โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมโฟมพอลิไอโซไซยานูเรตโดยใช้ผงฟูเป็นสารช่วยฟู
Preparation of polyisocyanurate foams by using baking powder as blowing agent

ชื่อนิสิต นายนพรุจ วุฒินันติวงศ์ **เลขประจำตัว** 5833046523
ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2561

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงงานทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงงานทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด
The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

การเตรียมโฟมพอลิไอโซไซยานูเรตโดยใช้ผงฟูเป็นสารช่วยฟู

Preparation of polyisocyanurate foams by using baking powder as blowing agent

โดย

นายนพรุจ วุฒินันติวงศ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

โครงการ การเตรียมโฟมพอลิไอโซไซยานูเรตโดยใช้ผงฟูเป็นสารช่วยฟู

โดย นายนพรุจ วุฒินันติวงศ์

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ขนิษฐา พุดหอม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. นวลพรรณ จันทรศิริ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุษยรัตน์ ธรรมพัฒนกิจ)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี

(รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ 14 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2562

ชื่อโครงการ การเตรียมโฟมพอลิไอโซไซยานูเรตโดยใช้ผงฟูเป็นสารช่วยฟู
ชื่อนิสิตในโครงการ นายนพรุจ วุฒินันติวงศ์ เลขประจำตัว 5833046523
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. นวลพรรณ จันทรศิริ
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งและโฟมพอลิไอโซไซยานูเรตโดยใช้ผงฟูเป็นสารช่วยฟูร่วมกับการใช้น้ำเป็นสารฟู โดยจะศึกษาผลของปริมาณสารฟูและปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต (isocyanate index) ต่อสมบัติของโฟมที่เตรียมได้ ปริมาณสารฟูที่ใช้ศึกษา คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 กรัม ดัชนีไอโซไซยาเนตที่ใช้ศึกษา คือ index 100, 200, 250 และ 300 สมบัติของโฟมที่ทำการศึกษา คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟม สมบัติทางกายภาพ ลักษณะและความเร็วในการฟู และสมบัติการหน่วงไฟของโฟม

จากการศึกษาพบว่าปริมาณผงฟูที่เหมาะสมสำหรับใช้ผสมกับน้ำเพื่อเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งและโฟมพอลิไอโซไซยานูเรต คือ 1.0 กรัม ซึ่งทำให้ได้โฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งที่มีความหนาแน่น 35.0 kg/m^3 และได้โฟมพอลิไอโซไซยานูเรตที่มีความหนาแน่น 36.7, 45.0 และ 47.3 kg/m^3 เมื่อเตรียมที่ isocyanate index 200, 250 และ 300 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต จะทำให้โฟมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น มีสมบัติการหน่วงไฟดีขึ้น แต่จะมีเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ช้าลง นอกจากนี้พบว่า โฟมพอลิไอโซไซยานูเรตมีสมบัติการหน่วงไฟที่ดีกว่าโฟมพอลิยูรีเทน คือ โฟมพอลิไอโซไซยานูเรตติดไฟยากกว่า ลามไฟช้ากว่า และแสดงสมบัติการดับไฟได้เอง

คำสำคัญ: โฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็ง, โฟมพอลิไอโซไซยานูเรต, ผงฟู, สารฟู

Project Title Preparation of polyisocyanurate foams by using baking powder as blowing agent
Student name Nopparud Wutthinuntiwong Student ID 5833046523
Advisor name Associate Professor Nuanphun Chantarasiri, Ph.D.
Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic year 2018

Abstract

This research involved the preparation of rigid polyurethane (RPUR) foams and polyisocyanurate-polyurethane (PIR-PUR) foams by using baking powder combined with water as blowing agent. Effect of the amount of baking powder and isocyanate index on the properties of the prepared foam was studied. The amount of baking powder used in this research were 0.5, 1.0 and 1.5 grams. Isocyanate index was 200 250 and 300. Properties of the prepared foams such as time of the reaction of foams, physical properties, nature and speed of rise profile and flammable properties of foams were investigated.

The experimental results showed that the amount of baking powder that was suitable for mixing with water for preparation of rigid polyurethane foams and polyisocyanurate foams was 1.0 g. Rigid polyurethane foams having density of 35.0 kg / m^3 and polyisocyanurate foams having density of 36.7, 45.0 and 47.3 kg / m^3 were obtained when prepared with isocyanate index of 200, 250 and 300, respectively. Increasing the amount of isocyanates would increase the foam density, better flame retardant property but it would have a slow reaction time. In addition, it was found that polyisocyanurate foams have a better flame retardant property than polyurethane foams. Polyisocyanurate foams are less flammable, less flame retardant and have self-extinguishing property.

Keywords: rigid polyurethane foams, polyisocyanurate foams, baking powder, blowing agent

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัย และรายงานฉบับนี้สำเร็จไม่ได้หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร. นวลพรรณ จันทรศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ อีกทั้งสละเวลาในการให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆมาอย่างดีโดยตลอด ขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ขนิษฐา พุดหอม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุษยรัตน์ ธรรมพัฒนกิจ ที่ยินดีสละเวลาในการตรวจทานแก้ไข และให้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบ senior project ครั้งนี้

ขอบคุณนิสิตปริญญาเอกปริญญาโทในกลุ่มวิจัย Supramolecular Chemistry ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาให้ความเกี่ยวกับเทคนิคการใช้เครื่องมือต่างๆและให้ความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

ขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณบริษัท iRPC Public Company Limited ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี (Polimax® 4221, RayCore B9001, Tegostab® B8460, DMCHA และ Dabco®K-15) ที่ใช้ในการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนและโฟมพอลิไอโซไซยานูเรต

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณกำลังใจ และความช่วยเหลือจากครอบครัว รวมทั้งเพื่อน และพี่ในภาควิชาเคมี ผู้วิจัยขอระลึกในความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญแผนภาพ	ซ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ **1** บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ	9
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	9
บทที่ 2 การทดลอง	10
2.1 เครื่องมือ	10
2.2 สารเคมี	10
2.3 การสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งโดยใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงชนิดเดียว	10

หน้า

2.4 การสังเคราะห์โฟม RPUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู 12

2.5 การสังเคราะห์โฟม PIR-PUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู 13

2.6 การคำนวณปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตในสูตรโฟม RPUR (NCO index 100) 15

2.7 การคำนวณปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตในสูตรโฟม PIR-PUR (NCO index 200, 250 และ 300) 16

2.8 การศึกษา % isocyanate conversion (%NCO conversion) ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR ด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy 18

บทที่ 3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง 19

3.1 การสังเคราะห์โฟม RPUR และโฟม PIR-PUR 19

3.2 ลักษณะและความเร็วในการฟู (rise profile) ของโฟม 27

3.3 การศึกษา isocyanate conversion 28

3.4 การทดสอบการติดไฟ (burning test) ของโฟม RPUR และ โฟม PIR-PUR 32

บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 35

4.1 สรุปผลการทดลอง 35

4.2 ข้อเสนอแนะ 36

เอกสารอ้างอิง 37

ภาคผนวก 39

ประวัติผู้วิจัย 59

สารบัญแผนภาพ

แผนภาพที่	หน้า
1.1 gelling reaction	2
1.2 blowing reaction โดยใช้น้ำเป็นสารฟู	2
1.3 blowing reaction โดยใช้ผงฟูเป็นสารฟู	3
1.4 trimerization reaction	3
1.5 กลไกการเร่งปฏิกิริยา gelling reaction และ blowing reaction ของ 3 แอมีน	3
1.6 กลไกการเร่งปฏิกิริยา trimerization reaction ของ KOct	4
2.1 ขั้นตอนการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู	11
2.2 ขั้นตอนการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู	13

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 สูตรในการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟูและใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ NCO index 100 11

2.2 สูตรในการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูและใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ NCO index 100 13

2.3 สูตรในการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูและใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ NCO index 200, 250 และ 300 13

2.4 ค่า wavenumber ของหมู่ฟังก์ชันของโฟม PIR-PUR 18

3.1 ผลการทดลองเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟม ความหนาแน่น ลักษณะทางกายภาพ และความสูงของโฟม RPUR ที่เตรียมโดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100 เปรียบเทียบกับโฟมอ้างอิง 20

3.2 ผลการทดลองเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟม ความหนาแน่น ลักษณะทางกายภาพ และความสูงของโฟม PIR-PUR ที่เตรียมโดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100, 200, 250 และ 300 เปรียบเทียบกับโฟมอ้างอิง 23

3.3 peak area ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จาก IR spectrum ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR 31

3.4 %NCO conversion และอัตราส่วนระหว่าง PIR-PUR ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR 32

3.5 ระยะการเผาไหม้ เวลาที่ดับไฟ และลักษณะการเผาไหม้ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูสรุปผลการทดลอง 33

ตารางที่ **หน้า**

ก.1 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100 40

ก.2 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100 42

ก.3 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100 43

ก.4 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100 44

ก.5 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100 45

ก.6 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100 46

ก.7 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100 47

ก.8 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.5 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100 48

ก.9 ผลการทดลองการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 200 49

ก.10 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 200 50

ก.11 ผลการทดลองการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 250 51

ตารางที่ **หน้า**

ก.12 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 250 52

ก.13 ผลการทดลองการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 300 53

ก.14 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 300 54

ก.15 rise profile โฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100 55

ก.16 rise profile โฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100 56

ก.17 rise profile โฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 200 57

ก.18 rise profile โฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 200 58

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 สูตรโครงสร้างของสารประกอบไอโซไซยาเนต (PMDI) และพอลิออลที่ใช้เตรียมโฟม 14

2.2 สูตรโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา DMCHA และ KOct 14

2.3 สูตรโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวซิลิโคน 14

3.1 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู 21

3.2 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5 g เป็นสารฟู 22

3.3 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู 22

3.4 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.5 g เป็นสารฟู 22

3.5 โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 200 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู 25

3.6 โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 250 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู 25

3.7 โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 300 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู 26

3.8 rise profile ของโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและน้ำกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู และ โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและน้ำกับผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index ต่างๆ 27

3.9 IR spectra ของโฟม RPUR และ PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียว 29

3.10 IR spectra ของโฟม RPUR และ PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู 30

3.11 ชิ้นงานโฟมหลังทดสอบการติดไฟ 32

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

โฟมพอลิไอโซไซยานูเรตหรือเรียกชื่อเต็มว่าโฟมพอลิไอโซไซยานูเรต-พอลิยูรีเทน [polyisocyanurate -polyurethane (PIR-PUR) foam] เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากโฟม PIR-PUR มีสมบัติที่โดดเด่น เช่น เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าโฟมพอลิยูรีเทน (PUR foam) สามารถกันเสียงและกันการรั่วซึม มีน้ำหนักเบา มีความคงทนต่อแรงอัดและแรงดึง ไม่อมน้ำ มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ช่วยกันการลามไฟได้ดี และมีต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นต้น การใช้งานโดยส่วนใหญ่ของโฟม PIR-PUR เช่น ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนภายในอาคารบ้านเรือน ซึ่งทำให้บ้านเย็นลง สามารถช่วยประหยัดพลังงานและคลายร้อนได้ไปในตัว และใช้เป็นอุปกรณ์ในตู้เย็นหรือเครื่องทำความเย็น เป็นต้น (1-3)

สำหรับการเตรียมโฟม PIR-PUR ซึ่งเป็นโฟมที่มีความหนาแน่นสูง จำเป็นต้องใช้สารฟู (blowing agent) เช่น สารไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน 141บี (HCFC-141b, 1,1-dichloro-1-fluoroethane) เพื่อช่วยปรับให้โฟม PIR-PUR มีความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการใช้งาน (4) แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารฟูดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารประกอบประเภทไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอนเมื่อดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเล็ต โมเลกุลจะแตกตัวให้คลอรีนอะตอมเดี่ยว ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโอโซน เกิดก๊าซคลอรีนโมโนออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน ส่งผลให้เกิดการทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน (5) จากผลกระทบดังกล่าวประเทศไทยจึงได้มีการร่างกฎหมายเพื่อลดการใช้สารฟูชนิดนี้ โดยมีการเริ่มใช้ในปี พ.ศ. 2556 (6) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการลดความหนาแน่นของโฟม PIR-PUR โดยใช้สารฟูที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน คือ ผงฟู (baking soda) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างโซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, $NaHCO_3$) และแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate, $Ca(H_2PO_4)_2$) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีและสลายตัวให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO_2) ที่จัดเป็นสารฟูชนิดเคมี (chemical blowing agent) ทำให้โฟมเกิดการฟูได้ โดยทั้งโซเดียมไบคาร์บอเนตและแคลเซียมฟอสเฟตจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมโฟม PIR-PUR จึงไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ ของโฟม การเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้สารฟูชนิดนี้ นอกจากจะช่วยลดปริมาณการใช้สารฟูประเภทไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอนแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตโฟม PIR-PUR ได้อีกด้วย เนื่องจากผงฟูมีราคาถูก และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป (7) โดยโฟม PIR-PUR ที่เตรียมได้จะนำมาศึกษาหมู่

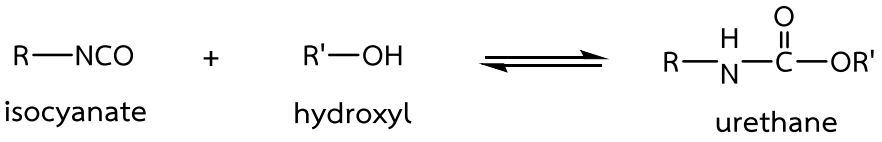
ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy ศึกษาเวลาการเกิดปฏิกิริยา (reaction time) ศึกษาการฟูของโฟม (rise profile) วัดความหนาแน่น (apparent density) และทำการทดสอบการติดไฟ (flammability)

1.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 ปฏิกิริยาเคมี (reaction)

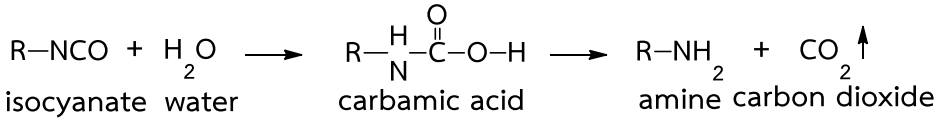
การสังเคราะห์โฟม PIR-PUR โดยใช้สารฟูเป็นของผสมระหว่างน้ำและผงฟู มีปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญ 4 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) หรือปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelling reaction) ปฏิกิริยาการฟู (blowing reaction) ที่เกิดจากน้ำและผงฟู และ ปฏิกิริยาไตรเมอไรเซชัน (trimerization) ซึ่งแสดงในแผนภาพที่ 1.1-1.4 ดังนี้

ปฏิกิริยาที่ 1 ปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelling reaction) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนของสารตั้งต้น 2 ชนิด คือ สารประกอบไอโซไซยาเนต (isocyanate) และพอลิออล (polyol) ทำให้ได้สายโซ่พอลิยูรีเทน (-NH-COO-) (1-3)



แผนภาพที่ 1.1 gelling reaction

ปฏิกิริยาที่ 2 ปฏิกิริยาการฟู (blowing reaction) ที่เกิดจากน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบไอโซไซยาเนตกับน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสารฟูได้ผลิตภัณฑ์คือ แอมีน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้โฟมเกิดการฟู (1-3)



แผนภาพที่ 1.2 blowing reaction โดยใช้น้ำเป็นสารฟู

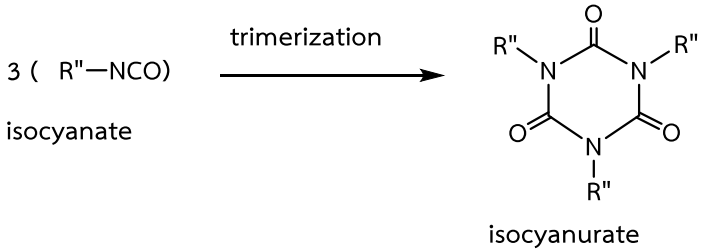
ปฏิกิริยาที่ 3 เป็น blowing reaction ที่เกิดจากผงฟู เป็นปฏิกิริยากรด-เบสที่เกิดจากการสลายตัวของผงฟูให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงจัดเป็นปฏิกิริยา blowing reaction ของโฟมอีกชนิดหนึ่ง โดยเมื่อโซเดียมไบคาร์บอเนตรวมกับน้ำจะทำปฏิกิริยากับเกลือของกรดได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (7)

$$NaHCO_3 + H^+ \longrightarrow Na^+ + CO_2 + H_2O$$

$$14\ NaHCO_3 + 5\ Ca(H_2PO_4)_2 \longrightarrow 14\ CO_2 + Ca_5(PO_4)_3OH + 7\ Na_2HPO_4 + 13\ H_2O$$

แผนภาพที่ 1.3 blowing reaction โดยใช้ผงฟูเป็นสารฟู

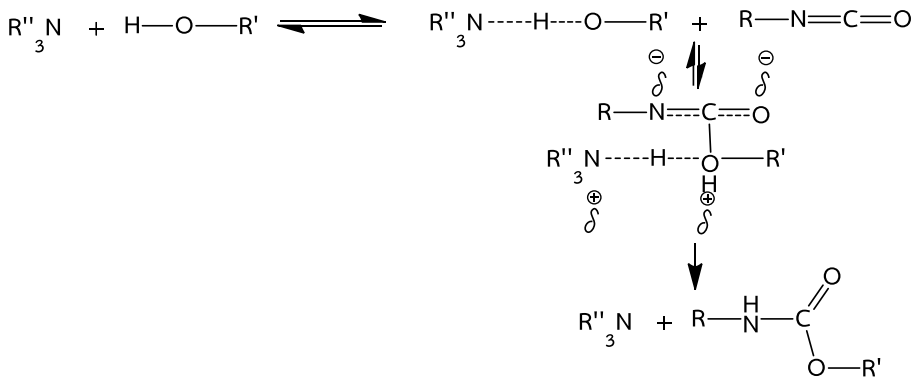
ปฏิกิริยาที่ 4 ปฏิกิริยาไตรเมอไรเซชัน (trimerization reaction) เกิดจากการทำปฏิกิริยากันเองของหมู่ไอโซไซยาเนตที่มีมากเกินพอในระบบ เกิดเป็นหมู่ไอโซไซยานูเรต (isocyanurate) ทำให้โฟม PIR-PUR ที่ได้มีความแข็งแรง และมีคุณสมบัติหน่วงไฟ (flame retardant property) ที่ดี (1-3)



แผนภาพที่ 1.4 trimerization reaction

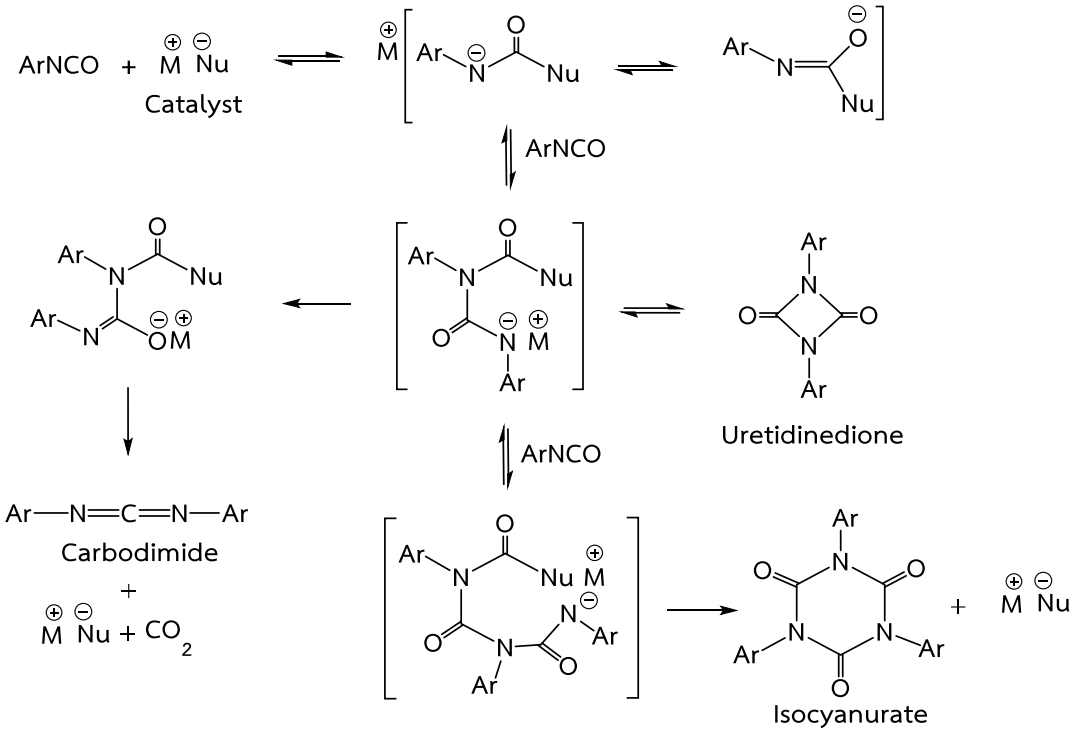
ในการเตรียมโฟม PIR-PUR จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ชนิดต่าง ๆ เนื่องจากปฏิกิริยา gelling, blowing และ trimerization เกิดได้ช้า โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะทำหน้าที่เร่งให้ปฏิกิริยาต่าง ๆ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม และเกิดขึ้นอย่างสมดุลกัน โดยกลไกการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดแสดงดังแผนภาพที่ 1.5-1.6

ในแผนภาพที่ 1.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท 3 แอมีน (tertiary amine) คือ N,N-ไดเมทิลไซโคลเฮกซิลแอมีน (*N,N*-dimethylcyclohexylamine, DMCHA) จะทำหน้าที่เป็น Lewis base ในการเร่งปฏิกิริยา gelling และ blowing (1)



แผนภาพที่ 1.5 กลไกการเร่งปฏิกิริยา gelling และ blowing ของ 3 แอมีน

สำหรับการเร่งปฏิกิริยา trimerization จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมออกโทเอต (potassium octoate, KOct) ในการเร่งปฏิกิริยาการปิดวงเพื่อเกิดหมู่ไอโซไซยานูเรต (1)



แผนภาพที่ 1.6 กลไกการเร่งปฏิกิริยา trimerization ของ KOct

1.2.2 สารฟู (blowing agent)

ในการเตรียมโฟม PIR-PUR มีการเติมสารฟูลงไปเพื่อทำให้เกิดกระบวนการเกิดฟองก๊าซขึ้น ซึ่งโฟม PIR-PUR ที่เตรียมจากสารฟูต่างชนิดกันจะมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล เช่น ความหนาแน่นของโฟม และความต้านทานแรงกดอัด ที่ต่างออกไปตามปริมาณและชนิดของสารฟูที่ใช้ (4, 5, 8, 9)

1.2.2.1 สารฟูชนิดกายภาพ (physical blowing agent)

สารฟูชนิดกายภาพเป็นสารเคมีที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารตั้งต้นที่ใช้เตรียมโฟม PIR-PURและสามารถระเหยเป็นไอได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิของโฟม PIR-PUR สูงขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ตัวอย่างของสารฟูทางกายภาพที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประเภทไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน แต่สารฟูชนิดนี้

มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คือ ทำให้เกิดการทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน ตัวอย่างสารฟูชนิดกายภาพชนิดอื่น ๆ ได้แก่

1.2.2.1.1 สารฟูชนิดไฮโดรคาร์บอน

สารฟูชนิดนี้ไม่มีอะตอมของหมู่ฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ จึงไม่ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ แต่สารฟูชนิดนี้มีความไวไฟสูงและสามารถติดไฟได้ง่าย จึงต้องระมัดระวังในการใช้งาน สารฟูชนิดไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟม PIR-PUR คือ ไซโคลเพนเทน (cyclopentane) (4, 10, 11)

1.2.2.1.2 สารฟูชนิดไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน

สารฟูชนิดนี้ไม่ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ เนื่องจากไม่มีอะตอมของคลอรีนเป็นองค์ประกอบ สารฟูชนิดนี้สามารถระเหยได้เร็ว สารฟูชนิดไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนที่นิยมใช้ในการผลิตโฟม PIR-PUR คือ 1,1,1,3,3-เพนตาฟลูออโรโพรเพน (HFC-245fa) และ 1,1,1,3,3-เพนตาฟลูออโรบิวเทน (HFC-365mfc) (4, 9-11)

1.2.2.2 สารฟูชนิดเคมี (chemical blowing agent)

ในกระบวนผลิตโฟม PIR-PUR ใช้น้ำเป็นสารฟูชนิดเคมี เนื่องจากน้ำจะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบไอโซไซยาเนต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และทำให้โฟมเกิดการฟู โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูจะมีความหนาแน่นสูงกว่าโฟมที่ใช้สารฟูชนิดกายภาพ แต่การใช้น้ำเป็นสารฟูในการเตรียมโฟมจะมีความปลอดภัยในการใช้งานมากกว่า (4, 8, 11)

1.2.3 ผลกระทบของสารฟูชนิดกายภาพต่อสิ่งแวดล้อม (effect of physical blowing agent on environment)

การใช้สารฟูชนิดกายภาพในผลิตโฟม PIR-PUR เป็นสาเหตุให้เกิดการทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน ทำให้เกิดอนุสัญญาเวียนนา (Vienna convention) และพิธีสารมอนทรีออล (Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer) ที่กำหนดขึ้นเพื่อควบคุม ยับยั้ง และรณรงค์ให้ลดการผลิตและการใช้สารทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน เพื่อดำเนินการป้องกันชั้นบรรยากาศโอโซนมิให้ถูกทำลาย และร่วมกันแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากรูโหว่ของชั้นบรรยากาศโอโซน

1.2.3.1 อนุสัญญาเวียนนา (Vienna convention) (13)

อนุสัญญาเวียนนาจัดตั้งขึ้นเพื่อให้นานาประเทศร่วมกันดำเนินการป้องกันชั้นบรรยากาศโอโซนมิให้ถูกทำลาย และร่วมกันแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากรูโหว่ของชั้นบรรยากาศโอโซน โดยสนับสนุนให้เกิดการวิจัยและความร่วมมือในการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างประเทศ

นอกจากนี้อนุสัญญายังประกอบด้วยข้อตกลงระหว่างประเทศที่จะลดและเลิกใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดการทำลายชั้นบรรยากาศโอโซนอีกด้วย

1.2.3.2 พิธีสารมอนทรีออลว่าด้วยสารทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน (Montreal Protocal on substances that deplete the ozone layer) (6)

พิธีสารมอนทรีออลว่าด้วยสารทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน คือ สนธิสัญญาสากลที่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อควบคุม ยับยั้ง และรณรงค์ให้ลดการผลิตและการใช้สารเคมีที่มีส่วนทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน เพื่อรักษาชั้นบรรยากาศโอโซนที่เริ่มจะสูญสลายไปเนื่องจากสารเหล่านี้ โดยพิธีสารได้เปิดให้ประเทศต่าง ๆ ลงนามเป็นประเทศภาคีสมาชิกในวันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2530 (1987) และเริ่มใช้บังคับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2532 (1989) เป็นต้นมา ตั้งแต่นั้นมาได้มีการแก้ไขปรับปรุงพิธีสาร 5 ครั้งด้วยกัน ครั้งแรก ณ กรุงลอนดอน สหราชอาณาจักร เมื่อ พ.ศ. 2533 (1990), ครั้งที่สอง ณ กรุงโคเปนเฮเกน ประเทศเดนมาร์ก เมื่อ พ.ศ. 2535 (1992) ครั้งที่สาม ณ กรุงเวียนนา สาธารณรัฐออสเตรีย เมื่อ พ.ศ. 2538 (1995) ครั้งที่สี่ ณ เมืองมอนทรีออล ประเทศแคนาดา เมื่อ พ.ศ. 2540 (1997) และครั้งที่ห้า ณ กรุงปักกิ่ง สาธารณรัฐประชาชนจีน เมื่อ พ.ศ. 2542 (1999) เนื่องจากพิธีสารมอนทรีออลมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งยังได้รับเสียงสนับสนุนและชื่นชมจากนานาประเทศและหลาย ๆ องค์กร ทำให้พิธีสารมอนทรีออลได้รับการยกย่องให้เป็นตัวอย่างการร่วมมือกันระหว่างประเทศในการแก้ไขปัญหาในระดับนานาชาติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ คือ ต้องการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้ผงฟูซึ่งประกอบด้วยสารผสมระหว่างโซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate, $NaHCO_3$) และ แคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate, $Ca(H_2PO_4)_2$) ร่วมกับน้ำเป็นสารฟู โดยในการทดลองจะมีการปรับปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมโฟม คือ ปริมาณผงฟูและปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต เพื่อให้ได้โฟม PIR-PUR ที่มีความหนาแน่นลดลง แต่ยังคงมีสมบัติเหมาะสมและใกล้เคียงกับโฟมที่เตรียมจากการใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียว ดังนี้

- ปริมาณผงฟูที่ใช้ คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 parts by weight (pbw) โดยใช้ปริมาณน้ำคงที่ คือ 4.0 pbw
- ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต (NCO) ที่ใช้ คือ NCO index 100 (15.16 g), NCO index 200 (31.36 g), NCO index 250 (39.20 g) และ NCO index 300 (47.03 g)

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2008 Nema และคณะ (11) ได้เตรียมโฟมพอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) คือ เป็นโฟมพอลิยูรีเทนที่สามารถขึ้นรูปใหม่ได้หลายครั้ง โดยในการเตรียมโฟมจะขึ้นรูปโดยการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (injection molding) และมีการใช้สารฟูผสมสองชนิด คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต และแอโซไดคาร์บอนามายด์ (azodicarbonamide) โดยโซเดียมไบคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นสารฟูที่ดูดความร้อน (endothermic blowing agent) เพื่อสลายตัวให้ฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่แอโซไดคาร์บอนามายด์ทำหน้าที่เป็นสารฟูที่คายความร้อน (exothermic blowing agent) เพื่อสลายตัวให้ฟองก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวของสารฟูทั้งสองชนิด ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และสัณฐาน (morphology) ของโฟมซึ่งเป็นผลมาจากการใช้สารฟูผสมดังกล่าว จากผลการศึกษาพบว่า การใช้สารฟูผสมดังกล่าวจะให้ประสิทธิภาพในการเกิดฟองก๊าซดีกว่าการใช้สารฟูชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงอย่างเดียวที่ปริมาณเท่ากัน โดยโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้สารฟูผสมมีลักษณะเซลล์โฟมที่สม่ำเสมอ (uniform cell structure) และมีความหนาแน่นลดลงถึง 40%

ในปี 2016 Shakir และคณะ (5) ศึกษาการใช้สารฟูที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น (flexible polyurethane foam) เนื่องจากสารฟูที่ใช้ในการผลิต โฟมพอลิยูรีเทน ได้แก่ คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (HCFC) ทำให้เกิดการทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน ในขณะที่การใช้เพนเทนซึ่งเป็นสารฟูประเภทไฮโดรคาร์บอนเป็นทางเลือกที่ดี แต่มีความไวไฟ ทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งาน การใช้น้ำเป็นสารฟูในการผลิตโฟมเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้น้ำในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแพร่กระจายที่เร็วเกินไปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเสียรูปของเซลล์โฟม (cell deformation) โดยโฟมที่เตรียมจากการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารฟูจะนำไปเปรียบเทียบกับโฟมอ้างอิงที่ใช้น้ำเป็นสารฟู ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของโฟมที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่า โซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถใช้เป็นสารฟูในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนตสามารถสร้างช่องว่างในเนื้อโฟม และทำให้พัฒนากลายเป็นเซลล์โฟมได้ โดยโฟมที่ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารฟูจะมีความยืดหยุ่น (elongation) ลดลง 23.6% เมื่อเทียบกับโฟมอ้างอิงที่ใช้น้ำเป็นสารฟู แต่โฟมที่เตรียมจากสารฟูทั้งสองชนิดสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารฟู ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของโฟมที่เตรียมได้

ในปี 1999 Zipfel และคณะ (9) ศึกษาการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนโดยใช้ HFC-365mfc เป็นสารฟูแทน HCFC-141b ที่ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโอโซน แต่ HFC-365mfc ผสมกับพอลลิออลที่ใช้เตรียมพอลิยูรีเทนได้ไม่ดี เนื่องจากเป็นสารฟูมีสภาพขั้วต่ำและมีจุดเดือดที่สูง ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีการนำ HFC-365mfc มาผสมกับ HFC-134a ที่ 4.7-7% ต่อน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ index 110 จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของสารฟูชนิด HFC-365mfc : HFC-134a คือ 93 : 7 โดยปริมาณที่เติมไม่ควรมากกว่า 17 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยโฟมพอลิยูรีเทนที่ได้มีความเป็นฉนวนที่ดี มีความหนาแน่น 35 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และเนื้อโฟมมีคุณภาพใกล้เคียงกับการใช้สารฟูชนิด HCFC-141b

ในปี 2008 Kim และคณะ (4) ศึกษาผลของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมโดยใช้สารฟู HCFC-141b และ HFC-365mfc จากการศึกษาพบว่า โฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารฟูเป็น HCFC-141b มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยา คือ เวลาที่สารผสมเป็นเนื้อครีม (cream time) เวลาที่สารผสมเป็นเนื้อเจล (gel time) เวลาที่โฟมไม่เกาะติดกับผิววัสดุ (tack free time) และเวลาที่โฟมหยุดฟู (rise time) ใกล้เคียงกับโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารฟูเป็น HFC-365mfc นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารฟูเป็น HFC-365mfc มีขนาดของเซลล์โฟมที่เล็ก โฟมทนต่อแรงกดอัดได้ดีและมีความหนาแน่นที่สูง ส่วนโฟมพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารฟูเป็น HCFC-141b มีความเป็นฉนวนที่ดีและมีความคงตัวของโฟมดีกว่า

ในปี 2010 Lim และคณะ (10) ศึกษาผลของสารฟู 3 ชนิด คือ น้ำ HFC 365mfc และ HFC 245fa ที่ส่งผลต่อการสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งที่เตรียมโดยใช้เมทิลีนไดฟีนิลไดโซไซยาเนตและโพรพิลีนไกลคอลเป็นสารตั้งต้น จากการศึกษาพบว่า น้ำจะเกิดปฏิกิริยา blowing reaction ได้เร็วที่สุด HFC 245fa มีความเร็วในเกิดฟองก๊าซปานกลาง ในขณะที่ HFC 365mfc เกิดฟองก๊าซได้ช้าที่สุด ซึ่งส่งผลให้ โฟมที่เตรียมโดยใช้น้ำเป็นสารฟูมีความหนาแน่นต่ำ รับแรงกดได้น้อย และมีเซลล์โฟมขนาดใหญ่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมที่เตรียมโดยสารฟูชนิด HFC 245fa และ HFC 365mfc โฟมเตรียมโดยใช้ HFC 365mfc มีเซลล์โฟมขนาดเล็กที่สุด โฟมมีความหนาแน่นสูงสุด และรับแรงกดได้มากที่สุด ในขณะที่โฟมที่เตรียมโดยใช้ HFC 245fa มีเซลล์โฟมขนาดปานกลาง โฟมมีความหนาแน่นและรับแรงกดได้ปานกลาง แต่โฟมมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด

ในปี 2003 Choe และคณะ (12) ศึกษาโฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งซึ่งเตรียมโดยใช้พอลิเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต (PMDI) กับ พอลิอีเทอร์พอลิออลเป็นสารตั้งต้น และใช้แอมีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้สารฟูหลายชนิด คือ ใช้น้ำเป็นสารฟูชนิดเคมี ใช้ไซโคลเพนเทนและไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนเป็นสารฟูชนิดกายภาพ จากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการของโฟมเพิ่มขึ้นตาม

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำ ขนาดเซลล์โฟมจะลดลงตามปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น โฟมที่เตรียมโดยใช้น้ำเป็นสารฟูนั้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นและการรับแรงกดของโฟม แต่โฟมที่เตรียมโดยใช้ไซโคลเพนเทนและไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนเป็นสารฟู เมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ความหนาแน่นและการรับแรงกดของโฟมจะเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบโฟมที่ความหนาแน่นเดียวกัน โฟมที่เตรียมโดยใช้สารฟูชนิดกายภาพจะมีขนาดของเซลล์โฟมเล็กกว่าโฟมที่เตรียมโดยใช้สารฟูชนิดเคมี โฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็งที่เตรียมโดยใช้สารฟูเป็นไซโคลเพนเทน : น้ำในอัตราส่วน 7 : 3 โดยโมล มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าโฟมที่ใช้ไซโคลเพนเทนหรือน้ำเป็นสารฟูเพียงชนิดเดียว แสดงให้เห็นว่าโฟมที่เตรียมโดยใช้สารฟูที่เป็นสารผสมจะมีความเสถียรของโครงสร้างโฟมมากกว่าโฟมที่ใช้สารฟูเพียงชนิดเดียว

1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้ผงฟูเป็นสารฟูในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารฟูต่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความหนาแน่น และสมบัติต่าง ๆ ของโฟม

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถเตรียมโฟม PIR-PUR ที่มีความหนาแน่นและคุณสมบัติเหมาะสมได้โดยใช้ผงฟูเป็นสารฟู และสามารถลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคลอโรฟลูออโรคาร์บอนที่ใช้ในการเตรียมโฟมได้

บทที่ 2
การทดลอง

2.1 เครื่องมือ

2.1.1 เครื่อง FT-IR spectrometer รุ่น Nicolet 6700

2.1.2 เครื่องกวนความเร็วสูง (mechanical stirrer) IKA รุ่น RW 20 digital

2.1.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก Precisa รุ่น XT920M

2.2 สารเคมี

2.2.1 พอลิอีเทอร์ พอลิออล (polyether polyol; Polimaxx® 4221; OH-value = 440 mgKOH/g; functionality = 4.3)

2.2.2 สารประกอบไอโซไซยาเนต (polymeric diphenyl methane diisocyanate; PMDI; Suprasec® 5005 and B9001®; %NCO = 31.0; functionality = 2.7)

2.2.3 สารลดแรงตึงผิว (silicone surfactant; polysiloxane; Tegostab®B8461)

2.2.4 สารฟู (water; H_2O)

2.2.5 เอ็น,เอ็น-ไดเมทิลไซโคลเฮกซิลแอมีน (*N,N*-dimethylcyclohexylamine; DMCHA)

2.2.6 โพแทสเซียมออกโทเอต (potassium octoate; KOct; Dabco®K-15; เป็นสารละลายโพแทสเซียมออกโทเอตในไดเอทิลีนไกลคอล 70% w/w)

2.2.7 ผงฟู [30.8% $NaHCO_3$ + 33.9% Na_2HPO_4 + 5.2% $Ca(H_2PO_4)_2$] ที่มีขายในซุปเปอร์มาร์เกต

2.3 การสังเคราะห์โฟมพอลิยูรีเทนแบบแข็ง (rigid polyurethane foam, RPUR foam) โดยใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงชนิดเดียว

การสังเคราะห์โฟม RPUR จะใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ index 100 นั่นคือ ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ใช้จะทำปฏิกิริยากับพอลิออลและน้ำหมดพอดี ปริมาณสารตั้งต้นแต่ละชนิดที่ใช้ในการเตรียมโฟมแสดงในตารางที่ 2.1 โดยขั้นตอนการเตรียมโฟม RPUR มี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกผสมพอลิออล สารลดแรงตึงผิว และสารฟู แล้วคนผสมให้เข้ากันก่อน จากนั้นจะเติมสารประกอบไอโซไซยาเนตในขั้นตอนที่ 2 แล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องกวนความเร็วสูงที่ความเร็ว 2000 รอบ/นาที (rpm) ดังแผนภาพที่ 2.1 จากนั้นจะจับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR คือ เวลาที่สารผสม

เป็นเนื้อครีม (cream time) เวลาที่สารผสมเป็นเนื้อเจล (gel time) หรือเวลาโฟมเริ่มฟู เวลาที่โฟมไม่เกาะติดกับผิววัสดุ (tack free time) และเวลาที่โฟมหยุดฟู (rise time) จากนั้นจะเก็บชิ้นโฟมไว้ 2 วัน หลังจากสังเคราะห์เสร็จเพื่อให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดอย่างสมบูรณ์ แล้วนำโฟมมาตัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 3.0 cm x 3.0 cm x 3.0 cm เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของโฟม คือ หาความหนาแน่น ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโฟมด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy, ศึกษาคุณสมบัติการติดไฟของโฟม และศึกษาลักษณะการฟู (rise profile) ของโฟม

ตารางที่ 2.1 สูตรในการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟูและใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ NCO index 100

สารตั้งต้น	ปริมาณที่ใช้โดยน้ำหนัก (pbw)	ปริมาณที่ใช้/แก้ว (g)
1. พอลิอีเทอร์ พอลิออล (Polimaxx®4221; OH-number = 440 mgKOH / g; functionality = 4.3)	100	10.0
2. สารลดแรงตึงผิวซิลิโคน (polysiloxane;Tegostab®B8461)	2.5	0.25
3. ตัวเร่งปฏิกิริยา (DMCHA)	1.0	0.10
4. สารประกอบไอโซไซยาเนต (PMDI; Suprasec® 5005; % NCO = 31.0; functionality = 2.7)	151.3	15.13

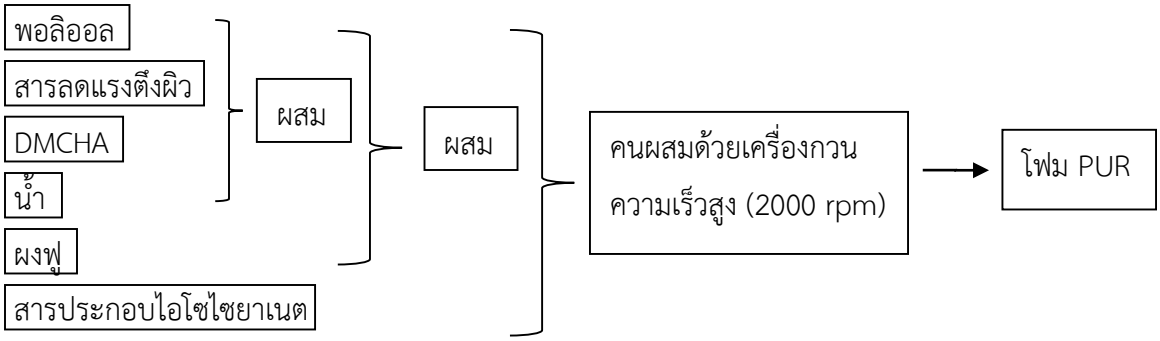
แผนภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู

2.4 การสังเคราะห์โฟม RPUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู

การสังเคราะห์โฟม RPUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟูจะใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ index 100 โดยปริมาณสารตั้งต้นแต่ละชนิดที่ใช้ในการเตรียมโฟมแสดงในตารางที่ 2.2 การเตรียมโฟมจะใช้วิธีการผสม 3 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกผสมพอลิออล สารลดแรงตึงผิว และสารฟู แล้วคนผสมให้เข้ากันก่อน แล้วผสมผงฟูในขั้นตอนที่ 2 จากนั้นจะเติมสารประกอบไอโซไซยาเนตในขั้นตอนสุดท้าย แล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่องกวนความเร็วสูงที่ความเร็ว 2000 รอบ/นาที (rpm) ดังแผนภาพที่ 2.2 โดยจะมีการศึกษาปริมาณผงฟูที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมโฟม RPUR คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 g ตามลำดับ การศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของโฟมที่ใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟูจะศึกษาเช่นเดียวกับโฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 2.2 สูตรในการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูและใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ NCO index 100

สารตั้งต้น	ปริมาณที่ใช้โดยน้ำหนัก (pbw)	ปริมาณที่ใช้/แก้ว (g)
1. พอลิอีเทอร์ พอลิออล (Polimaxx®4221; OH-number = 440 mgKOH / g: functionality = 4.3)	100	10.0
2. สารลดแรงตึงผิวซิลิโคน (polysiloxane,Tegostab®B8461)	2.5	0.25
3. สารฟู (water, H_2O)	3.0	0.30
4. ผงฟู ($NaHCO_3$)	0.5, 1.0 และ 1.5	0.05, 0.1 และ 0.15
5. ตัวเร่งปฏิกิริยา (DMCHA)	1.0	0.10
6. สารประกอบไอโซไซยาเนต (PMDI, Suprasec® 5005; % NCO = 31.0; functionality = 2.7)	151.6	15.16



แผนภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู

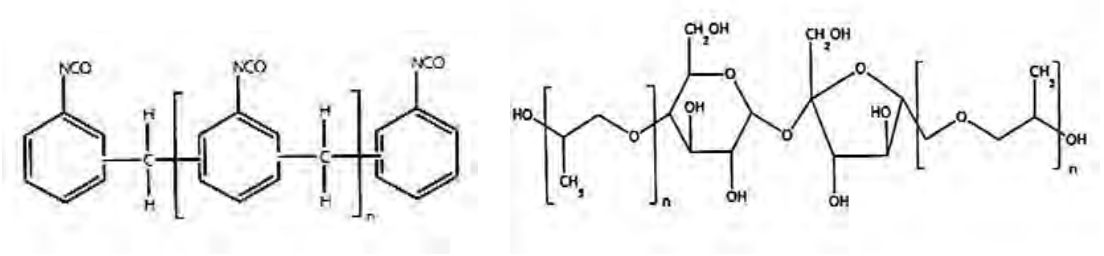
2.5 การสังเคราะห์โฟม PIR-PUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู

การสังเคราะห์โฟม PIR-PUR โดยใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู ใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ index 200, 250 และ 300 คือ จะมีสารประกอบไอโซไซยาเนตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับพอลิออลและน้ำสำหรับการเกิดปฏิกิริยา trimerization การเตรียมโฟม PIR-PUR จะมีขั้นตอนการเตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมโฟม RPUR ที่ใช้ผงฟูและน้ำเป็นสารฟู แต่จะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา KOct ในการเร่งปฏิกิริยา trimerization ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา DMCHA ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา gelling และ blowing โดยปริมาณสารตั้งต้นแต่ละชนิดที่ใช้ในการเตรียมโฟมแสดงในตารางที่ 2.3

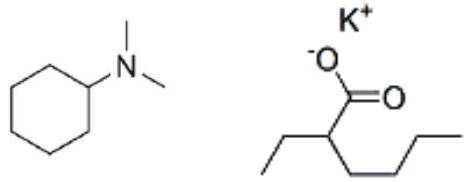
ตารางที่ 2.3 สูตรในการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูและใช้ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตที่ NCO index 200, 250 และ 300

สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ใช้/แก้ว (g)		
	NCO Index 200	NCO Index 250	NCO Index 300
1. พอลิออล (Polimaxx®4221; OH-number = 440 mgKOH / g; functionality = 4.3)	10	10	10
2. สารลดแรงตึงผิวซิลิโคน (polysiloxane;Tegostab®B8461)	0.25	0.25	0.25
3. สารฟู (water; H_2O)	0.30	0.30	0.30

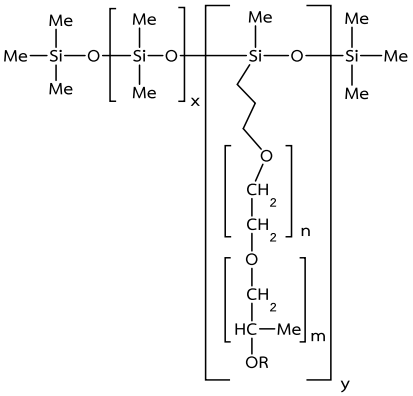
สารตั้งต้น	ปริมาณสารที่ใช้/แก้ว (g)		
	NCO Index 200	NCO Index 250	NCO Index 300
4. ผงฟู ($NaHCO_3$)	1.0	1.0	1.0
5. ตัวเร่งปฏิกิริยา (KOct; Dabco® K-15)	0.3	3.0	0.3
6.ตัวเร่งปฏิกิริยา (DMCHA)	0.05	0.05	0.05
7. สารประกอบไอโซไซยาเนต (PMDI,B9001®; % NCO = 31.0; functionality = 2.7)	31.36	39.20	47.03



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของสารประกอบไอโซไซยาเนต และพอลิออลที่ใช้เตรียมโฟม



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา DMCHA และ KOct



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวซิลิโคน

2.6 การคำนวณปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตในสูตรโฟม RPUR (NCO Index 100)

- **การหา equivalent weight สารประกอบพอลิออลและน้ำ**

$$\text{Hydroxyl value} = \frac{56.1 \times \text{functionality}}{\text{molar mass}} \times 1000$$

$$= \frac{56.1}{\text{equivalent weight}} \times 1000$$

$$\text{เมื่อ equivalent weight} = \frac{\text{molar mass}}{\text{functionality}}$$

$$\text{equivalent weight of polyol} = \frac{56.1}{440} \times 1000 = 127.5$$

$$\text{equivalent weight of water} = \frac{18}{2} = 9.0$$

- **การหาปริมาณ equivalent ของสารประกอบพอลิออลและน้ำในสูตรโฟม**

$$\text{equivalent of polyol in formulation} = \frac{\text{parts by weight of polyol}}{\text{equivalent of polyol}}$$

$$= \frac{100}{127.5} = 0.784$$

$$\text{equivalent of } H_2O \text{ in formulation} = \frac{\text{parts by weight of } H_2O}{\text{equivalent of } H_2O}$$

$$= \frac{3}{9} = 0.333$$

$$\text{Total of equivalent in formulation} = 0.784 + 0.333 = 1.117$$

- **การคำนวณปริมาณสารประกอบ PMDI ในหน่วย parts by weight (pbw)**

$$\text{PMDI (pbw)} = \frac{\text{total of equivalent} \times \text{molar mass}}{\text{functionality}}$$

$$\therefore \text{PMDI (pbw) ที่ NCO index 100} = \frac{1.117 \times 365.8^{*}}{2.7} = 151.3$$

* PMDI (Suprasec® 5005) ที่ใช้ในการเตรียม RPUR foam มี molar mass = 365.8 และ functionality = 2.7

2.7 การคำนวณปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตในสูตรโฟม PIR-PUR (NCO index 200, 250 และ 300)

- **การหา equivalent weight สารประกอบ polyol, H_2O และ diethylene glycol**

$$\text{Hydroxyl value} = \frac{56.1 \times \text{functionality}}{\text{molar mass}} \times 1000$$

$$= \frac{56.1}{\text{equivalent weight}} \times 1000$$

$$\text{เมื่อ equivalent weight} = \frac{\text{molar mass}}{\text{functionality}}$$

$$\text{equivalent weight of polyol} = \frac{56.1}{440} \times 1000 = 127.5$$

$$\text{equivalent weight of water} = \frac{18}{2} = 9.0$$

$$\text{equivalent weight of diethylene glycol} = \frac{106.12}{2} = 53.06$$

- **การหาปริมาณ equivalent ของสารประกอบ polyol และน้ำ ในสูตรโฟม**

$$\text{equivalent of polyol in formulation} = \frac{\text{parts by weight of polyol}}{\text{equivalent of polyol}}$$

$$= \frac{100}{127.5} = 0.784$$

$$\text{equivalent of } H_2O \text{ in formulation} = \frac{\text{parts by weight of } H_2O}{\text{equivalent of } H_2O}$$

$$= \frac{4}{9} = 0.444$$

$$\text{equivalent of diethylene glycol in formulation} = \frac{\text{parts by weight of diethylene glycol}}{\text{equivalent of diethylene glycol}}$$

$$= \frac{0.9}{53.06} = 0.017$$

$$\text{Total of equivalent in formulation} = 0.784 + 0.444 + 53.06 = 1.245$$

- **การคำนวณปริมาณสารประกอบ PMDI ในหน่วย parts by weight (pbw)**

$$\text{PMDI (pbw)} = \frac{\text{total of equivalent} \times \text{molar mass}}{\text{functionality}}$$

$$\therefore \text{PMDI (pbw) ที่ NCO index 200} = \frac{1.245 \times 340^{*}}{2.7} \times \frac{200}{100} = 313.56$$

$$\therefore \text{PMDI (pbw) ที่ NCO index 250} = \frac{1.245 \times 340^{*}}{2.7} \times \frac{250}{100} = 391.94$$

$$\therefore \text{PMDI (pbw) ที่ NCO index 200} = \frac{1.245 \times 340^{*}}{2.7} \times \frac{300}{100} = 470.33$$

*PMDI (B9001®) ที่ใช้ในการเตรียม RPUR foam มี molar mass = 340.0 และ functionality = 2.7

2.8 การศึกษา % isocyanate conversion (%NCO conversion) ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR ด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy

%NCO conversion สามารถหาได้จากกฎของ Beer Lambert's Law และอัตราส่วนระหว่าง isocyanate:urethane (PIR:PUR) ในโฟม PIR-PUR สามารถศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy ดังนี้

จากสมการ $A = \varepsilon bC$ (1)

เมื่อ A = absorbance

ε = extinction Coefficient (mol. mm/l)

b = optical path (mm)

C = Concentration (mol/l)

จากสมการที่ 1 พบว่าปริมาณ absorbance แปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของสารที่ทดสอบหรือปริมาณหมู่ฟังก์ชันของสารที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

สำหรับการคำนวณ %NCO conversion สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ดังนี้

$$\%NCO\ conversion = \frac{1 - NCO^{f}}{NCO^{i}} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ NCO^{i} = initial concentration of isocyanate

NCO^{f} = final concentration of isocyanate

ตารางที่ 2.4 ค่า wavenumber ของหมู่ฟังก์ชันของโฟม PIR-PUR

Chemical bond	Wavenumber (cm^{-1})	Chemical structure
Isocyanate (NCO)	2272	N=C=O
Phenyl	1595	Ar-H
Isocyanurate (PIR)	1413	PIR
Urethane	1221	-C-O

บทที่ 3
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การสังเคราะห์โฟม RPUR และโฟม PIR-PUR

ในการสังเคราะห์โฟม RPUR จะสังเคราะห์โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียวในปริมาณ 3.0 g เป็นโฟมอ้างอิง (reference foam) และจะศึกษาโฟม RPUR ที่สังเคราะห์จากการใช้สารฟูผสมระหว่างน้ำกับผงฟู โดยใช้ปริมาณน้ำคงที่ คือ 3.0 g ผสมกับผงฟูในปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 g สำหรับการสังเคราะห์โฟม PIR-PUR จะสังเคราะห์โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียวในปริมาณ 4.0 g เป็นโฟมอ้างอิง ศึกษาเปรียบเทียบกับโฟม PIR-PUR ที่สังเคราะห์จากการใช้สารฟูผสมระหว่างน้ำกับผงฟูในอัตราส่วนน้ำต่อผงฟูเท่ากับ 4.0 g ต่อ 1.0 g

3.1.1 การสังเคราะห์โฟม RPUR โดยใช้สารฟูผสมระหว่างน้ำและผงฟู

การสังเคราะห์โฟม RPUR โดยใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู จะทำโดยใช้ปริมาณสารประกอบไอโซยาเนต (NCO index) เท่ากับ 100 และปรับเปลี่ยนปริมาณผงฟูที่ใช้ คือ 0.5, 1.0 และ 1.5 g เพื่อศึกษาผลของการเติมผงฟูต่อสมบัติของโฟมที่ได้ โดยจะศึกษาช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมด 4 ช่วง คือ เวลาที่สารผสมเป็นเนื้อครีม (cream time) ซึ่งเป็นเวลาที่ปฏิกิริยาการฟู (blowing reaction) เริ่มเกิดขึ้นโดยโฟมจะเริ่มเกิดการฟู เวลาที่สารผสมเป็นเนื้อเจล (gel time) เป็นเวลาที่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เริ่มเกิดขึ้นทำให้โฟมเปลี่ยนสภาพเป็นเจลและหยุดไหล เวลาที่โฟมหยุดฟู (rise time) เป็นเวลาที่ปฏิกิริยาการฟูหยุดลง และเวลาที่โฟมไม่เกาะติดกับวัสดุสัมผัส (tack free time) เป็นเวลาที่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหยุดลง โดยผลการศึกษา เวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟม รวมทั้งความหนาแน่น (density) ลักษณะทางกายภาพ (physical appearance) และความสูงของโฟม (foam height) แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟม ความหนาแน่น ลักษณะทางกายภาพ และความสูงของโฟม RPUR ที่เตรียมโดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100 เปรียบเทียบกับโฟมอ้างอิง

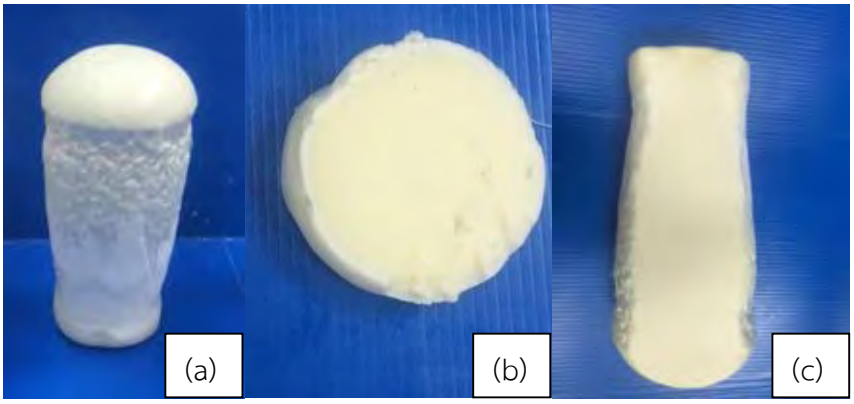
เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาและสมบัติของโฟม	โฟมที่ใช้น้ำเป็นสารฟู (โฟมอ้างอิง)	โฟมที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5 g เป็นสารฟู	โฟมที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู	โฟมที่ใช้น้ำและผงฟู 1.5 g เป็นสารฟู
Cream time (sec)	20±1	22±1	22±1	22±1
Gel time (sec)	31±1	36±1	33±1	33±1
Rise time (sec)	124±1	120±1	118±2	120±5
Tack free time (sec)	196±1	195±1	184±1	211±2
Density (kg/m^3)	38.5±1.1	38.5±0.8	35.0±1.1	34.2±2.0
Foam height (cm)*	14.5±0.2	14.8±0.1	15.7±0.2	16.0±0.1
ลักษณะทางกายภาพ	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย ไม่มีรูบนผิวโฟม	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย ไม่มีรูบนผิวโฟม	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย ไม่มีรูบนผิวโฟม	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวไม่ละเอียด เป็นขุย มีรูบนผิวโฟม เล็กน้อย

*ขึ้นรูปโฟมในแก้วกระดาษที่มีความสูง 16 cm และมีปริมาตร 750 ml

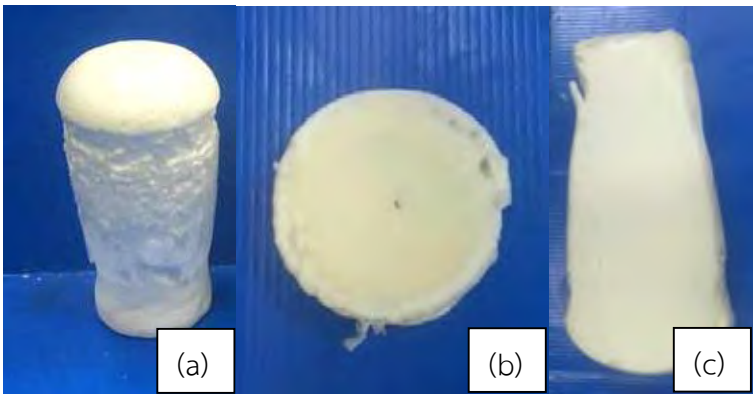
จากผลการทดลอง (ตารางที่ 3.1) เมื่อพิจารณา cream time และ gel time พบว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู มี cream time และ gel time สั้นกว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5, 1.0 และ 1.5 g เป็นสารฟู แต่เมื่อพิจาราณา rise time พบว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู มี rise time นานกว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5, 1.0 และ 1.5 g เป็นสารฟู เมื่อพิจารณา tack free time พบว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู มี tack free time นานกว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู แต่สั้นกว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.5 g เป็นสารฟู

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นและความสูงของโฟม พบว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู มีความหนาแน่นเท่ากับ RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5 g เป็นสารฟู แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารฟูมากขึ้นอีกเป็น 1.0 และ 1.5 g จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของโฟม RPUR จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่โฟมจะมีความสูงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณผงฟู ทั้งนี้การลดลงของความหนาแน่นและความสูงที่เพิ่มขึ้นของโฟมเมื่อเพิ่มปริมาณผงฟูเป็นผลมาจากมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเพิ่มขึ้นในระบบจากปฏิกิริยา blowing reaction ของน้ำ และปฏิกิริยาการสลายตัวของผงฟู

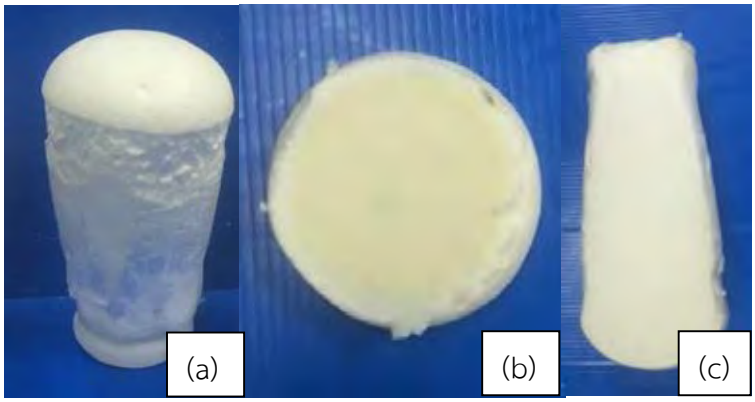
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟมในรูปที่ 3.1-3.4 ซึ่งแสดงโฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู และโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5, 1.0 และ 1.5 g เป็นสารฟู เตรียมที่ isocyanate index = 100 โดย 3.1(a), 3.2(a), 3.3(a) และ3.4(a) คือ โฟมที่ได้จากการเตรียมในแก้วกระดาษ 3.1(b), 3.2(b), 3.3(b) และ3.4(b) คือ ฐานของโฟมที่ถูกตัด 3.1(c), 3.2(c), 3.3(c) และ3.4(c) คือ โฟมที่ถูกตัดผิวด้านข้างออก จากลักษณะของโฟมพบว่าโฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู และโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5 และ 1.0 g เป็นสารฟู มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม คือ มีเนื้อโฟมสีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย และไม่มีรูบนผิวโฟม ส่วนโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.5 g เป็นสารฟู มีเนื้อโฟมสีเหลืองอ่อน ผิวไม่ละเอียด มีรูบนผิวโฟมที่สังเกตเห็นได้ และมีการหลุดร่อนของเนื้อโฟม ทั้งนี้ ลักษณะที่ไม่ดีของโฟมดังกล่าวเป็นผลมาจากการใช้ผงฟูในปริมาณที่มากเกินไป คือ 1.5 g ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากจนเกินไป ดังนั้น จากการทดลองพบว่า โฟม RPUR ที่เตรียมโดยใช้น้ำกับผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู จะได้โฟมที่มีคุณสมบัติดีที่สุด คือ มีความหนาแน่นลดลง และลักษณะทางกายภาพของโฟมที่เหมาะสมใกล้เคียงกับโฟมที่ใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียว



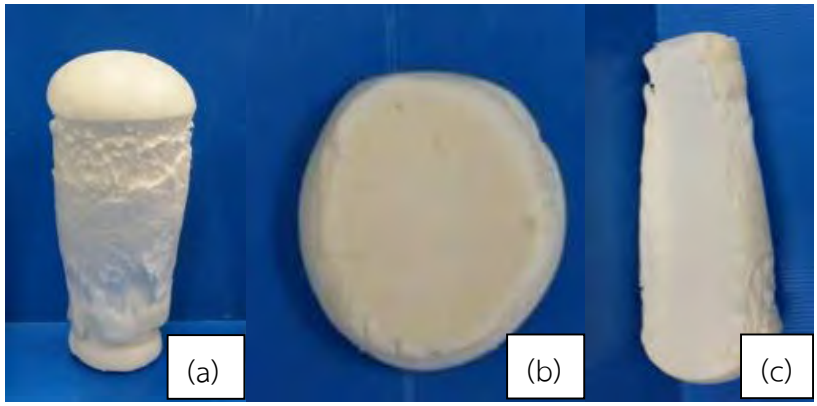
รูปที่ 3.1 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู



รูปที่ 3.2 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 0.5 g เป็นสารฟู



รูปที่ 3.3 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู



รูปที่ 3.4 โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.5 g เป็นสารฟู

3.1.2 การสังเคราะห์โฟม PIR-PUR โดยใช้สารฟูผสมระหว่างน้ำและผงฟู

การสังเคราะห์โฟม PIR-PUR จะใช้น้ำ 4.0 g และผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู โดยใช้ปริมาณสารประกอบไอโซยาเนตที่ NCO index 200, 250 และ 300 ในการสังเคราะห์โฟม โฟม PIR-PUR ที่สังเคราะห์ได้จะศึกษาเปรียบเทียบสมบัติกับโฟมอ้างอิง คือ โฟม PIR-PUR ที่สังเคราะห์โดยใช้น้ำ 4.0 g เป็นสารฟูเพียงอย่างเดียว โดยผลการศึกษาเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความหนาแน่น ลักษณะทางกายภาพ และความสูงของโฟม PIR-PUR แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของโฟม ความหนาแน่น ลักษณะทางกายภาพ และความสูงของโฟม PIR-PUR ที่เตรียมโดยใช้น้ำร่วมกับผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100, 200, 250 และ 300 เปรียบเทียบกับโฟมอ้างอิง

เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาและสมบัติของโฟม	โฟม RPUR	โฟม PIR-PUR		
	index 100	NCO index 200	NCO index 250	NCO Index 300
Cream time (sec)	22±1	19±1	19±1	19±1
Gel time (sec)	33±1	38±1	46±1	47±1
Rise time (sec)	118±2	132±3	177±3	178±7
Tack free time (sec)	184±1	109±2	152±2	188±2
Density (kg/m^3)	35.0±1.1	36.7±1.2	45.3±1.2	47.3±2.4
Foam height (cm)*	15.7±0.2	21.5±0.1	20.1±0.4	21.8±0.4
ลักษณะทางกายภาพ	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย ไม่มีรูบนผิวโฟม	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย มีรูบนผิวโฟม เล็กน้อย	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวไม่ละเอียด เป็นขุยเล็กน้อย มีรูบนผิวโฟม ปานกลาง	เนื้อโฟม สีเหลืองอ่อน ผิวร่วน เป็นขุย มีรูบนผิวโฟมมาก และขนาดใหญ่

*ขึ้นรูปโฟมในแก้วกระดาษที่มีความสูง 16 cm และมีปริมาตร 750 ml

จากผลการทดลอง (ตารางที่ 3.2) เมื่อพิจารณา cream time พบว่า โฟม RPUR ที่ NCO index 100 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มี cream time ใกล้เคียงกับโฟม PIR-PUR ที่ NCO index 200, 250 และ 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู

เมื่อพิจารณา gel time, tack free time และ rise time พบว่า โฟม RPUR ที่ NCO index 100 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มี gel time, tack free time และ rise time สั้นกว่าโฟม PIR-PUR ที่ NCO index 200, 250 และ 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู ซึ่งลำดับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวของโฟมทั้งสองประเภท เป็นดังนี้ โฟม RPUR ที่ NCO index 100 < โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 200 < โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 250 < โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 300 จากผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มปริมาณ NCO index จะทำให้มีปริมาณของสารประกอบไอโซไซยาเนตในระบบเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่โฟมต้องใช้ในการทำให้ปฏิกิริยาทั้งหมดของโฟมเกิดได้สมบูรณ์ถูกยืดออกไป นอกจากนี้เพิ่มปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาทางอ้อมด้วย เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดหมู่ไอโซไซยานูเรตสามารถเกิดได้ช้ากว่าปฏิกิริยาการเกิดหมู่ยูรีเทน (14, 15)

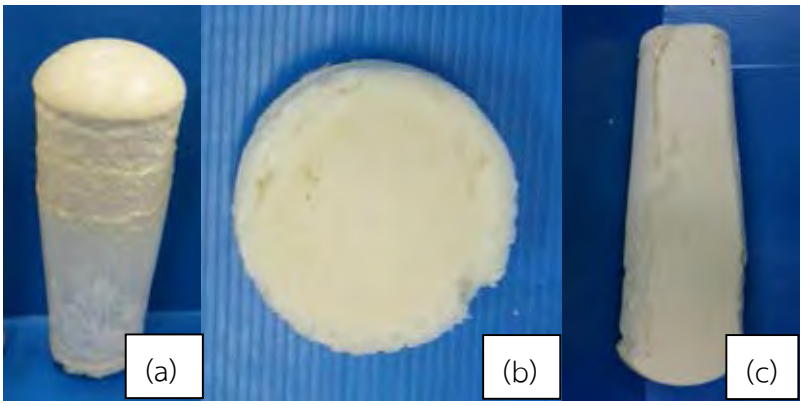
เมื่อพิจารณา tack free time พบว่า โฟม RPUR ที่มี NCO index 100 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มี tack free time ที่นานกว่ากว่าโฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 200, 250 และ 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ NCO index ทำให้โฟม มีปริมาณร่างแหพอลิเมอร์ (crosslink) หนาแน่นขึ้น ทำให้โฟมแข็งตัวเร็วขึ้น

เมื่อพิจารณา ความหนาแน่นของโฟมพบว่า โฟม RPUR ที่มี NCO index 100 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มีความหนาแน่นของโฟมน้อยกว่าโฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 200, 250 และ 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู ซึ่งมีลำดับความหนาแน่นของโฟม ดังนี้ โฟม RPUR ที่มี NCO index 100 < โฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 200 < โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 250 < โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 300 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ NCO index จะทำให้ร่างแหพอลิไอโซไซยานูเรตเกิดเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของร่างแหพอลิเมอร์ของโฟม (crosslink density) เพิ่มสูงขึ้น โฟมจึงมีความหนาแน่นมากขึ้น (16)

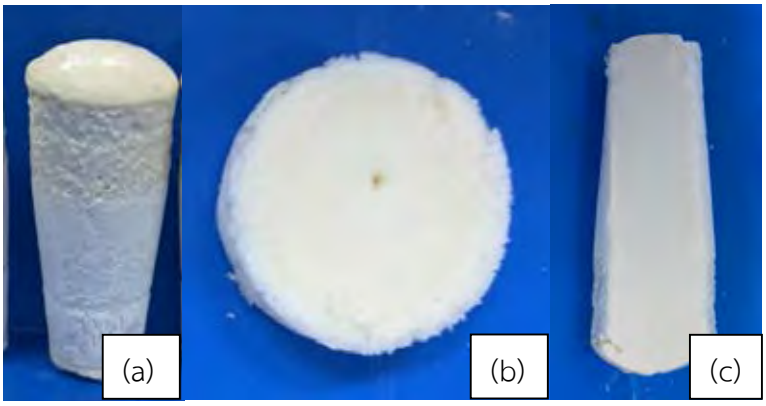
เมื่อพิจารณาความสูงของโฟม พบว่า โฟม RPUR ที่มี NCO index 100 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มีความสูงน้อยกว่าโฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 200, 250 และ 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู

รูปที่ 3.5-3.7 แสดงโฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 200, 250 และ 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู โดย (a) คือ โฟมที่ได้จากการเตรียมในแก้วกระดาษ (b) คือ ฐานของโฟมที่ถูกตัด (c) คือ โฟมที่ถูกตัดผิวด้านข้างออก เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของโฟม พบว่า โฟม RPUR ที่มี NCO index

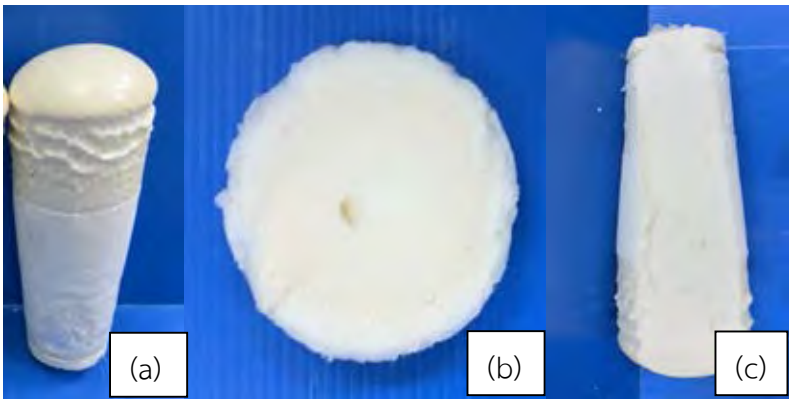
100 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มีเนื้อโฟมสีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย ไม่มีรูบนผิวโฟม ในขณะที่โฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 200 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มีเนื้อโฟมสีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย มีรูบนผิวโฟมเล็กน้อย โฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 250 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มีเนื้อโฟมสีเหลืองอ่อน ผิวไม่ละเอียด เป็นขุยเล็กน้อย มีรูบนผิวโฟมปานกลาง ส่วนโฟม PIR-PUR ที่มี NCO index 300 ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู มีเนื้อโฟมสีเหลืองอ่อน ผิวร่วน เป็นขุย มีรูบนผิวโฟมค่อนข้างเยอะและมีขนาดใหญ่ และเนื้อโฟมค่อนข้างเปราะแตกและหลุด มีสาเหตุมาจากการมีปริมาณพอลิไอโซไซยานูเรตที่มากเกินไป



รูปที่ 3.5 โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 200 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู



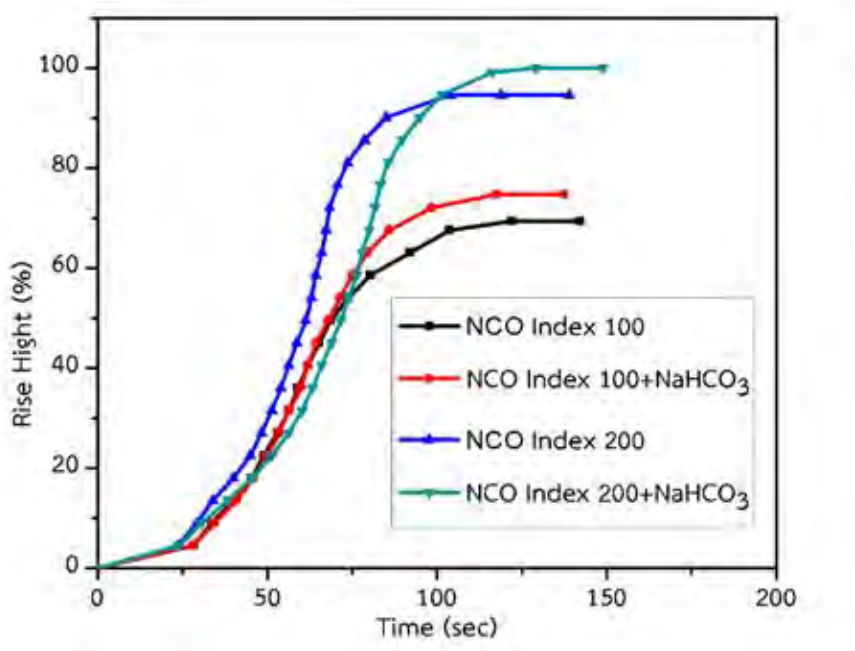
รูปที่ 3.6 โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 250 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู



รูปที่ 3.7 โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 300 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู

3.2 ลักษณะและความเร็วในการฟู (rise profile) ของโฟม

ผลการทดลองการตรวจสอบลักษณะและความเร็วในการฟู (rise profile) ของโฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูที่ NCO index 100, โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 100, โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูที่ NCO index 200 และโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 200 แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 rise profile ของโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและน้ำกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู และโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและน้ำกับผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index ต่าง ๆ

จากผลการทดลองพบว่า โฟม RPUR ที่เติมและไม่เติมผงฟูมีลักษณะของ rise profile ที่คล้ายกัน โดยโฟมทั้งสองแบบมีการฟูสม่ำเสมอประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่โฟมเริ่มเกิดการฟู เป็น ขั้นที่ปฏิกิริยา blowing เริ่มเกิดขึ้น, ขั้นที่โฟมฟูขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นขั้นที่ปฏิกิริยา blowing มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงและมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในปริมาณมาก และขั้นที่โฟมค่อย ๆ หยุดการฟู เป็นขั้นที่ปฏิกิริยา blowing reaction ค่อยๆ สิ้นสุดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโฟมชนิดเดียวกัน โฟม PUR-PIR และโฟม RPUR ที่เติมผงฟูมีความสูงมากกว่าโฟม PUR-PIR และโฟม RPUR ที่ไม่เติมผงฟู ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบโฟมต่างชนิดกัน โฟม PUR-PIR มีความสูงมากกว่าโฟม RPUR นอกจากนี้การเติมผงฟู จะ

ส่งผลต่อ rise profile ของโฟมที่เตรียมโดยใช้ NCO index 200 แต่ไม่ส่งผลต่อ rise profile ของโฟมที่เตรียมที่ NCO index 100 โดยพบว่าโฟม PUR-PIR ที่เติมผงฟูโดยใช้ NCO index 200 มีการหน่วงปฏิกิริยาเล็กน้อย และฟูขึ้นช้ากว่าโฟม PUR-PIR ที่ไม่เติมผงฟูที่ความสูงเดียวกัน

3.3 การศึกษา isocyanate conversion โดยใช้ IR spectrum

การศึกษา isocyanate (NCO) conversion และคำนวณอัตราส่วนระหว่าง polyisocyanurate/polyurethane (PIR/PUR) ของโฟม RPUR ที่เตรียมที่ NCO index 100 โดยใช้น้ำเป็นสารฟู, โฟม RPUR ที่เตรียมที่ NCO index 100 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู, โฟม PIR-PUR ที่เตรียมที่ NCO index 200, 250 และ 300 โดยใช้น้ำเป็นสารฟู และโฟม PIR-PUR ที่เตรียมที่ NCO index 200, 250 และ 300 โดยใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟู ด้วยเทคนิค IR spectroscopy สามารถคำนวณ %NCO conversion ได้จาก normalized peak area ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องใน IR spectra ที่แสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 โดยคำนวณจากสมการ ดังนี้

$$\%\text{NCO conversion} = 1 - \frac{NCO^{f}}{NCO^{i}} \times 100$$

เมื่อ NCO^{i} = initial normalized peak area of isocyanate group

NCO^{f} = final normalized peak area of isocyanate group

ตัวอย่างการคำนวณ %NCO conversion และอัตราส่วน PIR/PUR ของโฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูที่ NCO index 100

จาก IR spectrum ของ PMDI

peak area of isocyanate group (2277 cm^{-1}) = 57.41 = NCO°

peak area of Ar-H (1595 cm^{-1}) = 0.9

ดังนั้น initial normalized peak area of isocyanate group (NCO^{i}) = $\frac{57.41}{0.9}$ = 63.79

จาก IR spectrum ของโฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูที่ NCO index 100

peak area of isocyanate group = 1.092

peak area of isocyanate group Ar-H = 2.009

ดังนั้น final normalized peak area of isocyanate group (NCO^f) = $\frac{1.092}{2.009}$ = 0.54

ดังนั้น % NCO conversion $= 1 - \frac{NCO^f}{NCO^i} \times 100$

$= 1 - \frac{0.54}{63.79} \times 100$

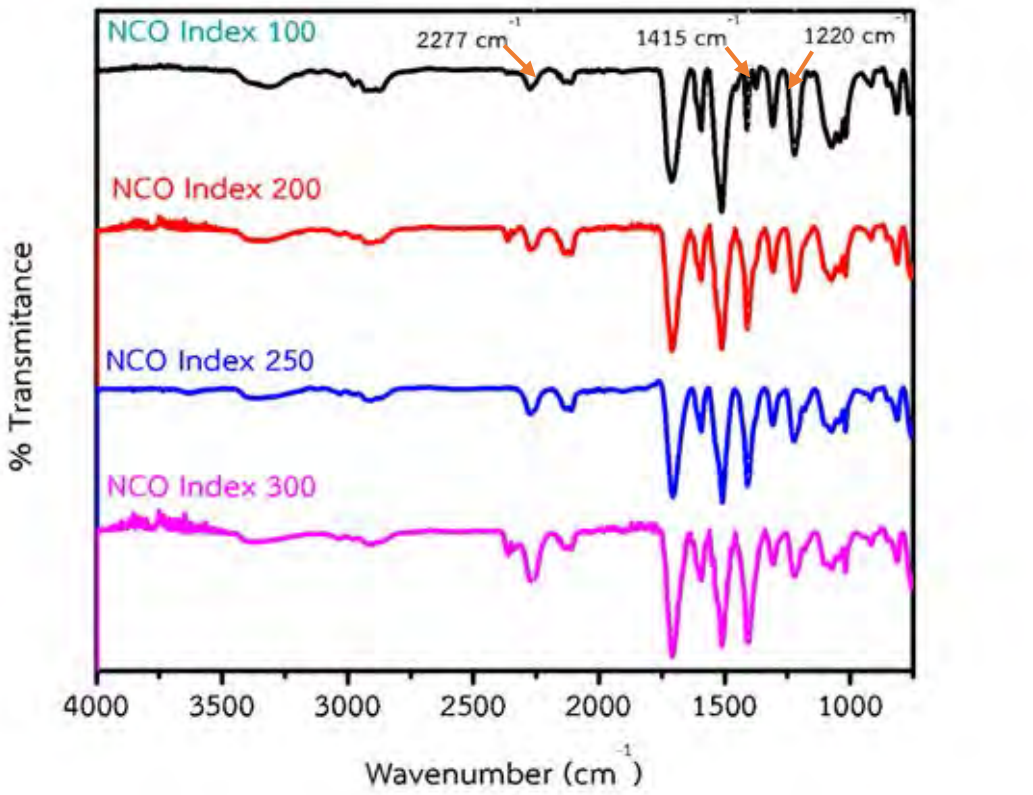
= 99.15 %

คำนวณอัตราส่วน PUR/PIR ได้ดังนี้

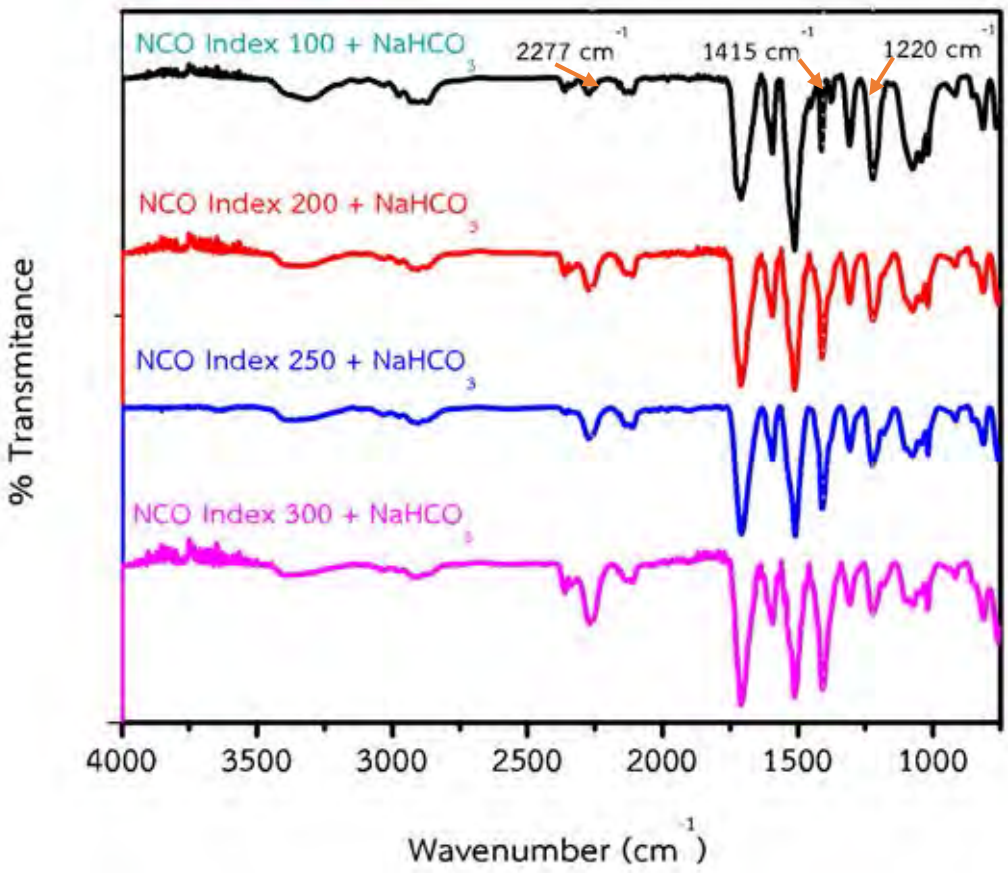
normalized peak area of isocyanurate (PIR; 1415 cm^{-1}) = 1.049

normalized peak area of urethane (PUR; 1220 cm^{-1}) = 4.452

ดังนั้น PIR/PUR = $\frac{1.049}{4.452}$ = 0.24



รูปที่ 3.9 IR spectrum ของโฟม RPUR และ PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3.10 IR spectrum ของโฟม RPUR และ PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู

ตารางที่ 3.3 แสดง peak area ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่หาได้จาก IR spectrum สำหรับใช้ในการคำนวณ %NCO conversion และอัตราส่วน PIR/PUR

จาก IR spectrum ของ โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูที่ NCO index 100, โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 100, โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟูที่ NCO index 200, 250 และ 300 และโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 200, 250 และ 300 พบว่ามี peak ของหมู่ยูรีเทน (PUR) ที่เลขคลื่น 1221 cm^{-1}, peak ของหมู่ไอโซไซยานูเรต (PIR) ที่เลขคลื่น 1415 cm^{-1} และ peak ของหมู่ไอโซไซยาเนต (NCO) ที่เลขคลื่น 2277 cm^{-1} ซึ่ง peak area ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่หาได้จาก IR spectrum แสดงดังตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าโฟมที่มีการเพิ่มปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนตจะทำให้พีคของหมู่ไอโซไซยาเนตและไอโซไซยานูเรตเพิ่มขึ้น แต่พีคของหมู่ยูรีเทนลดลง

ตารางที่ 3.3 peak area ของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ จาก IR spectrum ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR

ชนิดของโฟม	NCO index	Peak area				
		NCO 2277 cm^{-1}	Ar-H 1595 cm^{-1}	PIR 1415 cm^{-1}	PUR 1220 cm^{-1}	NCO^f (Ar-H=0.9)
โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู	100	1.092	2.009	1.049	4.452	0.54
โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู	100	0.674	2.169	1.085	5.076	0.31
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู	200	1.279	1.999	4.555	3.739	0.64
	250	1.737	2.312	3.899	2.325	0.75
	300	2.262	2.058	6.037	1.549	1.10
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู	200	3.212	1.728	6.212	1.641	1.86
	250	3.916	1.538	4.703	1.677	2.55
	300	2.902	1.492	5.766	2.159	1.95

ตารางที่ 3.4 แสดง % NCO conversion และอัตราส่วน PIR/PUR ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR จากตารางที่ 3.4 พบว่า การเติมผงฟู ไม่ส่งผลต่อ % NCO conversion ในโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR โดยโฟมประเภทเดียวกันที่ใช้และไม่ใช้สารฟูเป็นสารช่วยฟูที่เตรียมที่ NCO index เท่ากัน จะมีค่า % NCO conversion ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ เนื่องจากผงฟูที่เติมลงไปไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารประกอบไอโซไซยาเนต นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการเติมผงฟูต่ออัตราส่วน PIR/PUR พบว่า การเติมผงฟูไม่ส่งผลต่ออัตราส่วน PIR/PUR ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR อีกด้วย แต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อ % NCO conversion และอัตราส่วน PIR/PUR ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR อย่างเห็นได้ชัด คือ การเพิ่มปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต หรือ NCO index จากตาราง 3.4 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่ม NCO index จะพบว่า % NCO conversion ลดลงเล็กน้อย แต่อัตราส่วนระหว่าง PIR/PUR จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่ม NCO index จะทำให้มีปริมาณหมู่ไอโซไซยาเนตที่จะสามารถทำปฏิกิริยา trimerization เพื่อเกิดเป็นโครงสร้าง PIR ได้มากขึ้น

ตารางที่ 3.4 %NCO conversion และอัตราส่วนระหว่าง PIR/PUR ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR

ชนิดของโฟม	ตัวเร่งปฏิกิริยา	NCO index	% NCO conversion	PIR/PUR
โฟม RPUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู	DMCHA	100	99.15	0.24
โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู		100	99.51	0.21
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู	DMCHA+KOct	200	99.00	1.22
		250	96.95	2.67
		300	98.28	3.90
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู		200	98.82	1.68
		250	96.01	2.80
		300	97.09	3.79

3.4 การทดสอบการติดไฟ (burning test) ของโฟม RPUR และ โฟม PIR-PUR

การทดสอบการติดไฟของโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 100 เปรียบเทียบกับโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูในปริมาณเท่ากันเป็นสารฟูที่ NCO index 200, 250 และ 300 เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติในการหน่วงไฟ (flame retardancy) ของโฟม โดยชิ้นงานโฟมที่ผ่านการทดสอบการติดไฟแสดงดัง รูปที่ 3.11 และสมบัติการติดไฟของโฟมจากการทดสอบ สรุปได้ดังตารางที่ 3.5

NCO Index 100 NCO Index 200 NCO Index 250 NCO Index 300

รูปที่ 3.11 ชิ้นงานโฟมหลังทดสอบการติดไฟ

ตารางที่ 3.5 ระยะการเผาไหม้ เวลาที่ดับไฟ และลักษณะการเผาไหม้ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู

ตัวอย่างโฟม	ระยะการไหม้ไฟ (cm)	เวลาที่ไฟดับ (sec)	ลักษณะการเผาไหม้
โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู ที่ NCO index 100	3.0	24	เผาไหม้รุนแรง และรวดเร็ว
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู ที่ NCO index 200	1.5	21	เผาไหม้รุนแรงน้อยลง และดับไฟได้เอง
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟู ที่ NCO index 250	0.7	19	เผาไหม้ไม่รุนแรง และดับไฟได้เอง
โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 300	0.1	14	เผาไหม้ไม่รุนแรง และดับไฟได้เอง เกือบทันทีที่เอาไฟออก

จากตารางที่ 3.5 พบว่าเมื่อนำโฟมทั้งสองประเภทมาทดสอบการติดไฟ โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 100 มีการเผาไหม้ที่รุนแรง และรวดเร็ว อีกทั้งโฟมที่สังเคราะห์ได้ ยังไม่มีสมบัติการดับไฟได้เอง (self-extinguishing) ส่วนโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 200, 250 และ 300 มีการเผาไหม้ที่รุนแรงน้อยลง และมีสมบัติการดับไฟได้เอง โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดับไฟของโฟม คือ ปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต (NCO index) ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่ม NCO index จะพบว่า โฟมมีการเผาไหม้ที่รุนแรงน้อยลง และมีสมบัติการดับไฟได้เองที่ดีขึ้น โดยที่ NCO index 300 โฟมมีการเผาไหม้ที่ไม่รุนแรงและดับไฟได้เองเกือบทันทีที่เอาไฟออก เนื่องจากที่ NCO index 300 ปฏิกิริยา trimerization สามารถเกิดได้มากที่สุด ทำให้โฟม PIR-PUR ที่ได้มีหมู่ไอโซไซยานูเรตมากที่สุด ซึ่งหมู่

ไอโซไซยานูเรตเป็นโครงสร้างที่เสถียรต่อความร้อน (17) ทำให้โฟมที่สังเคราะห์ได้เสถียรต่อความร้อน และมีสมบัติหน่วงไฟที่ดีที่สุด

บทที่ 4
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

จากการสังเคราะห์โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูปริมาณ 0.5, 1.0 และ 1.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100 เทียบกับโฟม RPUR อ้างอิง ที่ใช้น้ำเป็นสารฟู พบว่าโฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูปริมาณ 1.0 g จะได้โฟมที่มีคุณสมบัติดีที่สุด คือ โฟมมีความหนาแน่นลดลง และ เนื้อโฟมมีสีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย และไม่มีรูบนผิวโฟม

จากการสังเคราะห์โฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟู 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 200, 250 และ 300 พบว่า ที่ NCO index 200 จะได้โฟมที่มีลักษณะทางกายภาพที่ดี คือ เนื้อโฟมมีสีเหลืองอ่อน ผิวละเอียด ไม่เป็นขุย มีรูบนผิวโฟมเล็กน้อย ในขณะที่ โฟม PIR-PUR ที่ NCO index 250 และ 300 จะมีผิวที่ละเอียดน้อยลง เป็นขุย และมีรูบนผิวโฟมเพิ่มขึ้นและขนาดใหญ่ขึ้น มีการหลุดร่อนของเนื้อโฟม และโฟมที่ได้ค่อนข้างเปราะ

เมื่อพิจารณาลักษณะและความเร็วในการฟูของโฟมโดยการศึกษา rise profile ของโฟม พบว่าโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR ที่เตรียมที่ NCO index เท่ากันจะมี ลักษณะของ rise profile ที่คล้ายกัน ไม่ว่าจะเติมผงฟูเป็นสารช่วยฟูหรือไม่ก็ตาม แต่โฟม PIR-PUR และโฟม RPUR ที่เติมผงฟูมีความสูง มากกว่าโฟม PUR-PIR และโฟม RPUR ที่ไม่เติมผงฟูเมื่อเตรียมโดยใช้ NCO index เท่ากัน

เมื่อคำนวณค่า % NCO conversion และอัตราส่วนระหว่าง polyisocyanurate/polyurethane (PIR/PUR) ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR พบว่าการเติมผงฟู ไม่ส่งผลต่อ % NCO conversion ในโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR โดยโฟมประเภทเดียวกันที่เตรียมที่ NCO index เท่ากันจะมีค่า % NCO conversion ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ เนื่องจากผงฟูที่เติมลงไปไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารประกอบไอโซไซยาเนต นอกจากนี้ การเติมผงฟูไม่ส่งผลต่อ อัตราส่วน PIR/PUR ของโฟม RPUR และโฟม PIR-PUR แต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อ % NCO conversion และอัตราส่วน PIR/PUR ของโฟม คือ การเพิ่มปริมาณสารประกอบไอโซไซยาเนต หรือ NCO index โดยจะพบว่า % NCO conversion ลดลงเล็กน้อย แต่อัตราส่วนระหว่าง PIR/PUR จะเพิ่มขึ้นเมื่อ NCO index สูงขึ้น

จากการทดสอบการติดไฟของโฟม พบว่า โฟม RPUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 100 มีการเผาไหม้ที่รุนแรง และรวดเร็ว อีกทั้งโฟมที่สังเคราะห์ได้ยังไม่มีสมบัติการดับไฟได้เอง (self-extinguishing) ส่วนโฟม PIR-PUR ที่ใช้น้ำและผงฟูเป็นสารฟูที่ NCO index 200, 250 และ 300 มีการเผาไหม้ที่รุนแรงน้อยลง และมีสมบัติการดับไฟได้เอง (self-extinguishing) เมื่อเพิ่ม NCO index จะพบว่า โฟมมีการเผาไหม้ที่รุนแรงน้อยลง และมีสมบัติการดับไฟได้เอง (self- extinguishing) ที่ดีขึ้น

4.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาการปรับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา หรือชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อเพื่อให้ได้โฟม RPUR และโฟม PIR-PUR ที่มีสมบัติที่ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Randall D, Lee S, editors. Huntsman polyurethanes – the polyurethanes book. United Kingdom: John Wiley & Sons; 2002.
2. Szycher M. Szycher's handbook of polyurethanes. 2nd ed. Florida: CRC press; 2012.
3. Woods G. The ICI polyurethane handbook. New York: Wiley; 1990.
4. Kim SH, Lim H, Song JC, Kim BK. Effect of blowing agent type in rigid polyurethane foam. J Macromol Sci, Pure Appl Chem. 2008;45(4):323-7.
5. Shakir ASA, Badri KH, Hua CC. Sodium hydrogen carbonate as an alternative blowing agent in the preparation of palm-based polyurethane foam. AIP Conf Proc. 2016;1784(1):030021.
6. UNEP. Handbook for the Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. Kenya: UNEP; 2006.
7. Baking powder. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Baking_powder [cited 25/01/2019].
8. Naruse A, Nanno H, Kurita M, Inohara H, Fukami T. Development of all water-blown polyisocyanurate foam system for metal-faced continuous sandwich panels. J Cell Plast. 2002;38(5):385-401.
9. Zipfel L, Börner K, Krücke W, Barthelemy P, Dournel P. HFC-365mfc: a versatile blowing agent for rigid polyurethane foams. J Cell Plast. 1999;35(4):328-44.
10. Lim H, Kim EY, Kim BK. Polyurethane foams blown with various types of environmentally friendly blowing agents. Plast Rubber Comps. 2010;39(8):364-9.
11. Nema AK, Deshmukh AV, Palanivelu K, Sharma SK, Malik T. Effect of exo- and endothermic blowing and wetting agents on morphology, density and hardness of thermoplastic polyurethanes foams. J Cell Plast. 2008;44(4):277-92.
12. Choe KH, Lee DS, Seo WJ, Kim WN. Properties of rigid polyurethane foams with blowing agents and catalysts. Polym J. 2004;36:368-73.

13. Villiger, Mark E. Commentary on the 1969 Vienna convention on the law of treaties. Brill; 2009.
14. Modesti M, Lorenzetti A. An experimental method for evaluating isocyanate conversion and trimer formation in polyisocyanate–polyurethane foams. Eur Polym J. 2001;37(5):949-54.
15. Dusek K, Spirkova M, Havlicek I. Network formation of polyurethanes due to side reactions. Macromolecules. 1990;23(6):1774-81.
16. Nacas AM, Ito NM, Sousa RRD, Spinacé MA, Dos Santos DJ. Effects of NCO:OH ratio on the mechanical properties and chemical structure of Kraft lignin–based polyurethane adhesive. J Adhes. 2017;93(1-2):18-29.
17. Xu Q, Hong T, Zhou Z, Gao J, Xue L. The effect of the trimerization catalyst on the thermal stability and the fire performance of the polyisocyanurate-polyurethane foam. Fire Mater. 2018;42(1):119-27.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100

วันที่ทำการทดลอง 30/08/61 (ความชื้น 75%)						
DMCHA 1.00g isocyanate (index 100) 15.18g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.838	2.81	2.972	0.927	39.11219757	14.1
1.2	2.848	2.82	3.034	0.975	40.01289238	
1.3	2.898	2.836	2.97	0.995	40.76261375	
2.1	2.89	2.942	2.99	0.98	38.54911182	14.4
2.2	2.872	2.864	2.908	0.927	38.75501263	
2.3	2.848	2.928	2.982	0.94	37.80151077	
3.1	2.942	2.894	2.974	0.982	38.78192199	14.4
3.2	2.92	2.972	3.056	0.99	37.3293294	
3.3	2.902	2.962	2.99	0.961	37.39122874	
4.1	2.916	2.97	2.902	0.996	39.62944237	14.5
4.2	2.768	2.806	2.998	0.906	38.90835025	
4.3	2.908	2.968	2.854	0.927	37.63288095	
5.1	2.886	2.856	3.014	0.997	40.13260776	14.7
5.2	2.91	2.894	2.928	0.921	37.3505535	
5.3	2.81	2.982	2.976	0.967	38.77748051	
6.1	2.834	2.864	2.972	0.903	37.43398704	14.7
6.2	2.882	2.88	2.964	0.915	37.19259068	
6.3	2.778	2.87	2.98	0.892	37.54347362	
7.1	2.926	2.902	3.03	0.913	35.4859486	14.7
7.2	2.728	2.788	2.894	0.815	37.02729162	
7.3	2.786	2.76	3.014	0.895	38.61798355	

ก.1 (ต่อ) ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100

8.1	2.84	2.904	3.138	0.996	38.48499612	14.7
8.2	2.864	2.886	2.982	0.969	39.31396055	
8.3	2.934	2.856	2.838	0.898	37.76118659	
9.1	2.912	2.966	2.972	0.953	37.12629218	14.5
9.2	2.936	2.866	2.88	0.908	37.46805279	
9.3	2.944	2.852	2.932	0.93	37.77736443	
10.1	2.862	2.904	2.966	0.915	37.11792637	14.5
10.2	2.788	2.844	2.986	0.909	38.39297078	
10.3	2.934	2.884	2.876	0.939	38.58525236	
เฉลี่ย					38.5382581	14.46666667
SD					1.11238327	0.225092574

ตาราง ก.2 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	Cream	Gel	Rise	tack free
1	20	31	125	209
2	20	31	128	210
3	20	30	125	208
4	19	32	124	210
5	21	29	130	207
6	20	30	128	206
7	20	30	130	208
8	21	32	130	205
9	21	32	128	206
10	20	33	128	203
เฉลี่ย	20.2	31	127.6	207.2
SD	0.632456	1.247219	2.221111	2.250926

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100

วันที่ทำการทดลอง 6/09/61 (ความชื้น 65%)						
DMCHA 1.00g isocyanate (index 100) 15.18g ผงฟู 0.5g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.794	2.798	2.994	0.912	38.9644841	14.8
1.2	2.814	2.814	2.922	0.916	39.58832034	
1.3	2.804	2.826	2.872	0.882	38.75555698	
2.1	2.98	3.008	2.952	1.014	38.32017695	14.9
2.2	2.88	2.866	2.884	0.897	37.68152869	
2.3	2.834	2.824	2.91	0.894	38.38663043	
3.1	2.972	2.94	2.992	0.984	37.63893909	14.9
3.2	2.876	2.864	2.932	0.923	38.21869377	
3.3	2.812	2.834	2.924	0.905	38.83792768	
4.1	3.078	3.072	3.006	1.055	37.11706749	14.6
4.2	2.93	2.912	2.982	0.975	38.32110165	
4.3	2.804	2.814	2.882	0.905	39.79719842	
เฉลี่ย					38.4689688	14.8
SD					0.782246762	0.141421356

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	cream	Gel	Rise	tack free
1	22	36	121	198
2	21	36	121	195
3	21	35	120	198
4	22	37	118	190
เฉลี่ย	21.5	36	120	195.25
SD	0.57735	0.816497	1.414214	3.774917

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100

วันที่ทำการทดลอง 6/09/61 (ความชื้น 60%)						
DMCHA 1.00g isocyanate (index 100) 15.18g ผงฟู 1.0g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.912	2.864	2.802	0.811	34.70470355	15.6
1.2	2.75	2.796	2.864	0.783	35.55649041	
1.3	2.864	3.07	3.038	0.868	32.49530118	
2.1	2.86	2.784	2.956	0.834	35.4345039	16
2.2	2.862	2.844	2.87	0.833	35.65856674	
2.3	2.736	2.728	3.05	0.777	34.13192011	
3.1	2.864	2.844	2.962	0.807	33.44921075	15.6
3.2	2.802	2.754	2.962	0.792	34.65038469	
3.3	2.776	2.83	2.882	0.793	35.02461044	
4.1	2.864	2.846	2.938	0.84	35.0767692	15.8
4.2	2.776	2.74	2.998	0.809	35.47699841	
4.3	2.78	2.828	2.982	0.821	35.01961095	
5.1	2.942	2.89	2.794	0.849	35.73886675	15.6
5.2	2.779	2.79	3.052	0.864	36.51207065	
5.3	2.77	2.878	2.944	0.859	36.60031301	
เฉลี่ย					35.03535472	15.72
SD					1.075127494	0.178885438

ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	cream	gel	Rise	tack free
1	22	34	116	183
2	22	33	119	184
3	21	33	121	184
4	22	32	118	186
5	22	34	117	183
เฉลี่ย	21.8	33.2	118.2	184
SD	0.447214	0.83666	1.923538	1.224745

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการเตรียมโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.5 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100

วันที่ทำการทดลอง 6/09/61 (ความชื้น 65%)						
DMCHA 1.00g isocyanate (index 100) 15.18g ผงฟู 1.5g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.97	2.97	2.774	0.814	33.26634211	15.9
1.2	2.992	2.834	2.906	0.793	32.18223059	
1.3	2.832	2.75	2.944	0.823	35.89517597	
2.1	3.02	2.962	2.932	0.83	31.64624087	16.1
2.2	2.886	2.864	2.954	0.827	33.87081745	
2.3	2.814	2.842	2.888	0.848	36.71558875	
3.1	2.874	2.792	2.91	0.719	30.79170403	16
3.2	2.684	2.668	2.928	0.767	36.58103212	
3.3	2.804	2.726	2.972	0.807	35.52391881	
4.1	2.952	2.786	2.92	0.808	33.64581434	15.8
4.2	2.878	2.884	2.934	0.855	35.10912125	
4.3	2.748	2.836	2.962	0.822	35.6093305	
เฉลี่ย					34.23644307	15.95
SD					1.97524269	0.129099445

ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 0.5 g เป็นสารฟูที่ NCO index 100

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	cream	gel	rise	tack free
1	22	34	118	210
2	22	33	125	209
3	22	33	115	213
4	21	33	124	211
เฉลี่ย	21.75	33.25	120.5	210.75
SD	0.5	0.5	4.795832	1.707825

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 200

วันที่ทำการทดลอง 18/10/61 (ความชื้น 60%)						
DMCHA 0.05g KOct 0.3g isocyanate (index 200) 31.36g ผงฟู 1.0g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.98	2.916	2.966	0.942	36.54903984	21.3
1.2	3.008	3	2.922	0.965	36.59721312	
1.3	3.05	3.028	2.958	0.972	35.58052772	
1.4	3.072	3.06	2.982	0.967	34.49659239	
2.1	3.044	3.018	2.85	0.973	37.16242936	21.5
2.2	2.986	2.91	2.926	0.928	36.49983171	
2.3	2.992	2.992	2.97	0.991	37.27297232	
2.4	2.96	2.97	3.078	0.961	35.51457418	
3.1	2.982	2.936	2.99	0.937	35.79354492	21.4
3.2	2.962	2.94	2.806	0.917	37.52746982	
3.3	2.942	2.966	2.864	0.923	36.93302435	
3.4	2.952	2.902	2.94	0.895	35.53546016	
4.1	2.964	2.938	3.028	0.927	35.15554804	21.5
4.2	2.904	2.85	2.93	0.919	37.89713851	
4.3	2.962	2.93	3.08	0.949	35.50281761	
4.4	3.02	2.982	3.02	0.984	36.18041745	
5.1	2.898	2.888	3.024	0.984	38.87923773	21.5
5.2	2.95	2.892	2.948	0.909	36.14232605	
5.3	2.896	2.88	2.96	0.934	37.83241978	
5.4	2.944	2.924	3.04	1.004	38.36586155	
เฉลี่ย					36.68009759	21.475
SD					1.155122406	0.05

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 200

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	cream	gel	rise	tack free
1	19	39	133	108
2	20	38	129	107
3	19	37	135	110
4	19	37	135	109
5	19	39	130	112
เฉลี่ย	19.2	38	132.4	109.2
SD	0.447214	1	2.792848	1.923538

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 250

วันที่ทำการทดลอง 17/12/61 (ความชื้น 55%)						
DMCHA 0.05g KOct 0.3g isocyanate (index 250) 39.20g ผงฟู 1.0g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.946	2.942	2.996	1.184	45.59681235	20
1.2	3.01	3.024	3.064	1.229	44.06713738	
1.3	2.94	2.9	3.024	1.183	45.88361526	
1.4	2.91	2.974	2.946	1.178	46.2038957	
2.1	3.09	3.01	2.952	1.249	45.49054189	19.7
2.2	3.064	3.072	2.978	1.276	45.52144176	
2.3	2.982	2.952	2.962	1.229	47.13492674	
2.4	2.938	2.934	2.982	1.222	47.53917775	
3.1	2.964	2.952	3.08	1.249	46.3465242	20.1
3.2	2.95	2.936	3.082	1.211	45.36630848	
3.3	2.884	2.874	2.976	1.143	46.33735966	
3.4	2.922	2.812	3.062	1.161	46.14572838	
4.1	3.08	3.078	2.876	1.189	43.60875027	20.5
4.2	3.016	3.01	2.922	1.156	43.57925381	
4.3	2.982	3.02	3.024	1.198	43.9906571	
4.4	2.982	2.934	2.93	1.141	44.50924991	
5.1	3.066	3.052	3.022	1.237	43.74400674	20.5
5.2	3.036	2.96	2.93	1.158	43.97921374	
5.3	2.906	2.918	2.934	1.136	45.660149	
5.4	3.012	2.956	2.95	1.174	44.69785514	
เฉลี่ย					45.27013026	20.1
SD					1.190397321	0.382970843

ตารางที่ ก.12 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 250

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	cream	gel	Rise	tack free
1	19	45	175	150
2	19	44	177	149
3	19	46	181	154
4	18	46	177	154
5	19	47	174	153
เฉลี่ย	18.8	45.6	176.8	152
SD	0.447214	1.140175	2.683282	2.345208

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการเตรียมโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 300

วันที่ทำการทดลอง 25/10/61 (ความชื้น 70%)						
DMCHA 0.05g KOct 0.3g isocyanate (index 300) 47.03g ผงฟู 1.0g						
ชิ้นโฟม	ความกว้าง	ความยาว	ความสูง	น้ำหนัก	ความหนาแน่น	ความสูงโฟม
1.1	2.88	2.884	2.992	1.205	48.48838439	22
1.2	2.91	2.896	2.952	1.167	46.9097325	
1.3	2.906	2.884	2.92	1.144	46.7468452	
1.4	2.952	2.942	2.952	1.191	46.45541957	
2.1	2.946	2.958	3.044	1.261	47.53784894	21.7
2.2	2.98	2.984	2.92	1.195	46.02247505	
2.3	2.966	2.946	2.948	1.14	44.25613497	
2.4	2.91	2.884	3.038	1.164	45.65380356	
3.1	3.136	3.104	2.898	1.335	47.32440016	22
3.2	3.02	3.036	2.922	1.276	47.62793504	
3.3	3.07	3.076	3.01	1.327	46.68525343	
3.4	3.054	3.062	3.03	1.359	47.96258801	
4.1	2.992	2.994	2.916	1.309	50.11165449	21.3
4.2	2.97	2.922	3.06	1.302	49.02898435	
4.3	2.97	2.956	2.946	1.321	51.07509653	
4.4	2.984	2.98	3.166	1.497	53.1735685	
5.1	3.046	3.04	3.044	1.247	44.24032643	22.1
5.2	2.956	2.928	3.002	1.222	47.03108694	
5.3	3.01	2.984	3.024	1.218	44.84357078	
5.4	3.02	3.04	3.104	1.244	43.65340666	
เฉลี่ย					47.28279452	21.775
SD					2.356565169	0.359397644

ตารางที่ ก.14 ตารางแสดงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟูที่ NCO index 300

ชิ้นโฟม	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (วินาที)			
	Cream	gel	Rise	tack free
1	19	46	173	189
2	19	47	178	186
3	20	47	168	185
4	20	48	184	191
5	19	46	185	189
เฉลี่ย	19.4	46.8	177.6	188
SD	0.547723	0.83666	7.231874	2.44949

ตารางที่ ก.15 rise profile โฟม RPUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 100

ความสูง (cm)	เวลา (วินาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	27	28	30	28.33
2	33	33	35	33.67
3	39	40	41	40.00
4	44	44	48	45.33
5	46	50	51	49.00
6	50	53	56	53.00
7	53	56	60	56.33
8	56	58	63	59.00
9	59	60	67	62.00
10	62	64	70	65.33
11	65	67	74	68.67
12	72	71	79	74.00
13	80	76	85	80.33
14	96	89	91	92.00
15	106	96	109	103.67
16	130 (โฟมหยุดฟู)	116 (โฟมหยุดฟู)	120 (โฟมหยุดฟู)	122.00

ตารางที่ ก.16 rise profile โฟม RPUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 100

ความสูง (cm)	เวลา (วินาที)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	26	30	28.00
2	33	36	34.50
3	40	42	41.00
4	45	47	46.00
5	49	51	50.00
6	52	55	53.50
7	55	58	56.50
8	59	61	60.00
9	60	64	62.00
10	63	66	64.50
11	67	69	68.00
12	70	73	71.50
13	74	76	75.00
14	79	80	79.50
15	85	87	86.00
16	98	99	98.50
17	115 (โฟมหยุดฟู)	120 (โฟมหยุดฟู)	117.50

ตารางที่ ก.17 rise profile โฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำเป็นสารฟู ที่ NCO index 200

ความสูง (cm)	เวลา (วินาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	23	24	24	23.67
2	27	30	31	29.33
3	33	33	36	34.00
4	38	40	42	40.00
5	43	44	48	45.00
6	47	48	50	48.33
7	50	51	53	51.33
8	53	53	56	54.00
9	55	55	59	56.33
10	57	58	61	58.67
11	60	61	63	61.33
12	61	63	65	63.00
13	62	64	67	64.33
14	64	66	68	66.00
15	65	67	70	67.33
16	66	68	71	68.33
17	68	71	73	70.67
18	72	74	75	73.67
19	77	79	80	78.67
20	83	86	86	85.00
21	103 (โฟมหยุดฟู)	114 (โฟมหยุดฟู)	95	104.00
22			119 (โฟมหยุดฟู)	119.00

ตารางที่ ก.18 rise profile โฟม PIR-PUR โดยใช้น้ำร่วมกับผงฟูปริมาณ 1.0 g เป็นสารฟู ที่ NCO index 200

ความสูง (cm)	เวลา (วินาที)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	24	24	24	24.00
2	31	31	30	30.67
3	38	38	39	38.33
4	47	45	45	45.67
5	53	50	51	51.33
6	58	55	56	56.33
7	62	59	60	60.33
8	65	62	63	63.33
9	69	63	66	66.00
10	72	67	68	69.00
11	75	69	71	71.67
12	77	71	74	74.00
13	80	73	76	76.33
14	82	75	77	78.00
15	84	77	79	80.00
16	86	78	81	81.67
17	87	80	83	83.33
18	91	82	84	85.67
19	96	86	87	89.67
20	102	91	92	95.00
21	111	96	97	101.33
22	137 (โฟมหยุดฟู)	112	100	116.33
23		128 (โฟมหยุดฟู)	130 (โฟมหยุดฟู)	129.00

ประวัติผู้วิจัย

นาย นพรุจ วุฒินันติวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 เดือน มกราคม พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ จังหวัดราชบุรี เมื่อปีการศึกษา 2557 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2558 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 83 หมู่ 1 ตำบลศรีสุราษฎร์ อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี รหัสไปรษณีย์ 70130