	69
4.3.1.3 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง	74
4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง	80
4.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผง	83
4.3.4 ผลการทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของ ยางธรรมชาติผง	86
4.3.5 ผลการทดสอบความหนืดมูนิ	88
4.3.6 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์	88
4.3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง	90
4.3.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	90
4.3.7.2 ผลการทดสอบความแข็ง	91
4.4 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษา ใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ	93
4.4.1 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	93
4.4.1.1 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีความเร็วทางเข้า ห้องอบ 5.5 m/s	93

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1.2 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีความเร็วทางเข้า ห้องอบ 8.7 m/s	100
4.4.1.3 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีความเร็วทางเข้า ห้องอบ 12 m/s	107
4.4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง	113
4.4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผง	116
4.4.4 ผลการทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของ ยางธรรมชาติผง	123
4.4.5 ผลการทดสอบความหนืดมูนิ	124
4.4.6 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์	124
4.4.7 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง	126
4.4.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	126
4.4.7.2 ผลการทดสอบความแข็งของยาง	129
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	132
5.1 สรุปผลการวิจัย	132
5.2 ข้อเสนอแนะ	134
<b>บรรณานุกรม</b>	135
<b>ภาคผนวก ก. ความเป็นมาของการออกแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง</b>	138
<b>ภาคผนวก ข. ความเป็นมาของการออกแบบและพัฒนาห้องอบ</b>	145
<b>ภาคผนวก ค. บทความสำหรับเผยแพร่ 1</b>	156
<b>ภาคผนวก ง. บทความสำหรับเผยแพร่ 2</b>	165
<b>ภาคผนวก จ. บทความสำหรับเผยแพร่ 3</b>	173
<b>ภาคผนวก ฉ. บทความสำหรับเผยแพร่ 4</b>	182
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	193

## รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำยางชั้นธรรมชาติตามทีสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thai industrial standard) กำหนด	6
ตารางที่ 2.2 มาตรฐานยางแท่ง STR 20 ตามทีตลาดสินค้าเกษตรล่งหน้าแห่งประเทศไทยกำหนด	7
ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของการอบแห้งระหว่างระบบอบแบบพัลส์และระบบพ่นฝอยแบบทั่วไปทีใช้หัวฉีดและจานหมุน	22
ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติชั้น	37
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขทีใช้ในการศึกษา	39
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขทีใช้ในการศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองฝอย	40
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขทีใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	47
ตารางที่ 3.5 สูตรยางคอมพาวด์ทีมีชนิดของยางแตกต่างกันและเวลาในการบดผสมสารเคมีแต่ละชนิด	54
ตารางที่ 4.1 ผลของการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางแท่ง STR 5L และยางธรรมชาติผงทีเคลือบด้วยทัลคัม	88
ตารางที่ 4.2 สรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางธรรมชาติแต่ละชนิด กรณีศึกษาโดยใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ	92
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติสำหรับกรณีศึกษาใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ	123
ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางแต่ละชนิด	124
ตารางที่ 4.5 สรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติยางดิบของยางธรรมชาติแต่ละชนิด	130
ตารางที่ 4.6 สรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติแต่ละชนิด	131

## รายการภาพประกอบ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบการแตกตัวเป็นละออง	9
รูปที่ 2.2 ลักษณะการแตกตัวของหยดของเหลวกรณีของเหลวมีแรงตึงผิวต่ำและสูง	10
รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายของละอองน้ำมันก๊าดเมื่อมีการเพิ่มความดันที่หัวฉีด	10
รูปที่ 2.4 ลักษณะหัวฉีดแบบ Airblast และตัวอย่างภาพการแตกตัวเป็นละอองของแผ่นของเหลวที่เกิดขึ้น	11
รูปที่ 2.5 การแตกตัวของละอองน้ำด้วยหัวฉีดแบบหมุนเหวี่ยง	11
รูปที่ 2.6 การแตกตัวเป็นละอองของเจ็ทของเหลว 2 ลำที่ไหลปะทะกัน เมื่อเพิ่มความดันของเจ็ทของเหลว	12
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	13
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหัวฉีดอัดแบบหมุนเหวี่ยงและลักษณะละอองจากหัวฉีด	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของหัวฉีดอัดแบบใบพัดและลักษณะละอองจากหัวฉีด	14
รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบหมุนและลักษณะของละอองฝอย	15
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของหัวฉีดของไหลสองชนิด	15
รูปที่ 2.12 ลักษณะการสัมผัสของละอองฝอยกับลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย	16
รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของระบบไซโคลน	17
รูปที่ 2.14 แผนภาพของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz	18
รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้พัลส์แบบมีวาล์ว	19
รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้	20
รูปที่ 2.17 ระบบทำละอองฝอยด้วยห้องเผาไหม้แบบพัลส์	21
รูปที่ 2.18 ภาพายางธรรมชาติผงที่กำลังขยายต่าง ๆ	23
รูปที่ 2.19 การกระจายขนาดของอนุภาคโดยปริมาตรของ NR:MD สเปรย์ผงแห้งที่ 120 °C ของอากาศที่ไหลเข้า	24
รูปที่ 2.20 ภาพการกระจายตัวของอนุภาค: a) SBR, b) SBR 12.5M, c) SBR-25M, d) SBR-50M, e) SBR-50M-7S, f) SBR-50M-50S, g) SBR-50M-25S, h) SBR-50M-12.5S	25
รูปที่ 2.21 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบพัลส์	28
รูปที่ 2.22 กราฟความเร็วแก๊สขึ้นอยู่กัเวลาที่ปากทางออกท่อส่ง	28
รูปที่ 2.23 กราฟอุณหภูมิแก๊สขึ้นอยู่กัเวลาที่ปากทางออกท่อส่ง	29
รูปที่ 2.24 แผนภาพของห้องอบแห้งแบบพัลส์	31

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 ชุดผลิตเม็ดแป้งเค้ก	31
รูปที่ 2.26 ระบบอบแห้งและการสอดท่อลำเลียงในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์	32
รูปที่ 2.27 ตัวอย่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารละลายขุ่น	33
รูปที่ 2.28 ระบบอบแห้งที่ต่อกับห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ติดตั้งท่อเพิ่มอากาศ	33
รูปที่ 2.29 ห้องเผาไหม้แบบพัลส์เพื่อใช้สำหรับการอบแห้งที่ติดตั้งโรตารีวาล์วควบคุมอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้	34
รูปที่ 2.30 ระบบอบแห้งสำหรับห้องเผาไหม้แบบพัลส์	34
รูปที่ 3.1 ผงทัลคัมที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ	36
รูปที่ 3.2 ผงซิงค์สเตียเรทที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ	37
รูปที่ 3.3 แผนภาพของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา	38
รูปที่ 3.4 ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา	38
รูปที่ 3.5 รูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง	40
รูปที่ 3.6 หัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง	40
รูปที่ 3.7 รูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน	41
รูปที่ 3.8 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์	42
รูปที่ 3.9 แผนภาพชุดทดลองสำหรับใช้ในการศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง	43
รูปที่ 3.10 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	44
รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายชุดทดลองที่ใช้ศึกษาในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	45
รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายส่วนประกอบของชุดทดลองที่ใช้ศึกษาในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	46
รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น FEI 400 (Czech Republic)	49
รูปที่ 3.14 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA8000, Perkin Elmer	50
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Rubber Viscosity Tester) รุ่น MV2000	52
รูปที่ 3.16 เครื่องผสมยางแบบปิด (Internal mixer) รุ่น HAAK PolyLab OS	53
รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบการสุกของยาง (Rubber Vulcanization Tester) รุ่น MDR 2000	53
รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง	54

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.19 ขนาดของชิ้นยางทดสอบรูปดัมเบลมาตรฐาน ASTM D412 (Die C)	55
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness Tester) รุ่น digitest II	55
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจลลุ่มร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่แตกต่างกัน	57
รูปที่ 4.2 ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจลลุ่มร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่แตกต่างกัน	58
รูปที่ 4.3 ผลการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติกรณี $Q_a=70$ l/min, $Q_L=40$ g/min และตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศ 1, 3, 12 mm	60
รูปที่ 4.4 ผลการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติของหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศ 3 mm, $Q_L=40$ g/min และ $Q_a=70, 80, 90$ l/min	61
รูปที่ 4.5 ผลการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติของหัวฉีดที่ระยะท่อทางเข้าอากาศ 3 mm, $Q_a=90$ l/min และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min	62
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_f=5.5, 8.7, 12$ m/s (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	64
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_f=5.5$ m/s (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	64
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_f=8.7$ m/s (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	65
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_f=12$ m/s (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	65



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_i=5.5, 8.7, 12$ m/s (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	66
รูปที่ 4.11 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_i=5.5$ m/s	67
รูปที่ 4.12 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_i=8.7$ m/s	67
รูปที่ 4.13 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $Q_L=20$ g/min และ $V_i=12$ m/s	68
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $V_i=12$ m/s, $Q_L=20$ g/min และ $Q_{LPG}=22, 25, 29$ l/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	70
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $V_i=12$ m/s, $Q_L=20$ g/min และ $Q_{LPG}=22$ l/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	70
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $V_i=12$ m/s, $Q_L=20$ g/min และ $Q_{LPG}=25$ l/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	71
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $V_i=12$ m/s, $Q_L=20$ g/min และ $Q_{LPG}=22, 25, 29$ l/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	72
รูปที่ 4.18 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $V_i=12$ m/s, $Q_L=20$ g/min และ $Q_{LPG}=22$ l/min	72
รูปที่ 4.19 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $V_i=12$ m/s, $Q_L=20$ g/min และ $Q_{LPG}=25$ l/min	73

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาค อย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	74
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายใน ห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิว อนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	75
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายใน ห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิว อนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=40$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	76
รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายใน ห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิว อนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	76
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	77
รูปที่ 4.25 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	78
รูปที่ 4.26 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	79
รูปที่ 4.27 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคอย่างธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	79
รูปที่ 4.28 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคอย่างธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	80
รูปที่ 4.29 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคอย่างธรรมชาติที่กำลังขยาย 50 เท่า	81
รูปที่ 4.30 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคอย่างธรรมชาติที่กำลังขยาย 200 เท่า	82

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.31 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ผงทลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	84
รูปที่ 4.32 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ผงทลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	84
รูปที่ 4.33 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ผงทลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	85
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีใช้ผงทลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min	86
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบผลของความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางระหว่างกรณีของยางแท่ง STR 5L กับกรณียางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทลคัม ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	87
รูปที่ 4.36 ค่าทอร์คระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์	89
รูปที่ 4.37 พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์	90
รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยาง	91
รูปที่ 4.39 ค่าโมดูลัสและความแข็งของยาง	92
รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=20$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	94
รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=40$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	95
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	96

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	97
รูปที่ 4.44 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	98
รูปที่ 4.45 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	98
รูปที่ 4.46 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	99
รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=20$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	101
รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=40$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	102
รูปที่ 4.49 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	103
รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	104
รูปที่ 4.51 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเดี่ยเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	105

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.52 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	105
รูปที่ 4.53 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	106
รูปที่ 4.54 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายใน ห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิว อนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	107
รูปที่ 4.55 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายใน ห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิว อนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=40$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	108
รูปที่ 4.56 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายใน ห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิว อนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	109
รูปที่ 4.57 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)	110
รูปที่ 4.58 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	111
รูปที่ 4.59 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	112
รูปที่ 4.60 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	112
รูปที่ 4.61 การเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	113
รูปที่ 4.62 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 50 เท่า	114

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.63 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า	115
รูปที่ 4.64 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	116
รูปที่ 4.65 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	117
รูปที่ 4.66 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	117
รูปที่ 4.67 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	118
รูปที่ 4.68 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	119
รูปที่ 4.69 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=8.7$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	119
รูปที่ 4.70 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	120
รูปที่ 4.71 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=40$ g/min	121
รูปที่ 4.72 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=60$ g/min	121
รูปที่ 4.73 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=5.5, 8.7, 12$ m/s และ $Q_L=20, 40, 60$ g/min	122
รูปที่ 4.74 การเปรียบเทียบค่าทอร์คระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์	125
รูปที่ 4.75 พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์	126
รูปที่ 4.76 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง	127
รูปที่ 4.77 ค่าโมดูลัส	128
รูปที่ 4.78 ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยาง	128
รูปที่ 4.79 ค่าความแข็งของยาง	129

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

$D_{Tailpipe}$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อส่ง (mm)
$Q_{LPG}$	คือ	อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส (l/min)
$Q_a$	คือ	อัตราการไหลของอากาศ (l/min)
$Q_L$	คือ	อัตราการไหลของน้ำยาง (g/min)
$Q_{Talc}$	คือ	อัตราการป้อนผงทัลคัม (g/min)
$Q_{Zinc}$	คือ	อัตราการป้อนซิงค์สเตียเรท (g/min)
$V_i$	คือ	ความเร็วทางเข้าของห้องอบ (m/s)
% $db$	คือ	ความชื้นเศษส่วนมาตรฐานแห้ง (% dry-basis)
$W$	คือ	น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ ที่ เวลาใด ๆ
$D$	คือ	น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์หลังจากการอบ
$E_{P_{heater}}$	คือ	พลังงานไฟฟ้าจากการใช้ฮีทเตอร์ (kWh)
$E_{P_{blower}}$	คือ	พลังงานไฟฟ้าจากการใช้พัดลมโบลเวอร์ (kWh)
$I$	คือ	กระแสของมอเตอร์ที่วัดได้จากการทดลอง (Ampere)
$V$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Volt)
$pf$	คือ	ตัวประกอบกำลัง
$E_{Q_{LPG}}$	คือ	พลังงานความร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG (kWh)
$\dot{m}_{f_{LPG}}$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส LPG ที่วัดค่าได้ (kg/s)
$HHV$	คือ	ค่าความร้อนคงที่ของแก๊ส LPG (MJ/kg)
$hr$	คือ	จำนวนชั่วโมงของการใช้พลังงาน (h)
$PRI$	คือ	ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง
$P_o$	คือ	ค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดเริ่มแรก
$P_{30}$	คือ	ค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดที่หลังอบ

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันยางธรรมชาติถือเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย โดยในปี 2560 ประเทศไทยได้ผลิตยางธรรมชาติมากกว่า 4 ล้านตัน โดยจากรายงานของกลุ่มวิจัยระหว่างประเทศ การแบ่งส่วนการผลิตยางธรรมชาติ ประเทศไทยคิดเป็นสัดส่วนประมาณหนึ่งในสามของการผลิตยางธรรมชาติของโลก ส่วนใหญ่มีการส่งออกในหลากหลายรูปแบบ เช่น ยางแผ่น ยางแท่ง และน้ำยางข้น

ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และการกระด้างตัวที่ต่ำเยี่ยม เป็นต้น ด้วยสมบัติเด่นเหล่านี้จึงทำให้ยางธรรมชาติถูกนำมาใช้งานในหลากหลายผลิตภัณฑ์ เช่น ยางรถยนต์ พื้นรองเท้า รวมไปถึงผลิตภัณฑ์เชิงวิศวกรรมขั้นสูงอื่น ๆ ส่งผลให้ยางธรรมชาติสามารถแข่งขันกับยางสังเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตามข้อด้อยหลักของยางธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงทำให้กระบวนการแปรรูปยางธรรมชาติมีความจำเป็นต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอนและใช้พลังงานสูง อาทิเช่น กระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุล (Mastication) และกระบวนการผสมสารเคมี (Compounding) เป็นต้น

น้ำยางธรรมชาติจะถูกแปรรูปให้อยู่ในรูปของยางแปรรูปขั้นต้น เช่น ยางแผ่นแห้ง ยางแผ่นรมควัน และยางแท่ง หลังจากนั้นจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ยาง เช่น ยางรถยนต์ ถุงมือยาง ต่อไป ซึ่งในการแปรรูปเบื้องต้นเป็นยางแผ่นนั้นจะต้องทำให้ยางแข็งตัวเป็นก้อนแล้วผ่านเครื่องรีด หลังจากนั้นนำไปอบในหีบอบรมควัน หรือในการแปรรูปเป็นยางแท่งจำเป็นต้องตัดย่อยยางแผ่นและล้างยางก่อนบรรจุกระบะเข้าหีบอบแบบอูโมงค์ หลังอบจนแห้งแล้วจึงถูกอัดให้เป็นก้อน ซึ่งต้องใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่จำนวนมากในการผลิตและใช้พลังงานมหาศาลเนื่องด้วยต้นทุนเรื่องพลังงานและเครื่องจักร หากสามารถผลิตยางธรรมชาติผงที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ จากน้ำยางธรรมชาติโดยตรงแล้ว นอกจากจะลดการใช้เครื่องจักรในการแปรรูปแบบเดิมแล้วยังช่วยลดพลังงานในกระบวนการตัดย่อยและผสมสารเคมีเพื่อแปรรูปยางเป็นผลิตภัณฑ์ได้ด้วย

ยางธรรมชาติผงเป็นยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กประมาณ 0.5-1.0 mm ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการเป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมโพลีเมอร์ เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลที่มีโมดูลัสแรงดึงสูง จึงทำให้ยางชนิดนี้สามารถนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยการผสมในเครื่องเอกซ์ทรูดแบบต่อเนื่อง โดยไม่ต้องผ่านการบดหรือตัดแล้วนำยางผสมที่ได้ไปใช้งานทันที ดังนั้นการผลิตยางธรรมชาติผง จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดความยุ่งยากและลดพลังงานในการแปรรูป เนื่องจากยางผงที่ผลิตขึ้นเป็นเม็ด จะสามารถนำมาแปรรูปได้ทันทีในลักษณะแบบต่อเนื่องได้ในทำนองเดียวกับวัสดุสังเคราะห์ เช่น PVC เป็นต้น อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติดิบมีสมบัติการเหนียวติด (Tack) ที่ดีเยี่ยม



เมื่อนำมาเตรียมเป็นยางธรรมชาติผง เม็ดยางที่เตรียมได้จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนใหม่ ดังนั้นการเตรียมยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติจึงจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีในการเคลือบผิวอนุภาค เพื่อป้องกันเม็ดยางมารวมตัวกันใหม่ โดยยางธรรมชาติผงสามารถเตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยหรือสเปรย์ (Spray drying) ซึ่งวิธีนี้มีจุดเด่นหลายประการ เช่น สามารถสร้างละอองหรือหยดน้ำยางที่มีขนาดเล็กเป็นอนุภาคทรงกลมและสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคให้มีความสม่ำเสมอในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถที่จะประยุกต์หรือทำการขยายไปสู่กระบวนการผลิตในระดับภาคอุตสาหกรรมได้ โดยในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะเริ่มจากนำน้ำยางข้นมาพ่นหรือสเปรย์ให้เป็นละอองฝอย เข้าไปในห้องอบลมร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 90 °C โดยลมร้อนที่เป่าเข้ามาในห้องอบนี้จะมีส่วนผสมของสารป้องกันการติดอยู่ ซึ่งอาจเป็นผงแป้งที่มีความละเอียดมากหรือซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) จากนั้นส่วนที่เป็นน้ำจะระเหยออกแล้วทำให้อนุภาคยางตกลงมา

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการผลิตยางธรรมชาติผงยังไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีปัญหาการติดอุดตันของยางในระบบพ่นฝอยและมีอัตราการผลิตที่ต่ำ ตลอดถึงการเกาะและไหลติดกันของยาง จนถึงปัจจุบันนี้ได้มีงานวิจัยที่ใช้เครื่องสเปรย์พ่นฝอยทดสอบผลิตยางธรรมชาติผงได้แล้วสำเร็จ แต่เป็นเพียงการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น ยังไม่สามารถผลิตเป็นปริมาณที่มากได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการผลิตยางธรรมชาติผง โดยการออกแบบหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะ ใช้ลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่มีสมบัติเหมือนคลื่นกระแทกปะทะกับหยดหรือฟิล์มของน้ำยางให้แตกกระจายเป็นละอองฝอย แล้วไหลไปกักระแสลมร้อนแบบพัลส์ จนเม็ดยางแห้ง ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดปัญหาอุดตันในระบบพ่นฝอยแบบเดิม และการสั้นของกระแสลมร้อนจะช่วยเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปยังเม็ดยาง ทำให้เม็ดยางแห้งเร็วขึ้น และออกแบบห้องสำหรับอบแห้งและดักจับละอองน้ำยางที่ลอยอยู่ในลมร้อน พร้อมกับกับระบบเคลือบผงแป้งหรือซิงค์สเตียเรท เพื่อให้สามารถเตรียมยางธรรมชาติผงที่ไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) ศึกษาและพัฒนาระบบพ่นฝอย โดยใช้ลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์
- (2) ศึกษาและพัฒนาระบบอบแห้งและดักจับอนุภาคละอองน้ำยาง โดยใช้เจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบปล่อยน้ำอย่างโดยใช้เจลทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์
- (2) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบอบแห้งยางธรรมชาติผงโดยใช้เจลทลมร้อนและระบบดักจับยางธรรมชาติผง รวมถึงระบบเคลือบผิวยางธรรมชาติผง
- (3) ยางธรรมชาติผงที่ผลิตได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ไม่เกิน 1 mm
- (4) สารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผง โดยใช้ผงทัลคัม (Talcum powder) และผงซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate)
- (5) ทดสอบผลิตยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากน้ำยางข้น ชนิดแอมโมเนียสูง (HA) ที่มีปริมาณเนื้อยาง 60% โดยน้ำหนัก และมีสารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย (Ammonia) เท่ากับ 0.7%
- (6) ศึกษาคุณสมบัติของยางธรรมชาติผง เช่น สมบัติของยางดิบ ลักษณะทางสัณฐาน วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พลังงานการแปรรูป รวมถึงสมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งของยาง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) เป็นแนวทางใหม่ในการลดพลังงานในภาคอุตสาหกรรมการแปรรูปยาง
  - (2) ภาคอุตสาหกรรมสามารถนำเทคโนโลยีไปต่อยอดหรือประยุกต์ใช้ได้
  - (3) เพิ่มมูลค่ายางพารา ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทย
- หน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย: ภาคอุตสาหกรรมแปรรูปยางขั้นต้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทฤษฎียางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ที่มีหน่วยชนิดเดียวกัน เป็นไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นโมเลกุล ยาวเรียกว่า พอลิไอโซพรีน  $(C_5H_8)_n$  โดย  $n$  มีค่าตั้งแต่ 5,000-15,000 ยางธรรมชาติประกอบด้วย โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000-3,000,000 และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มี น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 [1] โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีลักษณะเป็น cis-isomer มากกว่า 99.99 % และมี Trans-isomer ปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงมักจะเรียกยางธรรมชาติว่า cis-1,4-polyisoprene

น้ำยางสดจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม มีอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ อนุภาคยางมีรูปร่างกลมหรือรูปกลมแป้น มีขนาด 0.05-5  $\mu m$  ความหนาแน่น 0.975-0.980 g/ml มีความเป็นกรด - ด่างประมาณ 6.5-7.0 โดยทั่วไปปริมาณเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติมีค่าในช่วงตั้งแต่ 25-45% ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.934 ที่ 20 °C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางเย็นตัวลง

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ คือ

(1) การมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ทำใหยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

(2) มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ดี แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย จึงเป็นสาเหตุการเสื่อมของยางธรรมชาติ

(3) มีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวหยุกไปมาและยืดหยุ่นได้ง่าย ทำใหยางธรรมชาติคงสภาพความยืดหยุ่น (Elasticity) ได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

(4) โครงสร้างโมเลกุลที่สมำเสมอทำใหยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืด จึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง และทำให้มีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (Green strength) สูง และความเหนียวติดกัน (Tack) ดี

(5) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำใหยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบด เพื่อให้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปแปรรูป

จากสมบัติเด่นต่าง ๆ ของยางธรรมชาติ ทำใหยางธรรมชาติถูกใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อแปรรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมหลากหลายชนิด เช่น ยางรถยนต์ ยางรองคอกสะพาน และอื่น ๆ อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และมีลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นอย่างมากกล่าวคือ ยางจะเหนียวเฝิ้ม

เนื่องจากสัมผัสกับความชื้น เนื่องจากเกิดการแตกสลายของโมเลกุลของยาง แต่ยางธรรมชาติจะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การนำยางมาใช้ประโยชน์จำเป็นต้องผ่านกระบวนการแปรรูป เพื่อให้ยางสามารถใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ได้

โดยในกระบวนการแปรรูปจะเริ่มตั้งแต่การนำยางมาลดน้ำหนักโมเลกุล (Mastication) การนำยางดิบมาผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน สารกระตุ้น สารต้านการเสื่อมสารตัวเติม และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวเรียกว่ายางคอมปาวด์ (Rubber compound) เมื่อนำยางคอมปาวด์ที่ได้ถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า “วัลคาไนเซชัน” (Vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วเรียกว่า “ยางวัลคาไนซ์” (Vulcanized rubber) ซึ่งยางที่ผ่านกระบวนการนี้แล้ว สมบัติของยางที่ได้จะมีความเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางถูกเชื่อมขวาง (Crosslink)

อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลายประการ เช่น ความต้านทานต่อความร้อน และออกซิเดชันต่ำ โดยข้อด้อยนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารต้านการเสื่อมลงไปในสูตรยาง ข้อด้อยด้านแปรรูปเป็นข้อด้อยที่ต้องตระหนักถึงอีกประการหนึ่ง เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และยางธรรมชาติแข็งเมื่อเก็บเป็นเวลานาน (Storage hardening) ส่งผลให้ต้นทุนของการแปรรูปยางธรรมชาติสูง เพราะจะต้องใช้พลังงานในการแปรรูปที่สูงกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ การเตรียมยางธรรมชาติผงจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดข้อด้อยดังกล่าวของยางธรรมชาติ

## 2.2 การแปรรูปยางธรรมชาติขั้นต้น

น้ำยางสด (Latex) ที่ได้จากการกรีดต้นยางออกมาใหม่ ๆ จะอยู่ในสภาพที่เรียกว่า Colloids ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำอยู่ประมาณ 60% ส่วนที่เป็นของแข็งแต่ไม่ใช่อะไร เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต มีอยู่ประมาณ 5% มีทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและสารแขวนลอย ส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่เป็นยาง (Rubber hydrocarbon) ในลักษณะของอนุภาคแขวนลอยจะเป็นของเหลว

เมื่อได้น้ำยางสดจากต้นยาง หากไม่มีการรักษาสภาพน้ำยาง จุลินทรีย์ในอากาศจะปะปนในน้ำยางและใช้สารกลุ่มน้ำตาลเป็นอาหารทำให้เกิดความเป็นกรด นั่นคือมีอนุมูลบวกเกิดขึ้น และเกิดปฏิกิริยาสะเทินกับอนุมูลลบรอบ ๆ ผิวอนุภาคยาง ทำให้น้ำยางเสียสภาพก่อนจะนำไปแปรรูป ดังนั้นจึงต้องมีการรักษาสภาพน้ำยางโดยการเติมสารเคมี เช่น สารละลายแอมโมเนีย ร้อยละ 0.05 ต่อ น้ำหนักน้ำยาง หรือสารละลายโซเดียมซัลไฟท์ ร้อยละ 0.02-0.05 ต่อ น้ำหนักน้ำยาง

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดต้นยาง ปัจจุบันถูกนำไปแปรรูปขั้นต้นเป็น น้ำยางข้น หรือ ยางแท่ง ยางแผ่นแท่ง ยางแผ่นรมควัน ยางก้อนถ้วยและยางเครพ เป็นต้น

### 2.2.1 การผลิตน้ำยางชั้น

การผลิตน้ำยางชั้นในไทยส่วนใหญ่ใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงสามารถทำได้โดยนำน้ำยางสดที่เติมสารรักษาสภาพจำพวกแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) หรือซิงค์ออกไซด์ ( $\text{ZnO}$ ) ปั่น แยกเป็น 2 ส่วน จะได้ส่วนที่เป็นน้ำยางชั้นซึ่งมีความเข้มข้นของเนื้อยางประมาณร้อยละ 60 ที่เหลือเป็นหางน้ำยาง สำหรับส่วนที่เป็นน้ำยางชั้นนั้น เมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้นร้อยละ 0.7 จะได้เป็นน้ำยางชั้นชนิด HA (High Ammonia) หรือเมื่อเติมสารละลายแอมโมเนียความเข้มข้นร้อยละ 0.2 และสารช่วยรักษาสภาพน้ำยางอื่นๆ จะได้เป็นน้ำยางชั้นชนิด LA (Low Ammonia) ส่วนหางน้ำยางเมื่อนำมาไล่แอมโมเนียออกแล้วปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกแล้วนำไปผ่านกระบวนการรีดหรือตัดย่อย จะได้เป็นยางสกิมเครพหรือสกิมบล็อกออกมา สำหรับน้ำยางชั้นที่ได้นี้ส่วนหนึ่งจะนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ชั้นปลาย เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง ที่นอนฟองน้ำ และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น ซึ่งในตารางที่ 2.1 จะแสดงคุณสมบัติของน้ำยางชั้นธรรมชาติ ตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thai industrial standard) กำหนด

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำยางชั้นธรรมชาติตามที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (Thai industrial standard) กำหนด

ส่วนประกอบ		ชนิด HA	ชนิด LA
Total solids content	%	≥ 61.00	≥ 61.00
Dry rubber content	%	≥ 60.00	≥ 60.00
Ammonia Content (on total weight)	%	≥ 0.65-0.75	≥ 0.60
Non-Rubber solid	%	≤ 1.70	≤ 1.70
pH value		≥ 0.60	≤ 0.29
KOH number		≤ 1.00	≤ 1.00
Volatile fatty acid number		≤ 0.20	≤ 0.20
Mechanical stability time @55% T.S. (ASTM)	Secs	≥ 650	≥ 650
Magnesium Content (on solids), PPM		≤ 40.00	≤ 40.00

### 2.2.2 การผลิตยางแท่ง

ในกระบวนการผลิตยางแท่ง ยางที่ถูกย่อยเป็นเม็ดเล็ก ๆ จะถูกนำมาบรรจุแบบหลวม ๆ ในกระบะอบ โดยก่อนการอบแห้งมีการเป่าลมผ่านเม็ดยางในกระบะเพื่อไล่ไอน้ำและสิ่งสกปรกออก แล้วจึงเข้าเตาอบเพื่อไล่ไอน้ำและสิ่งระเหยที่มีอยู่ในเม็ดยางออกไปด้วยความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนนี้ได้จากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงในเตาเผา แล้วปล่อยความร้อนออกมาตามท่อ มีพัดลมเป่า

เพื่อให้ความร้อนกระจายและถ่ายเททั่วถึงภายในเตา โดยอุณหภูมิในเตาอบอยู่ในช่วง 100-125 °C และใช้เวลาอบประมาณ 3-4 ชั่วโมง เนื่องจากในกระบวนการผลิตยางแท่ง การอบยางเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานและเวลามาก ดังนั้นการพัฒนากระบวนการอบแห้งยางที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถลดเวลาในการอบและประหยัดพลังงานที่ใช้ ทำให้สามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิต

แต่ปัจจุบันการอบแห้งยางนั้นเม็ดยางจะถูกบรรจุในกระบะอบยางรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป่าให้ลมร้อนผ่านชั้นยาง แต่เนื่องจากชั้นเม็ดยางที่บรรจุในกระบะนั้นมีความหนา (ประมาณ 30 cm) ซึ่งต้องใช้ความดันลมที่สูงเพื่อให้ลมร้อนผ่านชั้นยางได้ทั่วถึง จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการอบมาก และโดยทั่วไปแล้วชั้นยางด้านนอกที่สัมผัสกับลมร้อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่ายางที่อยู่ด้านใน ทำให้ยางจะเริ่มแห้งจากผิวด้านนอกที่สัมผัสลมร้อนแล้วภายในจึงค่อยๆ เริ่มแห้งตามลำดับ ดังนั้นในกรณีที่ชั้นยางหนามากอาจจะทำให้ยางแห้งไม่สม่ำเสมอเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของยางแท่งที่สำคัญนอกเหนือสิ่งสกปรกที่เจือปน ซึ่งมาตรฐานยางแท่ง STR 20 ตามที่ตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าแห่งประเทศไทย (AFET) กำหนด จะแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานยางแท่ง STR 20 ตามที่ตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าแห่งประเทศไทยกำหนด

Properties	Specification
Dirt content (%wt.)	≤ 0.16
Ash content (%wt.)	≤ 0.80
Nitrogen (%wt.)	≤ 0.60
Initial Plasticity	≤ 0.80
Initial Plasticity (Po)	33 ± 3
Plasticity Retention Index (PRI)	55 ± 5
Colour Lovibond Scale	-
Mooney Viscosity ML (1+4) 100C	80 ± 10
Conlour Coding Marker	Red

### 2.2.3 การผลิตยางแผ่นรมควัน

การรมควันยางแผ่นเป็นกระบวนการทำให้ยางแผ่นแห้งและสุก เพื่อป้องกันการเกิดราและสามารถรักษาคุณภาพของยางแผ่นได้นาน โดยทั่วไปยางแผ่นดิบที่ผ่านการรีดจากเครื่องรีดจะมีความชื้นในเนื้อยางอยู่ประมาณ 60% มาตรฐานแห้ง หลังจากนั้นจะนำยางมาแขวนผึ่งแห้งให้สะอาด น้ำก่อนเข้าห้องรมควัน การรมควันยางแผ่นจะทำให้ยางแผ่นที่มีความชื้นประมาณ 40% แห้งจนเหลือความชื้นประมาณ 0.3-0.4% ในการอบแห้งรมควันยางแผ่นจะใช้ห้องปิด มีเตาเผาไม้ฟืนอยู่ด้านหลัง

ต่ำจากพื้นห้องประมาณ 1 m ความร้อนและความชื้นจากการเผาไหม้จะไหลเข้าห้องทางพื้นด้านล่างของห้อง และไหลผ่านยางแผ่นที่แขวนแล้วไหลออกทางช่องระบายอากาศบนเพดานห้องที่มีบานเปิด-ปิด สามารถควบคุมการระบายอากาศได้ การแห้งของยางแผ่นสังเกตได้จากลักษณะของแผ่นยาง เมื่อยางแห้งจะไม่มีส่วนชุ่มน้ำในเนื้อยางแผ่นซึ่งยางแผ่นรมควันที่มีคุณภาพดีนั้น ในเนื้อยางแผ่นจะไม่มีสิ่งสกปรกและฟองอากาศ ปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการรมควันจะมีค่าอยู่ระหว่าง 49-63 °C โดยในวันแรกจะรมยางที่อุณหภูมิประมาณ 49-52 °C และจะค่อยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เพราะถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปผิวยางแผ่นจะแห้งเร็วทำให้เนื้อยางหดตัวบิดปากรูซึม ทำให้น้ำที่เหลือซึมออกมาไม่ได้ถูกกักอยู่ในเนื้อยางเมื่อได้รับความร้อนจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอและกลายเป็นฟองอากาศค้างอยู่ในเนื้อยางแผ่น ทำให้ได้ยางแผ่นรมควันเกรดต่ำลง การควบคุมอุณหภูมิในห้องรมควันทำได้โดยการควบคุมปริมาณการเผาไหม้ไม้ฟืน โดยการใส่ไม้ฟืนอย่างสม่ำเสมอ 2-3 ชั่วโมงต่อครั้ง เพื่อควบคุมให้ห้องรมควันร้อนอยู่ประมาณ 50-70 °C อุณหภูมิสูงสุดต้องควบคุมไม่ให้เกิน 70 °C มิฉะนั้นจะทำให้ยางแผ่นเหลวและมีการยืดตัว

โดยปกติการแห้งของยางแผ่นต้องใช้เวลาประมาณ 2-4 วัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศร้อน ความเร็วอากาศร้อนในห้องรม ความหนาของแผ่นยาง และความหนาแน่นของการแขวนแผ่นยาง นอกจากนี้การออกแบบห้องรมที่เหมาะสมก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพและต้นทุนการผลิตยางแผ่นรมควัน เนื่องจากห้องรมควันที่มีการกระจายความร้อนไม่ดี จะทำให้เกิดปัญหายางแผ่นสุกไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง หรือเกิดปัญหาฟองในบริเวณที่อุณหภูมิอากาศร้อนสูงเกินไป ต้องใช้เวลาอบแห้งนานกว่าปกติเพื่อให้ยางสุกทั่วทั้งห้อง แต่การทำให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอในห้องรมยางในทางปฏิบัติทำได้ยาก

มาตรฐานยางแผ่นดิบ มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

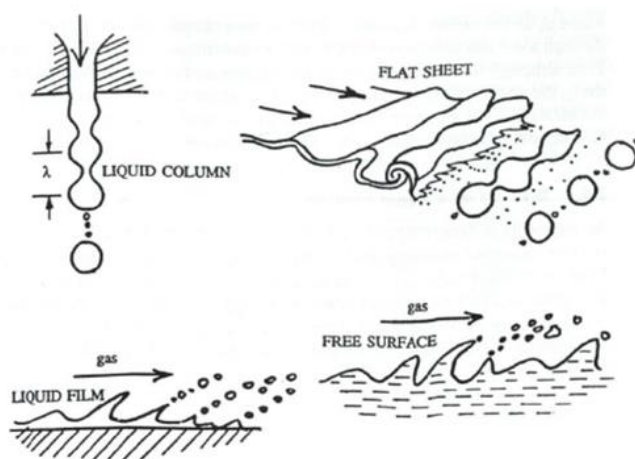
- (1) ยางแผ่นมีความสะอาด
- (2) ความหนาของแผ่นไม่เกิน 4 mm
- (3) ความชื้นในแผ่นไม่เกิน 5%
- (4) เนื้อยางแห้งใส มีสีสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นหรืออาจมีสีคล้ำ
- (5) มีความยืดหยุ่นดี และมีลายดอกเห็นเด่นชัด
- (6) น้ำหนักเฉลี่ยต่อแผ่น 1,000 –1,200 g
- (7) แผ่นยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 38–46 cm ความยาว 80–90 m หรือ

รูปทรงของยางแผ่น เหมาะสำหรับนำเข้าโรงรมควัน

## 2.3 กลไกการแตกเป็นละอองฝอย

การแตกตัวเป็นละออง ใช้หลักการทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่มีขนาดเล็กมาก การทำให้แตกตัวเป็นละอองจำเป็นต้องใช้แรงจากภายนอกกระทำต่อของเหลว ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ แรงกระแทกจากแก๊สที่มีความเร็วสูง แรงจากการหมุนเหวี่ยง แรงที่เกิดจากผลต่างระหว่างความดันในของเหลวกับบริเวณรอบ

โดยแรงจากภายนอกมีผลทำให้ลำของเหลวไม่เสถียรและแตกตัวด้วยกลไกต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เช่น การแตกตัวของลำของเหลวที่ไหลจากรู (Orifice) ในแนวตั้ง เกิดจากแรงของน้ำหนักของเหลวและแรงตึงผิว การแตกตัวของเจ็ทของเหลวที่เป็นแผ่นบาง เกิดจากความเค้นเฉือนระหว่างแผ่นเจ็ทกับอากาศที่อยู่รอบ ๆ ทำให้ผิวเรียบของแผ่นเจ็ทเกิดการก่อตัวเป็นคลื่นที่ไม่เสถียรจนเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่ละเอียด การแตกตัวของแผ่นฟิล์มของเหลวบนผิวที่มีแก๊สความเร็วสูงไหลผ่าน แก๊สความเร็วสูงจะเฉือนฟิล์มของเหลวที่อยู่บนผนังให้ขาดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนที่ของเหลวจะรวมตัวเป็นละอองอีกครั้งด้วยแรงตึงผิว มีลักษณะเช่นเดียวกับแก๊สความเร็วสูงไหลผ่านผิวของเหลว



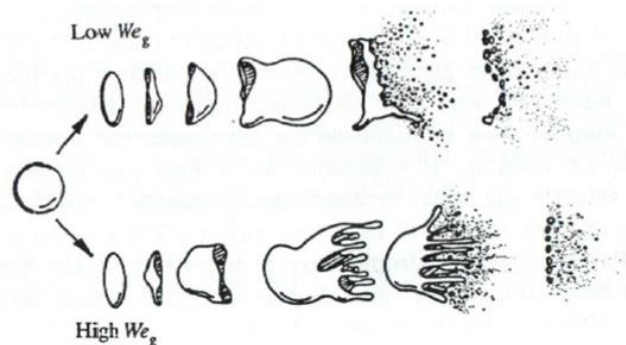
รูปที่ 2.1 รูปแบบการแตกตัวเป็นละออง [2]

อย่างไรก็ตาม ในการแตกตัวเป็นละอองนั้นจะต้องพลังงานจำนวนมากเพื่อเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวที่ต้านการเปลี่ยนรูปร่างเป็นเส้นเล็ก ๆ หรือฟิล์มบาง ๆ ก่อนที่จะฉีกขาดเป็นละออง และการแตกตัวเป็นละอองนั้นจึงมีค่าขึ้นกับความหนืด ความตึงผิวของเหลว

ของเหลวที่แตกตัวเป็นละอองหรือหยดของเหลวขนาดเล็ก หากยังมีแรงที่กระทำบนหยดของเหลวอยู่ จะทำให้หยดของเหลวเกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กอีก ดังแสดงในรูปที่ 2.2



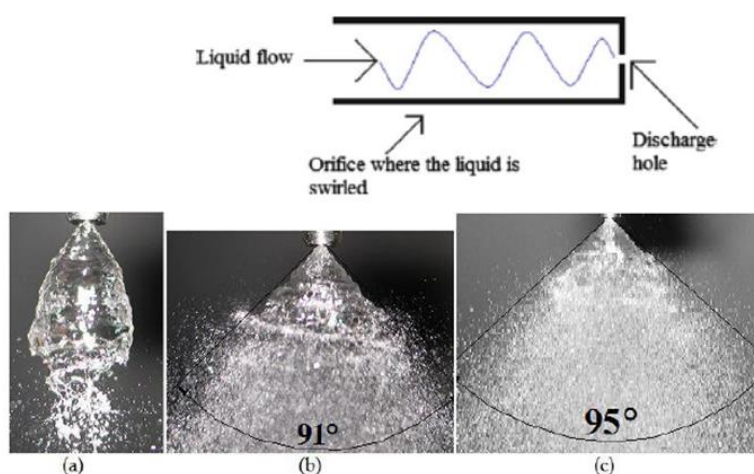
หยดของเหลวที่ถูกแรงกระทำจะเปลี่ยนแปลงเป็นรูปร่างแบนและรูปร่างแบบถุง (คล้ายแมงกะพรุน) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนสุดท้ายทนแรงที่กระทำไม่ไหว แตกตัวเป็นละอองขนาดเล็ก ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำกว่าจะแตกตัวเป็นละอองได้เร็วกว่า



รูปที่ 2.2 ลักษณะการแตกตัวของหยดของเหลวกรณีของเหลวมีแรงตึงผิวต่ำและสูง [2]

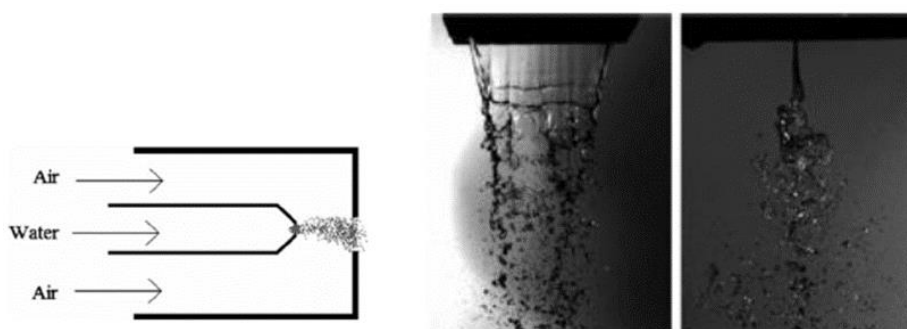
ตัวอย่างวิธีการทำละออง ได้แก่

(1) การแตกเป็นละอองโดยอาศัยความดัน (Pressure atomization) ใช้ความดันสูงในการบังคับให้ของเหลวไหลผ่านรูขนาดเล็กด้วยความเร็วสูง หรือบังคับให้ของเหลวเกิดการหมุนวนที่บริเวณใกล้กับปากทางออก ทำให้ของเหลวมีลักษณะเป็นเส้นด้ายหรือฟิล์มบาง ๆ ที่แผ่ออกเป็นรูปกรวย เมื่อของเหลวไหลผ่านอากาศที่หยุดนิ่งอยู่ ทำให้เกิดแรงเสียดทานกับอากาศโดยรอบและเกิดความไม่เสถียรที่ผิวของเหลว จนเกิดการฉีกขาดจนแตกตัวเป็นละอองในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นลักษณะการกระจายของละอองน้ำมันก๊าดเมื่อมีการเพิ่มความดันที่หัวฉีด



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกระจายของละอองน้ำมันก๊าดเมื่อมีการเพิ่มความดันที่หัวฉีด [3]

(2) การแตกตัวเป็นละอองโดยอาศัยพลังงานจลน์จากการไหลของอากาศ (Airblast atomization) ใช้อากาศหรือลำเจ็ทที่มีความเร็วสูงไหลผ่านปะทะของเหลวที่ไหลด้วยความเร็วต่ำ ก่อให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่อผิวของเหลว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นคลื่น จนผิวของเหลวฉีกขาดกลายเป็นละอองอย่างรวดเร็ว เทคนิคนี้มักใช้ในการพ่นยาฆ่าแมลงหรือพ่นสีสเปรย์เคลือบผิว



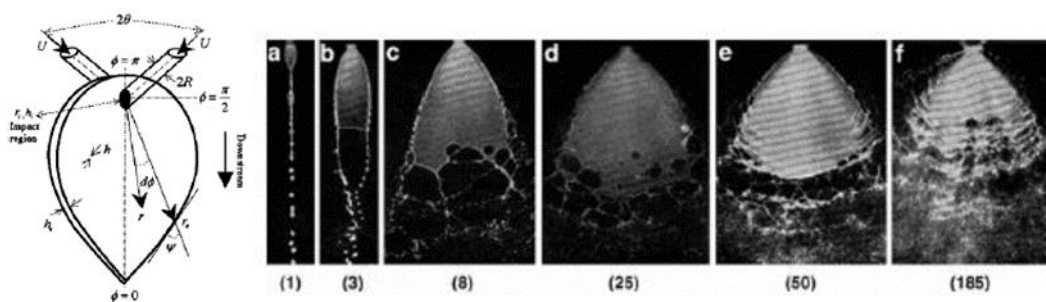
รูปที่ 2.4 ลักษณะหัวฉีดแบบ Airblast และตัวอย่างภาพการแตกตัวเป็นละอองของแผ่นของเหลวที่เกิดขึ้น [3]

(3) การแตกตัวเป็นละอองโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Rotary atomization) เทคนิคนี้อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของถ้วยหมุนที่ต่อผ่านเพลากับมอเตอร์ โดยของเหลวจะถูกส่งให้ไหลบนผิวของถ้วยหมุน และไหลเป็นฟิล์มเคลือบผิวของถ้วยหมุนด้วยแรงเหวี่ยง และฟิล์มของเหลวเกิดการฉีกขาดเป็นเส้นและเป็นละอองในที่สุด รูปที่ 2.5 แสดงการแตกตัวของละอองน้ำด้วยหัวฉีดแบบหมุนเหวี่ยง



รูปที่ 2.5 การแตกตัวของละอองน้ำด้วยหัวฉีดแบบหมุนเหวี่ยง [4]

(4) การแตกตัวเป็นละอองโดยอาศัยการชนกันของเจ็ท (Impinging jet atomization) เทคนิคนี้ใช้เจ็ทของเหลวที่มีความเร็วสูงไหลปะทะกันโดยตรง การชนกันของลำเจ็ททำให้เกิดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของของเหลว และเกิดการฉีกขาดเป็นละอองในที่สุด รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการแตกตัวเป็นละอองของเจ็ทน้ำ 2 ลำที่ไหลปะทะกัน เมื่อเพิ่มความดันของเจ็ทของเหลว



รูปที่ 2.6 การแตกตัวเป็นละอองของเจ็ทของเหลว 2 ลำที่ไหลปะทะกัน เมื่อเพิ่มความดันของเจ็ทของเหลว [3]

#### 2.4 การอบแห้งระบบพ่นฝอย

การอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) เป็นกระบวนการอบแห้งที่ใช้ความร้อนแปลงของเหลวให้เป็นผงแห้งในเวลาอันสั้น โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน คือ (1) ของเหลวจะถูกฉีดให้เป็นละอองฝอย (2) ละอองฝอยสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลเข้ามา (3) ทำให้เกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็ว (4) ผงแห้งจะถูกแยกออกจากลมร้อน ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถผลิตผงแห้งได้อย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ได้มีขนาด รูปร่าง ปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกันเกือบทุกอนุภาค อย่างไรก็ตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับประสิทธิภาพในการทำให้ของเหลวแตกเป็นละอองเล็ก ๆ และขึ้นกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของการสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับลมร้อน เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีส่วนประกอบสำคัญ ดังนี้

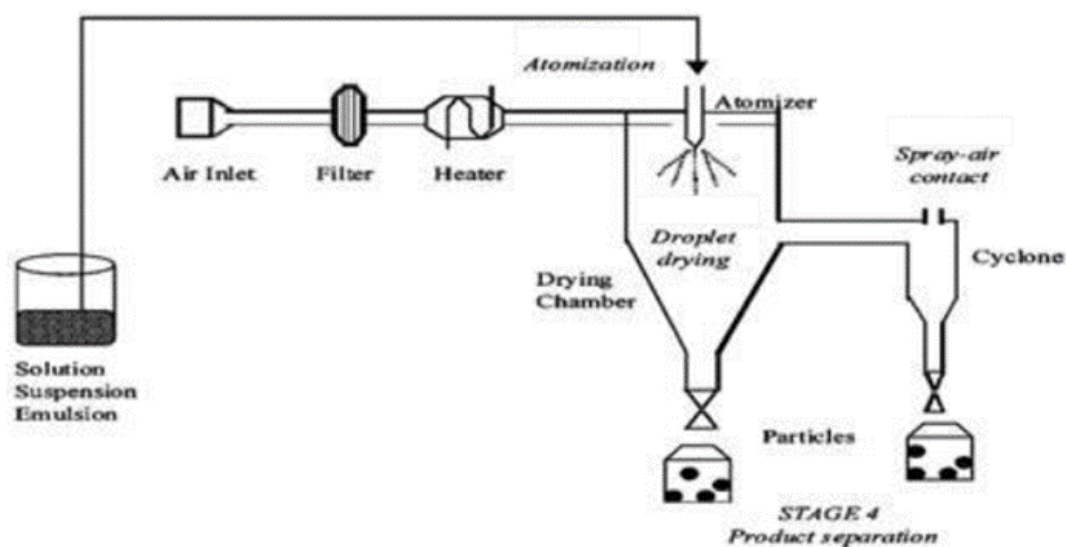
(1) ห้องอบ (Drying chamber) ทั่วไปมีลักษณะเป็นห้องทรงกระบอกมีส่วนปลายด้านล่างเป็นกรวย ภายในเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างลมร้อนกับละอองของเหลว

(2) หัวฉีดพ่นฝอย (Atomization nozzle) เป็นส่วนสำคัญในการทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็ก ทำให้ละอองระเหยเป็นผงเร็วขึ้น

(3) ระบบจ่ายลมร้อน ผลิตลมร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 120-220 °C ซึ่งความร้อนอาจได้จากไฟฟ้าหรือการเผาไหม้แก๊ส

(4) ระบบแยกอนุภาค ทำหน้าที่แยกผงอนุภาคออกจากลมร้อน ส่วนใหญ่นิยมใช้ไซโคลน (cyclone) ซึ่งใช้แรงเหวี่ยงในการแยกผงอนุภาคออกจากลมร้อน

รูปที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ในขั้นตอนแรกของเหลวจะถูกลำเลียงผ่านท่อเข้าสู่หัวฉีด เพื่อให้ของเหลวกระจายเป็นละอองขนาดเล็ก ในขั้นตอนที่ 2 ละอองจะถูกส่งจากพัดลม กรองอากาศและฮีทเตอร์เพื่อสร้างลมร้อนจ่ายเข้าไปในห้องอบ ทำให้ละอองของเหลวกลายเป็นผง หล่นลงด้านล่างของห้องอบ หลังจากนั้นเข้าสู่ไซโคลนเพื่อแยกผงผลิตภัณฑ์จากลมร้อนอีกครั้งในขั้นตอนที่ 3

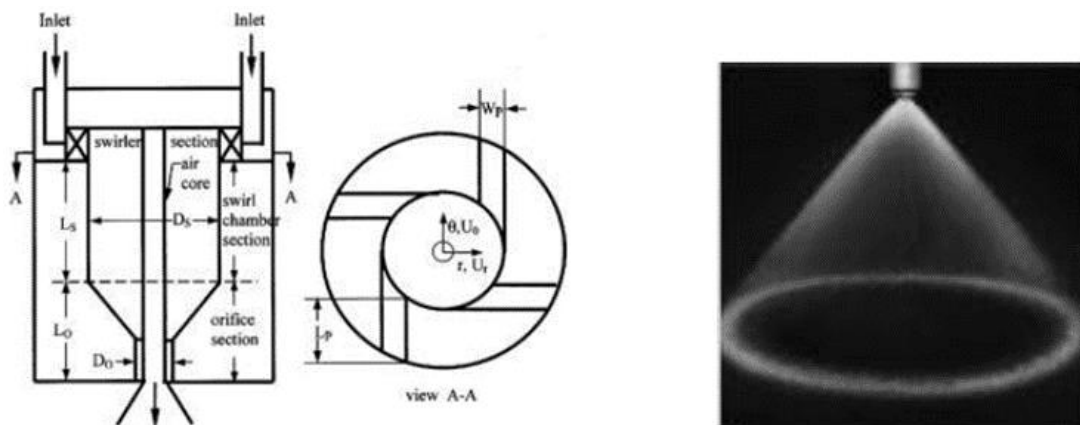


รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [5]

#### 2.4.1 การทำละอองฝอย

หัวฉีดที่ใช้ในการทำละอองฝอยโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

(1) หัวฉีดอัดแบบหมุนเหวี่ยง (Swirl spray nozzle) ใช้ความดันอัดของเหลวเข้าไปในแนวสัมผัสให้เกิดการไหลเหวี่ยงก่อนที่จะไหลผ่านรูเปิดขนาดเล็ก (Orifice) ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดจะมีลักษณะเป็นแผ่นรูปกรวย ก่อนที่จะแตกตัวเป็นหยดของเหลวขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหัวฉีดอัดแบบหมุนเหวี่ยงและลักษณะละอองจากหัวฉีด [3]

(2) หัวฉีดสเปรย์แบบใบพัด (Fan-spray nozzle) บังคับให้ลำของเหลวกระทบบนช่องเปิดเล็ก ๆ ซึ่งออกแบบเพื่อให้เกิดแผ่นของเหลวในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบของช่องเหลวแผ่นบาง ๆ ของของเหลวจะเกิดขึ้นแล้วแตกเป็นละอองในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.9



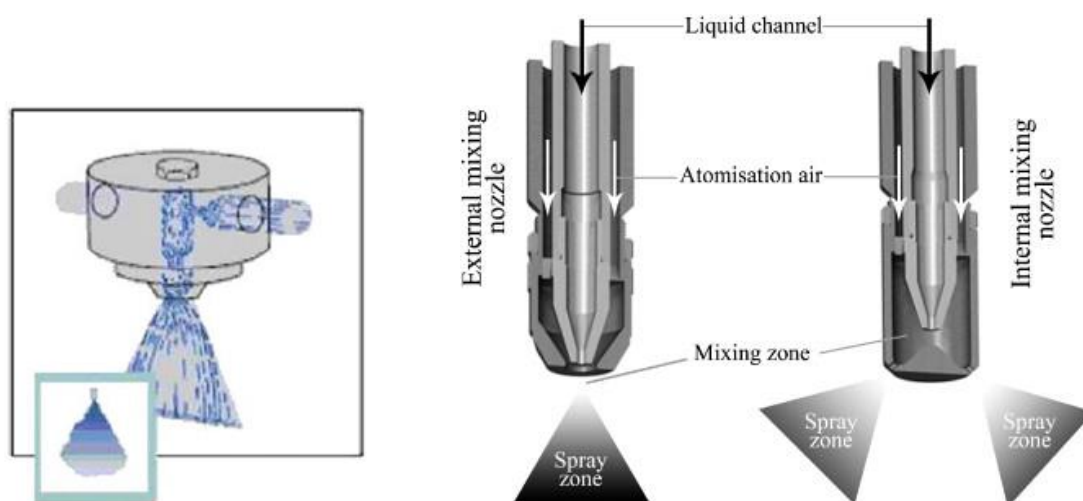
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของหัวฉีดอัดแบบใบพัดและลักษณะละอองจากหัวฉีด [3]

(3) หัวฉีดแบบหมุน (Rotary atomizers) ใช้หลักของแรงเหวี่ยงทำให้เกิดแผ่นของเหลวซึ่งแตกเป็นละอองฝอย ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มต้นของเหลวจะถูกดึงเข้าไปยังผิวที่หมุนและเคลื่อนที่ผ่านผิวถ้วย เพื่อให้เกิดแผ่นบางๆตามแนวเส้นรอบวง เนื่องจากแรงเหวี่ยงที่กระทำบนของเหลวขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนด้วยโดยตรง ทำให้สามารถประยุกต์ใช้กับของเหลวที่มีสมบัติต่าง ๆ กันได้



รูปที่ 2.10 หัวฉีดแบบหมุนและลักษณะของละอองฝอย [6]

(4) โครงสร้างของหัวฉีดของไหลสองชนิด (Two-fluid atomizers) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 จะใช้อากาศที่ความเร็วสูงเพื่อให้ไหลปะทะลำของเหลวที่มีความเร็วต่ำ แล้วของเหลวแตกเป็นละอองเล็ก ๆ สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูงได้



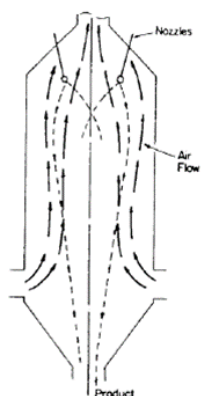
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของหัวฉีดของไหลสองชนิด [3]

#### 2.4.2 ลักษณะการสัมผัสของละอองฝอยกับลมร้อน

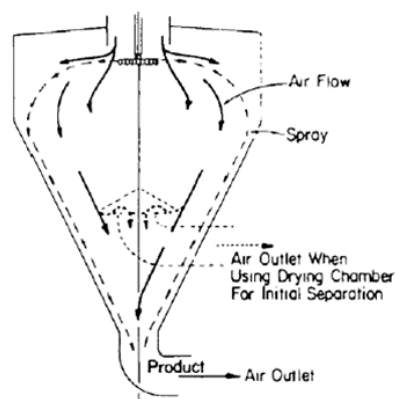
ลักษณะและทิศทางการสัมผัสระหว่างละอองกับลมร้อนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการแห้งของละอองของเหลว ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะ (1) ชนิดไหลสวนทางกันของเหลวจะถูกพ่นจากด้านบนและตกลงมา ในขณะที่ลมร้อนจะเข้าทางด้านล่างของห้องอบและไหลออกทางด้านบน วิธีนี้ละอองได้รับความร้อนที่สูงที่สุด แต่ลมร้อนจะต้องมีความเร็วไม่สูงเกินจนพา



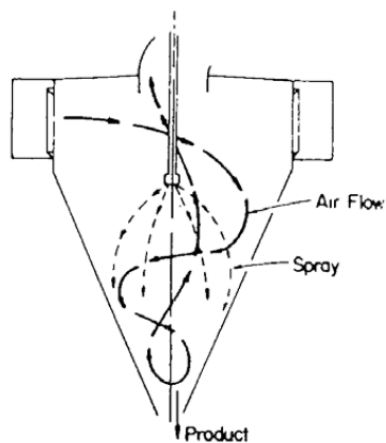
ละอองออกไปกับลมร้อน (2) ชนิดการไหลตามกัน ทิศทางการพ่นละอองและลมร้อนมีทิศทางเดียวกัน (3) ชนิดการไหลผสมกัน ของเหลวจะถูกพ่นจากด้านบน ในขณะที่ลมร้อนจะเข้าทางด้านบนในแนวสัมผัสกับห้องอบ ก่อนที่จะไหลวนผ่านละอองของเหลว และไหลขึ้นย้อนกลับในแนวแกนกลางของห้องอบไปที่ทางออกลมร้อน ซึ่งลักษณะนี้ให้การระเหยของน้ำสูงที่สุด (4) ชนิดการไหลขนานกัน มีลักษณะคล้ายกับชนิดการไหลตามกัน แต่ความเร็วลมร้อนจะสูงกว่าชนิดการไหลตามกัน



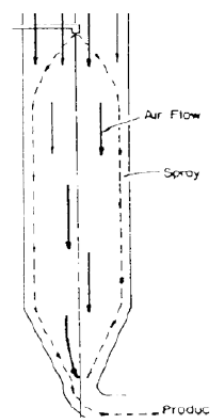
(ก) ชนิดไหลสวนทางกัน



(ข) ชนิดไหลตามกัน



(ค) ชนิดไหลผสมกัน



(ง) ชนิดไหลขนานกัน

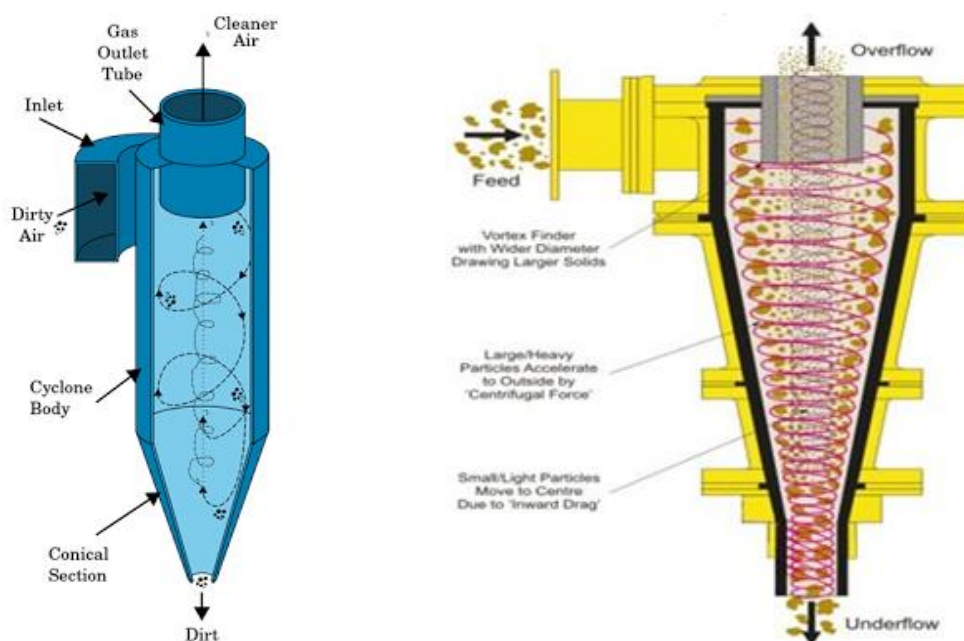
รูปที่ 2.12 ลักษณะการสัมผัสของละอองฝอยกับลมร้อนในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [7]

### 2.4.3 กลไกการระเหยน้ำจากละอองของเหลว

การเปลี่ยนจากละอองของเหลวเป็นผง เกิดจากกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างละอองของเหลวกับลมร้อน ซึ่งอัตราการแห้งจะขึ้นกับอุณหภูมิลมร้อน ความชื้นหรือความดันไอของลมร้อน ความเร็วลมร้อน ขนาดของละอองของเหลว และลักษณะของแข็งที่แขวนลอยในละอองของเหลว

### 2.4.4 การแยกผงผลิตภัณฑ์ออกจากลมร้อน

เมื่อลมร้อนพาผงอนุภาคเข้าสู่ไซโคลนในแนวสัมผัส จะเกิดแรงเหวี่ยงกระทำต่ออนุภาคผงและเกิดการเคลื่อนที่หมุนวนเป็นเกลียวรอบแกนกลางของไซโคลน (ห้องลักษณะเป็นทรงกระบอก) เหวี่ยงให้ผงอนุภาคเคลื่อนออกไปที่ผนังด้านในของไซโคลน เมื่อเคลื่อนที่สู่ส่วนล่างของไซโคลน ความเร็วของลมร้อนจะลดลงตามรัศมีของไซโคลนที่ลดลง จนผงอนุภาคตกลงด้านล่างของไซโคลนด้วยแรงโน้มถ่วง ในขณะที่ลมร้อนรวมตัวกันไหลออกไปตามช่องลมที่อยู่ด้านบน ทำให้สามารถแยกผงอนุภาคออกจากลมร้อนได้

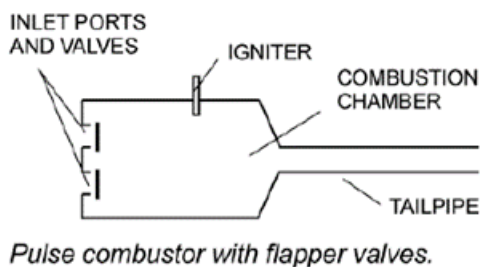


รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของระบบไซโคลน



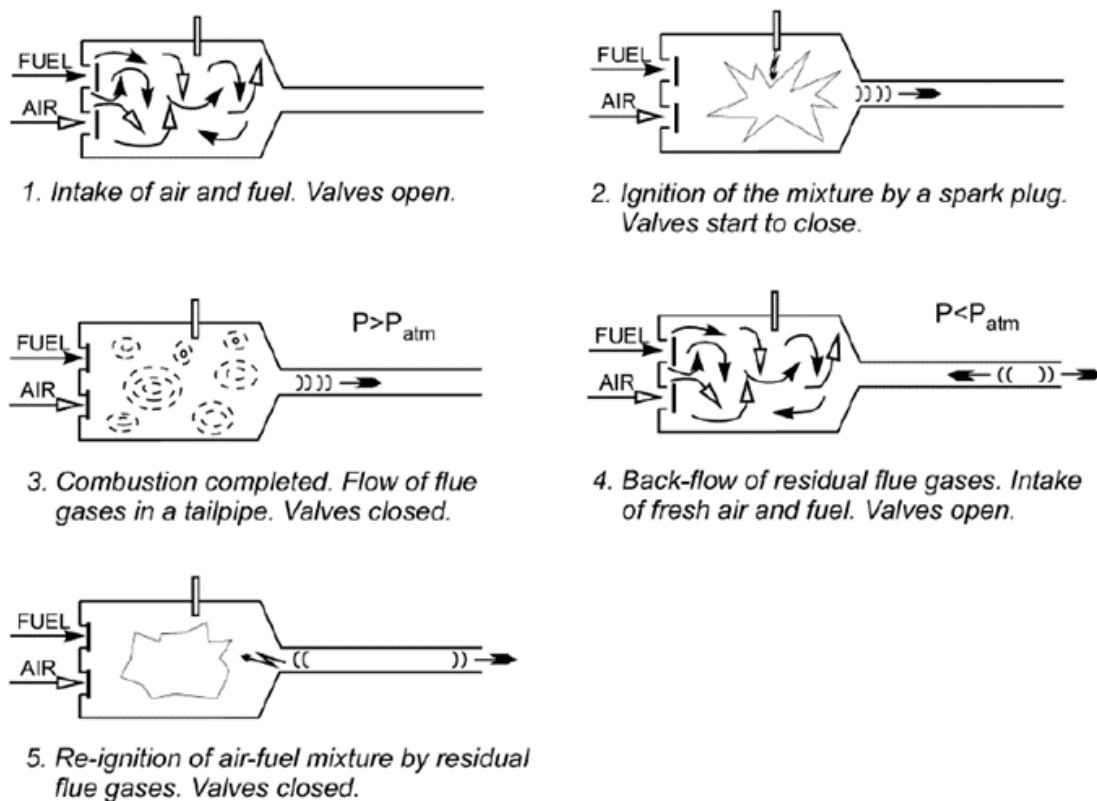
## 2.5 ห้องเผาไหม้ระบบพัลส์

แผนภาพของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz จะประกอบไปด้วยด้านปลายเปิดที่เป็นห้องเผาไหม้ (Combustion chamber) ขนาดใหญ่ โดยจะต่อเข้ากับท่อส่ง (Tailpipe) ที่มีปลายเปิดด้านเดียว ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.14



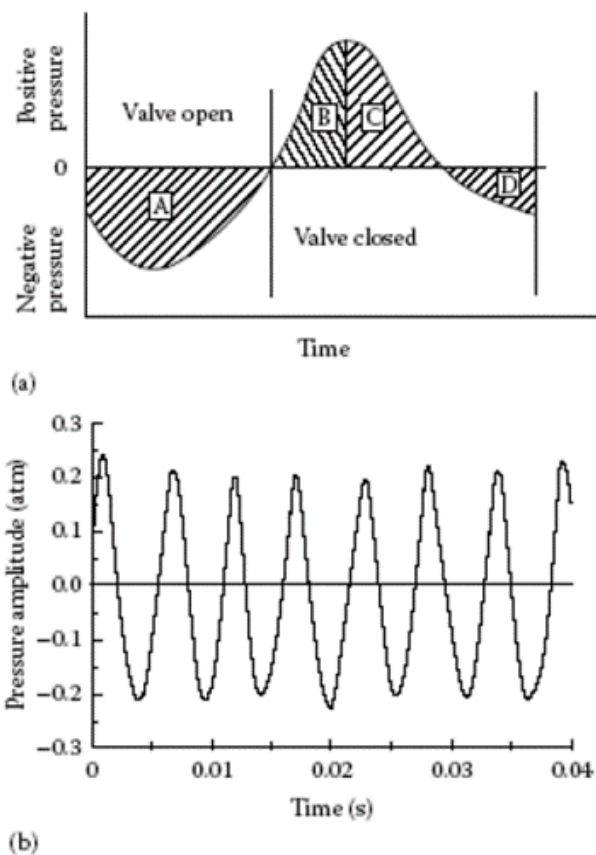
รูปที่ 2.14 แผนภาพของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz

รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz แบบมีวาล์ว ซึ่งมีความซับซ้อนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้แบบเป็นจังหวะและการส่งผ่านคลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อส่ง กระบวนการเผาไหม้จะเริ่มจากอากาศและเชื้อเพลิงแก๊สหรือละอองเชื้อเพลิงของเหลวถูกพ่นเข้าไปผสมกันในห้องเผาไหม้ แล้วถูกจุดระเบิดด้วยหัวเทียน (Spark plug) ทำให้เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดในห้องเผาไหม้ ในจังหวะนี้ทางเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงจะถูกปิดโดยวาล์วหรือด้วยความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ และแรงดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะดันให้แก๊สไอเสียไหลออกผ่านท่อส่งออกไปภายนอก การไหลออกของแก๊สไอเสียจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อส่ง จนกระทั่งความดันภายในห้องเผาไหม้ลดลงต่ำสุด วาล์วอากาศและเชื้อเพลิงจะเปิดอีกครั้งทำให้อากาศและเชื้อเพลิงใหม่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง โดยการจุดติดไฟครั้งใหม่จะเกิดขึ้นเองอีกโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน การจุดติดไฟจะเกิดโดยแก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับมายังห้องเผาไหม้ในจังหวะที่ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำสุด วัฏจักรการเผาไหม้จะเกิดขึ้นเองด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้และท่อส่ง สัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ชนิดของวาล์วเปิดปิดของอากาศและเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.15 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้พัลส์แบบมีวาล์ว [8]

รูปที่ 2.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่เวลาต่าง ๆ โดยที่ในรูป (a) คือการเปลี่ยนแปลงของความดันในห้องเผาไหม้ตามหลักทฤษฎี และ รูป (b) คือการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ที่ได้จากการทดลอง โดยที่บริเวณ A เป็นช่วงที่อากาศและเชื้อเพลิงไหลเข้าห้องเผาไหม้ สำหรับบริเวณ B เป็นช่วงที่เชื้อเพลิงใหม่จุดติดเกิดความร้อนทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูง อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ ในส่วนของบริเวณ C คือช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ แก๊สไอเสียไหลออกทางท่อส่ง ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง และบริเวณ D คือช่วงของโมเมนตัมของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกสร้าง ความดันติดลบภายในห้องเผาไหม้



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ (a) ผลทางทฤษฎี (b) ผลการทดลอง [8]

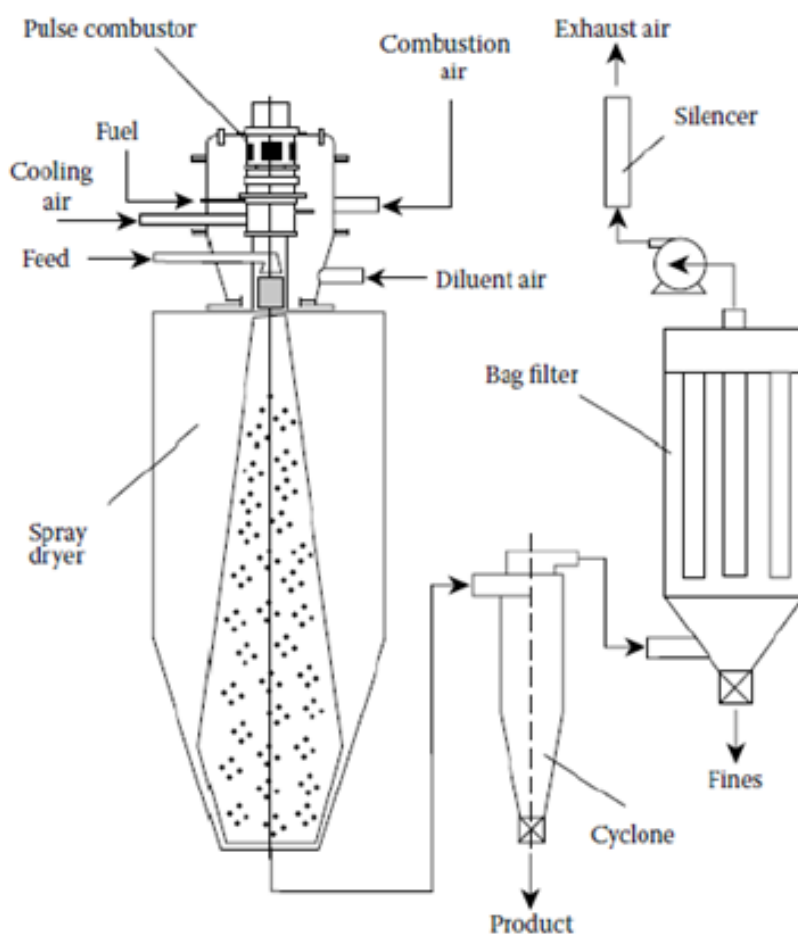
สำหรับเงื่อนไขที่ทำให้ระบบเผาไหม้แบบพัลส์เข้าสู่สภาวะคงตัวจะเป็นไปตาม Rayleigh criterion คือ ผลต่างเฟสระหว่างการสั่นของความดันและการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้จะต้องน้อยกว่า  $1/4$  ของคาบในวัฏจักร [9] โดยที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับคาร์ไบลและอัตราการผสมของอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้ การจุดระเบิดของอากาศผสมเชื้อเพลิงโดยหัวเทียนจะทำเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มวัฏจักร หลังจากนั้นการจุดระเบิดจะเกิดขึ้นเองเมื่อการทำงานของระบบเสถียร นอกจากนี้ พัดลมที่ใช้ในช่วงแรกสำหรับเริ่มเดินระบบก็ไม่ต้องใช้หลังจากที่เดินระบบได้แล้ว เนื่องจากอากาศจะถูกดูดเข้าสู่ระบบโดยอัตโนมัติ

## 2.6 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพ่นฝอยระบบพัลส์

รูปที่ 2.17 แสดงระบบทำละอองฝอยด้วยห้องเผาไหม้แบบพัลส์ หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบพัลส์มีดังนี้ เริ่มจากอากาศที่ความดันต่ำถูกส่งผ่านวาล์วเปิดปิดไปยังห้องเผาไหม้แบบพัลส์ แล้วอากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ที่เชื้อเพลิงถูกเติมเข้ามา แล้ววาล์วอากาศที่ทางเข้าถูกปิดลง อากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงถูกจุดด้วยหัวเทียน เกิดการระเบิดของแก๊ส

เชื้อเพลิง เกิดแก๊สร้อนความดันสูงไหลผ่านท่อส่งไปยังส่วนพ่นฝอย หลังจากนั้นวาล์วอากาศที่ทางเข้า จะเปิดอีกครั้ง เพื่อให้อากาศใหม่ไหลเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ก่อนที่จะได้รับความร้อน จากแก๊สร้อนที่ไหลกลับมายังห้องเผาไหม้ จนเกิดการระเบิดอีกครั้ง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเป็นวัฏจักรมี ความถี่ในช่วง 80 ถึง 110 Hz

ในส่วนของการทำละออง อากาศเย็นจากภายนอกจะถูกปล่อยให้เข้ามาผสมกับแก๊ส ร้อนที่ไหลออกมาจากท่อส่ง เพื่อลดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการทำละอองของเหลว ของเหลวจะถูก ป้อนผ่านท่อเข้ามายังส่วนที่ทำละออง หลังจากแห้งเป็นผงแล้วก็จะถูกแยกอนุภาคผงจากลมร้อนด้วย ไซโคลนที่ติดตั้งปลายทางของระบบ



รูปที่ 2.17 ระบบทำละอองฝอยด้วยห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [8]

ปัญหาการสึกหรอในชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการพ่นฝอยไม่ว่าเป็นระบบหัวฉีดหรือระบบถ้วยหมุน เนื่องจากผิวอุปกรณ์ได้รับแรงเฉือนหรือความเค้นเฉือนที่สูง ระบบพ่นฝอยที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ช่วยในการทำละอองสามารถลดปัญหาการสึกหรอที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้งระบบเดิม เนื่องจากห้องอบแบบพัลส์นี้ใช้คลื่นความดันกระแทกให้เป็นละอองแทนการใช้ความเค้นเฉือน และใช้ความดันในการลำเลียงหรือป้อนของเหลวที่ทำละอองน้อยกว่าระบบพ่นจากหัวฉีด ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของการอบแห้งระหว่างระบบอบแบบพัลส์และระบบพ่นฝอยแบบเดิมที่ใช้หัวฉีดและจานหมุน

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของการอบแห้งระหว่างระบบอบแบบพัลส์และระบบพ่นฝอยแบบทั่วไปที่ใช้หัวฉีดและจานหมุน [8]

Dryer Characteristics	PCS Pulse-Dryer	Spray Dryer (Nozzle Distributor)	Spray Dryer (Disk Distributor)
Atomization	Gas dynamic-no shear	High-pressure orifice-high shear	Moderate shear
Feed pump	Low pressure (~7 kPa)	High-pressure	Low pressure
Feed delivery to dryer	Open pipe	Precision orifice	Various wheel types
Evaporative heat	At point of atomization	Remote, ducted to drying chamber	Remote, ducted to drying chamber
Mixing of hot air and droplets	Rapid and complete	Slow	Slow
Heat-transfer rate	High	Relatively low	Relatively low
Parts that may wear	Feed pump, air valve	Feed pump, nozzles	Feed pump, rotary drive unit
Parts that may corrode	Feed pipe	Pump, feed line, nozzles	Pump, feed line, wheels
Cost to replace worn parts	Very low	High <sup>a</sup>	High <sup>a</sup>
Time to replace worn parts	Hours	Days <sup>b</sup>	Days <sup>b</sup>

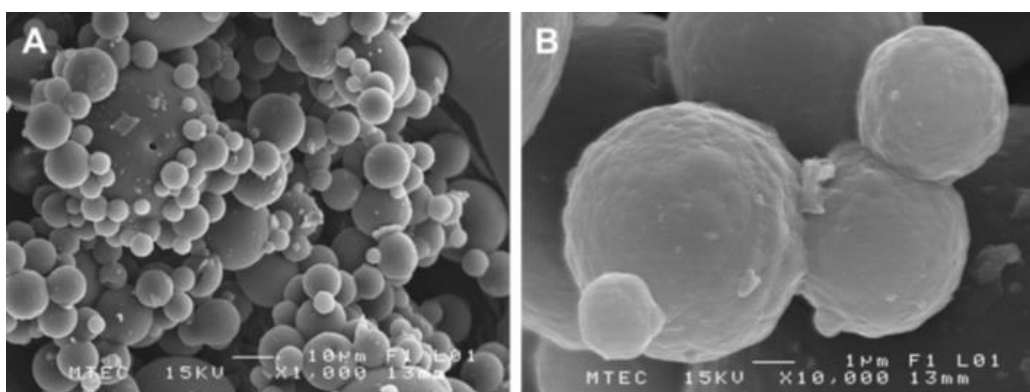
## 2.7 การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 งานวิจัยเกี่ยวกับยางธรรมชาติผง

ยางผงมีจุดเด่นหลายประการ เช่น ง่ายต่อกระบวนการแปรรูป ใช้พลังงานในการแปรรูปต่ำ และสามารถควบคุมอนุภาคได้ อย่างไรก็ตามการเตรียมยางผงไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นคือการเหนียวติด ซึ่งส่งผลให้อนุภาคที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอทั้งขนาดและรูปร่างรวมตัวกันกลับเป็นก้อนใหญ่ (Agglomerate) จึงมีการศึกษาถึงการใช้อยางธรรมชาติผสมสารเคมีต่าง ๆ รวมถึงสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมในการยางผงจากยางธรรมชาติ

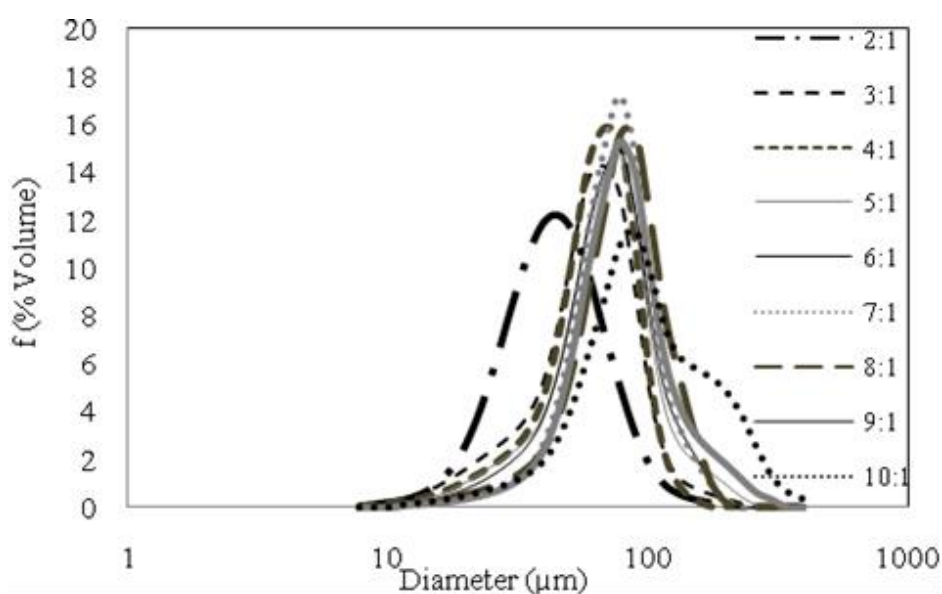
Abidin และคณะ [10] ได้ศึกษาการเตรียมยางผงที่เตรียมจากน้ำยางสดผสมสารป้องกันการเสียสภาพ 1% w/w (Anti-coagulation) และเหนียวติด 2% w/w (Anti-tack) โดยเครื่องพ่นยางดังกล่าวผ่านปากกระบอกฉีดแบบความดัน (Pressurized nozzle) ของเครื่องพ่นแห้ง (Spray dryer) ที่มีลมร้อนอุณหภูมิ 140 °C พบว่าสามารถเตรียมยางผงได้ โดยใช้เครื่องพ่นแห้งที่มีกระบอกฉีดแบบความดันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.5 mm ปริมาตรห้องอบเท่ากับ 0.8 m<sup>3</sup> ระยะเวลาในการผ่านลมร้อนเท่ากับ 0.134 วินาที โดยยางผงที่เตรียมได้มีปริมาณน้ำคงค้างประมาณ 0.32-0.56%

นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงการใช้น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ในการเตรียมยางผง จากรายงานของ Sae-Oui และคณะ [11] พบว่าสามารถเตรียมยางผงได้จากน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ผ่านการบ่ม 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยผ่านกระบวนการพ่นลมร้อน (Spray dryer) ที่อุณหภูมิทางเข้า (Inlet temperature) และออกเท่ากับ (Outlet temperature) เท่ากับ 160 °C และ 90 °C ตามลำดับ ความดันในการฉีดฝอยเท่ากับ 200 kPa ผลที่ได้ คือ สามารถเตรียมยางผงที่มีขนาดอนุภาค 1 ถึง 100 µm



รูปที่ 2.18 ภาพยางธรรมชาติผงที่กำลังขยายต่าง ๆ (A) 1,000 และ (B) 10,000 [11]

เนื่องจากอนุภาคของยางผงที่เตรียมได้มีช่วงของขนาดที่กว้างและใหญ่ Prachaya และคณะ [12] จึงได้ศึกษาการเตรียมยางผงจากยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ผสมกับแป้ง Maltodextrin โดยคาดหวังว่าจะสามารถทราบแนวทางในการลดขนาดอนุภาคของยางผงได้ รายงานฉบับนี้พบว่าขนาดอนุภาคของยางผงที่เตรียมได้มีแนวโน้มใหญ่มากขึ้นเมื่อสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อแป้ง Maltodextrin เพิ่มขึ้น และพบว่าสถานะที่เหมาะสมการเตรียมยางผง คือ การพ่น (Spray drying) น้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (%TSC) เท่ากับร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 120 °C โดยสัดส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติผง คือ สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อแป้ง Maltodextrin ที่น้อยกว่า 9:1 กล่าวคือเพิ่มปริมาณแป้ง เพื่อให้ขนาดอนุภาคของยางผงที่ลดลง



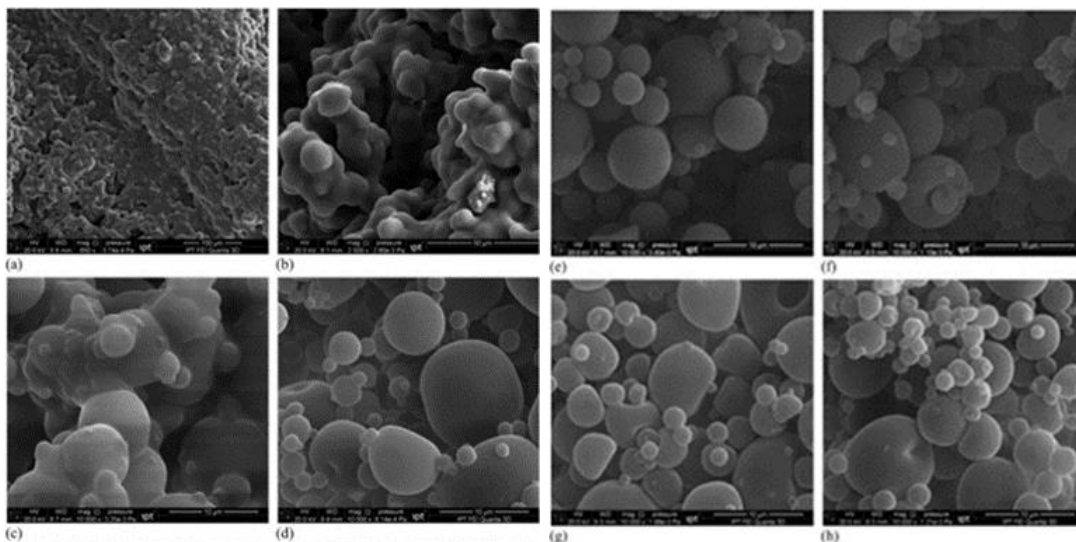
รูปที่ 2.19 การกระจายขนาดของอนุภาคโดยปริมาตรของ NR:MD สเปรย์ผงแห้งที่ 120 °C ของอากาศที่ไหลเข้า [12]

ยางผงธรรมชาติผงถูกรายงานถึงการนำไปใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกชนิดต่าง ๆ เช่น HDPE [11] และ PLA [13] เพื่อใช้ปรับปรุงข้อด้อยของพลาสติกเหล่านี้ เช่น ความเปราะ คือ หลังจากทำการเบลนด์ยางธรรมชาติผงกับพลาสติกเหล่านี้ สามารถปรับปรุงความเหนียว ความต้านทานต่อการกระแทก และความสามารถในการยึดจนขาดของพลาสติกเหล่านี้ได้ [13]

ยางธรรมชาติสามารถแปรรูปให้อยู่ในรูปร่างผงหรือยางเม็ด มีการเคลือบสารป้องกันการติดกัน (Anti-tack agent) เพื่อให้ผงหรือเม็ดยางมีการรวมตัวเป็นก้อนระหว่างการขนส่งหรือระหว่างการเก็บรักษา โดยทั่วไปขนาดของเม็ดยางสามารถผลิตในช่วง 10 mm ถึง 1 mm สำหรับการเตรียม สามารถใช้น้ำยางสดผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งมีบริษัท Crusoe ในประเทศมาเลเซีย

ผลิตเม็ดยางจากครีมน้ำยางธรรมชาติ โดยที่เม็ดยางมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 4 mm จำนวน 100% ในขณะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 mm จำนวน 60% ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, ML1+4, 100 °C) อยู่ในช่วง  $90 \pm 10$  และ  $70 \pm 5$  (กรณีเติม Hydroxylamine neutral sulphate) [14]

Lucilene Betega de Paiva และคณะ [15] ได้เสนองานวิจัยในการเตรียมยางผงจากน้ำยางชั้นที่ผ่านการตัดแปรง (Styrene-butadiene latex modified) ด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยผงยาง SBR สามารถเตรียมได้จากอัตราส่วนของน้ำยางผสมด้วยเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาคอลลอยด์ แล้วพ่นแห้ง (Spray drying) น้ำยางที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ด้วยอัตราการไหลที่ 250 ml/h ภายใต้อุณหภูมิขาเข้า 120 °C และอุณหภูมิขาออกประมาณ 75–80 °C ในเครื่องอบแห้งแบบ Mini B-190 Buchi Labortechnik AG จากการทดลองพบว่า การกระจายตัวของขนาดอนุภาคยางผงที่ได้จากภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนมี การกระจายตัวแบบทรงกลมที่มีขนาดไมครอนอยู่ในช่วง 1-10  $\mu\text{m}$  และการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่แตกต่างกันมีความเสถียรทางความร้อนประมาณ 200 °C



รูปที่ 2.20 ภาพการกระจายตัวของอนุภาค: a) SBR, b) SBR 12.5M, c) SBR-25M, d) SBR-50M, e) SBR-50M-7S, f) SBR-50M-50S, g) SBR-50M-25S, h) SBR-50M-12.5S [15]



## 2.7.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาระบบการเผาไหม้แบบพัลส์

สำหรับห้องเผาไหม้แบบพัลส์ จะมีการสร้างการไหลแบบสั้นที่เสถียรก็ต่อเมื่อผลรวมของเวลาที่ล่าช้าจะต้องนานเพียงพอที่จะให้ช่วงการคายความร้อนสูงสุดในห้องเผาไหม้เกิดขึ้นระหว่างที่การสั่นของความดันอยู่ในช่วงความดันเพิ่ม (วัฏจักรบวก) ผลรวมของเวลาที่ล่าช้านี้จะขึ้นอยู่กับเวลาสำหรับการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและไอเสียจากการเผาไหม้ Keller และคณะ [16] ควบคุมการไหลของเชื้อเพลิงที่ไหลสู่ห้องเผาไหม้ โดยการวางแผ่นขนาดเล็ก (Stagnation plate) ขวางเส้นทางการไหลของเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงไหลปะทะแผ่นนี้จะเกิดการไหลแบบหมุนวนขึ้นหลังแผ่นนี้ ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้ได้ นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งของการวางแผ่นขวางการไหลนี้หรือระยะห่างระหว่างทางเข้าเชื้อเพลิงและแผ่นนี้จะมีผลต่อการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้มาก โดยปกติรูปแบบของอัตราการปลดปล่อยความร้อนเทียบกับเวลาจะมีลักษณะเป็นระฆังคว่ำ เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้ทั้งหมดไม่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน คุณสมบัติของการปลดปล่อยความร้อนสามารถดูจากความสูงของรูปแบบระฆังคว่ำ ซึ่งจะนำมาทำเป็นสัดส่วนเทียบกับค่าเฉลี่ยของความร้อนที่ปลดปล่อย นิยามเป็นสัดส่วนแอมพลิจูดของอัตราการปลดปล่อยความร้อน โดยค่าเฉลี่ยของความร้อนที่ปลดปล่อยสามารถคำนวณจากอัตราการไหลเฉลี่ยของเชื้อเพลิงที่จ่ายเข้าในห้องเผาไหม้ สัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยนี้สามารถควบคุมโดยตำแหน่งการวางของตัวขวางการไหล การลดระยะระหว่างปากทางเข้าเชื้อเพลิงกับแผ่นขวางการไหลจะช่วยเพิ่มอัตราการผสม หรือลดเวลาการผสมเป็นผลทำให้การปลดปล่อยความร้อนเริ่มเกิดเร็วขึ้น ดังนั้นสัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยจะลดลง และการปลดปล่อยความร้อนจะลดลงในเฟสของการสั่นของความดัน ในการทดลองของ Keller และคณะ [16] เชื้อเพลิงและอากาศจะถูกผสมกันก่อนเข้าห้องเผาไหม้ (Premixed) และอัตราการไหลเฉลี่ยและสัดส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าคงที่จากการทดลองพบว่า สัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยจะมีผลโดยตรงกับขนาดของแอมพลิจูดของความดันที่เปลี่ยนแปลง โดยที่ความสัมพันธ์ของทั้งสองเป็นไปตาม Rayleigh criterion คือการสั่นที่รุนแรงจะเกิดขึ้นเมื่อการปลดปล่อยความร้อนสอดคล้องกับการสั่นของความดัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดสัดส่วนแอมพลิจูดของความร้อนที่ปลดปล่อยสูงที่สุด

การลดผลรวมเวลาล่าช้าของกระบวนการเผาไหม้จะลดคาบเวลาของวัฏจักรมีผลทำให้ความถี่ของการสั่นเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความถี่กำหนดจะมีผลต่อความถี่ของการเกิดการสั่นในห้องเผาไหม้อย่างมาก เนื่องจากผลการทดลองพบว่าความถี่ของการสั่นจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาตรของห้องเผาไหม้ถึงแม้ว่าจะวางตัวขวางการไหลของเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งความถี่กำหนดนี้ปกติจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของห้องเผาไหม้และความเร็วเสียงเฉลี่ยซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในท่อส่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องโดยห้องวิจัยทางการเผาไหม้ที่ Sandia National Laboratories Keller และคณะ [17] และ Eibeck และคณะ [18] ได้ใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่มีท่อส่งหน้าตัดกลมยาว  $L=880$  mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=50$  mm มีอัตราส่วนปริมาตรของห้องเผาไหม้ต่อท่อส่งประมาณ 1.0 ทดสอบเดินเครื่องที่เงื่อนไข อัตราการไหลเชิงมวลแก๊สเฉลี่ย  $9$  g/s ความถี่ของการสั่น  $f=100$  Hz แอมพลิจูดของความดันในห้องเผาไหม้  $A_p=10$  kPa อุณหภูมิสูงสุดที่ทางออกท่อส่งเท่ากับ  $1400$  K และมีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ  $350$  K อุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ วัดได้ประมาณ  $700$  K

จากการศึกษาการไหลพบว่า ลักษณะเฉพาะของพัลส์เจ็ทที่ทางออกท่อส่งคือมีโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนเป็นลักษณะวงแหวน (Toroidal vortices) รอบลำเจ็ทอิสระ เป็นผลทำให้เกิดการตั้งอากาศที่อยู่รอบ ๆ เข้าเป็นจำนวนมาก ทำให้อุณหภูมิตามแนวแกนของเจ็ทลดลงอย่างรวดเร็วจากตำแหน่งปากทางออกของท่อส่ง การไหลแบบหมุนวนอันดับหนึ่งถูกสร้างขึ้นระหว่างช่วงที่ความเร็วเป็นบวกในวัฏจักร และเคลื่อนที่ไปยังปลายทางการไหลอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างที่เกิดการไหลแบบย้อนกลับการไหลที่ปลายท่อส่งจะมีลักษณะเป็น Sink flow หรืออากาศที่อยู่รอบทางออกของท่อส่งจะไหลเข้าท่อส่งจากทุกทิศทาง แทนที่จะไหลแบบตรงเหมือนตอนที่เจ็ทไหลออกจากท่อส่งระหว่างช่วงที่ความเร็วเป็นบวกในวัฏจักร โครงสร้างการไหลแบบหมุนวนอันดับที่สองจะเกิดขึ้นที่เวลาสิ้นสุดของวัฏจักรที่ความเร็วเป็นบวก แต่มีขนาดเล็กกว่าการไหลแบบหมุนวนอันดับที่หนึ่ง แต่การไหลแบบหมุนวนที่เกิดขึ้นนี้จะไม่เคลื่อนที่ไปยังปลายทางการไหลเนื่องจากได้รับอิทธิพลของ Sink flow ที่เกิดขึ้นในเวลาต่อมา โครงสร้างการไหลแบบหมุนวนอันดับสามจะสามารถเห็นได้ในช่วงปลายของ วัฏจักรเกิดขึ้นค่อนข้างเบา

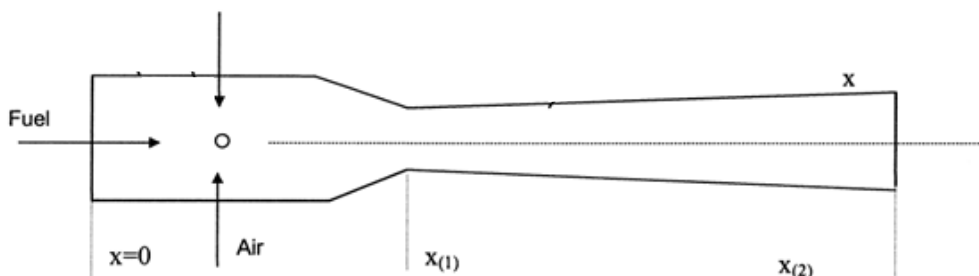
สำหรับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทจากท่อส่งปะทะบนผนังได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกรณีเจ็ทแบบพัลส์และกรณีเจ็ทแบบต่อเนื่อง โดยทดลองที่เงื่อนไขอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยเท่ากัน พบว่าที่ระยะปะทะน้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่ง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบพัลส์จะเพิ่มขึ้น 2.5 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีของเจ็ทแบบต่อเนื่อง แต่ที่ระยะปะทะมากกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่ง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบพัลส์จะต่ำกว่าเจ็ทแบบต่อเนื่อง สาเหตุเกิดจากการตั้งอากาศที่อยู่รอบ ๆ เข้ามาภายในลำเจ็ทของการไหลแบบหมุนวนรอบลำเจ็ท ทำให้การไหลของเจ็ทถูกทำลายก่อนปะทะพื้น ตัวอย่างการศึกษาได้แก่

Patterson และคณะ [19] ได้ทดลองอบแห้งกระดาษด้วยเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์พุ่งชนที่มีการออกแบบห้องเผาไหม้แบบพัลส์เจ็ทที่มีระบบท่อส่งต่างกัน 3 รูปแบบ โดยทุกระบบที่ออกแบบมีความถี่ในการทำงานประมาณ  $90$  Hz โดยระบบแรกจะใช้ท่อส่งเป็นแบบสล็อตสร้างพัลส์เจ็ทที่มีการไหลแบบย้อนกลับ ส่วนอีกสองระบบที่เหลือมีส่วนการสั่นของความเร็วเจ็ทที่ค่อนข้างต่ำ

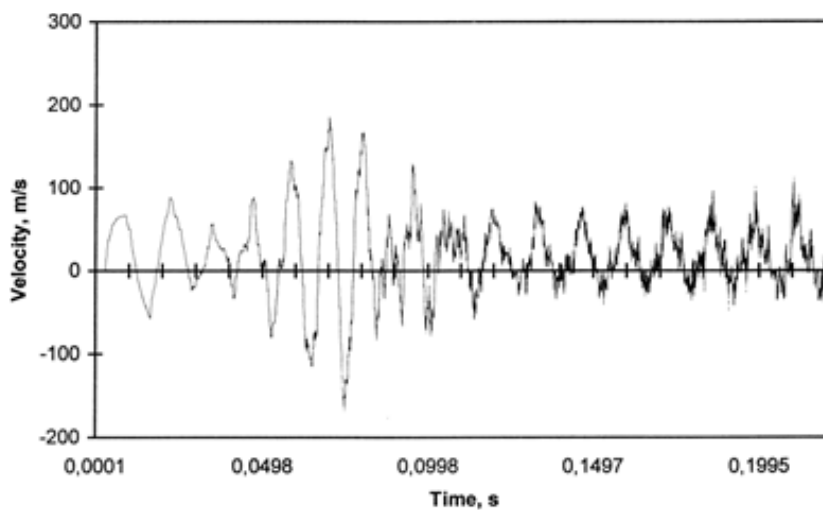
และระบบที่สามารถออกแบบให้สามารถสร้างเจ็ทแบบต่อเนื่องได้ด้วย พบว่ารูปแบบห้องเผาไหม้ที่มีการไหลแบบย้อนกลับจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงที่สุด

Wu และคณะ [20] ใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ขนาดเล็กในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทพุ่งชน และได้ทดสอบอบแห้งกระดาษด้วยระบบเจ็ทพุ่งชน ลักษณะของท่อเจ็ทที่ใช้เป็นท่อส่งแบบเตี้ยมีหน้าตัดกลมที่เงื่อนไขระยะพุ่งชน  $H/D=1.27, 2.96, 4.68$  และ  $6.36$  ความถี่ของการสั่นอยู่ที่  $250$  Hz โดยวัดจากการสั่นของความดันในห้องเผาไหม้ ผลการศึกษาพบว่าบริเวณพื้นที่เจ็ทพุ่งชนที่มีการถ่ายเทความร้อนสูงอยู่ภายในรัศมี  $r/D=3$  เท่านั้น เนื่องจากผลของการตั้งอากาศที่อยู่รอบๆเข้ามาในเจ็ท จากลักษณะการกระจายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ระยะ  $H/D$  ต่าง ๆ พบว่าเมื่อระยะ  $H/D$  เพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางการพุ่งชน (Stagnation point) จะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่ง  $r/D=1$  จะเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากมีโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนไหลปะทะพื้นผิว อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ไม่มีการวัดแอมพลิจูดการสั่นของความเร็วและไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดการไหลแบบย้อนกลับในท่อส่งหรือไม่ และไม่มีการเปรียบเทียบกับกรณีของเจ็ทแบบต่อเนื่อง

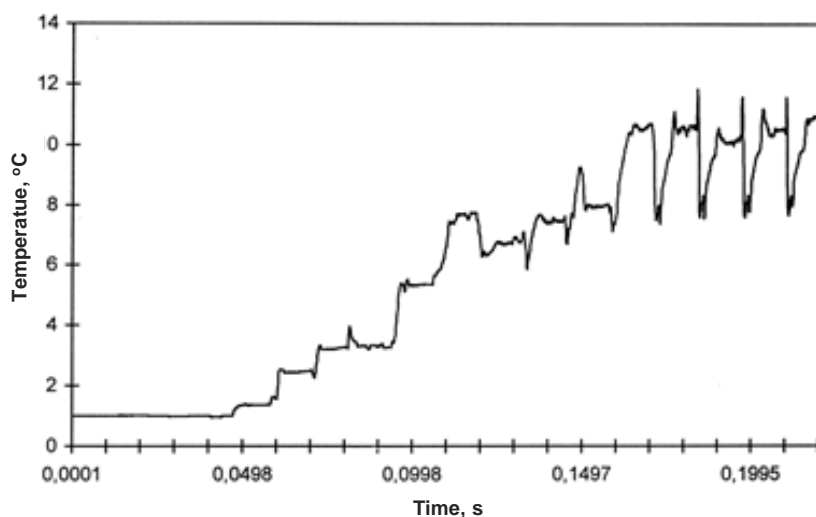
Kuts และคณะ [21] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเคลื่อนที่ของแก๊สในห้องเผาไหม้แบบสันโดยใช้เชื้อเพลิงเป็น Liquefied Petroleum Gas (แก๊ส LPG) ในการจำลองโมเดลจะมีลักษณะของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกกลมแล้วลดพื้นที่หน้าตัดเพื่อให้ต่อกับท่อส่งได้ (Tailpipe) โดยลักษณะของท่อส่งมีลักษณะเป็นท่อขยายหน้าตัด ซึ่งจากการจำลองการไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้และการไหลออกจากท่อส่งจะเป็นการไหลที่มีอุณหภูมิและความเร็วในการไหลที่สูง โดยเทียบกับความเร็วเฉลี่ยของแก๊สที่น้อย การเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้มีผลต่อรูปแบบของไอเสียที่ออกมา อย่างไรก็ตามการเดินเครื่องที่สภาวะที่เหมาะสมของห้องเผาไหม้แบบสันมีเป้าหมายสำหรับการอบวัสดุ ดังนั้นยังเกิดการไหลแบบสันที่สูง ย่อมส่งผลให้อุณหภูมิในการไหลของแก๊สยิ่งสูงขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการอบได้



รูปที่ 2.21 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [21]



รูปที่ 2.22 กราฟความเร็วแก๊สขึ้นอยู่กัเวลาที่ปากทางออกท่อส่ง [21]



รูปที่ 2.23 กราฟอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กัเวลาที่ปากทางออกท่อส่ง [21]

นอกจากนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับห้องเผาไหม้แบบพัลส์สำหรับการขับเคลื่อน (Propulsion) ตัวอย่างการศึกษา ได้แก่

Geng และคณะ [22] ได้ทดลองและจำลองผลของห้องเผาไหม้แบบพัลส์แบบไม่มีวาล์วขนาด 8 cm โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้จะมีขนาดของห้องเผาไหม้ 1.9 cm ยาว 1.2 cm เป็นทรงกระบอกและต่อกับท่อส่ง (Tailpipe) โดยการลดหน้าตัดทางเข้าอากาศทั้งสองท่อต่อขนานกับท่อไอเสียและใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ส่วนโมเดลการจำลองจะศึกษาเป็นการไหลไม่คงตัวแบบ 3 มิติอัดตัวได้และไหลแบบมีความหนืดมีการถ่ายเทความร้อนและแผ่รังสีจำลองจากโปรแกรมจำลองการ

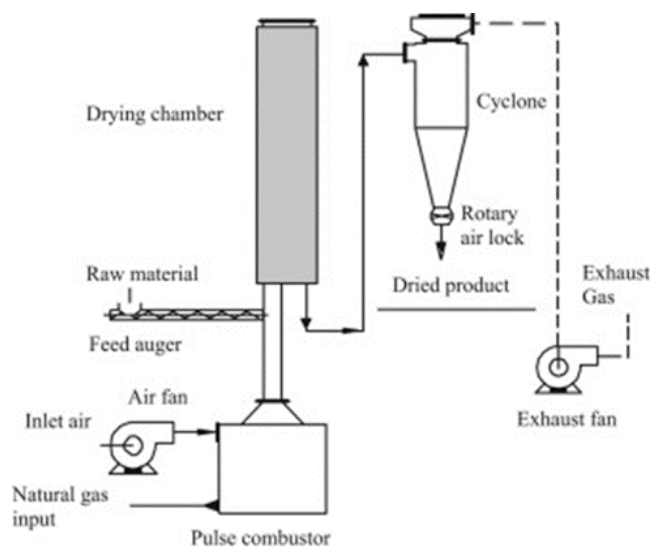
ไหล CFX ver. 5.7 จากผลการจำลองทั้งค่าความถี่และความดันสูงสุดตรงกับผลการทดลอง จากผลการทดลองและจำลองสรุปได้ว่า

1. ความถี่ในห้องเผาไหม้จะเป็นฟังก์ชันอยู่กับความยาวของท่ออากาศทางเข้า
2. ความถี่และความดันสูงสุดจะแปรผันตามอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง
3. การไหลแบบย้อนกลับจะให้แรงขับสุทธิที่ต่ำ แต่การไหลไปข้างหน้าจะช่วยเพิ่มแรง

ขับสุทธิ 1 N และ TSFC=0.02 kg/N-h

Kilicarslan และ Arisoy [23] ได้ศึกษาและวิเคราะห์คลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้แบบสันโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊ส LPG ในการทดสอบห้องเผาไหม้จะออกแบบให้มีห้องผสมกันก่อนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงโดยที่อากาศและเชื้อเพลิงถูกควบคุมด้วยวาล์ว ขนาดของห้องผสมมีขนาด 77 mm ยาว 102 mm ขนาดของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกกลมขนาด 115 mm ยาว 331 mm และท่อส่ง (Tailpipe) ที่ใช้ทดสอบมีขนาด 42 mm ความยาวตั้งแต่ 1300-1900 mm ในการทดลองนี้ได้ใช้เครื่องวัดระดับเสียง เช่น เซอร์วัดความดัน และเครื่องวัดสเปคตรัมในการวิเคราะห์ผล จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความยาวท่อส่ง ทำให้ระดับความดันเสียงลดลงโดยพิจารณาที่ความถี่เดียวกัน ค่าระดับแรงดันเสียงสูงสุดเท่ากับ 96.6 dB ที่ความยาวท่อส่งเท่ากับ 1.3 m ซึ่งทำให้ได้ข้อสรุปว่า ค่าเฉลี่ยของความถี่พื้นฐานจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์เท่ากับ 63 Hz และความถี่ที่จุดสูงสุดอื่น ๆ จะเป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน สำหรับทุกความยาวท่อส่งที่ได้ทำการทดลอง และระดับแรงดันเสียงที่ทางออกของห้องเผาไหม้จะสูงกว่าที่ทางเข้าของอากาศ

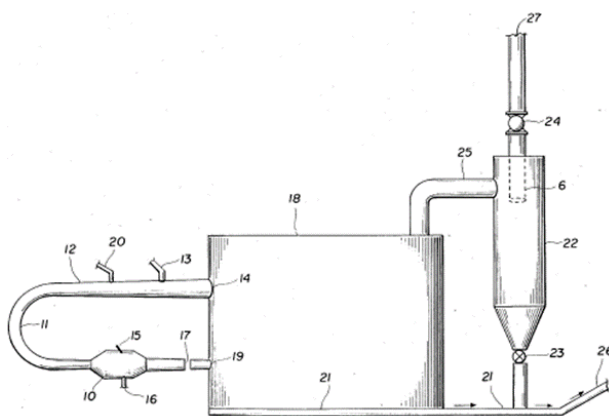
Kudra และ Mujumdar [24] ได้ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับห้องอบแห้งแบบพัลส์สำหรับอุตสาหกรรมซีเมนต์และเศษไม้อื่น ๆ จากรูปไดอะแกรมประกอบด้วยห้องเผาไหม้แบบพัลส์พร้อมด้วยวาล์วลูกตุ้ม ท่อนิวเมติกที่ยื่นออกมาจากท่อส่งของห้องเผาไหม้ และอุปกรณ์สำหรับพีดีวัสตุ และการเก็บรวบรวม โดยที่ห้องเผาไหม้ทำงานด้วยความถี่ประมาณ 70 Hz มีความสามารถในการระเหยน้ำ 275 kg/h และมีอัตราส่วนการปั่น 3:1 วัสดุถูกฉีดเข้าไปในท่อส่งเกิดการกระจายและอบแห้งโดยใช้ก๊าซหุงต้มร้อนจนขึ้นตอนการอบแห้งเสร็จสมบูรณ์ในท่อลม ผลการทดสอบพบว่า วัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้น 50% สามารถอบแห้งได้ถึง 30% ภายในครั้งเดียว เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบทั่วไป มีประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่คล้ายคลึงกัน แต่มีการใช้พลังงานที่ต่ำกว่ามาก (40-50%) อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุน 10-15% และลดการปล่อยก๊าซไอเสียที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย



รูปที่ 2.24 แผนภาพของห้องอบแห้งแบบพัลส์ [24]

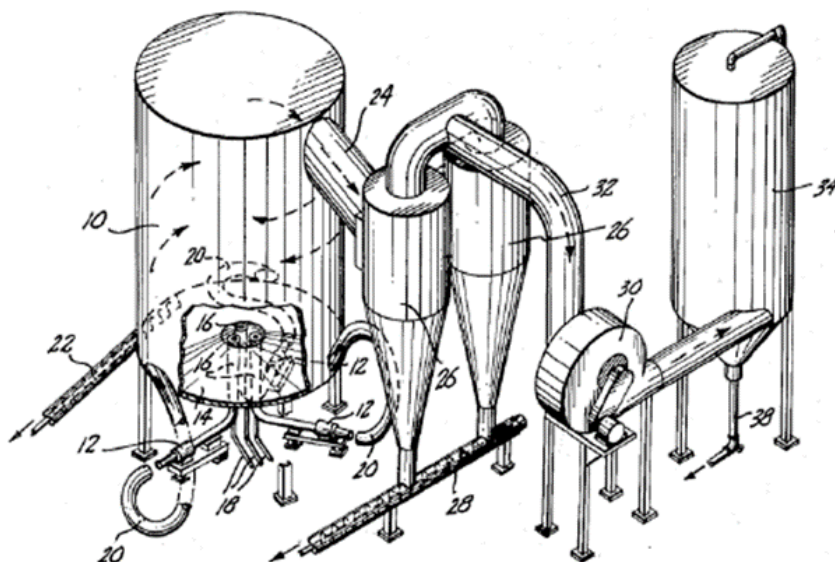
### 2.7.3. การสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตร

Martin และ Roger [25] นำเสนอสิทธิบัตรเลขที่ US 4667654 เป็นสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระบวนการทำเป็นละออง ให้ความร้อนจนสุกและอบแห้งส่วนผสมของแป้งและน้ำ โดยใช้แก๊สไอเสียที่และคลื่นเสียงจากเครื่องยนต์ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 กระบวนการผลิตประกอบด้วย การเตรียมส่วนผสมระหว่างแป้งเค้กและน้ำ ส่งผ่านส่วนผสมนี้ไปที่ท่อส่ง ซึ่งทำให้ส่วนผสมนี้แตกตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ ระหว่างไหลผสมกับแก๊สร้อนในท่อส่ง และกลายเป็นวุ้น ก่อนที่จะแห้งเป็นเม็ด แล้วถูกส่งไปรวมกันในห้องเก็บรวบรวม สิทธิบัตรนี้ได้แก้ปัญหาที่ไม่สามารถผลิตโดยเครื่องอบแห้งพ่นฝอยแบบเดิม เนื่องจากความหนืดของแป้งผสมที่สูงเกินไป



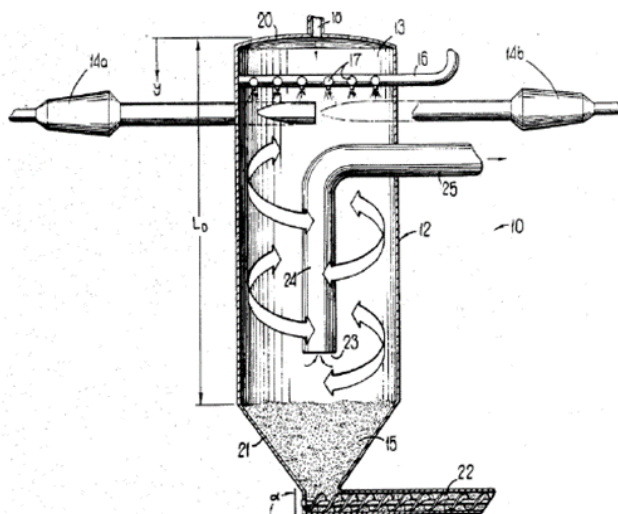
รูปที่ 2.25 ชุดผลิตเม็ดแป้งเค้ก [25]

Frederick [26] นำเสนอสิทธิบัตรเลขที่ US 4226668 เป็นสิทธิบัตรเกี่ยวกับหัวฉีดวัสดุสำหรับใช้ในระบบอบแห้งแบบเจ็ทพัลส์ โดยท่อลำเลียงวัสดุถูกสอดเข้าไปในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จำนวน 1 ท่อ หรือหลายท่อ ซึ่งท่อส่งแต่ละท่อถูกวางในแนวตั้ง โดยเชื่อมต่อกับห้องอบขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2.26 โดยท่อลำเลียงวัสดุถูกวางในตำแหน่งกลางท่อส่งและปลายของท่อลำเลียงอยู่ภายในท่อส่ง ทำให้วัสดุที่ส่งออกมาโดนแก๊สร้อนความเร็วสูงและคลื่นเสียงและถูกทำให้แตกกระจายเป็นละอองและถูกอบแห้งอย่างรวดเร็ว รูปแบบการวางท่อลำเลียงในท่อส่งสามารถช่วยลดปัญหาการเกาะติดของวัสดุระหว่างออกจากท่อส่ง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ห้องเผาไหม้ทำงานผิดปกติได้ และยังแสดงไซโคลนสำหรับดักจับวัสดุที่ผ่านการอบแห้งจากลมร้อน ด้านใต้ของไซโคลนมีการติดตั้งสกรูสำหรับลำเลียงวัสดุที่ผ่านการอบออก



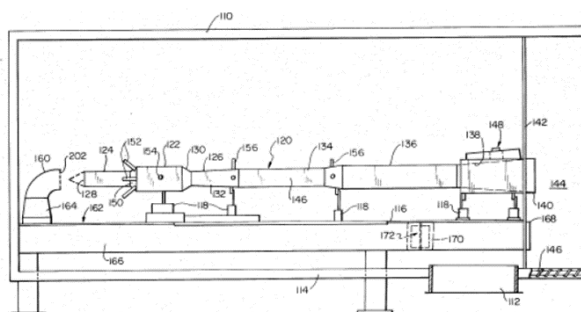
รูปที่ 2.26 ระบบอบแห้งและการสอดท่อลำเลียงในท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [26]

Zinn และคณะ [27] ได้เสนอสิทธิบัตร US 4770626 เกี่ยวกับการควบคุมความถี่และแอมพลิจูดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ซึ่งสามารถใช้กระตุ้นความถี่ธรรมชาติในห้องอบได้ และได้แสดงตัวอย่างการใช้งานอบแห้งสารละลายชั้น (Slurry) ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยของสารละลายชั้น [27]

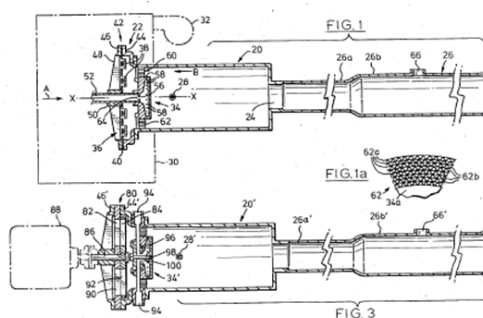
Robert และ Val [28] ได้เสนอสิทธิบัตรเลขที่ US 4637794 เป็นระบบอบแห้งห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยต่อท่อยาวที่ใช้เป็นห้องอบกับท่อส่งของห้องเผาไหม้โดยตรง และได้เพิ่มระบบเพิ่มอากาศเข้าในระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ระบบอบแห้งนี้จะแตกต่างกับระบบเดิมที่ส่วนใหญ่จะวางท่ออบในแนวตั้ง แต่ในระบบนี้ท่ออบจะวางในแนวนอน ระบบเพิ่มอากาศสามารถใช้ลดอุณหภูมิของแก๊สร้อนจากท่อส่งให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่จะอบ



รูปที่ 2.28 ระบบอบแห้งที่ต่อกับห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ติดตั้งท่อเพิ่มอากาศ [28]

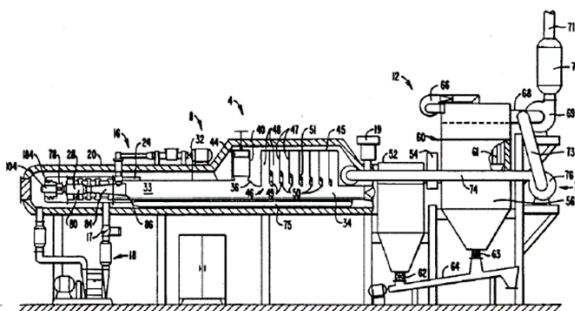


Kitchen [29] ได้เสนอสิทธิบัตรเลขที่ US 4697358 เป็นวิธีการปรับปรุงห้องเผาไหม้แบบพัลส์เพื่อใช้สำหรับการอบแห้ง โดยที่ทางเข้าอากาศและเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้จะติดตั้งโรตารีวาล์วที่สามารถปรับอัตราการจ่ายอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ทำให้สามารถปรับโหมดความรุนแรงของการเผาไหม้ได้ ในส่วนของท่อส่งจากห้องเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นท่อขยายออก มีการติดตั้งท่อสำหรับใส่วัสดุที่ต้องการอบได้ โดยจะมีกลไกที่สามารถปรับอัตราการป้อนวัสดุให้เหมาะสมกับการเผาไหม้ในส่วนของห้องเผาไหม้



รูปที่ 2.29 ห้องเผาไหม้แบบพัลส์เพื่อใช้สำหรับการอบแห้งที่ติดตั้งโรตารีวาล์วควบคุมอากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้ [29]

Hanford [30] ได้เสนอสิทธิบัตรเลขที่ US 4941820 เกี่ยวกับระบบอบแห้งแบบใหม่ที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ต่อเข้ากับท่อห้องอบ (Processing tube) ที่จะให้วัสดุอบแห้งไหลผ่านไปยังส่วนของไซโคลนสำหรับดักเก็บ วัตถุประสงค์ของเหลวที่ต้องการอบจะถูกส่งเข้าสู่ระบบที่ทางออกของท่อส่งที่ต่อกับห้องเผาไหม้ ภายในท่อส่งจะติดตั้งตัวปรับแอมพลิจูดของคลื่นเสียงและติดตั้งแผ่นบัพเฟิลเพื่อลดเสียงดัง ในระบบมีชุดควบคุมอัตราการจ่ายของเหลว ชุดควบคุมการเผาไหม้ ชุดควบคุมอัตราการไหล และชุดควบคุมความถี่การทำงานห้องเผาไหม้แบบพัลส์



รูปที่ 2.30 ระบบอบแห้งสำหรับห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [30]

Daisuke และคณะ [31] ได้เสนอสิทธิบัตรเลขที่ US 0189732 A1 เป็นวิธีการผลิตยางผงจากน้ำยางธรรมชาติที่ประกอบไปด้วยการฉีดพ่นน้ำยางลงไปในบรรยากาศของคลื่นกระแทกที่เกิดจากการเผาไหม้แบบพัลส์จนยางแห้ง โดยใช้น้ำยางที่มีความเข้มข้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนักหรือน้อยกว่า ภายใต้เงื่อนไขความถี่ของการเผาไหม้ที่ 250-1,200 Hz และอุณหภูมิของห้องอบแห้งสำหรับการฉีดพ่นน้ำยาง 140 °C หรือน้อยกว่า จากการทดลองพบว่า การลดความชื้นจะทำให้ยางแห้งเร็วขึ้น ประสิทธิภาพความร้อนในการผลิตน้ำยางชั้นสามารถปรับปรุงได้ และมีค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, ML1+4) อยู่ในช่วง 91-95 ในระบบของ daisuke ยังไม่สามารถพูดถึงความชัดเจนในการเคลือบผิวของอนุภาคยางธรรมชาติผง ซึ่งเมื่ออบแห้งละอองน้ำยางจนเป็นอนุภาคยางที่มีขนาดเล็กแล้ว ถ้าไม่มีการเคลือบผิวของอนุภาคยาง อาจทำให้อนุภาคยางกลับมาเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนได้อีกครั้ง

จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นพบว่า งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการเตรียมยางธรรมชาติผง ที่ใช้หัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะร่วมกับห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่มีสมบัติเหมือนคลื่นกระแทก ซึ่งในระบบสเปรย์พ่นฝอยแบบทั่วไป ยังมีปัญหาการติดอุดตันของน้ำยางในระบบพ่นละอองฝอย

งานวิจัยนี้จะศึกษาและออกแบบหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะ โดยใช้เจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่มีสมบัติเหมือนคลื่นกระแทกปะทะกับหยดหรือฟิล์มของน้ำยางให้แตกเป็นละอองฝอย แล้วไหลไปกับกระแสลมร้อนจนเม็ดยางแห้ง ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดปัญหาการอุดตันในระบบพ่นฝอยแบบเดิม และการสั้นของกระแสลมร้อนจะช่วยเพิ่มความสามารถถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปยังละอองน้ำยาง ทำใหยางแห้งเร็วขึ้น

### บทที่ 3

#### ชุดทดลองและขั้นตอนการวิจัย

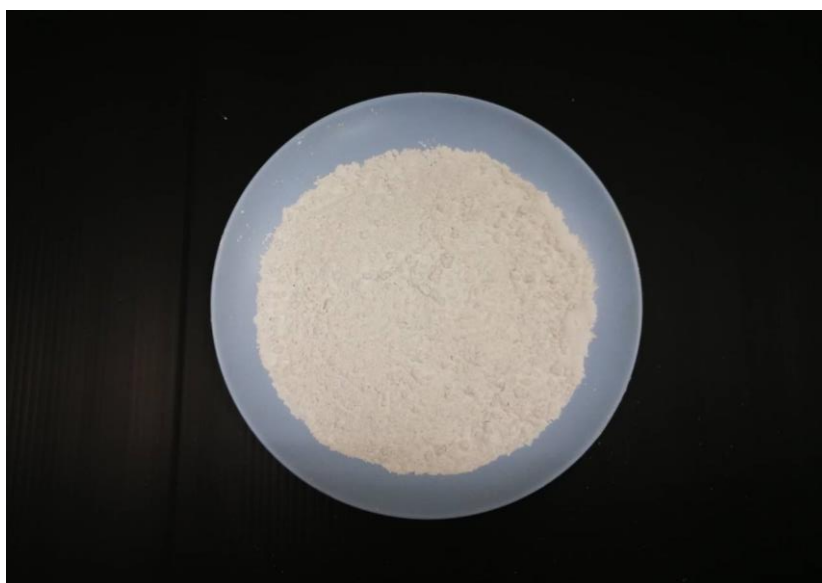
ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงลักษณะของห้องเผาไหม้ รายละเอียดของรูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางและขนาดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ในส่วนที่สองจะศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง สำหรับส่วนที่สามจะศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย และในส่วนที่สี่จะศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติผง ซึ่งรายละเอียดการทดลองจะแสดงดังต่อไปนี้

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) ที่มีปริมาณเนื้อยางร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ใช้สารรักษาสภาพน้ำยางชนิดแอมโมเนีย (Ammonia) เท่ากับ 0.7% มีส่วนที่ไม่ใช่ยาง 1.59% และส่วนที่เป็นน้ำ 37.57% จากบริษัทผลองอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น จำกัด ซึ่งส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติชั้น แสดงดังตารางที่ 3.1

3.1.2 ผงทัลคัม (Talcum powder) ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ มีขนาดอนุภาค 43  $\mu\text{m}$  จากบริษัท เอสเจ สินธุพันธ์เทรดดิ้ง จำกัด มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1.3 ผงซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) ที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ มีขนาดอนุภาค 37  $\mu\text{m}$  จากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมีคัลส์ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ผงทัลคัมที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ



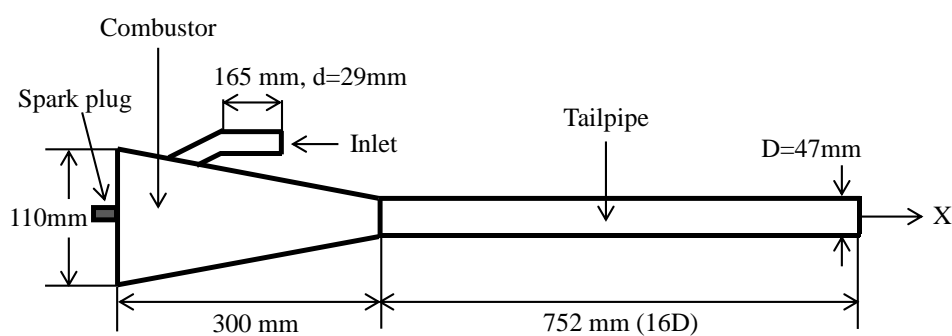
รูปที่ 3.2 ผงชิงค์สเตียเรทที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติชั้น

ส่วนประกอบ		ผลการทดสอบ	ขีดจำกัด
Total solids content	%	61.73	≥ 61.50
Dry rubber content	%	60.14	≥ 60.00
Ammonia content (on total weight)	%	0.70	≥ 0.60
Ammonia content (on water phase)	%	1.829	≥ 1.60
Non rubber solid	%	1.59	≤ 2.00
pH		10.56	≥ 10.50
KOH number		0.56	≤ 1.00
Volatile fatty acid number		0.029	≤ 0.20
Mechanical stability time @55% T.S. (ASTM)	Secs	1,100	≥ 650
Mg <sup>2+</sup>		17.00	≤ 30.00 PPM
Colour of latex		White	White
Colour of film		Normal	Normal

### 3.2 ลักษณะของห้องเผาไหม้แบบพัลส์

สำหรับโมเดลที่ใช้ในการศึกษา มีลักษณะของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยรูปแบบของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ที่มีท่อทางเข้าอากาศทางเดียว โดยห้องเผาไหม้ทำจากแผ่นสแตนเลส ด้านท้ายของห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm ยาว 300 mm และด้านท้ายของห้องเผาไหม้ได้ติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดระเบิดเชื้อเพลิงตอนเริ่มเดินเครื่อง ส่วนอีกด้านของห้องเผาไหม้จะต่อเข้ากับท่อส่ง มีลักษณะเป็นท่อลดหน้าตัด ทำจากสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=47$  mm ยาว 750 mm (ประมาณ 16D) สำหรับท่อทางเข้าอากาศได้ออกแบบให้ติดตั้งเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยท่อทางเข้าอากาศทำจากท่อสแตนเลส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ยาว 165 mm ถูกงอให้ปลายชี้ไปทิศทางเดียวกับท่อส่ง สำหรับรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แผนภาพของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา [32]



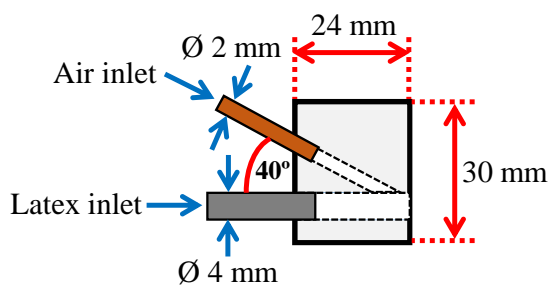
รูปที่ 3.4 ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา [32]

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่ง (D)	47 mm
ระยะห่างจากปากทางออกท่อส่งถึงหัววัดอุณหภูมิ และหัววัดความเร็ว (X)	1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D และ 8D
อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG, $Q_{LPG}$ (ที่ความดันจ่าย 2.5 bar)	22, 25 และ 29 l/min (0.023, 0.027 และ 0.031 kg/min)

### 3.3 รูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจที่จะออกแบบและพัฒนาหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง โดยในรูปที่ 3.5 แสดงรูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางสำหรับใช้ในการศึกษา ซึ่งหัวฉีดทำจากวัสดุอะคริลิก (Acrylic) มีลักษณะเป็นหัวฉีดที่มีท่อทางเข้าน้ำยางและท่อทางเข้าอากาศร่วมกัน โดยในหัวฉีดจะประกอบด้วย ท่อทางเข้าน้ำยาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm และท่อทางเข้าอากาศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm โดยจะออกแบบหัวฉีดให้สามารถสร้างละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็กและไม่เกิดการอุดตันในรูหัวฉีด ซึ่งในขั้นตอนแรก ได้ออกแบบหัวฉีดโดยให้ท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยาง 30 องศา จากการทดสอบพบว่า เมื่อพ่นละอองน้ำยางจากหัวฉีดมุม 30 องศา จะทำให้ละอองน้ำยางส่วนหนึ่งปะทะกับลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ และจะมีละอองน้ำยางบางส่วนถูกพ่นจากหัวฉีดไหลไปปะทะและเกาะติดกับผนังของห้องอบ จึงทำให้หัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยาง 30 องศา เป็นมุมหัวฉีดที่ไม่เหมาะสมกับการพ่นละอองน้ำยางในที่นี้ หลังจากนั้นได้ทำการเปลี่ยนมาใช้หัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยาง 40 องศา ซึ่งจากผลการทดสอบหัวฉีดมุม 40 องศา พบว่า ละอองน้ำยางที่พ่นจากหัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยาง 40 องศา ทำให้ละอองน้ำยางที่เข้ามาในห้องอบ ไหลเข้ามาปะทะกับลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยทำให้ละอองน้ำยางตกลงมาตรงกึ่งกลางของห้องอบได้อย่างพอดี ซึ่งละอองน้ำยางที่พ่นจากหัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยาง 40 องศา ไม่ไหลไปปะทะและเกาะติดกับผนังของห้องอบ ในหลักการทำงานของหัวฉีด จะเริ่มจากใช้อากาศที่มีความเร็วสูงไหลเข้ามาสู่ท่อทางเข้าอากาศเพื่อให้ปะทะกับน้ำยางที่เข้ามายังท่อทางเข้าน้ำยางที่มีความเร็วต่ำ จนเกิดการแตกเป็นละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็กในที่สุด สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.3 โดยในการทดลอง จะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้ามาในหัวฉีด ( $Q_a$ ) ที่ 70, 80 และ 90 l/min และจะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้ามาในหัวฉีด ( $Q_L$ ) ที่ 20, 40 และ 60 g/min ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 รูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

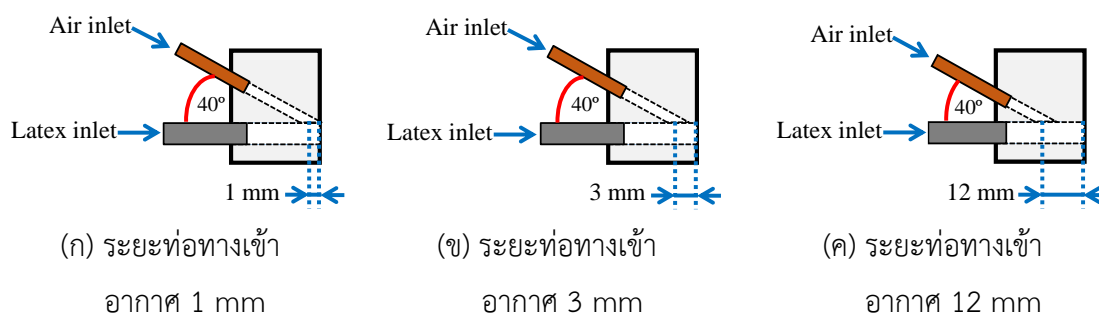


รูปที่ 3.6 หัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองฝอย

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเข้าน้ำยาง	4 mm
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเข้าอากาศ	2 mm
มุมระหว่างช่องทางเข้าอากาศที่ทำกับช่องทางเข้าน้ำยาง	40 องศา
อัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าหัวฉีด, $Q_a$ (ที่ความดันจ่าย 2 bar)	70, 80 และ 90 l/min
อัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้าหัวฉีด, $Q_L$	20, 40 และ 60 g/min

สำหรับรูปที่ 3.7 แสดงรูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ สำหรับการทดลองจะควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่เข้ามาในหัวฉีดไว้ที่ 70 L/min และควบคุมอัตราการไหลของน้ำยางที่เข้ามาในหัวฉีดไว้ที่ 40 g/min เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางที่เหมาะสมและสามารถสร้างละอองที่มีขนาดเล็กละเอียด



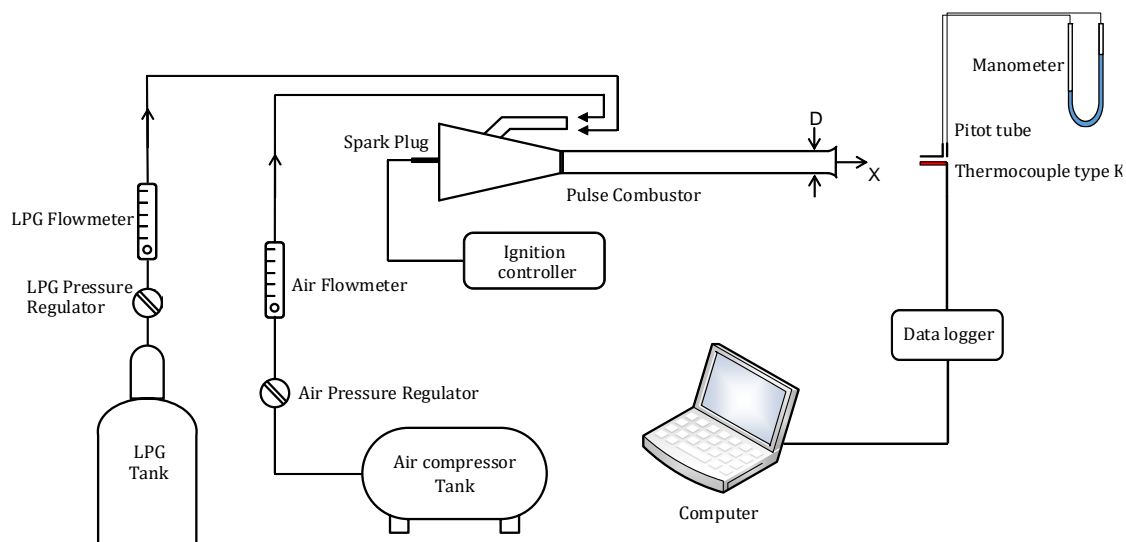
รูปที่ 3.7 รูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน

### 3.4 การศึกษาลักษณะพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์

สำหรับหัวข้อนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ในการทดลองเริ่มจากอากาศจะถูกจ่ายจากถังอัดอากาศไหลผ่านโรตารีเมเตอร์เพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 2 bar อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 50 L/min จะไหลเข้าสู่ท่อทางเข้าอากาศของห้องเผาไหม้ จากนั้นจะจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ผ่านตัวปรับความดันของเชื้อเพลิง 2.5 bar เข้าสู่ห้องเผาไหม้มาผสมกับอากาศที่ไหลเข้ามาก่อนหน้านี้ จากนั้นจะจุดระเบิดด้วยหัวเทียนที่ติดตั้งอยู่ด้านท้ายของห้องเผาไหม้ด้วยการควบคุมกระแสไฟฟ้าจากชุดควบคุมการจุดระเบิดผ่านหัวเทียนจนเกิดความร้อน ทำให้ระบบเกิดการระเบิดขึ้น การระเบิดนี้เรียกว่าวัฏจักรแบบพัลส์ คือจะมีทั้งความดันบวกและลบ เป็นการระเบิดแบบต่อเนื่อง ทำให้หลังจากการจุดระเบิดด้วยหัวเทียนแล้ว จะไม่ต้องจ่ายอากาศจากถังอัดอากาศอีกต่อไป เนื่องจากความดันเป็นสุญญากาศของห้องเผาไหม้จะดึงอากาศโดยรอบเข้ามาสู่ห้องเผาไหม้ได้เอง จากนั้นรอให้สถานะของห้องเผาไหม้เริ่มคงที่ และเริ่มทำการวัดผลของอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของท่อส่งที่ X/D ต่าง ๆ ในส่วนของการวัดอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจะใช้หัววัดอุณหภูมิ Thermocouple type K ต่อเข้ากับ Data logger และเก็บข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาวิเคราะห์ผล ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับในส่วนของการวัดความเร็วของเจ็ทลมร้อน จะวัดผลต่างของความดันด้วยหัววัด Pitot static tube แล้วแสดงผลต่างของความดันด้วยความสูงของระดับน้ำในมานอมิเตอร์ (Manometer) เมื่อได้ค่าความสูงแล้วจึงนำผลที่ได้ไปคำนวณหา



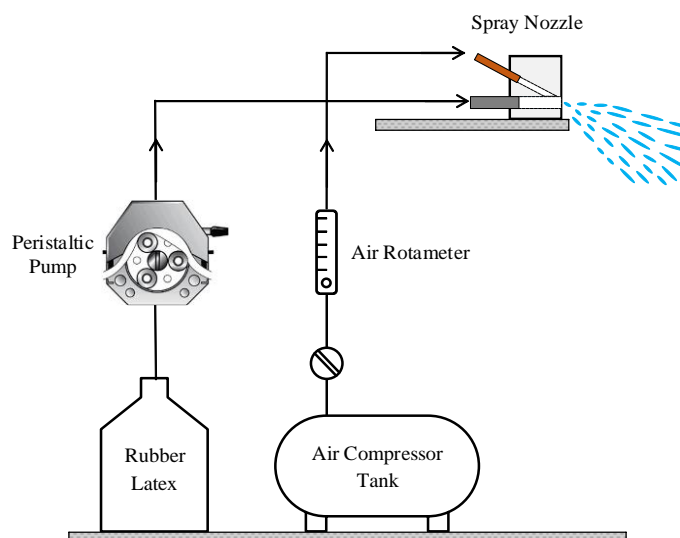
ความเร็วต่อไป โดยในการทดลองนี้ จะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 22, 25 และ 29 l/min เพื่อศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.8 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

### 3.5 การศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

ชุดทดลองสำหรับใช้ในการศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง แสดงดังรูปที่ 3.9 ประกอบด้วย ถังพักน้ำยาง (Rubber tank) ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) ถังอัดอากาศ (Air compressor tank) และหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง (Spray nozzle) โดยในหลักการทำงานของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง จะเริ่มจากป้อนน้ำยางจากถังพักน้ำยางผ่านปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) เพื่อทำการวัดและควบคุมอัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้ามาในหัวฉีด จากนั้นจะป้อนอากาศจากถังอัดอากาศไหลผ่านโรตاميเตอร์เพื่อวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่เข้ามาในหัวฉีด เมื่ออากาศไหลเข้ามาปะทะกับน้ำยางในหัวฉีดด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นละอองน้ำยางออกมาจากหัวฉีดโดยมีลักษณะเป็นละอองฝอยที่มีขนาดเล็ก

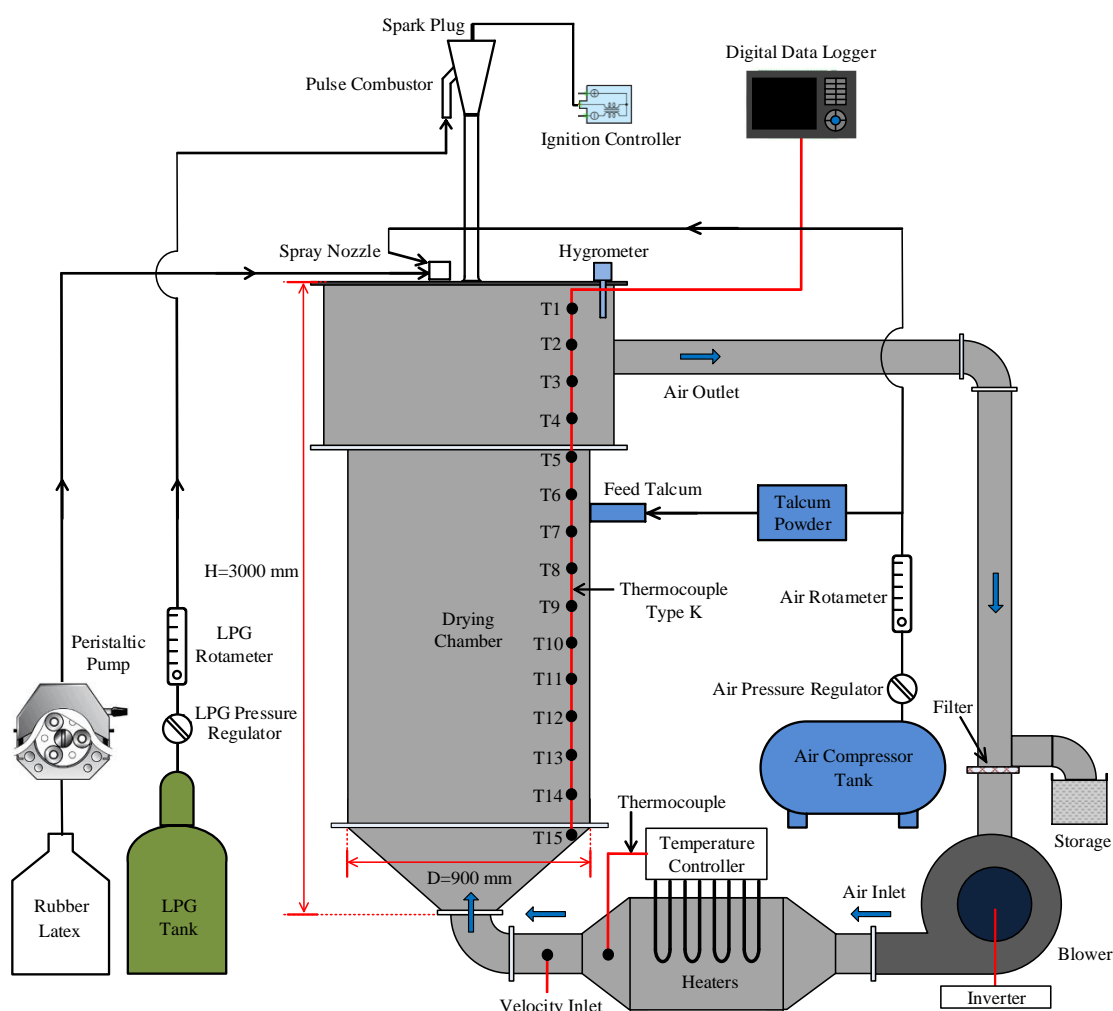


รูปที่ 3.9 แผนภาพชุดทดลองสำหรับใช้ในการศึกษารูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

### 3.6 การศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ในรูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพของชุดทดลองสำหรับการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ดังนี้ คือ ห้องอบ (Drying chamber) ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ (Pulse combustor) และแผงควบคุมการจุดระเบิด (Ignition controller), หัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง (Nozzle) และกระบอกฉีดผงแป้งทัลคัม (Talcum sprayer) สำหรับรายละเอียดของห้องอบ (Drying chamber) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 900 mm มีความสูง (H) เท่ากับ 3000 mm ทำจากเหล็กแผ่นหนา 2 mm โดยท่อทางเข้าของห้องอบจะอยู่บริเวณด้านล่างของห้องอบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm จะต่อเข้ากับชุดฮีทเตอร์ (Heaters) และต่อกับพัดลม (Blower) ที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อทำหน้าที่เป่าลมเข้าไปในห้องอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยในส่วนทางด้านข้างห้องอบจะมีท่อทางออกอากาศ 1 ท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm และสำหรับในส่วนของระบบดักจับอนุภาคยางธรรมชาติผงจะมีฟิลเตอร์ (Filter) ไว้เพื่อดักจับอนุภาคยางก่อนที่ลมร้อนจะไหลเวียนกลับเข้าไปยังพัดลมอีกครั้ง ภายในห้องอบจะติดตั้งแถวของเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K เรียงตามแนวตั้ง ติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งด้านข้างภายในห้องอบมีจำนวน 15 จุด ต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Digital data logger) เพื่อสำหรับวัดอุณหภูมิที่กระจายภายในห้องอบ โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งการวัดแต่ละจุดเท่ากับ 200 mm และติดตั้งเซนเซอร์สำหรับวัดความชื้น 1 ตัว เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ โดยในการทดลองจะเริ่มจ่ายอากาศจากพัดลมที่ควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ จากนั้นเปิดฮีทเตอร์ที่มีกล่องควบคุมอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากระบบ หลังจากนั้นจะจุดระเบิดห้องเผา

ไหม้แบบพัลส์ด้วยแผงควบคุมการจุดระเบิด รองนกว่าห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady) แล้วจึงเริ่มพ่นละอองน้ำจากหัวฉีดเข้าไปในห้องอบแห้งละอองน้ำ ซึ่งใช้เจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ในการให้ความร้อนแก่ระบบ เมื่อละอองน้ำยางไหลเข้ามาสัมผัสกับลมร้อนแบบพัลส์จนทำให้ละอองน้ำยางแห้งเป็นยางธรรมชาติผงที่มีขนาดเล็ก จากนั้นลมร้อนจะพาอนุภาคยางธรรมชาติผงไหลออกที่ช่องทางออกของห้องอบ เมื่ออนุภาคยางตกลงมาสู่ด้านล่างของช่องทางออก จะมีฟิลเตอร์เป็นตัวกรองอนุภาคยาง เพื่อไม่ให้อนุภาคยางไหลเข้าสู่พัดลม โดยด้านข้างของตัวกรองฟิลเตอร์จะติดตั้งที่กักเก็บอนุภาคยาง (Storage) เพื่อไว้เก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง จากนั้นลมร้อนจะไหลเวียนกลับเข้ามาสู่พัดลมอีกครั้ง ซึ่งในระบบนี้จะติดตั้งแผ่นเหล็กไว้ที่พัดลมฝั่งดูดอากาศเข้าเป็นแผ่นแบบเลื่อนเปิดและปิดได้ เพื่อให้สามารถปรับการนำความชื้นออกจากระบบ

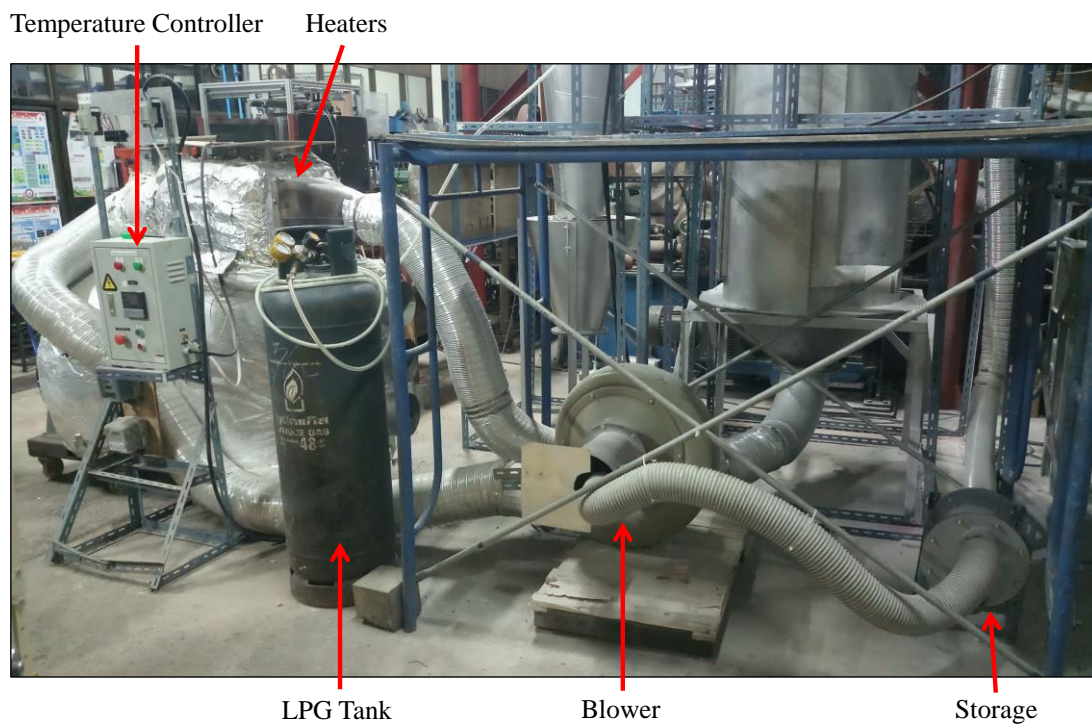
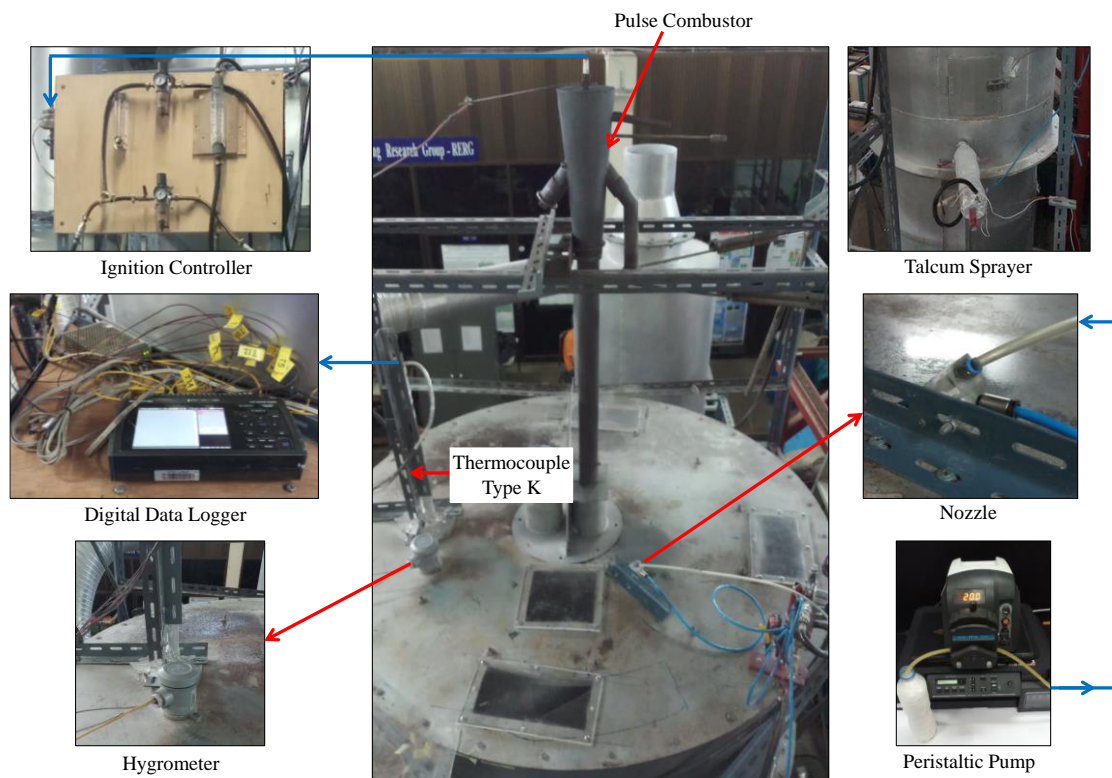


รูปที่ 3.10 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายชุดทดลองที่ใช้ศึกษาในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย





รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายส่วนประกอบของชุดทดลองที่ใช้ศึกษาในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

สำหรับรายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.4 ก่อนที่จะเริ่มการทดลอง จะทำการใส่สีน้ำหมึก (สีแดง) ลงไปในน้ำยางชั้นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จนทำให้สีของน้ำยางเปลี่ยนเป็นสีแดงอมชมพู เพื่อให้ง่ายต่อการแยกสีของอนุภาคยางธรรมชาติผงกับผงแป้งทัลคัม ซึ่งผงแป้งทัลคัมที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผงจะเป็นสีขาว โดยในการทดลองจะควบคุมการใช้ปริมาณของน้ำยางชั้นไว้ที่ 500 g (โดยคิดเป็น 60% yield ของน้ำหนักยางที่ได้) เหมือนกันทุกกรณี และควบคุมอัตราการป้อนผงทัลคัม (Talcum powder) ไว้ที่ 50 g/min จากนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) เท่ากับ 22, 25 และ 29 l/min หลังจากนั้นจะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีด ( $Q_L$ ) เท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min และจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วทางเข้าห้องอบ ( $V_i$ ) ที่ 5.5, 8.7 และ 12 m/s ตามลำดับ

สำหรับกรณีศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ จะทำการติดตั้งแถวของเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K เรียงตามแนวตั้ง โดยติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของห้องอบ มีระยะห่างจากผนังด้านในของห้องอบเท่ากับ 450 mm มีจำนวนตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิภายในห้องอบ 15 จุดวัด เพื่อสำหรับวัดอุณหภูมิที่กระจายภายในห้องอบ โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งการวัดแต่ละจุดเท่ากับ 200 mm และได้ติดตั้งเซนเซอร์สำหรับไว้วัดความชื้น 1 ตัว เพื่อเก็บข้อมูลความชื้นที่เปลี่ยนไปภายในห้องอบ สำหรับในการทดลองจะควบคุมการใช้ปริมาณของน้ำยางชั้นเท่ากับ 500 g (โดยคิดเป็น 60% ของน้ำหนักยางที่ได้) เหมือนกันทุกกรณี และทำการควบคุมอัตราการป้อนผงซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) ไว้ที่ 50 g/min

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

รายละเอียดตัวแปร	เงื่อนไขและขนาด
น้ำหนักของน้ำยางชั้น	500 g
อัตราการป้อนผงทัลคัม, $Q_{Talc}$	50 g/min
อัตราการป้อนผงซิงค์สเตียเรท, $Q_{Zinc}$	50 g/min
อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG, $Q_{LPG}$ (ที่ความดันจ่าย 2.5 bar)	22, 25 และ 29 l/min (0.023, 0.027 และ 0.031 kg/min)
อัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้าหัวฉีด, $Q_L$	20, 40 และ 60 g/min
ความเร็วทางเข้าห้องอบ, $V_i$	5.5, 8.7 และ 12 m/s

### 3.7 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการแห้งผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติผงและพลังงานที่ใช้ในการอบ

#### 3.7.1 การตรวจหาความชื้นของยางแห้งโดยวิธีการอบผลิตภัณฑ์

การตรวจหาความชื้นของยางแห้งโดยวิธีการอบตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานวิจัยและในงานควบคุมคุณภาพที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำสูง โดยในกระบวนการอบแห้งจะใช้เตาอบไฟฟ้า (Hot air oven) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้หาน้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ โดยจะอบผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 105 °C ใช้เวลาในการอบประมาณ 2-3 วัน หรือ 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐานของการวิเคราะห์แบบ AOAC 1996 โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ (1) ทำการสับตัวอย่างสำหรับการอบ ประมาณ 50 กรัม (2) นำมาใส่ภาชนะอลูมิเนียม จากนั้นนำไปชั่งและจดบันทึกน้ำหนักก่อนที่จะอบแห้งผลิตภัณฑ์ (3) นำไปอบในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 105 °C ใช้เวลานานประมาณ 72 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง (4) เมื่ออบครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำผลิตภัณฑ์มาชั่งน้ำหนักหลังจากการอบและจดบันทึกข้อมูล โดยในระหว่างการทดลองอบแห้งผลิตภัณฑ์ จะทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อหาความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่อบ ซึ่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่เวลาต่าง ๆ สามารถคำนวณหาความชื้นได้ดังสมการ

$$\% db = \frac{W - D}{D} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ % db คือ ความชื้นเศษส่วนมาตรฐานแห้ง (% dry basis)

$W$  คือ น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ ที่ เวลาใด ๆ

$D$  คือ น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์หลังจากการอบ

#### 3.7.2 พลังงานที่ใช้ในการอบ

การสิ้นเปลืองพลังงานระหว่างการอบแห้งละอองน้ำยาง จะคิดพลังงานรวมจากกำลังไฟฟ้าที่ฮีตเตอร์ (Heater) จ่ายให้กับระบบ กำลังไฟฟ้าของพัดลม (Blower) ที่จ่ายให้กับระบบ และพลังงานความร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG โดยสามารถคำนวณหาพลังงานไฟฟ้ารวมที่จ่ายให้กับระบบได้ดังสมการ

$$Total Energy = E_{P_{heater}} + E_{P_{blower}} + E_{Q_{LPG}} \quad (3.2)$$

$$Total Energy = [(I \times V) \times hr] + [(\sqrt{3} \times I \times V \times pf) \times hr] + [(m_{fLPG} \times HHV) \times hr]$$

โดยที่	$E_{P_{heater}}$	คือ พลังงานไฟฟ้าจากการใช้ฮีทเตอร์ (kWh)
	$E_{P_{blower}}$	คือ พลังงานไฟฟ้าจากการใช้พัดลมโบลเวอร์ (kWh)
	$I$	คือ กระแสของมอเตอร์ที่วัดได้จากการทดลอง (Ampere)
	$V$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง (Volt)
	$pf$	คือ ตัวประกอบกำลัง
	$E_{Q_{LPG}}$	คือ พลังงานความร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG (kWh)
	$\dot{m}_{f_{LPG}}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส LPG ที่วัดค่าได้ (kg/s)
	$HHV$	คือ ค่าความร้อนคงที่ของแก๊ส LPG (MJ/kg)
	$hr$	คือ จำนวนชั่วโมงของการใช้พลังงาน (h)

### 3.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ดังแสดงในภาพที่ 3.13 โดยการนำชิ้นตัวอย่างที่ต้องการวัดไปวางบนแท่นถ่ายภาพ ก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ สำหรับในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานด้วยเทคนิคนี้ จะใช้กำลังขยายที่ 50, 200 และ 500 เท่า โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 20 kV และวิเคราะห์ขนาดอนุภาคยางธรรมชาติผงด้วยเครื่องวิเคราะห์อิเล็กตรอนแบบจุลภาค (Electron micro analyzer) ตามลำดับ



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น FEI 400 (Czech Republic)



### 3.9 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการศึกษากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้เทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) ด้วยเครื่อง Thermalgravimetric analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เป็นเทคนิคใช้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำหนักที่หายไป เนื่องจากการสลายตัวขององค์ประกอบในสารตัวอย่างยางธรรมชาติผงและวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ของยางธรรมชาติผง เช่น ปริมาณของสารเติมอินทรีย์และสารเติมอนินทรีย์ ในการทดสอบจะให้อัตราการความร้อนที่  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากอุณหภูมิ 25 ถึง  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราเร็ว  $40\text{ ml}/\text{min}$



รูปที่ 3.14 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA8000, Perkin Elmer

### 3.10 การทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติ

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลการศึกษาทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติผง (Original Wallace Plasticity and Plasticity Retention Index: Po และ PRI) โดยค่าความอ่อนตัวเริ่มต้นของยาง (Po) เป็นค่าที่ใช้ประมาณขนาดของโมเลกุลของยาง โดยยางที่มีค่า Po สูง แสดงว่ายางชนิดนั้นมีขนาดโมเลกุลของยางสูง (ยางที่ถูกออกซิไดซ์มากจะนิ่ม มีค่า Po ต่ำ) ส่วนค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง เป็นค่าที่แสดงว่ายางที่ทดสอบมานั้น มีความต้านทานต่อการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที (กรณีของยางที่ทนต่อการออกซิเดชันสูง โมเลกุลของยางจะทนต่อการถูกออกซิไดซ์) หรือเป็นการแสดงความต้านทานของยางดิบ ต่อการแตกหักของโมเลกุลยางที่อุณหภูมิสูง ซึ่งในส่วนนี้จะเลือกยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับกรณีของเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่  $29\text{ l}/\text{min}$ , ความเร็วทางเข้าห้องอบ ที่  $12\text{ m}/\text{s}$  และอัตราการไหลของน้ำยางที่  $20\text{ g}/\text{min}$  ซึ่งเป็นกรณีที่มีสารปนเปื้อนอยู่ในยางธรรมชาติผงที่มีค่าน้อยที่สุด แล้วนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางแห่ง STR 5L ซึ่งเป็นยางที่มีจัดจำหน่ายอยู่ในเชิงพาณิชย์ โดยในการทดสอบจะเริ่มจาก

นำยางขึ้นทดสอบมาอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที รอจนครบ 30 นาทีแล้ว ทิ้งยางให้เย็นเป็นเวลา 30 นาที จึงทำการทดสอบวัดค่า  $P_0$  และ  $P_{30}$  เมื่อได้ค่าจากการทดสอบแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI) ดังสมการ

$$PRI = \frac{P_{30}}{P_0} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่  $P_0$  คือ ค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดเริ่มแรก  
 $P_{30}$  คือ ค่ามัธยฐานความอ่อนตัวของยางชุดที่หลังอบ

### 3.11 การทดสอบความหนืดมูนนี่

สำหรับหัวข้อนี้จะศึกษาการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ซึ่งความหนืดมูนนี่เป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของยางคอมพาวด์ที่ต้องตรวจสอบ เพราะเป็นสมบัติที่บ่งชี้ความสามารถในการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางคอมพาวด์ ยางที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่าย ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายดายเช่นกัน ในการวัดค่าความหนืดมูนนี่สามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Rubber viscosity tester) ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.15 ตัวเครื่องทดสอบประกอบด้วยโรเตอร์ที่วางอยู่ในช่องว่างระหว่างดาย 2 อัน คือ ดายบน (Upper die) และดายล่าง (Lower die) ใส่ยางเข้าไปในช่องว่างระหว่างดายบนและดายล่าง ให้ความร้อนแก่ยาง (Preheat time) 1 นาที เพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่จะทดสอบ จากนั้นโรเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วประมาณ 2 รอบต่อนาที ทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างพื้นผิวของโรเตอร์และพื้นผิวของดาย แรงที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดของยางคอมพาวด์ เครื่องจะบันทึกแรงบิดที่ต้องใช้ในการหมุนโรเตอร์ตามเวลาและแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของ Mooney units (MU) หรือ Mooney viscosity (MV) scale โดยจะอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไป 4 นาที



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Rubber Viscosity Tester) รุ่น MV2000

### 3.12 การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ (Cure characteristics) ในการทดสอบจะเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางแท่ง (Standard Thai Rubber, STR 5L) โดยมีขนาดของชิ้นยางในช่วง 1-5 mm และยางธรรมชาติผง (Natural rubber powder, NRP) ที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ ที่ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20 g/min ซึ่งมีขนาดของอนุภาคยางประมาณ 50-500  $\mu\text{m}$  โดยการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรงด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) มีขนาดห้องเสื่อ (Batch size) เท่ากับ 90  $\text{cm}^3$  ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เนื่องจากเครื่องบดผสมแบบปิดจะให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการผสมมากกว่าการใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง เพราะสารเคมีจะไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการบดผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม ซึ่งจะบดผสมภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70  $^{\circ}\text{C}$  และที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ 60 rpm โดยใช้เวลาการบดผสมสารเคมีแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.5 ซึ่งในระหว่างการบดผสม จะแสดงข้อมูลพื้นฐานระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์ คือ ค่าทอร์คระหว่างการบดผสม (Mixing torque) และ พลังงานระหว่างการผสม (Mixing energy) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติของยางคอมพาวด์ หลังจากนั้น นำยางคอมพาวด์ที่ได้มาทดสอบหา ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ของยาง (Curing time) โดยใช้เครื่องทดสอบชนิดที่ไม่มีโรเตอร์

(Rotorless curemeter) หรือที่เรียกว่า เครื่อง Moving die rheometer (MDR) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เพื่อตรวจสอบลักษณะการทำให้ยางคงรูปของยางที่ผ่านการผสม โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 170 °C และเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 10 นาที



รูปที่ 3.16 เครื่องผสมยางแบบปิด (Internal Mixer) รุ่น HAAK PolyLab OS



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบการสุกของยาง (Rubber Vulcanization Tester) รุ่น MDR 2000

ตารางที่ 3.5 สูตรยางคอมพาวด์ที่มีชนิดของยางแตกต่างกันและเวลาในการบดผสมสารเคมีแต่ละชนิด

สารเคมี (Ingredient)	หน้าที่ (Function)	ปริมาณ phr (ส่วนต่ออย่างหนึ่งร้อยส่วน)		เวลาการบดผสม (Min)
		สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	
STR 5L	Elastomer	100	-	3
NRP	Elastomer	-	100	3
Stearic acid	Activator	1	1	1
ZnO	Activator	5	5	1
TBBS	Accelerator	1	1	1
Sulfur	Curing agent	2.5	2.5	1

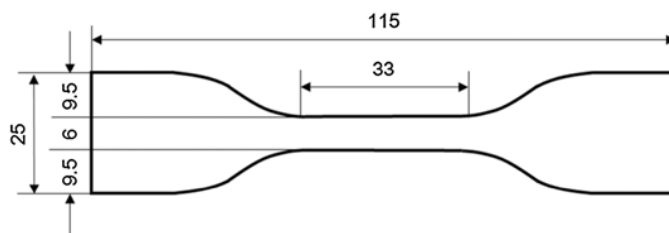
### 3.13 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง

#### 3.13.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

ในการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐานของ ASTM D412 (Die C) โดยชิ้นยางทดสอบจะได้รับการนำยางที่อัดขึ้นรูปเป็นแผ่นมาตัดด้วยเครื่องขึ้นทดสอบ สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยรูปแบบของขนาดชิ้นยางทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 3.19 ขนาดของชิ้นยางทดสอบรูปดัมเบลมาตรฐาน ASTM D412 (Die C)

### 3.13.2 การทดสอบความแข็ง

สำหรับหัวข้อนี้จะศึกษาการทดสอบความแข็งของยางธรรมชาติ (Hardness) โดยจะทำการทดสอบสมบัติความแข็งของยางตามมาตรฐาน ASTM D2240 จะใช้เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester) รุ่น Digitest II ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดสมบัติความต้านทานในการเกิดรอยกดบนพื้นผิวของชิ้นงาน เครื่องชนิดนี้เป็นการทดสอบแบบ Shore A



รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester) รุ่น Digitest II

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

ในบทนี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 4 ส่วนหลัก โดยในส่วนแรกจะอธิบายเกี่ยวกับผลของการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ สำหรับส่วนที่สองจะอธิบายเกี่ยวกับการศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยา ในส่วนที่สามจะอธิบายเกี่ยวกับผลของการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย และส่วนที่สี่จะอธิบายถึงการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงดังต่อไปนี้

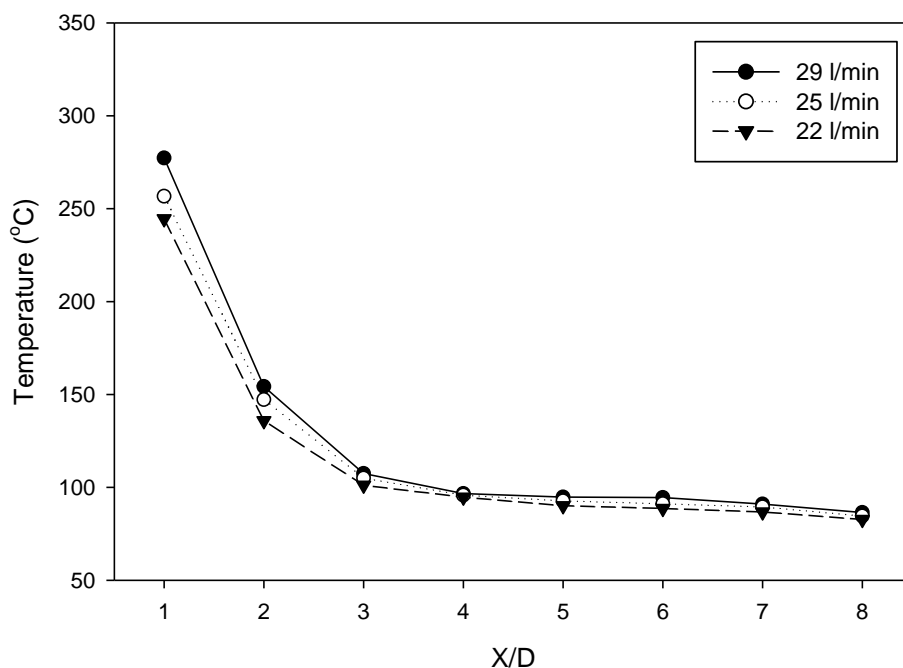
#### 4.1 ผลการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของห้องเผาไหม้แบบพัลส์

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะพฤติกรรมของการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยในการทดลองวัดผลของอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของท่อส่งที่ X/D ต่าง ๆ ในการทดลองนี้จะเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22, 25 และ 29 l/min เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเร็วของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่แตกต่างกัน

##### 4.1.1 ผลการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส

ในกรณีของการวัดผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของท่อส่งที่ X/D ต่าง ๆ โดยในที่นี้จะเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22, 25 และ 29 l/min เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่แตกต่างกัน การศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ พบว่าอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง X/D และสำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 29 l/min ให้อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนสูงสุด ที่  $T = 279\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่ตำแหน่ง X/D=1 โดยอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วง X/D=1 ถึง X/D=3 และเมื่อระยะ X/D เพิ่มมากขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนเนื่องจากที่ระยะ X/D มากขึ้น มีอุณหภูมิลมร้อนที่ใกล้เคียงกันในทุกกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส



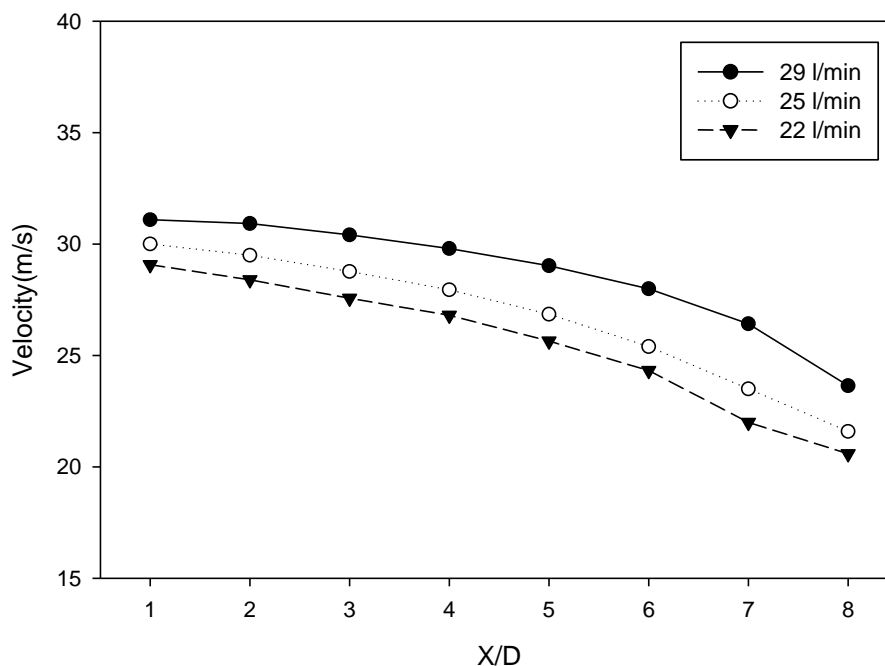
รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่แตกต่างกัน

#### 4.1.2 ผลการวัดความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส

ในกรณีของการวัดผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของท่อส่งที่  $X/D$  ต่าง ๆ โดยในที่นี้จะเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22, 25 และ 29 l/min เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง  $X/D$  และที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่สูงสุด 29 l/min ให้อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนสูงสุด ที่ 32 m/s ที่ตำแหน่ง  $X/D=1$  จากกราฟจะเห็นได้ว่ากรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สที่ 22 และ 25 l/min มีแนวโน้มของเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน และกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส 29 l/min มีลักษณะของเส้นกราฟที่กระโดดมากกว่าเส้นกราฟอื่น เนื่องจากมีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่สูง จึงทำให้มีความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่สูงตาม





รูปที่ 4.2 ผลของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่าง ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่แตกต่างกัน

#### 4.1.3 อัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงแก๊ส

สำหรับส่วนนี้จะทำการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ เพื่อให้ลมร้อนแก่ระบบอบแห้งแบบพ่นฝอย ในการทดลองนี้จะใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22, 25 และ 29 l/min ตามลำดับ โดยการวัดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส สามารถวัดได้จากการชั่งน้ำหนักถังแก๊ส LPG ก่อนและหลังการทดลอง ซึ่งผลจากการวัดชั่งน้ำหนักถังแก๊ส มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส ดังแสดงต่อไปนี้

- สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22 l/min มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส เท่ากับ 1.40 kg/h ( $\dot{m}_{fLPG} = 0.000389$  kg/s)

- สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 25 l/min มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส เท่ากับ 1.62 kg/h ( $\dot{m}_{fLPG} = 0.000450$  kg/s)

- สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 29 l/min มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส เท่ากับ 1.86 kg/h ( $\dot{m}_{fLPG} = 0.000517$  kg/s)

สำหรับราคาขายปลีกโดยทั่วไปของเชื้อเพลิงแก๊สหุงต้ม LPG จะมีราคาอยู่ที่ประมาณ 23 บาท ต่อ กิโลกรัม (kg)

## 4.2 ผลการศึกษาแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

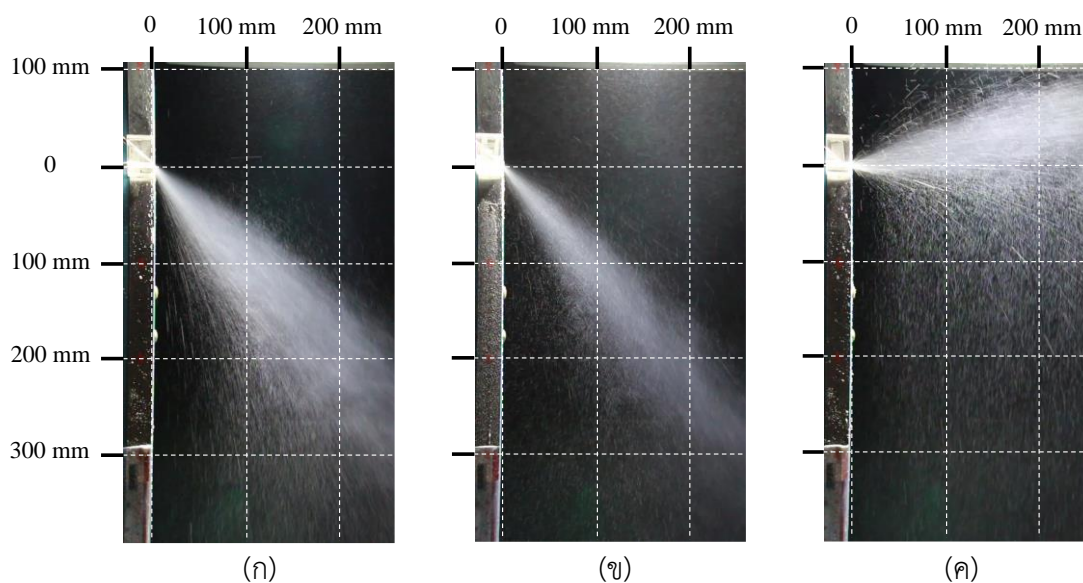
### 4.2.1 ผลของรูปแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน

สำหรับหัวข้อนี้จะศึกษาการกระจายของละอองน้ำยางธรรมชาติจากหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบตำแหน่งทางเข้าอากาศของหัวฉีดด้วยกัน 3 รูปแบบ อัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ ) 70, 80 และ 90 l/min และอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่ 20, 40 และ 60 g/min ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงดังต่อไปนี้

สำหรับในส่วนแรก จะทำการศึกษาโดยจะควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ 70 l/min และอัตราการไหลของน้ำยางที่ 40 g/min เพื่อศึกษาคุณลักษณะของการกระจายตัวของน้ำยางที่พ่นออกจากหัวฉีดสำหรับรูปแบบตำแหน่งทางเข้าอากาศของหัวฉีดที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ

จากรูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติจากหัวฉีดสร้างละอองที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศรูปแบบต่าง ๆ ที่อัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ ) 70 l/min และอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) 40 g/min ในรูปที่ 4.3 (ก) แสดงผลจากการทดลองรูปแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 1 mm จะเห็นได้ว่าละอองน้ำยางที่ออกจากหัวฉีดมีลักษณะเป็นละอองฝอยและมีลักษณะเป็นเส้นน้ำยางร่วมกัน จึงทำให้หัวฉีดที่ระยะท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 1 mm ไม่เหมาะกับการนำไปใช้สร้างละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็กระดับไมครอน สำหรับในรูปที่ 4.3 (ข) แสดงผลการกระจายของละอองน้ำยางธรรมชาติที่ถูกฉีดพ่นด้วยรูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 3 mm (วัดระยะจากปากทางออกของหัวฉีดเข้ามา 3 mm) พบว่าละอองน้ำยางที่ออกมาจากหัวฉีด มีการกระจายของละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็กละเอียดและฟุ้งกระจายได้ดี โดยที่ละอองไม่มีลักษณะเป็นเส้นน้ำยาง ส่วนในรูปที่ 4.3 (ค) แสดงภาพถ่ายการกระจายของละอองน้ำยางจากการทดลองหัวฉีดรูปแบบที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 12 mm จะเห็นได้ว่าละอองน้ำยางที่ออกจากหัวฉีด โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะออกมาเป็นเส้นและมีลักษณะเป็นละอองฝอยค่อนข้างน้อย เนื่องด้วยตำแหน่งของท่อทางเข้าอากาศของหัวฉีดอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของหัวฉีด ซึ่งอาจเป็นตำแหน่งที่ไม่เหมาะสำหรับการสร้างละอองฝอยที่มีขนาดเล็กละเอียด

จากการทดลองพบว่า รูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศที่ดีที่สุดที่สุดคือ หัวฉีดที่มีระยะท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 3 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) เนื่องด้วยลักษณะการพ่นละอองน้ำยางมีการกระจายเป็นละอองขนาดเล็กได้ดีกว่าอีก 2 กรณี โดยไม่มีการอุดตันของยางในรูหัวฉีด และสามารถนำไปใช้ในการทำละอองฝอยที่มีขนาดเล็กระดับไมครอนได้



รูปที่ 4.3 ผลการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติ กรณี  $Q_a=70$  L/min,  $Q_L=40$  g/min และตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศ 1, 3, 12 mm

#### 4.2.2 ผลของรูปแบบหัวฉีดที่อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน

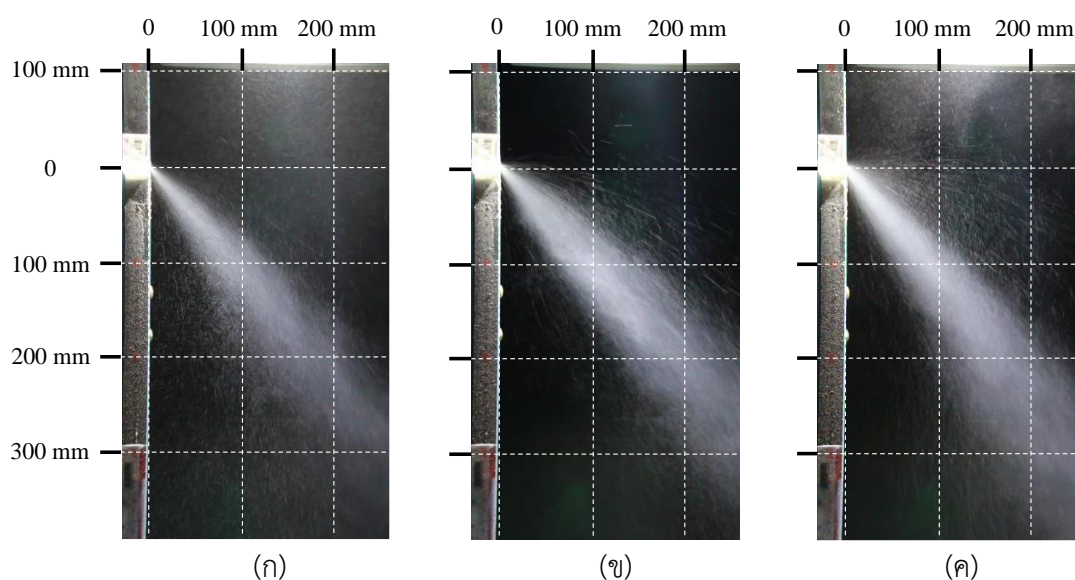
ในส่วนนี้จะเลือกใช้รูปแบบของหัวฉีดที่มีระยะท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 3 mm เนื่องจากหัวฉีดสามารถสร้างละอองน้ำยางที่มีลักษณะเป็นละอองฝอยขนาดเล็กละเอียดได้ดี สำหรับการศึกษหาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมสำหรับการสร้างละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็ก โดยในส่วนนี้จะทำการควบคุมอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ไว้ที่ 40 g/min เพื่อศึกษาอิทธิพลของการกระจายละอองน้ำยางที่พ่นออกจากหัวฉีดสำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศที่ต่างกันไป โดยในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ ) ที่ไหลเข้ามาสู่หัวฉีด เท่ากับ 70, 80 และ 90 L/min ซึ่งผลการทดลองจะแสดงดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.4 ผลการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติของหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 3 mm และอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่ 40 g/min โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ ) ที่แตกต่างกัน จากการทดลองกรณีอัตราการไหลของอากาศ 70 L/min ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) จะเห็นได้ว่าลักษณะการพ่นละอองน้ำยางที่ออกมาจากหัวฉีด มีการกระจายเป็นละอองฝอยที่มีขนาดเล็กได้ดี แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำยางมีปริมาณที่พอเหมาะกับอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้ามาในหัวฉีด จึงทำให้ได้ผลการกระจายของละอองฝอยที่มีขนาดเล็กละเอียด

รูปที่ 4.4 (ข) แสดงภาพถ่ายการกระจายของละอองน้ำยางธรรมชาติจากหัวฉีดสร้างละอองที่อัตราการไหลของน้ำยาง 40 g/min และอัตราการไหลของอากาศ 80 L/min จากรูปจะเห็น

ได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้น ลักษณะการพ่นละอองของน้ำยางมีการกระจายตัวเป็นละอองฝอยที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่าอัตราการไหลของอากาศในกรณีที่น้อยกว่า แสดงว่าอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อการกระจายของละอองน้ำยางโดยมีนัยสำคัญ

จากการทดลองพบว่าการกระจายของละอองน้ำยางธรรมชาติจากหัวฉีดสร้างละอองสำหรับกรณีอัตราการไหลของน้ำยาง 40 g/min อัตราการไหลของอากาศ 90 U/min ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) ด้วยลักษณะการพ่นละอองน้ำยางมีการกระจายตัวเป็นละอองฝอยที่มีขนาดเล็กละเอียดมากกว่าอัตราการไหลของอากาศกรณีอื่น เนื่องจากอากาศที่เข้ามาสู่หัวฉีดในปริมาณที่มาก จึงทำให้น้ำยางที่เกิดการปะทะกับอากาศในหัวฉีดมีลักษณะฟุ้งกระจายและเป็นละอองฝอยได้ดีกว่า



รูปที่ 4.4 ผลการกระจายละอองน้ำยางธรรมชาติของหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศ 3 mm

$Q_L=40$  g/min และ  $Q_a=70, 80, 90$  U/min

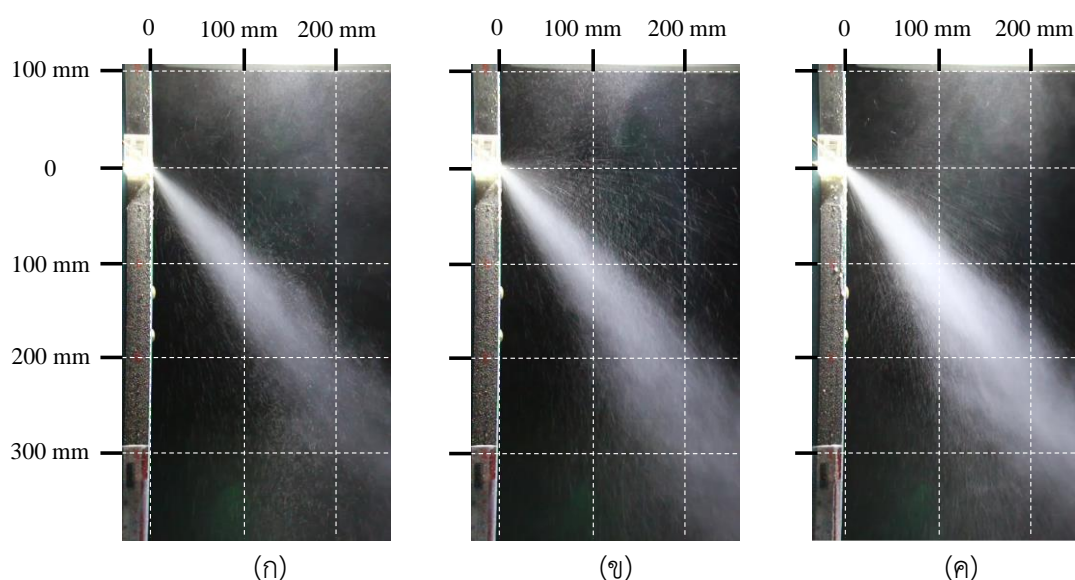
#### 4.2.3 ผลของรูปแบบหัวฉีดที่อัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน

ในส่วนนี้จะใช้รูปแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งระยะท่อทางเข้าอากาศ 3 mm ในการศึกษาหาอัตราการไหลของน้ำยางที่เหมาะสมสำหรับการสร้างละอองน้ำยาง โดยจะทำการควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ ) ไว้ที่ 90 U/min เพื่อดูอิทธิพลการกระจายตัวของละอองน้ำยางที่พ่นออกจากหัวฉีดสำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน โดยในการทดลองจะปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่ 20, 40 และ 60 g/min ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.5 แสดงผลการกระจายของละอองน้ำจากหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศเท่ากับ 3 mm และอัตราการไหลของอากาศ ( $Q_a$ ) 90 L/min โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน สำหรับในรูปที่ 4.5 (ก) แสดงผลการกระจายของละอองน้ำสำหรับเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ ( $Q_L$ ) ที่ 20 g/min จะเห็นว่าลักษณะการพ่นละอองน้ำมีการกระจายตัวเป็นละอองฝอยที่มีขนาดเล็กละเอียด เนื่องด้วยมีอากาศเข้ามาสู่หัวฉีดในปริมาณที่มาก จึงทำให้น้ำที่เกิดการปะทะกับอากาศในหัวฉีดมีลักษณะฟุ้งกระจายและเป็นละอองฝอยได้ดี

ส่วนในรูปที่ 4.5 (ข) แสดงการกระจายของละอองน้ำที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำ ( $Q_L$ ) ที่ 40 g/min จะเห็นได้ว่าเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่าเดิม ละอองน้ำมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ต่างกัน และมีลักษณะการไหลที่คล้ายกันกับกรณีอัตราการไหลของน้ำ 20 g/min

ส่วนรูปที่ 4.5 (ค) แสดงภาพถ่ายการกระจายของละอองน้ำสำหรับกรณีอัตราการไหลของน้ำ 60 g/min จากการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้น จะทำให้การกระจายตัวของละอองน้ำฟุ้งกระจายมากขึ้น และสังเกตเห็นได้ว่าปริมาณของละอองน้ำที่ออกมาจากหัวฉีดนั้นมีมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ละอองน้ำมีลักษณะเป็นเส้นและเป็นละอองฝอยปะปนกัน และในท้ายที่สุดละอองน้ำอาจเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเดียวกัน



รูปที่ 4.5 ผลการกระจายละอองน้ำธรรมชาติของหัวฉีดที่ระยะท่อทางเข้าอากาศ 3 mm  
 $Q_a=90$  L/min และ  $Q_L=20, 40, 60$  g/min

### 4.3 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งละอองน้ำแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ โดยในการทดลอง จะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22, 25 และ 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบแห้ง ( $V_i$ ) ที่ 5.5, 8.7 และ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่ 20, 40 และ 60 g/min ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงดังต่อไปนี้

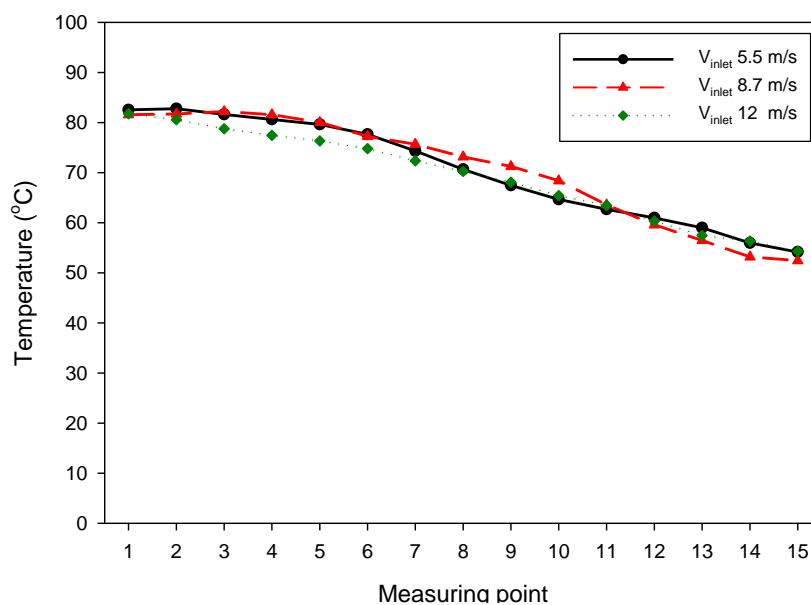
#### 4.3.1 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

##### 4.3.1.1 ผลของความเร็วทางเข้าห้องอบ

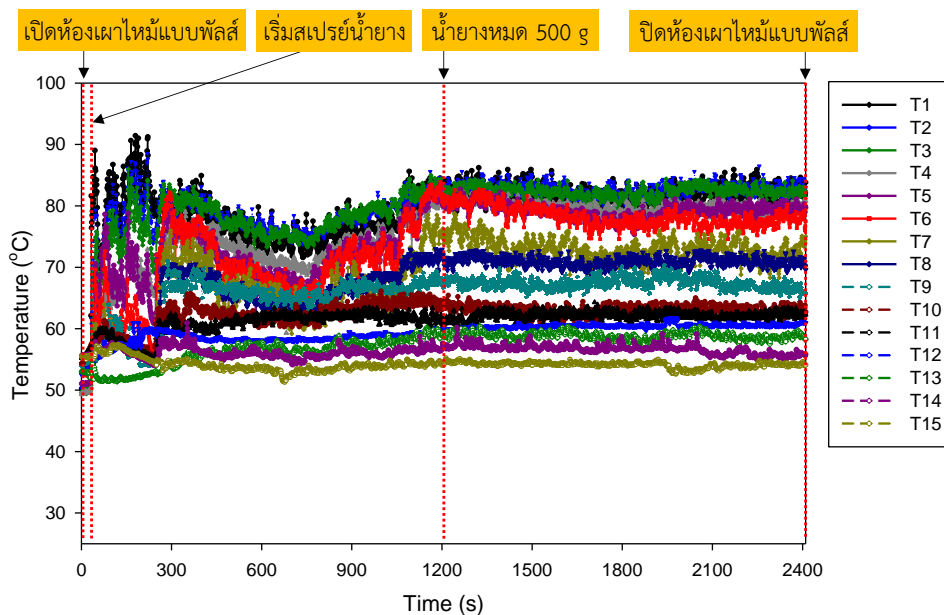
สำหรับส่วนนี้จะศึกษาผลของความเร็วทางเข้าของห้องอบ เพื่อหาความเร็วทางเข้าห้องอบที่เหมาะสมกับสภาวะในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นละอองฝอยน้ำยางธรรมชาติ โดยในการทดลองจะทำการควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ไว้ที่ 29 L/min และอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่ 20 g/min เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของความเร็วทางเข้าห้องอบ

รูปที่ 4.6 แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ ในแต่ละตำแหน่ง ( $T_1$ - $T_{15}$ ) โดยการอ้างอิงตำแหน่งตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นชุดทดลองที่ใช้ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อดูจากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าตำแหน่ง  $T_1$  จะอยู่ด้านบนของห้องอบ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับห้องเผาไหม้แบบพัลส์มากที่สุด และในตำแหน่ง  $T_{15}$  คือตำแหน่งที่ห่างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์มากที่สุด (อยู่ใกล้กับทางเข้าของห้องอบ) สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 L/min และอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วทางเข้าห้องอบ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่กระจายภายในห้องอบมีค่าอยู่ในช่วง 55 ถึง 83 °C โดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ( $T_1$ ) เท่ากับ 200 mm มีอุณหภูมิประมาณ 83 °C โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละตำแหน่งภายในห้องอบจะลดลงตามระยะห่างจากปากทางออกของท่อส่งห้องเผาไหม้เป็นแบบเชิงเส้นจนอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ทางเข้าของห้องอบในตำแหน่ง  $T_{15}$  มีอุณหภูมิลมร้อนอยู่ที่ประมาณ 55 °C

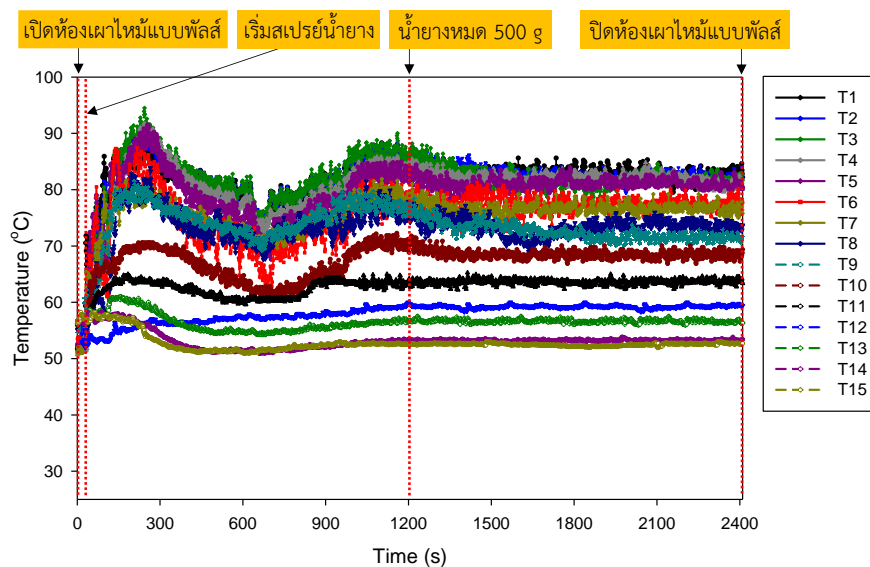
สำหรับในรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบที่ 5.5, 8.7 และ 12 m/s ตามลำดับ ซึ่งทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบในแต่ละตำแหน่งตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งละอองน้ำยาง จะเห็นว่าอุณหภูมิในห้องอบจะตกลงเล็กน้อยในช่วงที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องอบ หลังจากนั้นอุณหภูมิจะมีสภาวะคงที่ตลอดจนเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย



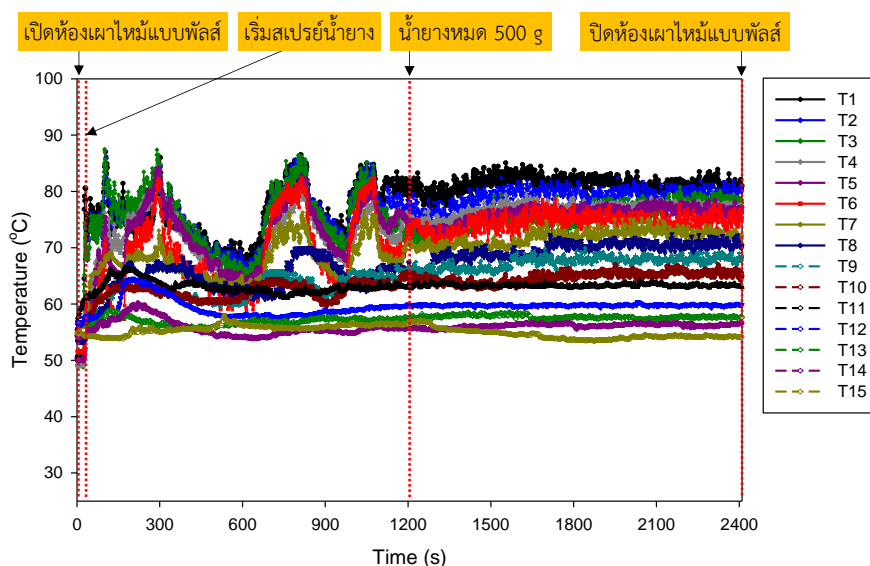
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50 \text{ g/min}$ )  $Q_{LPG}=29 \text{ l/min}$ ,  $Q_L=20 \text{ g/min}$  และ  $V_i=5.5, 8.7, 12 \text{ m/s}$  (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50 \text{ g/min}$ )  $Q_{LPG}=29 \text{ l/min}$ ,  $Q_L=20 \text{ g/min}$  และ  $V_i=5.5 \text{ m/s}$  (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



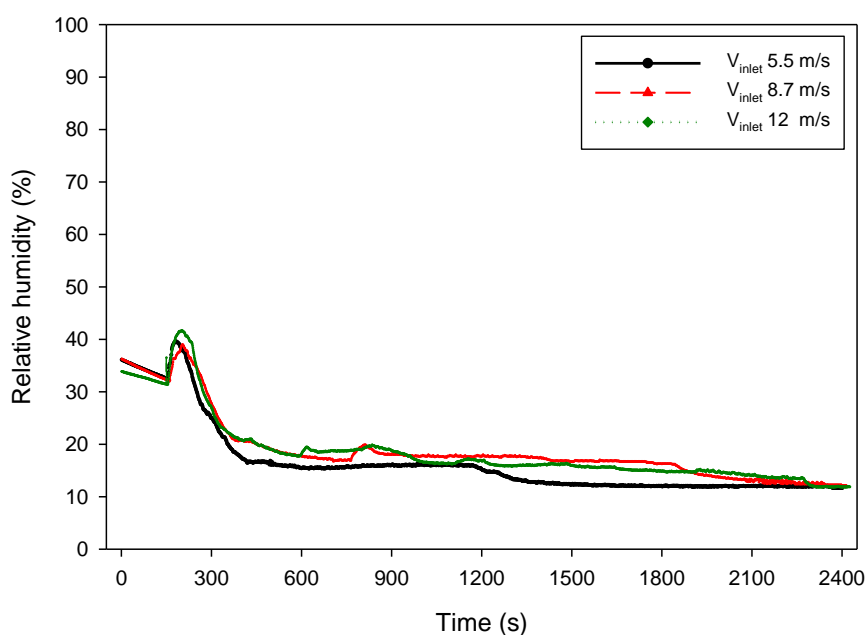
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ  
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $Q_L=20$  g/min และ  $V_i=8.7$  m/s  
(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ  
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $Q_L=20$  g/min และ  $V_i=12$  m/s  
(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.10 แสดงผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วทางเข้าห้องอบที่แตกต่างกัน จากการทดลองจะเห็นได้ว่าที่กรณีปรับความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบที่ค่อนข้างน้อยและมีค่าความชื้นต่ำกว่ากรณีอื่น ทำให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งได้ดี



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc} = 50$  g/min)

$$Q_{LPG} = 29 \text{ L/min}, Q_L = 20 \text{ g/min} \text{ และ } V_i = 5.5, 8.7, 12 \text{ m/s}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่ผลิตได้จะมี 2 ลักษณะด้วยกัน โดยจากรูปที่ 4.11 (ก) จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมยึดเกาะติดกันจนกลายเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก และสำหรับในรูปที่ 4.11 (ข) ยางธรรมชาติจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเกือบจะเป็นแผ่นเดียวกัน ซึ่งมีลักษณะเหมือนกันกับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยมีปริมาณของยางที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเท่ากับ 153 กรัม และ 178 กรัม ตามลำดับ

จากการหาความชื้นของยางธรรมชาติที่ผลิตได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการอบตัวอย่างแห้งจนกระทั่งได้ความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติ พบว่าที่กรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 l/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s มีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.62 % dry-basis และสำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 l/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s มีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.63 % dry-basis



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $Q_L=20$  g/min และ  $V_i=5.5$  m/s



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.12 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $Q_L=20$  g/min และ  $V_i=8.7$  m/s

รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมเกือบจะทั้งหมด โดยปริมาณของยางที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับกรณีนี้ มีน้ำหนักอยู่ที่ 168 กรัม และมีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.64 % dry-basis



รูปที่ 4.13 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  L/min,  $Q_L=20$  g/min และ  $V_i=12$  m/s

จากการวิเคราะห์คำนวณหาการสิ้นเปลืองพลังงานรวมในกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมของระบบในกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s มีค่าเท่ากับ 39.41 kWh สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมเท่ากับ 39.86 kWh และสำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมเท่ากับ 40.17 kWh

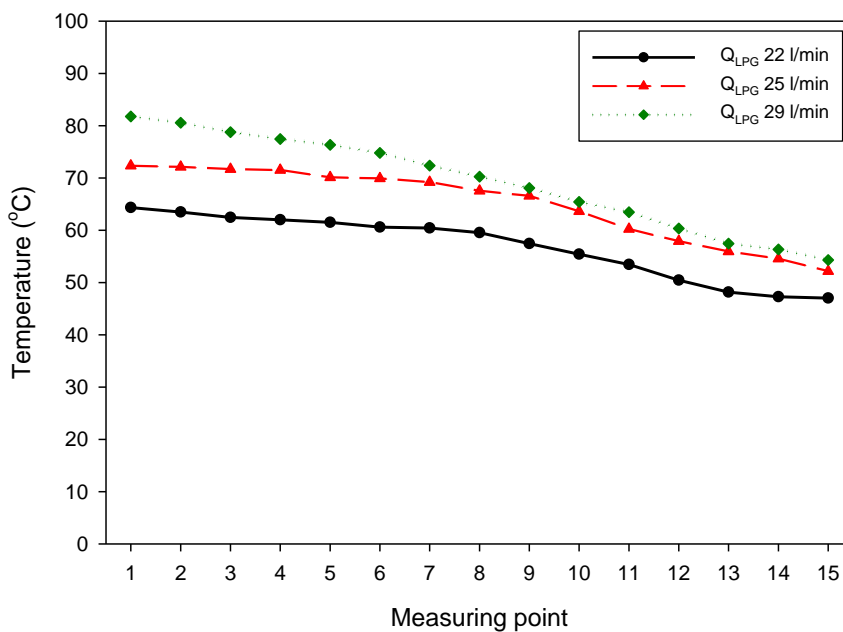
#### 4.3.1.2 ผลของการปรับเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส

สำหรับในส่วนนี้จะศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สที่แตกต่างกัน เพื่อหาอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สที่เหมาะสมกับสถานะในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยในการทดลองจะทำการควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบแห้ง ( $V$ ) ไว้ที่ 12 m/s และควบคุมอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ไว้ที่ 20 g/min เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบพัลส์เพื่อให้ความร้อนแก่ระบบอบแห้งแบบพ่นฝอย

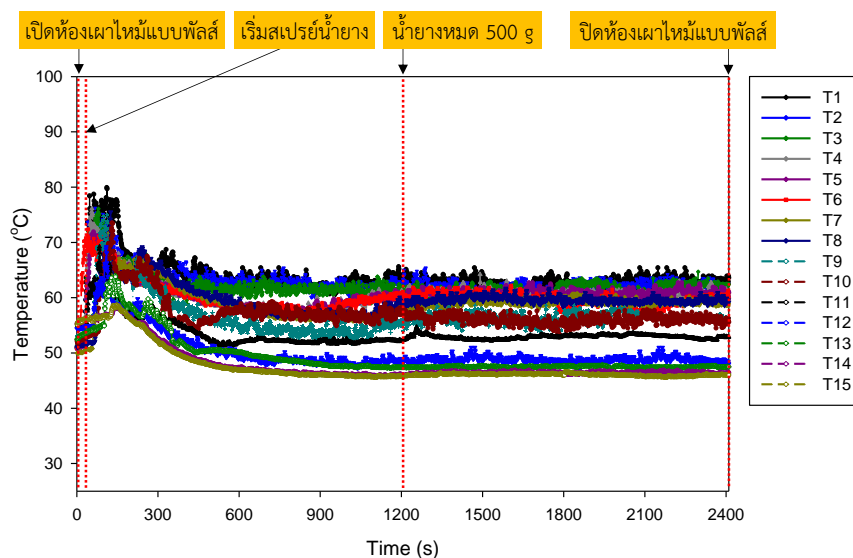
รูปที่ 4.14 แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ ในแต่ละตำแหน่ง ( $T_1$ - $T_{15}$ ) สำหรับกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 22, 25 และ 29 l/min ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าในกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่ 22 l/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1$  ประมาณ 64.32 °C และที่ตำแหน่ง  $T_{15}$  มีค่าประมาณ 47 °C สำหรับกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่ 25 l/min จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนที่ตำแหน่ง  $T_1$  และที่ตำแหน่ง  $T_{15}$  ประมาณ 72.34 °C และ 52 °C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่กรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่ 22 l/min และ 25 l/min มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่ 29 l/min โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1$  เท่ากับ 81.76 °C และที่ตำแหน่ง  $T_{15}$  มีค่าประมาณ 54 °C และเมื่อเปรียบเทียบที่ตำแหน่ง  $T_1$  (อยู่บริเวณใกล้กับท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์) ในทั้งสามกรณี จะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนต่างกันอยู่พอสมควร

จากผลของอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบสำหรับในกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 22 l/min และ 25 l/min จะเห็นว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่กระจายภายในห้องอบที่ไม่สูงมากพอ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว และเมื่อมีการปรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สสูงสุดเท่ากับ 29 l/min จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่กระจายภายในห้องอบมีค่าสูงมากเพียงพอสำหรับการอบแห้งอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายความว่าอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลกระทบต่อการกระจายของอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบอย่างมีนัยสำคัญ

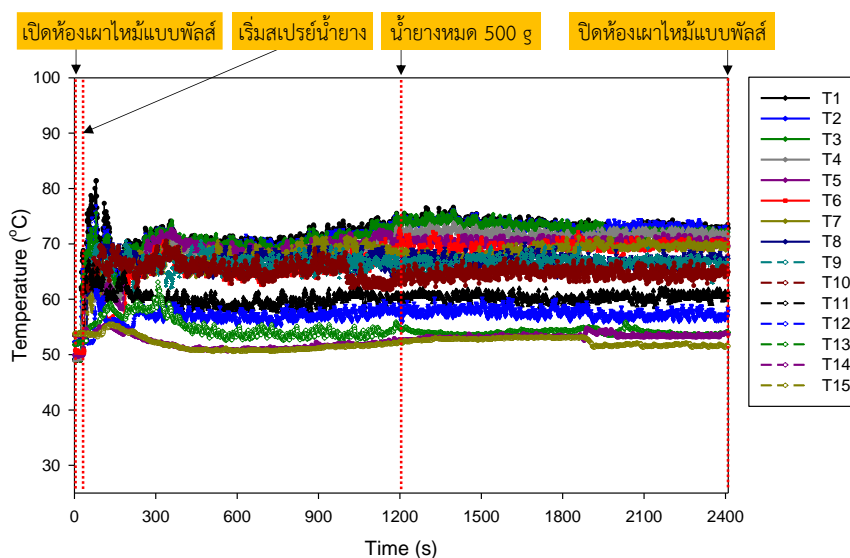
สำหรับในรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ 22, 25 29 l/min ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ในแต่ละตำแหน่งตลอดระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งละอองน้ำยาง



รูปที่ 4.14 อุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $V_i=12$  m/s,  $Q_L=20$  g/min และ  $Q_{LPG}=22, 25, 29$  l/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $V_i=12$  m/s,  $Q_L=20$  g/min และ  $Q_{LPG}=22$  l/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



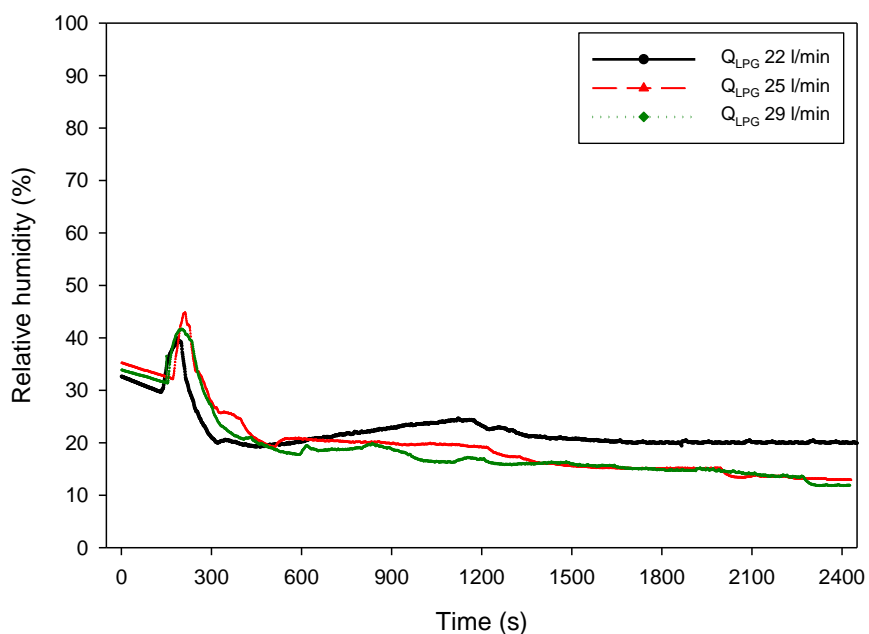
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{\text{Talc}}=50 \text{ g/min}) V_i=12 \text{ m/s}, Q_L=20 \text{ g/min} \text{ และ } Q_{\text{LPG}}=25 \text{ l/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.17 แสดงผลของการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และ อัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สที่ 22 l/min จะมีค่าความชื้นในห้องอบที่สูงกว่ากรณีอื่น เนื่องจากมีอุณหภูมิของลมร้อนที่กระจายภายในห้องอบมีอุณหภูมิไม่มากเพียงพอที่จะพาส่วนที่เป็นน้ำระเหยออกจากละอองน้ำยาง

รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 22 l/min จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติมีลักษณะเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนและเกือบจะเป็นแผ่นเดียวกัน โดยปริมาณของยางที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง มีน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 168 กรัม และมีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.74 % dry-basis



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเต็มเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$  g/min)

$V_i=12$  m/s,  $Q_L=20$  g/min และ  $Q_{LPG}=22, 25, 29$  l/min

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.18 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $V_i=12$  m/s,  $Q_L=20$  g/min และ  $Q_{LPG}=22$  l/min



รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับกรณีอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส 25 L/min เมื่อดูจากรูปจะเห็นได้ว่าลักษณะของยางธรรมชาติมีการเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนเหมือนกับในกรณีอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 22 L/min เนื่องจากภายในห้องอบมีความชื้นมากเกินไปและมีอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยาง โดยยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งในกรณีนี้มีน้ำหนักเท่ากับ 181.7 กรัม และมีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.95 % dry-basis

จากการคำนวณหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมของระบบในกรณีอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 22 L/min มีค่าเท่ากับ 33.78 kWh สำหรับในกรณีอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส 25 L/min มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมเท่ากับ 36.83 kWh



รูปที่ 4.19 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

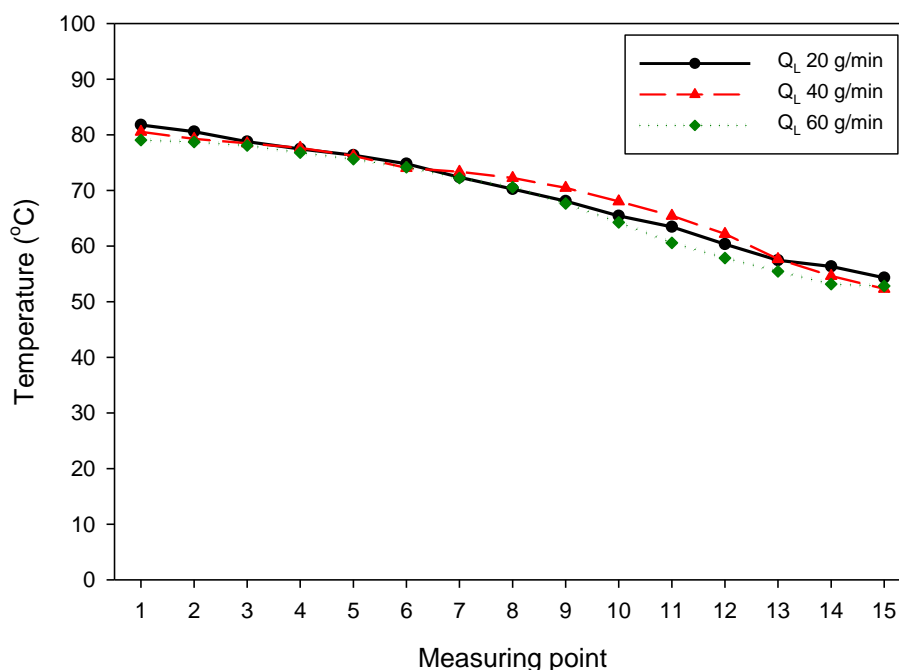
( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $V_i=12$  m/s,  $Q_L=20$  g/min และ  $Q_{LPG}=25$  L/min



#### 4.3.1.3 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง

ในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำยางที่เหมาะสมกับสภาวะในการอบแห้งแบบพ่นฝอย ในการทดลองจะควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบ ( $V_i$ ) ไว้ที่ 12 m/s และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง ของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ไว้ที่ 29 l/min เพื่อศึกษาการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.20 แสดงผลของการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ สำหรับการฉีดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ 29 l/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้ามาในหัวฉีดเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่กระจายภายในห้องอบ มีอุณหภูมิที่สูงมากเพียงพอสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละตำแหน่งมีแนวโน้มของเส้นกราฟไปในทิศทางเดียวกันทุกกรณีที่มีอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน ซึ่งหมายความว่าอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกันนั้น ไม่ได้ส่งผลอย่างมากต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องอบ ทำให้กรณีเงื่อนไขการควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 12 m/s เหมาะสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้ามาในหัวฉีดเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min

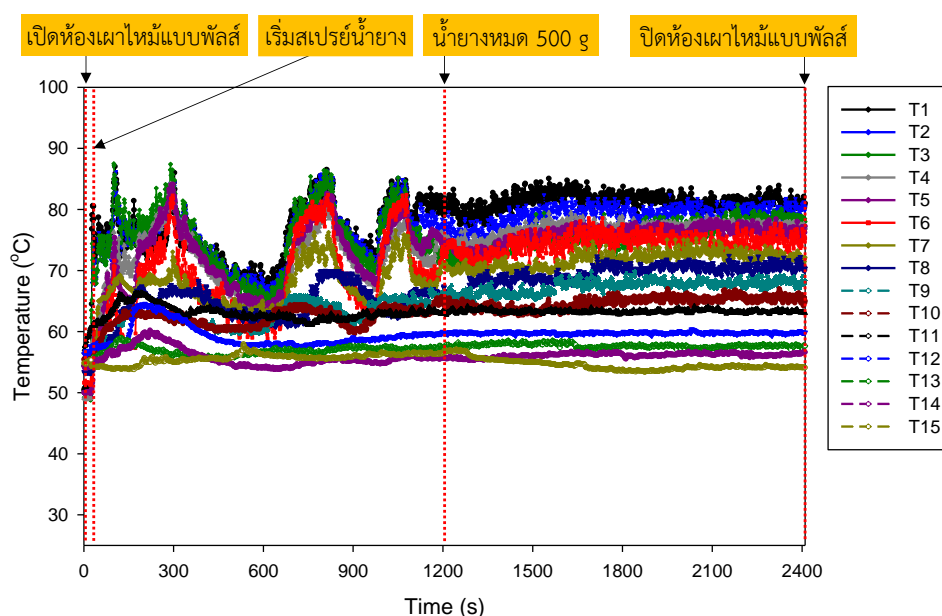


รูปที่ 4.20 อุณหภูมิเฉลี่ยของลมร้อนภายในห้องอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Talc}$ =50 g/min)  $Q_{LPG}$ =29 l/min,  $V_i$ =12 m/s และ  $Q_L$ =20, 40, 60 g/min

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

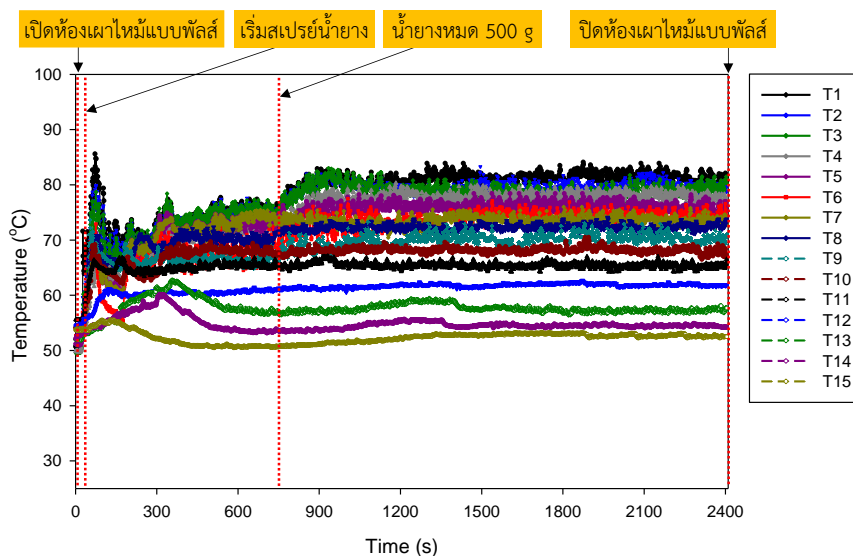
สำหรับในรูปที่ 4.21, 4.22 และ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 U/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้ามาในหัวฉีด 20, 40 และ 60 g/min ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบแต่ละตำแหน่ง มีการเปลี่ยนแปลงไปตามวิธีการดำเนินการในกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย โดยในช่วงที่มีการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ และการพ่นละอองน้ำยางจากหัวฉีดเข้าไปในห้องอบ จะมีการปั่นป่วนของการกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง หลังจากการพ่นละอองน้ำยางจนครบ 500 g ในทุกกรณี การกระจายของอุณหภูมิภายในห้องอบจะเริ่มกลับมาคงที่ตลอดจนจบกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยาง



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

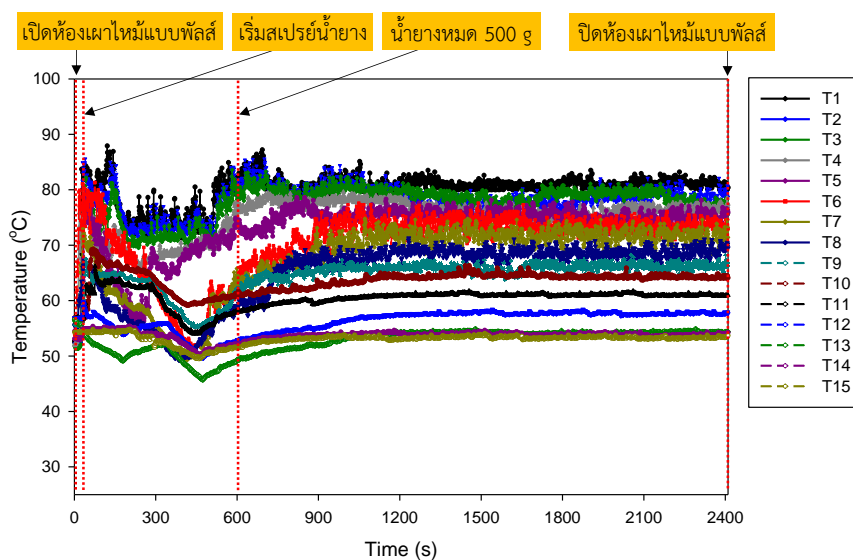
$$(Q_{\text{Talc}}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{\text{LPG}}=29 \text{ U/min}, \quad V_i=12 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=20 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ  
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

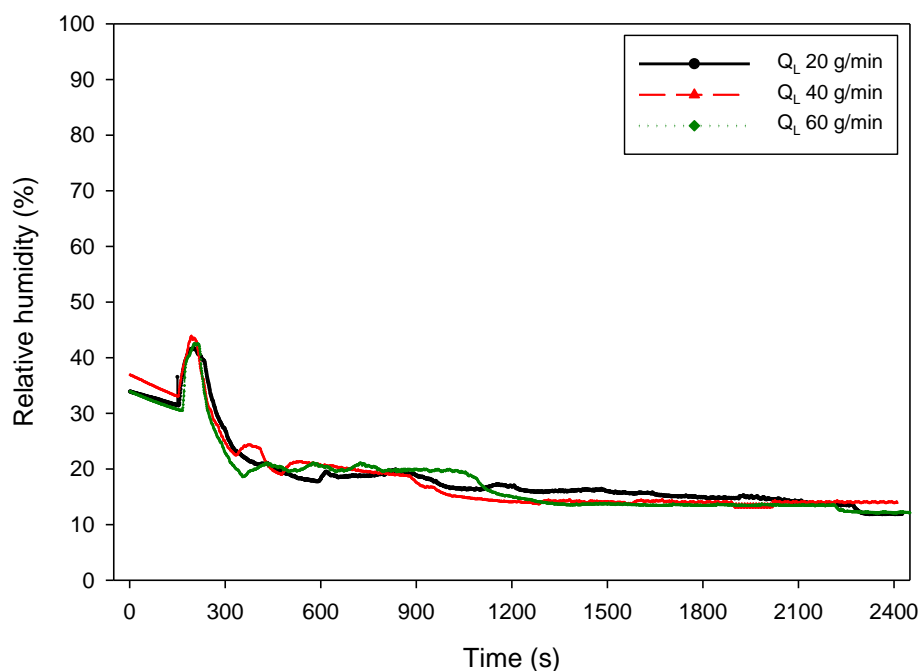
( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  U/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min  
(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ  
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  U/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min  
(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s โดยจะเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยาล้างที่พ่นเข้าไปในห้องอบที่แตกต่างกัน จากการทดลองวัดความชื้นภายในห้องอบในขณะที่เริ่มต้นระบบจนถึงสิ้นสุดการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยในช่วง 5 นาทีแรก คือการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้ จะเห็นได้ชัดว่าเส้นกราฟของความชื้นมีค่ากระโดดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องด้วยมาจากการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้ ซึ่งจะมีการผสมกันระหว่างอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ที่เป็นของเหลว เปรียบเสมือนการนำความชื้นเข้ามาในระบบอบแห้งเพียงแค่ช่วงเวลาเริ่มต้นการผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิง หลังจากการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้แล้ว จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นภายในห้องอบก็จะค่อย ๆ ลดลงจนเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady) และเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในห้องอบอีกครั้ง ขณะเริ่มทำการพ่นละอองน้ำจากหัวฉีดเข้ามาในห้องอบเพื่อทำการอบแห้งละอองน้ำยาล้าง ตลอดจนการพ่นละอองน้ำยาล้างหมดลง การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบก็จะค่อย ๆ ลดลงและเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่อีกครั้งจนเสร็จการทดลอง



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$  g/min)

$$Q_{LPG}=29 \text{ l/min}, V_f=12 \text{ m/s} \text{ และ } Q_L=20, 40, 60 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้ทาลค์เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับกรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยาง 20, 40 และ 60 g/min จากรูปจะเห็นว่ายางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้น มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมเกือบจะทั้งหมด โดยมีช่วงของขนาดอนุภาคยางธรรมชาติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งมีปริมาณของยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเท่ากับ 168, 150 และ 144 กรัม ตามลำดับ และมีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติผงเท่ากับ 0.64, 0.83 และ 0.75 % dry-basis ตามลำดับ

จากการคำนวณหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมของระบบในกรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สไว้ที่ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าของห้องอบที่ 12 m/s และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยทั้งสามกรณีมีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมในการอบแห้งแบบพ่นฝอยเท่ากันคือ 40.17 kWh



รูปที่ 4.25 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทาลค์เคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



รูปที่ 4.26 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{\text{Talc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min

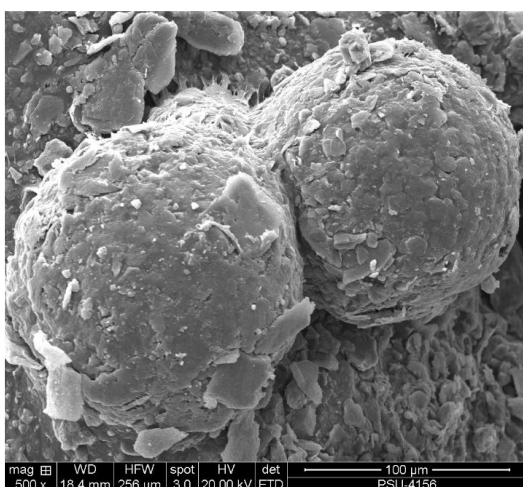


รูปที่ 4.27 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{\text{Talc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

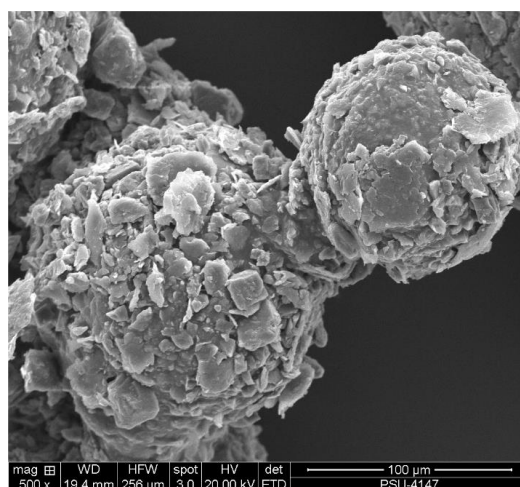
#### 4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่ได้จากการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย โดยใช้ลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ให้ความร้อนแก่ละอองน้ำยางที่พ่นเข้าไปในห้องอบที่สภาวะต่าง ๆ สำหรับในส่วนนี้จะศึกษากรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ที่ 29 l/min และความเร็วทางเข้าห้องอบ ( $V_i$ ) เท่ากับ 12 m/s เพื่อดูลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำยาง ( $Q_L$ ) ที่แตกต่างกัน

อนุภาคยางธรรมชาติ เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นพบว่าลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า จากรูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัมและอนุภาคของยางธรรมชาติที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม (Talcum powder) จากการทดสอบพบว่า อนุภาคของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัมจะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมและยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ก) ส่วนในกรณีของอนุภาคของยางธรรมชาติที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัมจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมและยึดเกาะติดกันและสามารถแยกออกจากกันได้ โดยมีผงทัลคัมเคลือบอยู่รอบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผง ทำให้ไม่เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (ข)



(ก) อนุภาคของยางธรรมชาติ  
ในกรณีไม่เคลือบทัลคัม



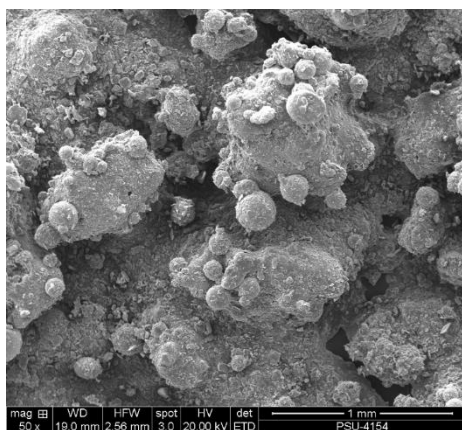
(ข) อนุภาคของยางธรรมชาติผง  
ที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม

รูปที่ 4.28 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า  
กรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

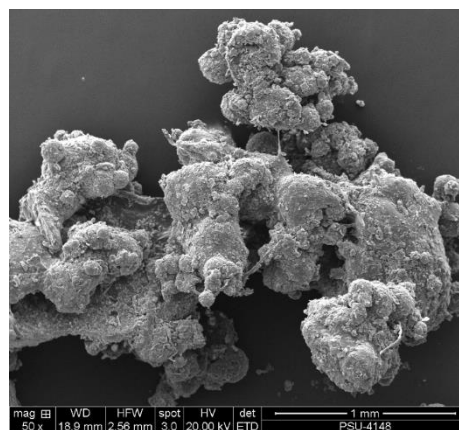


รูปที่ 4.29 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยในรูปที่ 4.29 (ก) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัม จะเห็นว่ายางธรรมชาตินั้นมีลักษณะเป็นแผ่นยางที่มีผิวขรุขระและยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน

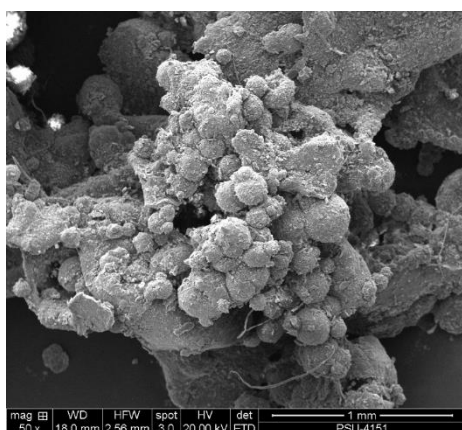
สำหรับในกรณีของรูปที่ 4.29 (ข) ถึง 4.29 (ง) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัม กรณีเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะทางสัณฐานของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัม สำหรับอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min มีความแตกต่างของการกระจายตัวของอนุภาคยางธรรมชาติและมีลักษณะยึดเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยกว่าที่อัตราการไหลของน้ำยางในกรณีอื่น



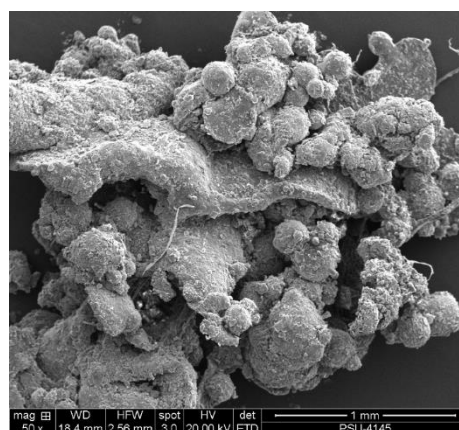
(ก) อนุภาคยางธรรมชาติ  
กรณี  $Q_L=20$  g/min



(ข) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยทัลคัม  
กรณี  $Q_L=20$  g/min



(ค) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยทัลคัม  
กรณี  $Q_L=40$  g/min



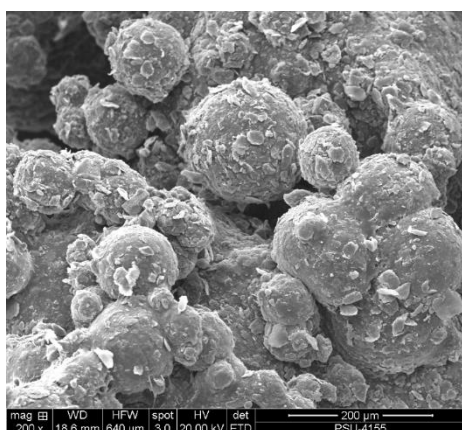
(ง) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยทัลคัม  
กรณี  $Q_L=60$  g/min

รูปที่ 4.29 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 50 เท่า

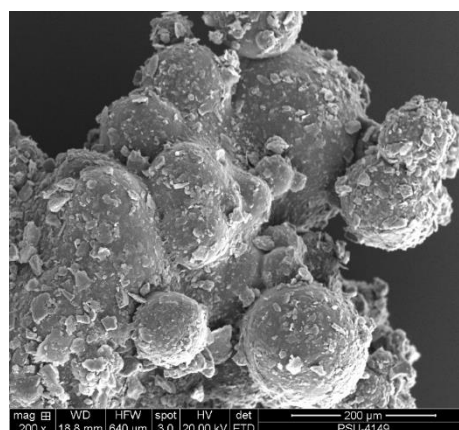


รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่ได้จากระบวนการพ่นแห้งที่กำลังขยาย 200 เท่า โดยในรูปที่ 4.22 (ก) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัม แม้ว่าจะสามารถมองเห็นอนุภาคยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมได้ แต่ปัญหาการพ่นแห้งของละอองน้ำยางที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม จะทำให้อนุภาคยางธรรมชาติยึดเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

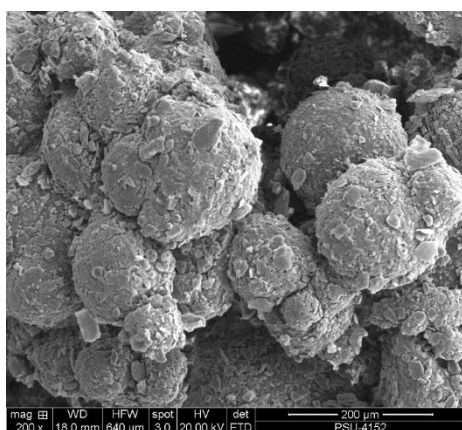
อย่างไรก็ตามลักษณะทางสัณฐานของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัม ในอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.30 (ข) ถึง รูปที่ 4.30 (ง) มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมยึดเกาะติดกันและมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง  $50\ \mu\text{m}$  ถึง  $300\ \mu\text{m}$



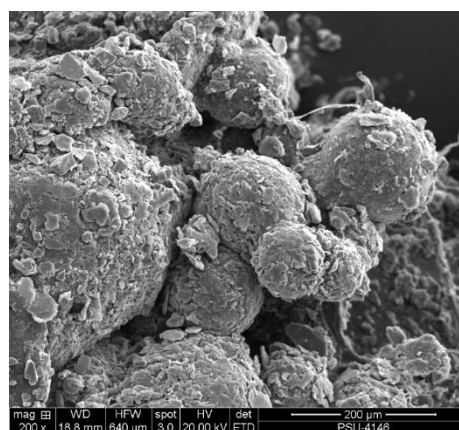
(ก) อนุภาคยางธรรมชาติ  
กรณี  $Q_L=20\ \text{g/min}$



(ข) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยทัลคัม  
กรณี  $Q_L=20\ \text{g/min}$



(ค) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยทัลคัม  
กรณี  $Q_L=40\ \text{g/min}$



(ง) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยทัลคัม  
กรณี  $Q_L=60\ \text{g/min}$

รูปที่ 4.30 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 200 เท่า

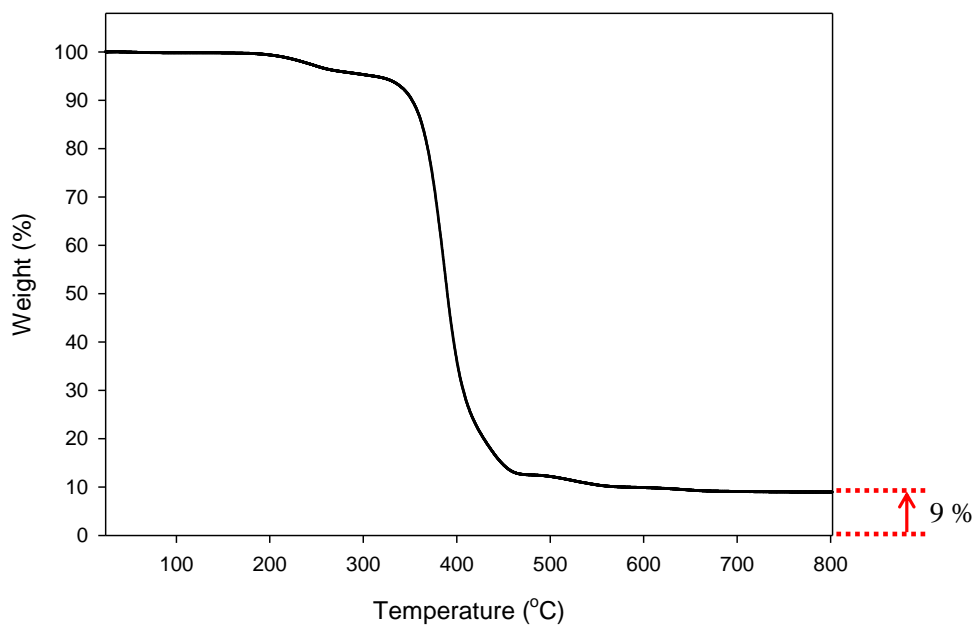
### 4.3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการศึกษาการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้เทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) ด้วยเครื่อง Thermalgravimetric Analyzer ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ด้วยอัตราการความร้อนที่  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 25 ถึง  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในส่วนนี้จะควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ไว้ที่  $29\text{ L}/\text{min}$  และความเร็วทางเข้าห้องอบที่  $12\text{ m}/\text{s}$  เพื่อดูคุณสมบัติทางความร้อนและตรวจสอบสารปนเปื้อนที่มีรวมอยู่ในอนุภาคยางธรรมชาติผง โดยจะทำการทดสอบที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน 20, 40 และ  $60\text{ g}/\text{min}$

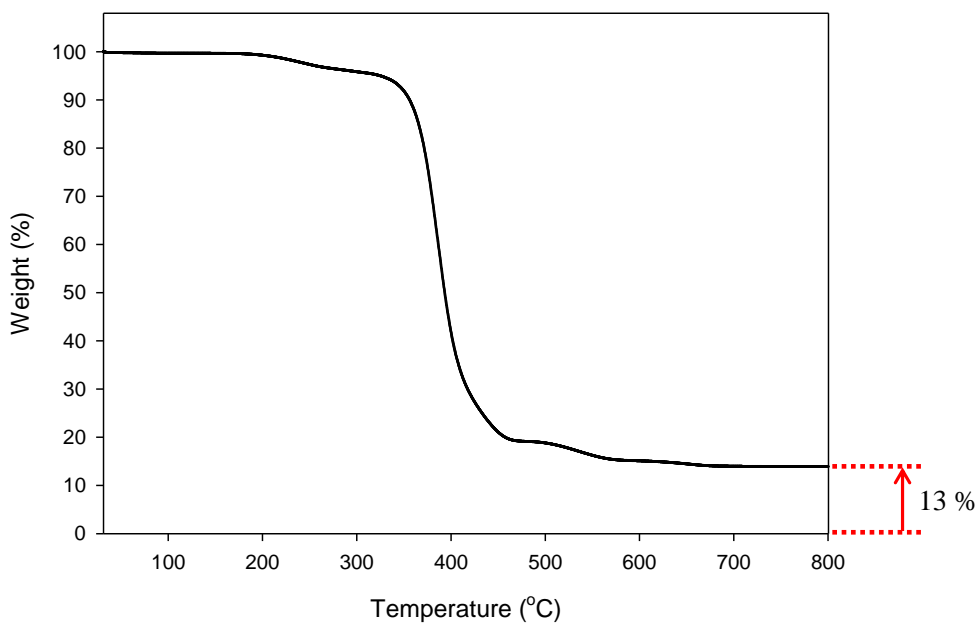
จากรูปที่ 4.31 แสดงสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ผงทลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส  $29\text{ L}/\text{min}$  ความเร็วทางเข้าห้องอบ  $12\text{ m}/\text{s}$  และอัตราการไหลของน้ำยาง  $20\text{ g}/\text{min}$  ซึ่งจะแสดงข้อมูลในรูปของกราฟระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่ายางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของความชื้นสำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิประมาณ  $320\text{--}460\text{ }^{\circ}\text{C}$  และพบว่ามีปริมาณของมวลน้ำหนักที่เหลืออยู่จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน เท่ากับ 9% โดยสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผงทลคัมที่มีอยู่ในอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

จากรูปที่ 4.32 แสดงสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส  $29\text{ L}/\text{min}$  ความเร็วทางเข้าห้องอบ  $12\text{ m}/\text{s}$  และอัตราการไหลของน้ำยาง  $40\text{ g}/\text{min}$  จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของความชื้นสำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิประมาณ  $330\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$  และพบว่ามีปริมาณของผงทลคัมที่เหลืออยู่ เท่ากับ 13%

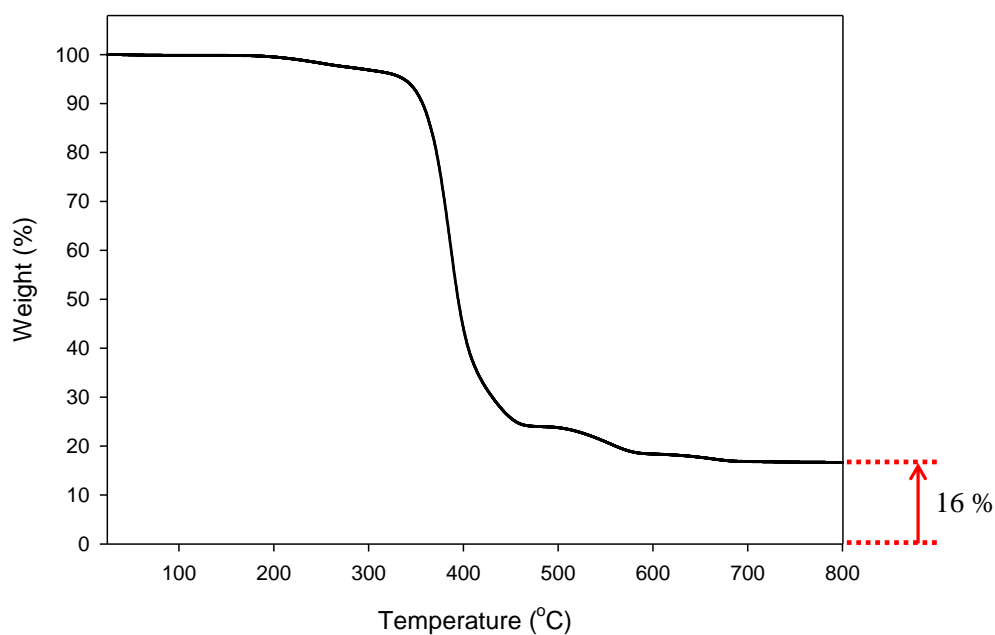
จากรูปที่ 4.33 แสดงสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส  $29\text{ L}/\text{min}$  ความเร็วทางเข้าห้องอบ  $12\text{ m}/\text{s}$  และอัตราการไหลของน้ำยาง  $60\text{ g}/\text{min}$  จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของความชื้นสำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิประมาณ  $320\text{--}440\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีปริมาณของผงทลคัมที่เหลืออยู่จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนประมาณ 16% นั้นหมายความว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำยางที่สูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณของผงทลคัมที่มีอยู่ในอนุภาคยางธรรมชาติผงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.31 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{\text{Talc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

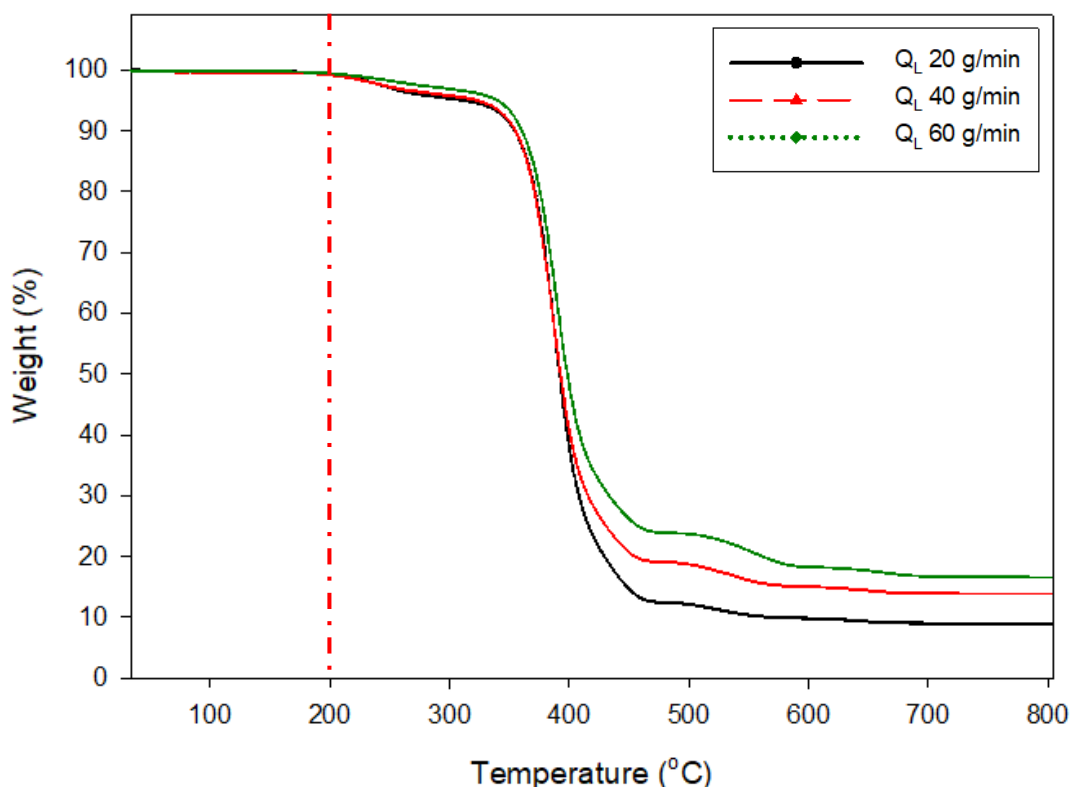


รูปที่ 4.32 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{\text{Talc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



รูปที่ 4.33 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ผงทัลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20, 40 และ 60 g/min เมื่อนำอัตราการสูญเสียน้ำหนักของยางธรรมชาติผงที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์ปริมาณของผงทัลคัมที่เหลืออยู่เพื่อหาอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อผงทัลคัมที่แท้จริง จากการทดสอบพบว่าปริมาณของผงทัลคัมที่เหลืออยู่มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำยางที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าอัตราการไหลของน้ำยางนั้นส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณของผงทัลคัมที่มีอยู่ในอนุภาคยางธรรมชาติผง และพบว่ายางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย มีความเสถียรภาพทางความร้อนอยู่ที่ประมาณ 200 °C

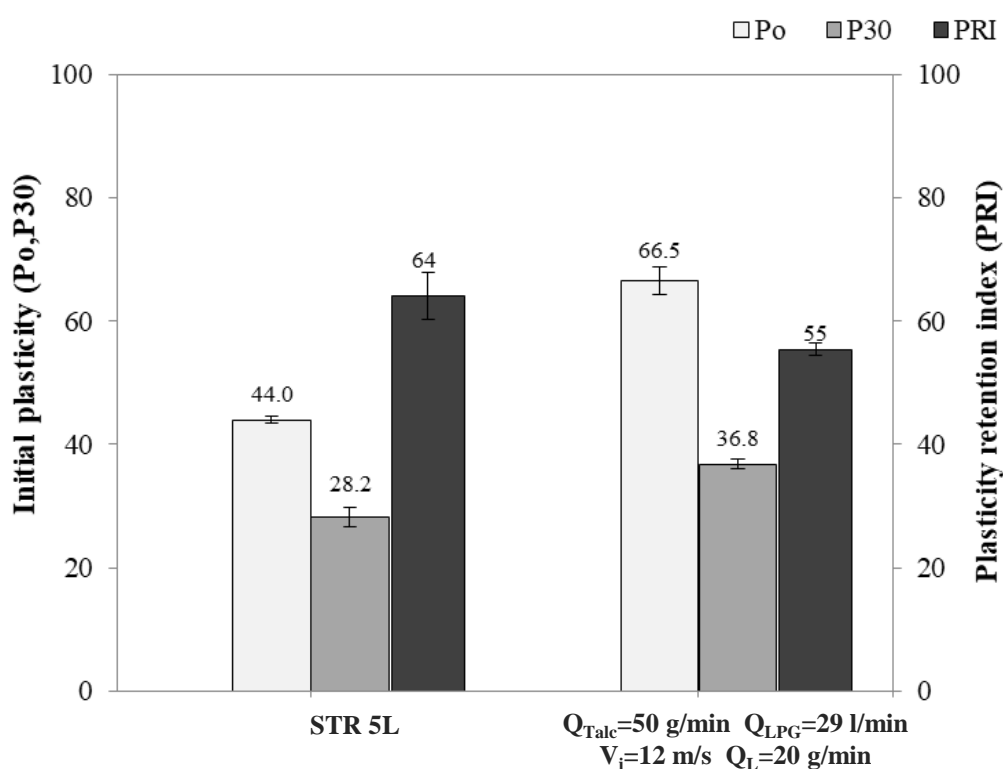


รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีใช้ผงทลคัมเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  U/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20, 40, 60$  g/min

#### 4.3.4 ผลการทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติผง

สำหรับในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติผง (Original wallace plasticity and Plasticity retention index: Po และ PRI) โดยในส่วนนี้จะเลือกยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 U/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ ที่ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีด 20 g/min ซึ่งเป็นกรณีเงื่อนไขที่มีปริมาณผงทลคัมปนอยู่ในยางธรรมชาติผงน้อยที่สุด จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงกรณีเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน โดยในการทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยาง จะทำการเปรียบเทียบระหว่างยางแท่ง (Standard Thai Rubber, STR 5L) และยางธรรมชาติผงกรณีเคลือบด้วยทลคัม ( $Q_{Talc}=50$  g/min) สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 U/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20 g/min

รูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางระหว่างยางแท่ง STR 5L กับยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม มีค่าความอ่อนตัวเริ่มต้น ( $P_0$ ) และค่าความอ่อนตัวค่าความอ่อนตัวของยางซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที ( $P_{30}$ ) มากกว่า ยางแท่ง STR 5L นั้น แสดงว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม เป็นยางที่มีความนิ่มน้อยกว่ายางแท่ง STR 5L และค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI) ของยางธรรมชาติผงมีค่าสูงกว่ายางแท่ง STR 5L แสดงว่ายางธรรมชาติผงที่ได้จากการะบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย มีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุล และมีความต้านทานต่อการออกซิเดชัน (Oxidation) ที่น้อยกว่ายางแท่ง STR 5L



\* ค่ามาตรฐานยางแท่ง STR ตามที่ตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าไทย (AFET) กำหนด  
ความอ่อนตัวเริ่มต้นของยาง,  $P_0$  มีค่า  $33 \pm 3$   
ดัชนีความอ่อนตัวของยาง, PRI มีค่า  $55 \pm 5$

รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบผลของความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางระหว่างกรณีของยางแท่ง STR 5L กับกรณียางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม ( $Q_{Talc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

#### 4.3.5 ผลการทดสอบความหนืดมูนนี่

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยจะทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างกรณีของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม กับกรณีของยางแท่ง STR 5L ในการทดสอบสามารถอ่านค่าความหนืดของยางจากเครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Rubber viscosity tester) หลังจากทีโรเตอร์หมุนไป 4 นาที พบว่ายางธรรมชาติผงมีค่าความหนืดมูนนี่น้อยกว่ายางแท่ง STR 5L ซึ่งผลการทดสอบยางดิบทั้งหมดจะแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางแท่ง STR 5L และยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม

ชนิดของยาง	ความหนืดมูนนี่ (Mooney unit)
ยางแท่ง STR 5L	73.22
ยางธรรมชาติผงกรณีเคลือบด้วยทัลคัม ( $Q_{Talc}=50$ g/min) $Q_{LPG}=29$ l/min, $V_i=12$ m/s และ $Q_L=20$ g/min	43.87

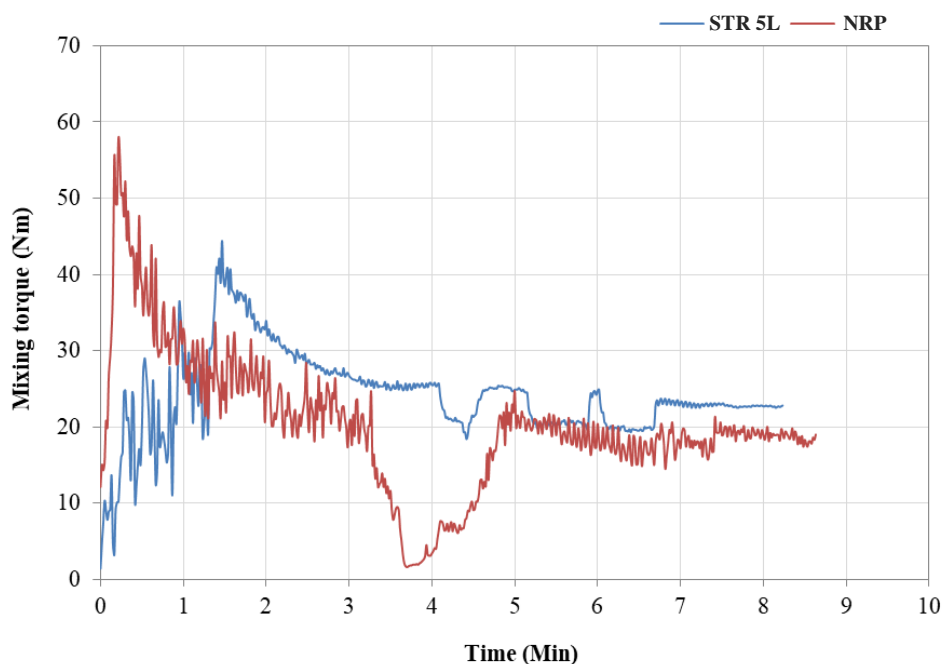
\* ค่ามาตรฐานยางแท่ง STR ตามที่ตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าไทย (AFET) กำหนด ความหนืดมูนนี่, Mooney viscosity มีค่า  $80 \pm 10$

#### 4.3.6 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ของยางแท่ง Standard Thai Rubber (STR 5L) และยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (NRP) สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ ที่ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20 g/min โดยการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรงด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) ซึ่งบดผสมภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70 °C และที่ความเร็วรอบของโรเตอร์ 60 rpm ซึ่งในระหว่างการบดผสม จะแสดงข้อมูลพื้นฐานระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์ คือ ค่าทอร์คระหว่างการบดผสม (Mixing torque) และ พลังงานระหว่างการผสม (Mixing energy) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์สมบัติของยางคอมพาวด์

รูปที่ 4.36 แสดงค่าทอร์คระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์ โดยข้อมูลจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ค่าทอร์คระหว่างการบดผสมและเวลาในการบดผสมของยางคอมพาวด์ จากการทดสอบกรณีของยางแท่ง STR 5L พบว่าในตอนเริ่มต้นของการบดผสมยางจะมีค่าทอร์คที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่ง ค่าทอร์คก็จะค่อย ๆ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเวลาการบดผสม เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางนั้นเกิดการขาดออกจากกัน ส่งผลให้ความหนืดของยางลดลงและจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงสภาวะคงที่ เมื่อพิจารณาการทดสอบกรณีของยางธรรมชาติผงที่ได้

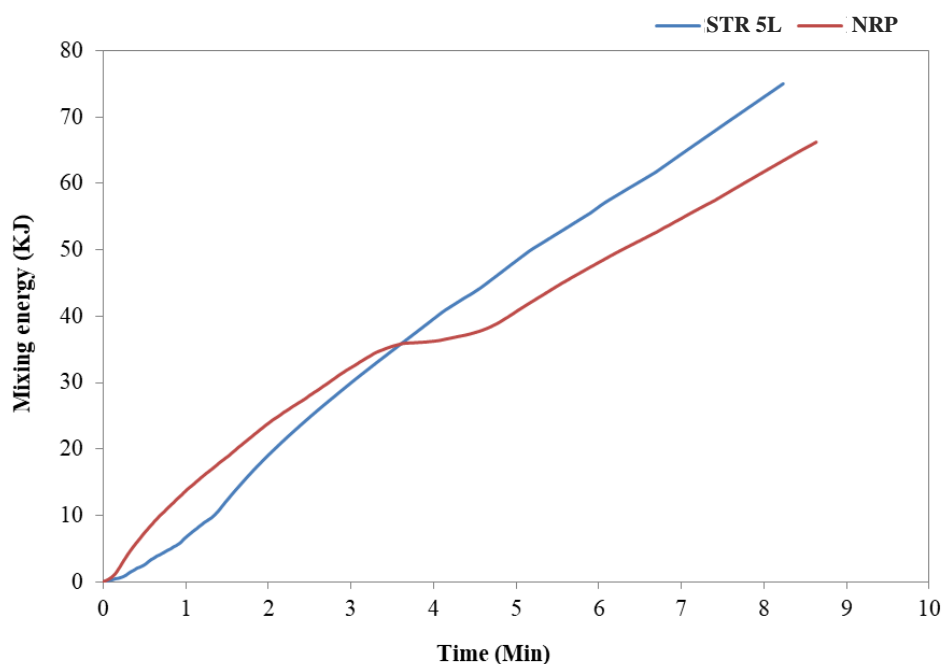
จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าค่าทอร์คในตอนเริ่มต้นของการบดผสมยางจะมีค่าสูงกว่ากรณีของยางแท่ง STR 5L เนื่องจากยางมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็กระดับไมครอน ทำให้การบดผสมในตอนเริ่มต้นอาจใช้แรงในการบดผสมที่มากซึ่งจะสามารถผสมเข้ากับสารเคมีได้ง่ายกว่ากรณีของยางแท่ง STR 5L และเมื่อเวลาการบดผสมเพิ่มขึ้น ค่าทอร์คมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.36 ค่าทอร์คระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์

รูปที่ 4.37 แสดงพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมของยางคอมพาวด์ ซึ่งข้อมูลจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมและเวลาในการบดผสมของยางคอมพาวด์ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์ของยางแท่ง STR 5L มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้น สำหรับกรณีของยางธรรมชาติผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (NRP) พบว่าพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมในตอนเริ่มต้นจะมีค่าการใช้พลังงานที่สูงกว่ากรณีของยางแท่ง STR 5L เมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่งของการบดผสม ค่าพลังงานระหว่างการบดผสมจะเกิดการคงตัว สันนิษฐานว่าสารเคมีเข้าไปในตัวยางได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้ใช้พลังงานในระหว่างการบดผสมที่น้อยกว่า และเมื่อเวลาการบดผสมเพิ่มขึ้นพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมจะเพิ่มขึ้นตามเวลาของการบดผสมเป็นแบบเชิงเส้น



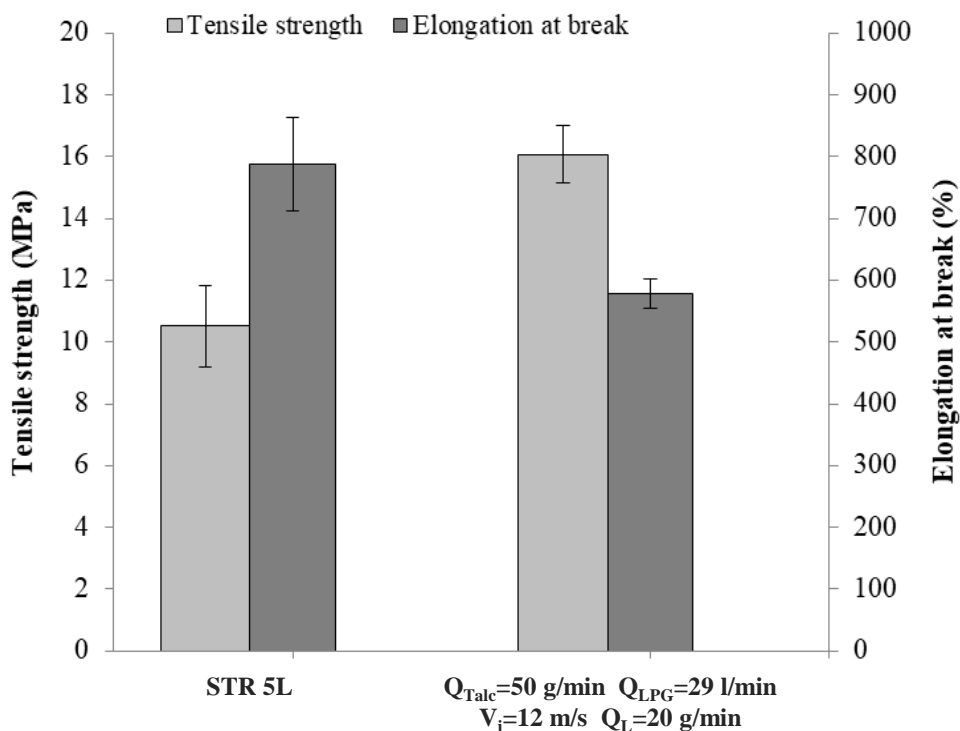


รูปที่ 4.37 พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์

#### 4.3.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง

##### 4.3.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยในการทดสอบจะพิจารณาผลของยางธรรมชาติผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (NRP) เปรียบเทียบกับยางแท่ง STR 5L จากรูปที่ 4.38 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาดของยาง (Elongation at break) พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (NRP) มีค่าสูงกว่า ยางแท่ง STR 5L เนื่องจากยางธรรมชาติผงมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมที่มีขนาดเล็ก ทำให้มีพื้นที่ผิวโดยรอบมากขึ้น ดังนั้นสารเคมีสามารถเข้าไปกระจายและเกาะเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายกว่ายางแท่ง STR 5L ส่งผลให้ยางธรรมชาติผงเกิดอันตรกิริยาพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ดี ซึ่งยางธรรมชาติผงจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ที่ประมาณ 16 MPa เมื่อพิจารณาระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติผง (NRP) จะมีค่าน้อยกว่ายางแท่ง STR 5L ซึ่งบ่งบอกถึงคุณภาพของวัสดุว่าอาจมีผงที่ลคมผสมอยู่ในอนุภาคยางธรรมชาติผง โดยยางธรรมชาติผงมีค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยางประมาณ 580%

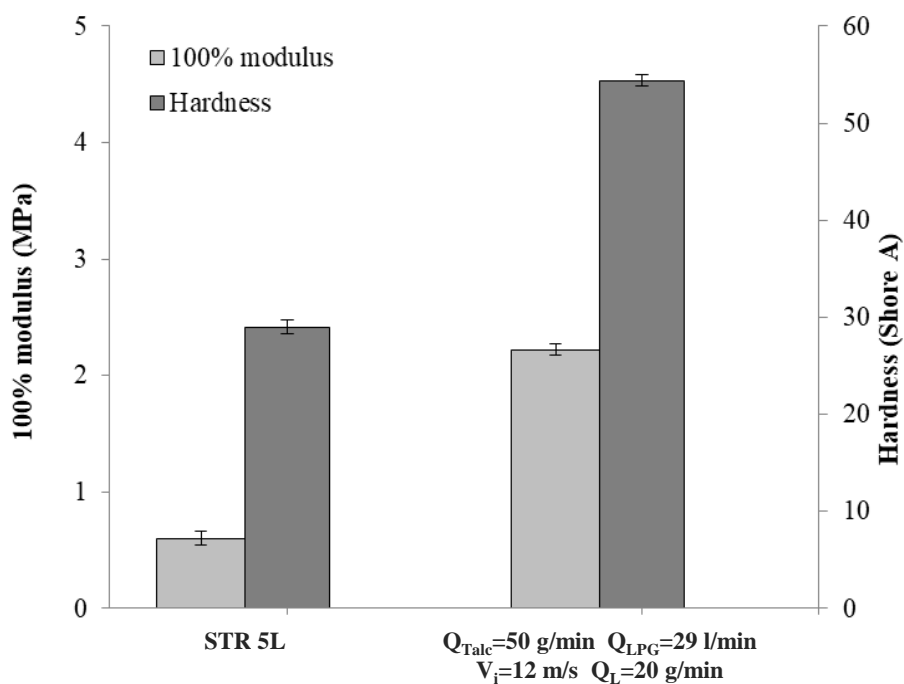


รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของยาง

#### 4.3.7.2 ผลการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 4.39 แสดงค่าโมดูลัสและความแข็งของยาง เมื่อพิจารณาผลของยางธรรมชาติ ผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (NRP) เปรียบเทียบกับยางแท่ง STR 5L พบว่ายางธรรมชาติผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย มีค่าโมดูลัส 100% ที่สูงกว่ายางแท่ง STR 5L ซึ่งมีค่าประมาณ 2.3 MPa โดยที่ยางแท่ง STR 5L มีค่าประมาณ 0.65 MPa

จากการทดสอบความแข็ง (Hardness) แบบ Shore A พบว่ายางธรรมชาติผงที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (NRP) มีค่าความแข็งสูงกว่ายางแท่ง STR 5L เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะของการเชื่อมขวาง (Crosslinking) โดยที่ค่าความแข็งของยางธรรมชาติผง อยู่ที่ประมาณ 55 ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งของยางแท่ง STR 5L ประมาณเกือบ 2 เท่า



รูปที่ 4.39 ค่าโมดูลัสและความแข็งของยาง

ตารางที่ 4.2 สรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางธรรมชาติแต่ละชนิด กรณีศึกษาโดยใช้ผงทัลคัม เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

คุณสมบัติของยาง (Rubber Properties)	ชนิดของยาง	
	ยางแท่ง STR 5L	ยางธรรมชาติผง (NRP)
<b>สมบัติของยางดิบ</b>		
ความอ่อนตัวเริ่มต้นของยาง, P <sub>0</sub>	44.0 ±0.5	66.5 ±2.1
ความอ่อนตัวของยางชุดที่หลังอบ, P <sub>30</sub>	28.2 ±1.6	36.8 ±0.7
ดัชนีความอ่อนตัวของยาง, PRI	64.0 ±3.8	55.4 ±1.1
ความหนืดมูนนี่ (Mooney unit)	73.22	43.87
<b>สมบัติเชิงกลของยาง</b>		
100 % Modulus (MPa)	0.6 ±0.05	2.22 ±0.05
Tensile strength (MPa)	10.52 ±1.32	16.07 ±0.94
Elongation at break (%)	788 ±76	578 ±23
Hardness (Shore A)	29.00 ±0.71	54.40 ±0.54

#### 4.4 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ซิงค์สเตียเรท เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

##### 4.4.1 ผลการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

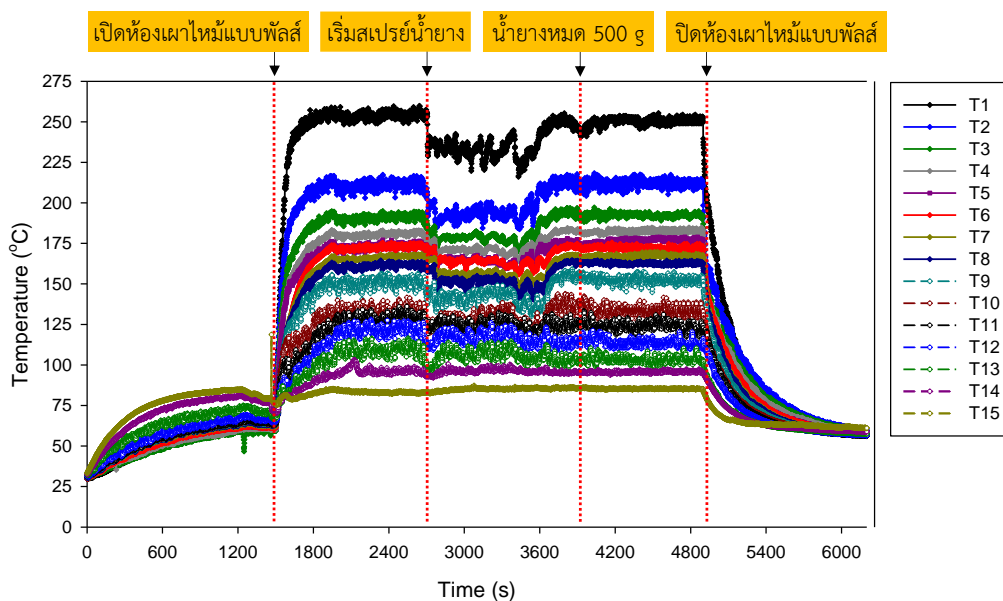
สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยโดยใช้ซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ เนื่องด้วยในกรณีศึกษาใช้ทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 22 และ 25 l/min พบว่าทั้งสองกรณีมีการกระจายอุณหภูมิภายในห้องอบที่ไม่เพียงพอสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ จึงเลือกใช้ควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ไว้ที่ 29 l/min สำหรับในทุกกรณีที่ทำการศึกษา โดยในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนความเร็วทางเข้าห้องอบ ( $V_i$ ) ที่ 5.5, 8.7 และ 12 m/s และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง ( $Q_L$ ) เท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min สำหรับผลการทดลองทั้งหมดจะแสดงดังต่อไปนี้

##### 4.4.1.1 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s

สำหรับส่วนนี้จะศึกษาผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 5.5 m/s เพื่อศึกษาหาอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางที่เหมาะสมกับสภาวะในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยละอองน้ำยางธรรมชาติ โดยในการทดลองจะทำการควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ไว้ที่ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 5.5 m/s เพื่อศึกษาดูการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง ( $Q_L$ ) เท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min ตามลำดับ

รูปที่ 4.40 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1$ - $T_{15}$  กับเวลาที่ใช้ในการอบ โดยการอ้างอิงตำแหน่งจากรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นรูปชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สที่ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20 g/min จากรูปจะเห็นว่าในขณะที่ทำการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ อุณหภูมิภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1$ - $T_9$  มีค่ากระโดดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นรอจนระบบการทำงานของห้องเผาไหม้เข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady) จึงทำการสเปรย์น้ำยางจากหัวฉีดเข้าไปในห้องอบ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในช่วงที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องอบ จะทำให้อุณหภูมิที่กระจายภายในห้องอบในแต่ละตำแหน่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง  $T_1$   $T_2$  และ  $T_3$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับส่วนเริ่มต้นของละอองน้ำยางที่ถูกฉีดพ่นจากหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางแล้วไหลเข้ามาในห้องอบ และเมื่อในส่วนของการทำละอองฝอยเสร็จสิ้น

(น้ำยางหมด 500 g) อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งจะกลับมาคงที่อีกครั้งจนเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง โดยอุณหภูมิภายในห้องอบที่ตำแหน่งการวัด  $T_1$ - $T_{15}$  มีค่าอยู่ในช่วง 85-250 °C ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ( $T_1$ ) ประมาณ 250 °C และอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้กับทางเข้าห้องอบ  $T_{15}$  มีอุณหภูมิลมร้อนอยู่ที่ประมาณ 85 °C

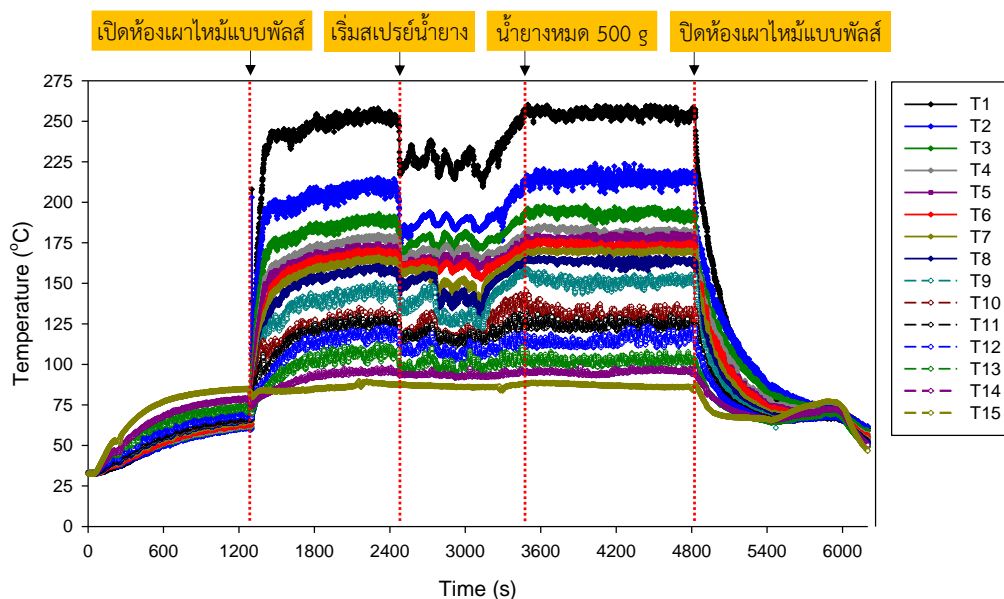


รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ L/min}, \quad V_i=5.5 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=20 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

สำหรับในรูปที่ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 L/min ควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ในแต่ละตำแหน่ง ( $T_1$ - $T_{15}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 85-255 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมากและสามารถนำมาใช้สำหรับอบแห้งละอองน้ำยางในเวลาที่รวดเร็วได้ดี

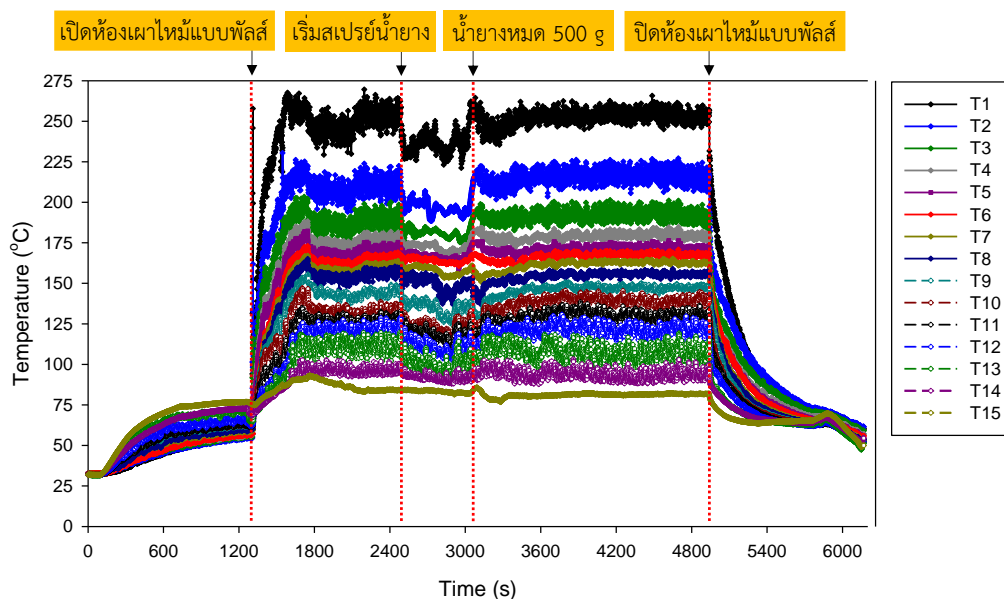


รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ l/min}, \quad V_i=5.5 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=40 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

สำหรับในรูปที่ 4.42 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 60 g/min จากการทดลองพบว่า ภายในห้องอบมีอุณหภูมิที่สูงมากเพียงพอสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว เหมือนกับในกรณีอัตราการไหลของน้ำยาง 20 และ 40 g/min โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 82-256 °C แต่เนื่องด้วยความเร็วทางเข้าห้องอบที่ไม่สูงมากพอจะพาอนุภาคยางธรรมชาติและผงซิงค์สเตียเรทลอยออกไปที่ทางออกของห้องอบได้ ทำให้อนุภาคยางธรรมชาติและซิงค์สเตียเรทบางส่วนตกลงที่ด้านล่างของห้องอบมาเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนโดยมีขนาดแตกต่างกันออกไป และในส่วนน้อยที่มีลักษณะเป็นเม็ดยางทรงกลมขนาดเล็ก

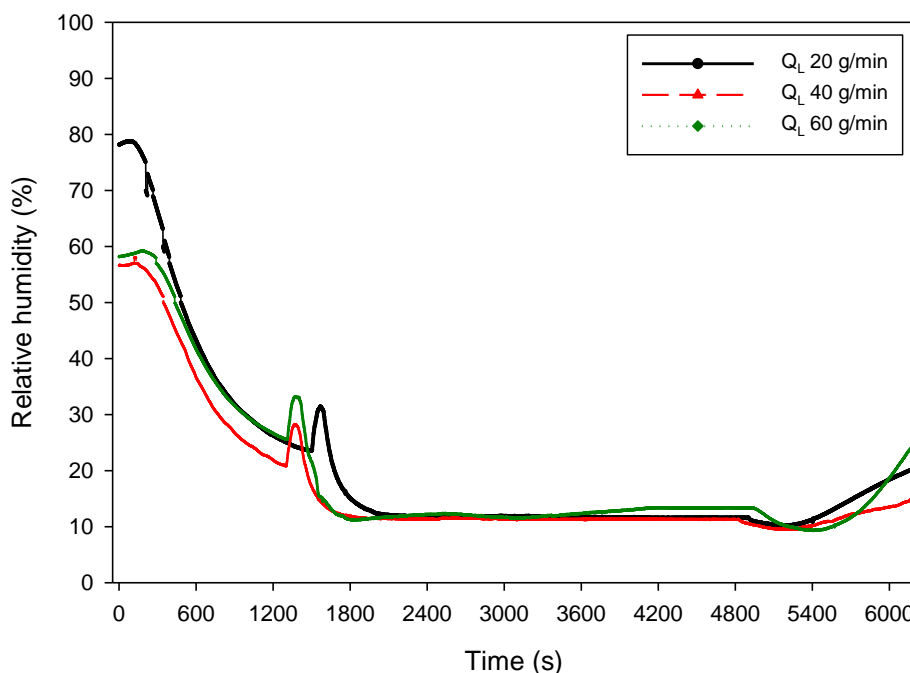


รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ l/min}, \quad V_i=5.5 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=60 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.43 แสดงผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}$ ) สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่  $29 \text{ l/min}$  และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่  $5.5 \text{ m/s}$  โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า กรณีเงื่อนไขปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ  $20$  และ  $40 \text{ g/min}$  หลังจากการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้เสร็จและเข้าสู่สภาวะคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในห้องอบที่ต่างกันเล็กน้อย และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบที่กรณีเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ  $60 \text{ g/min}$  ในช่วงเวลา  $3000 \text{ s}$  (นาทีที่  $50$ ) เป็นต้นไป คือช่วงที่เสร็จสิ้นการฉีดพ่นน้ำยางเข้าไปในห้องอบ (น้ำยางหมด  $500 \text{ g}$ ) ค่าความชื้นภายในห้องอบจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสูงกว่ากรณีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องด้วยกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ  $60 \text{ g/min}$  เปรียบเสมือนการนำความชื้นเข้าไปในห้องอบที่มากกว่ากรณีอื่น ทำให้เกิดความชื้นสะสมในระบบที่ค่อนข้างรวดเร็ว ทำให้การระบายความชื้นออกจากห้องอบเป็นไปค่อนข้างช้า ส่งผลให้ระบบอบแห้งไม่มีประสิทธิภาพและอบแห้งได้ไม่ดี จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า กรณีความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ  $5.5 \text{ m/s}$  ไม่เหมาะสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  L/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=20, 40, 60$  g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.44 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทรอบอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 20 g/min จะเห็นว่ายางธรรมชาติที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นชั้นบางหลาย ๆ ชั้น ยึดเกาะติดกันจนกลายเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ และยังมียางธรรมชาติอีกส่วนหนึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็ก ระดับไมครอน โดยปริมาณของยางธรรมชาติที่ผลิตได้มีน้ำหนักเท่ากับ 198.2 กรัม

จากการหาความชื้นของยางธรรมชาติที่ผลิตได้ โดยการอบตัวอย่างยางแห้ง พบว่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min มีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 2.77 % dry-basis





รูปที่ 4.44 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

รูปที่ 4.45 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่เคลือบผิวอนุภาคยางด้วยซิงค์สเตียเรทสำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min พบว่ายางธรรมชาติมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กเหมือนกับกรณีปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min โดยมีปริมาณของยางที่ผลิตได้เท่ากับ 183.5 g และมีความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 2.76 % dry-basis



รูปที่ 4.45 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min

รูปที่ 4.46 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการใช้ผงซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min) สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min จะเห็นว่ายางธรรมชาติที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมที่มีขนาดเล็กยึดเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างฝอย โดยสามารถดึงและแยกออกจากกันได้ง่าย โดยน้ำหนักของยางที่ได้สำหรับกรณีนี้เท่ากับ 191.6 กรัม และยางธรรมชาติมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 1.07 % dry-basis



รูปที่ 4.46 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ผงซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

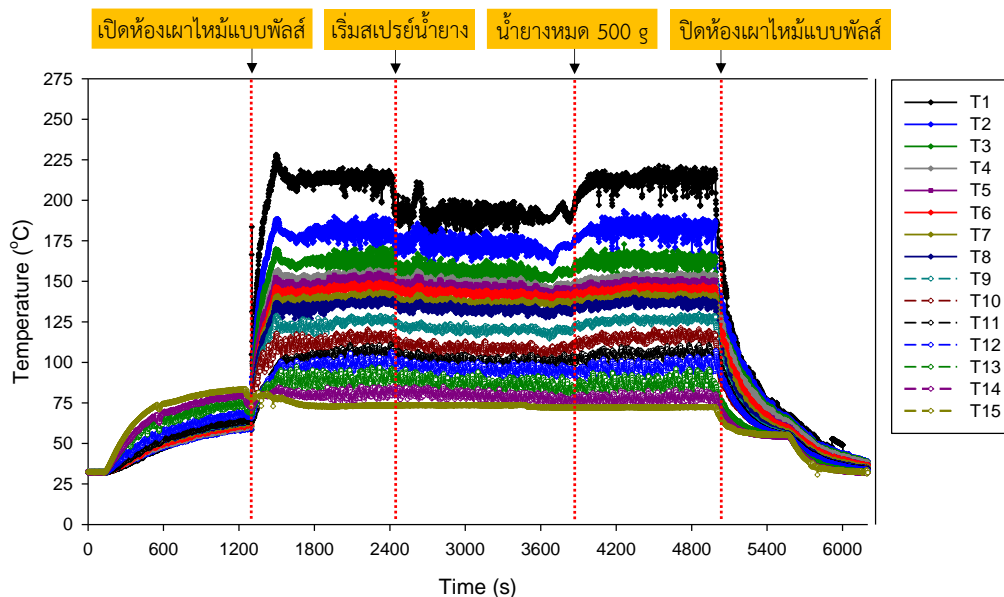
จากการคำนวณหาการสิ้นเปลืองพลังงานรวมในการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่าง ๆ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5 m/s พบว่าค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมสำหรับกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min 39.41 kWh สำหรับในกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมเท่ากับ 39.41 kWh และในกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min มีค่าการสิ้นเปลืองพลังงานรวมของระบบเท่ากับ 39.41 kWh

เมื่อพิจารณาผลผลิตกัมมันต์ยางธรรมชาติที่เตรียมได้โดยการเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิงค์สเตียเรท กรณีควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 5.5 m/s พบว่าสามารถให้การกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบได้ดีและมีอุณหภูมิที่สูง แต่เนื่องจากความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5 m/s เป็นค่าความเร็วไม่มากพอที่จะพาอนุภาคยางลอยไปที่ทางออกของห้องอบได้ จึงทำให้อนุภาคยางธรรมชาติตกลงมาที่ส่วนด้านล่างของห้องอบและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนบริเวณด้านล่างของห้องอบ และไม่สามารถผลิตยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมได้

#### 4.4.1.2 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s

สำหรับในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดเพื่อสร้างละอองน้ำยางโดยการฉีดพ่นเข้าไปในห้องอบ สำหรับกรณีควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s โดยในการทดลองจะทำการควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) ไว้ที่ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 8.7 m/s เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min

รูปที่ 4.47 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1$ - $T_{15}$  กับเวลาที่ใช้ในการอบ โดยการอ้างอิงตำแหน่งตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10 กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min) สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG เท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20 g/min เมื่อดูจากกราฟอุณหภูมิจะเห็นว่าในตอนเริ่มต้นของการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ อุณหภูมิภายในห้องอบมีค่ากระโดดเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากกระบวนการทำงานของห้องเผาไหม้เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงเริ่มทำการสเปรย์น้ำยางเข้าไปในห้องอบ โดยในช่วงที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องอบ อุณหภูมิภายในห้องอบตกลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นว่าที่ตำแหน่ง  $T_1$   $T_2$  และ  $T_3$  เป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับละอองน้ำยางที่ถูกฉีดพ่นเข้ามาในห้องอบ และเมื่อการทำละอองน้ำยางเสร็จสิ้น (น้ำยางหมด 500 g) อุณหภูมิมีค่ากระโดดเพิ่มขึ้นมามีค่าเทียบเท่ากับอุณหภูมิในช่วงก่อนที่จะเริ่มทำการสเปรย์น้ำยางเข้ามาในห้องอบ จากนั้นระบบอบแห้งจะกลับมาเข้าสู่การอบแห้งด้วยสภาวะคงที่ตลอดจนเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง โดยอุณหภูมิภายในห้องอบที่ตำแหน่งการวัด  $T_1$ - $T_{15}$  มีค่าอยู่ในช่วง 71-215 °C ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งด้านบนของห้องอบ ( $T_1$ ) มีค่าประมาณ 215 °C และอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านล่างของห้องอบ ( $T_{15}$ ) มีอุณหภูมิของลมร้อนอยู่ที่ประมาณ 71 °C

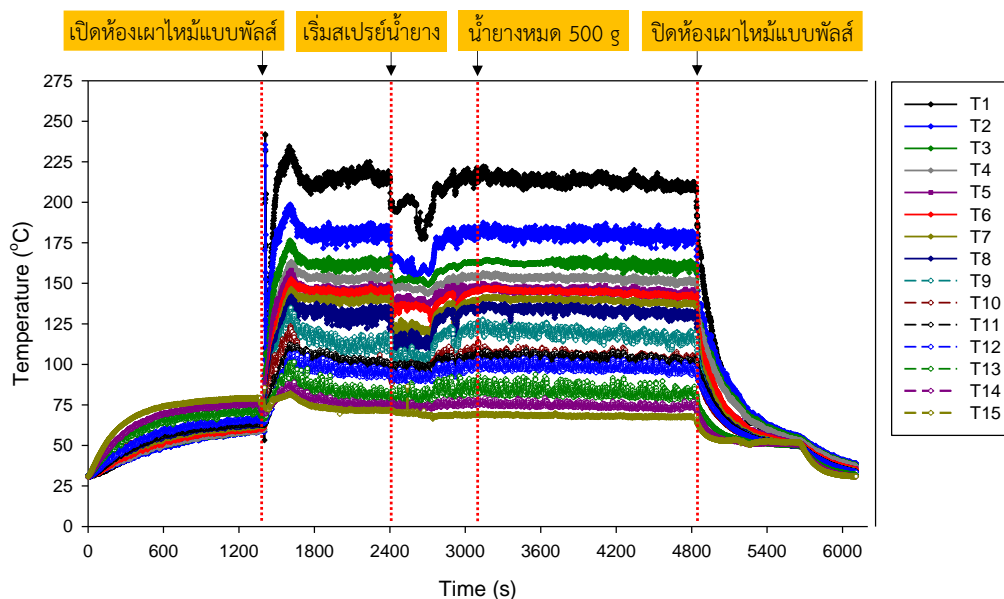


รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{\text{Zinc}}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{\text{LPG}}=29 \text{ l/min}, \quad V_i=8.7 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=20 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

สำหรับในรูปที่ 4.48 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{\text{Zinc}}=50 \text{ g/min}$ ) สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 l/min โดยทำการควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min จากผลการวัดอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในห้องอบ พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ในแต่ละตำแหน่ง ( $T_1-T_{15}$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 69-211 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงเพียงพอสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย

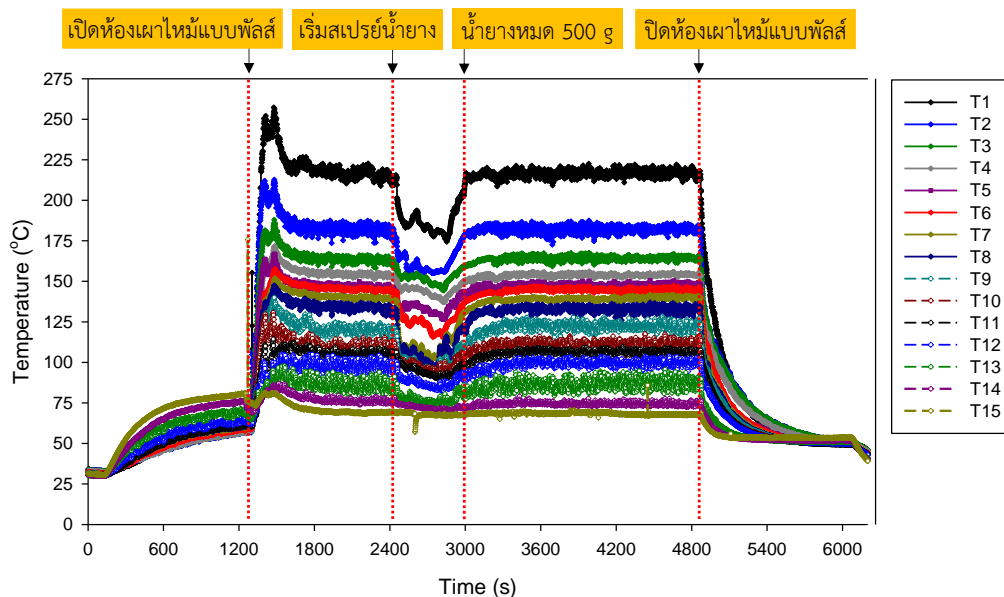


รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ l/min}, \quad V_i=8.7 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=40 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

สำหรับในรูปที่ 4.49 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min จากผลการทดลองพบว่า มีอุณหภูมิภายในห้องอบที่สูงมากเพียงพอสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาผลจากการวัดอุณหภูมิภายในห้องอบพบว่า มีการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 และ 40 g/min โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 67-217 °C แต่เนื่องจากที่เงื่อนไขควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s เป็นความเร็วทางเข้าห้องอบที่ไม่มากพอจะพาอนุภาคยางธรรมชาติผงลอยออกไปที่ทางออกของห้องอบได้ ทำให้อนุภาคยางธรรมชาติตกลงมาที่ด้านล่างของห้องอบแล้วเกิดการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนโดยมีขนาดแตกต่างกันออกไป

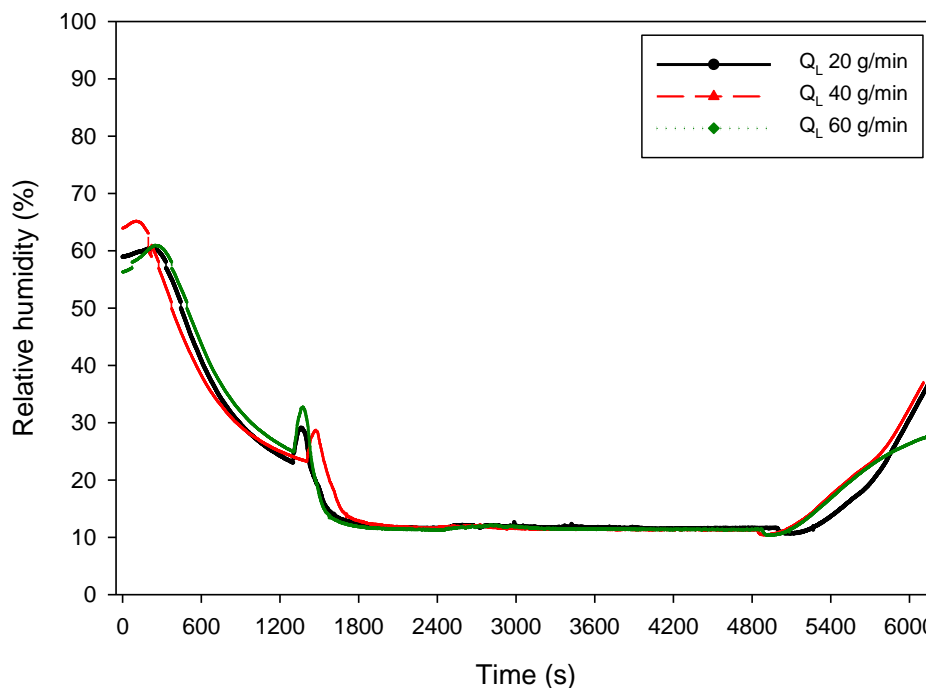


รูปที่ 4.49 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{\text{Zinc}}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{\text{LPG}}=29 \text{ l/min}, \quad V_i=8.7 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=60 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.50 แสดงผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 8.7 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยการอ้างอิงตำแหน่งตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10 จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในห้องอบที่ต่างกันน้อยมาก และจะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นกราฟค่าความชื้นในทุกกรณีของการควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบไว้ที่ 8.7 m/s ขณะที่ทำการทดลองเปิดห้องเผาไหม้แบบพัลส์จนเสร็จสิ้นการทดลอง มีลักษณะของเส้นกราฟที่ซับซ้อนกันมากที่สุด แสดงว่าผลของการควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบสำหรับกรณีปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min



รูปที่ 4.50 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=20, 40, 60$  g/min (อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.51 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท สำหรับกรณี อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และปรับ อัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min จะเห็นว่ายางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบ ฟันฝอย จะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็กเกาะติดกันเป็นแบบรูปร่างโครงตาข่ายและรวมกัน เป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก โดยมียางธรรมชาติที่ผลิตได้ในบางส่วนจะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็ก ระดับไมครอน โดยปริมาณของยางธรรมชาติที่ผลิตได้มีน้ำหนักเท่ากับ 191.9 กรัม

จากการหาความชื้นของยางธรรมชาติที่ผลิตได้ โดยการอบตัวอย่างยางจนกระทั่งได้ ความชื้นสุดท้าย พบว่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติสำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส เท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min มีความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.75 % dry-basis



รูปที่ 4.51 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

รูปที่ 4.52 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติที่เตรียมได้ สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 40 g/min จากรูปจะเห็นว่ายางธรรมชาติที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนโดยมีขนาดที่แตกต่างกันและมีลักษณะเป็นเม็ดยางทรงกลมที่มีขนาดของอนุภาคระดับไมครอน โดยมีน้ำหนักของยางที่ผลิตได้เท่ากับ 191.2 g และมีความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติเท่ากับ 0.44 % dry-basis



รูปที่ 4.52 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



รูปที่ 4.53 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติผลิตได้โดยการใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min จะเห็นว่ายางธรรมชาติมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนยางที่มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับยางที่เตรียมได้ในกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min และมีลักษณะเป็นเม็ดยางทรงกลมที่มีขนาดเล็ก โดยปริมาณของยางที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับกรณีนี้ มีน้ำหนักเท่ากับ 183.5 กรัม และจากการอบตัวอย่างของยางแห้งพบว่ายางธรรมชาติมีค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 3.33 % dry-basis



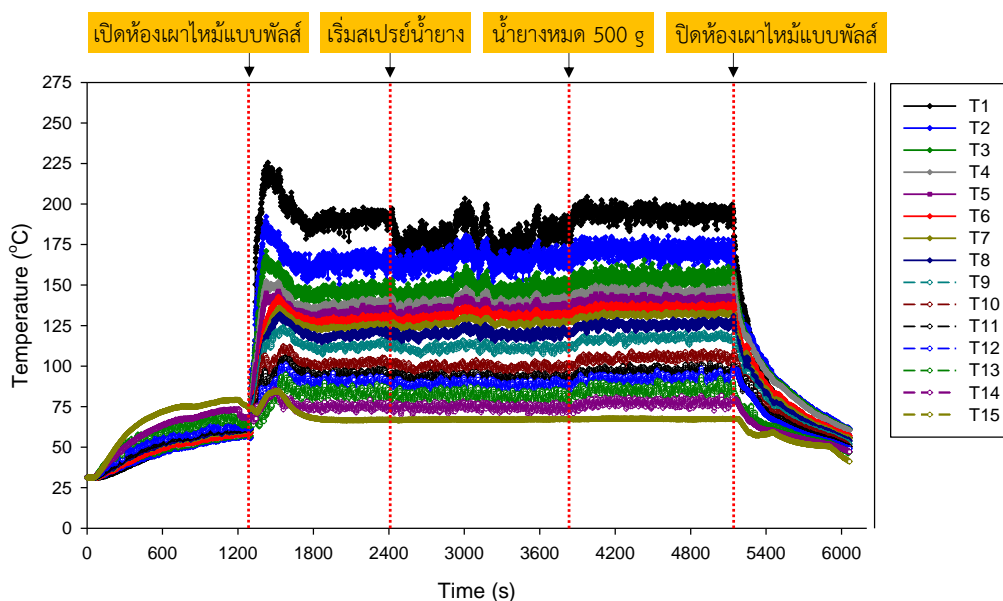
รูปที่ 4.53 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  L/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

จากการวิเคราะห์คำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานรวมในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าในกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมในระบบเท่ากับ 39.86 kWh สำหรับในกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมเท่ากับ 39.86 kWh และสำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 8.7 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมเท่ากับ 39.86 kWh

#### 4.4.1.3 ผลต่ออัตราการไหลของน้ำยาง กรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s

ในส่วนนี้จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดเพื่อสร้างละอองน้ำยางโดยการฉีดพ่นเข้าไปในห้องอบ สำหรับกรณีควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s โดยในการทดลองจะทำการควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส ( $Q_{LPG}$ ) เท่ากับ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s เพื่อศึกษาดูการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min

รูปที่ 4.54 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1-T_{15}$  กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งละอองน้ำยาง สำหรับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส เท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดเท่ากับ 20 g/min จากการทดลอง พบว่าอุณหภูมิของลมร้อนที่กระจายภายในห้องอบ มีอุณหภูมิที่สูงมากเพียงพอเหมาะสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว โดยกราฟอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีแนวโน้มของเส้นกราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จากการวัดและบันทึกผลของอุณหภูมิผ่านเครื่องเก็บข้อมูล (Digital data logger) พบว่าอุณหภูมิในห้องอบมีค่าอยู่ในช่วง 70-199 °C

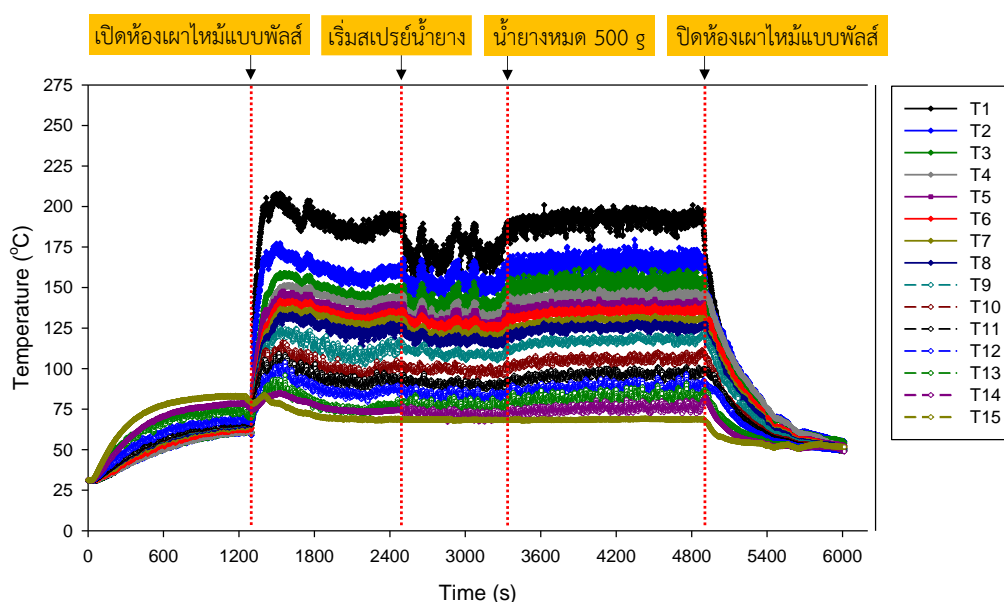


รูปที่ 4.54 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ l/min}, \quad V_i=12 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=20 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

จากรูปที่ 4.55 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ ที่เงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 l/min โดยการควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min จากการทดลองอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย พบว่าอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบแต่ละตำแหน่ง มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นของการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้และในช่วงที่มีการฉีดพ่นละอองน้ำยางจากหัวฉีดเข้าไปในห้องอบโดยมีความปั่นป่วนของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่ไม่เหมือนกัน จากการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T<sub>1</sub>-T<sub>15</sub> พบว่ามีอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบอยู่ในช่วง 70-197 °C

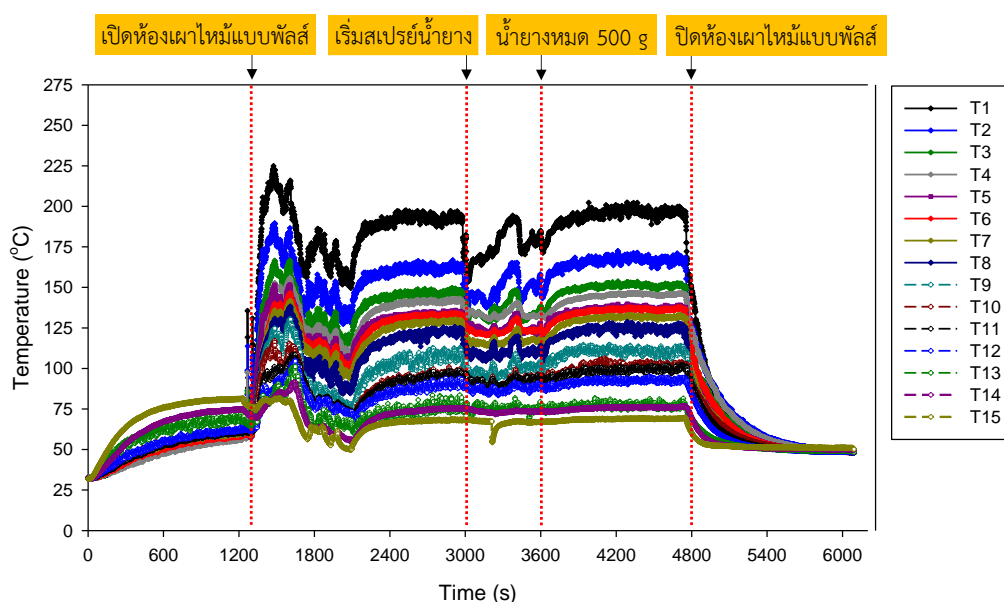


รูปที่ 4.55 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์เตตระเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ l/min}, \quad V_f=12 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=40 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

สำหรับในรูปที่ 4.56 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่ง  $T_1-T_{15}$  กับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 V/min ควบคุมความเร็วลมของทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางแล้วฉีดพ่นเข้าไปในห้องอบเท่ากับ 60 g/min จากผลการทดลองจะเห็นว่ากราฟอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นการจุดระเบิด (วินาทีที่ 1200 ถึง 2000) มีความปั่นป่วนของอุณหภูมิภายในห้องอบ เนื่องด้วยในช่วงแรกของการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้เกิดความไม่เสถียรของระบบขึ้น ทำให้อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งมีค่าตกลงเล็กน้อย และหลังจากนั้นระบบการทำงานของห้องเผาไหม้เริ่มกลับมาสู่สภาวะคงที่ (Steady) และสามารถให้ความร้อนกับระบบอย่างมีประสิทธิภาพในการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยได้ดี โดยที่อุณหภูมิภายในห้องอบมีค่าอยู่ในช่วง 70-199 °C

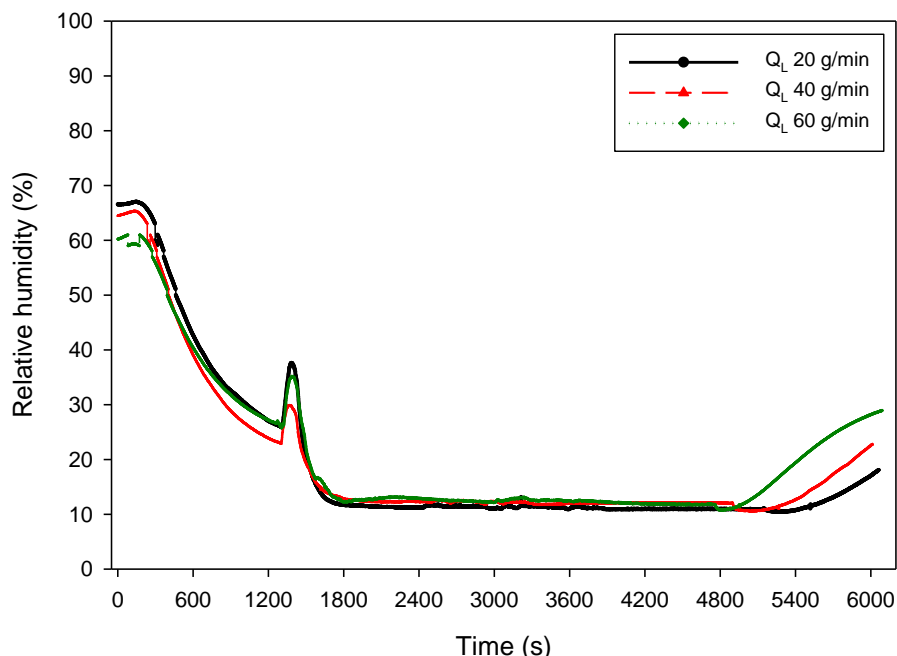


รูปที่ 4.56 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์เตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

$$(Q_{Zinc}=50 \text{ g/min}) \quad Q_{LPG}=29 \text{ V/min}, \quad V_i=12 \text{ m/s} \quad \text{และ} \quad Q_L=60 \text{ g/min}$$

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.57 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางที่ฉีดพ่นเข้าไปในห้องอบเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min ตามลำดับ จากการเก็บข้อมูลของความชื้นภายในห้องอบในขณะที่ทำการการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย โดยในช่วง 1200 s (ในช่วงเวลา 20 นาทีแรก) คือการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้ จะเห็นว่ากราฟความชื้นมีค่ากระโดดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้ มีการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงแก๊สที่เป็นของเหลวเปรียบเสมือนการนำความชื้นเข้ามาในห้องอบ หลังจากการจุดระเบิดของห้องเผาไหม้เสร็จแล้ว จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงจนเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในห้องอบอีกครั้ง ในช่วงที่เริ่มต้นการฉีดพ่นละอองน้ำยางจากหัวฉีดเข้ามาในห้องอบ และหลังจากการพ่นละอองน้ำยางหมด 500 g การเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบก็จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่อีกครั้งตลอดจนเสร็จสิ้นการทดลองในแต่ละกรณี เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบสำหรับทั้งสามกรณี พบว่ามีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความชื้นไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่กรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min มีค่าความชื้นสูงกว่ากรณีอื่นเล็กน้อย



รูปที่ 4.57 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายในห้องอบกับเวลาที่ใช้ในการอบ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min)

$Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20, 40, 60$  g/min

(อ้างอิงตามชุดทดลองในรูปที่ 3.10)

รูปที่ 4.58, 4.59 และ 4.60 แสดงลักษณะของยางธรรมชาติเคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับกรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min จากรูปจะเห็นว่ายางธรรมชาติผงมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็กกระจัดไม่ครอน โดยมีช่วงของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันออกไป เมื่อนำยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้มาชั่งน้ำหนักหาปริมาณของยางที่ได้ พบว่ายางธรรมชาติผงสำหรับกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min มีน้ำหนักเท่ากับ 180.6, 166.1 และ 173.7 กรัม ตามลำดับ และมีค่าความชื้นสุดท้ายของยางธรรมชาติผงเท่ากับ 0.12, 0.32 และ 0.41 % dry-basis ตามลำดับ

จากการคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานรวมในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่าง ๆ พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมของระบบสำหรับกรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สไว้เท่ากับ 29 l/min และควบคุมความเร็วทางเข้าของห้องอบเท่ากับ 12 m/s โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min พบว่าในทั้งสามกรณีมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานรวมในระบบเท่ากับ 40.17 kWh



รูปที่ 4.58 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



รูปที่ 4.59 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{\text{Zinc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  U/min,  $V_f=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



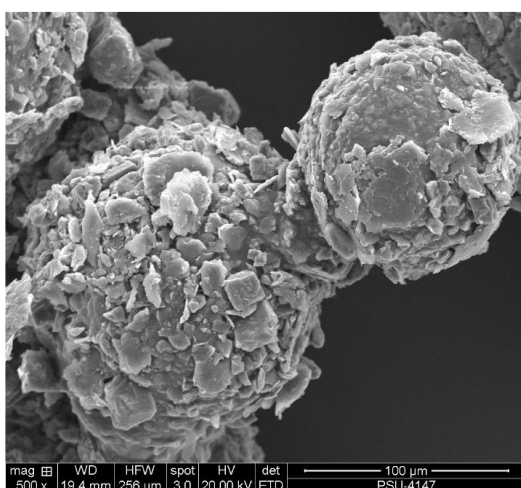
รูปที่ 4.60 ลักษณะของยางที่เตรียมได้ กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ  
( $Q_{\text{Zinc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  U/min,  $V_f=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min



#### 4.4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับส่วนนี้จะศึกษากรณีเงื่อนไขไอควมคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 L/min และความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 และ 12 m/s และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานจะแสดงดังต่อไปนี้

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) สำหรับในรูปที่ 4.61 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานระหว่างอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) และอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม (Talcum powder) ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าในกรณีของอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัมจะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมและยึดเกาะติดกันโดยมีผงทัลคัมเคลือบอยู่รอบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผงดังแสดงในรูปที่ 4.61 (ก) และสำหรับในรูปที่ 4.61 (ข) แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท จะเห็นว่ายางธรรมชาติมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมโดยมีซิงค์สเตียเรทเคลือบอยู่โดยรอบผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ ทำให้อนุภาคยางไม่เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรณีที่เคลือบผิวอนุภาคยางด้วยผงทัลคัม พบว่าสารเคลือบผิวซิงค์สเตียเรทสามารถนำมาใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติได้ดีกว่าสารเคลือบผิวทัลคัม



(ก) อนุภาคยางธรรมชาติเคลือบด้วยทัลคัม

( $Q_{Talc}=50$  g/min)



(ข) อนุภาคยางธรรมชาติเคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท

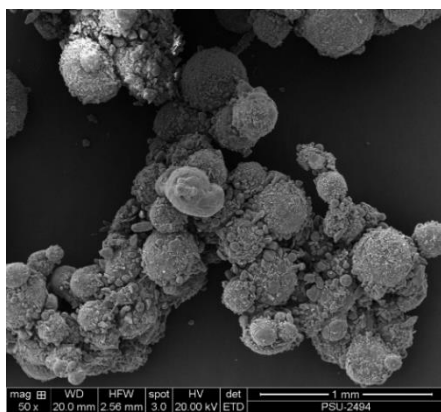
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)

รูปที่ 4.61 การเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า  
กรณี  $Q_{LPG}=29$  L/min,  $V_1=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

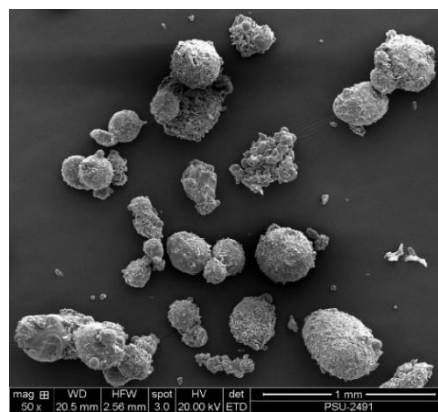


รูปที่ 4.62 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางเคลือบผิวด้วยผงซิงค์สตีเรทที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยในรูปที่ 4.62 (ก) แสดงลักษณะทางสัณฐานกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min พบว่ามีลักษณะเป็นเม็ดยางทรงกลมขนาดเล็กจำนวนมากหลายเม็ดเกาะติดกันแล้วรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนโดยมีรูปร่างที่แตกต่างกัน

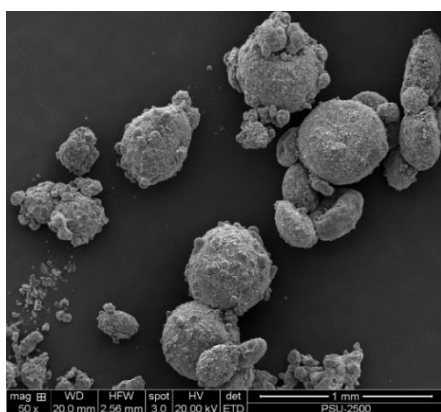
สำหรับในรูปที่ 4.62 (ข) ถึง 4.62 (ง) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สตีเรท กรณีความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน พบว่าลักษณะทางสัณฐานของยางธรรมชาติผงสำหรับอัตราการไหลของน้ำยาง 20, 40 และ 60 g/min มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคทรงกลมที่ไม่เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน และมีขนาดของอนุภาคยางอยู่ในช่วง 100 ถึง 450  $\mu\text{m}$ , 150 ถึง 540  $\mu\text{m}$  และ 200 ถึง 600  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ



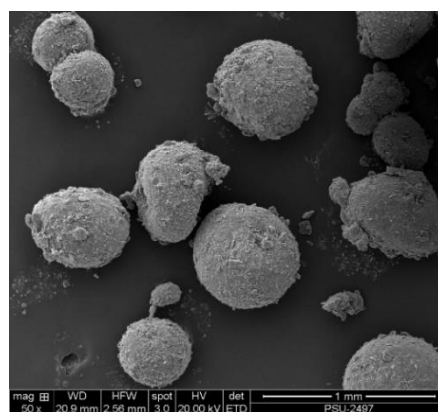
(ก) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



(ข) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



(ค) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



(ง) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

รูปที่ 4.62 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 4.63 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยในรูปที่ 4.63 (ก) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงกรณีความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min จะเห็นว่ายางมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมที่มีซิงค์สเตียเรทเคลือบอยู่รอบผิวของยางธรรมชาติและมีการเกาะติดกันของอนุภาคยาง

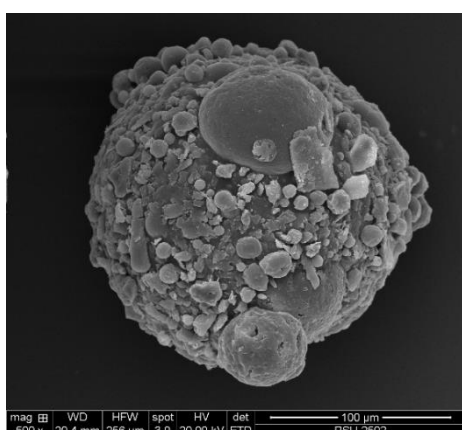
รูปที่ 4.63 (ข) ถึง รูปที่ 4.63 (ง) แสดงลักษณะทางสัณฐานของยางธรรมชาติผงสำหรับความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min จะเห็นว่ายางธรรมชาติผงมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมโดยมีซิงค์สเตียเรทเคลือบอยู่โดยรอบผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ ทำให้อนุภาคยางธรรมชาติไม่เกาะติดรวมกันเป็นกลุ่มก้อน



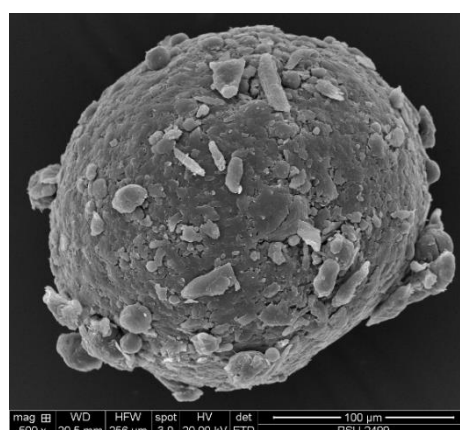
(ก) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



(ข) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



(ค) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



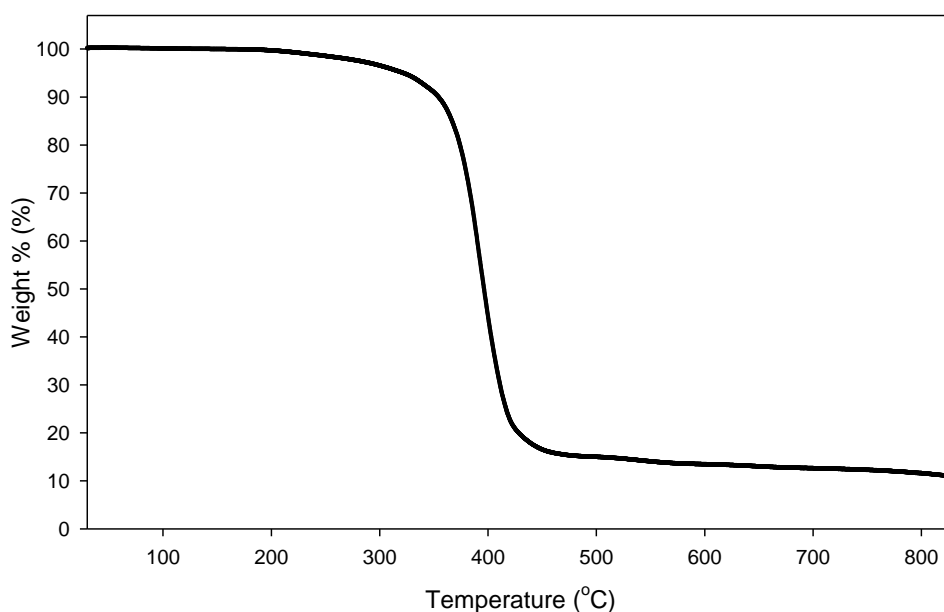
(ง) อนุภาคยางผงกรณี  $Q_{LPG}=29$  l/min  
 $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

รูปที่ 4.63 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 500 เท่า

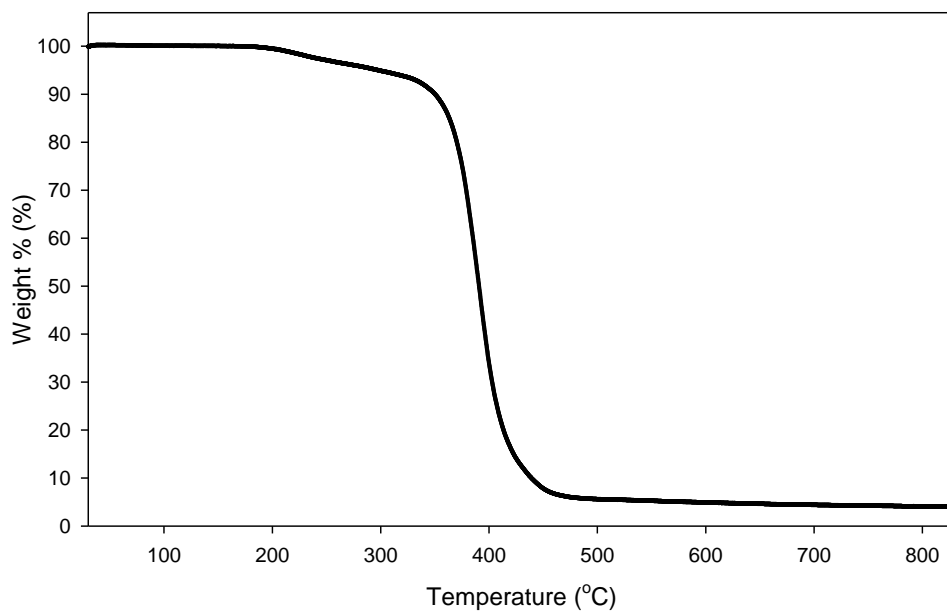
#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผง

สำหรับในส่วนนี้จะอธิบายถึงผลของการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีศึกษาใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ โดยใช้เทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) ในการวิเคราะห์หาสมบัติทางความร้อน จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 25 ถึง 800 °C สำหรับกรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สไว้ที่ 29 l/min โดยการปรับเปลี่ยนความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5, 8.7 และ 12 m/s และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min

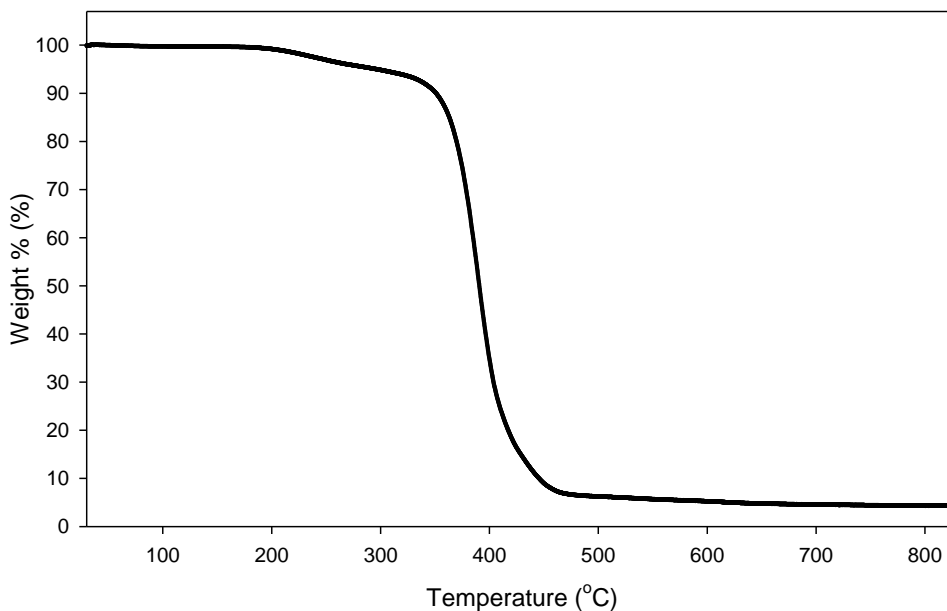
จากรูปที่ 4.64, 4.65 และ 4.66 แสดงสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 5.5 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยแสดงข้อมูลอยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่สูญเสียกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของความชื้นสำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิประมาณ 320-480 °C, 330-520 °C และ 330-510 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.64 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง ( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

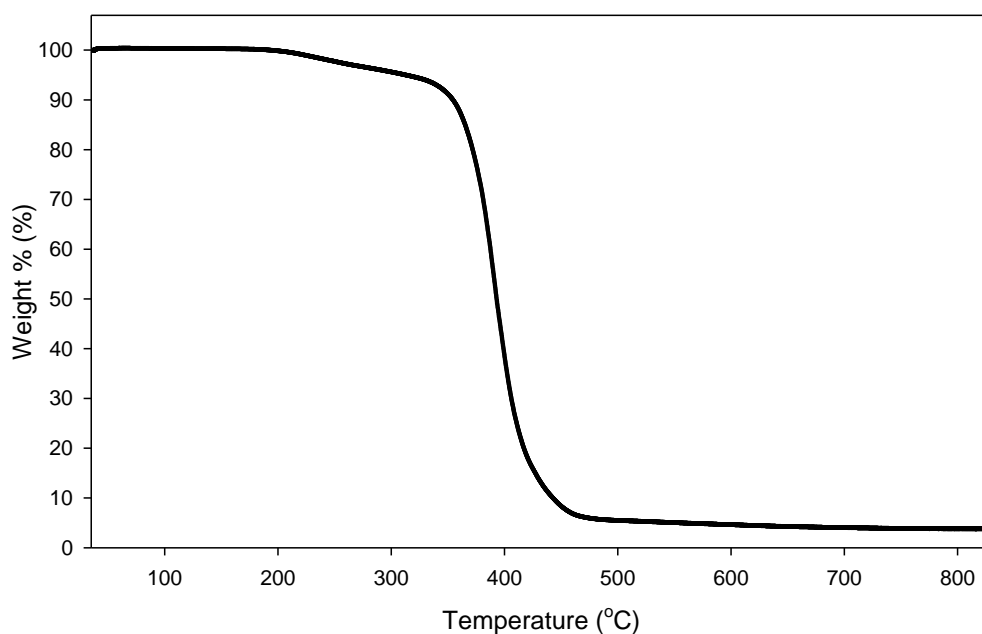


รูปที่ 4.65 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สตีเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{\text{Zinc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min

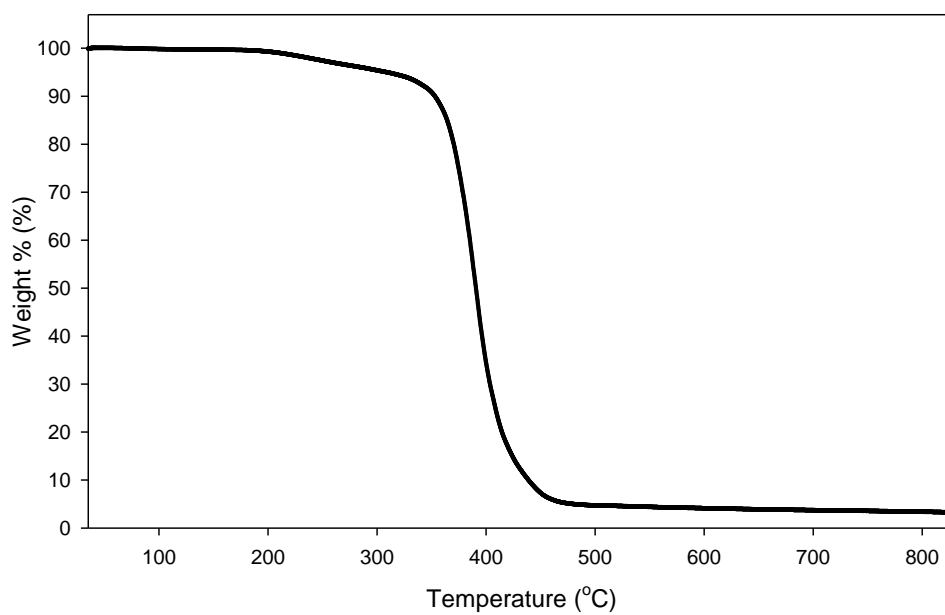


รูปที่ 4.66 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สตีเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{\text{Zinc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=5.5$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

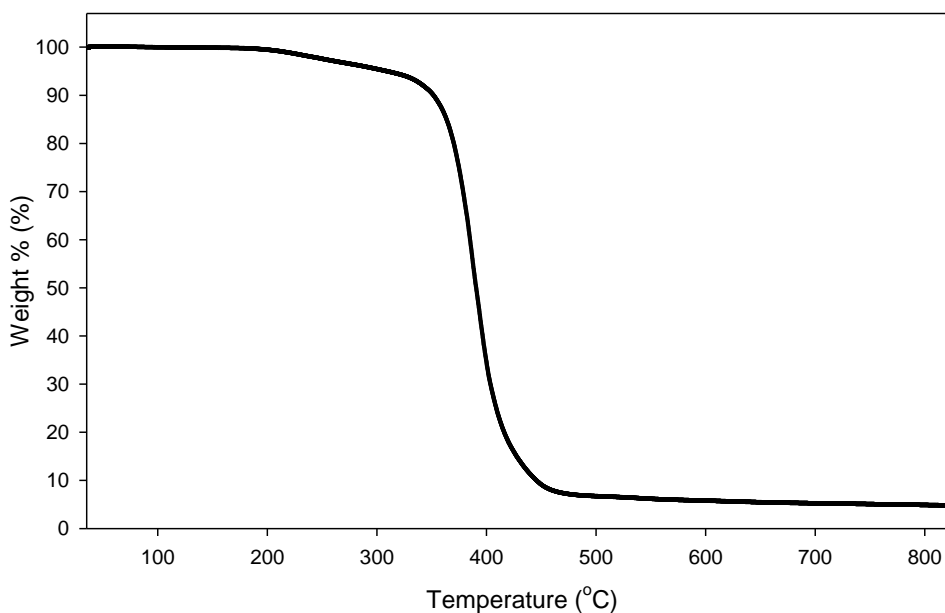
จากรูปที่ 4.67, 4.68 และ 4.69 แสดงสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติ ผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยใช้ผงซิงค์สเทียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับกรณีควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min และควบคุมความเร็วลมทางเข้าของห้องอบเท่ากับ 8.7 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของน้ำหนักที่สูญเสียไปในระหว่างการทดสอบอยู่ช่วงอุณหภูมิ 330-510 °C, 320-510 °C และ 310-490 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.67 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเทียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min

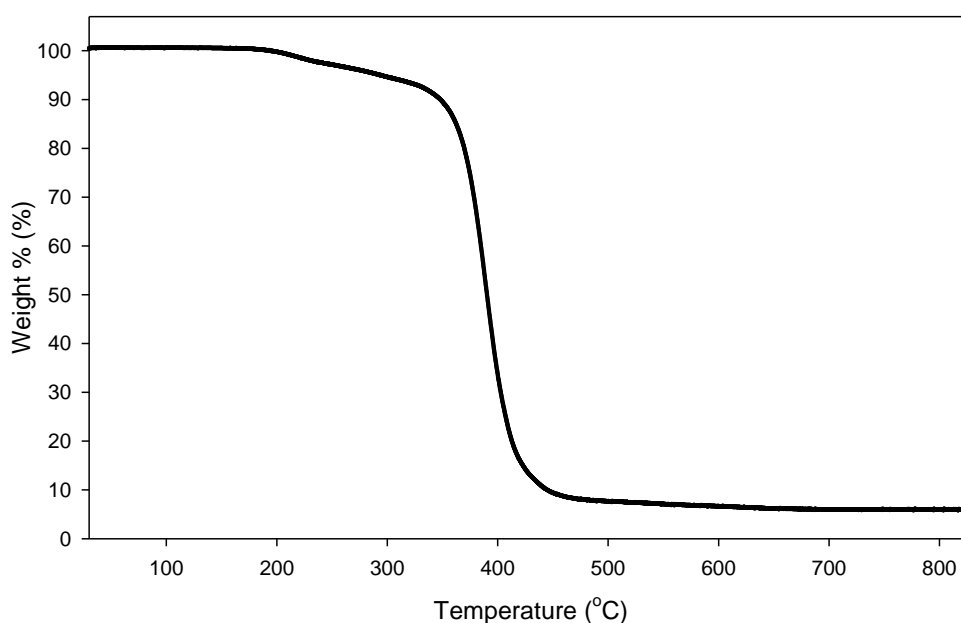


รูปที่ 4.68 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สตีเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



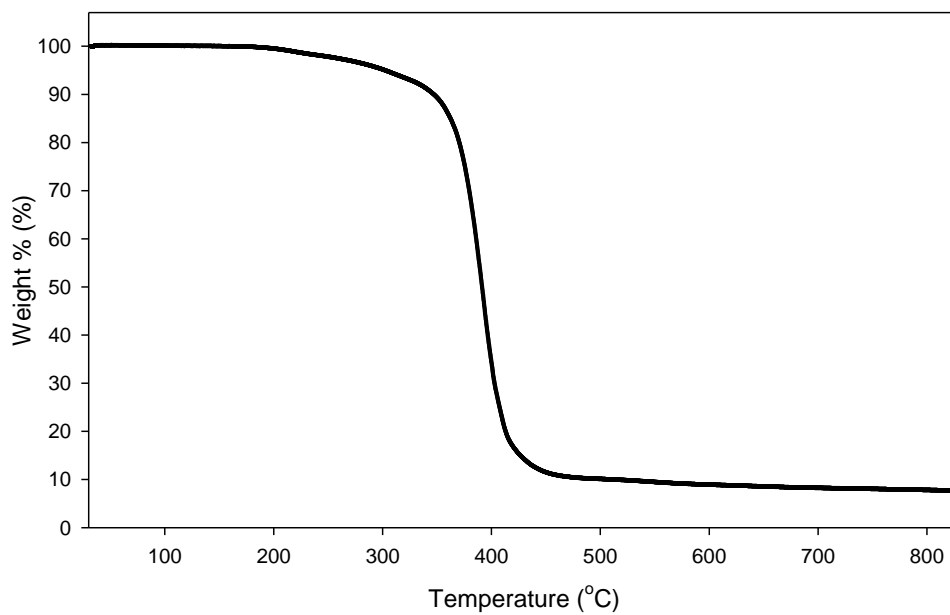
รูปที่ 4.69 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สตีเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=8.7$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min

จากรูปที่ 4.70, 4.71 และ 4.72 แสดงสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติ ผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส เท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และปรับอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหล เข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min จากการวิเคราะห์สมบัติทาง ความร้อนสำหรับในกรณีปรับอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20 g/min พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของความชื้นสำหรับน้ำหนักที่สูญเสีย ไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 320-520 °C สำหรับในกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min พบว่า ยางธรรมชาติเกิดการสลายตัวของความชื้นสำหรับน้ำหนักที่สูญเสียไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 330-490 °C และสำหรับในกรณีของการปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 60 g/min พบว่ายางธรรมชาติเกิด การสลายตัวของน้ำหนักยางที่สูญเสียไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 320-500 °C

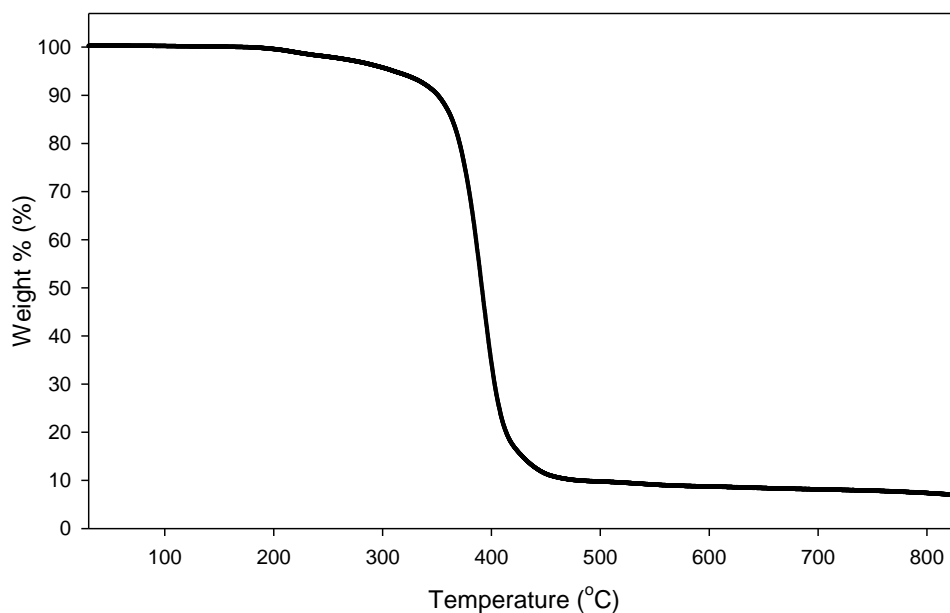


รูปที่ 4.70 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง

( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=20$  g/min



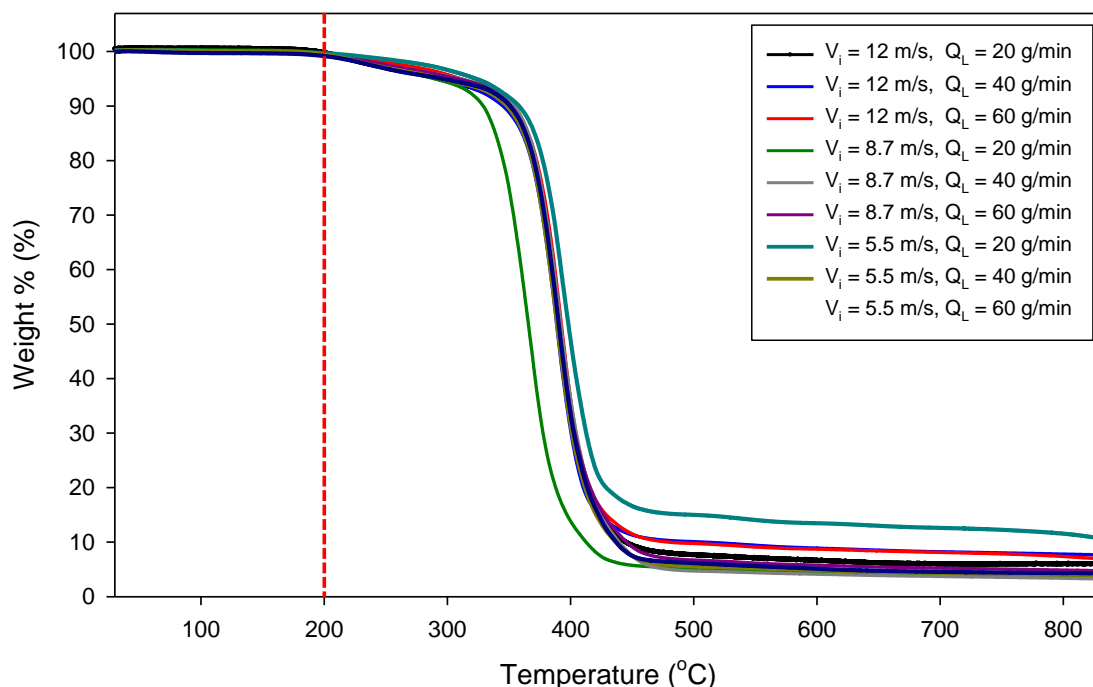
รูปที่ 4.71 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สตีเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{\text{Zinc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=40$  g/min



รูปที่ 4.72 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สตีเรทเคลือบผิวอนุภาคยาง  
( $Q_{\text{Zinc}}=50$  g/min)  $Q_{\text{LPG}}=29$  l/min,  $V_i=12$  m/s และ  $Q_L=60$  g/min



รูปที่ 4.73 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min) สำหรับเงื่อนไขควบคุมอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 5.5, 8.7 และ 12 m/s โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min เมื่อนำอัตราการสูญเสียน้ำหนักของยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยในแต่ละกรณีมาวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางความร้อน พบว่าอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทที่มีความเสถียรภาพทางความร้อนโดยภาพรวมประมาณ 200 °C ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโดยทั่วไปของการวิเคราะห์หาสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.73 การเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของอนุภาคยางธรรมชาติที่เตรียมได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ ( $Q_{Zinc}=50$  g/min)  
 $Q_{LPG}=29$  l/min,  $V_i=5.5, 8.7, 12$  m/s และ  $Q_L=20, 40, 60$  g/min

#### 4.4.4 ผลการทดสอบหาความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติผง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติ (ค่า  $P_o$  และ PRI) โดยในส่วนนี้จะพิจารณาเลือกยางที่มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมที่เตรียมได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่ กรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยาง 20, 40 และ 60 g/min โดยในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระหว่างยางแท่ง STR 5L กับยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทสำหรับเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลของการทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติผง กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกับกรณียางแท่ง STR 5L และยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท มีค่าความอ่อนตัวเริ่มต้นของยางน้อยกว่ายางแท่ง STR 5L แสดงว่ายางธรรมชาติผงเคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทเป็นยางที่มีความนิ่มมากกว่ายางแท่ง STR 5L และเมื่อนำค่า  $P_o$  และ  $P_{30}$  ที่ทดสอบได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI) พบว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทมีค่าน้อยกว่ายางแท่ง STR 5L แสดงว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท มีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุลและมีความต้านทานต่อการออกซิเดชันที่น้อยมาก

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความอ่อนตัวเริ่มต้นและดัชนีความอ่อนตัวของยางธรรมชาติสำหรับกรณีศึกษาใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

ชนิดของยาง	$P_o$	$P_{30}$	PRI
ยางแท่ง STR 5L	44.0 ±0.5	28.2 ±1.6	64.0 ±3.8
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=20$ g/min	66.5 ±2.1	36.8 ±0.7	55.4 ±1.1
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=20$ g/min	36.0 ±0.5	7.0 ±0.6	19.4 ±1.6
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=40$ g/min	36.0 ±0.3	11.1 ±0.8	31.1 ±1.9
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=60$ g/min	36.5 ±1.3	10.0 ±0.3	27.4 ±1.0

\* ค่ามาตรฐานยางแท่ง STR ตามที่ตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าไทย (AFET) กำหนด

ความอ่อนตัวเริ่มต้นของยาง,  $P_o$  มีค่า  $33 \pm 3$

ดัชนีความอ่อนตัวของยาง, PRI มีค่า  $55 \pm 5$

#### 4.4.5 ผลการทดสอบความหนืดมูนนี่

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ซิงค์สเตียเรท (Zinc stearate) เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ สำหรับกรณีเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางที่ไหลเข้ามาในหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยในการทดสอบสามารถอ่านและบันทึกค่าความหนืดจากเครื่องทดสอบความหนืดของยาง หลังจากที่โรเตอร์หมุนไป 4 นาที จากการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติผงสำหรับทุกกรณี มีค่าความหนืดมูนนี่น้อยกว่ากรณีของยางแท่ง STR 5L โดยผลการทดสอบความหนืดมูนนี่ทั้งหมดจะแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางแต่ละชนิด

ชนิดของยาง	ความหนืดมูนนี่ (Mooney unit)
ยางแท่ง STR 5L	73.22
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัม กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=20$ g/min	43.87
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=20$ g/min	47.65
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=40$ g/min	40.46
ยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=60$ g/min	30.75

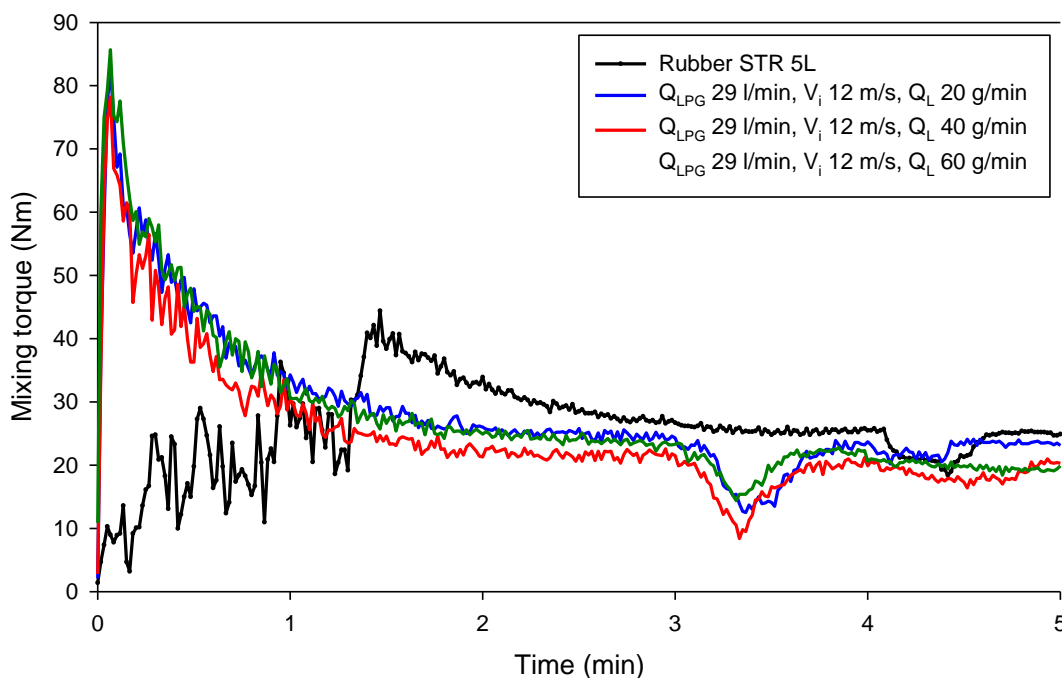
\* ค่ามาตรฐานยางแท่ง STR ตามที่ตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าไทย (AFET) กำหนด

ความหนืดมูนนี่, Mooney viscosity มีค่า  $80 \pm 10$

#### 4.4.6 ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์

สำหรับส่วนนี้จะอธิบายถึงผลของการทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากการเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิงค์สเตียเรท สำหรับเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min โดยการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรงด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) ซึ่งจะแสดงข้อมูลระหว่างการบดผสมของยางคอมพาวด์ ได้แก่ ค่าทอร์คระหว่างการบดผสมและพลังงานระหว่างการผสม โดยผลการทดสอบจะแสดงดังต่อไปนี้

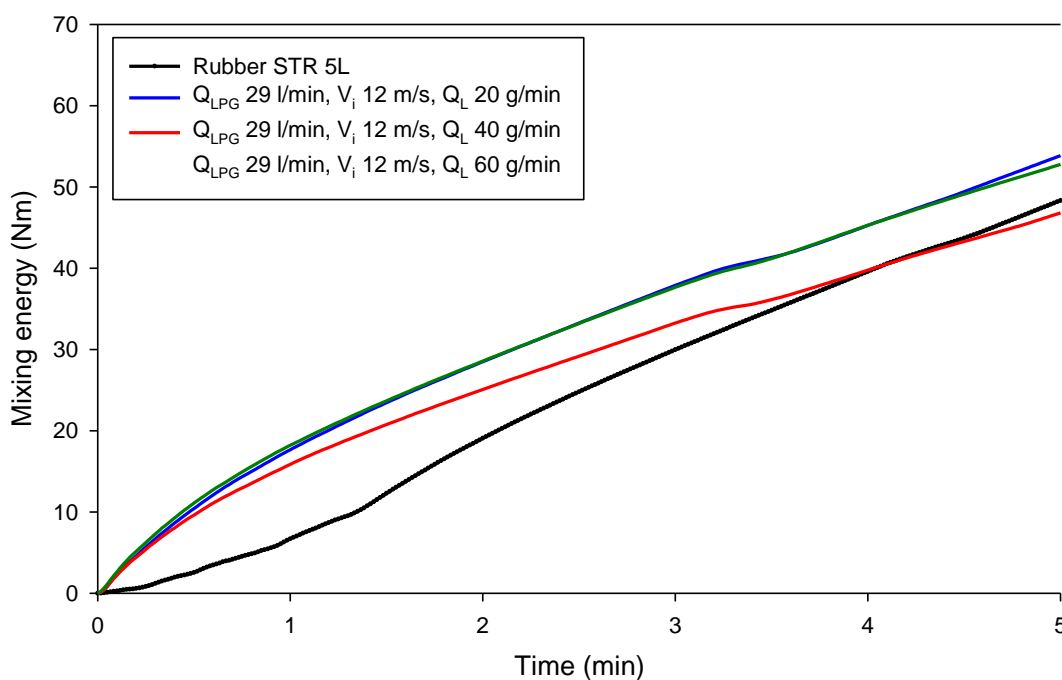
รูปที่ 4.74 แสดงการเปรียบเทียบค่าทอร์คระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์ของยางแต่ละชนิด โดยข้อมูลจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ค่าทอร์คระหว่างการบดผสมและเวลาที่ใช้ในการบดผสมของยางคอมพาวด์ จากการทดสอบกรณีของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สตีเรียทพบว่าค่าทอร์คในตอนเริ่มต้นของการบดผสมยางจะมีค่าสูงมาก เนื่องด้วยยางที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็ก ทำให้การบดผสมในตอนเริ่มต้นจำเป็นต้องใช้แรงในการบดผสมค่อนข้างมาก แต่จะมีข้อดีคือ ยางธรรมชาติจะสามารถเข้ามามีผลกับสารเคมีที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงได้ง่ายและเร็วกว่ากรณีของยางแท่ง STR 5L และเมื่อพิจารณาในกรณียางธรรมชาติผงเคลือบด้วยซิงค์สตีเรียทสำหรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min จะเห็นว่าค่าทอร์คระหว่างการบดผสมมีแนวโน้มลดลงมากกว่ากรณีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.74 การเปรียบเทียบค่าทอร์คระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์

รูปที่ 4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมของยางคอมพาวด์กับเวลาที่ใช้ในการบดผสม โดยทำการเปรียบเทียบกรณีของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สตีเรียทสำหรับอัตราการไหลของน้ำยางที่ 20, 40 และ 60 g/min กับกรณียางแท่ง STR 5L เมื่อดูจากกราฟจะเห็นว่าพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์ในกรณียางแท่ง STR 5L มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเป็นแบบเชิงเส้นและมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับกรณีของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สตีเรียท พบว่าพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมในตอนเริ่มต้น

จะมีการการใช้พลังงานที่มากกว่ากรณีของการบดผสม เนื่องจากกรณีของยางธรรมชาติผงมีขนาดของชิ้นยางทดสอบที่เล็กกว่าขนาดชิ้นยางทดสอบของกรณียางแท่ง STR 5L โดยสันนิษฐานว่าสารเคมีได้เข้าไปในอนุภาคยางธรรมชาติได้ง่ายและรวดเร็ว จึงทำให้ใช้พลังงานในการบดผสมที่น้อยกว่ากรณีอื่น เมื่อพิจารณาในกรณีเงื่อนไขอัตราไหลของน้ำยางเท่ากับ 40 g/min จะเห็นว่าพลังงานระหว่างการบดผสมมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับกรณีอัตราไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 และ 60 g/min มีการใช้พลังงานในการบดผสมที่เท่ากัน



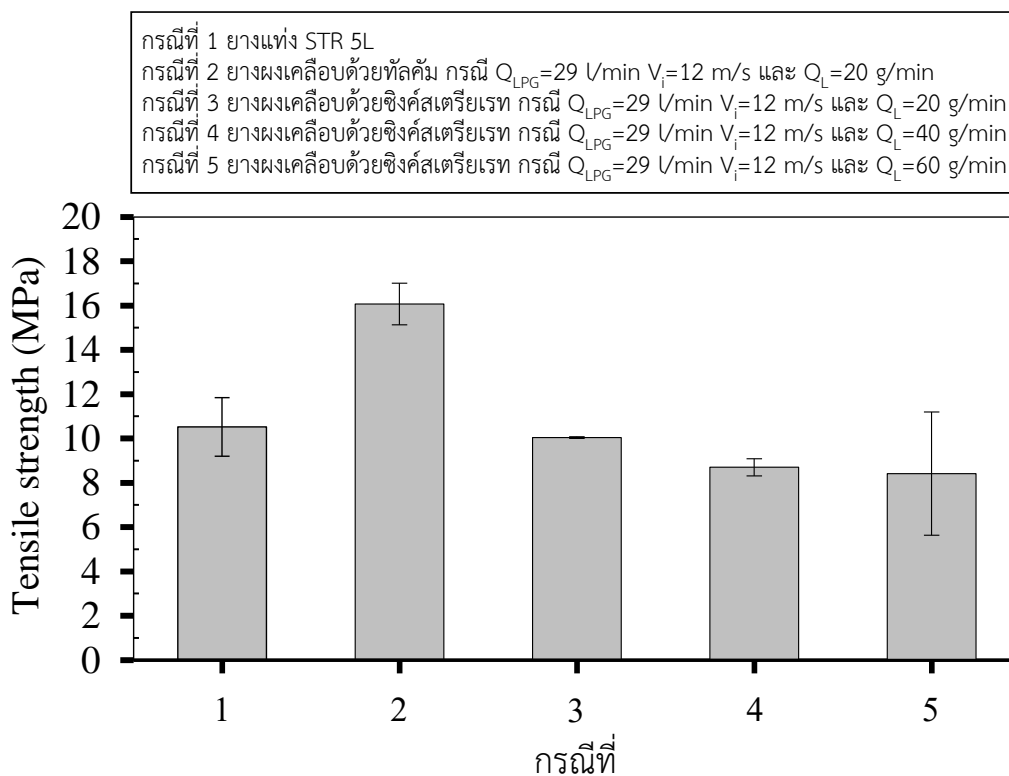
รูปที่ 4.75 พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบดผสมยางคอมพาวด์

#### 4.4.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง

##### 4.4.7.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง โดยในการทดสอบจะพิจารณาเลือกเลือกยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทที่เตรียมได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอย แล้วนำมาเปรียบเทียบกับยางแท่ง STR 5L จากรูปที่ 4.76 แสดงผลจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ของยางแต่ละชนิด พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทสำหรับกรณีอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min มีค่าใกล้เคียงกับกรณีของยางแท่ง STR 5L เนื่องด้วยยางธรรมชาติผงมีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเล็กกระจัดไม่ครอน ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสโดยรอบมากขึ้น ดังนั้นสารเคมีสามารถเข้าไปกระจาย

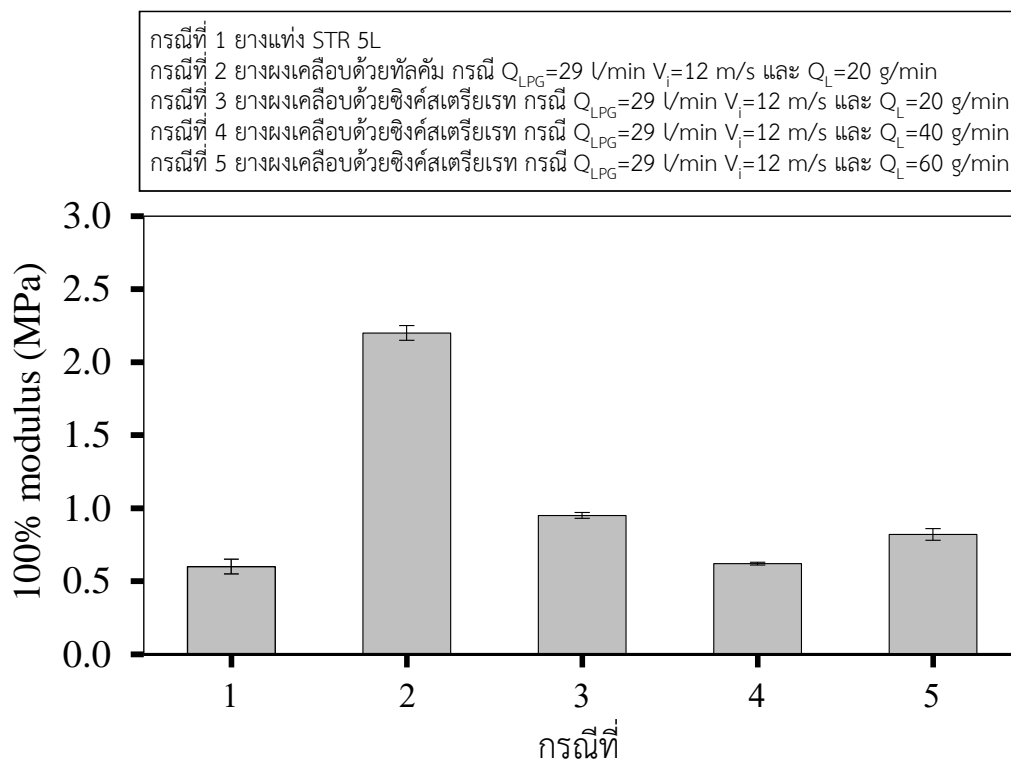
และเกาะเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายกว่า โดยยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเทียเรท มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงประมาณ 10 MPa ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้โดยทั่วไปเมื่อมีการนำตัวอย่างมาทดสอบก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง



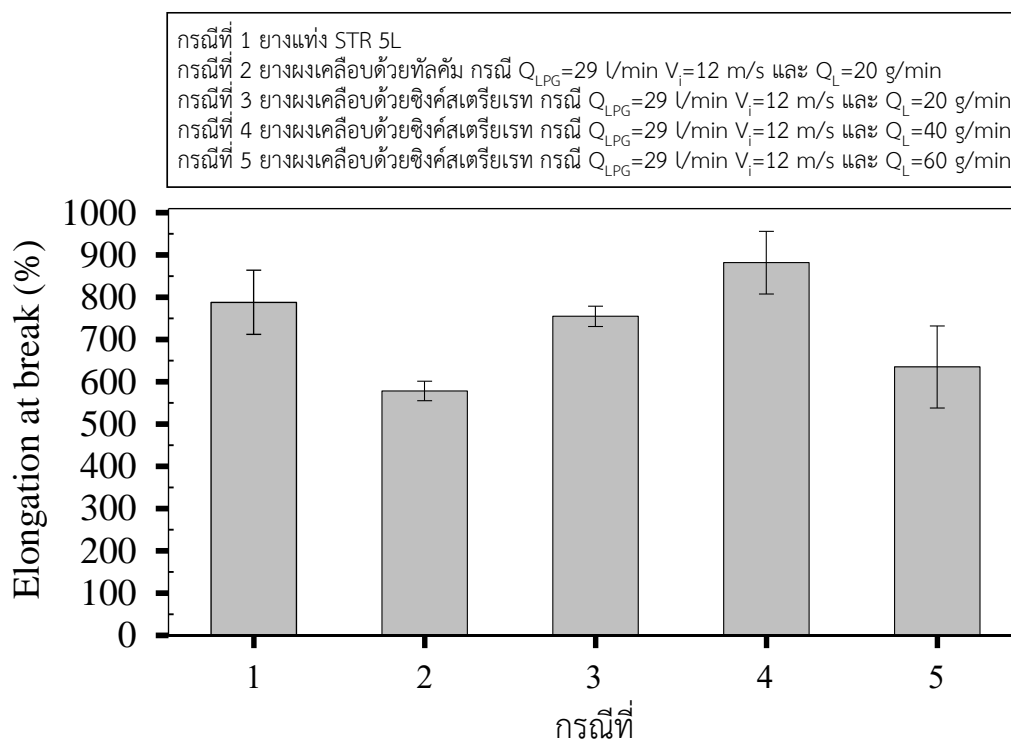
รูปที่ 4.76 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง

รูปที่ 4.77 แสดงค่าโมดูลัสของยางชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาผลของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเทียเรทเปรียบเทียบกับกรณียางแห้ง STR 5L จากการทดสอบพบว่ากรณียางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเทียเรท มีค่าโมดูลัส 100% ที่สูงกว่ากรณีของยางแห้ง STR 5L เล็กน้อย สำหรับในกรณียางธรรมชาติผงเคลือบด้วยซิงค์สเทียเรทที่อัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ 60 g/min มีค่าโดยประมาณ 0.95, 0.62 และ 0.82 MPa ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.78 แสดงค่าระยะยัด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติในกรณีต่าง ๆ โดยจากผลการทดสอบพบว่า กรณียางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเทียเรทสำหรับเงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรณีของยางแห้ง STR 5L จะเห็นว่ามีการระยะยัดของยางที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ว่าอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้สามารถนำมาใช้แทนยางแห้งที่มีใช้อยู่ทั่วไปได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติของยางที่ใกล้เคียงกัน



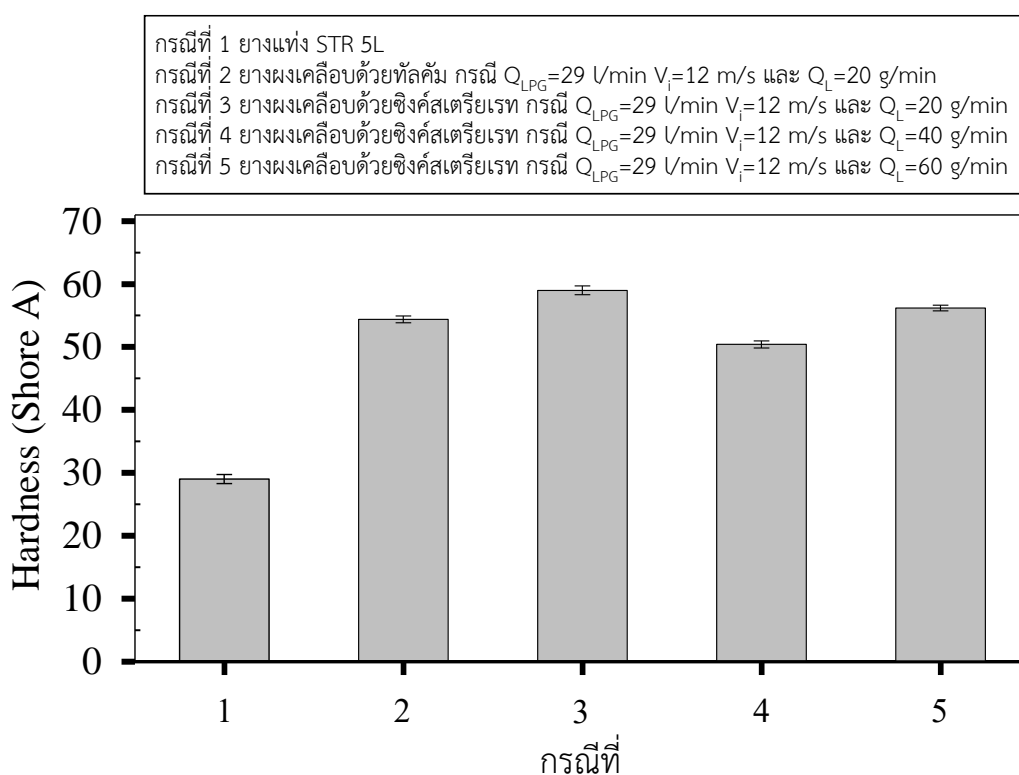
รูปที่ 4.77 ค่าโมดูลัส



รูปที่ 4.78 ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของยาง

#### 4.4.7.2 ผลการทดสอบความแข็งของยาง

รูปที่ 4.79 แสดงผลจากการทดสอบความแข็งของยาง (Hardness) แบบ Shore A พบว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท มีค่าความแข็งสูงกว่ากรณียางแท่ง STR 5L เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะของการเชื่อมขวาง (Crosslinking) เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับระหว่างกรณียางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยเคลือบด้วยซิงค์สเตียเรทกับยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยเคลือบด้วยผงทัลคัม พบว่ายางทั้งสองกรณีมีค่าความแข็งของยางที่สูงใกล้เคียงกัน ซึ่งยางที่มีความแข็งสูงสุดคือยางธรรมชาติผงที่กรณีเงื่อนไขอัตราการผลิตของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min โดยมีค่าเท่ากับ 59



รูปที่ 4.79 ค่าความแข็งของยาง



ตารางที่ 4.5 สรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติยางดิบของยางธรรมชาติแต่ละชนิด

ชนิดของยาง	P <sub>0</sub>	P <sub>30</sub>	PRI	Mooney Viscosity
ยางแท่ง STR 5L	44.0 ±0.5	28.2 ±1.6	64.0 ±3.8	73.22
ยางผงที่เคลือบด้วยทัลคัม กรณี Q <sub>LPG</sub> =29 l/min V <sub>i</sub> =12 m/s Q <sub>L</sub> =20 g/min	66.5 ±2.1	36.8 ±0.7	55.4 ±1.1	43.87
ยางผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตริยเรท กรณี Q <sub>LPG</sub> =29 l/min V <sub>i</sub> =12 m/s Q <sub>L</sub> =20 g/min	36.0 ±0.5	7.0 ±0.6	19.4 ±1.6	47.65
ยางผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตริยเรท กรณี Q <sub>LPG</sub> =29 l/min V <sub>i</sub> =12 m/s Q <sub>L</sub> =40 g/min	36.0 ±0.3	11.1 ±0.8	31.1 ±1.9	40.46
ยางผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตริยเรท กรณี Q <sub>LPG</sub> =29 l/min V <sub>i</sub> =12 m/s Q <sub>L</sub> =60 g/min	36.5 ±1.3	10.0 ±0.3	27.4 ±1.0	30.75

ตารางที่ 4.6 สรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติแต่ละชนิด

ชนิดของยาง	100 % Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (Shore A)
ยางแท่ง STR 5L	0.6 ±0.05	10.52±1.32	788 ±76	29.00±0.71
ยางผงที่เคลือบด้วยทัลคัม กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=20$ g/min	2.22 ±0.05	16.07±0.94	578 ±23	54.40±0.54
ยางผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตริยเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=20$ g/min	0.95 ±0.02	10.04±0.04	755 ±24	59.00±0.71
ยางผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตริยเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=40$ g/min	0.62 ±0.01	8.70±0.39	882 ±74	50.40±0.55
ยางผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตริยเรท กรณี $Q_{LPG}=29$ l/min $V_i=12$ m/s $Q_L=60$ g/min	0.82 ±0.04	8.41±2.78	635 ±97	56.20±0.45

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยาง ภายใต้สภาวะอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยห้องเผาไหม้ที่ใช้เป็นห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ชนิดไร้วาล์ว ที่มีท่อทางเข้าอากาศทางเดียว ในการทดลองจะศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ จากนั้นจะศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง รวมไปถึงการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางธรรมชาติผง จากผลการศึกษาดังนี้

กรณีศึกษาลักษณะพฤติกรรมการไหลของห้องเผาไหม้แบบพัลส์

(1) จากผลการศึกษาลักษณะการไหลของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยและความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยเฉพาะอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง  $X/D$  เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊สเท่ากับ 29 l/min ให้ค่าอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนสูงสุดเท่ากับ 279 °C ที่ตำแหน่ง  $X/D=1$  และมีความเร็วของเจ็ทลมร้อนสูงสุดเท่ากับ 32 m/s ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้ในการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว

กรณีศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

(1) จากผลการศึกษารูปแบบของหัวฉีดสร้างละอองน้ำยางที่ตำแหน่งทางเข้าท่ออากาศที่แตกต่างกัน พบว่าผลการกระจายของละอองน้ำยางธรรมชาติของหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยาง 40 องศา (รูปแบบที่ 3) สามารถสร้างละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็กละเอียดได้ดี โดยที่ไม่มีลักษณะเป็นเส้นน้ำยางขณะทำการสเปรย์น้ำยางออกจากหัวฉีด

(2) จากผลการศึกษาอัตราการไหลอากาศและอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน พบว่าสำหรับกรณีอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้ามาในหัวฉีดเท่ากับ 90 l/min และปรับอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min มีลักษณะการฉีดพ่นละอองน้ำยางที่ให้การกระจายเป็นละอองฝอยขนาดเล็กละเอียดมากกว่ากรณีอื่น โดยไม่มีการอุดตันของยางในรูหัวฉีด

กรณีศึกษาสถานะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

(1) จากการศึกษาสถานะในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย สำหรับอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำยางเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้อนุภาคยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้ เกาะติดรวมกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งละอองน้ำยางคือ กรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 L/min ความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20 g/min ซึ่งยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากการใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก โดยมีช่วงของขนาดอนุภาคยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษากการผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติ พบว่าผงทัลคัมสามารถใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติได้

(2) จากผลการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง พบว่า ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยผงทัลคัม มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมยึดเกาะติดกันและมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50  $\mu\text{m}$  ถึง 300  $\mu\text{m}$

(3) จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผงที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่ามีปริมาณของผงทัลคัมที่เหลืออยู่ โดยมีปริมาณที่มากขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำยางที่เพิ่มขึ้น และมีความเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติอยู่ที่ประมาณ 200  $^{\circ}\text{C}$

(4) ยางธรรมชาติผง มีค่าความอ่อนตัวเริ่มต้น ( $P_0$ ) มากกว่ายางแห้ง STR 5L แสดงว่ายางธรรมชาติผงเป็นยางที่มีความนิ่มน้อยกว่ายางแห้ง STR 5L และค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI) ของยางธรรมชาติผงมีค่าน้อยกว่ายางแห้ง STR 5L แสดงว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยทัลคัมมีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุลและความต้านทานต่อการออกซิเดชัน (Oxidation) ต่ำกว่ายางแห้ง STR 5L โดยที่ยางธรรมชาติผงเคลือบด้วยทัลคัมมีค่าความหนืดมูนนี้ประมาณ 43.87

(5) จากผลการทดสอบสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง พบว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัมมีความต้านทานต่อแรงดึงและค่าโมดูลัสที่สูงกว่ายางแห้ง STR 5L โดยมีค่าประมาณ 16 และ 2.2 MPa ตามลำดับ ในขณะที่มีค่าความแข็งของยางและระยะยืด ณ จุดขาดของยางมีค่าเท่ากับ 55 และ 580% ตามลำดับ

กรณีศึกษาสถานะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ

(1) จากการศึกษาสถานะต่าง ๆ ในการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการอบคือ กรณีเงื่อนไขอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สเท่ากับ 29 L/min ควบคุมความเร็วทางเข้าห้องอบเท่ากับ 12 m/s และปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำยางเท่ากับ 20, 40 และ

60 g/min โดยให้อุณหภูมิของลมร้อนภายในห้องอบที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ มีการกระจายอุณหภูมิได้ทั่วห้องอบ ทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพและอบแห้งละอองน้ำได้อย่างรวดเร็ว โดยยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากการใช้ซิงค์สเตียเรทเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติ พบว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลมโดยมีผงซิงค์สเตียเรทเคลือบอยู่รอบผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ และไม่เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะมีช่วงของขนาดอนุภาคยางธรรมชาติที่แตกต่างกันออกไป

(2) จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด พบว่าลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคทรงกลมโดยมีลักษณะที่ไม่ยึดเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน ขนาดเล็กและมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 90  $\mu\text{m}$  ถึง 600  $\mu\text{m}$

(3) จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติผงที่เตรียมได้จากการอบแห้งละอองน้ำแบบพ่นฝอย กรณีใช้ซิงค์สเตียเรทเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผง พบว่ามีค่าความเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติประมาณ 200  $^{\circ}\text{C}$

(4) ยางธรรมชาติผงมีค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) เท่ากับ 47.65

(5) จากผลการทดสอบสมบัติทางกลของยางธรรมชาติผง พบว่ายางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยซิงค์สเตียเรท มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าโมดูลัสที่ใกล้เคียงกับกรณีของยางแท่ง STR 5L โดยมีค่าประมาณ 10 และ 0.95 MPa ตามลำดับ ในขณะที่มีค่าความแข็งของยางและระยะยืด ณ จุดขาดของยางมีค่าเท่ากับ 59 และ 755% ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ศึกษาออกแบบเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย อาจมีการเพิ่มปริมาตรของห้องอบแห้งที่กว้างขึ้น เพื่อให้ละอองน้ำสามารถกระจายภายในห้องอบได้อย่างเต็มตัว ทำให้มีพื้นที่ในการอบแห้งละอองน้ำอย่างมากขึ้น อาจส่งผลให้ละอองน้ำแห้งและกลายเป็นยางผงได้อย่างรวดเร็ว

(2) อาจมีการหุ้มฉนวนของห้องอบ เมื่อห้องอบถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน จะทำให้อุณหภูมิภายในห้องอบเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(3) ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับสารเคลือบผิวของอนุภาคยางธรรมชาติชนิดอื่น ที่สามารถใช้เคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติได้ เพื่อลดการเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติและเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

### บรรณานุกรม

- [1] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์, 2526. โพลีเมอร์เชิงพาณิชย์, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- [2] Andrew, J.Y., John, J.D., 1994. Atomization of Melts for powder production and spray deposition, Oxford Series on Advanced Manufacturing, Clarendon press-Oxford.
- [3] Ashgriz, N., 2011. Handbook of atomization and sprays, Springer.
- [4] Aurizon Ultrasonics. On-line. Available from internet, <http://www.aurizonultrasonics.com>, accessed 24 September 2016.
- [5] Pharma Info. On-line. Available from internet, <http://www.pharmainfo.net/>, accessed 25 September 2016
- [6] Niro. On-line. Available from internet, <http://www.niro.com/>, accessed 25 September 2016.
- [7] Patsavas, A.C., 1963. The spray dryer, Chemical Engineering Program, Vol. 59 (4), pp. 65-70.
- [8] Kudra, T., Mujumdar, A.S., 2009. Pulse combustion drying, In Advanced Drying Technologies, 2nd ed., Taylor&Francis, pp. 225-261.
- [9] Zinn, B.T., 1996. Pulse combustion applications: past, present and future, In Unsteady Combustion, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 113-137.
- [10] Abidin, A.Z., Vachlepi, A., 2012. Spray drying process design for the production of natural rubber powder from latex, Indonesian Journal of Chemical Engineering, pp. 132-140
- [11] Sae-Oui, P., Sirisinha, C., Sa-nguanthamarong, P., Thaptong, P., 2010. Properties and recyclability of thermoplastic elastomer prepared from natural rubber powder (NRP) and high density polyethylene (HDPE), Journal of Polymer Testing, Vol. 29, pp. 346-351.
- [12] Sopanon, P., Soottitanawat, P., 2011. Preparation of natural rubber powder by spray drying, TIChE International Conference 2011. November 10–11, Hatyai, Songkhla THAILAND.

- [13] Bitinis, N., Verdejoa, R., Cassagnau, P., Lopez-Manchado, M.A., 2011. Structure and properties of polylactide/natural rubber blends, *Journal of Materials Chemistry and Physics*, Vol. 129, pp. 823-831.
- [14] Powdered/granulated raw natural rubber – types, properties and uses, 1981. *NR Technology*, Vol. 12 Part 3.
- [15] Betega de Paiva, L., Marim de Oliveira, A., Gavioli, R.R., 2014. Preparation and properties of rubber powder from modified-SBR latex by spray drying process, Vol. 264, pp. 507–513.
- [16] Keller, J.O., Barr, P.K., Bramlette, T.T., Evens, L.J., Marchant, R.N., 1989. Pulse combustion: demonstration of the characteristic mixing time in a commercial burner, *Combustion Science and Technology*, Vol. 66, pp. 127-137.
- [17] Keller, J.O., Eibeck, P.A., Bramlette, T.T., Bar, P.K., 1993. Pulse combustion: tailpipe exit jet characteristics, *Combustion Science and Technology*, Vol. 94, pp. 167-192.
- [18] Eibeck, P.A., Keller, J.O., Bramlette, T.T., Sailor, D.J., 1993. Pulse combustion: impinging jet heat transfer enhancement, *Combustion Science and Technology*, Vol. 94, pp. 147-165.
- [19] Patterson, T., Ahrens, F., Stipp, G., 2003. High performance impingement paper drying using pulse combustion technology, *TAPPI Engineering Conference*, Chicago, Illinois.
- [20] Wu, Z.H., Mujumdar, A.S., Liu, X.D., Yang, L., 2006. Pulse combustion impingement to enhance paper drying, *The 15th International Drying Symposium*, Budapest, Hungary.
- [21] Kuts, P.S., Akulich, P.V., Grinchik, N.N., Strumillo, C., Zbicinski, I., Nogotuv, E.F., 2002. Modeling of gas dynamics in a pulse combustor chamber to predict initial drying process parameters, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 86, pp. 25-31.
- [22] Geng, T., Zheng, F., Kiker, A.P., Kuznetsov, A.V., Roberts, W.L., 2007. Experimental and numerical investigation of an 8-cm valveless pulsejet, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, pp. 641-647.
- [23] Kilicarslan, A., Arisoy, A., 2008. Acoustic analysis of a liquefied petroleum gas-fired pulse combustor. *Applied Acoustics*, Vol. 69, pp. 770-777.

- [24] Kudra, T., Mujumdar, A.S., 2010. Advanced drying technologies, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 211–237
- [25] Martin, D.T., Roger, W.R., 1987. Pulse combustion process for the preparation of pregelatinized starches, United States Patent No.4,667,654
- [26] Frederick, A.F., 1980. Spray drying apparatus utilizing pulse jet engines, United States Patent No.4,226,668
- [27] Zinn, B.T., Brady, R.D., 1988. Tunable pulse combustor, United States Patent No. 4,770,626
- [28] Gray, R.R., Marguth, V.M., 1987. Pulse combustion drying apparatus for particulate materials, United States Patent No.4,637,794
- [29] Kitchen, J.A., 1987. Pulse combustion apparatus, United States Patent No. 4,697,358
- [30] Lockwood, Jr. H.N., 1990. Pulse combustion energy system, United States Patent No.4,941,820
- [31] Daisuke, K., Tetsuji, K., Yousuke, S., 2006. Method for producing rubber from rubber latex, United States Patent No.0189732 A1
- [32] ปฐมพร นระระโต, 2557. การศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาคผนวก ก.

ความเป็นมาของการออกแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง

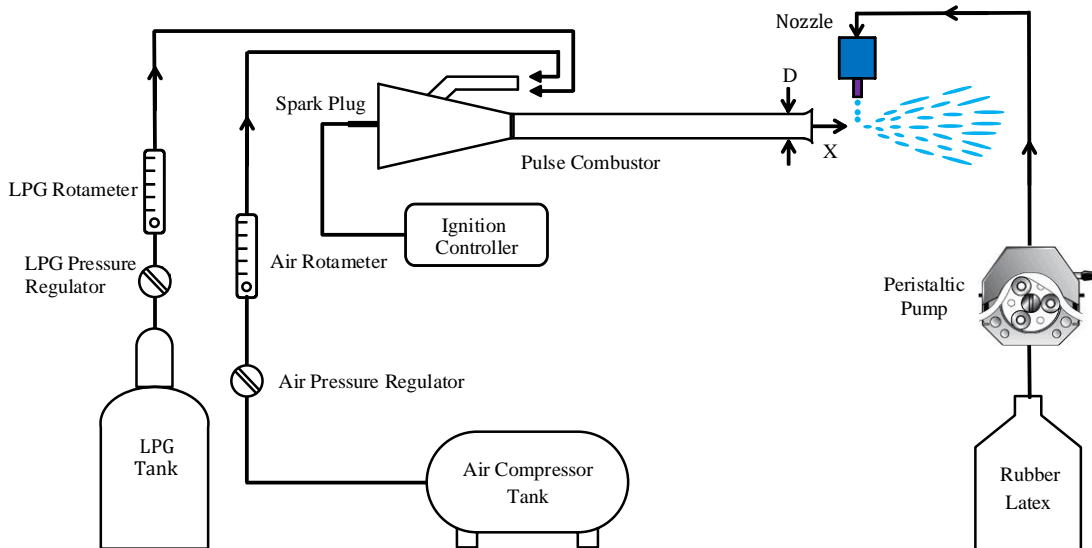
### ก.1 ความเป็นมาของการออกแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง (Spray nozzle)

หัวฉีดที่ใช้ในการทำละอองฝอยแบบทั่วไป เมื่อนำมาใช้ในการฉีดพ่นละอองน้ำยางธรรมชาติ จะพบว่ามึลักษณะการกระจายเป็นละอองฝอยขนาดเล็กละเอียดได้ดี แต่เมื่อทำการฉีดพ่นละอองฝอยจากหัวฉีดในเวลาที่นาน จะพบว่าภายในหัวฉีดจะเกิดการอุดตันของยางในรูหัวฉีด จากนั้นจะไม่สามารถทำละอองฝอยต่อไปได้ ทำให้ต้องหยุดการทำละอองฝอยและเป็นเรื่องยากต่อการทำความสะอาดหรือล้างยางออกจากหัวฉีด



รูปที่ ก.1 หัวฉีดทำละอองฝอยแบบทั่วไป

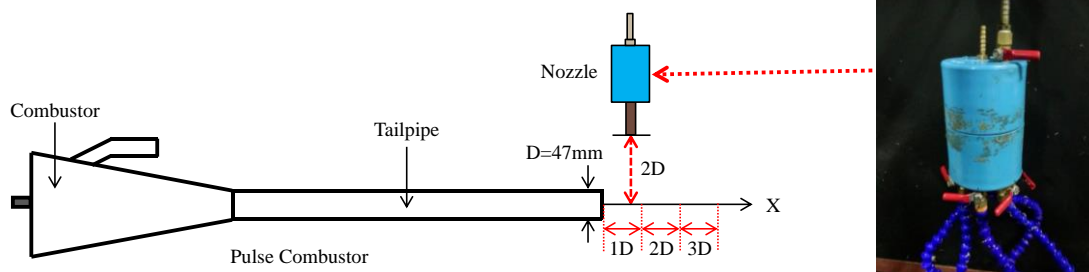
งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดและสนใจที่จะศึกษาพัฒนาหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะที่สร้างละอองน้ำยาง เพื่อไม่ให้ยางเกิดการอุดตันในระบบพ่นฝอยหรือในรูของหัวฉีด โดยในขั้นตอนแรกจะเริ่มศึกษาการแตกตัวของละอองน้ำยางธรรมชาติด้วยเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ จากรูปที่ ก.2 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ชุดสำหรับจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สและแผงควบคุมการจุดระเบิดของวงจร ชุดหัวฉีดและกล้องถ่ายภาพสำหรับบันทึกภาพ โดยในการทดลองจะเริ่มจากป้อนน้ำยางผ่านตัววัดอัตราการไหลแล้วเข้าสู่หัวฉีด จากนั้นเปิดหัวฉีดเพื่อหยดน้ำยางให้ปะทะกับเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ จากนั้นทำการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพ เพื่อดูการแตกตัวของหยดละอองน้ำยาง



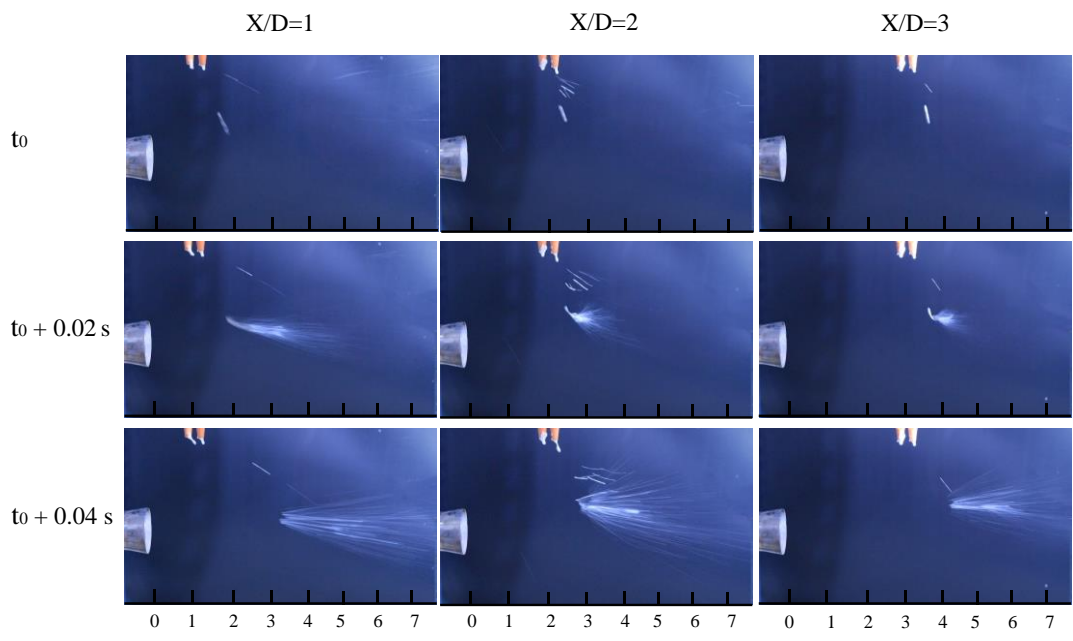
รูปที่ ก.2 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาการแตกตัวของละอองน้ำยางธรรมชาติด้วยเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

รูปที่ ก.3 แสดงโมเดลของห้องเผาไหม้แบบพัลส์และการติดตั้งหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะ โดยจะทำการทดลองที่ตำแหน่งระยะห่างจากปากทางออกท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ( $X/D$ ) เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

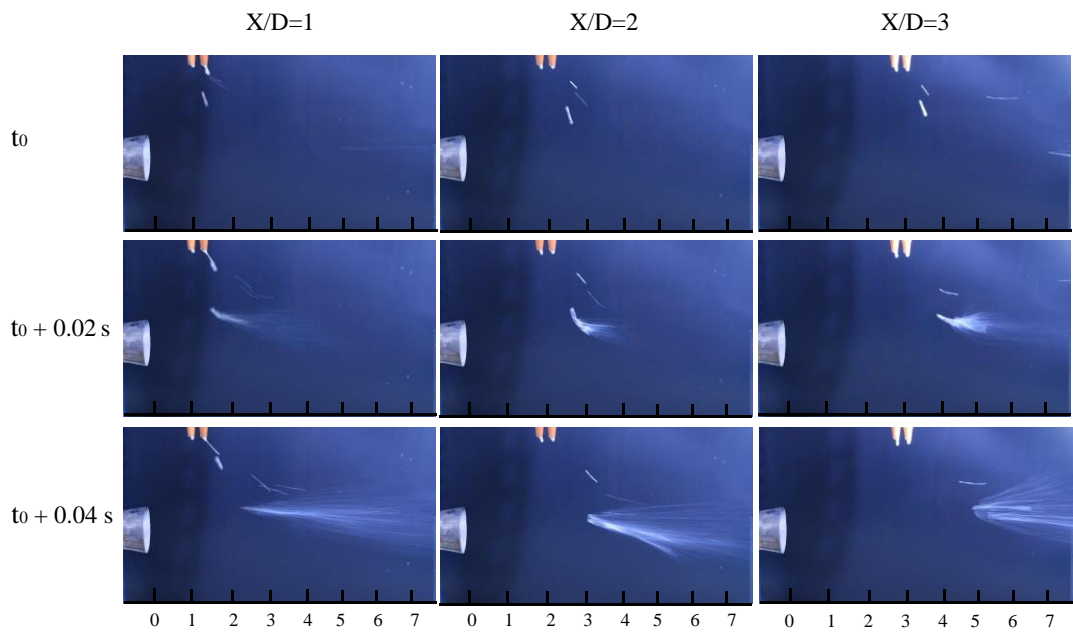
- (1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่ง ( $D$ ) = 47 mm
- (2) ระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง ( $X$ ) = 1D, 2D และ 3D
- (3) อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG = 22.6, 24.3 และ 25.7 l/min
- (4) อัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้าหัวฉีด = 20 g/min



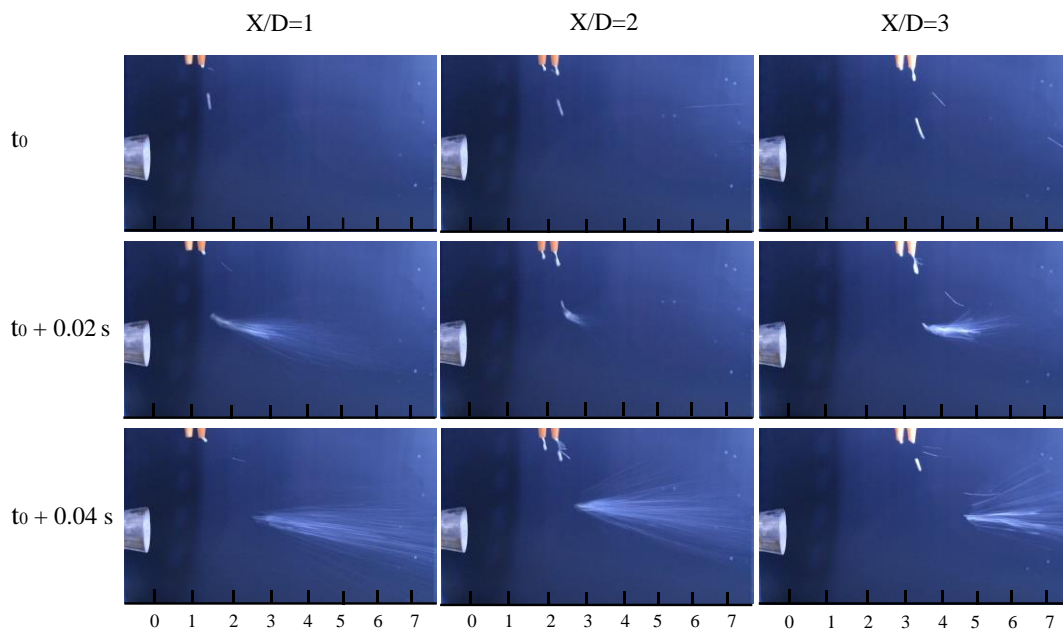
รูปที่ ก.3 โมเดลของห้องเผาไหม้แบบพัลส์และหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะ



รูปที่ ก.4 ผลการแตกตัวของละอองน้ำยางที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของ  
แก๊ส LPG ที่ 22.6 l/min



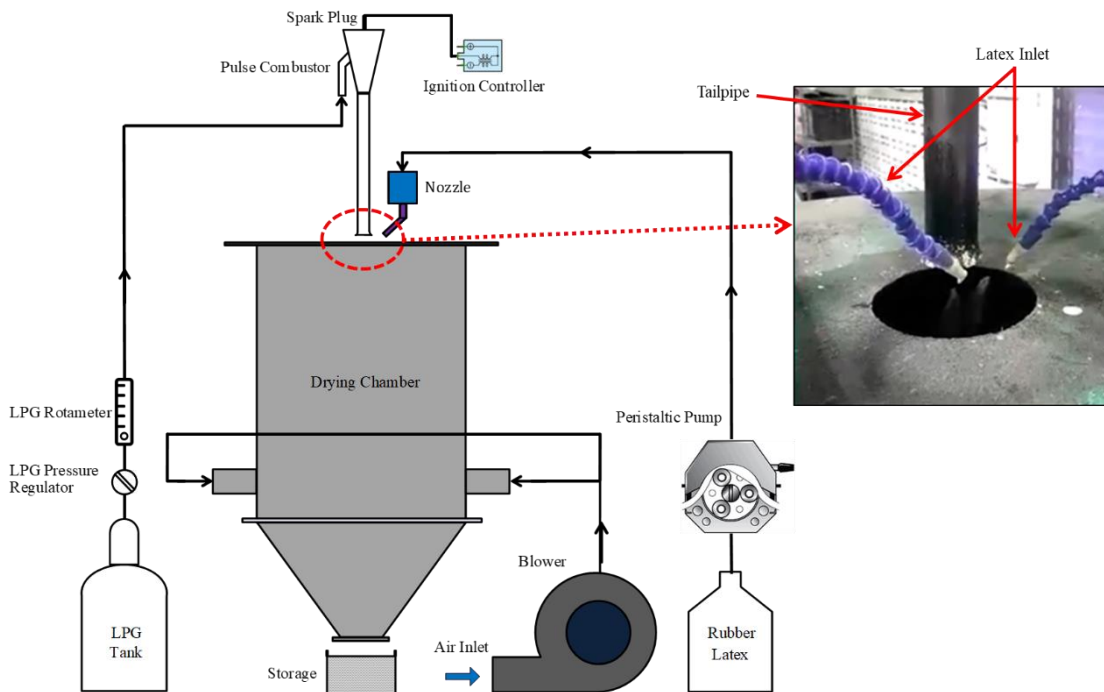
รูปที่ ก.5 ผลการแตกตัวของละอองน้ำยางที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของ  
แก๊ส LPG ที่ 24.3 l/min



รูปที่ ก.6 ผลการแตกตัวของละอองน้ำยางที่ตำแหน่งต่าง ๆ สำหรับกรณีอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของ  
แก๊ส LPG ที่ 25.7 l/min

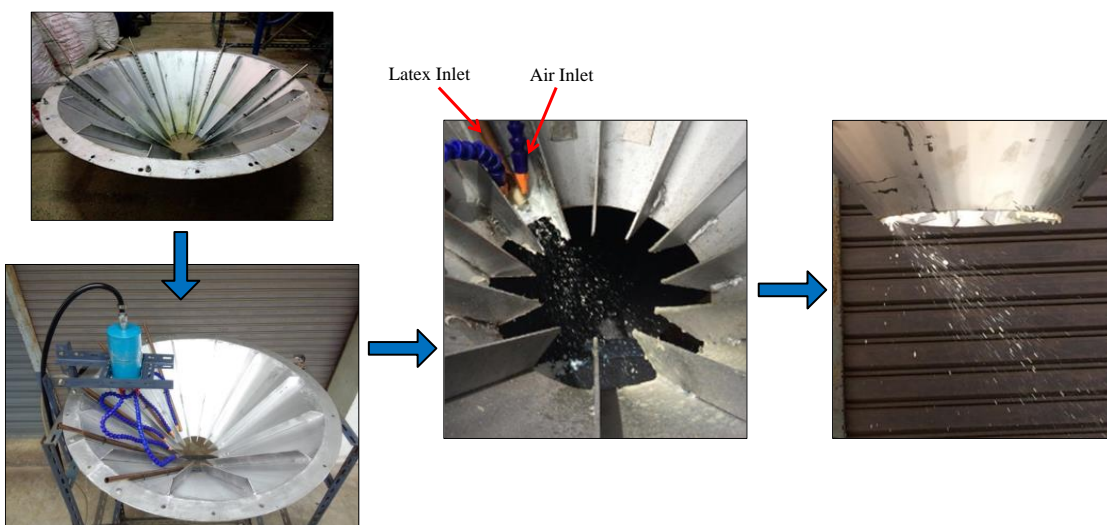
จากการศึกษาการแตกตัวของละอองน้ำยางธรรมชาติด้วยเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ พบว่าตำแหน่งในการหยดละอองน้ำยางธรรมชาติ  $X/D$  มีผลต่อการกระจายของหยดละอองน้ำยาง โดยที่ระยะใกล้กับปากทางออกท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จะกระจายแตกตัวได้ละเอียดกว่าที่ตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากความเร็วของเจ็ทลมร้อนสูง และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงแก๊สที่สูงขึ้น จะเห็นได้ว่าละอองน้ำยางธรรมชาติมีการแตกตัวที่ฟุ้งกระจายมากขึ้น แสดงว่าการเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลทำให้การแตกตัวของหยดน้ำยางรุนแรงขึ้น

เมื่อทำการทดลองอบแห้งละอองน้ำยางด้วยการพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องอบโดยใช้ลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ สำหรับรูปที่ ก.7 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการอบแห้งการแตกตัวของละอองน้ำยางธรรมชาติด้วยเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ สำหรับห้องอบมีท่อทางเข้าอากาศในแนวสัมผัส ทำให้อากาศเกิดการหมุนวนภายในห้องอบ เมื่อละอองหยดน้ำยางปะทะกับเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์แล้วไหลเข้ามาในห้องอบ จากผลการทดลองพบว่าละอองน้ำยางตกลงมาด้านล่างอย่างรวดเร็วและละอองน้ำยางบางส่วนไหลไปเกาะติดกับผนังของห้องอบ ทำให้ละอองน้ำยางไม่สามารถแห้งอย่างรวดเร็วและกลายเป็นยางธรรมชาติผงได้



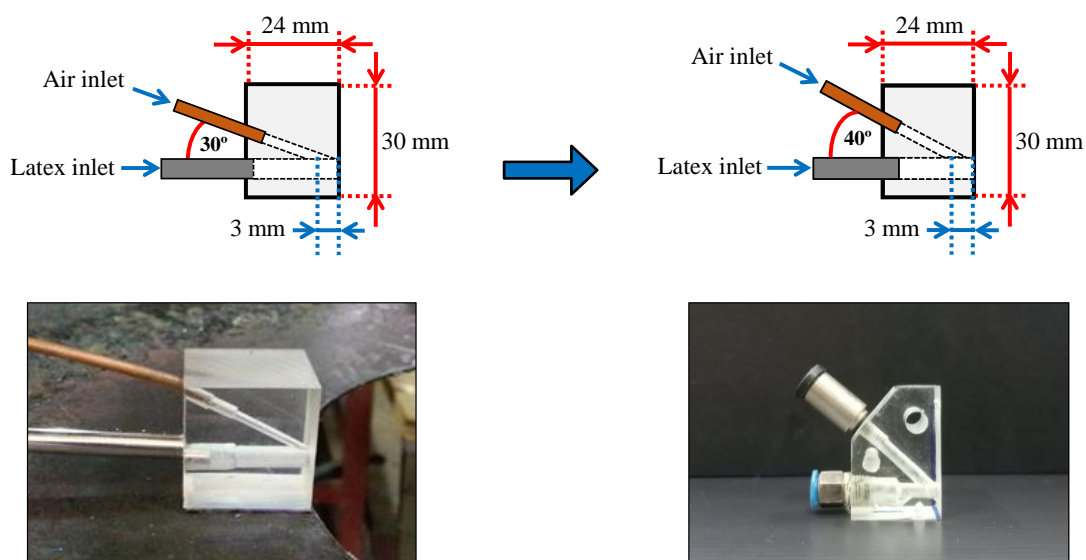
รูปที่ ก.7 ชุดทดลองที่ใช้ในอบแห้งการแตกตัวของละอองน้ำยางธรรมชาติด้วยเจ็ทลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

จากนั้นได้เปลี่ยนระบบหัวฉีดพ่นละอองน้ำยางมาเป็นแบบรางท่อ โดยมีท่อน้ำยางและท่ออากาศที่แยกออกจากกันดังแสดงในรูปที่ ก.8 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าละอองน้ำยางมีหยดของน้ำยางที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งละอองน้ำยางอย่างรวดเร็ว



รูปที่ ก.8 ระบบหัวฉีดพ่นละอองน้ำยางที่มีท่อน้ำยางและท่อจ่ายอากาศแยกออกจากกัน

สำหรับรูปที่ ก.9 แสดงรูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยงที่มีท่อทางเข้าน้ำยงและท่อทางเข้าอากาศร่วมกัน โดยหัวฉีดทำจากวัสดุอะคริลิก (Acrylic) ในหัวฉีดจะประกอบด้วย ท่อทางเข้าน้ำยงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm และท่อทางเข้าอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm โดยจะออกแบบหัวฉีดให้สามารถสร้างละอองน้ำยงที่มีขนาดเล็กและไม่เกิดการอุดตันในรูของหัวฉีด ซึ่งในขั้นตอนแรก ได้ออกแบบหัวฉีดโดยให้ท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยง 30 องศา จากการทดสอบพบว่า เมื่อพ่นละอองน้ำยงจากหัวฉีดมุม 30 องศา จะทำให้ละอองน้ำยงส่วนหนึ่งปะทะกับลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ และมีละอองน้ำยงบางส่วนถูกพ่นจากหัวฉีดไหลไปปะทะและเกาะติดกับผนังของห้องอบ จึงทำให้หัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยง 30 องศา เป็นมุมหัวฉีดที่ไม่เหมาะสมสำหรับการพ่นละอองน้ำยง หลังจากนั้นได้ทำการเปลี่ยนมาเป็นหัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยง 40 องศา จากผลการทดลองพ่นละอองน้ำยงจากหัวฉีดมุม 40 องศา พบว่าละอองน้ำยงไหลเข้ามาปะทะกับลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ภายในห้องอบ ทำให้ละอองน้ำยงตกลงมาตรงกึ่งกลางของห้องอบได้อย่างพอดี โดยละอองน้ำยงที่พ่นจากหัวฉีดที่มีท่อทางเข้าอากาศทำมุมกับท่อทางเข้าน้ำยง 40 องศา ไม่ไหลไปเกาะติดกับผนังของห้องอบและมีลักษณะการกระจายเป็นละอองฝอยขนาดเล็กละเอียดได้ดี



รูปที่ ก.9 รูปแบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยงที่มีท่อทางเข้าน้ำยงและท่อทางเข้าอากาศร่วมกัน

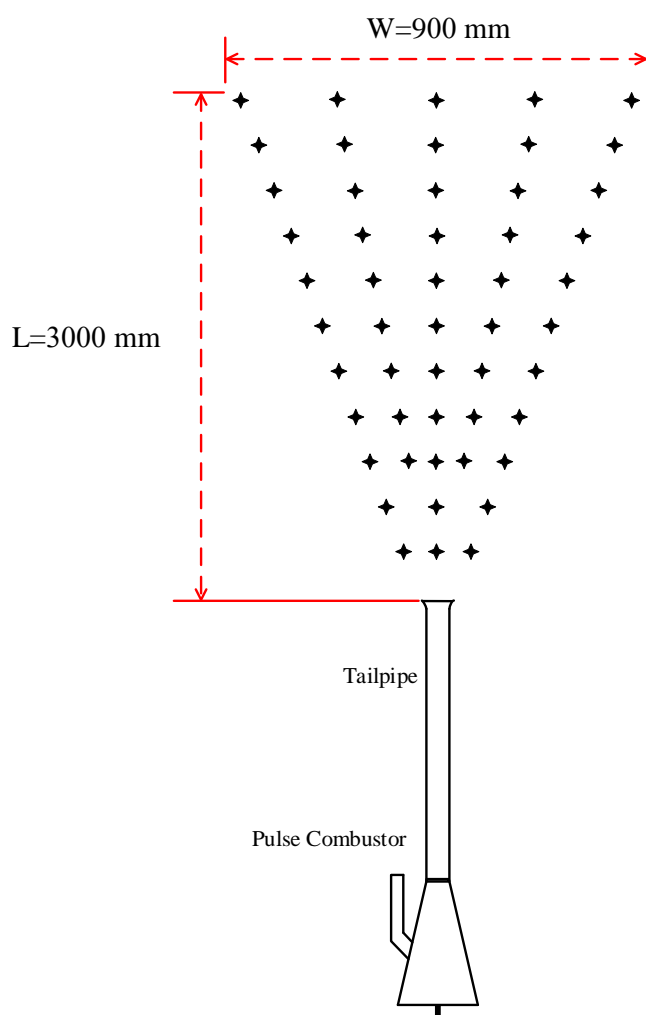
ภาคผนวก ข.

ความเป็นมาของการออกแบบและพัฒนาห้องอบ



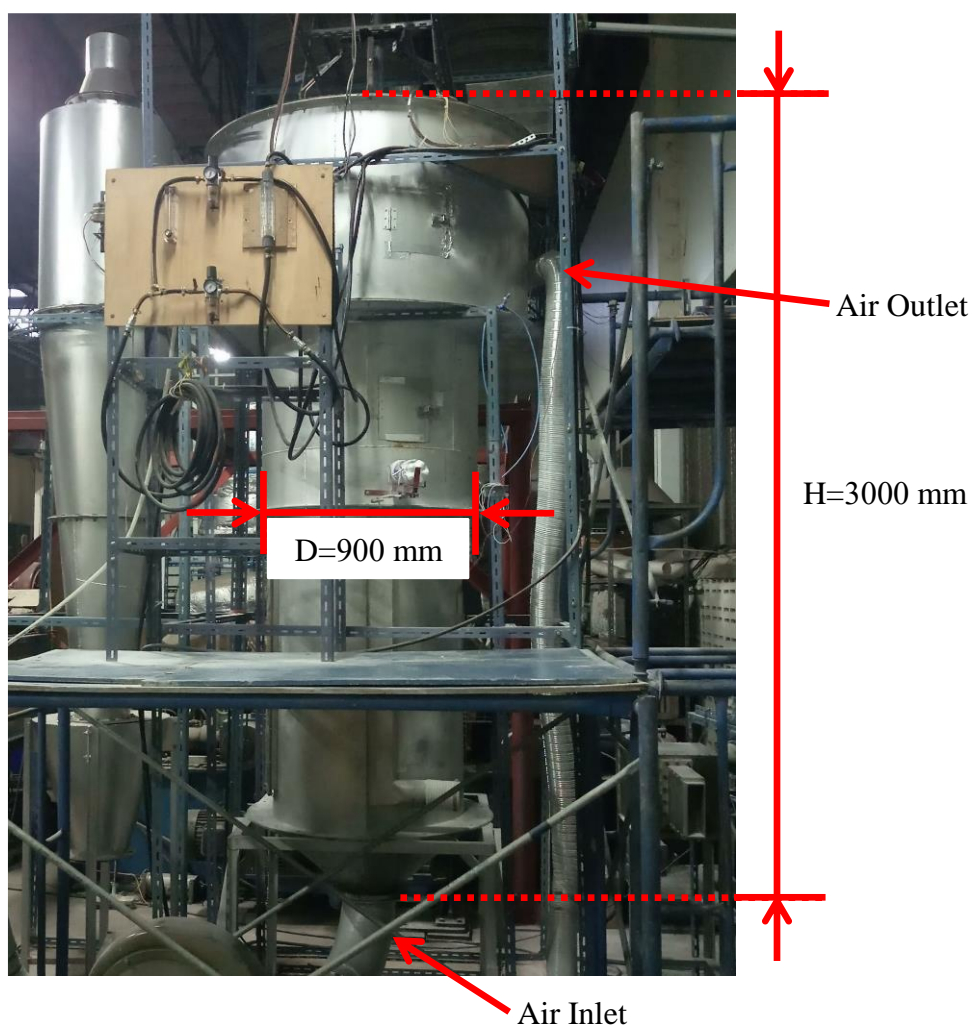
### ข.1 ความเป็นมาของการออกแบบและพัฒนาห้องอบ (Drying chamber)

สำหรับในส่วนของการออกแบบห้องอบแห้งละอองน้ำยาง โดยในขั้นตอนแรกจะทำการวัดตำแหน่งการกระจายของลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) จากรูปที่ ข.1 แสดงผลจากการวัดการกระจายของลมร้อนที่ระยะห่างจากปากทางออกท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งที่ระยะไกลสุด มีการกระจายของลมร้อนอยู่ที่ระยะความสูง (L) เท่ากับ 3000 mm ( $L=3\text{ m}$ ) และมีความกว้างของการกระจายลมร้อน (W) เท่ากับ 900 mm ( $W=0.9\text{ m}$ )



รูปที่ ข.1 ตำแหน่งการกระจายของลมร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

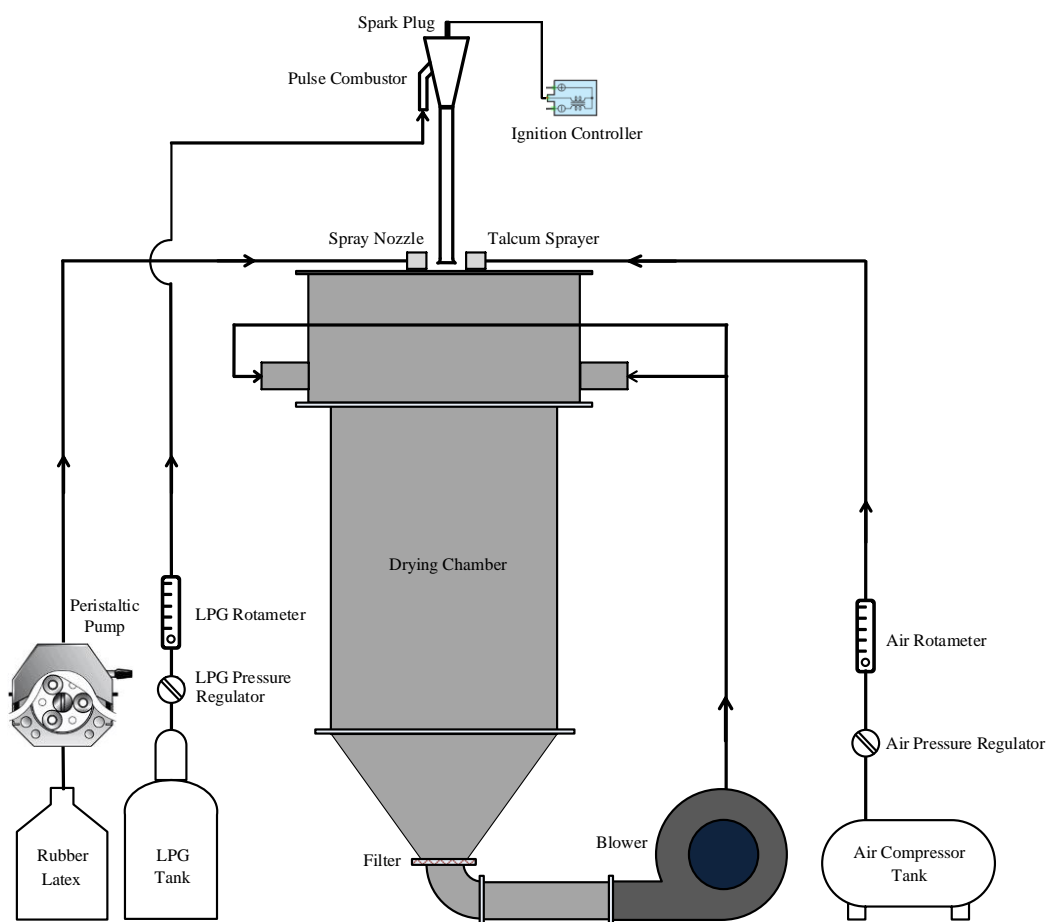
หลังจากทำการวัดการกระจายของลมร้อนที่ระยะห่างจากปากทางออกท่อส่งของห้องเผาไหม้แบบพัลส์จนได้ตำแหน่งของการกระจายลมร้อนที่ถูกต้องแล้ว จากนั้นจะออกแบบและสร้างห้องอบสำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้งละอองน้ำแบบพ่นฝอยดังแสดงในรูปที่ ข.2 สำหรับรายละเอียดของห้องอบ (Drying chamber) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 900 mm มีความสูง (H) เท่ากับ 3000 mm ทำจากเหล็กแผ่นหนา 2 mm โดยท่อทางเข้าของห้องอบจะอยู่บริเวณด้านล่างของห้องอบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 mm โดยในส่วนทางด้านข้างห้องอบจะมีท่อทางออกอากาศ 1 ท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm



รูปที่ ข.2 ห้องอบ

หลังจากออกแบบและสร้างห้องอบสำหรับใช้ในกระบวนการอบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอยเสร็จแล้ว จากนั้นจะทำการประกอบชุดทดลองและต่อเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับระบบ โดยในขั้นตอนแรกจะเริ่มทำการทดลองโดยใช้ชุดทดลองดังแสดงแผนภาพในรูปที่ ข.3 สำหรับรายละเอียดของชุดทดลองจะประกอบด้วย ห้องอบ ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เป็นเครื่องให้ความร้อนแก่ระบบ ระบบหัวฉีดสร้างละอองน้ำยาง และระบบเคลื่อนผิวยางธรรมชาติผิง

รูปที่ ข.4 แสดงการติดตั้งชุดทดลองที่ใช้อบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย สำหรับห้องอบ จะมีช่องทางเข้าของห้องอบอยู่บริเวณด้านบนบนของห้องอบ เป็นช่องทางเข้าห้องอบแบบ 2 ท่อ โดยอากาศจากพัดลมโบลเวอร์จะไหลเข้ามาในแนวสัมผัส เพื่อบังคับให้ลมร้อนเกิดการไหลแบบหมุนวนภายในห้องอบ จากนั้นลมร้อนจะไหลออกทางท่อด้านล่างของห้องอบและลมร้อนจะไหลเวียนกลับเข้ามายังพัดลมโบลเวอร์อีกครั้ง จากการทดลองพบว่าละอองน้ำยางไม่สามารถแห้งและกลายเป็นยางธรรมชาติผิงได้ โดยละอองน้ำยางจะไปปะทะและเกาะติดกับผนังของห้องอบจนกลายเป็นชั้นของยางที่มีความหนาขึ้นเรื่อย ๆ และระบบนี้ไม่สามารถแยกยางธรรมชาติผิงออกจากลมร้อนได้

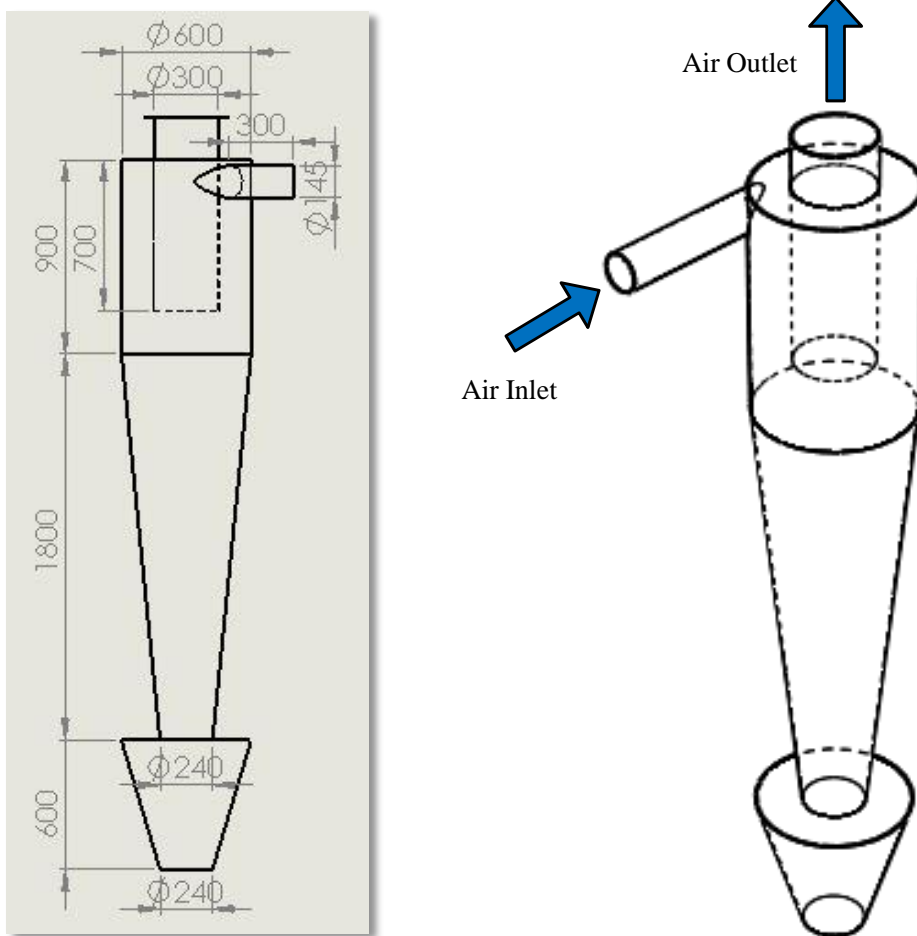


รูปที่ ข.3 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้อบแห้งละอองน้ำยางแบบพ่นฝอย



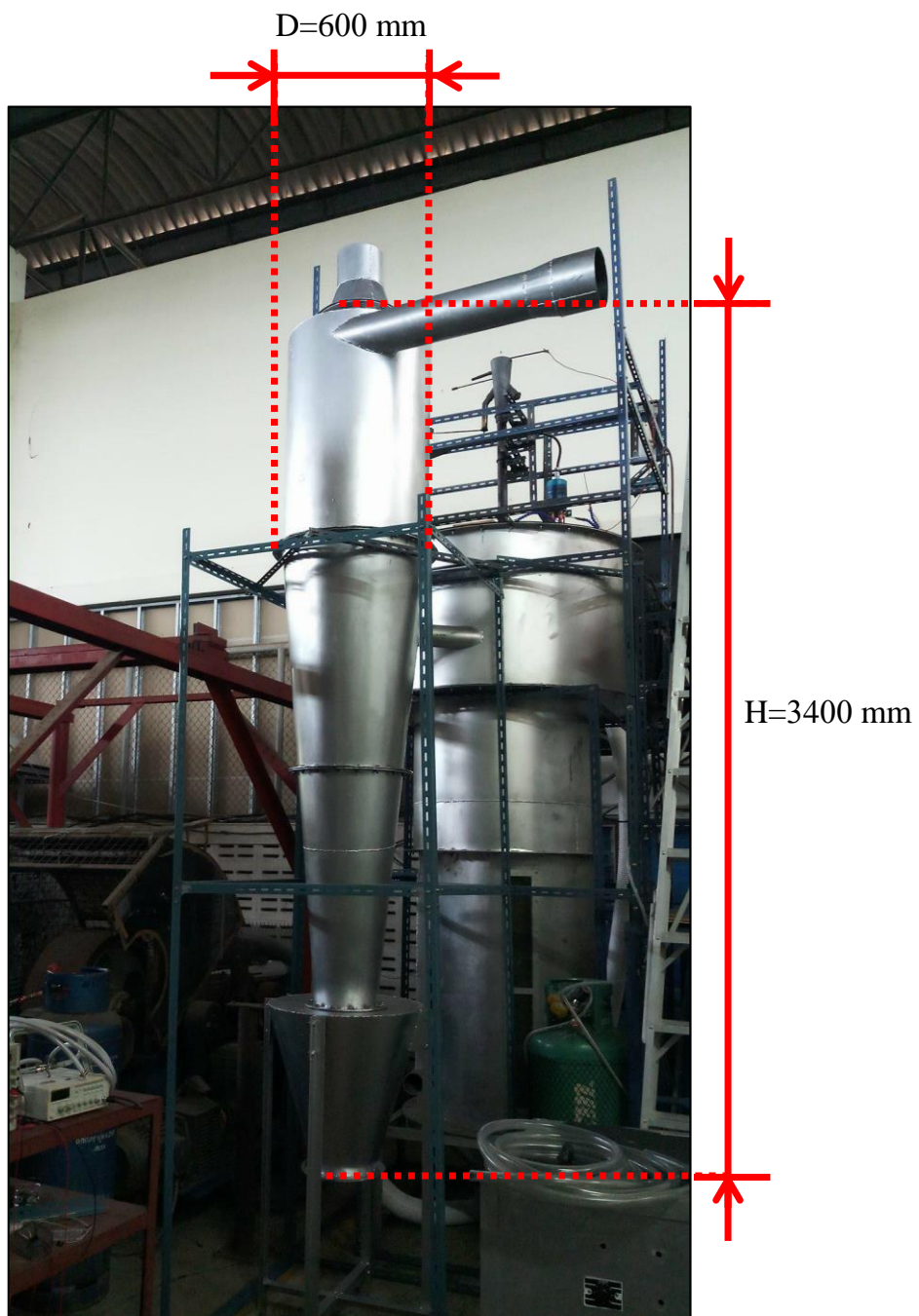
รูปที่ ข.4 การติดตั้งชุดทดลองที่ใช้บ่อบำบัดน้ำแบบพ่นฝอย

จากนั้นได้เปลี่ยนมาเป็นระบบอบแห้งละอองน้ำยางโดยเป็นระบบที่ใช้ห้องอบร่วมกับระบบไซโคลนสำหรับแยกอนุภาคของยางธรรมชาติผงออกจากลมร้อน สำหรับรูปที่ ข.5 แสดงการออกแบบโมเดลและขนาดของไซโคลน โดยท่อทางเข้าของไซโคลนจะอยู่ที่ด้านบน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 145 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออกไซโคลนเท่ากับ 300 mm



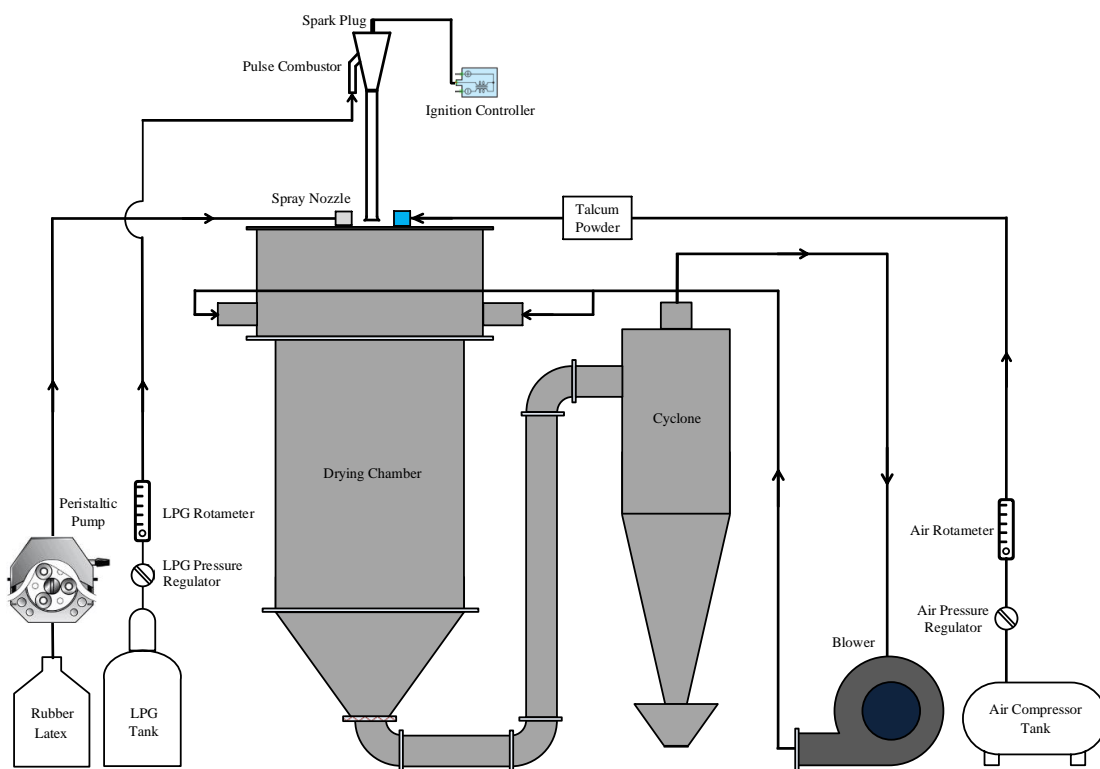
รูปที่ ข.5 โมเดลและขนาดของไซโคลน





รูปที่ ข.6 ไชโคลน

จากรูปที่ ข.7 แสดงแผนภาพชุดทดลองที่มีห้องอบต่อเข้ากับไซโคลนสำหรับแยกอนุภาคของยางธรรมชาติผงออกจากลมร้อน โดยคาดว่าเมื่อลมร้อนและอนุภาคยางธรรมชาติผงไหลเข้ามาในไซโคลน จะเกิดแรงเหวี่ยงกระทำต่ออนุภาคยางแล้วเคลื่อนที่หมุนวนเป็นเกลียว โดยแรงหนีศูนย์กลางจะเหวี่ยงอนุภาคยางไปยังผนังด้านในของไซโคลนแล้วทำให้อนุภาคยางธรรมชาติผงตกลงด้านล่างของไซโคลนด้วยแรงโน้มถ่วง จากนั้นลมร้อนจะไหลออกทางด้านบนไซโคลนและไหลเวียนกลับมายังพัดลมโบเวอร์อีกครั้ง จากการทดลองพบว่าละอองน้ำยางไม่สามารถแห้งเป็นยางธรรมชาติผงได้ และเมื่อขณะทดลองอบแห้ง ละอองน้ำยางจะไหลวนไปปะทะและเกาะติดกับผนังของห้องอบ และพบอีกว่าระบบอบแห้งละอองน้ำยางนี้ไม่สามารถแยกยางธรรมชาติผงออกจากผงแป้งทัลคัมที่ใช้เป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผงและไม่สามารถแยกผลิตภัณฑ์ออกจากลมร้อนได้



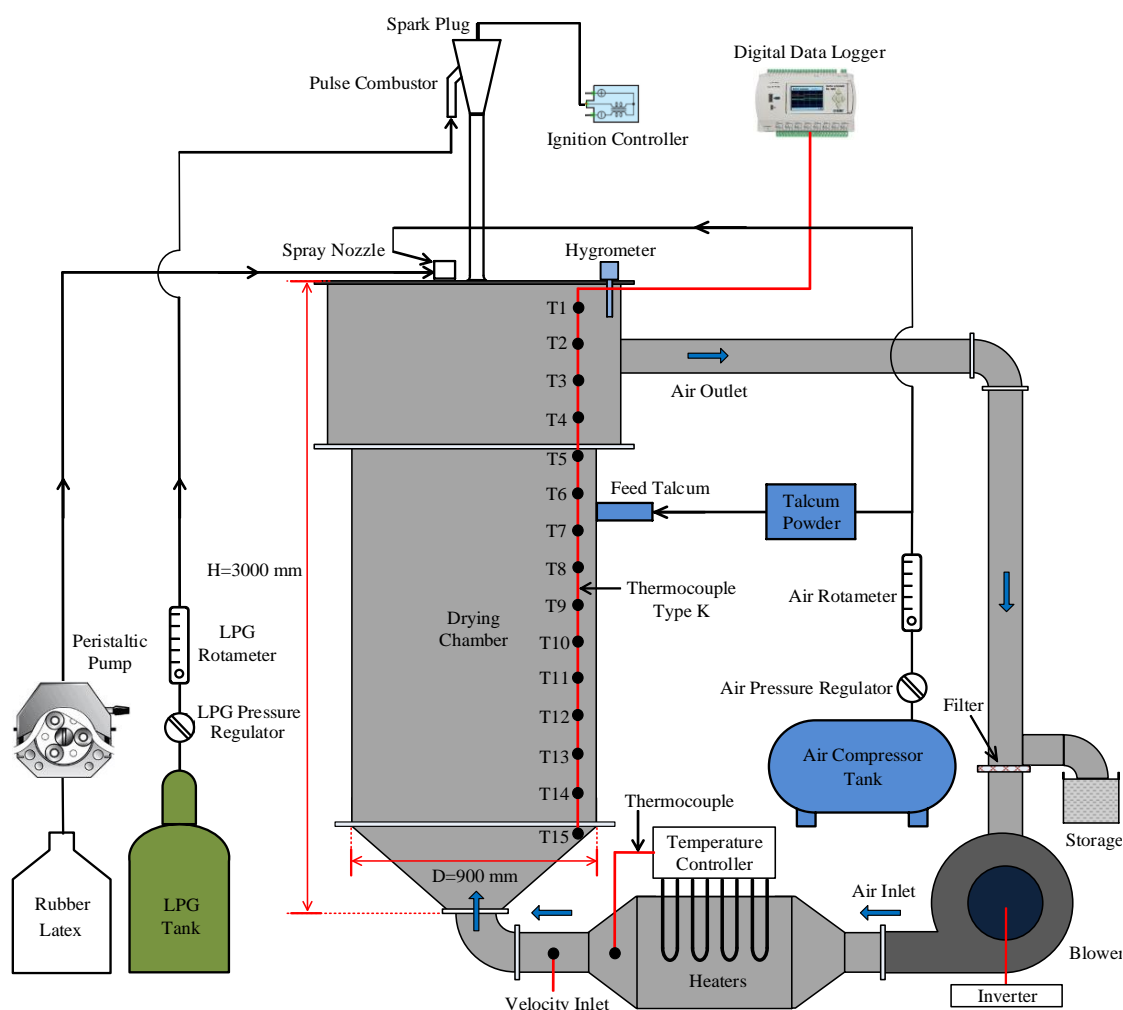
รูปที่ ข.7 แผนภาพชุดทดลองที่มีห้องอบต่อเข้ากับไซโคลน



รูปที่ ข.8 การติดตั้งชุดทดลองที่มีห้องอบต่อเข้ากับไซโคลน



จากนั้นได้เปลี่ยนมาเป็นระบบอบแห้งโดยใช้ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เป็นเครื่องให้ความร้อนแก่ระบบร่วมกับชุดฮีเตอร์ สำหรับในรูปที่ ข.9 แสดงแผนภาพของชุดทดลอง สำหรับการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือ ห้องอบ ห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่เป็นเครื่องให้ความร้อนแก่ระบบ พัดลมโบลเวอร์ ชุดฮีเตอร์ ที่สำหรับกักเก็บยางธรรมชาติผง หัวฉีดสร้างละอองน้ำยางและกระบอกฉีดผงแป้งทalcum สำหรับระบบนี้สามารถผลิตยางธรรมชาติผงได้สำเร็จและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้



รูปที่ ข.9 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย



รูปที่ ข.10 ชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาสถานะต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ภาคผนวก ค.

บทความสำหรับเผยแพร่ 1

การศึกษาการแตกตัวเป็นละอองของยางธรรมชาติด้วยเจลลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

# การศึกษาการแตกตัวเป็นละอองของยางธรรมชาติด้วยเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์

## A STUDY OF ATOMIZATION OF NATURAL RUBBER BY JET FROM THE PULSE COMBUSTOR

ณัฐวุฒิ หัสนะชัย  
วิริยะ ทองเรือง  
ชยุดันันทุลิต

สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงานและภาคีวิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่จ.สงขลา90112  
โทรศัพท์ 074-287-035  
โทรสาร 074-212-893  
E-mail:chayut@me.psu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลของการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทความร้อน การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้และตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยห้องเผาไหม้ที่ใช้เป็นห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ชนิดไร้วาล์ว ที่มีท่อทางเข้าอากาศทางเดียว ในการทดลองใช้เจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ปะทะกับหยดน้ำยางให้แตกกระจายเป็นละอองฝอย ในการทดลองจะกำหนดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่  $Q_{LPG} = 25.7, 24.3$  และ  $22.6$  ลิตรต่อนาที และกำหนดตำแหน่งที่ศึกษาห่างจากปากทางออกท่อส่ง  $X = 1d, 2d$  และ  $3d$  โดยที่  $d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเจ็ท จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลให้อุณหภูมิและความดันของแก๊สร้อนเพิ่มสูงขึ้น และที่ตำแหน่งในการป้อนน้ำยาง ( $X$ ) มีผลต่อการแตกตัวเป็นละอองของหยดน้ำยาง ที่ระยะใกล้จะกระจายแตกตัวละเอียดกว่า เนื่องจากความเร็วสูง และการเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลให้การแตกตัวของหยดน้ำยางรุนแรงขึ้น

คำสำคัญ: ห้องเผาไหม้แบบพัลส์, เจ็ท, การพ่นฝอย, น้ำยางธรรมชาติ

### Abstract

This research presented average temperature of the hot gas jet, pressure variation in the pulse combustor near tailpipe outlet. The combustion chamber is valveless type Helmholtz combustor having single tailpipe. The jet from pulse jet combustor impinged on the rubber latex drop for atomization. In this experiment, LPG flow rate was fixed at  $Q_{LPG} = 25.7, 24.3$  and  $22.6$  liters per minute and the location of study was fixed at position from the tailpipe  $X = 1d, 2d$  and  $3d$  where  $d$  was the jet diameter. The experiment results demonstrated that adding the flow rate of LPG has resulted to increase the gas temperature. The position to put rubber latex drop  $X$  affected to atomization of the rubber latex droplets that nearly to breakdown will spread over more particle due to high speed and increasing of LPG flow rate has resulted to the rubber latex dropped more intense.

**Keywords:** Pulse combustor, Jet, Atomizer, Natural rubber latex

### 1. บทนำ

ในระบบการทำละอองฝอยแบบทั่วไป ใช้หลักการทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่มีขนาดเล็ก การทำให้แตกตัวเป็นละอองจำเป็นต้องใช้แรงจากภายนอกมากระทำต่อของเหลว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้หัวฉีดพ่นฝอยผ่านกระบอกฉีดแบบความดัน (Pressurized nozzle) [1] โดยจะใช้ความดันอัดของเหลวเข้าในแนวสัมผัสทำให้เกิดการไหลเหวี่ยงก่อนที่จะไหลผ่านรูขนาดเล็ก (Orifice) ของเหลวที่ออกจากหัวฉีดจะมีลักษณะเป็นแผ่นรูปกรวย ก่อนที่จะแตกตัวเป็นหยดของของเหลวขนาดเล็กอย่างไรก็ตามในปัจจุบัน การใช้หัวฉีดแบบพ่นฝอยยังมีปัญหาการติดอุดตันของน้ำยางในระบบพ่นฝอย ตลอดจนการเกาะและไหลติดกันของน้ำยาง

การแตกตัวเป็นละอองโดยอาศัยการชนกันของเจ็ท เทคนิคนี้ใช้เจ็ทของเหลวที่มีความเร็วสูงไหลปะทะกันโดยตรง การชนกันของลำเจ็ททำให้เกิดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของของเหลว และเกิดการฉีกขาดเป็นละอองในที่สุด [2]

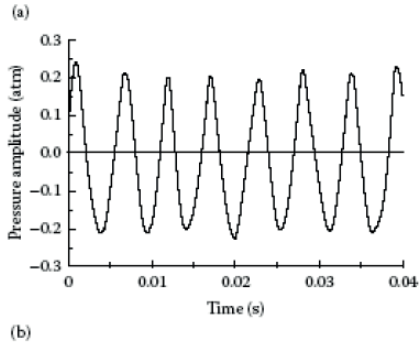
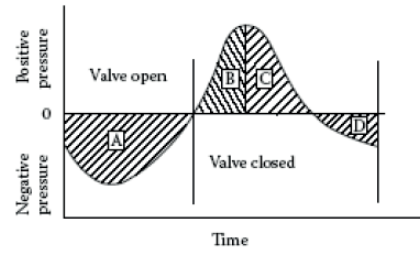
งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะใช้เจ็ทความร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่มีสมบัติเหมือนคลื่นกระแทกปะทะกับหยดหรือฟิล์มของน้ำยางให้แตกกระจายเป็นละอองฝอย แล้วไหลไปกับกระแสลมร้อนแบบพัลส์ จนหยดน้ำยางแตกตัวเป็นละอองฝอย ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดปัญหาอุดตันในระบบพ่นฝอยแบบเดิม และการสั่นของกระแสลมร้อนจะช่วยเพิ่มความสามารถในการแตกตัวกระจายของน้ำยางได้ดี

## 2. หลักการทำงานของระบบ

### 2.1 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์

รูปที่ 1 แสดงการทำงานของห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz แบบมีวาล์ว ซึ่งมีความซับซ้อนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาไหม้แบบเป็นจังหวะ และการส่งผ่านคลื่นเสียงจากห้องเผาไหม้ไปยังท่อส่ง กระบวนการเผาไหม้จะเริ่มจากอากาศและเชื้อเพลิงแก๊สหรือละอองเชื้อเพลิงของเหลว ถูกพ่นเข้าไปผสมกันในห้องเผาไหม้ แล้วถูกจุดระเบิดด้วยหัวเทียน (Spark plug) ทำให้เกิดการเผาไหม้แบบระเบิดในห้องเผาไหม้ ในจังหวะนี้ทางเข้าของอากาศและเชื้อเพลิงจะถูกปิดโดยวาล์วหรือด้วยความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ และแรงดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้จะดันให้แก๊สไอเสียไหลออกผ่านท่อส่งออกไปภายนอก การไหลออกของแก๊สไอเสียจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ความดันภายในห้องเผาไหม้สูงกว่าความดันตกที่เกิดขึ้นจากการไหลผ่านท่อส่ง จนกระทั่งความดันภายในห้องเผาไหม้ลดลงต่ำสุด วาล์วอากาศและเชื้อเพลิงจะเปิดอีกครั้งทำให้อากาศและเชื้อเพลิงใหม่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้อีกครั้ง โดยการจุดติดไฟครั้งใหม่จะเกิดขึ้นเองอีกโดยไม่ต้องใช้หัวเทียน การจุดติดไฟจะเกิดโดยแก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับมายังห้องเผาไหม้ในจังหวะที่ความดันในห้องเผาไหม้ต่ำสุด วัฏจักรการเผาไหม้จะเกิดซ้ำเองด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้และท่อส่ง สัดส่วนการเผาไหม้ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ชนิดของวาล์วเปิดปิดของอากาศและเชื้อเพลิง

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ โดยที่ในรูป (a) บริเวณ A เป็นช่วงที่อากาศและเชื้อเพลิงไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ B เป็นช่วงที่เชื้อเพลิงใหม่จุดติดเกิดความร้อนทำให้ความดันภายในห้องเผาไหม้สูง อากาศและเชื้อเพลิงหยุดไหลเข้าห้องเผาไหม้ บริเวณ C เป็นช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสมบูรณ์ แก๊สไอเสียไหลออกทางท่อส่ง ความดันในห้องเผาไหม้ลดลง บริเวณ D เป็นช่วงที่โมเมนตัมของแก๊สไอเสียที่ปล่อยออกสร้างความดันติดลบภายในห้องเผาไหม้



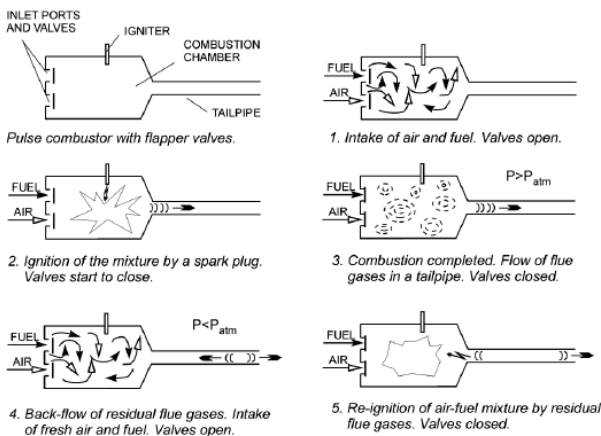
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในห้องเผาไหม้

(a) ผลทางทฤษฎี (b) ผลการทดลอง [3]

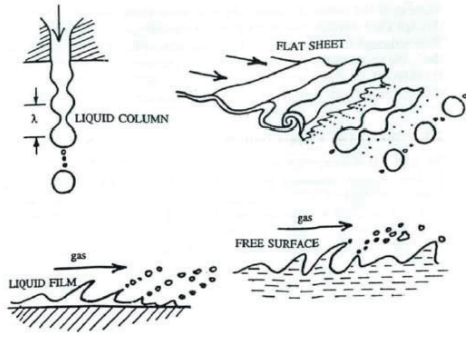
สำหรับเงื่อนไขที่ทำให้ระบบเผาไหม้แบบพัลส์เข้าสู่สภาวะคงตัวจะเป็นไปตาม Rayleigh criterion คือ ผลต่างเฟสระหว่างการสั่นของความดันและการปลดปล่อยความร้อนในห้องเผาไหม้จะต้องน้อยกว่า  $1/4$  ของคาบในวัฏจักร [4] โดยที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับการไหลและอัตราการผสมของอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบห้องเผาไหม้ การจุดระเบิดของอากาศผสมเชื้อเพลิงโดยหัวเทียนจะทำเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มวัฏจักร หลังจากนั้นการจุดระเบิดจะเกิดขึ้นเองเมื่อการทำงานของระบบเสถียร นอกจากนี้ พัดลมที่ใช้ในช่วงแรกสำหรับเริ่มเดินระบบก็ไม่ต้องใช้หลังจากที่เดินระบบได้แล้ว เนื่องจากอากาศจะถูกดูดเข้าสู่ระบบโดยอัตโนมัติ

### 2.2 หลักการแตกตัวเป็นละอองฝอย

การแตกตัวเป็นละออง ใช้หลักการทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นหยดหรือละอองที่มีขนาดเล็กมาก การทำให้แตกตัวเป็นละอองจำเป็นต้องใช้แรงจากภายนอกกระทำต่อของเหลว ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ แรงกระแทกจากแก๊สที่มีความเร็วสูง แรงจากการหมุนเหวี่ยง แรงที่เกิดจากผลต่างระหว่างความดันในของเหลวกับบริเวณรอบๆ โดยแรงจากภายนอกมีผลทำให้ลำของเหลวไม่เสถียรและแตกตัวด้วยกลไกต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 เช่น การแตกตัวของลำของเหลวที่ไหลจากรู (Orifice) ในแนวตั้ง เกิดจากแรงของหน้าหนัของเหลวและแรงตึงผิว การแตกตัวของเจ็ทของเหลวที่เป็นแผ่นบาง เกิดจากความเค้นเฉือนระหว่างแผ่นเจ็ทกับอากาศที่อยู่รอบๆ ทำให้ผิวเรียบของแผ่นเจ็ทเกิดการก่อตัวเป็นคลื่นที่ไม่เสถียร จนเกิดการแตกตัวเป็นละอองที่ละเอียด การแตกตัวของแผ่นฟิล์มของเหลวบนผิวที่มีแก๊สความเร็วสูงไหลผ่าน แก๊สความเร็วสูงจะเฉือนฟิล์มของเหลวที่อยู่บนผนังให้ขาดเป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนที่ของเหลวจะรวมตัวเป็นละอองอีกครั้งด้วยแรงตึงผิว มีลักษณะเช่นเดียวกับแก๊สความเร็วสูงไหลผ่านผิวของเหลว

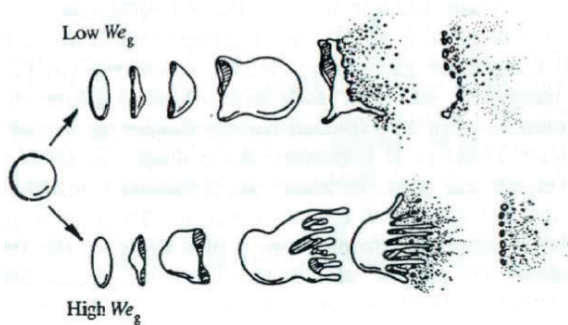


รูปที่ 1 หลักการทำงานของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ [3]



รูปที่ 3 รูปแบบการแตกตัวเป็นละออง [5]

อย่างไรก็ตาม ในการแตกตัวเป็นละอองนั้นจะต้องมีพลังงานจำนวนมากเพื่อเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวที่ต้านการเปลี่ยนรูปร่างเป็นเส้นเล็กๆหรือฟิล์มบางๆก่อนที่จะฉีกขาดเป็นละออง และการแตกตัวเป็นละอองนั้นจึงมีค่าขึ้นกับความหนืด ความตึงผิวของเหลวของเหลวที่แตกตัวเป็นละอองหรือหยดของเหลวขนาดเล็ก หากยังมีแรงที่กระทำบนหยดของเหลวอยู่ จะทำให้หยดของเหลวเกิดการแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็กอีก ดังแสดงในรูปที่ 4 หยดของเหลวที่ถูกแรงกระทำจะเปลี่ยนแปลงเป็นรูปร่างแบนและรูปร่างแบบตุ่ง (คล้ายแมงกะพรุน) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนสุดท้ายทนแรงที่กระทำไม่ไหว แตกตัวเป็นละอองขนาดเล็ก ของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำกว่าจะแตกตัวเป็นละอองได้เร็วกว่า



รูปที่ 4 ลักษณะการแตกตัวอันดับที่ 2 ของหยดของเหลวกรณีของเหลวมีแรงตึงผิวต่ำและสูง [5]

### 3. ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1 ชุดทดลองและโมเดลที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 5 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ชุดจ่ายเชื้อเพลิงและชุดจุดเดินเครื่อง ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ความดันในห้องเผาไหม้และความดันที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของท่อส่ง ชุดหัวฉีดและกล้องถ่ายรูป

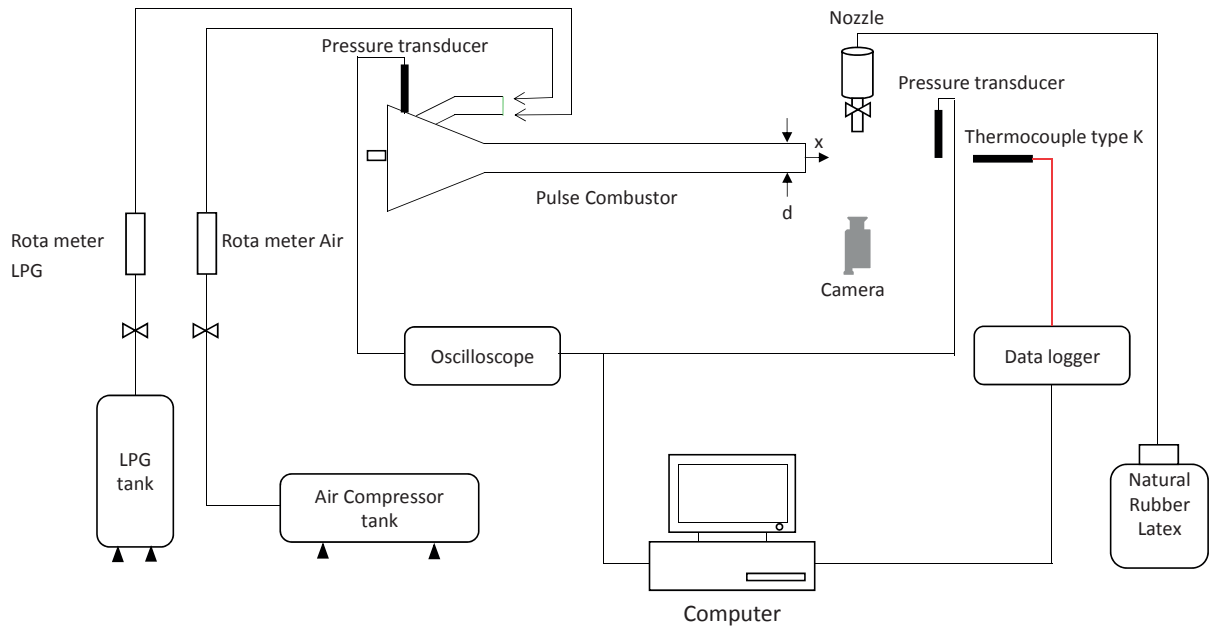
สำหรับชุดจ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG จะถูกส่งออกจากถังแก๊ส ผ่านวาล์วควบคุมความดันและอุปกรณ์ป้องกันเปลวไฟย้อนกลับ ผ่านโรตารีมิเตอร์เพื่อวัดอัตราการไหลของแก๊สก่อนที่จะจ่ายเข้าสู่ท่อทางเข้าอากาศของห้องเผาไหม้

สำหรับชุดจุดเดินเครื่อง จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ หัวเทียนที่ติดตั้งด้านท้ายของห้องเผาไหม้ จะต่อเข้ากับชุดวงจรไฟฟ้าสำหรับจุดหัวเทียน และส่วนจ่ายอากาศซึ่งอากาศจะถูกส่งจากถังปั๊มอากาศผ่านท่อส่งไปยังท่อทางเข้าอากาศร่วมกับท่อแก๊ส LPG แต่หลังจากจุดเครื่องติดแล้วจะหยุดจ่ายอากาศ และหัวเทียนจะใช้จุดระเบิดตอนเริ่มต้นเพียงเท่านั้น หลังจากห้องเผาไหม้เดินเครื่องต่อเนื่องด้วยตัวเอง

สำหรับชุดอุปกรณ์วัดประกอบด้วย อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความดัน โดยใช้ Thermocouple Type K ในการวัดอุณหภูมิ ส่วนความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง ใช้ Pressure Transducer วัดความดันและอ่านค่าผ่าน Oscilloscope และเก็บข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

สำหรับชุดหัวฉีด จะเป็นตัวพ่นน้ำยางเพื่อให้ น้ำยางปะทะไปกับลมร้อน เพื่อดูการแตกตัวของน้ำยางที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง และใช้กล้องถ่ายรูปบันทึกภาพที่ตำแหน่งต่างๆเพื่อนำมาพิจารณาต่อไป



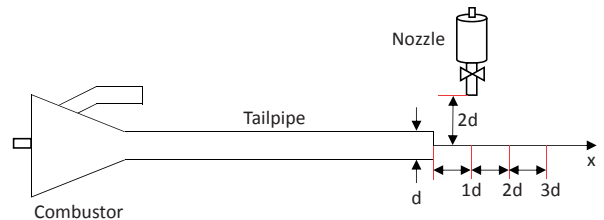


รูปที่ 5 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2 โมเดลและตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้นำห้องเผาไหม้แบบHelmholtzที่มีท่อทางเข้าอากาศทางเดียว มาศึกษาผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อนที่ออกจากท่อส่งและศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง และดูการแตกตัวของละอองน้ำยาง เพื่อหาตำแหน่งการแตกตัวของน้ำยางที่เหมาะสมรูปที่ 6 แสดงโมเดลของชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษา โดยห้องเผาไหม้ทำจากแผ่นสแตนเลส ด้านท้ายของห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110mm ยาว 300mm และด้านท้ายของห้องเผาไหม้ได้ติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดระเบิดเชื้อเพลิงตอนเริ่มเดินเครื่อง ส่วนอีกด้านของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งจะมีลักษณะเป็นท่อลดหน้าตัด ท่อส่งทำจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d=47$  mm ยาว 750mm (ประมาณ  $16 d$ ) สำหรับท่อทางเข้าอากาศได้ออกแบบให้ติดตั้งเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยท่อทางเข้าอากาศทำจากท่อสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ยาว 165 mm ถูกงอให้ปลายชี้ไปทิศทางเดียวกับท่อส่ง ดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของหัวฉีดทำจากพลาสติกแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm สูง 145 mm มีวาล์วควบคุมการไหลจะติดตั้งให้สูงห่างจากปากทางออกท่อส่ง 94 mm (ประมาณ  $2d$ )

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7, 24.3 และ 22.6 ลิตรต่ออนาที และทำการทดลองที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง  $X/d=1, 2$  และ 3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6



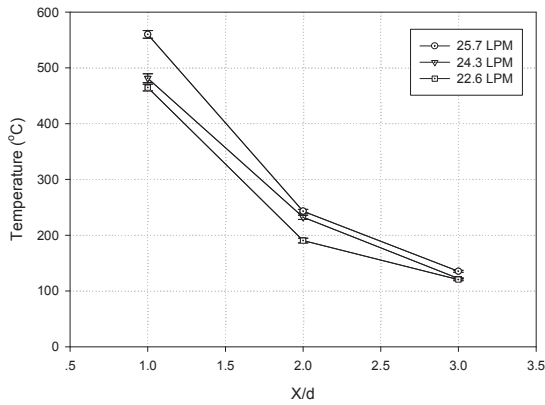
รูปที่ 6 แสดงชุดโมเดลของห้องเผาไหม้และหัวฉีดระบบเจ็ทไหลปะทะ

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ผลของอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อน

จากรูปที่ 7 ได้แสดงผลของอุณหภูมิของเจ็ทลมร้อน จะเห็นว่าอุณหภูมิจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะ  $X/d$  และอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ระยะ  $X/d=1$  ในทุกอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่  $560^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 25.7 ลิตรต่ออนาที และการลดอัตราการไหลของแก๊ส LPG ในช่วงการทดลอง มีผลทำให้อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนที่ตำแหน่ง  $X/d=1$  และ 2 ลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ผลของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิเฉลี่ยของเจ็ทลมร้อน ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 25.7 ลิตรต่ออนาที พบว่าที่ระยะ  $X/d=1$  อยู่ที่  $687^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/d=2$  อยู่ที่  $343^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/d=3$  อยู่ที่  $171^{\circ}\text{C}$  เมื่อลดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG เป็น 24.3 ลิตรต่ออนาที พบว่าที่ระยะ  $X/d=1$  อยู่ที่  $786^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/d=2$  อยู่ที่  $376^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/d=3$  อยู่ที่  $112^{\circ}\text{C}$  และที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 22.6 ลิตรต่ออนาที พบว่าที่ระยะ  $X/d=1$  อยู่ที่  $595^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/d=2$  อยู่ที่  $424^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะ  $X/d=3$  อยู่ที่  $202^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 7 แสดงผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่างๆ

#### 4.2 ผลของความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง

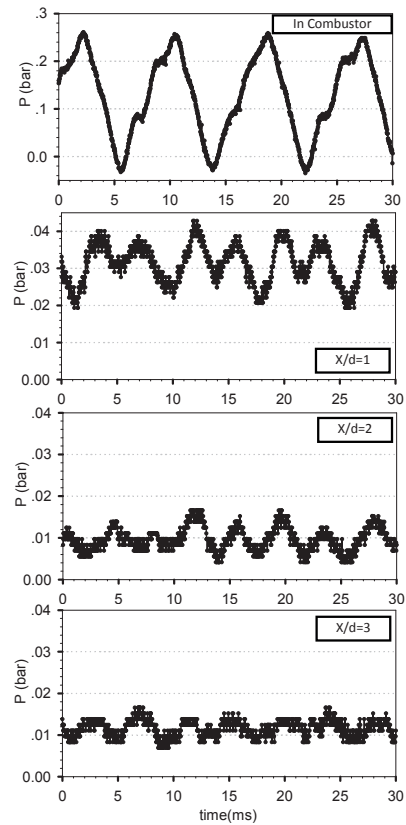
จากรูปที่ 8, 9 และ 10 เป็นผลของความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7, 24.3 และ 22.6 ลิตรต่อวินาที พบว่าผลต่างของความดันสูงสุดในห้องเผาไหม้อยู่ที่ 0.26 Bar ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7 ลิตรต่อวินาที และความดันเป็นลบสูงสุดอยู่ที่ -0.04345 bar ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7 ลิตรต่อวินาที

จากรูปที่ 8 ผลของความดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7 ลิตรต่อวินาที พบว่าที่ระยะ  $X/d=1$  ให้ความดันสูงสุดอยู่ที่ 0.043 bar และความดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.0037 bar ที่ระยะ  $X/d=2$

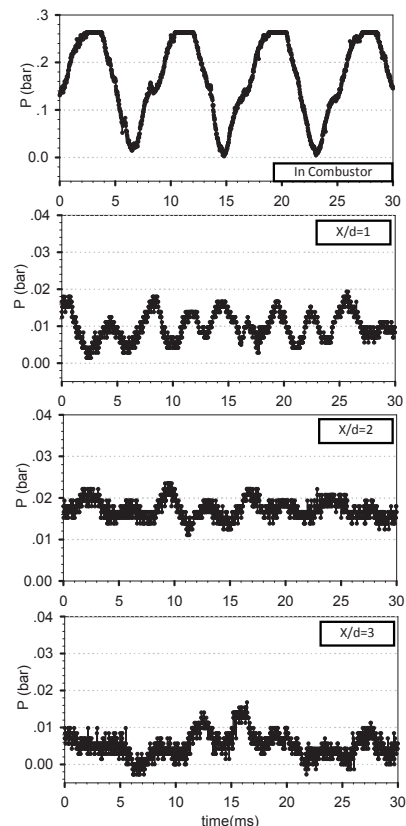
จากรูปที่ 9 ผลของความดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 24.3 ลิตรต่อวินาที พบว่าที่ระยะ  $X/d=2$  ให้ความดันสูงสุดอยู่ที่ 0.024 bar และความดันต่ำสุดอยู่ที่ -0.0028 bar ที่ระยะ  $X/d=3$

จากรูปที่ 10 ผลของความดันที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง โดยใช้อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 22.6 ลิตรต่อวินาที พบว่าที่ระยะ  $X/d=1$  ให้ความดันสูงสุดอยู่ที่ 0.0244 bar และความดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.0052 bar ที่ระยะ  $X/d=3$

จากการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง พบว่าผลของการเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลให้ค่าของความดันที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งและในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น

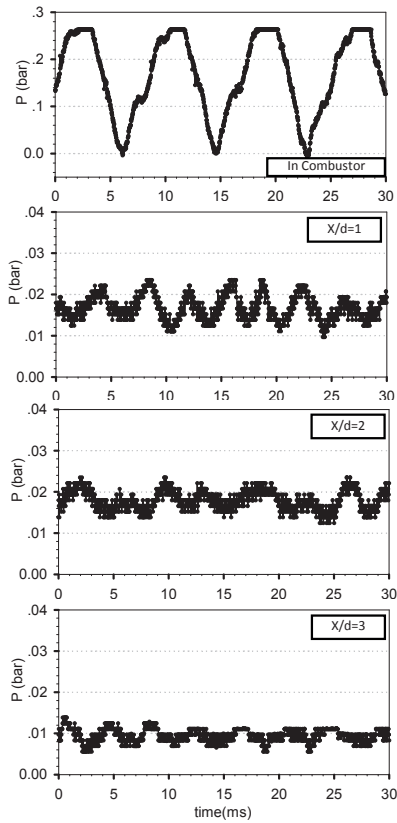


รูปที่ 8 ความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่างๆที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 25.7 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 9 ความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่างๆที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 24.3 ลิตรต่อวินาที





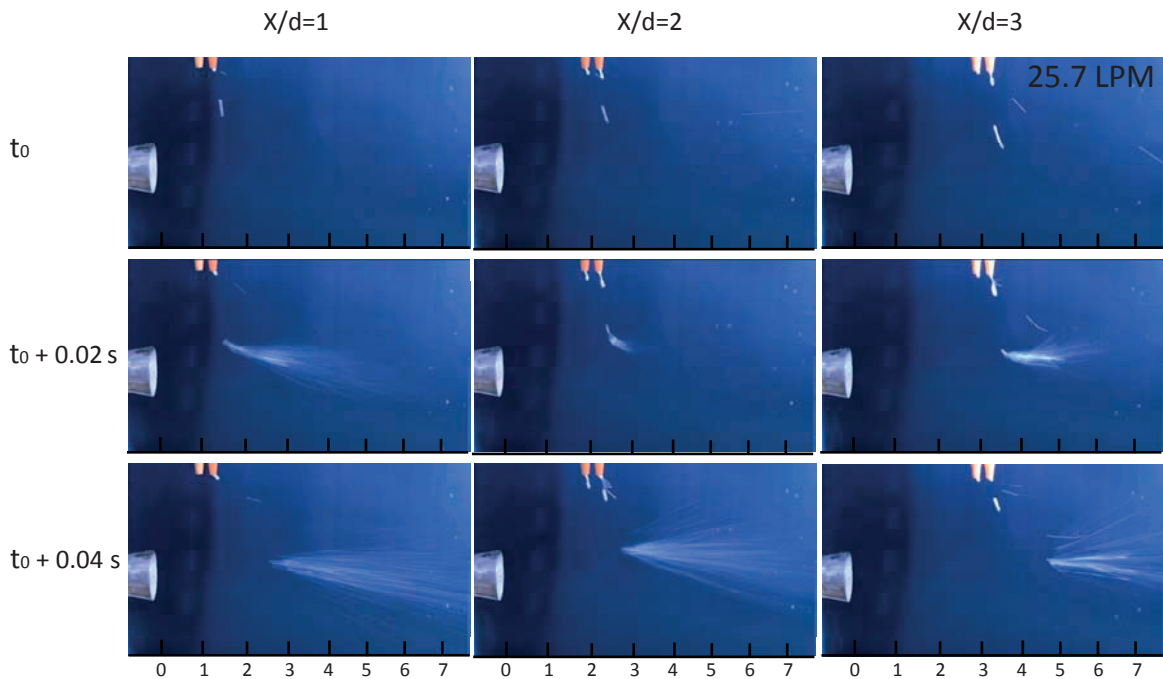
รูปที่ 10 ความดันในห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่างๆ ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG 22.6 ลิตรต่อวินาที

#### 4.3 ผลของการแตกตัวเป็นละอองของน้ำยางที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่ง

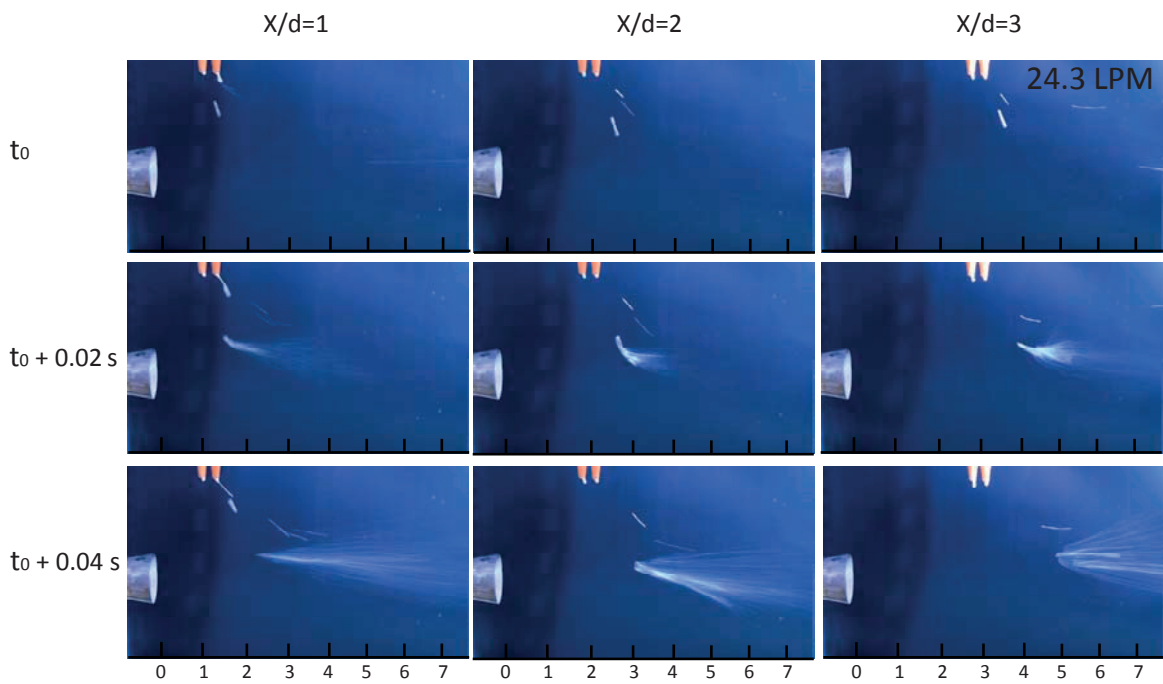
ผลของการแตกตัวของหยดน้ำยางที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกท่อส่งต่างๆ และกำหนดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7, 24.3 และ 22.6 ลิตรต่อวินาที ดังแสดงรูปที่ 11, 12 และ 13 ที่เวลา  $t_0$  แสดงการเคลื่อนที่ของหยดน้ำยางก่อนถูกเจ็ทปะทะ ที่เวลา  $t_0+0.02$  วินาที หยดน้ำยางไหลปะทะขอบเจ็ท ทำให้ถูกเฉือนย่อย ที่เวลา  $t_0+0.04$  วินาที หยดน้ำยางถูกเจ็ทไหลปะทะจนหยดน้ำยางแตกตัวเป็นละอองเล็กๆ ไหลเข้าไปในลำเจ็ทจากการทดลองพบว่าหยดน้ำยางแตกตัวเมื่อหยดลงมาปะทะกับขอบลำเจ็ทจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ แล้วถูกความเค้นเฉือนที่ขอบเจ็ทตัดย่อยเป็นละอองฝอยหรือเกิดจากการปะทะของคลื่นความดันภายในเจ็ททำให้แตกเป็นละออง

จากการทดลอง ตำแหน่งในการป้อนน้ำยาง  $X/d$  มีผลต่อการกระจายของหยดน้ำยาง ที่ระยะ  $X/d$  ใกล้กับปากทางออกท่อส่ง มีผลทำให้กระจายแตกตัวละเอียดกว่า เนื่องจากความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 11, 12 และ 13 จะเห็นเป็นเส้นสีขาวๆ ที่กระจายยาวออกไปและการเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลให้การแตกตัวของหยดน้ำยางรุนแรงขึ้น

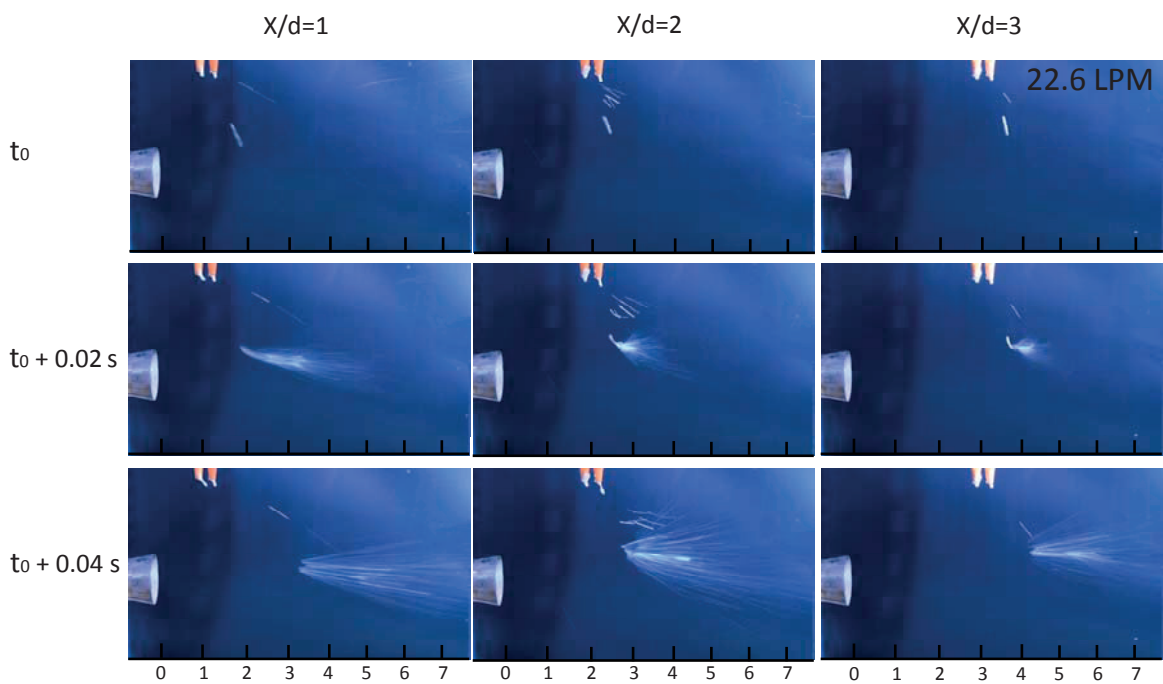
ในอนาคต งานวิจัยนี้มีแนวโน้มที่จะใช้กล้องความเร็วสูงศึกษาการกระจายของหยดน้ำยางซึ่งคาดว่าจะช่วยให้เห็นการกระจายของหยดน้ำยางได้ละเอียดขึ้น



รูปที่ 11 แสดงการแตกตัวของละอองน้ำยางที่ตำแหน่งต่างๆ โดยกำหนดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 25.7 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 12 แสดงการแตกตัวของละอองน้ำยางที่ตำแหน่งต่างๆ โดยกำหนดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 24.3 ลิตรต่อหน้าที่



รูปที่ 13 แสดงการแตกตัวของละอองน้ำยางที่ตำแหน่งต่างๆ โดยกำหนดอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่ 22.6 ลิตรต่อหน้าที่

### 5. สรุปผลการศึกษา

(1) ผลของการเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลทำให้อุณหภูมิของเจ็ทลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น

(2) ผลของการเปลี่ยนแปลงความดันในแต่ละรูปแบบของห้องเผาไหม้และที่ตำแหน่งระยะห่างจากปากทางออกท่อส่ง ขึ้นอยู่กับอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG ที่เพิ่มขึ้น

(3) ตำแหน่งในการป้อนน้ำยาง  $X/d$  มีผลต่อการกระจายของหยดน้ำยาง ที่ระยะใกล้กับปากทางออกท่อส่งจะกระจายแตกตัวละเอียดกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากความเร็วของเจ็ทลมร้อนสูง

(4) การเพิ่มอัตราการจ่ายเชื้อเพลิงของแก๊ส LPG มีผลทำให้การแตกตัวของหยดน้ำยางรุนแรงขึ้น

(5) ในอนาคตจะใช้กล้องความเร็วสูงศึกษาการกระจายของหยดน้ำยาง ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้เห็นการกระจายของหยดน้ำยางได้ละเอียดขึ้น

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A Zainal Abidin, Afrizal Vachlepi, Spray drying process design for the production of natural rubber powder from latex. Indonesian Journal of Chemical Engineering, 2012.11: p. 132-140
- [2] Ashgriz N. 2011. Handbook of atomization and sprays, Springer
- [3] Kudra, T., Mujumdar, A. S., 2009, Pulse combustion drying, In Advanced Drying Technologies, 2nd Edition, Taylor&Francis, pp.225-261.
- [4] Zinn, B.T., 1996, Pulse combustion applications: past, present and future, In Unsteady Combustion, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 113-137.
- [5] Andrew J. Yule, John J. Dunkley. 1994. Atomization of Melts for powder production and spray deposition, Oxford Series on Advanced Manufacturing, Clarendon press-Oxford.

ภาคผนวก ง.

บทความสำหรับเผยแพร่ 2

Flow and Heat Transfer Characteristics of Hot Gas Jet from Pulse Combustor:  
Effect of Tailpipe Length

# Flow and Heat Transfer Characteristics of Hot Gas Jet from Pulse Combustor: Effect of Tailpipe Length

Nattawoot Hasanachai<sup>1</sup>, Pathomporn Narato<sup>1</sup> and Chayut Nuntadusit<sup>1,\*</sup>

## Abstract

This research presented the results of tailpipe length configurations on flow and heat transfer characteristics of a hot gas jet from the pulse combustor. The combustion chamber is Helmholtz type without valve that having single tailpipe and single air inlet. In the experiments, the flow rate of LPG fuel was fixed at 29.8 l/min. The distance from the tailpipe outlet to impinged surface at 1D, 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D and 8D. Where D was an inner diameter of the tailpipe equals 47 mm. The length of tailpipe was varied at 16D, 19D, 22D and 25D. The velocity and temperature were measured by using a pitot-tube and a thermocouple, respectively, and the heat transfer rate on the impingement surface was measured by using a heat flux sensor. The results showed that jet velocity, jet temperature and heat transfer on the impingement surface decreased according to increasing of distance from tailpipe outlet. The length of tailpipe at 19D gives highest jet velocity, jet temperature and the heat transfer on the impingement surface.

**Keywords :** Pulse combustor, Hot gas jet, Tailpipe length configurations, Impinging jet, Heat transfer characteristics

---

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand

\* Corresponding Author: Email address: chayut.n@psu.ac.th



## 1. Introduction

The pulse combustion technique is one of the opportunities for efficient and environmental friendly combustion technology. Pulse combustion is driven by combustion, with acoustic oscillation. It is recognized for high-intensity combustion, high heat and mass transfer rates, low pollutant emission and excellent combustion stability compared with steady combustion. [1] According to the operation principles, pulse combustors can be classified into three types: Rijke, Schmidt and Helmholtz depending on the operational system geometry. [2-5] Helmholtz-type pulse combustors have more industrial applications than the other two type pulse combustors. [6]

Pulse combustors, first recorded in the literature in 1906, initially reached prominence as the propulsive engine for the V-1 in during the Second World War. [7] For several applications, Pulse combustor offers distinct advantages over conventional combustion devices, the most notable of which is an observed increase in the heat transfer rate through the walls of the combustion chamber and tailpipe. [8] Tailpipes are the most important transfer factors of pulse combustor, so it is necessary to predict and take the full advantage of the heat transfer rates in tailpipes for designing pulse combustors.

One of the most significant advantages offered by Helmholtz-type pulse combustor is high energy efficiency attributable to the mechanism of the process. [9] Helmholtz-type pulse combustors are based on the concept of the standard acoustic Helmholtz resonator. A Helmholtz resonator is operated at a frequency determined by both the combustion chamber volume and the length and cross-sectional area of the tailpipe. [10] Helmholtz-type pulse combustor consists of an inlet, a separated combustion chamber and a long tailpipe with a smaller diameter.

In previous literature, studies on pulse combustion primarily focused on the limit cycle oscillations, such as pressure amplitude, frequency, heat transfer rate, and pollutant emission characteristics. Martinelli et al. [11] were the first to observe an increase in the heat transfer rates for flows in the laminar regime. No significant increase in heat transfer rates was observed for turbulent flows. Carpinlioglu et al. [12] pointed out that the reverse effects of a pulsating flow on heat transfer are confusing at different problem domains. Rahgoshay et al. [13] revealed that increase in the frequency and amplitude leads to a slight increase in heat transfer rate. Zohir et al. [14] found that the heat transfer of pulsating flow in pulse combustor tailpipes was enhanced at certain pressure amplitudes and frequencies. However, Past research on these rates of heat transfer is inconclusive regarding the amount of heat transfer enhancement and how various flow parameters affect this enhancement.

The aim of this research is to experimentally study the effect of tailpipe length configuration on flow and heat transfer characteristics of hot gas jet from the Helmholtz-type Pulse Combustor. Thermocouples and pitot-tube were used to measure jet temperature and jet velocity, respectively. A heat flux sensor was used to measure heat transfer rate on the impingement surface at stagnation point.

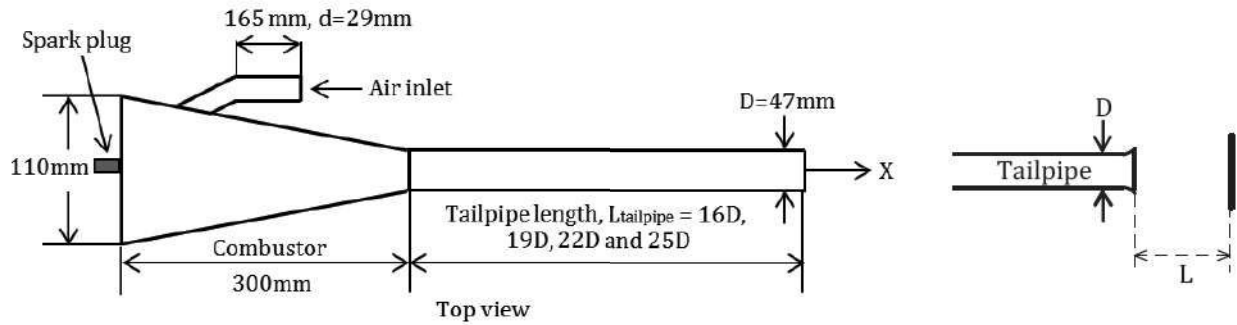
## 2. Experimental model and methods

### 2.1 Experimental model and parameters

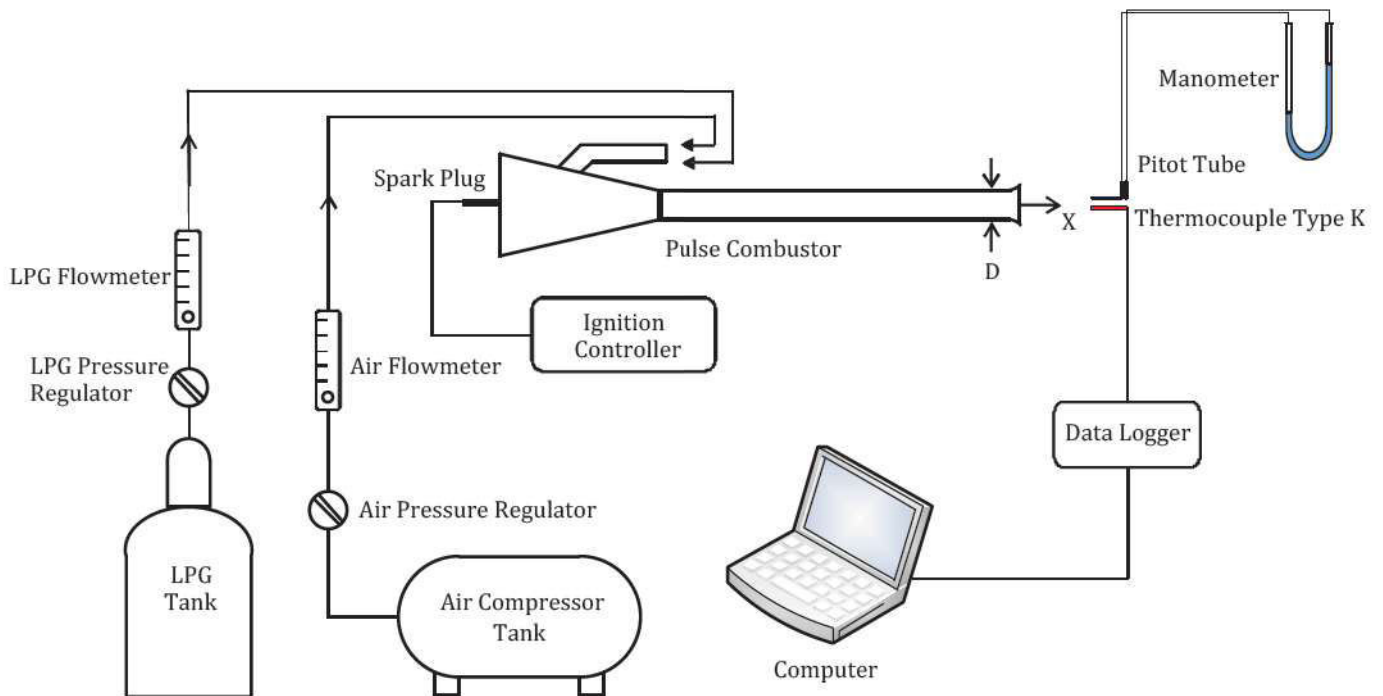
The pulse combustor used in this study is a Helmholtz-type without valves. A schematic of this combustor is shown in Fig. 1. The pulse combustor consists of a combustion chamber, a single tailpipe and a single air inlet pipe. The dimension of the combustion chamber was 110 mm in diameter and 300 mm in length. The pulse combustor was made of stainless steel. A spark plug was

installed at the bottom of combustion chamber for ignition during starting system. The dimension of the air inlet pipe was 29 mm in diameter and 165 mm in length.

The dimension of the tailpipe was  $D=47$  mm in diameter. In this experiment, the length of tailpipe was varied at 16D, 19D, 22D and 25D.

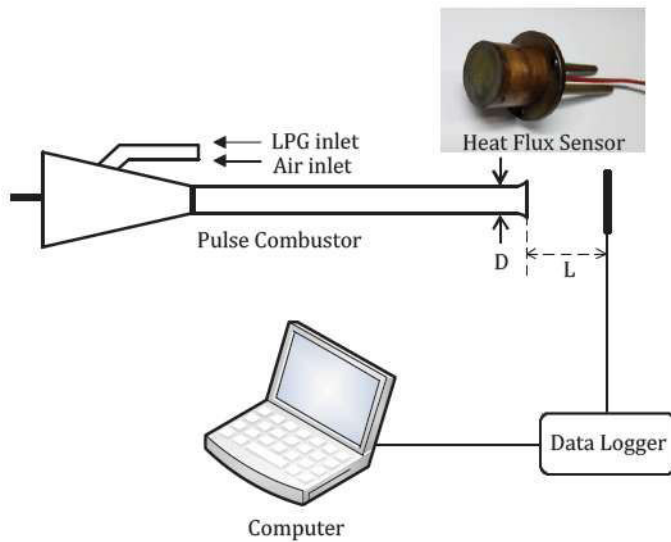


**Fig. 1.** Schematic diagram of a Helmholtz-type pulse combustor with impingement plate.



**Fig. 2.** Experimental setup for measurement of temperature and velocity of free jet.





**Fig. 3.** Experimental setup for heat transfer measurement.

## 2.2 Experimental setup and methods

The experimental setup with the instrumentation is shown in Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup consists of Helmholtz-type pulse combustor, fuel supply, ignition controller, measurements system for temperature, velocity and measurement system for heat transfer rate as shown in Fig. 3. The LPG flow meter and air flow meter are used to measure the flow rates of fuel and air, respectively. The LPG fuel and compressed air were injected to the center of air inlet pipe for mixing inside the combustion chamber. A spark plug was installed at the bottom of combustion chamber for starting the system. Both of spark plug and compressed air used only the beginning for starting the system.

In the experiments, the supplied flow rate of LPG fuel was fixed at 29.8 l/min. The temperature and velocity oscillations of free jet along streamwise at center of tailpipe were measured by using a thermocouple type K and pitot-tube, respectively. A heat flux sensor was embedded on the impingement plate at its center to measure heat transfer rate on the impingement surface at stagnation point. The impingement plate was made of steel

plate with 12 mm in thickness and 100 mm in diameter, respectively. The jet-to-plate distance was varied at  $L=1D$ ,  $2D$ ,  $3D$ ,  $4D$ ,  $5D$ ,  $6D$ ,  $7D$  and  $8D$ .

## 3. Results and discussions

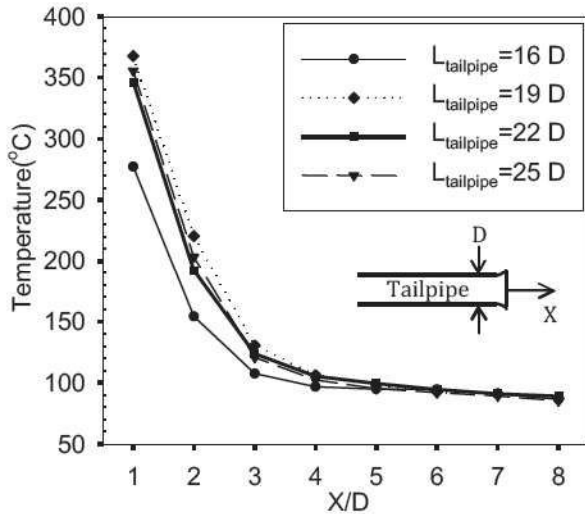
The experimental results of were divided into two main parts. The first part will discuss the results of measuring the jet temperature and jet velocity of hot gas jet from the pulse combustor at the distance from the tailpipe outlet. The second part will discuss the results of heat transfer rate on the impingement surface with hot gas jet impinged directly.

In the case of measurement of jet temperature and jet velocity of hot gas jet generated from pulse combustion chamber at the distance  $X/D$  from the tailpipe outlet by varied tailpipe length. All of experiments, the flow rate of LPG fuel was fixed at 29.8 l/min.

Fig. 4 shows the results for the temperature variation of hot gas jet measured with thermocouples probe type K at various distance  $X/D$  from the tailpipe outlet. It is found that case of the length of the tailpipe at  $19D$  gives the highest temperature at  $T = 367.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the case for length of the tailpipe at  $16D$  gives the lowest temperature at  $T = 277.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . At the distance  $X/D = 1$ , case of tailpipe length at  $16D$  gives the lowest temperature. This is due to the length of the tailpipe is a shortest distance at  $16D$  that the ambient air introduce to tailpipe easier than a longer tailpipe, which results in the lowest temperature increase during flow along the hot tailpipe and results in low combustion temperature. The temperature of hot gas jet decreased obviously in the range of  $1D$  to  $3D$ . Meanwhile, the distance from tailpipe outlet in range of  $X/D > 3$ , they decreased gradually and rather consistent due to all of increased tailpipe length, the effect of the jet temperature is similar. At the distance  $X/D = 8$  gives the lowest jet temperature and becomes almost constant at  $T = 87\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The temperature of the hot gas jet did not depend on tailpipe length configurations, but it is highest

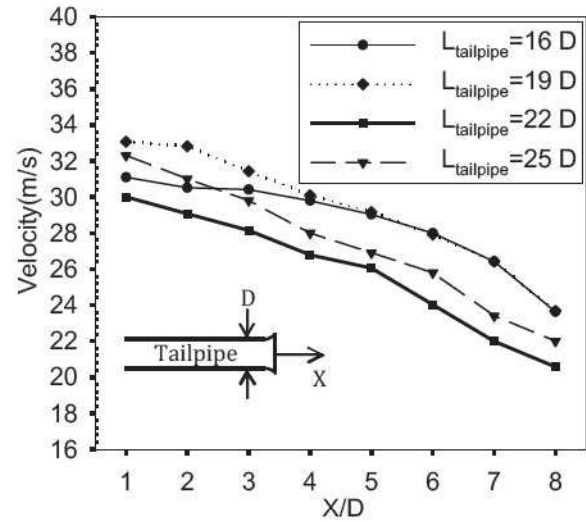


for the tailpipe length that appropriate of the combustion chamber. In this case, the length of tailpipe at 19D is suitable for installation of single air inlet pipe. As the result of jet temperature of the hot gas jet, all of tailpipe lengths used for experiment was similar at the distance  $X/D = 1$ .



**Fig. 4.** Temperature of hot gas jet from the pulse combustor at different  $X/D$

Fig. 5 shows the results of study the jet velocity of hot gas jet measured on the jet axial with Pitot-tube at various distance  $X/D$  from the tailpipe outlet. The length of the tailpipe at 19D gives the highest velocity at 33.1 m/s and the length of the tailpipe at 16D gives the lowest velocity at 30 m/s. At the distance  $X/D = 1$ , the jet velocity decreased according to increasing of distance from tailpipe outlet. At the distance  $X/D = 8$ , the length of the tailpipe at 19D gives the jet velocity at 23.7 m/s and the length of the tailpipe at 22D gives the jet velocity at 20.58 m/s. The velocity of the hot gas jet is not depended on tailpipe length configurations, but it is highest for the tailpipe length that is appropriate of the combustion chamber. In this case, the length of tailpipe at 19D gives the highest jet velocity at the distance  $X/D = 1$ .



**Fig. 5.** Velocity of hot gas jet from the pulse combustor at different  $X/D$

Fig. 6 shows heat transfer rate on the impingement surface measured at stagnation point on impingement plate at various jet-to-plate distances  $L/D$ . The case of tailpipe length at 19D gives the highest heat transfer rate equals to 53.2 kW/m<sup>2</sup> and the case for length of the tailpipe at 25D gives the lowest heat transfer rate equals to 48.67 kW/m<sup>2</sup>. For case of jet-to-plate distances  $L/D = 1$ , the case of tailpipe length at 16D gives the similar value of heat transfer rate with the other case. Meanwhile, it gives the lowest temperature as showed in Fig. 4. This is due to the frequency of hot gas pulsation near the tailpipe outlet as shown in Fig. 7. Fig. 7 shows the amplitude and frequency of pressure pulsation measured with pressure transducer at  $X/D=1$ . The frequency of pulsation can help to promote the heat transfer on surface. The heat transfer rate on the impingement surface decreased rapidly in the range from 1D to 3D. For the jet-to-plate distance from tailpipe outlet in range of  $L/D > 3$ , the heat transfer decreased gradually. The case for jet-to-plate at distance  $L/D = 8$  gives the heat transfer rate on the impingement surface about 28.86 kW/m<sup>2</sup>. The heat transfer rate tends to decreased as increasing the jet-to-plate distance,

corresponding to the same condition that jet temperature and jet velocity decreased according to increasing of distances from tailpipe outlet.

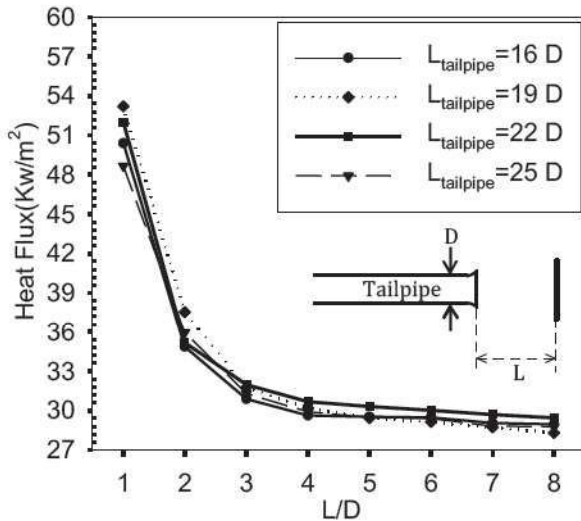


Fig. 6. Heat transfer rate on impinged surface with impinging air jet at different jet-to-plate distance L/D

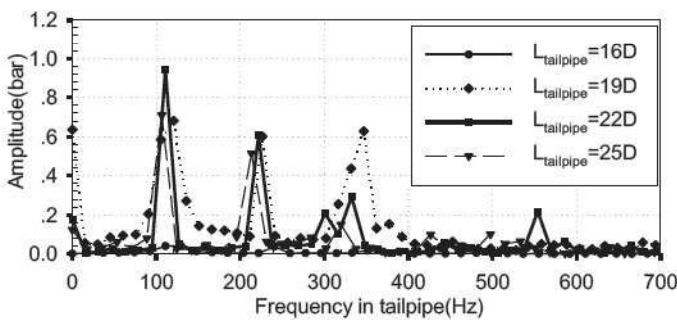


Fig. 7. The effect of the frequency near tailpipe outlet.

#### 4. Conclusions

Experimental studies were carried out to investigate the flow and heat transfer characteristics of hot gas jet from valveless Helmholtz-type pulse combustor. The effect of tailpipe length was also investigated. The major findings for the present work can be summarized as follows:

1. The effect of jet velocity, jet temperature and heat transfer on the impingement surface decreased according to increasing of distance from the tailpipe outlet.
2. Especially for distance from tailpipe outlet in the range of 1D to 3D, the jet velocity and heat transfer on the impingement surface decreased rapidly. Meanwhile, the distance from tailpipe outlet in the range of  $L/D > 3$ , they decreased gradually and rather consistent.
3. The length of tailpipe at  $L=19D$  gives highest jet velocity, jet temperature and the heat transfer on the impingement surface.

#### 5. Acknowledgment

This research was supported by the Graduate School and Faculty of Engineering, Prince of Songkla University.

#### 6. References

- [1] A.A. Putnam, F.E. Belles and J.A.C. Kentfield, "Pulse combustion", Progress in Energy and Combustion Science 12, 1986, pp. 43-79.
- [2] C.D. Field and F.R. Fricke, "Theory and applications of quarter-wave resonators: a prelude to their use for attenuating noise entering buildings through ventilation openings", Applied Acoustics 53, 1998, pp. 117-132.
- [3] P.K. Tang and W.A. Sirignano, "Theory of a generalized Helmholtz resonator", Journal of Sound and Vibration 26, 1973, pp. 247-262.
- [4] B.T. Zinn, "A theoretical study of non-linear damping by helmholtz resonators", Journal of Sound and Vibration 13, 1970, pp. 347-356.
- [5] R.L. Raun, M.W. Beckstead, J.C. Finlinson and K.P. Brooks, "A review of Rijke tubes, Rijke burners and related devices", Progress in Energy and Combustion Science 19, 1993, pp. 313-364.



- [6] X. Meng, W. de Jong and T. Kudra, “A state-of-the-art review of pulse combustion: Principles, modeling, applications and R&D issues”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, 2016, pp. 73-114.
- [7] R.D. Giammer and A.A. Putnam, “Noise reduction using paired pulse combustion”, *J Energy* 2 (5), 1978, pp. 319-32.
- [8] J.E. Dec and J.O. Keller, “Pulse combustor tail-pipe heat-transfer dependence on frequency, amplitude, and mean flow rate”, *Combustion and Flame* 77, 1989, pp. 359-374.
- [9] I. Zbicinski, Equipment, “technology, perspectives and modeling of pulse combustion drying”, *Chemical Engineering Journal* 86, 2002, pp. 33-46.
- [10] T. Kudra and A.S. Mujumdar, “*Pulse combustion drying. In Advance Drying Technologies* (2nd ed.)”, Taylor & Francis Group, 2009.
- [11] R.C. Martinelli, L.M.K. Boelter, E.B. Weinberg and S. Yakahi, “Heat transfer to a fluid flowing periodically at low frequencies in a vertical tube”, *ASME Trans* 65, 1943, pp. 789-798.
- [12] M.O. Carpinlioglu and M.Y. Gundogdu, “A critical review on pulsatile pipe flow studies directing towards future research topics”, *Flow Measurement and Instrumentation* 12, 2001, pp. 163-174.
- [13] M. Rahgoshay, A.A. Ranjbar and A. Ramiar, “Laminar pulsating flow of nanofluids in a circular tube with isothermal wall”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 2012, pp. 463-469.
- [14] A.E. Zohir, M.A. Habib, A.M. Attya and A.I. Eid. “An experimental investigation of heat transfer to pulsating pipe air flow with different amplitudes”, *Heat and Mass Transfer* 42, 2006, pp. 625-635.

ภาคผนวก จ.

บทความสำหรับเผยแพร่ 3

การผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

## การผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

### Method for Producing Natural Rubber Powder from Rubber Latex by Spray Drying Process

ณัฐวุฒิ หัสนะชัย<sup>1</sup>, Peter Brenner<sup>3</sup>, วิริยะ ทองเรือง<sup>4</sup>, เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี<sup>2</sup> และ ชยุต นันทดุสิต<sup>5\*</sup>

<sup>1,3,4,5</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

<sup>2</sup> ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

\*ติดต่อ: chayut.n@psu.ac.th โทรศัพท์ 0-7428-7035 โทรสาร 0-7455-8830

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการพ่นแห้งละอองน้ำยางภายใต้สภาวะอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยห้องเผาไหม้ที่ใช้เป็นห้องเผาไหม้แบบ Helmholtz ชนิดไร้วาล์ว ที่มีท่อทางเข้าอากาศทางเดียว ในการทดลองจะศึกษารูปแบบหัวฉีดที่สามารถพ่นละอองยางฝอยได้ เริ่มจากหัวฉีดจะพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องอบแห้ง จากนั้นละอองน้ำยางถูกให้ความร้อนจากอากาศร้อนที่สร้างจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ในห้องอบแห้งจะมีอุณหภูมิทางเข้าอยู่ที่ประมาณ 180 °C และอุณหภูมิทางออกอยู่ที่ประมาณ 80 °C หลังจากการอบแห้งจะนำอนุภาคยางธรรมชาติผงมาวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานและขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติผงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์อิเล็กตรอนแบบจุลภาคตามลำดับ จากการทดลองพบว่าช่วงของขนาดอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 50  $\mu\text{m}$  ถึง 300  $\mu\text{m}$

**คำหลัก:** ยางธรรมชาติผง, การพ่นแห้ง, ห้องเผาไหม้แบบพัลส์, รูปแบบของหัวฉีดพ่นฝอย

#### Abstract

This paper presents the method for producing natural rubber powder from natural rubber latex by spray drying process under hot gas jet generated from a pulse combustor. The pulse combustor is valveless Helmholtz type that having single tailpipe and single air inlet. In the experiments, the rubber latex was sprayed from developed air spray nozzle into the drying chamber. Then, the latex droplets was heated by hot gas jet and dried in the chamber. The temperature of hot gas jet at the chamber inlet was around 180 °C and chamber outlet temperature was 80 °C. The latex dispersions was spray dried to obtain rubber particle. After the drying process, the morphology and particle size of natural rubber powders were analyzed by scanning electronic microscopy (SEM) and electron micro analyzer, respectively. The range of particle size was from approximately 50  $\mu\text{m}$  to 300  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** Natural rubber powder, Spray drying, Pulse combustor, Spray nozzle configuration

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันยางธรรมชาติเป็นสินค้าเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย โดยในปี 2560 ประเทศไทยได้ผลิตยางธรรมชาติมากกว่า 4 ล้านตัน [1] จากรายงานของกลุ่มวิจัยยางระหว่างประเทศ การแบ่งส่วนการผลิตยางธรรมชาติ โดยประเทศไทยคิดเป็นสัดส่วนประมาณหนึ่งในสามของการผลิตยางของโลก ส่วนใหญ่มีการส่งออกเป็นหลายรูปแบบ เช่น ยางแผ่น ยางแท่ง และน้ำยางข้น [2]

โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะถูกแปรรูปให้อยู่ในรูปของยางแปรรูปขั้นต้น เช่น ยางแผ่นแห้ง ยางแผ่นรมควัน และยางแท่ง หลังจากนั้นจึงถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ยาง เช่น ล้อ ยางรถยนต์ ถังมือยาง ต่อไป ซึ่งในการแปรรูปเบื้องต้นจะต้องใช้พลังงานสูงและเวลานานในการผลิต เนื่องจากด้วยต้นทุนเรื่องพลังงานและเครื่องจักร หากสามารถผลิตยางผงที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ จากน้ำยางธรรมชาติโดยตรงแล้ว นอกจากจะลดการใช้เครื่องจักรในการแปรรูปแบบเดิมแล้ว ยังช่วยลดพลังงานในกระบวนการตัดย่อยและผสมสารเคมีเพื่อแปรรูปยางเป็นผลิตภัณฑ์ได้ด้วย

การอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying) [3] เป็นกระบวนการอบแห้งที่ใช้ความร้อนแฝงของเหลวให้เป็นผงแห้งในเวลาอันสั้น โดยมีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน คือ (1) ของเหลวจะถูกฉีดให้เป็นละอองฝอย (2) ละอองฝอยสัมผัสกับลมร้อนที่ไหลเข้ามา ทำให้เกิด (3) การระเหยน้ำอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้น (4) ผงแห้งจะถูกแยกออกจากลมร้อน ข้อดีของวิธีนี้ สามารถผลิตผงแห้งได้อย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ได้มีขนาดรูปร่าง ปริมาณความชื้นที่ใกล้เคียงกันเกือบทุกอนุภาค อย่างไรก็ตาม คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับประสิทธิภาพในการทำให้ของเหลวแตกเป็นละอองเล็กๆ และขึ้นกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของการสัมผัสระหว่างหยดของเหลวกับลมร้อน เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีส่วนประกอบสำคัญ ดังนี้

- (1) ห้องอบ (Drying chamber) ทั่วไปมีลักษณะเป็นห้องทรงกระบอกมีส่วนปลายด้านล่างเป็นกรวย

ภายในเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลสารระหว่างลมร้อนกับละอองของเหลว

- (2) หัวฉีดพ่นฝอย (Atomization nozzle) เป็นส่วนสำคัญในการทำให้ของเหลวแตกตัวเป็นละอองขนาดเล็ก ทำให้ละอองระเหยเป็นผงเร็วขึ้น
- (3) ระบบจ่ายลมร้อน ผลิตลมร้อนที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 180 – 220 °C ซึ่งความร้อนอาจได้จากไฟฟ้าหรือการเผาไหม้แก๊ส
- (4) ระบบแยกอนุภาค ทำหน้าที่แยกผงอนุภาคออกจากลมร้อน ส่วนใหญ่นิยมใช้ไซโคลน ซึ่งใช้แรงเหวี่ยงในการแยกผงอนุภาคออกจากลมร้อน

ยางธรรมชาติผงสามารถเตรียมได้จากวิธีการพ่นแห้งละอองฝอย โดยกระบวนการพ่นแห้งสามารถสร้างละอองหรือหยดน้ำยางที่มีขนาดเล็ก และสามารถควบคุมขนาดของอนุภาคได้ [4, 5] โดยจะพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 90 °C เมื่อละอองน้ำยางสัมผัสกับลมร้อน กระแสลมร้อนจะพาส่วนที่เป็นน้ำระเหยออก จนเม็ดยางแห้งในที่สุด

งานวิจัยนี้ ศึกษาวิธีการผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการพ่นแห้งละอองน้ำยางภายใต้สภาวะอากาศร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ โดยหัวฉีดจะพ่นละอองน้ำยางเข้าไปในห้องอบแห้งเพื่อให้น้ำยางแตกกระจายเป็นละอองฝอย แล้วไหลไปกับกระแสลมร้อนแบบพัลส์จนเม็ดยางแห้งพร้อมกันกับระบบเคลือบแป้งหรือผิวของอนุภาคยางเพื่อให้สามารถเตรียมยางผงที่ไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อน

## 2. การดำเนินงานวิจัย

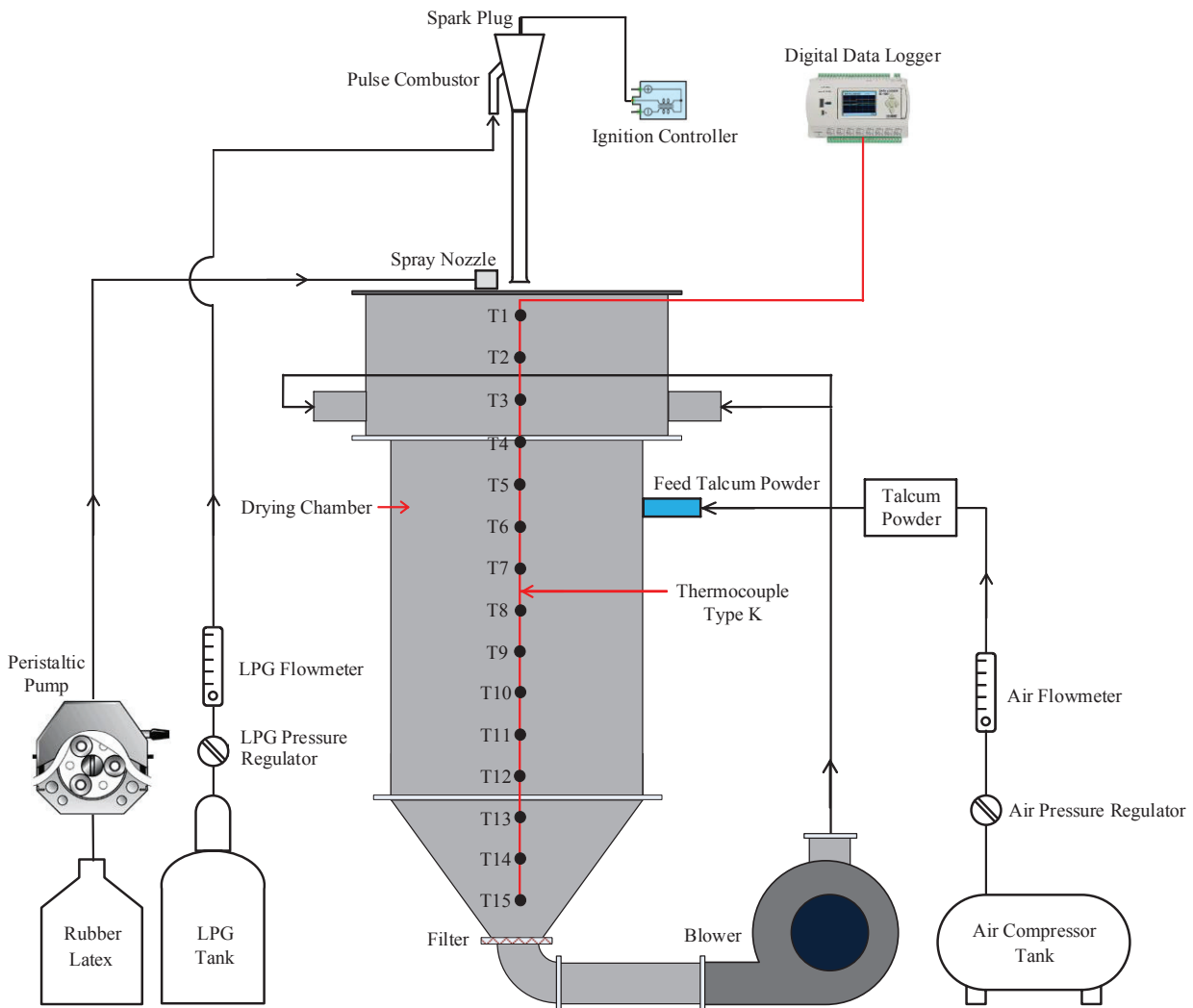
### 2.1 รายละเอียดชุดทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพของชุดทดลองสำหรับการศึกษาระบบอบแห้งละอองน้ำยางด้วยเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์ ประกอบด้วยส่วนหลักๆ ดังนี้ คือ ห้องอบแห้งละอองน้ำยาง, ห้องเผาไหม้แบบพัลส์และแผงควบคุมการจุดระเบิด, หัวฉีดพ่นละอองน้ำยางและกระบอกฉีดผงทัลคัม (Talcum) สำหรับส่วนของห้องอบแห้ง (Drying chamber) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 900 mm สูง 3000 mm ทำจากเหล็ก

แผ่นหนา 3 mm ด้านข้างของห้องอบแห้งจะมีท่อทางเข้าอากาศ 2 ท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ซึ่งจะต่อเข้ากับพัดลม ควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ เป็นตัวเป่าลมเข้าไปในห้องอบแห้ง ในแนวสัมผัส ทำให้เกิดการไหลภายในห้องอบแห้ง โดยในห้องอบแห้งจะติดตั้งแถวของเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องอบแห้งจำนวน 15 จุด เพื่อสำหรับวัดอุณหภูมิที่กระจายตัวภายในห้องอบแห้ง โดยระยะห่างระหว่างตำแหน่งการวัดแต่ละจุดเท่ากับ 200 mm ดังแสดงในรูปที่ 1 ในส่วนของระบบดักจับ

อนุภาคยางธรรมชาติผงจะมีฟิลเตอร์ดักจับอนุภาคยางก่อนที่ลมร้อนจะไหลเวียนกลับไปยังพัดลมอีกครั้ง

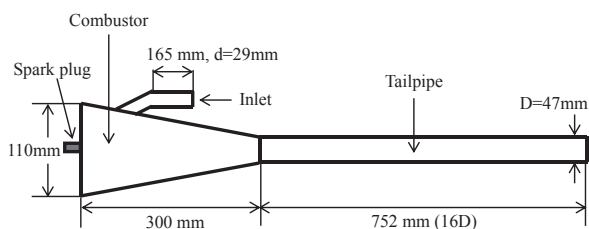
สำหรับรายละเอียดของหัวฉีด จะเริ่มจากการป้อนน้ำยางผ่านปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) เพื่อวัดและควบคุมอัตราการไหลของน้ำยางที่ป้อนเข้าหัวฉีด จากนั้นจะป้อนอากาศจากถังลมผ่านโรตารีเตอร์เพื่อวัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่เข้ามายังหัวฉีด เมื่ออากาศไหลเข้ามาปะทะกับน้ำยางในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้ละอองน้ำยางพ่นออกมาจากหัวฉีดที่มีลักษณะเป็นละอองฝอยขนาดเล็ก



รูปที่ 1 แผนภาพชุดทดลองที่ใช้ในการศึกษาอบแห้งละอองน้ำยาง

## 2.2 รายละเอียดของห้องเผาไหม้แบบพัลส์

รูปที่ 2 แสดงแผนภาพของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา โดยห้องเผาไหม้ทำจากแผ่นสแตนเลส ด้านท้ายของห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 mm ยาว 300 mm และด้านท้ายของห้องเผาไหม้ได้ติดตั้งหัวเทียนสำหรับจุดระเบิดเชื้อเพลิงตอนเริ่มเดินเครื่อง ส่วนอีกด้านของห้องเผาไหม้ที่ต่อกับท่อส่งจะมีลักษณะเป็นท่อลดหน้าตัด ท่อส่งทำจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D=47$  mm ยาว 750 mm (ประมาณ 16 D) สำหรับท่อทางเข้าอากาศได้ออกแบบให้ติดตั้งเข้าสู่ห้องเผาไหม้โดยท่อทางเข้าอากาศทำจากท่อสแตนเลสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm ยาว 165 mm ปลายท่อชี้ไปที่ทิศทางเดียวกับท่อส่ง

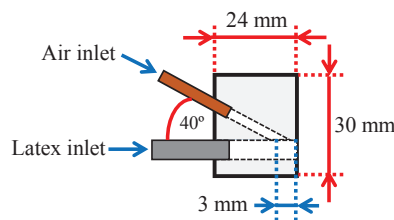


รูปที่ 2 แผนภาพของห้องเผาไหม้แบบพัลส์ที่ใช้ในการศึกษา

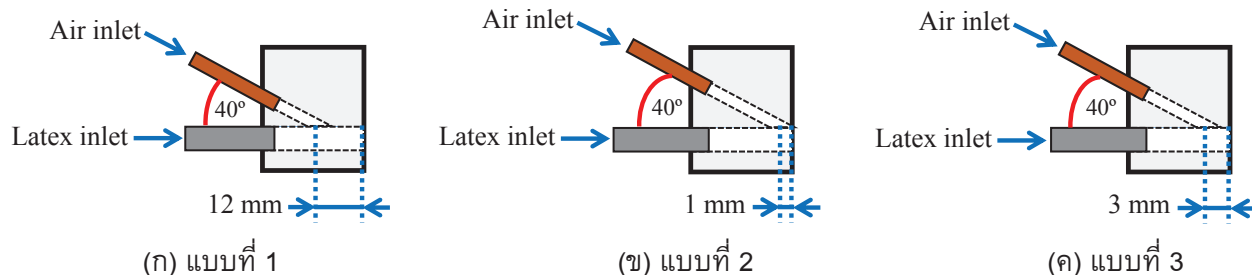
## 2.3 รายละเอียดของหัวฉีดพ่นละอองน้ำยาง

รูปที่ 3 แสดงลักษณะโมเดลและพารามิเตอร์ของหัวฉีดที่ใช้ในการศึกษา ในหัวฉีดจะมีท่อทางเข้าน้ำยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm และท่อทางเข้าอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm โดยจะใช้อากาศที่มีความเร็วสูงเพื่อให้ไหลปะทะกับน้ำยางที่เข้ามายังท่อทางเข้าน้ำยางที่มีความเร็วต่ำ จนเกิดการแตกเป็นละอองน้ำยางที่มีขนาดเล็ก

รูปที่ 4 แสดงรูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน เพื่อหารูปแบบของหัวฉีดพ่นละอองน้ำยางที่เหมาะสมในการสร้างละอองน้ำยางในการทดสอบร่วมกับการฉีดพ่นผงทัลคัม (Talcum) ที่ใช้เคลือบผิวอนุภาคน้ำยางต่อไป จากการทดลองพบว่ารูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าอากาศที่ดีที่สุด คือ รูปแบบที่ 3 (ค) ดังแสดงในรูปที่ 4 ด้วยลักษณะการพ่นละอองน้ำยางมีการกระจายตัวของละอองขนาดเล็กได้ดีกว่าอีก 2 กรณี โดยไม่มีการอุดตันของยางในรูหัวฉีด



รูปที่ 3 โมเดลและพารามิเตอร์ของหัวฉีด



รูปที่ 4 รูปแบบของหัวฉีดพ่นที่ตำแหน่งทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน



## 2.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค ยางธรรมชาติผง

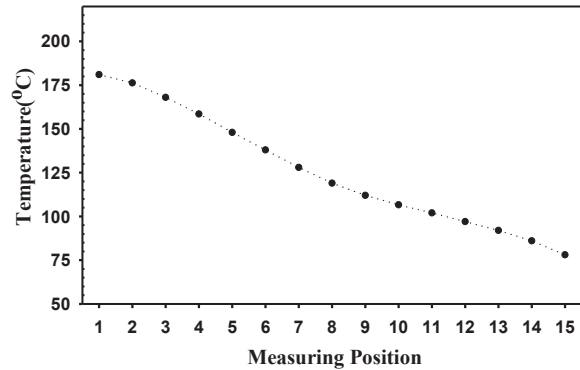
ในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาค  
ยางธรรมชาติผง ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)  
โดยการนำตัวอย่างที่ต้องการวัดไปวางบนแท่น  
ถ่ายภาพ ก่อนทำการฉาบด้วยผิวหน้าด้วยทอง เพื่อให้  
ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ และวิเคราะห์ขนาด  
อนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์อิเล็กตรอนแบบจุลภาค  
ตามลำดับ

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 การกระจายอุณหภูมิของลมร้อนในห้องอบ

รูปที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิของลมร้อนที่  
ตำแหน่งกึ่งกลางของห้องอบแห้ง จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิ  
ในห้องอบแห้งกระจายตัวได้ดีและมีอุณหภูมิที่สูง  
เหมาะสำหรับการอบแห้งอย่างรวดเร็ว และต้องการ  
เวลาในการอบแห้งผ่านอากาศร้อนที่เร็ว อุณหภูมิจะ  
ลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างจากปากทางออก  
ท่อส่ง โดยที่อุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งห่างจาก  
ปากทางออกท่อส่ง 20 mm ( $T_1$ ) = 180.5 °C และ  
อุณหภูมิในห้องอบแห้งจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ  
ระยะห่างจากปากทางออกของท่อส่งห้องเผาไหม้แบบ

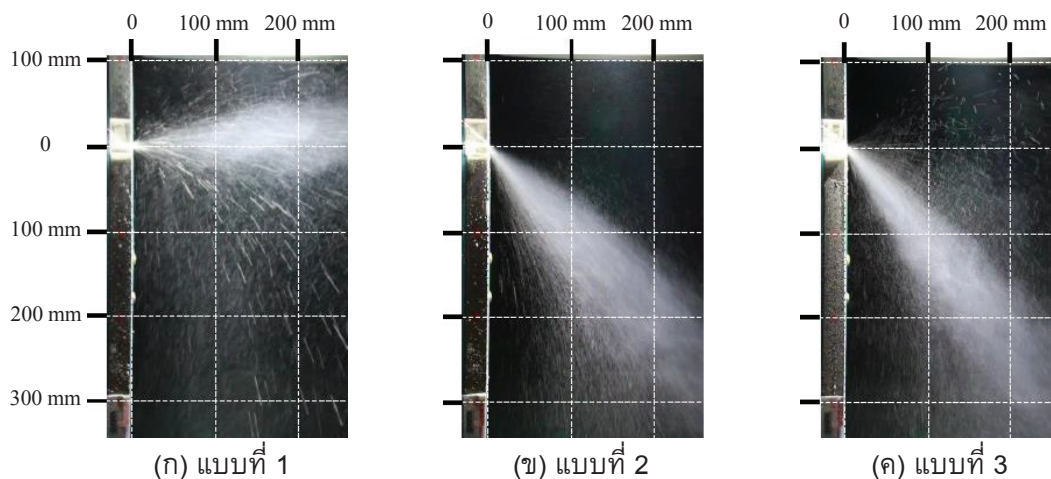
พัลส์อย่างเห็นได้ชัด และอุณหภูมิที่จุดใกล้ทางออก  
ของห้องอบแห้งอยู่ที่ประมาณ 80.7 °C



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิลมร้อนที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ  
ห้องอบแห้ง

### 3.2 ผลของรูปแบบหัวฉีดที่ตำแหน่งท่อทางเข้า อากาศที่แตกต่างกัน

รูปที่ 6 แสดงผลของการศึกษาหัวฉีดพ่นละอองที่  
ตำแหน่งทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน จากการทดลอง  
พบว่ารูปแบบของหัวฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าอากาศที่ดี  
ที่สุด คือ รูปแบบที่ตำแหน่งที่ 3 (ค) ด้วยลักษณะการ  
พ่นละอองน้ำยางมีการกระจายตัวของละอองน้ำยาง  
เป็นละอองฝอยขนาดเล็กละเอียดมากกว่ากรณีอื่น

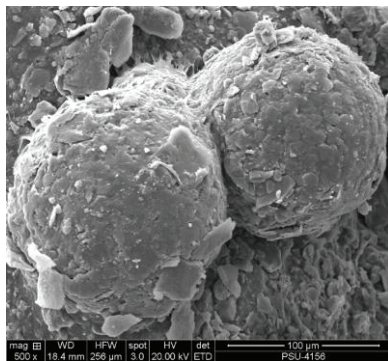


รูปที่ 6 ผลการศึกษาการกระจายของละอองน้ำยางธรรมชาติของหัวฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าอากาศที่แตกต่างกัน  
ที่เงื่อนไขอัตราการไหลของน้ำยาง 20 มิลลิลิตร/นาที และอัตราการไหลของอากาศ 80 ลิตร/นาที

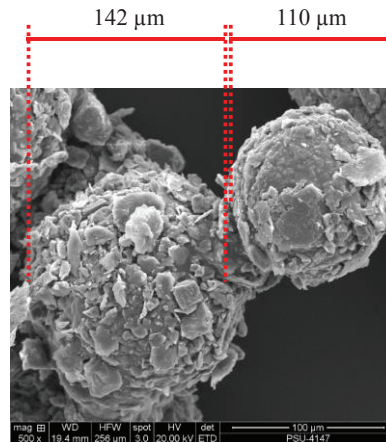
### 3.3 ภาพถ่ายเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผง

รูปที่ 7 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่กำลังขยาย 500 เท่า จากรูปจะเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคของยางธรรมชาติผงที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัมและอนุภาคของยางธรรมชาติผงที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม (Talcum

powder) จากการทดสอบพบว่า อนุภาคของยางธรรมชาติผงที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัมจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมยัดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) ส่วนในกรณีของอนุภาคของยางธรรมชาติผงที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัมจะมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมและยัดเกาะติดกัน โดยมีผงทัลคัมเคลือบอยู่รอบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผง ทำให้ไม่เกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อน



(ก) อนุภาคของยางธรรมชาติผง  
ในกรณีไม่เคลือบทัลคัม



(ข) อนุภาคของยางธรรมชาติผง  
ที่เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม

รูปที่ 7 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่กำลังขยาย 500 เท่า

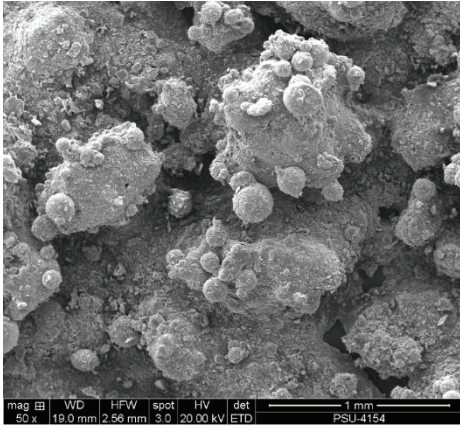
รูปที่ 8 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่กำลังขยาย 50 เท่า โดยในรูปที่ 8 (ก) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัม จะเห็นว่ายางธรรมชาตินั้นมีลักษณะเป็นผิวขรุขระและยัดเกาะเป็นเนื้อเดียวกัน

สำหรับในกรณีของรูปที่ 8 (ข-ค) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัม ในอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกันพบว่าลักษณะทางสัณฐานของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัม ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 20 มิลลิลิตร/นาที มีความแตกต่างของการกระจายตัวของอนุภาคยางธรรมชาติและยัดเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยกว่าที่อัตราการไหลของน้ำยางในกรณีอื่น

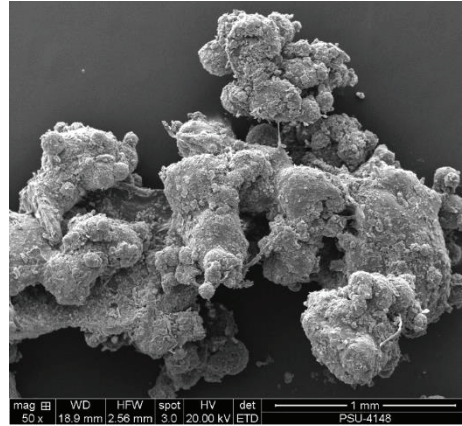
รูปที่ 9 แสดงลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการปั่นแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า โดยในรูปที่ 9 (ก) เป็นลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ไม่ได้เคลือบด้วยผงทัลคัม แม้ว่าจะสามารถมองเห็นอนุภาคยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมได้ แต่ปัญหาการปั่นแห้งของละอองน้ำยางที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยผงทัลคัม จะทำให้อนุภาคยางธรรมชาติยัดเกาะติดกันเป็นกลุ่มก้อนและมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

อย่างไรก็ตามลักษณะทางสัณฐานของยางธรรมชาติผงที่เคลือบด้วยผงทัลคัม ในอัตราการไหลของน้ำยางที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 9 (ข-ง) มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมยัดเกาะติดกันและมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 50 µm ถึง 300 µm

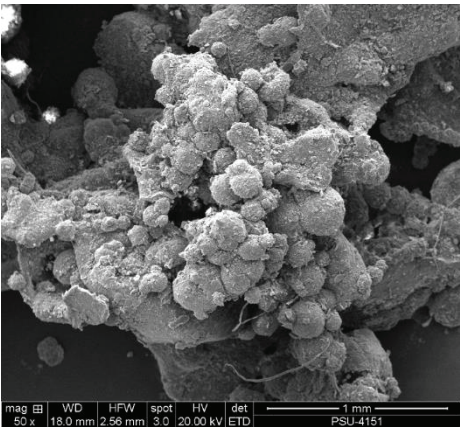




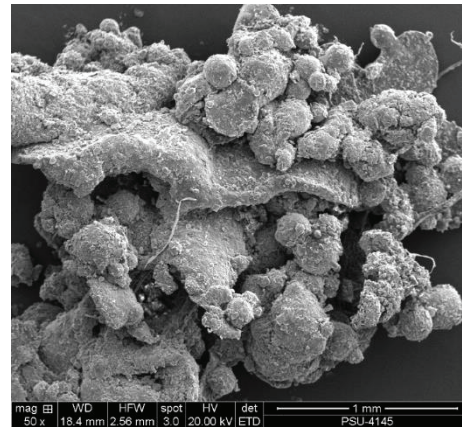
(ก) อนุภาคยางผงที่อัตราการไหล  
ของน้ำยาง 20 มิลลิลิตร/นาที



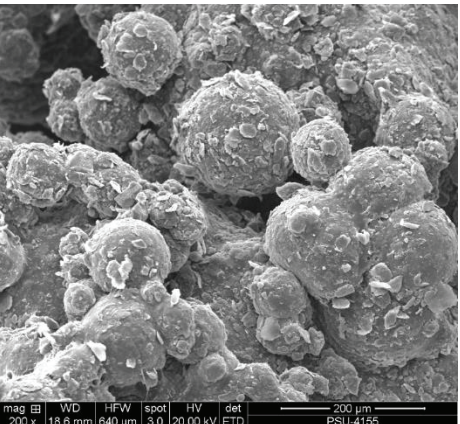
(ข) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยผงทัลคัม  
ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 20 มิลลิลิตร/นาที



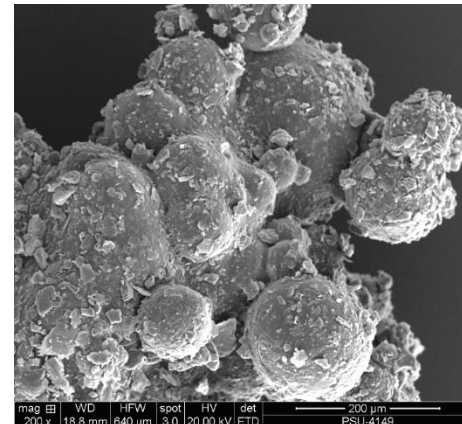
(ค) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยผงทัลคัม  
ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 40 มิลลิลิตร/นาที  
รูปที่ 8 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่กำลังขยาย 50 เท่า



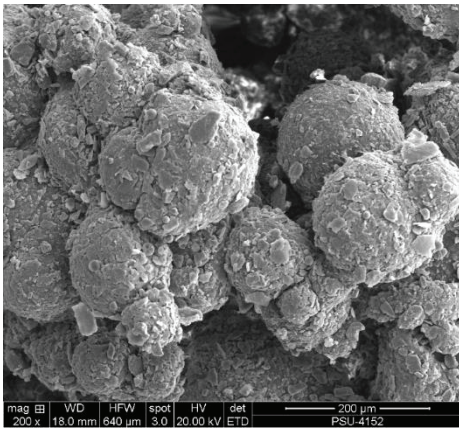
(ง) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยผงทัลคัม  
ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 60 มิลลิลิตร/นาที



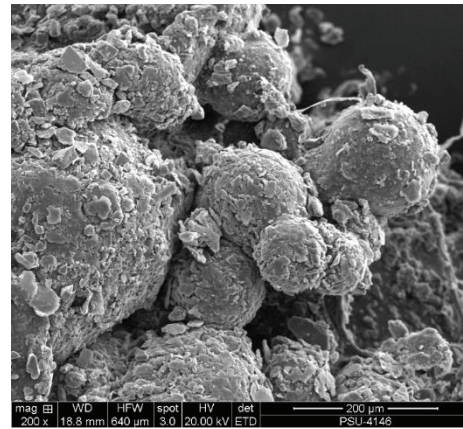
(ก) อนุภาคยางผงที่อัตราการไหล  
ของน้ำยาง 20 มิลลิลิตร/นาที



(ข) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยผงทัลคัม  
ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 20 มิลลิลิตร/นาที



(ค) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยผงทัลคัม  
ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 40 มิลลิลิตร/นาที  
รูปที่ 9 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่กำลังขยาย 200 เท่า



(ง) อนุภาคยางผงเคลือบด้วยผงทัลคัม  
ที่อัตราการไหลของน้ำยาง 60 มิลลิลิตร/นาที  
รูปที่ 9 ลักษณะทางสัณฐานของอนุภาคยางธรรมชาติผงที่กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติ โดยน้ำยางธรรมชาติแอมโมเนียสูงสามารถใช้ผลิตยางธรรมชาติผงด้วยกระบวนการพ่นแห้งเข้าไปในห้องอบที่มีอุณหภูมิสูง 180 °C เพื่อให้ น้ำยางแตกกระจายเป็นละอองฝอย แล้วไหลไปกับกระแสลมร้อนแบบพัลส์จนเม็ดยางแห้ง พร้อมกับพ่นสารเคลือบผิวของอนุภาคยางธรรมชาติ โดยในขั้นตอนนี้จะใช้ผงทัลคัมเป็นสารเคลือบผิวอนุภาคยางธรรมชาติผง เพื่อให้สามารถเตรียมยางธรรมชาติผงที่ไม่จับกันเป็นกลุ่มก้อนได้ จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคยางธรรมชาติผงที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม ขนาดเล็กระดับไมโครเมตร อยู่ในช่วง 50 ถึง 300  $\mu\text{m}$

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนในการทำวิจัยและเอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัยครั้งนี้ และภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนบริจาคน้ำยางข้นและผงทัลคัม

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Markets Insider, Global and China Natural Rubber Industry Report, USA (2017). On-line, URL: <http://markets.businessinsider.com/news/stocks/Global-and-China-Natural-Rubber-Industry-Report-2017-2021-1002266986>, access on 12/11/2018.
- [2] International Rubber Study Group (IRSG), Statistical Summary of World Rubber Situation, Thailand (2015). On-line, URL: [http://ap.ffc.agnet.org/ap\\_db.php?id=819](http://ap.ffc.agnet.org/ap_db.php?id=819), access on 12/11/2018.
- [3] Ashgriz, N. (2011). Handbook of atomization and sprays: Includes fundamental physics of the atomization process, the theoretical models and numerical simulations of spray, 1<sup>st</sup> edition, ISBN: 9-78144197-263-7, Springer, New York.
- [4] Sosnik, A. and Seremeta, K.P. (2015). Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 223, September 2015, pp. 40 - 54.
- [5] Buchi, Scale-up from the Buchi Mini Spray Dryer B-290 to the Niro MOBILE MINOR, Switzerland (2008). On-line, URL: [https://static1.buchi.com/sites/default/files/downloads/B-290\\_Scale-up\\_B-290\\_Niro\\_MOBILE\\_MINOR\\_en\\_01.pdf](https://static1.buchi.com/sites/default/files/downloads/B-290_Scale-up_B-290_Niro_MOBILE_MINOR_en_01.pdf), access on 15/11/2018.

ภาคผนวก ฉ.

บทความสำหรับเผยแพร่ 4

Method for producing natural rubber powder from rubber latex by spray drying process

## Method for producing natural rubber powder from rubber latex by spray drying process

Nattawoot Hasanachai<sup>1</sup>, Wiriya Thongruang<sup>1</sup>, Ekwipoo Kalkornsurapranee<sup>2</sup>, Peter Brenner<sup>1</sup>,  
and Chayut Nuntadusit<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai,  
Songkhla 90110, Thailand

<sup>2</sup>Department of Materials Science and Technology Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai,  
Songkhla 90112, Thailand

\*Corresponding author; E-mail: [chayut.n@psu.ac.th](mailto:chayut.n@psu.ac.th)

Received 31 October 2018; Revised 18 December 2018; Accepted 2 May 2019  
Published online 18 June 2019

---

### Abstract

This paper presents the method for producing natural rubber powder from natural rubber latex by a spray drying process under hot gas jet generated from a pulse combustor. The pulse combustor is valveless Helmholtz type, having single tailpipe and single air inlet. In the experiments, the flow rate of LPG fuel was fixed at 29 l/min. The rubber latex was sprayed from an air spray nozzle into the drying chamber. The latex droplets were heated by hot gas jet and dried in a chamber. The temperature of the hot gas jet in the chamber inlet was about 180 °C and the chamber outlet temperature was about 80 °C. The latex dispersion was spray-dried to obtain rubber particles. After the drying process, the morphology and particle size of natural rubber powders were analyzed by scanning electronic microscopy (SEM) and electron micro analyzer, respectively. The range of particle size was from approximately 50 µm to 300 µm.

**Keywords:** *natural rubber powder, nozzle configuration, particle size, pulse combustor, spray drying*

---

### 1. Introduction

Natural rubber (NR) is an important agricultural product of Thailand. In 2016, Thailand produced more than 4 million tons of natural rubber (Markets Insider, 2017). According to the International Rubber Study Group (IRSG) (2015), the sharing of natural rubber from Thailand accounted for about one-third of the world production. Most of it was exported in several forms such as rubber sheets, rubber block and concentrated latex.

At the present time, natural rubber latex is being produced manually from rubber trees, followed by filtering, then coagulating and drying the latex, then shipping the natural rubber in the form of a sheet or block from the countries of origin. In this way, even at the present, where the need of natural rubber is rather continuing to rise, rubber sheet and block are produced from rubber latex relying on manual labor. Further, the latex coagulating, rinsing and drying steps in particular the drying step, have a large influence on the viscosity of the rubber product. The current method for production of rubber from the latex cannot be said to be sufficient in view of the variation in rubber quality. Natural rubber is

mainly used for tires, gloves, condoms, balloons and other relatively high-value products (Praktikantin, 2017).

Natural rubber powder (NRP) has advantages in further production. It is better to mix with some chemical solutions or powders prior to vulcanization. So it also will be possible to make good compounds with different plastics and fillers. Beside this, it will save a lot of energy because will not grind the big chunks of rubber sheets or blocks.

Natural rubber powder will be widely used as an additive in polymer industries because of its mechanical properties with high tensile modulus. Natural rubber powder can be successfully prepared by a spray drying method. Spray drying processes, the generation of small and uniform droplets and the efficient precipitation of submicron particles is challenging (Sosnik & Seremeta, 2015). For the production of droplets in micrometer size there are many methods, such as ultrasonic atomization (Arpagaus, Collenberg, Rutti, Assadpour, & Jafari, 2018), de Laval type atomization in the supersonic spray dryer (Eggersdorfer, Koren, Stolovicki, Amstad, & Weitz, 2017) and liquid atomization by



electrospraying (Jaworek & Sobczyk, 2008) were developed. The advantages of a spray drying method will be to control the particle size, reproducible and scalable (Arpagaus & Schwartzbach, 2008). The produced powders are high in quality and have typically low moisture contents (Schmid, 2011), resulting in high shelf life stability (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015). However, it is difficult to prepare rubber nanoparticles using conventional methods due to inherent properties of rubber that were adhered together (Li et al., 2007). In the recent literature, there are several works that demonstrate the possibility to obtain ultrafine rubber powder, particles from micrometer to nanometer dimensions, based on rubber lattices, such as styrene-butadiene, acrylonitrile-butadiene and natural rubber. Some examples of works will be presented in the next paragraphs.

According to the literatures, they have reported the preparation of natural rubber powder by spray drying of Zinc oxide pre-vulcanized latex (Sae-Oui, Sirisinha, Sa-nguanthamarong, & Thaptong, 2010). However, instead of irradiation, they used a chemical reaction with sulfur and other additives, at 70 °C for 24 h. After this period, the latex was sprayed and dried to obtain the particles. It was also described to prepare natural rubber powder pre-vulcanized with Maltodextrin for reducing particle size. It was found that the starch of maltodextrin was used to encapsulate the latex particle which the free flowing and non-stick of rubber powder could be prepared. The inlet air temperature of 120 °C was found to be suitable to make the rubber powder. The mass ratio of rubber to maltodextrin should not be higher than 9:1 to obtain the free flowing rubber powder (Sopanon & Soottitanawat, 2011). It has been reported that research into the preparation of rubber powder from styrene-butadiene latex modified with a colloidal oxide. The SBR rubber latex can be prepared from the ratio of latex mixed with methyl methacrylate and silica colloid, spray drying, solid rubber latex. 40% by weight with a flow rate of 250 ml/h. The air inlet temperature of 120 °C and air outlet temperature of 75-80 °C in a Mini B-190 Buchi Labortechnik AG dryer. The particle size of rubber powder analyzed by SEM is from approximately 1 µm to 10 µm. Differential scanning calorimeter analysis indicated that the glass transition temperatures did not change significantly, and thermogravimetric analysis

showed thermal stability until approximately 200 °C (Paiva, Oliveira, & Gavioli, 2014). In addition, natural rubber powder was used as an additive in PLA (polylactid) because of its mechanical properties and crystallisation ability of PLA. The ductility of PLA has been significantly improved by blending with natural rubber, elongation break, the incorporation of natural rubber not only increased the crystallisation rate but also enhanced the crystallisation ability of PLA (Bitinis, Verdejoa, Cassagnau, & Lopez-Manchado, 2011).

Another interesting work about a method for producing natural rubber latex or synthetic rubber latex synthesized from emulsion polymerization is dried to produce rubber using a pulse combustor generating a shock wave. In the application, such a pulse combustor is used to spray and dry latex, having a solid concentration of 60% by weight or less in a drying chamber, under conditions of a frequency of 250 to 1200 Hz, more preferably 300 to 1000 Hz, and a temperature of not more than 140°C, more preferably 40 to 100°C (Daisuke, Tetsuji, & Yousuke, 2007).

## 2. Objectives

The aim of this present study relates to a method for producing natural rubber powder from a rubber latex by a spray drying process inside a drying chamber under hot gas jet generated from pulse combustor. Furthermore, the morphology and particle size of natural rubber powder were investigated.

## 3. Materials and methods

### 3.1 Experimental setup

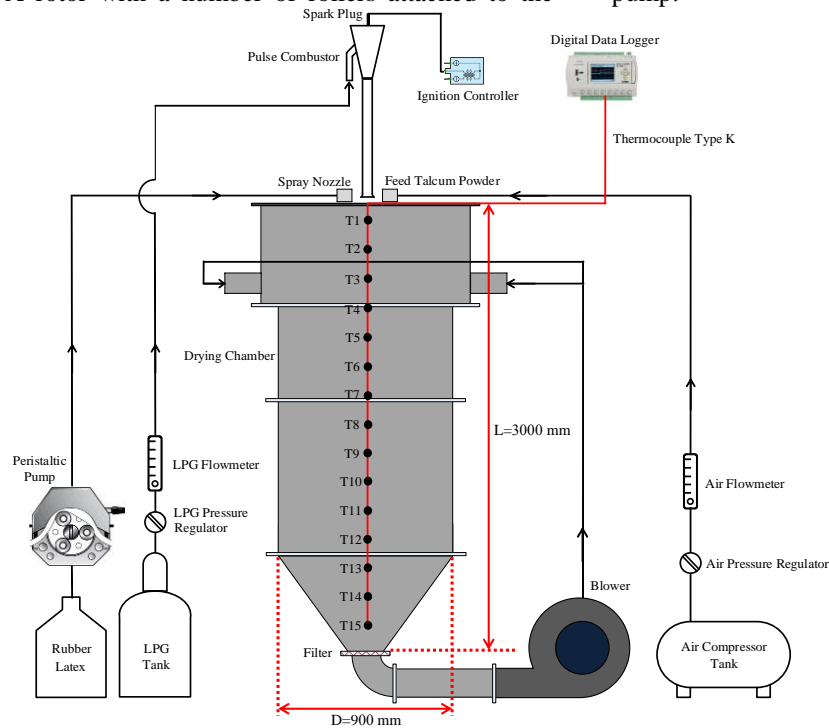
The experimental setup with the instrumentation is shown in Figure 1. The schematic diagram of the experimental setup consists of a Helmholtz-type pulse combustor, ignition controller, a drying chamber, blower, digital data logger, thermocouple (Type K), rotameter, a high compressor tank, peristaltic pump, rubber latex tank, spray nozzle and feed talcum powder. The K-type thermocouple uncertainty is  $\pm 0.5$  °C. The uncertainty of air flow meter is about 3.1%.

A drying chamber has a volume of about 1.95 m<sup>3</sup> (0.45 m radius and 3 m high). Inside the drying chamber thermocouple type K for measuring temperature variation was installed in the center of the chamber. The distance between

measuring positions (T<sub>1</sub>-T<sub>15</sub>) is 200 mm as shown in Figure 1.

For details of the spray drying nozzle, the fluid was contained within a flexible tube (silicone rubber tube) fitted inside a circular pump casing. A rotor with a number of rollers attached to the

external circumference of the rotor compresses the flexible tube. As the rotor turns, some part of the tube under compression is pinched thus forcing the fluid to be pumped through the tube. As the tube opens to its starting point the fluid is drawn to the pump.



**Figure 1** Experimental setup for producing natural rubber powder from a rubber latex by spray drying process

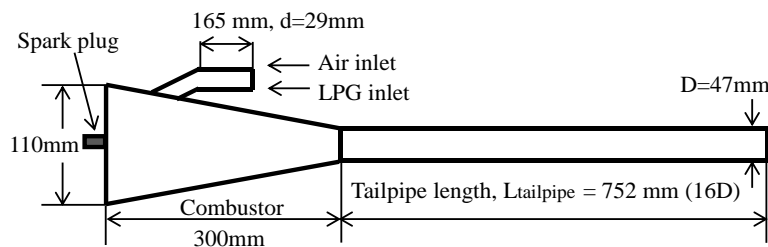


**Figure 2** The photograph of drying chamber

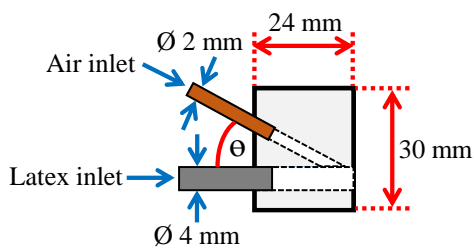


### 3.2 Model and parameters of pulse combustor

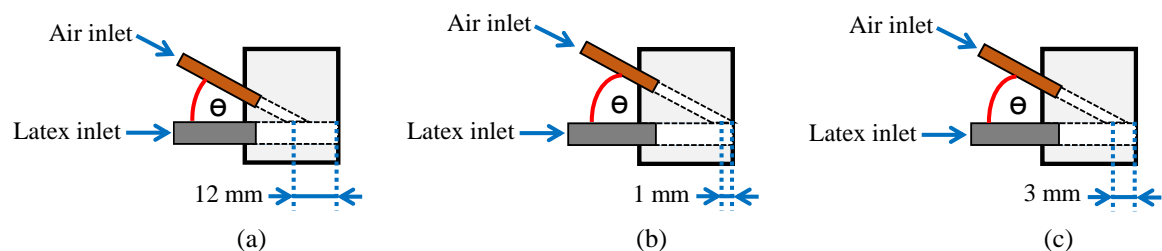
The pulse combustor used in this study is a Helmholtz-type without mechanical valves. A schematic of this combustor is shown in Figure 3. The pulse combustor consists of a combustion chamber, a single tailpipe and a single air inlet pipe. The dimension of the combustion chamber is 110 mm in diameter and 300 mm in length. The pulse combustor is made of stainless steel. A spark plug was installed at the bottom of combustion chamber for ignition during starting. The dimension of the air inlet pipe is 29 mm in diameter and 165 mm in length. The dimension of the tailpipe is  $D=47$  mm in diameter. The length of tailpipe is 752 mm (16D).



**Figure 3** Schematic diagram of a Helmholtz-type pulse combustor



**Figure 4** Model and parameters of spray nozzle



**Figure 5** The model of spray nozzles at different air inlet positions: (a) position 1, (b) position 2 and (c) position 3

### 3.3 Nozzle configurations

Figure 4 shows the configuration and dimensions of the spray nozzle which used in this study. The spray nozzle consists of the air inlet and rubber latex inlet tubes. The air inlet tube has 2 mm in diameter and the rubber latex inlet has 4 mm in diameter. The spray angle of the nozzle orifice was 40 degrees. The flow rate of the latex is adjusted by the peristaltic pump through silicone rubber tube. The air from the compressor tank was introduced through the air inlet of spray nozzle. The flow rate was controlled by a rotameter. Simultaneously, the air is flowing through the nozzle and then impinges through the rubber latex and breaking latex into small particles. Figure 5 shows the models of the spray nozzles at different air inlet positions used in this present study.

### 3.4 Materials and procedure

High ammonia natural rubber latex (HA-60% by weight) was purchased from Chalong latex industry co., Ltd. (Songkhla, Thailand). The formulation of natural rubber latex was shown in Table 1. The talcum powder was obtained from the Department of Materials Science and Technology, Prince of Songkla University (Hatyai, Thailand).

In the experiments, the supplied flow rate of LPG fuel was fixed at 29 l/min. The drying process starts with the LPG rotameter and air rotameter used to measure the flow rates of fuel and air, respectively. The LPG fuel and compressed air were injected into the center of the air inlet pipe for mixing inside the combustion chamber. A spark plug was installed at the bottom of the combustion chamber for starting the system. Both spark plugs and compressed air were used only in the beginning for starting the process.

The air was blown with a blower through a stainless steel pipe into the air inlet on the top of the drying chamber. The inverter controls the speed of the blower. The temperature variation inside the drying chamber was measured by using a thermocouple type K connected to digital data logger storage.

Conditions of the fixed nozzle air flow rate at 90 l/min, the inlet air temperature of 180 °C and relative humidity in the drying chamber of 38-55% by weight, fixed feed talcum powder flow rate at 60 ml/min and the mass flow rate of rubber latex fed into the spray nozzle varied in range of

( $Q_L$ ) 20-60 ml/min were studied. After feeding latex into the spray nozzle, rubber particles dispersed around inside the drying chamber and dropped to the bottom of the chamber. At the near outlet drying chamber a filter was installed for the collection of rubber particles.

### 3.5 Micrograph and size analysis of rubber powder particles

The morphology of rubber particles prepared by spray drying depends on the drying conditions and the feed properties. Dense, hollow, porous, and encapsulated structures with spherical, wrinkled, shriveled outcomes are possible (Arpagaus, John, Collenberg, & Rutti, 2017). The morphology of the samples was observed using a scanning electron microscopy (SEM), Quanta 400, FEI, (Czech Republic) at 20 kV. The particle size of rubber was determined by an electron micro analyzer.

### 3.6 Mechanical properties testing

The mechanical testing is one of the major elements in describing the properties of natural rubber production for application. This research investigates the mechanical properties of two different natural rubber. The tensile testing of the samples was measured according to the ASTM D412 (Die C) standard. It was used for measuring the hardness of natural rubber by piercing the needle into the testing samples by Shore A according to ASTM D2240 standard.

**Table 1** Formulation of the HA 60 % by weight of natural rubber latex

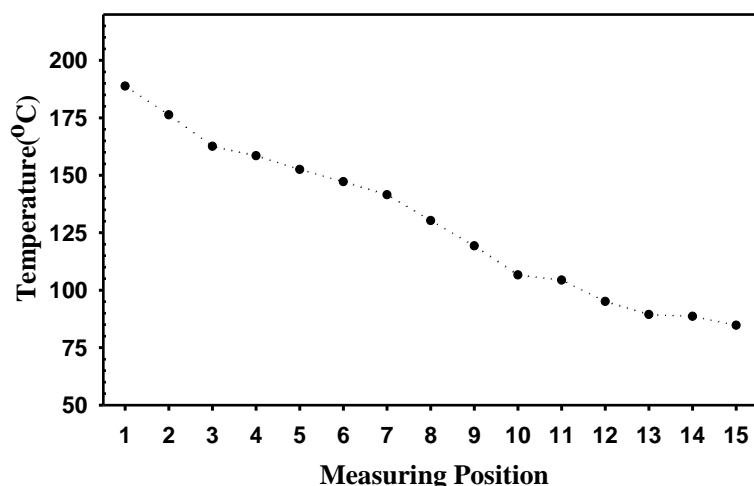
Properties	Test Results	H.A. Limits
Total solids content	61.73 %	≥ 61.50
Dry rubber content	60.14 %	≥ 60.00
Ammonia content (on total weight)	0.70 %	≥ 0.60
Ammonia content (on water phase)	1.829 %	≥ 1.60
Non rubber solid	1.59 %	≥ 2.00
pH	10.56	≥ 10.50
KOH number	0.56	≤ 1.00
Volatile fatty acid number	0.029	≤ 0.20
Mechanical stability time @55% T.S. (ASTM)	1,100 Secs	≥ 650
Mg <sup>2+</sup>	17.00	≤ 30.00 PPM
Colour of latex	White	White
Colour of film	Normal	Normal
Odour of latex	Sweet	Sweet

## 4. Results and discussions

### 4.1 Temperature variation inside drying chamber

Figure 6 shows the temperature variation inside the drying chamber at the different measuring positions measured with thermocouples probe type K. It was found that the position near

the tailpipe outlet at  $T_1$  gives the highest temperature at 180 °C and the measuring position near the drying chamber outlet at  $T_{15}$  gives the lowest temperature at 80.5 °C. The temperature distribution of hot air decreased linearly in the drying chamber.



**Figure 6** Temperature variation inside the drying chamber according to the measuring position

### 4.2 Effect of spray nozzle

Figure 7 shows the photographs of latex spraying profiles for different nozzle configurations of different air inlet positions. The liquid and air flow rate fed into the nozzle were set at 20 ml/min and 90 l/min, respectively.

Figure 7(a) shows the sprayed latex near the outlet of nozzle. It obviously generated large droplets and cannot be controlled. In the Figure 7(b) it can be seen that the latex droplets from the spray nozzle gets more aerosol characteristics compared to the air inlet position 1. It was found that the small droplets make a fog in the middle of the beam. But the diameter of the latex droplets is relatively large. So the present study decided to use the nozzle model c (see Figure 5(c)) because all the beams consist of small droplets.

As the results are shown in the Figure 7(b) and (c), smaller droplets of latex spray was obtained because the air inlet position was placed near the outlet of the nozzle. These results indicated from the air inlet position 3, Figure 7(c) the sprayed latex was smoother than air inlet position 2, Figure 7(b) and could be controlled droplet sizes. The optimum position for the air inlet position of the spray nozzle configuration was position 3, as seen in Figure 7(c). This was

because the latex spray does not hit the surface of the drying chamber at this position.

### 4.3 Morphology of natural rubber powder

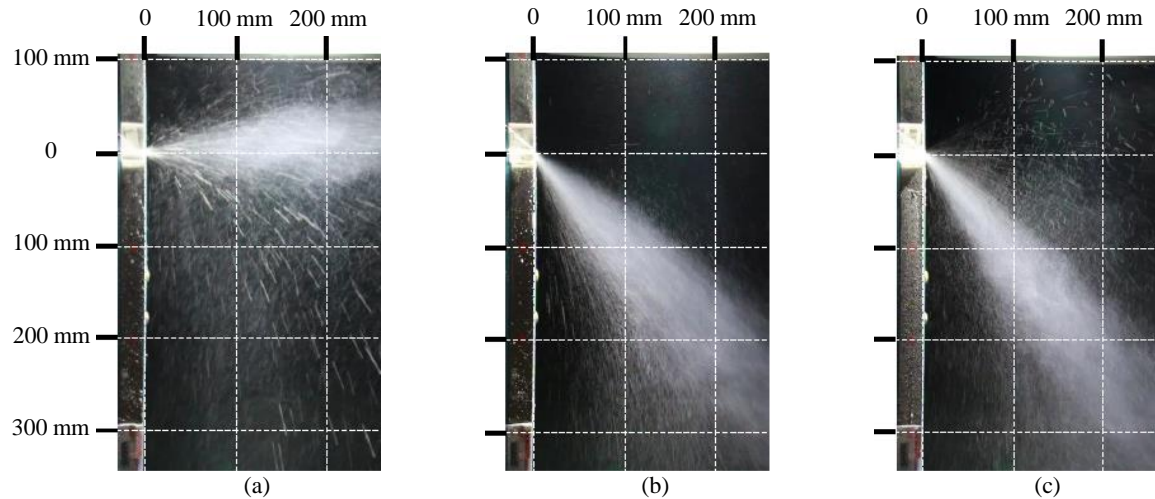
The morphology obtained from the SEM was shown in Figure 8 which a particle size of about 50-300  $\mu\text{m}$ . The comparison for SEM micrographs under  $\times 500$  of magnification of Figure 8(a) the natural rubber particles which were produced by spray drying without talcum powder and Figure 8(b) the natural rubber particles coated with talcum powder. These results showed that the particles without talcum powder stuck together. Meanwhile, characteristic of the natural rubber particles coated with talcum powder were spherical. It is found that the talcum powder could be used for coating or encapsulating the surface of natural rubber particles.

The morphology of natural rubber particles was characterized by scanning electronic microscopy (SEM) and the photomicrographs. The samples are shown in Figure 9(a-h). Figure 9 shows the SEM micrographs for the natural rubber particle at different magnifications.

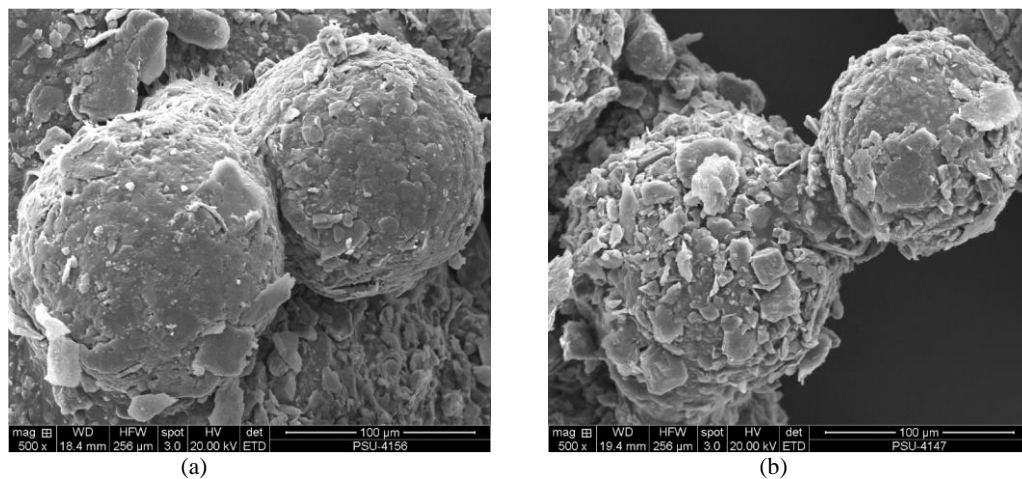
It was clearly shown in Figure 9(a) and (b) that from the SEM for spray dried particles without talcum powder they were sticking together.

Besides this previous result, the morphology of spray dried rubber latex and talcum powder at different mass ratio was shown in Figure 9(c-h). The natural rubber particles from spray drying were spherical in shape and had more agglomeration observed at the higher flow rate of the feed latex ratio.

Meanwhile, the flow rate of fed latex was elevated to 60 ml/min, the morphology of particles changed, Figure 9(g). Spherical particles and a large size distribution of about 100  $\mu\text{m}$  and above 300  $\mu\text{m}$  were observed.



**Figure 7** Effect of nozzle configurations at different air inlet positions: (a) position 1, (b) position 2 and (c) position 3

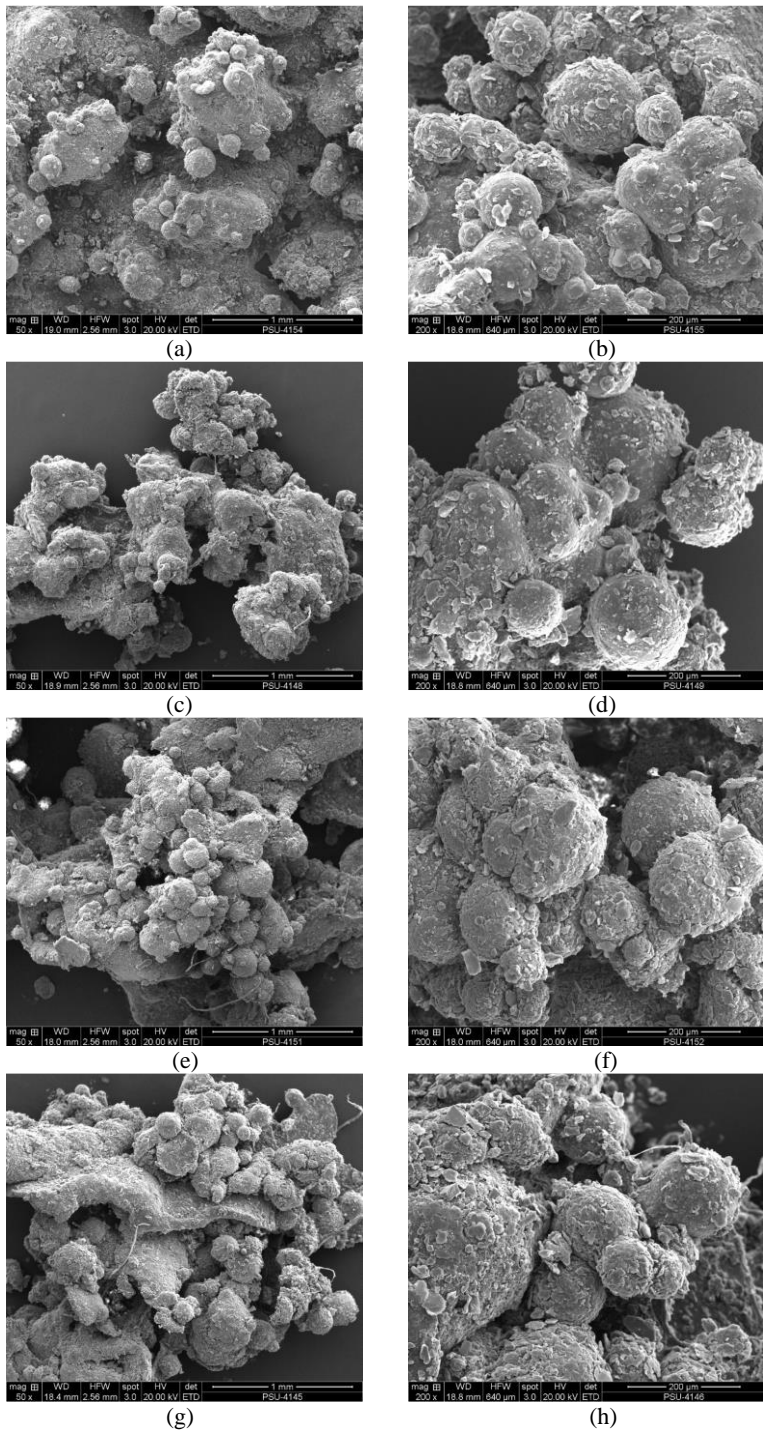


**Figure 8** Comparison of SEM micrographs under  $\times 500$  magnification (a) natural rubber particles and (b) natural rubber particles coated with talcum powder

#### 4.4 Mechanical properties

The results of mechanical properties is summarized in Table 2. It can be observed that the tensile strength of natural rubber powder was strongly dependent on coated with talcum powder. Moreover, the Young's modulus obtained with natural rubber powder is slightly higher than that obtained with rubber block STR 5L. The elongation reduced due to the coating of natural

rubber powder with talcum powder, which indicates the quality of the material that may be talcum powder mixed in natural rubber particles. The tensile strength of natural rubber powder and Young's modulus were 16.07 and 2.22 MPa, respectively, while the elongation at break and hardness of natural rubber powder equal to 578 % and 54.40 respectively.



**Figure 9** The SEM micrographs for the natural rubber (NR) particles at different magnifications containing: (a) NR particles at magnification  $\times 50$  for  $Q_L = 20$  ml/min (b) NR particles at magnification  $\times 200$  for  $Q_L = 20$  ml/min (c) NR particles coated with talcum at magnification  $\times 50$  for  $Q_L = 20$  ml/min (d) NR particles coated with talcum at magnification  $\times 200$  for  $Q_L = 20$  ml/min (e) NR particles coated with talcum at magnification  $\times 50$  for  $Q_L = 40$  ml/min (f) NR particles coated with talcum at magnification  $\times 200$  for  $Q_L = 40$  ml/min (g) NR particles coated with talcum at magnification  $\times 50$  for  $Q_L = 60$  ml/min (h) NR particles coated with talcum at magnification  $\times 200$  for  $Q_L = 60$  ml/min

**Table 2** The comparison of mechanical properties between rubber block (STR 5L) and natural rubber powder (NRP)

Mechanical properties	STR 5L	NRP
Tensile strength (MPa)	10.52±1.32	16.07±0.94
100% Modulus (MPa)	0.60±0.05	2.22±0.05
Elongation at break (%)	788±76	578±23
Hardness (Shore A)	29.00±0.71	54.40±0.54

## 5. Conclusion

This paper has presented a method for producing natural rubber powder from a rubber latex. The high ammonia natural rubber latex could produce natural rubber powder followed by spray drying of resulting dispersions with the technique coating or encapsulating the surface of rubber particle with talcum powder. Talcum powder could be used to coat the surface and separate the natural rubber powder while drying. The spherical rubber particles with micrometric sizes in the range were 50 µm to 300 µm.

## 6. Acknowledgements

This work was supported by the Graduate School and Faculty of Engineering, Prince of Songkla University. We also thank the Department of Materials Science and Technology, Prince of Songkla University for donating the latex and talcum powder.

## 7. References

- Anandharamkrishnan, C., & Ishwarya, P. S. (2015). Chapter 8: *Spray drying for nanoencapsulation of food components. Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation* (pp. 180-197), Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Arpagaus, C., & Schwartzbach, H. (2008). Scale-up from the Buchi Mini Spray Dryer B-290 to the Niro MOBILE MINOR, best@buchi Information Bulletin, 52/2008.
- Arpagaus, C., John, P., Collenberg, A., & Rutti, D. (2017). Chapter 10: *Nanocapsules formation by nano spray drying* (pp. 346-401) S. M. Jafari, Nano encapsulation Technologies for the Food and Nutraceutical Industries, Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-809436-5.00010-0
- Arpagaus, C., Collenberg, A., Rutti, D., Assadpour, E. & Jafari, S. M. (2018). Nano spray drying for encapsulation of pharmaceuticals. *International Journal of Pharmaceutics*, 546(1-2), 194-214. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2018.05.037
- Bitinis, N., Verdejoa, R., Cassagnau, P., & Lopez-Manchado, M.A. (2011). Structure and properties of polylactide/natural rubber blends. *Journal of Materials Chemistry and Physics*, 129, 823-831. DOI 10.1016/j.matchemphys.2011.05.016
- Daisuke, K., Tetsuji, K., & Yousuke, K. 2006, Method for producing rubber from rubber latex, *United States Patent*, 0189732 A1
- Eggersdorfer, M. L., Koren, V., Stolovicki, E., Amstad, E., & Weitz, D. A. (2017). Rapid production of submicron drug substance particles by supersonic spray drying. *Crystal Growth and Design*, 17(4), 2046-2053.
- International Rubber Study Group (IRSG). (2015). Statistical Summary of World Rubber Situation. Retrieved November 30, 2017, from [http://ap.fftc.agnet.org/ap\\_db.php?id=819](http://ap.fftc.agnet.org/ap_db.php?id=819).
- Jaworek, A., & Sobczyk, A. T. (2008). Electro spraying route to nanotechnology: An overview. *Journal of Electrostatics*, 66(3-4), 197-219.
- Li, D., Xia, H., Peng, J., Zhai, M., Wei, G., Li, J., & Qiao, J. (2007). Radiation preparation of Nano powdered styrene-butadiene rubber (SBR) and its toughening effect for polystyrene and high-impact polystyrene, *Radiation Physics and Chemistry*, 76(11-12), 1732-1735.
- Markets Insider. (2017). Global and China Natural Rubber Industry Report. Retrieved October 12, 2017, from <http://markets.businessinsider.com/news/stocks/Global-and-China-Natural-Rubber-IndustryReport-2017-2021-1002266986>.
- Paiva, L. B. de, Oliveira, A. M. de, & Gavioli, R. R. (2014). Preparation and properties of rubber powder from modified-SBR latex by spray drying process, *Powder Technology*, 264, 507-513. Retrieved

- from  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591014005270?via%3DiHub>
- Praktikantin. (2017). Rubber Farm Economics in Thailand. Retrieved October 12, 2017, from <https://pugnatorius.com/rubber-farm-investments/>.
- Sae-Oui, P., Sirisinha, C., Sa-nguanthammarong, P., & Thaptong, P. (2010). Properties and recyclability of thermoplastic elastomer prepared from natural rubber powder (NRP) and high density polyethylene (HDPE). *Journal of Polymer Test*, 29(3), 346-351. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2009.12.010
- Schmid, K. (2011). *Spray drying of protein precipitates and evaluation of the nano spray dryer B-90*. (PhD's thesis, Ludwig-Maximilians-University, Munich). Retrieved from [https://edoc.ub.uni-muenchen.de/13132/1/Schmid\\_Katja.pdf](https://edoc.ub.uni-muenchen.de/13132/1/Schmid_Katja.pdf)
- Sopanon, P., & Soottitanawat, A. (2011). Preparation of natural rubber powder by spray drying. *TICHe International Conference*, November 10 – 11, 2011 at Hatyai, Songkhla THAILAND, 004-006.
- Sosnik, A., & Seremeta, K. P. (2015). Advantages and challenges of the spray-drying technology for the production of pure drug particles and drug-loaded polymeric carriers. *Advances in Colloid and Interface Science*, 223, 40-54. DOI: 10.1016/j.cis.2015.05.003

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นาย อนุรักษ์ หัสนะชัย	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5910120025	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2558

## ทุนการศึกษา

ทุนศึกษีกันกุญแจวิศวกรรมศาสตรปีการศึกษา 2559

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

## (1) ผลงานการประชุมวิชาการ (Conference paper)

อนุรักษ์ หัสนะชัย และ ชยุต นันทดุษิต, 2560, “การศึกษาการแตกตัวเป็นละอองของยางธรรมชาติด้วยเจ็ทลมร้อนจากห้องเผาไหม้แบบพัลส์”, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16 ระหว่างวันที่ 23-24 กุมภาพันธ์ 2560 ณ ศูนย์ฝึกอบรมธนาคารไทยพาณิชย์ จังหวัดเชียงใหม่

Nattawoot Hasanachai, Pathomporn Narato and Chayut Nuntadusit, 2018, “Flow and Heat Transfer Characteristics of Hot Gas Jet from Pulse Combustor: Effect of Tailpipe Length”, The 3<sup>rd</sup> International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT2018), Phang-Nga, Thailand, April 19 - 22, 2018.

อนุรักษ์ หัสนะชัย, Peter Brenner, วิริยะ ทองเรือง, เอกวิญ กาลกรณ์สุรปราณี และ ชยุต นันทดุษิต, 2561, “การผลิตยางธรรมชาติผงจากน้ำยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย”, การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5 วันที่ 14 ธันวาคม 2561 ณ โรงแรมเจริญธานี อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น



**(2) บทความวิชาการ (Journal paper)**

Nattawoot Hasanachai, Wiriya Thongruang, Ekwipoo Kalkornsurapranee, Peter Brenner and Chayut Nuntadusit, 2019, “Method for producing natural rubber powder from rubber latex by spray drying process”, Journal of Current Science and Technology (JCST), Vol. 9 No. 1 January-June, pp. 49-58.