

อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมสำหรับการแยกพลาสติกด้วย  
กระบวนการทำให้ลอยตัว

นางสาวภัทราศิริ พักแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

BUBBLE HYDRODYNAMIC AND MIXING FOR PLASTIC SEPARATION  
BY FLOTATION PROCESS

Miss Pattarasiri Fagkaew

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
For the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering  
Department of Environmental Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2013  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมสำหรับการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว
โดย	นางสาวภัทราศิริ พักแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ฝาริโน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุล)

ภัทรศิริ พักแก้ว: อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมสำหรับการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว (Bubble Hydrodynamic and Mixing for Plastic Separation by Flotation Process) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 178 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกการแยกพลาสติกผสมระหว่างพลาสติกพอลิโพรพิลีน (พีเอส) กับพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (เอบีเอส) ทั้งชนิดที่เป็นเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวจากการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกผ่านใบพัดกวน (Induced air flotation) โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกพลาสติก และมีการประยุกต์ใช้โปรแกรมทางสถิติในการอธิบายอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมที่เกิดจากกระบวนการนี้ จากการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกวน และเมื่อศึกษาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมที่เกิดจากกระบวนการนี้ ซึ่งในงานวิจัยอธิบายในรูปของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร่งเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) พบว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติก โดยอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร่งเกรเดียนท์สูง จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกพลาสติกสูงด้วย โดยประสิทธิภาพการแยกพลาสติกบริสุทธิ์สูงสุดของพีเอสเท่ากับ 91% และเอบีเอสเท่ากับ 99% และสำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ประสิทธิภาพการแยกพีเอสสูงสุดเท่ากับ 89% และเอบีเอสเท่ากับ 95% มีเงื่อนไขดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศ (6.99 เซนติเมตร) อัตราเร็วในการกวน (675 รอบต่อนาที) ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บอนอล (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ความเข้มข้นของกรดแทนนิก (10 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว) โดยปรับสภาพเป็นเวลา 15 นาทีและใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 นาที

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2556.....

# # 5470321721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: FLOTATION / PLASTIC SEPARATION / BUBBLE HYDRODYNAMIC / MIXING

PATTARASIRI FAGKAEW: BUBBLE HYDRODYNAMIC AND MIXING FOR PLASTIC SEPARATION BY FLOTATION PROCESS. ADVISOR: ASSOC. PROF. PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 178 pp.

The objective of this research is to study separation mechanisms of plastic, i.e. polystyrene (PS) and acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), both virgin and post – consumer plastics, by the induced air flotation with mixing devices process. The optimal operating condition for plastic separation was determined and the bubble hydrodynamics and mixing parameters in this process were investigated. The results shown that, from factor analysis and design of experiment method (DOE), the generated bubble sizes were mainly affected by the induced air tube diameter and the rotation speed. Moreover, the bubble hydrodynamic parameters (i.e. interfacial area ( $a$ ) and velocity gradient ( $G$ )) that in this research expressed in term of  $a/G$  apart from the chemical agents (i.e. wetting agent and surfactant) were the key factors impacting the plastic separation efficiency. The higher  $a/G$  ratio provided the higher plastic recovery percentage. The highest plastic recovered percentage of 99% were achieved at this operating condition: induced air tube diameter (6.99 centimeters), rotation speed (675 rpm), methyl isobutyl carbinol (5 mg/l), tannic acid (10mg/l for virgin plastic and 5 mg/l for post – consumer plastic) with conditioning time of 15 minutes and flotation time of 2 minutes.

Department: Environmental Engineering.....

Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering.....

Advisor's Signature .....

Academic Year 2013.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาส คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ผาริโน และดร. พิเชฐ ชัยวิวัฒน์วรกุลที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ทิชม แก่ในงานวิจัยนี้ให้เป็นไปในแนวทางที่ดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ในหลายๆรายวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ขอขอบคุณบริษัท Global connection สำหรับเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์และบริษัท Thai Ethoxylate สำหรับสารลดแรงตึงผิว Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณน้ำแอม สำหรับคู่มือและโปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติ Minitab

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือข้าพเจ้าทุกอย่าง

และสุดท้ายที่ขาดไม่ได้เลย ต้องขอบคุณครอบครัวที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจและให้คำแนะนำข้าพเจ้า รวมทั้งสนับสนุนและให้โอกาสทางการศึกษาเป็นอย่างดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 พลาสติก .....	5
2.2 กระบวนการตัดแยกพลาสติก .....	6
2.3 พลาสติกพอลิโพรไพลีน.....	7
2.4 พลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน.....	8
2.5 การแยกพลาสติกผสมด้วยกระบวนการทำให้ลอย.....	10
2.6 สารเคลือบผิว .....	12
2.7 ศักย์ไฟฟ้าซีต้า.....	13
2.8 มุมสัมผัส.....	16
2.9 พลังงานพื้นผิวอิสระและแรงยึดเกาะระหว่างของแข็งกับฟองอากาศ.....	17
2.10 การเหนี่ยวนำอากาศผ่านใบกวน.....	19
2.11 การออกแบบแผนการทดลอง.....	22

2. 12	ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม .....	28
2. 13	สารเคลือบฟอง .....	34
2. 14	สารลดแรงตึงผิว .....	34
2. 15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	35
บทที่ 3	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	42
3. 1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย .....	42
3. 2	ชุดทดลองและการติดตั้งอุปกรณ์ .....	47
3. 3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	48
3. 4	วิธีดำเนินการวิจัย .....	53
3. 5	แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน .....	73
บทที่ 4	ผลการทดลอง และวิจารณ์ .....	75
4. 1	สมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติก .....	75
4. 2	ผลการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย – จม .....	83
4. 3	ผลการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก .....	85
4. 4	ผลการกวนผสมและการเกิดฟอง .....	97
4. 5	ผลการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย .....	116
4. 6	การวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอส ด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว .....	123
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะและบทประยุกต์เชิงวิศวกรรม .....	127
5. 1	สรุปผลการวิจัย .....	127
5. 2	ข้อเสนอแนะ .....	128
5. 3	บทประยุกต์ทางวิศวกรรม .....	129



รายการอ้างอิง.....	131
ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก .....	138
ภาคผนวก ข .....	146
ภาคผนวก ค .....	150
ภาคผนวก ง.....	153
ภาคผนวก จ .....	164
ภาคผนวก ฉ .....	171
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	178

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2- 1	สรุปสมบัติต่างๆของพีเอส (SHASHOUA, 2008).....	8
ตารางที่ 2- 2	สรุปสมบัติต่างๆของเอบีเอส (SHASHOUA, 2008) .....	9
ตารางที่ 2- 3	ค่าพลังงานอิสระพื้นผิวของพลาสติกบางชนิด (SHASHOUA, 2008) .....	17
ตารางที่ 2- 4	การจัดการทดลองของ PLACKETT – BURMAN ที่มีจำนวนการทดลอง 12 ครั้ง (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551).....	24
ตารางที่ 2- 5	ค่ารหัสของระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบ CCD สำหรับ 3 ปัจจัย (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551).....	25
ตารางที่ 2- 6	ค่าคงที่ K ของไบกวน ณ สภาวะราบเรียบและสภาวะปั่นป่วน (TCHOBANOGLOUS, BURTON AND STENSEL, 2002) .....	33
ตารางที่ 2- 7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของพลาสติกที่มีผลต่อกระบวนการแยก พลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย.....	35
ตารางที่ 2- 8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับสภาพพลาสติกที่มีผลต่อกระบวนการแยก พลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย.....	36
ตารางที่ 2- 9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟองอากาศและการรวมผสม .....	40
ตารางที่ 3- 1	เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	42
ตารางที่ 3- 2	ขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย .....	43
ตารางที่ 3- 4	ลักษณะสมบัติของกรดแทนนินค .....	45
ตารางที่ 3- 5	ลักษณะสมบัติของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต.....	45
ตารางที่ 3- 6	ลักษณะสมบัติของเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล .....	46
ตารางที่ 3- 7	ลักษณะสมบัติของ POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL ETHER.....	46
ตารางที่ 3- 8	ลักษณะสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์.....	47
ตารางที่ 3- 8	สรุปพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์.....	52
ตารางที่ 3- 9	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1.....	54
ตารางที่ 3- 10	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2 .....	55

ตารางที่ 3 - 11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.1 .....	58
ตารางที่ 3 - 12 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.2 .....	60
ตารางที่ 3 - 13 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.3 .....	62
ตารางที่ 3 - 14 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลองที่ 4 .....	63
ตารางที่ 3 - 15 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4 .....	65
ตารางที่ 3 - 16 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.1 .....	68
ตารางที่ 3 - 17 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.2 .....	70
ตารางที่ 3 - 18 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.3 .....	72
ตารางที่ 4 - 1 ค่าพลังงานพื้นผิวของของเหลวที่ใช้ทดสอบ .....	76
ตารางที่ 4 - 2 ค่ามุมสัมผัสของพลาสติกและสารเคลือบผิว .....	77
ตารางที่ 4 - 3 ค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติกและสารเคลือบผิว (มิลลิจูล/ตารางเมตร).....	77
ตารางที่ 4 - 4 ค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติกหรือสารเคลือบผิวกับน้ำ.....	81
ตารางที่ 4 - 5 ค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติก น้ำและสารเคลือบผิว .....	81
ตารางที่ 4 - 6 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกจากการ ปรับสภาพด้วยกรดแทนนิกและแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต .....	90
ตารางที่ 4 - 7 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกในการใช้เมทิล ไโอโซบิวทิลคาร์บิโนลและ POLYOXYEHTYLENE (5) LAURYL ETHER เป็นสาร เคลือบฟอง.....	94
ตารางที่ 4 - 8 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลองที่ 4 .....	98
ตารางที่ 4 - 9 เงื่อนไขในการจัดการทดลองแบบ PLACKETT - BURMAN แบบ 12 สิ่งทดลอง .....	99
ตารางที่ 4 - 10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจากการจัดแบบการทดลองแบบ PLACKETT - BURMAN สำหรับกลิ่นรองปัจจัยการเกิดฟองอากาศจากการ เหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผ่านใบพัดกวน .....	100
ตารางที่ 4 - 11 ผลทางสถิติของการจัดแบบการทดลองแบบ PLACKETT - BURMAN .....	101
ตารางที่ 4 - 12 เงื่อนไขในการจัดการทดลองแบบ CCD .....	102

ตารางที่ 4 - 13 ขนาดของฟองอากาศจากการจัดการทดลองแบบ CCD และขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้ POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL ETHER เป็นสารเคลือบฟอง .....	103
ตารางที่ 4 - 14 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจากขนาดของฟองอากาศที่ใช้ POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL ETHER เป็นสารเคลือบฟองในการจัดการทดลองแบบ CCD .....	103
ตารางที่ 4 - 15 ขนาดของฟองอากาศจากการจัดการทดลองแบบ CCD และขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้เมทิลไอโซบิวทิลเป็นสารเคลือบฟอง.	109
ตารางที่ 4 - 16 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจากขนาดของฟองอากาศที่ใช้เมทิลไอโซบิวทิลเป็นสารเคลือบฟองในการจัดการทดลองแบบ CCD .....	110
ตารางที่ 4 - 17 เปรียบเทียบผลทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมระหว่าง POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL EYHER และเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล (MIBC)	114
ตารางที่ 4 - 18 ต้นทุนในระดับการทดลองของการแยกพลาสติกผสมต่อครั้ง (กรณีใช้พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว) .....	123
ตารางที่ 4 - 19 สรุปประสิทธิภาพการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอย .....	124
ตารางที่ 4 - 20 เปรียบเทียบผลจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ .....	125
ตารางที่ 5 - 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบขั้นต้นสำหรับการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอส.....	130

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2 - 1 โครงสร้างของพีเอส (บวรกิตต์, 2549) .....	7
ภาพที่ 2 - 2 โครงสร้างของเอบีเอส (บวรกิตต์, 2549) .....	8
ภาพที่ 2 - 3 กระบวนการทำให้ลอย (SASTRY และคณะ, 1999) .....	11
ภาพที่ 2 - 4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าซีตากับศักย์พื้นผิวซึ่งขึ้นกับระดับของประจุใน สารละลาย (MTEC, 2008: ONLINE) .....	14
ภาพที่ 2 - 5 ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าซีต่า (มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2010: ออนไลน์) .....	15
ภาพที่ 2 - 6 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีต่ากับค่าพีเอส (MTEC, 2008: ONLINE) .....	15
ภาพที่ 2 - 7 ค่ามุมสัมผัสของฟองอากาศบนผิวของแข็ง (SASTRY และคณะ, 1999: ออนไลน์).....	16
ภาพที่ 2 - 8 สมดุลของแรงที่กระทำตามแนวราบ (ALTER, 2005).....	18
ภาพที่ 2 - 9 การเกิดฟองอากาศจากการเหนี่ยวนำอากาศผ่านตัวกวน (NORTH AMERICAN MIXING FORUM, 2012: ONLINE) .....	19
ภาพที่ 2 - 10 ใบกวนแบบ PITCHED BLADE TURBINE (WELLMAN, 2006: ONLINE) .....	20
ภาพที่ 2 - 11 ใบกวนแบบ TURBINE DISC (WELLMAN, 2006: ONLINE) .....	21
ภาพที่ 2 - 12 ใบกวนแบบ PADDLE (WELLMAN, 2006: ONLINE) .....	21
ภาพที่ 2 - 13 คุณลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิว (ROSEN และ KUNJAPPU, 2012) .....	35
ภาพที่ 3 - 1 ลักษณะของท่อนำอากาศที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
ภาพที่ 3 - 2 ใบกวนชนิด PITCHED BLADE TURBINE .....	44
ภาพที่ 3 - 3 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (ซ้าย) และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (ขวา) .....	44
ภาพที่ 3 - 4 การติดตั้งอุปกรณ์.....	47
ภาพที่ 3 - 5 อุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าไปในระบบ .....	49
ภาพที่ 3 - 6 แผนผังสรุปการทดลองที่ 1 .....	54
ภาพที่ 3 - 7 แผนผังสรุปการทดลองที่ 2 .....	55
ภาพที่ 3 - 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก .....	56
ภาพที่ 3 - 9 แผนผังสรุปการทดลองที่ 3.1 .....	57

ภาพที่ 3 - 10 แผนผังสรุปการทดลองที่ 3.2 .....	59
ภาพที่ 3 - 11 แผนผังสรุปการทดลองที่ 3.3 .....	61
ภาพที่ 3 - 12 แผนผังสรุปการทดลองที่ 4 .....	64
ภาพที่ 3 - 13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการกวนผสมและ การเกิดฟอง .....	65
ภาพที่ 3 - 14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการแยกพลาสติกด้วย กระบวนการทำให้ลอย.....	66
ภาพที่ 3 - 15 แผนผังสรุปการทดลองที่ 5.1 .....	67
ภาพที่ 3 - 16 แผนผังสรุปการทดลองที่ 5.2 .....	69
ภาพที่ 3 - 17 แผนผังสรุปการทดลองที่ 5.3 .....	71
ภาพที่ 4 - 1 ศักย์ไฟฟ้าซีต้าของเอบีเอสที่พีเอช 7 ณ ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆ .....	80
ภาพที่ 4 - 2 เปรียบเทียบปฏิกิริยาพลังงานอิสระพื้นผิวของพลาสติกและสารเคลือบผิว .....	82
ภาพที่ 4 - 3 แบบจำลองการดูดซับด้วยชั้นน้ำของกรดแทนนิกบนพื้นผิวพลาสติก .....	83
ภาพที่ 4 - 4 เปอร์เซ็นต์การลอยของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ต่างๆกัน.....	84
ภาพที่ 4 - 5 เปอร์เซ็นต์การลอยของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของ แคลเซียมคลอไรด์ต่างๆกัน .....	85
ภาพที่ 4 - 6 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของพลาสติก .....	86
ภาพที่ 4 - 7 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ กรดแทนนิกต่างๆกัน .....	87
ภาพที่ 4 - 8 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆกัน .....	88
ภาพที่ 4 - 9 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆกัน.....	89

ภาพที่ 4 - 10	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆกัน.....	90
ภาพที่ 4 - 11	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL ETHER ต่างๆกัน.....	92
ภาพที่ 4 - 12	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ MIBC ต่างๆกัน .....	92
ภาพที่ 4 - 13	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ ความเข้มข้นของ POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL ETHER ต่างๆกัน .....	93
ภาพที่ 4 - 14	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ ความเข้มข้นของ MIBC ต่างๆกัน .....	94
ภาพที่ 4 - 15	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ปรับสภาพเป็น เวลาต่างๆกัน .....	96
ภาพที่ 4 - 16	เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ ปรับสภาพเป็นเวลาต่างๆกัน .....	97
ภาพที่ 4 - 17	ขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการจัดการทดลองแบบ PLACKETT – BURMAN ในการทดลองที่ 9 (ซ้าย) และสิ่งทดลอง 10 (ขวา).....	100
ภาพที่ 4 - 18	ขนาดของฟองอากาศ (1) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (2) ที่ การทดลองต่างๆ .....	104
ภาพที่ 4 - 19	อัตราการไหลของอากาศ (1) และความถี่ในการเกิดฟอง (2) ที่การทดลองต่างๆ..	105
ภาพที่ 4 - 20	พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (1) และความเร็วเกรเดียนท์ (2) ที่การทดลองต่างๆ .....	106
ภาพที่ 4 - 21	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ที่การทดลอง ต่างๆ.....	107
ภาพที่ 4 - 22	แผนภาพพื้นที่ผิวสะท้อนค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับ ความเร็วเกรเดียนท์ที่ขนาดของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกวนต่างๆ .....	108

ภาพที่ 4 - 23 ขนาดของฟองอากาศ (1) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (2) ที่ การทดลองต่างๆ .....	110
ภาพที่ 4 - 24 อัตราการไหลของอากาศ (1) และความถี่ในการเกิดฟอง (2) ที่การทดลองต่างๆ ..	111
ภาพที่ 4 - 25 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (1) และความเร็วเกรเดียนท์ (2) ที่การทดลองต่างๆ .....	112
ภาพที่ 4 - 26 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ที่ การทดลองต่างๆ .....	113
ภาพที่ 4 - 27 แผนภาพพื้นที่ผิวสะท้อนค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับ ความเร็วเกรเดียนท์ที่ขนาดของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกวนต่างๆ .....	114
ภาพที่ 4 - 28 เปรียบเทียบฟองที่เกิดขึ้นระหว่างสารเคลือบฟอง POLYOXYETHYLENE (5) LAURYL ETHER (บน) และเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล (ล่าง) .....	116
ภาพที่ 4 - 29 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เวลาในการ ทำให้ลอยต่าง ๆ กัน .....	118
ภาพที่ 4 - 30 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้ เวลาในการทำให้ลอยต่าง ๆ กัน .....	118
ภาพที่ 4 - 31 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เวลาในการแยก ต่าง ๆ กัน .....	119
ภาพที่ 4 - 32 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้ เวลาในการแยกต่าง ๆ กัน .....	120
ภาพที่ 4 - 33 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เงื่อนไขทาง อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่าง ๆ กัน .....	122
ภาพที่ 4 - 34 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้ เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่าง ๆ กัน .....	122
ภาพที่ 4 - 35 สรุปกระบวนการแยกพลาสติกพีเอสบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอย .....	124



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกเข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน ของใช้ และเครื่องประดับต่างๆ เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการเพราะมีน้ำหนักเบา ราคาถูก จึงมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ข้อเสียคือ พลาสติกนั้นมีช่วงอายุการใช้งานสั้นและไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable) จึงส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งในสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น กลายเป็นปัญหาทางด้านการจัดการขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ปีค.ศ.2005 ปริมาณขยะชุมชนมีอัตราเพิ่มขึ้นประมาณ 14 ล้านตันต่อปีโดยเป็นพลาสติก 16.8% (กรมควบคุมมลพิษ, 2551: ออนไลน์)

วิธีการจัดการขยะพลาสติกทางหนึ่ง คือ การนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งอาจทำได้หลายวิธี เช่น การนำมาเผาเพื่อทำเป็นเชื้อเพลิง การนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ สำหรับการนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่นั้น ควรทำการคัดแยกพลาสติกแต่ละชนิดออกจากกันก่อน เนื่องจากพลาสติกผสมเมื่อนำไปขายเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการนำกลับมาใช้ใหม่ มักจะได้ราคาต่ำและเมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ ไม่คงที่ แม้ว่าจะมีพลาสติกชนิดอื่นเจือปนเพียง 1% คุณสมบัติที่ต้องการก็จะผิดแผกไปจากเดิม ดังนั้นการแยกพลาสติกจึงมีความสำคัญ ที่ทำกันอยู่ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธีตั้งแต่การแยกด้วยมือ (Manual Sorting) การแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น (Density-based Sorting) จนถึงการแยกโดยใช้เทคนิคขั้นสูงขึ้นไป เช่น การแยกด้วยรังสีเอกซ์ (Sorting by X-ray) การแยกโดยใช้ของเหลวใกล้วิกฤติและเหนือวิกฤติ (Sorting with near-critical and super-critical fluids) เป็นต้น (Scheirs, 1998)

การแยกพลาสติกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นนั้น เป็นวิธีที่สะดวกและต้นทุนต่ำ โดยนำพลาสติกผสมมาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ถ้าใช้น้ำซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1.0 กรัม/ลบ.ซม.เป็นตัวกลาง จะสามารถแยกพลาสติกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ลอยเป็นส่วนพลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและส่วนที่จมเป็นส่วนพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ซึ่งการแยกพลาสติกด้วยวิธีนี้จะเกิดปัญหาเมื่อทำการแยกพลาสติกที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ทำให้ไม่สามารถแยกพลาสติกออกจากกันได้มีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการแยกพลาสติก

ชนิดพีเอสและเอบีเอสออกจากกันจำเป็นที่จะต้องหาวิธีใหม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ คือ กระบวนการทำให้ลอยตัว (Flotation) (Shen และคณะ, 2001; Shen และคณะ, 2002; Takoungsakdakun และ Pongstabodee, 2007)

กลไกของกระบวนการทำให้ลอยจะอาศัยความสามารถในการเปียกพื้นผิวที่แตกต่างกัน เมื่อผ่านฟองอากาศเข้าไป ของแข็งที่พื้นผิวมีลักษณะไม่ชอบน้ำจะมีฟองอากาศไปเกาะติด ทำให้ความหนาแน่นรวมระหว่างของแข็งกับฟองอากาศที่ไปเกาะติดมีค่าน้อยลง สามารถลอยขึ้นสู่ผิวด้านบน ส่วนของแข็งที่พื้นผิวมีลักษณะชอบน้ำจะยังคงอยู่ในของเหลวตัวกลาง ทำให้เราสามารถแยกพลาสติกออกจากกันได้ (Marques และ Terenorio, 2000)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา อุปกรณ์สร้างฟองอากาศที่ใช้ส่วนมากเป็นหัวกระจายอากาศ (Diffuser) เนื่องจากหาได้ง่ายตามท้องตลาด สามารถเลือกหรือประมาณขนาดฟองอากาศที่ต้องการได้ (Wang และคณะ, 2012) แต่ข้อเสียคือ เกิดการอุดตัน มีความดันสูญเสียสูง และสิ้นเปลืองพลังงานจากการใช้ปั๊มอากาศ นอกจากนี้ปั๊มอากาศอาจเสียหายจากการที่น้ำไหลย้อนเข้าไปผ่านหัวกระจายอากาศในกรณีที่ไฟดับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจการสร้างฟองอากาศโดยการใช้ใบพัดกวาดอากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปในน้ำแทน ทั้งนี้จากการค้นคว้าพบว่าตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการนี้ยังไม่มีการศึกษาหรือวิเคราะห์ในรายละเอียดโดยเฉพาะในการคัดแยกพลาสติก นอกจากนี้ กระบวนการที่เลือกใช้หรือปัจจัยอื่นๆ ก็ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศด้วยเช่นกัน ดังนั้นถ้าเราเข้าใจในส่วนนี้จะทำให้ออกแบบ ควบคุมหรือนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม จากที่กล่าวมาในข้างต้น จึงเป็นเหตุจูงใจให้เก็งงานอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมสำหรับการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติก
- 1.2.2 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย-จม ได้แก่ ความเข้มข้นของสารปรับความหนาแน่นที่ใช้ในการแยก
- 1.2.3 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกด้วยสารเคลือบผิวหลังจากแยกด้วยวิธีลอย-จม ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบผิว ชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบฟองและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ

- 1.2.4 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการกวนผสมและการเกิดฟอง ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง ท่อนำอากาศ อัตราเร็วในการกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับใบกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง
- 1.2.5 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อวิธีการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย เวลาที่ใช้ในการแยกและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 รูปแบบของถังปฏิกริยา
- ถังปฏิกริยาเป็นถังแก้วทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 เซนติเมตร สูง 33 เซนติเมตร
  - ใบกวนเป็นชนิด Pitched blade turbine ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตรต่อกับแกนเพลายาว 40 เซนติเมตรที่ติดกับมอเตอร์กำลัง 100 วัตต์ ปรับความเร็วรอบได้ 0 – 3,000 รอบต่อนาที
- 1.3.2 พลาสติกที่ใช้ในการทดลอง มี 2 ชนิด ได้แก่ พลาสติกพอลิสไตรีน (PS) และพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) ซึ่งมีทั้งส่วนที่เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ (บริษัท Global connection) และที่เป็นขยะพลาสติก โดยความหนาแน่นของพีเอสมีค่าระหว่าง 1.01 – 1.04 กรัม/ลบ.ซม.เอบีเอสมีค่าระหว่าง 1.02 – 1.07 กรัม/ลบ.ซม. และมีขนาดอยู่ระหว่าง 3 – 5 มิลลิเมตร
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกโดยการหาค่าแรงดึงผิวของพลาสติกด้วยวิธีการ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base (Hui และคณะ, 2012)
- 1.3.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสมด้วยวิธีลอย – จมที่ความเข้มข้นของสารปรับความหนาแน่นแตกต่างกัน

- 1.3.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสมโดยการศึกษาดัชนีที่ส่งผลต่อการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกด้วยสารเคลือบผิวหลังจากวิธีลอย – จม ได้แก่
  - 1.3.5.1 ชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง
  - 1.3.5.2 ชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบผิว
  - 1.3.5.3 เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ
- 1.3.6 ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมในกระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศผ่านใบกวน ได้แก่
  - 1.3.6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ
  - 1.3.6.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ
  - 1.3.6.3 อัตราการไหลของอากาศ
  - 1.3.6.4 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ
  - 1.3.6.5 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ
  - 1.3.6.6 ความเร็วเกรเดียนท์
- 1.3.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสมโดยศึกษาดัชนีที่ส่งผลต่อการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย ได้แก่
  - 1.3.7.1 เวลาที่ใช้ในการกวน
  - 1.3.7.2 เวลาที่ใช้ในการแยก
  - 1.3.7.3 อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการแยกพลาสติกในการเกาะติดของฟองอากาศด้วยกระบวนการทำให้ลอย
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศผ่านใบกวนเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการแยกพลาสติกผสมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 1.4.3 สามารถนำข้อกำหนดขั้นต้นในการออกแบบระบบการแยกพลาสติกผสมด้วยกระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศผ่านใบกวนในการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอสไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น สามารถหล่อให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้โดยใช้แรงดันและความร้อน ซึ่งในปัจจุบันพลาสติกนับว่าเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญมากเพราะพลาสติกนั้นมีคุณสมบัติพิเศษเด่นกว่าวัสดุอื่นที่ใช้กันมาก่อน เนื่องจากมีความแข็งแรง เหนียว ทนต่อการสึกกร่อนและมีน้ำหนักเบา เป็นต้น (พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์, 2536)

สำหรับประเทศไทยก็มีการใช้ประโยชน์จากพลาสติกอย่างหลากหลาย ทั้งในส่วนของบรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ในครัวเรือนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกนั้นมีความคงทนต่อสารเคมี ไม่เป็นสนิม รวมทั้งไม่สามารถย่อยสลายด้วยวิธีการทางธรรมชาติได้ ส่งผลให้พลาสติกมีอายุการใช้งานยาวนานหลายร้อยปี และนอกจากนี้พลาสติกยังมีราคาถูก จึงนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยมีการใช้ทดแทนวัสดุอื่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แม้แต่ไม้หรือวัสดุจากธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายได้ ก็ถูกทดแทนด้วยพลาสติกเกือบทั้งสิ้นและจากการสำรวจปริมาณขยะพลาสติกของกรมควบคุมมลพิษ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2544: ออนไลน์) พบว่าในประเทศไทยปริมาณขยะมูลฝอยประเภทพลาสติกที่พบในสิ่งแวดล้อมปี พ.ศ. 2542 มีประมาณร้อยละ 14 ของปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมดหรือ 1.9 ล้านตันต่อปี และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 16 หรือ 2.3 ล้านตันในปีพ.ศ.2544 นี้ยังไม่นับรวมขยะพลาสติกจากงานอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าพลาสติกจะมีอายุการใช้งานยาวนาน แต่ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกหลายชนิดนั้นก็มีอายุการใช้งานสั้น เช่น ถัง ขวด เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะถูกทิ้งเป็นขยะปริมาณมากและมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ก่อให้เกิดปัญหาในการจัดการขยะ ตัวอย่างเช่น ถ้าทิ้งตามท่อระบายน้ำจะทำให้เกิดการอุดตัน หรือเผาจะก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น อากาศเป็นพิษ เมื่อสูดดมเข้าไปก็จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพร่างกาย ดังนั้น ถ้าเราจัดการขยะพลาสติกไม่ถูกต้องก็จะกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยการจัดการขยะพลาสติก สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปฝัง นำไปถมดิน การนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงหรือนำกลับมาใช้ใหม่ สำหรับการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่นั้นเป็นทางเลือกที่นิยมและให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทางหนึ่ง แต่ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่นั้นควรมีการคัดแยกพลาสติกแต่ละชนิดออกจากกันเสียก่อน เพราะเมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ ไม่คงที่ และมีสมบัติไม่ตรงกับความต้องการ ดังนั้นกระบวนการคัดแยกพลาสติกจึงมีความสำคัญ

## 2.2 กระบวนการคัดแยกพลาสติก

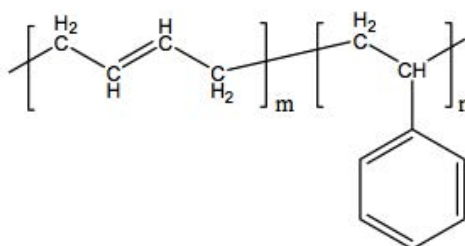
พลาสติกที่ใช้กันโดยทั่วไปในปัจจุบันมีหลายชนิดและส่วนมากมักเป็นขยะพลาสติกผสม ซึ่งเมื่อนำไปขายเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการนำกลับมาใช้ใหม่ มักจะได้ราคาต่ำและเมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ ไม่คงที่ ดังนั้นกระบวนการคัดแยกจึงมีความจำเป็นในการแยกขยะพลาสติกผสมเหล่านี้ ซึ่งวิธีการคัดแยกขยะพลาสติกมีหลายวิธี ตั้งแต่การแยกด้วยมือจนถึงการแยกโดยใช้เทคนิคขั้นสูงขึ้น โดยอาศัยสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ ทางไฟฟ้าหรือทางกายภาพ ยกตัวอย่างเช่น การแยกด้วยมือเป็นการคัดแยกโดยอาศัยสมบัติทางการมองเห็น เราสามารถแยกได้เพียงอาศัยหมายเลขที่ประทับ อาศัยความแตกต่างของสีหรืออาศัยความโปร่งแสง แต่ไม่สามารถแยกสมบัติทางเคมีหรือเชิงลึกได้ ซึ่งกระบวนการคัดแยกพลาสติกผสมนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ความแตกต่างของความหนาแน่น ความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) หรือคุณสมบัติเฉพาะที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ เช่น จุดหลอมเหลว สมบัติการละลาย (Scheirs, 1998) กระบวนการคัดแยกพลาสติกผสมวิธีหนึ่งที่นิยม ได้แก่ การแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น

การคัดแยกด้วยวิธีนี้จะอาศัยความหนาแน่นของวัสดุที่แตกต่างกัน คุณสมบัติที่ใช้เป็นหลักคือคุณสมบัติทางกายภาพ อาทิเช่น ความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะ การคัดแยกด้วยวิธีนี้ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีมาเกี่ยวข้อง จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายต่ำและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่มากนัก เช่น การแยกด้วยวิธีการลอย - จม (Float – sink method or wet separation) เป็นวิธีที่ใช้กันมานานวิธีหนึ่ง ใช้ในการแยกพลาสติกผสม ซึ่งอยู่ในสารละลายตัวกลางที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่างพลาสติกที่ต้องการจะแยก พลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นของสารละลายตัวกลางจะลอยขึ้นสู่ผิวด้านบน ส่วนพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่าความหนาแน่นของสารละลายตัวกลางจะจมลงข้างล่าง โดยทั่วไปสารละลายตัวกลางที่นิยมใช้ คือ น้ำ สารละลายผสมระหว่างน้ำกับเมทานอล สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสารละลายซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) ซึ่งการแยกพลาสติกด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะกับพลาสติกที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เช่น ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างแอลดีพีอี (LDPE) และเอชดีพีอี (HDPE) มีค่าเท่ากับ 0.001 กรัม/ลบ.ซม. ในขณะที่ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างเอชดีพีอีและพีพี (PP) มีค่าเท่ากับ 0.03 กรัม/ลบ.ซม. นอกจากนี้การแยกด้วยวิธีนี้จะใช้เวลานาน ทำให้ผลที่ได้มีคุณภาพต่ำ ยากต่อการควบคุมความหนาแน่นของสารละลายตัวกลางให้แม่นยำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อีกทั้งในกรณีที่มีการระเหยของสารละลายผสมจะ

ทำให้ความหนาแน่นของสารละลายเปลี่ยนแปลง และการรวมกลุ่มของพลาสติกจะทำให้พลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจมได้ เนื่องจากถูกพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาล้อมรอบ

### 2.3 พลาสติกพอลิสไตรีน

พลาสติกพอลิสไตรีนเป็นพลาสติกประเภทคีนรูปแบบมาตรฐานที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบเติม (Addition polymerization) ของสารตั้งต้นสไตรีน (Styrene monomer) ซึ่งสารตั้งต้นสไตรีน เป็นสารประกอบประเภทไวนิลที่มีหมู่อะโรแมติกส์เป็นหมู่แทนที่อะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างเอทิลีน สูตรโครงสร้างเป็น  $C_8H_8$  ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จะเป็นของเหลวคล้ายกับน้ำมัน ไม่มีสี กลิ่นหอมหวาน ระเหยได้ง่าย ไม่ละลายน้ำ ว่องไวต่อการเกิดพอลิเมอร์ เมื่อได้รับแสงหรือมีอนุมูลอิสระเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา (ฝ่ายสื่อสารองค์กรบริษัท ปตท. จำกัด, 2554) ซึ่งโครงสร้างของพีเอสสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2 - 1 โครงสร้างของพีเอส (บวรกิตดี, 2549)

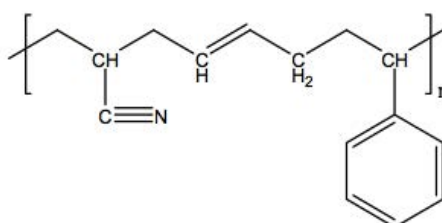
พอลิสไตรีนหรือพีเอส จะมีอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นช่วงกว้าง ทำให้หลอมขึ้นรูปได้ง่าย มีความโปร่งใส มีสมบัติเชิงแสงดีมาก และมีค่าความแข็งตึงสูง แต่เปราะ มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าไม่ดูดความชื้น เกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย ทำให้ดูดฝุ่นละอองติดได้ง่าย ไม่ทนกับสภาพสิ่งแวดล้อมภายนอก ผิวเสื่อมสภาพเร็วเพราะไม่ทนต่อการขีดข่วน แต่ถ้ามีการจัดตัวแบบสองทาง (Biaxial orientation) แล้ว จะมีความยืดหยุ่นและความทนทานมากขึ้น ละลายในตัวทำละลายประเภทอะโรแมติกส์ (Aromatics) และคีโตน (Ketone) บางชนิด มีราคาต่ำและพอลิสไตรีนนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตภัณฑ์ของเล่น ขวดน้ำดื่ม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ภาชนะบรรจุใช้แล้วทิ้ง ถาดที่ใช้ในการแพทย์และในธุรกิจโรงแรม เป็นต้น ซึ่งสมบัติต่างๆของพีเอสสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2 - 1 สรุปสมบัติต่างๆของพีเอส (Shashoua, 2008)

ความถ่วงจำเพาะ	1.04 - 1.05
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	36 - 52
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (°C)	100 - 108
ค่าการส่องผ่านของแสง (%)	87 - 92

## 2. 4 พลาสติกอะคริโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน

พลาสติกอะคริโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนหรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า เอบีเอส เป็นพลาสติกประเภทพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ประกอบด้วยสารตั้งต้น 3 ชนิดในสายโซ่พอลิเมอร์ ได้แก่ อะคริโลไนไทรล์ บิวทาไดอีนและสไตรีน (ฝ่ายสื่อสารองค์กรบริษัท ปตท. จำกัด, 2554) ซึ่งโครงสร้างของเอบีเอส สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2 - 2 โครงสร้างของเอบีเอส (บวรกิตดี, 2549)

### 2.4.1 อะคริโลไนไทรล์ (Acrylonitrile)

เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทไนไทรล์ (Nitrile) ที่มีหมู่ไนไทรล์ (-CN) เชื่อมต่อกับหมู่ไวนิล (Vinyl group,  $\text{CH}_2=\text{CH}-$ ) มีพันธะคู่ภายในโครงสร้าง สูตรโมเลกุลคือ  $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$  แสดงดังภาพที่ 2-8 เป็นของเหลวใสไม่มีสี หรือบางครั้งอาจมีสีออกเหลืองเนื่องจากมีสิ่งเจือปน มีกลิ่นฉุน นิยมผลิตจากสารตั้งต้นโพรพิลีน (Propylene monomer) แอมโมเนียและก๊าซออกซิเจนผ่านปฏิกิริยาแอมมอกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic ammoxidation) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ บิสมัทโมลิบดีนัม (Bismuth molybdenum; BiMo)



### 2.4.2 บิวทาไดอีน (Butadiene)

เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ประเภทแอลคีน (Alkene) ที่ภายในโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอมและพันธะคู่จำนวน 2 พันธะ เรียกอีกอย่างว่า ไดอีน (Diene) สูตรโมเลกุลคือ  $C_4H_6$  แบ่งเป็น 2 ไอโซเมอร์ (Isomer) คือ 1,2-บิวทาไดอีน (1,2-butadiene) และ 1,3-บิวทาไดอีน (1,3-butadiene) ซึ่ง 1,2-บิวทาไดอีนไม่มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมและมีการผลิตยุ่งยาก บิวทาไดอีนที่ใช้จึงหมายถึง 1,3-บิวทาไดอีน แสดงดังภาพที่ 2-9 โดยบิวทาไดอีนเป็นก๊าซ ไม่มีสี อยู่ใน สารผสมไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 4 อะตอมในโครงสร้าง สามารถแยกได้โดยการสกัดด้วยทำละลายที่มีขั้วและเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยไอน้ำ (Stream cracking) ของสารแอลิฟติกส์ (Aliphatics) เพื่อผลิตสารโอเลฟิน

### 2.4.3 สไตรีน (Styrene)

เป็นสารประกอบประเภทไวนิลที่มีหมู่อะโรแมติกส์เป็นหมู่แทนที่อะตอมไฮโดรเจนในโครงสร้างเอทิลีน สูตรโครงสร้างเป็น  $C_8H_8$  ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศจะเป็นของเหลวคล้ายกับน้ำมัน ไม่มีสี กลิ่นหอมหวาน ระเหยได้ง่าย ไม่ละลายน้ำ ว่องไวต่อการเกิดพอลิเมอร์เมื่อได้รับแสงหรือมีอนุมูลอิสระเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา

ด้วยเหตุนี้พลาสติกเอบีเอสจึงประกอบด้วยสมบัติเด่นของสารตั้งต้นแต่ละชนิด คือ อะคริโลไนไตรล์จะทำให้ทนสารเคมีและมีเสถียรภาพทางความร้อน บิวทาไดอีนจะทำให้มีความเหนียวและทนแรงกระแทก ส่วนสไตรีนจะทำให้มีความแข็งเกร็ง (Rigidity) และมีความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น โครงสร้างรถยนต์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ของเล่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์ทำสวน เครื่องเรือน กระเป๋าเดินทาง หมวกกันน็อก เป็นต้น ซึ่งสมบัติต่างๆของเอบีเอส สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2- 2 สรุปสมบัติต่างๆของเอบีเอส (Shashoua, 2008)

ความถ่วงจำเพาะ	1.04 – 1.07
ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	38 - 48
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว (°C)	106 - 130
ค่าการส่องผ่านของแสง (%)	87 - 92

จะเห็นว่าพลาสติกพอลิสไตรีนและพลาสติกอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนนั้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก การแยกพลาสติกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นไม่เหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการทำให้ลอย

## 2.5 การแยกพลาสติกผสมด้วยกระบวนการทำให้ลอย

การแยกด้วยกระบวนการทำให้ลอยนี้เป็นการปรับเปลี่ยนกระบวนการลอยแร่โดยใช้สารเคมีในการแยกแร่โลหะ ซึ่งในปี ค.ศ.1970 บริษัท The Mitsui Mining & Smelting Company ได้พัฒนากระบวนการลอยแร่มาใช้ในการแยกพลาสติกผสมแยกพีทีอีออกจากพีอีที นอกจากนี้วิธีการนี้ยังเหมาะสำหรับการแยกพลาสติกที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันและยากต่อการแยกด้วยวิธีอื่น (Scheirs, 1998) โดยกระบวนการทำให้ลอยจะอาศัยความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมีพื้นผิว ซึ่งก็คือ ความสามารถในการเปียกทางพื้นผิวของของแข็ง โดยปกติแล้วพื้นผิวของของแข็งที่สามารถเปียกได้ด้วยน้ำจะมีลักษณะชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวไม่สามารถเปียกได้ด้วยน้ำจะมีลักษณะไม่ชอบน้ำหรือไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งฟองอากาศจะยึดติดกับผิวลักษณะนี้ได้ดี ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมระหว่างของแข็งกับฟองอากาศมีค่าน้อยลง สามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำด้านบน ในขณะที่ของแข็งที่พื้นผิวมีลักษณะชอบน้ำจะยังคงลอยอยู่ในน้ำหรือจมลงสู่ด้านล่าง สำหรับการแยกด้วยวิธีการลอยแร่มี 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ ขั้นตอนการปรับสภาพ (Conditioning) และขั้นตอนการทำให้ลอย (Flotation) (ขวัญชัยลีเฝ้าพันธุ์, 2553)

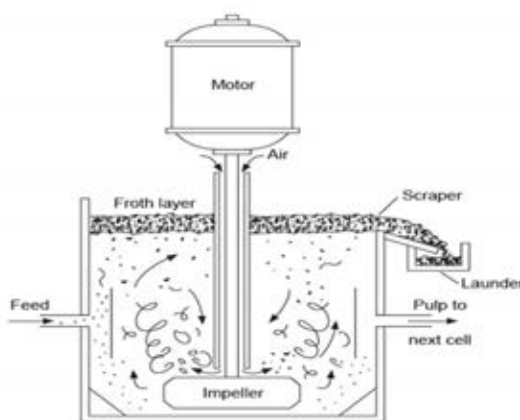
### 2.5.1 ขั้นตอนการปรับสภาพ (Conditioning)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ของแข็งที่ต้องการและไม่ต้องการมีสภาพผิวหน้าที่แตกต่างกันไป โดยของแข็งหนึ่งจะชอบน้ำ ในขณะที่อีกชนิดหนึ่งไม่ชอบน้ำหรือเปียกน้ำน้อยกว่า เป็นการเตรียมสภาพผิวหน้าของของแข็งให้เหมาะสมเพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการแยกขั้นต่อไป โดยการปรับสภาพนี้อาจจะเป็นการใช้สารเคมีหรือการใช้ปัจจัยทางกายภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น การใช้ความร้อน เป็นต้น

## 2.5.2 ขั้นตอนการทำให้ลอย (Flotation)

เป็นขั้นตอนต่อจากขั้นตอนการปรับสภาพ โดยจะสร้างหรือนำอากาศเข้ามาทำให้เกิดเป็นฟองอากาศ สำหรับไปเกาะติดของแข็งที่มีพื้นผิวลักษณะไม่ชอบน้ำ ของแข็งที่ถูกเกาะติดโดยฟองอากาศก็就会被ยกโดยลอยขึ้นสู่ผิวด้านบน

กลไกของกระบวนการทำให้ลอยจะประกอบด้วยดังปฏิกิริยาที่บรรจุตัวกลาง อาจเป็นน้ำหรือสารละลายอื่นและของแข็งผสมที่เราต้องการจะแยก ในงานวิจัยนี้ คือ พลาสติก ซึ่งจะแช่ถูกด้วยสารเคลือบผิว เพื่อให้มีสภาพผิวหน้าที่แตกต่างกันไป ชนิดหนึ่งชอบน้ำ ส่วนอีกชนิดหนึ่งไม่ชอบน้ำหรือเปี่ยมน้ำได้น้อยกว่า มีตัวกวน (Agitator) ดึงอากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้ามาโดยการหมุนใบพัดตัดลำอากาศ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นมา ซึ่งฟองอากาศดังกล่าวจะถูกเคลือบให้เสถียรเพียงพอด้วยสารเคลือบฟอง นอกจากนี้ตัวกวนยังทำให้เกิดการผสมกันระหว่างพลาสติกกับตัวกลาง และเกิดการกระจายของฟองอากาศอีกด้วย พลาสติกที่พื้นผิวไม่ชอบน้ำจะมีฟองอากาศไปเกาะติด ทำให้ความหนาแน่นรวมระหว่างพลาสติกกับฟองอากาศที่ไปเกาะติดมีค่าน้อยลงสามารถลอยขึ้นสู่ผิวด้านบนของตัวกลางแล้วจึงเก็บ โดยอาจทำให้เกิดการล้นสู่ถาดรองรับหรือกวาดพลาสติกที่อยู่บริเวณผิวของตัวกลาง ส่วนพลาสติกที่พื้นผิวชอบน้ำจะยังคงอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้อาจใช้สารเคมีปรับสภาพผิวเพื่อปรับปรุงหรือขัดขวางหน้าที่ของสารเคลือบผิว แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2 - 3 กระบวนการทำให้ลอย (Sastry และคณะ, 1999)

ดังนั้นขั้นตอนแรกที่สำคัญของกระบวนการทำให้ลอย คือ ขั้นตอนการปรับสภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ปรับสภาพผิวหน้าของของแข็งให้เหมาะสมเพื่อเตรียมเข้าสู่ขั้นตอนการแยกขั้นต่อไป โดยการปรับสภาพนี้อาจจะเป็นการใช้สารเคมีหรือการใช้ปัจจัยทางกายภาพเข้ามาเกี่ยวข้อง สารเคมีที่นำมาปรับสภาพ เรียกกันว่า สารเคลือบผิว (Wetting agent)

## 2.6 สารเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (Collector) หรืออีกชื่อ คือ สารทำให้เปียก (Wetting agent) เป็นสารเคมีที่เคลือบผิวซึ่งอาจจะเป็นไอออนหรือโมเลกุลอินทรีย์ที่ถูกดูดซับไปเคลือบผิวหน้าของของแข็ง ทำให้มีลักษณะไม่ชอบน้ำ สารเคลือบผิวส่วนใหญ่เป็นกรดอ่อน ต่าง หรือเกลือและเป็นสารประกอบขั้วผสม (Hetero-polar) บางชนิดเป็นสารประกอบที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนในน้ำ แต่เมื่อถูกดูดซับเกาะติดบนผิวหน้าของของแข็งแล้วจะทำให้ผิวหน้ามีลักษณะไม่ชอบน้ำเหมือนกัน โดยสารเคลือบผิวสามารถจัดประเภทที่ใช้โดยทั่วไปเป็นประเภทไม่มีประจุ (Non-ionizing) และประเภทมีประจุ (Ionizing) (ขวัญชัย ลิเฝ้าพันธุ์, 2553)

### 2.6.1 สารเคลือบผิวประเภทที่ไม่มีประจุ

สารเคลือบผิวประเภทที่ไม่มีประจุ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel oils) เคโรซีน (Kerosene) สารเคลือบผิวประเภทนี้เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อให้เคลือบบนผิวหน้าของของแข็งคล้ายฟิล์มบาง โดยจะช่วยเพิ่มความชอบน้ำของของแข็ง แต่จะไม่สามารถเลือกทำปฏิกิริยาเฉพาะเจาะจงได้ จึงใช้ในบางกรณีเท่านั้น เช่น การลอยถ่านหิน เป็นต้น

### 2.6.2 สารเคลือบผิวประเภทที่มีประจุ

สารเคลือบผิวประเภทที่มีประจุจะแตกตัวในน้ำ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ สารเคลือบผิวที่ให้ประจุลบเมื่อละลายแตกตัวในน้ำ (Anionic collector) และสารเคลือบผิวที่ให้ประจุบวกเมื่อละลายแตกตัวในน้ำ (Cationic collector)

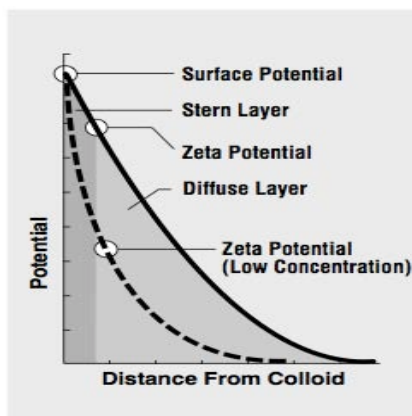
- สารเคลือบผิวที่ให้ประจุลบเมื่อละลายแตกตัวในน้ำ เป็นสารเคลือบผิวที่มีขั้วเป็นประจุลบอยู่ข้างหนึ่งและมีแขนหรือกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นกลุ่มไม่ชอบน้ำอยู่อีกปลายด้านหนึ่ง สารเคลือบผิวประเภทนี้ใช้มากที่สุดในกระบวนการทำให้ลอยที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แชนเทต (Xanthate) คาร์บอกซิเลต (Carboxylate) ซัลโฟเนต (Sulphonate) เป็นต้น

- สารเคลือบผิวที่ให้ประจุบวกเมื่อละลายในตัวในน้ำ เป็นสารเคมีที่มีขั้วเป็นประจุบวกอยู่ข้างหนึ่งและมีแขนหรือกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนที่เป็นกลุ่มไม่ชอบน้ำอยู่อีกปลายด้านหนึ่ง ได้แก่ สารประกอบอามีน (Amines)

ในขั้นตอนการปรับสภาพ นอกจากสารเคลือบผิวที่มีอิทธิพลสำคัญต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกแล้ว ควรพิจารณาถึงปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลสารเคลือบผิวกับพลาสติกด้วย เพราะปฏิกิริยานี้จะอธิบายถึงการดูดซับของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวพลาสติก ถ้ามีการเลือกสรรการดูดซับได้ดีจะง่ายต่อการแยกพลาสติก ทำให้ประสิทธิภาพการแยกพลาสติกสูงขึ้น อีกทั้งควรพิจารณาปฏิกิริยาระหว่างพลาสติกด้วยตัวเอง เพราะพลาสติกมีการเกาะกลุ่มกัน การรวมกลุ่มของพลาสติกนี้จะทำให้พลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจมได้ เนื่องจากถูกพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาล้อมรอบ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกลดลง ดังนั้นปฏิกิริยาที่กล่าวนี้จะพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า

## 2.7 ศักย์ไฟฟ้าซีต้า

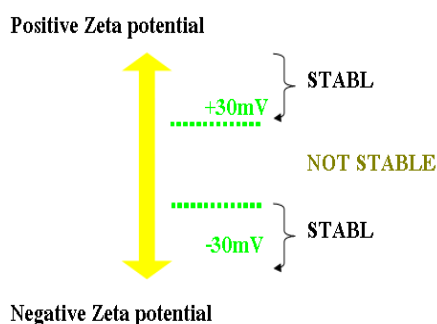
ศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential) (MTEC, 2008: online) คือ ความแตกต่างของประจุไฟฟ้าระหว่างชั้นความหนาแน่นของไอออนที่อยู่รอบๆอนุภาคหรือชั้นเสติร์น (Stern layer) และชั้นประจุที่อยู่ห่างออกมาหรือชั้นกระจาย (Diffuse Layer) มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ แสดงดังภาพที่ 2-4 ซึ่งโดยทั่วไปแต่ละอนุภาคจะเสมือนมีประจุไฟฟ้าอยู่ที่รอบๆผิว ทำให้เกิดแรงผลักซึ่งกันและกันระหว่างอนุภาคที่อยู่ติดกัน และถ้าประจุมากเพียงพอก็จะไม่เกิดการรวมตัวกันและกระจายตัวออกจากกัน แต่ถ้ามีการลดหรือเอาประจุบนผิวอนุภาคนั้นออกไป จะทำให้เกิดการรวมตัวกันแล้วตกตะกอน



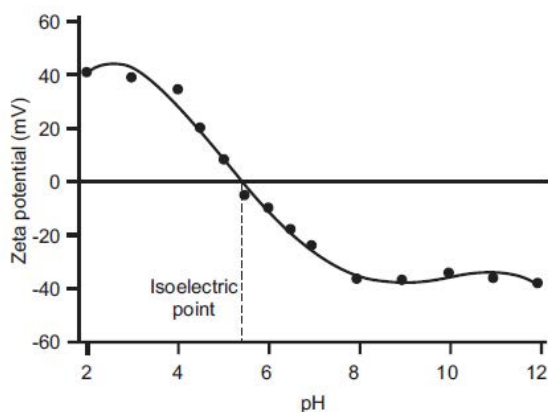
ภาพที่ 2 - 4 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกับศักย์พื้นผิวซึ่งขึ้นกับระดับของประจุในสารละลาย (MTEC, 2008: online)

ซึ่งการควบคุมประจุบนอนุภาคสามารถทำได้โดยดัดแปลงของเหลว เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช การเปลี่ยนชนิดของประจุในสารละลาย หรืออาจจะใช้สารลดแรงตึงผิวให้เข้าไปดูดซับหรือเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของโมเลกุลของอนุภาค เป็นต้น

ค่าที่มากที่สุดของศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ จะบ่งบอกถึงความเสถียรของระบบ ถ้าอนุภาคมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำเป็นบวกหรือลบมากๆ ระบบนั้นจะเสถียรมาก อนุภาคไม่รวมตัวกัน แต่ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำจะทำให้อนุภาครวมตัวกันและไม่เสถียรในการแขวนลอย จากภาพที่ 2-5 จะเห็นว่าอนุภาคที่มีความเสถียรในการแขวนลอยจะต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่า +30 มิลลิโวลต์หรือน้อยกว่า -30 มิลลิโวลต์ เพราะถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงไม่เสถียร พลาสติกจะมีความเป็นขั้วน้อยและมีแนวโน้มในการเกาะกลุ่มกัน การรวมกลุ่มของพลาสติกนี้จะทำให้พลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจมได้ เพราะถูกพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาล้อมรอบ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกลดลง (นริศรา จิรตระกูลชัย, 2549) และปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ คือ ค่าพีเอช ในกรณีที่เติมเบสเข้าไปในระบบแขวนลอยจะทำให้อนุภาคมีแนวโน้มที่จะมีประจุลบมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าเติมกรดเข้าไปในระบบจะทำให้อนุภาคมีประจุบวกมากขึ้น จากภาพที่ 2-6 จะเห็นว่าค่าศักย์ที่ต่ำจะเป็นบวกที่พีเอชต่ำและจะเป็นลบที่ค่าพีเอชสูง ซึ่งจุดที่ค่าศักย์ที่ต่ำเป็นศูนย์ จะเรียกจุดดังกล่าวว่า จุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ปกติแล้วที่จุดนี้จะเป็นจุดที่ระบบคอลลอยด์มีความเสถียรน้อยที่สุด ดังนั้นที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 4 และสูงกว่า 8 ระบบจะมีความเสถียรในการแขวนลอย



ภาพที่ 2 - 5 ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า (มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2010: ออนไลน์)

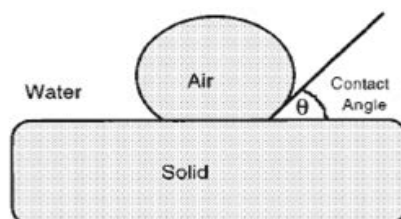


ภาพที่ 2 - 6 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ซีต้ากับค่าพีเอช (MTEC, 2008: online)

เมื่อปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวแล้ว สมบัติของพื้นผิวพลาสติกก็จะเปลี่ยนไป อาจจะชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำมากขึ้น โดยสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพลาสติกสามารถพิจารณาได้จากค่าแรงตึงผิวและค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติก งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีของ Lifshitz – Van de Waals/ Lewis acid – base ในการหาพลังงานพื้นผิวของพลาสติก ซึ่งวิธีนี้จะทำการวัดค่ามุมสัมผัสของแข็งกับของเหลวที่ใช้ทดสอบที่รู้ค่าพลังงานพื้นผิว 5 ชนิด ถ้าของเหลวมีค่าแรงตึงผิวมากกว่าแรงตึงผิวของพลาสติกจะทำให้ไม่เกิดการเปียกผิว ฟองอากาศไปเกาะติดที่พลาสติกมาก ความหนาแน่นโดยรวมระหว่างฟองอากาศกับพลาสติกน้อยลง พลาสติกจึงเกิดการลอย แต่ถ้าของเหลวมีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิวของพลาสติกนั้นจะทำให้เกิดการเปียกผิว ฟองอากาศไม่สามารถไปเกาะติดได้ พลาสติกชนิดนั้นจึงไม่ลอย

## 2.8 มุมสัมผัส

ในงานวิจัยนี้ มุมสัมผัสจะใช้สำหรับการคำนวณหาค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติก ซึ่งมุมสัมผัส คือ มุมที่ฟองอากาศทำมุมกับผิวหน้าของของแข็งที่อยู่ในแนวระนาบเมื่อเกาะติดกัน ดังภาพที่ 2-7 ดังนั้นมุมสัมผัสจึงมีความสำคัญในการเกาะติดของฟองอากาศกับของแข็ง ขนาดของมุมสัมผัสขึ้นอยู่กับพลังงานพื้นผิวและแรงตึงผิวของของเหลว (ขวัญชัย ดีเฝ้าพันธุ์, 2553)



ภาพที่ 2 - 7 ค่ามุมสัมผัสของฟองอากาศบนผิวของแข็ง (Sastry และคณะ, 1999: ออนไลน์)

ซึ่งมุมสัมผัสนั้นสามารถใช้เป็นดัชนีชี้ถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพในการยึดเกาะของฟองอากาศได้ดังนี้

- 1.) ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $0^\circ$  แสดงว่าผิวหน้าของของแข็งจะเปียกน้ำโดยสิ้นเชิง ไม่เกิดการสัมผัสระหว่างฟองอากาศกับผิวหน้าของของแข็ง ของแข็งจึงไม่มีการลอย
- 2.) ถ้ามุมสัมผัสมีค่าน้อยกว่า  $90^\circ$  ของแข็งนั้นจะมีแนวโน้มเปียกน้ำมาก
- 3.) ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  การยึดเกาะของฟองอากาศและการเปียกน้ำเป็นไปเท่าๆกัน
- 4.) ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า  $90^\circ$  ของแข็งนั้นจะมีแนวโน้มไม่เปียกน้ำ
- 5.) ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  ผิวหน้าของแข็งจะเกาะตัวกับฟองอากาศ

ดังนั้นเมื่อทราบค่าของมุมสัมผัสจะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวหรือค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติกได้ ซึ่งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์แนวโน้มประสิทธิภาพในการยึดเกาะของฟองอากาศกับพลาสติก



## 2.9 พลังงานพื้นผิวอิสระและแรงยึดเกาะระหว่างของแข็งกับฟองอากาศ

ในกระบวนการทำให้ลอย ประสิทธิภาพการแยกนอกจากจะขึ้นกับการปรับสภาพด้วยสารเคมีแล้ว การสร้างแรงยึดระหว่างฟองอากาศกับของแข็งก็มีความสำคัญ ถ้าฟองอากาศเกาะติดกับของแข็งได้ดี โอกาสที่ของแข็งจะลอยก็สูง เมื่อมีการลอยเกิดขึ้นระบบฟองอากาศ และระบบของแข็ง จะรวมเป็นระบบเดียว คือระบบของของแข็ง – ฟองอากาศที่มีความเสถียรมากกว่า สิ่งที่น่าสนใจพิจารณาในระบบนี้คือ พลังงานอิสระพื้นผิว (Free surface energy) หรือในของเหลวจะเรียกว่า แรงตึงผิว (Surface tension) ประกอบไปด้วยพลังงานอิสระระหว่างผิวหน้าของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลวและของเหลว-ก๊าซ ขนาดของพลังงานที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของพลังงานอิสระระหว่างผิวหน้าทั้งหมดในบริเวณนั้น (ขวัญชัย ลีเผ่าพันธุ์, 2553)

โดยค่าพลังงานพื้นผิวของของแข็งที่ในงานวิจัยสนใจ คือ พลาสติก ค่านี้อาจช่วยเป็นแนวทางในการวิเคราะห์แนวโน้มการเปียกผิวซึ่งส่งผลต่อการลอยตัวของพลาสติก ถ้าพลาสติกนั้นมีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิวของของเหลวตัวกลาง พลาสติกจะไม่เกิดการเปียกผิวด้วยน้ำ ทำให้โอกาสที่ฟองอากาศจะไปเกาะติดผิวพลาสติกมาก แนวโน้มที่พลาสติกนั้นจะลอยก็สูง แต่ถ้าพลาสติกมีค่าแรงตึงผิวใกล้เคียงกับแรงตึงผิวของของเหลวตัวกลาง พลาสติกจะเกิดการเปียกผิว แนวโน้มที่พลาสติกจะลอยก็ต่ำ ตัวอย่างค่าพลังงานอิสระพื้นผิวของพลาสติกบางชนิดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2- 3 ค่าพลังงานอิสระพื้นผิวของพลาสติกบางชนิด (Shashoua, 2008)

พอลิเมอร์	ค่าพลังงานอิสระพื้นผิว ที่อุณหภูมิ 20 °C (mN/m)
อะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)	35
พอลิสไตรีน (PS)	33
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)	39
พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)	43

ซึ่งสมมูลของพลังงานอิสระของระบบก่อนมีการเกาะติด มีสมการดังสมการที่ (2-1)

$$E_1 = A_{lg} \gamma_{lg} + A_{sl} \gamma_{sl} \quad (2-1)$$

$A_{lg}$  คือ พื้นที่ระหว่างผิวของเหลว - ก๊าซ  
 $A_{sl}$  คือ พื้นที่ระหว่างผิวของแข็ง - ก๊าซ  
 $\gamma_{lg}$  คือ พลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างผิวน้ำของเหลว - ก๊าซ  
 $\gamma_{sl}$  คือ พลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างผิวน้ำของแข็ง - ของเหลว  
 สมดุลของพลังงานอิสระของระบบหลังการเกาะติด ดังสมการที่ (2-2)

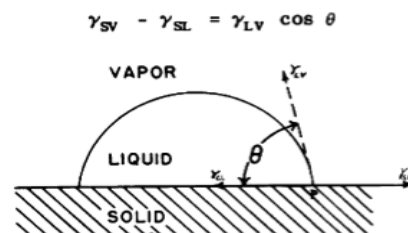
$$E_2 = (A_{lg} - 1)\gamma_{lg} + \gamma_{sg}(1) + (A_{sl} - 1)\gamma_{sl} \quad (2-2)$$

$\gamma_{sg}$  คือ พลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างผิวน้ำของแข็ง - ก๊าซ  
 เมื่อกำหนดให้พื้นที่ที่เกาะติดเท่ากับ 1 ตร.ซม. ถ้า  $E_1 \geq E_2$  จะเกิดการลดของพลังงานอิสระลง  
 แสดงดังสมการที่ (2-3)

$$\Delta E = \gamma_{lg} + \gamma_{sl} > \gamma_{sg} \quad (2-3)$$

โดยสมการของยัง (Young equation) (สมการที่ (2-4)) สามารถหาได้จากสมดุลของแรงที่กระทำ  
 ตามแนวราบ แสดงดังภาพที่ 2-8

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} \cos \theta \quad (2-4)$$



ภาพที่ 2 - 8 สมดุลของแรงที่กระทำตามแนวราบ (Alter, 2005)  
 นำไปแทนค่าลงในสมการ จะได้ดังสมการที่ (2-5) และ (2-6)

$$\Delta E = \gamma_{lg} + \gamma_{lg} \cos \theta > 0 \quad (2-5)$$

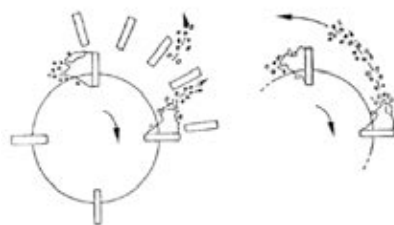
$$\Delta E = \gamma_{lg}(1 + \cos \theta) > 0 \quad (2-6)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวใช้สำหรับพื้นที่สัมผัส 1 ตารางเซนติเมตรและแสดงให้เห็นว่าการลดลงของพลังงานอิสระของระบบเป็นสัดส่วนกับมุมสัมผัส นั่นคือ ยิ่งผิวหน้าไม่ชอบน้ำมากเท่าไร จะเกิดการเกาะติดของฟองอากาศมากเท่านั้น

หลังจากขั้นตอนการปรับสภาพแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ ขั้นตอนการทำให้ลอย (Flotation) ซึ่งจะอาศัยฟองอากาศเป็นสำคัญ โดยจะสร้างหรือนำอากาศเข้ามาเพื่อไปเกาะติดของแข็งที่มีพื้นผิวลักษณะไม่ชอบน้ำ ในงานวิจัยนี้การสร้างฟองอากาศจะเกิดจากการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกผ่านใบพัดกวน

## 2. 10 การเหนี่ยวนำอากาศผ่านใบกวน

ในกระบวนการทำให้ลอยจำเป็นจะต้องมีการใส่อากาศเข้าไปในระบบเพื่อให้เกิดฟองอากาศไปเกาะติดกับของแข็งที่พื้นผิวมีลักษณะไม่ชอบน้ำ ทำให้ความหนาแน่นรวมระหว่างฟองอากาศกับของแข็งนั้นลดลง จึงเกิดการแยกกระหว่างของแข็งที่พื้นผิวมีลักษณะชอบน้ำกับไม่ชอบน้ำได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศเข้าไป (Induced air flotation) ผ่านตัวกวน โดยอากาศจากบรรยากาศภายนอกจะถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาผ่านทางท่อที่อยู่รอบแกนเพลลาจากการหมุนของใบกวนที่ต่อกับมอเตอร์ ซึ่งการหมุนใบกวนจะทำให้เกิดบริเวณเฉือนขึ้น (Shear zone) บริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่อากาศถูกตัดลำให้กลายเป็นฟองอากาศขนาดเล็กด้านล่างของใบกวน จากนั้นก็จะลอยขึ้นสู่ด้านบน ช่วยในการแยกของแข็งในกระบวนการทำให้ลอย (Sastry และคณะ, 1999) โดยการเกิดฟองอากาศจากการเหนี่ยวนำอากาศผ่านตัวกวนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-9

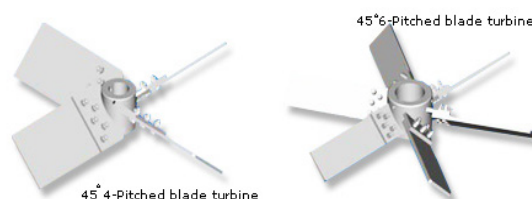


ภาพที่ 2 - 9 การเกิดฟองอากาศจากการเหนี่ยวนำอากาศผ่านตัวกวน (North American mixing forum, 2012: online)

จากที่กล่าวในข้างต้นว่าอากาศในกระบวนนี้จะถูกเหนี่ยวผ่านใบกวน ดังนั้นชนิดและลักษณะของใบกวนที่ใช้จึงมีความสำคัญ โดยใบกวนสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้เป็น 3 ประเภท (AICHE, 2001) ได้แก่

### 2.10.1 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวขนานกับเพลลา (Axial flow)

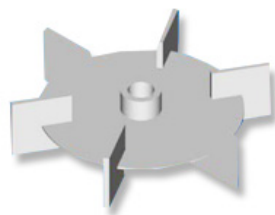
ใบกวนประเภทนี้จะทำให้ของเหลวถูกดูดและไหลในแนวแกนขนานกับเพลลา ใช้เพิ่มการไหลของของเหลว เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้าด้วยกันและการผสมของแข็งเข้ากับของเหลว ยกตัวอย่างเช่น Pitched blade turbine ดังภาพที่ 2 – 10 เป็นใบกวนที่สามารถใช้งานได้ทั่วไป ตั้งแต่ของเหลวความหนืดต่ำจนถึงความหนืดสูง สามารถใช้จำนวนใบได้ตั้งแต่ 3 – 12 ใบ จำนวนใบยิ่งมากก็ยิ่งใช้กำลังมาก แต่ก็ให้อัตราการไหลที่มากขึ้น นอกจากนี้ใบกวนแบบ Pitched blade turbine ยังสามารถทำงานได้ที่ค่าความหนืดสูงๆ หรือที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ใบกวนประเภทนี้ในการกวนเพื่อให้เกิดฟองอากาศ



ภาพที่ 2 - 10 ใบกวนแบบ Pitched blade turbine (Wellman, 2006: online)

### 2.10.2 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลแนวรัศมี (Radial flow)

ใบกวนประเภทนี้จะทำให้ของเหลวถูกผลักดันออกไปในแนวรัศมีหรือในแนวตั้งฉากกับเพลลา ใช้เพิ่มแรงเฉือนหรืออัตราการเฉือนให้กับของเหลว เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียว การลดขนาดของของแข็งที่แขวนลอยในของเหลวและการลดขนาดของแก๊สในของเหลว เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลสารที่ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น Turbine disc หรือ Rushton turbine ดังภาพที่ 2-11 ข้อดีคือให้อัตราเฉือนและอัตราการไหลพอสมควร ทั้งยังสามารถใช้กับกระบวนการทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนมวลโดยใช้ก๊าซ เนื่องจากใบกวนนี้มีแผ่นดิสก์ตรงกลางใบคอยป้องกันไม่ให้ก๊าซหลุดออกไปจากของเหลวได้ง่าย รวมทั้งมีใบด้านข้างที่คอยเฉือนก๊าซให้มีขนาดเล็กลงด้วย แต่มีข้อเสียคือกินกำลังงานมาก



ภาพที่ 2 - 11 ใบกวนแบบ Turbine disc (Wellman, 2006: online)

### 2.10.3 ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลตามแนวสัมผัสรอบขอบถัง (Tangential flow)

ใบกวนประเภทนี้ ของเหลวจะไหลตามแนวสัมผัสรอบขอบถัง ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนกับภาชนะบรรจุได้ดี ยกตัวอย่างเช่น Paddle หรือ Beam ดังภาพที่ 2-12 เป็นใบกวนที่ใช้กันมานาน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดถัง และหมุนที่ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ เหมาะสำหรับการกวนที่ค่อนข้างเบาถึงปานกลาง



ภาพที่ 2 - 12 ใบกวนแบบ Paddle (Wellman, 2006: online)

นอกจากใบกวนแล้ว ลักษณะและรูปร่างของถังกวนก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน โดยสำหรับรูปร่างของถัง ในงานวิจัยนี้ใช้ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวขนานกับเพลา ดังนั้นถึงทรงกระบอกในแนวตั้งจึงมีความเหมาะสมมากที่สุด เพราะถังสี่เหลี่ยมมักมีมุมอับที่บริเวณเหลี่ยมต่างๆ และเพื่อให้ในระบบมีการกวนที่ดี จึงออกแบบใบกวนและถังปฏิบัติการตามเกณฑ์การออกแบบตามมาตรฐาน โดยให้เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนและระยะห่างของใบกวนกับก้นถังปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ  $1/3$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน (McCabe และคณะ, 2001)

หลังจากเลือกใช้ใบกวนและถังกวนที่เหมาะสมแล้ว วัสดุหลักที่จะใช้แยกในงานวิจัยนี้คือ พลาสติกชนิดพีเอสและเอบีเอส ซึ่งพลาสติกทั้งสองชนิดนั้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ทำให้การแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นนั้นไม่เพียงพอที่จะแยกพลาสติกออกจากกันได้

อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นกระบวนการทำให้ลอยโดยอาศัยการเหนี่ยวนำหรือสร้างฟองอากาศไปเกาะติดผิวพลาสติกจะทำให้เราสามารถแยกพลาสติกทั้งสองชนิดออกจากกันได้ ซึ่งลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นก็ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกด้วยเช่นกัน และปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของฟองอากาศก็มีหลายปัจจัย ทำให้ยากต่อการศึกษา ดังนั้นเพื่อความสะดวก การออกแบบแผนการทดลองจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดจำนวนการทดลองลง

## 2. 11 การออกแบบแผนการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลอง (Experimental design or Design of experiments) จะช่วยแก้ปัญหการทดลองที่มีตัวแปรมากมายหรือมีการทำซ้ำ ซึ่งทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยจะดูการเปลี่ยนแปลงตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบ เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวแปรที่ควบคุมได้ (Controllable variables) และตัวแปรที่รับกวนระบบ (Uncontrollable variables) (ประไพศรีและพงษ์ชนัน, 2551) ซึ่งแผนการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การจัดการทดลองแบบ Plackett – Burman

### 2.11.1 การจัดการทดลองแบบ Plackett – Burman

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกในกระบวนการทำให้ลอย นอกจากการปรับสภาพพื้นผิวแล้ว ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นก็มีความสำคัญ ซึ่งปัจจัยที่คิดว่ามีผลต่อขนาดของฟองอากาศที่งานวิจัยนี้สนใจมี 6 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดของท่อนำอากาศ (Induced air tube diameter) อัตราเร็วรอบในการหมุน (Rotation speed) ระยะห่างระหว่างท่อกับใบกวน (Spacing distance between tube and impeller) ระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว (Spacing distance between tube and liquid surface) ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง (Concentration of frother) และความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (Concentration of wetting agent) ซึ่งยากต่อการทำการทดลอง เสียเวลาและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ดังนั้นการคัดกรองปัจจัยจึงมีความสำคัญ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการจัดการทดลองของ Plackett – Burman มาพยายามปรับลดรายละเอียดของตัวแปรหรือปัจจัย เพื่อที่จะได้จำนวนปัจจัยที่เหมาะสม และทำการทดลองได้จริงในการทดลอง เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในกระบวนการที่จะทำการศึกษาต่อไป

ซึ่งถ้าเราจัดการทดลองแบบไม่มีการกลั่นกรองปัจจัยก่อน จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด  $2^6$  หรือ 64 ครั้ง ทำให้เสียเวลา ดังนั้น Plackett – Burman จะใช้ในการคัดเลือกปัจจัยออกบางส่วน (Screening factors) เพื่อลดจำนวนปัจจัยลงเหลือเฉพาะปัจจัยที่สำคัญหรือมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น เพื่อให้สามารถทำการทดลองได้ โดยข้อดีที่เห็นได้ชัดเจนของวิธีการนี้ คือ สามารถกำหนดจำนวนการทดลองที่จำกัดในการศึกษาปัจจัยได้เป็นจำนวนมากพร้อมๆ กัน เช่น การทดลอง 12 ครั้ง ศึกษาได้สูงสุด 11 ปัจจัย อีกทั้งคัดกรองปัจจัยจากหลายๆ ปัจจัยให้เหลือเพียงแค่ 1 – 4 ปัจจัยได้โดยไม่ต้องทำการทดลองขนาดใหญ่ แต่ข้อเสีย คือ ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในกรณีที่ผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญสูงหรือผลกระทบร่วมนั้นต้องไม่มีอิทธิพลที่จะกลบอิทธิพลหลักของปัจจัยหลัก (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

การจัดการทดลองแบบ Plackett – Burman จะอาศัยหลักการเมตริกซ์ Hadamard ซึ่งจำนวนการทดลองจะเปลี่ยนไปในเทอมของ 4 คือ 4, 8, 12, 24, ... แต่ละสดมภ์ประกอบด้วยค่า -1 หรือ +1 และจากจำนวนสดมภ์ทั้งหมด ( $n - 1$ ) สดมภ์มีลักษณะสมดุลงเกิดขึ้นในจำนวนครั้งที่เท่ากัน โดยการสร้างแผนการทดลองแบบ Plackett – Burman ทำได้ดังนี้ คือ

1.) สร้างเวกเตอร์ของค่าในสดมภ์แรก (Column ปัจจัย A) ขนาดเท่ากับ  $n - 1$  โดยที่  $n$  คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ใช้ในแผนแบบ Plackett – Burman เช่น  $n = 12$  เวกเตอร์ในสดมภ์แรก คือ ค่า code ของปัจจัย A = (+ + - + + + - - - + - -)

2.) สร้างเวกเตอร์ code ของสดมภ์ที่เหลือโดยใช้ค่าในแถวที่  $n - 1$  ของเวกเตอร์ในสดมภ์ก่อนหน้าเลื่อนมาเป็นค่าเริ่มต้นในแถวแรกและเลื่อนค่าลงไป 1 ตำแหน่ง นั่นคือ ค่าสุดท้ายของปัจจัย A ในแถวที่  $n - 1$  จะเท่ากับค่าแรกของปัจจัย B ดังนั้น code ของปัจจัย B = (- + + - + + - - - + -) ทำเช่นนี้จนได้ครบทุกสดมภ์

3.) เพิ่ม code ของแถวสุดท้ายโดยใส่ค่า (-) ของทุกสดมภ์ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2- 4 การจัดการทดลองของ Plackett – Burman ที่มีจำนวนการทดลอง 12 ครั้ง (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

n	ปัจจัยที่ต้องการกลั่นกรอง $k = n - 1$										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
2	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
3	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
5	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
6	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
7	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
8	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
11	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 2.11.2 แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)

เมื่อเรากลั่นกรองปัจจัยจนได้ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าตอบสนองจริงๆแล้ว ในขั้นต่อไปจะเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและค่าตอบสนองที่ต้องการในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีแผนการทดลองแบบ CCD โดยวิธีนี้ดัดแปลงมาจากการจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งเพิ่มสิ่งทดลองระหว่างระดับของปัจจัย แต่ลดจำนวนสิ่งทดลองลง เช่น กรณีแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3 ปัจจัย ( $3^3$  factorial design) จะมีสิ่งทดลองทั้งหมด 27 สิ่งทดลอง ในขณะที่แผนการทดลองแบบ CCD 3 ปัจจัยจะมีสิ่งทดลอง  $2^3 + (2 \times 3 + 1)$  โดยที่เทอม  $(2n+1)$  เป็นจุดพิเศษที่เพิ่มขึ้นมา และเพิ่มการทดลองที่จุดตรงกลาง 3 ถึง 5 ข้ำ จะได้เท่ากับ 20 สิ่งทดลอง (นิสา ร่มส้มซ่า, 2552) เป็นต้น นอกจากนี้แผนการทดลองแบบ CCD ยังเหมาะสำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี 2 (Second – order or



Quadratic Model) ในกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ มีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากสามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปและการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนและสามารถแยกการทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของแฟคทอเรียล (Factorial portion) และจุดศูนย์กลาง (Center point) ก่อน จากนั้นสร้างสมการตัวแบบเชิงเส้นตรง ถ้าไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนจุดแกน (Axial point) จะได้สมการโพลิโนเมียลดีกรี 2 แต่ข้อเสียของแผนการทดลองแบบนี้ คือ เหมาะสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นในกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพจะต้องทำการปรับแผนการทดลอง (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551) ซึ่งค่ารหัสของระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบ CCD สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2- 5 ค่ารหัสของระดับปัจจัยที่ใช้ในแผนการทดลองแบบ CCD สำหรับ 3 ปัจจัย (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

การทดลอง	ระดับของปัจจัย			การทดลอง	ระดับของปัจจัย		
	ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C		ปัจจัย A	ปัจจัย B	ปัจจัย C
1	-1	-1	-1	11	0	0	0
2	-1	-1	+1	12	0	0	0
3	-1	+1	-1	13	0	0	0
4	-1	+1	+1	14	0	0	0
5	+1	-1	-1	15	$\alpha$	0	0
6	+1	-1	+1	16	$-\alpha$	0	0
7	+1	+1	-1	17	0	$\alpha$	0
8	+1	+1	+1	18	0	$-\alpha$	0
9	0	0	0	19	0	0	$\alpha$
10	0	0	0	20	0	0	$-\alpha$

โดย    สิ่งทดลอง 1 – 8                    เป็นส่วนของการทดลองแฟคทอเรียล (Factorial portion)  
        สิ่งทดลอง 9 – 14                    เป็นส่วนของจุดศูนย์กลาง (Centerpoint portion)  
        สิ่งทดลอง 15 – 20                   เป็นส่วนของจุดแกน (Axial point)

จากแผนการทดลองแบบ CCD ในงานวิจัยนี้เราจะได้ค่าขนาดของฟองอากาศที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นและสามารถทราบค่าขนาดของฟองอากาศที่เงื่อนไขอื่นๆนอกจากที่กำหนดในนี้ เราจะสร้างสมการขึ้นมาเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นกับปัจจัยหลักโดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอย

### 2.11.3 การวิเคราะห์สมการถดถอย

ในการแก้ปัญหาอาจมี 2 ตัวแปรหรือมากกว่ามาเกี่ยวข้อง จึงมีความสำคัญในการหาสมการอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นกับค่าตอบสนองว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในการทำนายค่าตอบสนอง (Prediction) ซึ่งในทางวิศวกรรมจะนำไปใช้เพื่อการวางแผนกระบวนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิต เป็นต้น โดยสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนองนี้ เรียกว่า สมการถดถอย (Regression equation) (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

ข้อดีของการวิเคราะห์การถดถอยนั้นคือ สามารถใช้ข้อมูลจริงจากการทดลองโดยไม่ต้องแยกส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้กับตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การถดถอยนั้นมักจะใช้ร่วมกันเสมอ โดยเริ่มจากศึกษาว่าตัวแปรใดที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เปรียบเทียบด้วย ANOVA จากนั้นทำการสร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองและตัวแปรปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการหรือระบบนั้น

รูปแบบการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะขึ้นกับจำนวนตัวแปรอิสระ ดังนี้

2.12.3.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัวกับตัวแปรตอบสนอง 1 ตัว หากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตอบสนอง (Y) เป็นแบบเส้นตรงสมการที่ได้จะเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2-7)$$

โดย  $\beta_0$  คือ จุดตัดบนแกน Y

$\beta_1$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรง  
 $\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม

2.12.3.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตอบสนอง 1 ตัว หากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตอบสนอง (Y) เป็นแบบเส้นตรงสมการที่ได้จะเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2-8)$$

โดย  $\beta_0$  คือ จุดตัดบนแกน Y  
 $\beta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของเส้นตรงของตัวแปร  $X_i$   
 $\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ซึ่งการประมาณตัวแบบสมการเพื่อทำนายนั้น ในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายจะอาศัยหลักการวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งมีพื้นฐานจากการทำนายที่ดีจะต้องทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงต่ำที่สุด ในทางอุดมคติต้องการให้เท่ากับศูนย์ หลักการของวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด คือ จะประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ทำให้ค่าผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด (Sum square error: SSE) มีค่าต่ำที่สุด นั่นคือ

$$\begin{aligned} \min \text{SSE} &= \min \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ &= \min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \end{aligned} \quad (2-9)$$

จะเห็นได้ว่า ค่าผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาด (SSE) ขึ้นอยู่กับรูปแบบสมการตัวแบบ ดังนั้น การเลือกรูปแบบสมการจึงเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการสร้างสมการทำนาย

## 2.12 ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองจะช่วยถ่วงน้ำหนักปัจจัยที่ใช้ในการทำการทดลองและช่วยลดสิ่งทดลองลงและการวิเคราะห์สมการถดถอยจะช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมที่ศึกษา ได้แก่

### 2.12.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter: $d_b$ )

ขนาดของฟองอากาศมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการลอย เมื่อฟองอากาศมีขนาดใหญ่ จำนวนฟองอากาศต่อหน่วยปริมาตรจะน้อยลง พื้นที่ผิวของฟองอากาศจะลดน้อยลงด้วย ดังนั้น โอกาสในการชนกันกับของแข็งจะลดลง ทำให้อัตราการลอยช้าลงตามไป

### 2.12.2 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity: $U_b$ )

เมื่อเหนี่ยวนำอากาศเข้าไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเกิดได้น้ำ มีรูปร่างทรงกลมและลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำด้วยค่าความเร็วลอยตัว ในทางทฤษฎีสามารถวิเคราะห์ความเร็วลอยตัว ณ จุดที่มีค่าคงที่หรือความเร็วสุดท้ายได้จากการสมดุลแรงตามกฎของนิวตัน (Newton's law) ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดึงดูดของโลกจากน้ำหนักของอนุภาค (Gravity force) แรงลอยตัว (Buoyant force) และแรงเนื่องจากความเสียดทานของของไหลที่กระทำต่ออนุภาค (Drag force) พิจารณาในกรณีที่มีความเร็วของฟองอากาศคงที่หรือความเร็วเป็นศูนย์ โดยความเร็วลอยตัวของฟองอากาศสามารถหาได้จาก

$$U_b = \sqrt{\frac{4\Delta\rho g d_b}{3C_D\rho}} \quad (2-10)$$

$\Delta\rho$  คือ ความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวตัวกลางกับฟองอากาศ หน่วย กิโลกรัม/ลบ.ม.

$g$  คือ ความเร่งโน้มถ่วง หน่วย เมตร/วินาที<sup>2</sup>

$d_b$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคหรือฟองอากาศ หน่วย เมตร

$\mu$  คือ ความหนืดของของเหลวตัวกลาง หน่วย ปาสคาล-วินาที หรือ กิโลกรัม/เมตร-วินาที

$C_D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถหาได้จาก

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (2-11)$$

โดยที่  $Re$  คือ ค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.4

จากสมการที่ (2-14) จะเห็นว่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศแปรผันตามรากที่สองของขนาดของฟองอากาศ แสดงว่า ฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีความเร็วลอยตัวมาก ฟองอากาศขนาดเล็กจะมีความเร็วลอยตัวน้อยกว่า

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวตามสมการที่ (2-12) ดังนี้ (Pianmanakul และคณะ, 2010)

$$U_b = \frac{\Delta D}{T_{frames}} \quad (2-12)$$

$U_b$  คือ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ หน่วย เมตรต่อวินาที

$\Delta D$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ หน่วย เมตร

$T_{frames}$  คือ ช่วงเวลาของการถ่ายภาพ หน่วย วินาที

ซึ่งวิธีนี้จะสามารถวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยตรง และนอกจากนี้ยังสามารถลดความคลาดเคลื่อนจากการใช้สมการคำนวณได้อีกด้วย

### 2.12.3 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency; $f_b$ )

ความถี่ในการเกิดฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับปริมาตรเฉลี่ยของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (2-13) (Painmanakul และคณะ, 2010)

$$f_b = \frac{Q_g}{V_b} \quad (2-13)$$

โดย  $V_b$  คือ ปริมาตรเฉลี่ยของฟองอากาศและ  $Q_g$  คือ อัตราการไหลของอากาศ

#### 2.12.4 ความหนาแน่นรวมของอนุภาคกับฟองอากาศ (Shen และคณะ, 2001)

ในกระบวนการทำให้ลอยของพลาสติก ชื่นพลาสติกมักจะมีขนาดใหญ่กว่าฟองอากาศ ดังนั้นในพลาสติกหนึ่งชิ้นจะมีฟองอากาศอย่างน้อย 1 ฟองไปเกาะติด การที่ชื่นพลาสติกจะลอยหรือไม่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นโดยรวมของพลาสติกกับฟองอากาศ ซึ่งถ้าค่าความหนาแน่นรวมมีค่ามากกว่าของเหลวตัวกลาง แม้ว่าจะมีฟองอากาศไปเกาะติดบริเวณผิวของพลาสติกก็ตาม ชื่นพลาสติกนั้นจะไม่ลอย

สมมติให้ฟองอากาศยึดติดกับชื่นพลาสติกมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับกับปริมาตรฟองอากาศก่อนติดกับชื่นพลาสติก พื้นที่ที่ฟองอากาศไปเกาะติดจะหาได้จาก

$$A_0 = (\pi/4)d_0^2 = (\pi/4)(2^{1/3}d_b)^2 \quad (2-14)$$

$d_0$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งทรงกลม หน่วย เมตร

$d_b$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ หน่วย เมตร

ดังนั้นความหนาแน่นรวมระหว่างพลาสติกกับฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-15)

$$\rho_{pb} = \frac{\rho_p V_p}{V_p + nV_b} \quad (2-15)$$

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค หน่วย กิโลกรัม/ลบ.ม.

$V_p$  คือ ปริมาตรของชื่นพลาสติก หน่วย ลบ.ม.

$V_b$  คือ ปริมาตรของฟองอากาศ หน่วย ลบ.ม.

$n$  คือ จำนวนฟองอากาศที่ไปเกาะติดบนชื่นพลาสติก

โดยที่

$$V_p = \left(\frac{1}{6}\right) \pi d_{pe}^3 \quad (2-16)$$

$$V_b = \left(\frac{1}{6}\right) \pi d_b^3 \quad (2-17)$$

$$n = KA_p/A_0 \quad (2-18)$$

$d_{pe}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Equivalent sphere หน่วย เมตร

$A_p$  คือ พื้นที่ผิวของชื่นพลาสติก หน่วย ตารางเมตร

K คือ เปอร์เซ็นต์การเกาะติดของฟองอากาศบนผิวชั้นพลาสติก

ในการคำนวณหาพื้นที่ผิวของพลาสติก จะใช้ค่าปัจจัยทางรูปร่างในการนำมาคำนวณโดย

$$\phi = A_e/A_p \quad (2-19)$$

$A_e$  คือ พื้นที่ผิวของ Equivalent sphere ของชั้นพลาสติก หน่วย ตารางเมตร

$$A_e = \pi d_{pe}^2 \quad (2-20)$$

เพราะฉะนั้น

$$A_p = \frac{\pi d_{pe}^2}{\phi} \quad (2-21)$$

แทนสมการ (2-18) และ (2-25) ลงในสมการ (2-22) จะได้

$$n = \frac{4Kd_{pe}^2}{\phi(2^{1/3}d_b)^2} \quad (2-22)$$

จากนั้น แทนสมการ (2-16), (2-17) และ (2-23) ลงในสมการ (2-15) จะได้ ความหนาแน่นรวมระหว่างพลาสติกกับฟองอากาศดังสมการ

$$\rho_{pb} = \frac{1.59\phi\rho_p d_{pe}}{1.59\phi d_{pe} + 4Kd_b} \quad (2-23)$$

$\phi$  คือ ปัจจัยแสดงรูปร่าง (Shape factor)

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาค หน่วย กิโลกรัม/ลบ.ม.

$d_{pe}$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า หน่วย เมตร

K คือ ค่าคงที่การเกาะติดของฟองอากาศบนผิวของอนุภาค

$d_b$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ หน่วย เมตร

ซึ่งความหนาแน่นรวมระหว่างพลาสติกกับฟองอากาศ ยิ่งมีค่าน้อยจะมีความสามารถในการลอยมากขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของชั้นพลาสติกมีการเปียกหรือชอบน้ำมากขึ้น ค่าคงที่การเกาะติดของฟองอากาศบนผิวจะลดลง ดังนั้นความหนาแน่นระหว่างพลาสติกกับฟองอากาศจะมากขึ้น ทำให้โอกาสที่ชั้นพลาสติกจะลอยลดลง

### 2.12.5 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial Area) (Painmanakul และคณะ, 2010)

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่สัมผัสของฟองอากาศทั้งหมดกับปริมาตรของน้ำที่เติมอากาศ โดยเป็นฟังก์ชันของความถี่ของการเกิดฟอง ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ ดังสมการที่ (2-24)

$$a = \frac{N_b \times S_b}{V_{total}} = f_b \times \frac{H_L}{U_b} \times \frac{S_b}{V_{total}} \quad (2-24)$$

- $N_b$  คือ จำนวนฟองอากาศ  
 $S_b$  คือ พื้นที่ผิวของฟองอากาศ หน่วย ตารางเมตร  
 $H_L$  คือ ความสูงของช่องเหลว หน่วย เมตร  
 $V_{total}$  คือ ปริมาตรของน้ำในถังปฏิกรณ์ หน่วย ลบ.ม.

### 2.12.6 ความเร็วเกรเดียนท์ (Gradient velocity: G) (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)

ความเร็วเกรเดียนท์ คือ การเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อหน่วยระยะทาง เป็นตัวที่บ่งบอกถึงความปั่นป่วนในการกวน โดย

$$G = \sqrt{P/\mu v} \quad (2-25)$$

- $v$  คือ ความเร็วปลายใบกวน หน่วย เมตร/วินาที  
 $\mu$  คือ ความหนืด หน่วย ปาสคาล-วินาที  
 $P$  คือ กำลังของใบกวน หน่วย วัตต์

ในงานวิจัยนี้ ค่ากำลังสามารถคำนวณได้จากการกวนด้วยใบพัดกวนและการกวนที่เกิดจากฟองอากาศ

สำหรับกำลังของใบกวนที่ใช้ ในการไหลแบบราบเรียบ สามารถหาได้จากสมการที่ (2-26) (Metcalf & Eddy, 2003)

$$P = K\mu N^2 D^3 \quad (2-26)$$

สำหรับกำลังของใบกวนที่ใช้ ในการไหลแบบปั่นป่วน สามารถหาได้จากสมการที่ (2-27) (Metcalf & Eddy, 2003)



$$P = K\rho N^3 D^5 \quad (2-27)$$

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว หน่วย กก./ลบ.ม.

$D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน หน่วย เมตร

$N$  คือ ความเร็วรอบการหมุน หน่วย รอบ/วินาที

$K$  คือ ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของใบกวน

ซึ่งค่าคงที่  $K$  ของใบกวนชนิดต่างๆ ที่สภาวะราบเรียบและสภาวะปั่นป่วนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2- 6 ค่าคงที่  $K$  ของใบกวน ณ สภาวะราบเรียบและสภาวะปั่นป่วน (Tchobanoglous และคณะ, 2002)

ชนิดของใบกวน	ค่าคงที่ของใบกวน $K$	
	สภาวะราบเรียบ	สภาวะปั่นป่วน
Propeller, square pitch, 3 blades	41.0	0.32
Propeller, pitch of two, 3 blades	43.5	1.00
Turbine, 6 flat blades	71.0	6.30
Fan turbine, 6 blades	70.0	4.80
Turbine, 6 arrowhead blades	70.0	1.65
Turbine, 6 arrowhead blades	71.0	4.00
Flat paddle, 6 blades	36.5	1.70
Shrouded turbine, 2 curved blades	97.5	1.08

นอกจากนี้ค่ากำลังในส่วนที่เกิดจากฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-28) (Metcalf & Eddy, 2003)

$$P = C_1 Q_g \log \left( \frac{H+10.4}{10.4} \right) \quad (2-28)$$

$C_1$  คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3904

$H$  คือ ความดันอากาศ หน่วย เมตร

ฟองอากาศเมื่อเกิดขึ้นในน้ำ ก็มักต้องการที่จะไปอยู่ในบรรยากาศภายนอก ดังนั้นจึงเติมสารชนิดหนึ่งลงไปเพื่อช่วยให้ฟองอากาศมีความเสถียรมากขึ้น อยู่ได้นานขึ้น สารนั้น คือ สารเคลือบฟอง (Frother) หรืออาจเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เพื่อให้เกิดฟองและทำให้เป็ยกง่ายขึ้น

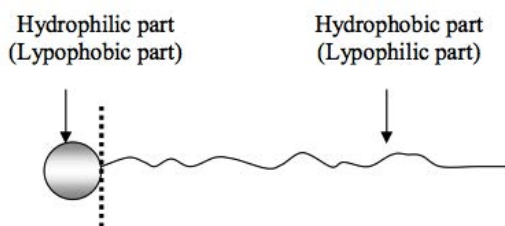
## 2. 13 สารเคลือบฟอง

สารเคลือบฟอง (Frother) เป็นสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และถูกดูดซึมบนผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำและเป็นสารที่มีโมเลกุลหลายขั้ว (Hetero-polar molecules) คือ ขั้วที่มีประจุละลายน้ำได้และขั้วที่ไม่มีประจุเป็นกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสารเคลือบฟองจะมีหน้าที่ช่วยให้ฟองมีเสถียรภาพ โดยสารเคลือบฟองที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ได้แก่ น้ำมันสน เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บินอล (Methyl isobutyl carbinol: MIBC) กรดครีซิลิก (Creysylic acid) เป็นต้น (ขวัญชัย ลีเฝ้าพันธุ์, 2553)

## 2. 14 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ เพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆ ง่ายขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เป็ยก เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสม โดยสารลดแรงตึงผิวมีคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนหัวที่มีขั้วเป็นส่วนชอบน้ำ (Hydrophilic) และส่วนหางที่ไม่มีขั้วเป็นส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แสดงดังภาพที่ 2-13 ซึ่งสารลดแรงตึงผิวแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด (จิรสา ทรงกลด, 2548: ออนไลน์)

- สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)
- สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)
- สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)
- สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Amphoteric surfactant)



ภาพที่ 2 - 13 คุณลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิว (Rosen และ Kunjappu, 2012)

## 2. 15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการแยกพลาสติกผสมด้วยกระบวนการทำให้ลอยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกหลายปัจจัย ยกตัวอย่างเช่น ลักษณะของพลาสติก การปรับสภาพพื้นผิว อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้เป็นตาราง ดังนี้

### 2.15.1 ลักษณะของพลาสติก

งานวิจัยที่ถึงลักษณะพลาสติกลักษณะของพลาสติกที่มีผลต่อกระบวนการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2- 7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของพลาสติกที่มีผลต่อกระบวนการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย

งานวิจัย	ผลการทดลอง
Shen และคณะ (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ขนาดของพลาสติกที่ใกล้เคียงกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกดีกว่า</li> <li>-พลาสติกส่วนที่ลอยควรมีลักษณะเป็นแผ่น มีขนาดเล็กเพราะความสามารถในการลอยและอัตราการลอยสูงกว่าพลาสติกที่มีลักษณะกลมและมีขนาดใหญ่</li> <li>-พลาสติกขนาด 3.35 – 5 มิลลิเมตรมีประสิทธิภาพการแยกพลาสติกสูงสุด</li> </ul>

Shen และคณะ (2002)	-ความสามารถในการลอยของพลาสติกไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปียกของพื้นผิวเพียงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับความหนาแน่นและรูปร่างของชิ้นพลาสติกอีกด้วย
--------------------	---

จากตารางที่ 2-7 จะเห็นว่าในการแยกพลาสติก ขนาดและลักษณะของพลาสติกมีความสำคัญ โดยขนาดและลักษณะของพลาสติกที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพการแยกสูงสุดอยู่ในช่วง 3 – 5 มิลลิเมตรและพลาสติกควรมีลักษณะเป็นแผ่น เนื่องจากมีอัตราการลอยสูงกว่าพลาสติกที่มีลักษณะกลมและมีขนาดใหญ่

### 2.15.2 การปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก

หลักการของกระบวนการทำให้ลอยเป็นการอาศัยความแตกต่างของพื้นผิวพลาสติกแต่ละชนิด ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิวจึงมีความสำคัญ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับสภาพพื้นผิวมีผลต่อกระบวนการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2- 8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับสภาพพลาสติกที่มีผลต่อกระบวนการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย

เอกสารอ้างอิง	ชนิดพลาสติก	สารปรับสภาพและสารเคลือบฟอง	ผลการทดลอง
Bimal (1998)	PVC และ POM	-Sodium ligningsulfonate -Sorbitan monolaurate -Pineoil	-โซเดียมลิกนินซัลโฟเนตจะให้เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของฟิวส์ที่ 97% และ 92% ตามลำดับ -การควบคุมการค้ำแรงตึงผิววิกฤตของ สารพลาสติกตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้พลังงานพื้นผิวอิสระที่ต่างกัน ทำส่งผลถึงการเกิดการเลือกสรร ในการแยก
Marques และ Terenorio (2000)	PET และ PVC	-Calcium lignosulfonate	-เมื่อเพิ่มความเป็นด่างมากขึ้น MIBC จะให้เปอร์เซ็นต์การแยกความ

		-MIBC -Pineoil	<p>บริสุทธิ์ของ PVC มากขึ้น</p> <p>-Pineoil ให้เปอร์เซ็นต์การแยก PVC สูงกว่า MIBC แต่ความบริสุทธิ์ที่ได้จะต่ำกว่า เนื่องจาก Pineoil ไปเหนี่ยวนำประจุของสารละลาย</p>
Shen และคณะ (2002)	POM PVC PET PMMA PC PS และ ABS	-Tergitol 15-S-7	<p>-การเติมสารลดแรงตึงผิวแอลคิลอีทอกซิลเลทประเภทไม่แตกตัวเป็นประจุ จะทำให้ ความสามารถในการลอยของพลาสติกทั้ง 7 ชนิดลดลงแต่ลดลงแตกต่างกัน โดย PS จะมีความสามารถในการลอยสูงสุด รองลงมาคือ ABS PC PET PMMA PVC และ POM เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวนี้นำไปลดแรงตึงผิวของของเหลวตัวกลาง</p>
Shen และคณะ (2002)	POM PVC PET PMMA PC PS และ ABS	-Methyl Cellulose -MIBC	<p>-แม้จะเพิ่มปริมาณ MC สูงแต่ PS และ ABS ก็ยังคงมีเปอร์เซ็นต์การลอยสูง</p> <p>-แยกพีเอสได้ 88.60% และเอบีเอสได้ 96.40% ที่ความเข้มข้น MC เท่ากับ 57.14 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้น MIBC เท่ากับ 29.4 มิลลิกรัม/ลิตร</p>
ณภัทร คุณาจิตพิมล (2553)	PP HDPE ABS PS PET และ PVC	-Calcium lignosulfonate -Calcium chloride -MIBC	<p>-แคลเซียมลิกโนซัลไฟเนตร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 %w/v จะให้ความบริสุทธิ์ของ PS ที่ 96.43% และ ABS ที่ 98.97%</p>
Fraunholz และคณะ (2004)	GRPP HIPS ABS PC PA6 PMMA PVC	-Inorganic depressant -Organic	<p>-สารกดอนุภาคโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น กรดแทนนิก จะสามารถแยกพลาสติกกลุ่มที่ไม่มีขั้วออกจากกลุ่มที่มี</p>

	และ POM	depressant -Macromolecular organic depressant	ขั้วได้ แต่จะไม่สามารถแยกในกลุ่ม ด้วยตัวเอง -สารกดอนุภาคโมเลกุลขนาดใหญ่ ประเภทไม่มีประจุ ค่าพีเอชไม่มีผลต่อ ความสามารถในการลอย
ธงชัย เถกิงศักดิ์ากุล (2548)	PP HDPE ABS PS PET POM และ PVC	-Calcium lignosulfonate -CTAB	-แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต 400 มิลลิกรัม/ลิตรร่วมกับ CTAB $2.67 \times 10^{-5}$ ppm สามารถแยก PS ได้ 93.5% มีความบริสุทธิ์ 94.8% และ แยก ABS ได้ 94.7% มีความบริสุทธิ์ 93.3%
นริศรา จิตรระกูลชัย (2549)	HIPS และ ABS	- anionic cationic nonionic และ zwitterionic surfactant -Tetraethylene glycol dodecyl ether	-สารลดแรงตึงผิวและสารเคลือบฟอง มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยก -การคัดแยกพลาสติกผสมของ สารละลายน้ำเกลือที่มีสารลดแรงตึง ผิวผสมอยู่ร้อยละ 1 โดยปริมาตรของ น้ำ และควบคุมความหนาแน่นให้มีค าเท่ากับ 1.0380 กรัม/ลบ.ซม. จะมี ประสิทธิภาพในการคัดแยกสูงถึง 94.25 - 100%
บวรกิตติ์ เนคมานุ รักษ์ (2549)	HIPS และ ABS	-Tannic acid	- HIPS และ ABS สามารถแยกออก จากกันได้ดีที่สุดที่สภาวะการแยก อุณหภูมิของตัวกลาง 30 องศา เซลเซียส อัตราความเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที อัตราการไหลของ ฟองอากาศ 1 ลิตรต่อนาที โดย เปอร์เซ็นต์การแยกพลาสติก ABS มา กกว่า 98 % และมีความบริสุทธิ์ ประมาณ 99%

Pongstabodee และคณะ (2008)	PP HDPE ABS PS PET และPVC	-Calcium lignosulfonate	-แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต 200 มิลลิกรัม/ลิตรร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ 0.1มิลลิกรัม/ลิตรและ MIBC 0.01 ppm ที่พีเอชเท่ากับ 7 สามารถแยก PS และ ABS ได้ 99% และ 96.3% ตามลำดับ
Carvalho และคณะ (2010)	PET PVC และ PS	-Calcium lignosulfonate -Hostaphat -SA detergent -MIBC	-การปรับสภาพด้วยต่างร่วมกับสารลดแรงตึงผิวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแยกพลาสติก -SA detergent ร่วมกับแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต 11 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถแยก PET PVC และ PS ได้ 97.2% 1.1% และ 1.1% ตามลำดับ
Wang และคณะ (2012)	PS และ ABS	-Tannic acid -Lignosulfonate -Terpineol	-ความเข้มข้นของกรดแทนนิก 25 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับสภาพเป็นเวลา 15 นาที เทอร์พินอล 5 มิลลิกรัม/ลิตรและใช้เวลาในการทำให้ลอย 15 นาที สามารถแยก PS ได้ 97.45% มีความบริสุทธิ์ 90.12% และแยก ABS ได้ 89.38% มีความบริสุทธิ์ 97.24%

จากตารางที่ 2-8 จะเห็นว่าในกระบวนการทำให้ลอยจะต้องมีการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกหรือการลดแรงตึงผิวของตัวกลางให้ใกล้เคียงกับพื้นผิวพลาสติกใดพลาสติกหนึ่งจึงจะสามารถแยกพลาสติกผสมเหล่านั้นออกจากกันได้ และสำหรับการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอส งานวิจัยต่างๆ นิยมใช้แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตกับกรดแทนนิกเป็นสารเคลือบผิว และในอุตสาหกรรมทั่วไปก็มักใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลเป็นสารเคลือบฟอง นอกจากนี้ยังพบว่าสารลดแรงตึงผิวที่ทอกซีเลทประเภทไม่มีประจุก็มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตกับกรดแทนนิกเป็นสารเคลือบผิว และเมทิลไอโซ

บิวทิลคาร์บีนอลกับ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether มาเป็นสารเคลือบฟอง เพื่อศึกษาผลของสารเคลือบผิวและสารเคลือบฟองที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย

### 2.15.3 ฟองอากาศและการกวนผสม

งานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการทำให้ลอยโดยอาศัยการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกเข้าไปผ่านใบกวน ดังนั้นใบกวนและลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจึงมีความสำคัญ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกวนและฟองอากาศ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2- 9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฟองอากาศและการกวนผสม

งานวิจัย	ผลการทดลอง
Ranade และ Joshi (1989)	-มุมเอียงของใบกวนมีผลต่อรูปแบบการกวน
Gorain และคณะ (1995)	-ขนาดของฟองอากาศจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการกวนของใบกวน -ขนาดของฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่สุดตรงแกนเหนือใบกวนและมีขนาดเล็กสุดตรงจุดปล่อยออก (Discharge point) ของใบกวน
We-Ming และคณะ (2000)	-ความกว้างของใบกวนมีผลต่อรูปร่างของVortexที่เกิดขึ้น โดยใบกวนกว้างจะทำให้เกิดการไหลแบบ Vortex แต่ใบกวนที่กว้างน้อยกว่า จะเกิดแรงเฉือนมากกว่า เนื่องจากการรวมตัวกันของ 2 Vortex
Wu และคณะ (2001)	-จำนวนใบกวนและมุมเอียงเพิ่ม จะทำให้อัตราเร็วในการกวนเพิ่ม -อัตราเร็วในการกวนเพิ่ม ถ้าความหนาของใบกวนลดลง
Chapple และคณะ (2002)	- ค่าเลขกำลังของใบกวนชนิด Pitched blade turbine ไม่ขึ้นกับความหนาของใบกวน แต่ขึ้นกับอัตราส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนต่อขนาดของถัง
Tomas และคณะ (2003)	-ใบกวนที่มีค่าเลขกำลัง (Power number) น้อยจะกวนให้กระจายตัวได้ดีกว่า ส่วนใบกวนที่มีค่าเลขกำลังมากจะมีการแลกเปลี่ยนมวลสารดีกว่า



Jirout และ Rieger (2011)	-ค่าความเร็ว just-suspended ของใบกวนจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนใบพัด -จำนวนใบพัดที่น้อยกว่าจะให้แรงในแนวแกนหมุนต่ำกว่า -Pitched blade turbine with diagonally folded blades เป็นใบกวนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด
--------------------------	---

จากตารางที่ 2-9 จะเห็นว่าลักษณะของใบกวนมีความสำคัญต่อการกวนที่เกิดขึ้น โดย Pitched blade turbine with diagonally folded blades เป็นใบกวนที่มีประสิทธิภาพการกวนดีที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ Pitched blade turbine with diagonally folded blades แบบ 3 ใบกวนมาใช้ในการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกเพื่อให้เกิดฟองอากาศในกระบวนการทำให้ลอย

จากหลายงานวิจัยดังกล่าวจะพบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญในการคัดแยกพลาสติกผสมประกอบด้วย

- ลักษณะและชนิดของพลาสติกที่ทำการแยก
- สารเคมี (สารลดแรงตึงผิวและสารเคลือบผิว)
- อุปกรณ์สร้างฟองอากาศและการกวนผสม
- ปัจจัยอื่น ๆ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก

ดังนั้นแนวทางการประยุกต์การสร้างฟองอากาศแบบกระบวนการลอยแร่โดยวิธีการเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปด้วยการหมุนใบพัดกวนตัดลำอากาศ ดึงอากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปในน้ำ สร้างฟองอากาศแล้วปล่อยจากส่วนล่างของใบกวนจึงน่าสนใจ อีกทั้งจากการค้นคว้ายังไม่มียานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการคัดแยกพลาสติกผสม และสภาวะเงื่อนไขในการลอย เช่น การเลือกชนิดสารเคมี ปริมาณที่ใช้ ต่างก็ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกพลาสติก ดังนั้นถ้าเราเข้าใจในส่วนนี้จะทำให้ออกแบบ ควบคุมหรือนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นเหตุจูงใจให้เกิิดงานวิจัยการคัดแยกพลาสติกผสมด้วยกระบวนการทำให้ลอยในด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) กระทำภายใต้สภาวะการณ์ที่กำหนดขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการ ชั้น 3 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

###### 3.1.1.1 พลาสติก

พลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด ได้แก่ พอลิสไตรีน (PS) และอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) แบ่งเป็นเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์จากบริษัท Global connection ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร (ตารางที่ 3 – 1) และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วหรือขยะพลาสติก นำมาล้างให้สะอาด ตัดให้มีขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร โดยพีเอสได้จากกล่องใส่ซีดีและเอบีเอสได้จากโครงพัดลม (ตารางที่ 3 – 2) ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้ชนิดละ 25 กรัม ทั้งสองชนิดรวมกัน 50 กรัม

ตารางที่ 3 - 1 เม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้ในงานวิจัย

พลาสติก	ความหนาแน่น(g/cm <sup>3</sup> )	รูปประกอบ
พอลิสไตรีน (PS)	1.038	
อะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS)	1.071	

ตารางที่ 3 - 2 ขยะพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย

พลาสติก	แหล่งที่มา	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	รูปประกอบ
พอลิสไตรีน (PS)	กล่องใส่ซีดี	1.010	
อะครีไนล-บิวทาได อีน-สไตรีน (ABS)	โครงพัดลม	1.021	

### 3.1.1.2 ท่อนำอากาศ (Induced air tube)

ท่อนำอากาศที่ใช้ในงานวิจัยทำด้วยท่อพลาสติกใส ความยาว 14 เซนติเมตร ต่อท่อพีวีซีแยกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 นิ้ว โดยลักษณะของท่อนำอากาศแสดงได้ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3 - 1 ลักษณะของท่อนำอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.1.1.3 มอเตอร์ปรับรอบ

มอเตอร์ปรับรอบที่ใช้ในงานวิจัย มีกำลัง 100 วัตต์ สามารถปรับรอบได้ 0 - 3,000 รอบต่อนาทีจากบริษัท แพลทตินั่ม เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด

#### 3.1.1.4 ใบกวน

ใบกวนที่ใช้ในงานวิจัย เป็นชนิด Pitched blade turbine มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร จากบริษัท แพลทตินั่ม เอ็นจิเนียริง แอนด์ เซอร์วิส จำกัด



ภาพที่ 3 - 2 ใบกวนชนิด Pitched blade turbine

#### 3.1.1.5 แกนเพลลา ยาว 40 เซนติเมตร

#### 3.1.1.6 ถังปฏิกริยา

#### 3.1.1.7 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ

กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงที่ใช้ในงานวิจัยจากบริษัท Hi – Tech Resources (Thailand) Co., Ltd. รุ่น InLine 2000 และใช้ Image Frame Work เป็นซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ



ภาพที่ 3 - 3 กล้องถ่ายภาพความเร็วสูง (ซ้าย) และซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ (ขวา)

#### 3.1.1.8 นาฬิกาจับเวลา

#### 3.1.1.9 เครื่องชั่งดิจิตอลแบบละเอียด

#### 3.1.1.10 เครื่องกวนสารละลายแบบ Magnetic stirrer

### 3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 สารเคลือบผิว (Wetting agent) ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ กรดแทนนิก (Tannic acid) และ แคลเซียมลิกโนซัลไฟเฟต (CaLS)

1.) กรดแทนนิก (Tannic acid) ของบริษัท Loba Chemie Pvt., Ltd. ประเทศอินเดีย ลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3 - 3 ลักษณะสมบัติของกรดแทนนิก

IUPAC name	2,3-dihydroxy-5-(((2R,3R,4S,5R,6R)-3,4,5,6-tetrakis((3,4-dihydroxy-5-[(3,4,5-trihydroxyphenyl)carbonyloxy]phenyl)carbonyloxy)oxan-2-yl)methoxy)carbonyl)phenyl 3,4,5-trihydroxybenzoate
CAS number	1401 - 55 - 4
Molecular formula	$C_{76}H_{52}O_{46}$
Molar Mass	1701.22 g mol <sup>-1</sup>

2.) แคลเซียมลิกโนซัลไฟเฟต (Calcium lignosulfonate; CaLS) ของบริษัท Sigma – Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา ลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3 - 4 ลักษณะสมบัติของแคลเซียมลิกโนซัลไฟเฟต

IUPAC name	calcium 3-(2-hydroxy-3-methoxyphenyl)-2-[2-methoxy-4-(3-sulfonatopropyl)phenoxy]propane-1-sulfonate
CAS number	8061 - 52 - 7
Molecular formula	$C_{20}H_{24}CaO_{10}S_2$
Molar Mass	528.61 g mol <sup>-1</sup>

3.1.2.2 สารเคลือบฟอง (Frother) ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล (Methyl Isobutyl Carbinol; MIBC) และ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether

1.) เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล (Methyl Isobutyl Carbinol; MIBC) ของบริษัท Sigma – Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา ลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3 - 5 ลักษณะสมบัติของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล

IUPAC name	4-Methyl-2-pentanol
CAS number	108 - 11 - 2
Molecular formula	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O
Molar Mass	102.17 g mol <sup>-1</sup>
Density	0.802 g ml <sup>-1</sup>
HLB	6.1

2.) Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ของบริษัท Thai Ethoxylate Co., Ltd. ประเทศไทย ลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3 - 6 ลักษณะสมบัติของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether

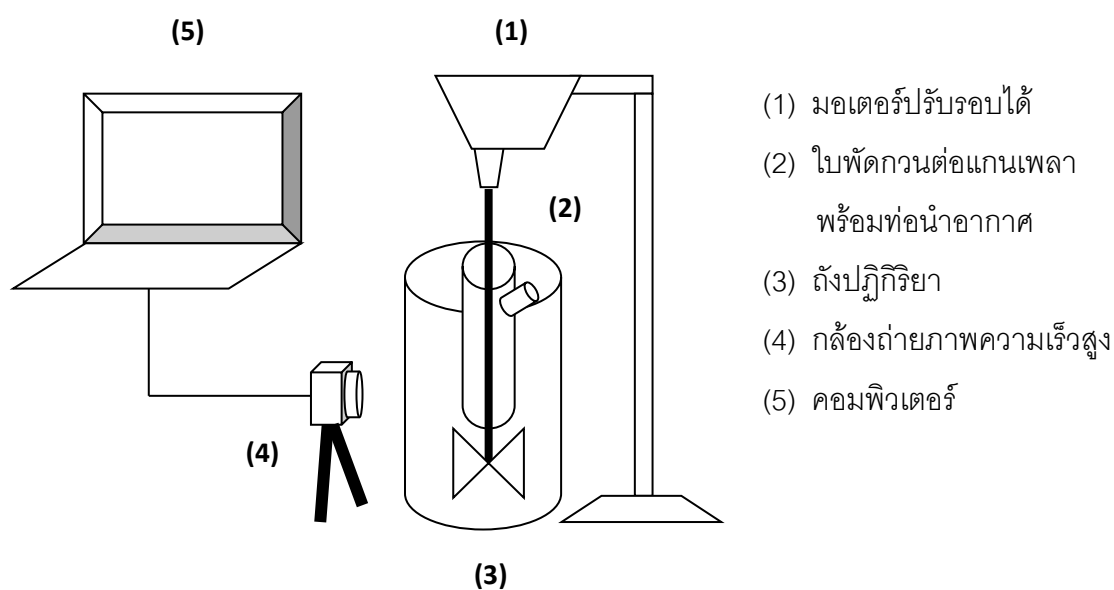
INCI name	Fatty alcohol C12-14 approx.5 mol EO/Laureth5
CAS number	68439 - 50 - 9
Molecular formula	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub> O <sub>6</sub>
Molar Mass	406.6 g mol <sup>-1</sup>
Density	0.924 g ml <sup>-1</sup>
HLB	10.3

3.1.2.3 สารปรับความหนาแน่น (Density modifying agent) ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) ลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3 - 7 ลักษณะสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์

IUPAC name	Calcium chloride
CAS number	10035 - 04 - 8
Molecular formula	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Molar Mass	$147.02 \text{ g mol}^{-1}$
Density	$1.835 \text{ g ml}^{-1}$

### 3.2 ชุดทดลองและการติดตั้งอุปกรณ์



ภาพที่ 3 - 4 การติดตั้งอุปกรณ์

ประกอบมอเตอร์ปรับรอบที่สามารถปรับรอบได้เข้ากับแกนเพลลา ซึ่งมีใบพัดกวนชนิด Pitched blade turbine ต่อกันพร้อมท่อนำอากาศ ส่วนที่เป็นใบพัดกวนพร้อมท่อนำอากาศลงในถังปฏิกิริยา เมื่อทำการทดลองจะมีกล้องถ่ายภาพความเร็วสูงซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บข้อมูล

### 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 3.3.1 ร้อยละการแยก (%recovery)

%recovery คือ ปริมาณพลาสติกที่คัดแยกออกมาได้จากปริมาณพลาสติกทั้งหมดที่ใส่เข้าไป หาได้จาก

$$\%recovery = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้}}{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ใส่เข้าไปทั้งหมด}} \times 100 \quad (3-1)$$

#### 3.3.2 ร้อยละความบริสุทธิ์ (%grade)

%grade คือ ปริมาณความบริสุทธิ์ของพลาสติกชนิดที่ต้องการที่แยกออกมาได้จากปริมาณพลาสติกทั้งหมดที่แยกออกมาได้ หาได้จาก

$$\%grade = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกชนิดที่ต้องการที่แยกออกมาได้}}{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกทั้งหมดที่แยกออกมาได้}} \times 100 \quad (3-2)$$

#### 3.3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter; $D_b$ )

ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศสามารถหาได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องความเร็วสูง และวิเคราะห์ขนาดโดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ วัดขนาดและเฉลี่ยขนาดของฟองอากาศด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบซอเทอร์ (Sauter mean diameter,  $d_{32}$ ) ที่ใช้วิธีนี้เนื่องจากเป็นการเฉลี่ยโดยให้ความสำคัญกับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรทรงกลมกับพื้นที่ผิวของทรงกลมซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์ฟองอากาศ (Pohorecki และคณะ, 2005) ซึ่งค่าเฉลี่ยแบบซอเทอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (3-3)

$$d_{3,2} = \frac{d_v^3}{d_s^2} \quad (3-3)$$



โดย  $d_v$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปริมาตรของฟองอากาศ และ  $d_s$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ผิวของฟองอากาศ

### 3.3.4 ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency; $f_b$ )

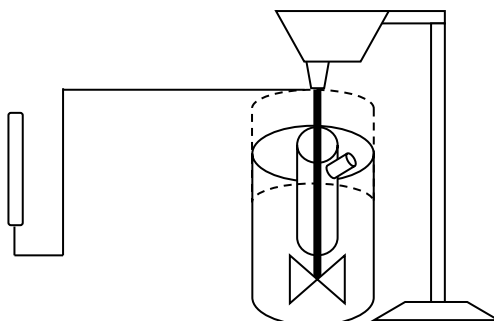
ความถี่ในการเกิดฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับปริมาตรเฉลี่ยของฟองอากาศที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ (3-4) (Painmanakul และคณะ, 2010)

$$f_b = \frac{Q_g}{V_b} \quad (3-4)$$

โดย  $V_b$  คือ ปริมาตรเฉลี่ยของฟองอากาศและ  $Q_g$  คือ อัตราการไหลของอากาศ

### 3.3.5 อัตราการไหลของอากาศ (Gas flow rate; $Q_g$ )

อัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าไปในระบบสามารถวัดได้ด้วยวิธีการ Soap film meter โดยทำถังปฏิกริยาให้เป็นระบบปิด ต่อท่อเชื่อมเข้ากับหลอดแก้วบิวเรท ที่ใส่ฟิล์มสบู่ไว้เดินระบบหมุนใบพัดคววน แล้วจับเวลาที่ฟองสบู่จะเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นที่ขีดศูนย์ไปจนถึงจุดสุดท้ายที่กำหนดไว้ สามารถคำนวณเป็นอัตราไหลของอากาศในหน่วย ลิตร/นาที (Loubiere และคณะ, 2003) หรืออาจวัดด้วยการวัดปริมาตรของฟองอากาศที่เข้าไปในระบบในหนึ่งหน่วยเวลา



ภาพที่ 3 - 5 อุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าไปในระบบ

### 3.3.6 ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity; $U_b$ )

ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-5)

$$U_b = \sqrt{\frac{4\Delta\rho g d_b}{3C_D\rho}} \quad (3-5)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถหาได้จาก

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (3-6)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.4 แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศได้โดยใช้กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของฟองอากาศ แล้วนำภาพมาวิเคราะห์ความเร็วลอยตัวตามสมการที่ (3-7) ดังนี้

$$U_b = \frac{\Delta D}{T_{frames}} \quad (3-7)$$

โดยใช้อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่ฟองอากาศลอยขึ้นตามแนวดิ่งกับจำนวนภาพที่ถ่ายได้ด้วยความเร็ว 500 ภาพต่อวินาทีหรือสามารถค่าได้จากกราฟระหว่างความเร็วลอยตัวสุดท้าย (Terminal rising velocity) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter) ของ Grace et Wairegi (1986) (Sardeing และคณะ, 2006)

### 3.3.7 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial Area)

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเป็นฟังก์ชันของความถี่ในการเกิดฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-8) (Painmanakul และคณะ, 2010)

$$a = \frac{N_b \times S_b}{V_{total}} = f_b \times \frac{H_L}{U_b} \times \frac{S_b}{V_{total}} \quad (3-8)$$

โดย  $N_b$ ,  $S_b$ ,  $V_{total}$  และ  $H_L$  คือ จำนวนของฟองอากาศ พื้นที่ผิวของฟองอากาศ ปริมาตรของของเหลวและความสูงของของเหลวตามลำดับ

### 3.3.8 ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradient)

ความเร็วเกรเดียนท์ เป็นตัวที่บ่งบอกความปั่นป่วนในการกวน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-9) (Metcalf & Eddy และคณะ, 2003)

$$G = \left( \frac{P}{\mu V} \right)^{0.5} \quad (3-9)$$

โดย  $\mu$  คือความหนืดจลนศาสตร์และ  $P$  คือ กำลังที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ ค่ากำลังสามารถคำนวณได้จากการกวนด้วยใบพัดกวนและการกวนที่เกิดจากฟองอากาศ ซึ่งค่ากำลังในส่วนที่เกิดจากใบพัดกวนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-10) (Metcalf & Eddy และคณะ, 2003)

$$P = K_T n^3 D^5 \rho \quad (3-10)$$

โดย  $n$ ,  $D$  และ  $\rho$  คือ ความเร็วรอบการกวน (รอบต่อวินาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกวน (เมตร) และความหนาแน่นของของเหลว ตามลำดับ  $K_T$  คือ ค่าคงที่ของใบพัดกวนสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ใบพัดกวนชนิด Pitch blade turbine ซึ่ง  $K_T$  มีค่าเท่ากับ 1.00 นอกจากนี้ค่ากำลังในส่วนที่เกิดจากฟองอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-11)

$$P = C_1 Q_g \log \left( \frac{H+10.4}{10.4} \right) \quad (3-11)$$

โดย  $C_1$  คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3904 และ  $H$  คือ ความดันอากาศ (เมตร)

ตารางที่ 3 - 8 สรุปพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาและวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์
ร้อยละการแยก (%recovery)	$\%recovery = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้}}{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ใส่เข้าไปทั้งหมด}} \times 100$
ร้อยละความบริสุทธิ์ (%grade)	$\%grade = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกชนิดที่ต้องการที่แยกออกมาได้}}{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกทั้งหมดที่แยกออกมาได้}} \times 100$
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter; $D_b$ )	ถ่ายด้วยกล้องความเร็วสูง และวิเคราะห์ขนาดโดยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ วัดขนาดและเฉลี่ยขนาดของฟองอากาศด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบซอเทอร์
ความถี่ในการเกิดฟองอากาศ (Bubble formation frequency; $f_b$ )	$f_b = \frac{Q_g}{V_b}$
อัตราการไหลของอากาศ (Gas flow rate; $Q_g$ )	วัดปริมาตรของฟองอากาศที่เข้าในหนึ่งหน่วยเวลา
ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (Bubble rising velocity; $U_b$ )	กราฟของ Grace et Wairegi (1986)
พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (Interfacial Area)	$a = \frac{N_b \times S_b}{V_{total}} = f_b \times \frac{H_L}{U_b} \times \frac{S_b}{V_{total}}$
ความเร็วเกรเดียนท์ (Gradient Velocity)	$G = \left( \frac{P}{\mu V} \right)^{0.5}$

### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัวโดยการใส่ไบพัดกวन्दึงอากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปในน้ำ และยังศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 5 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการแยกพลาสติกด้วยวิธีการของ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base

การทดลองที่ 2 ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย-จม ได้แก่ความเข้มข้นของสารปรับความหนาแน่นที่ใช้ในการแยก

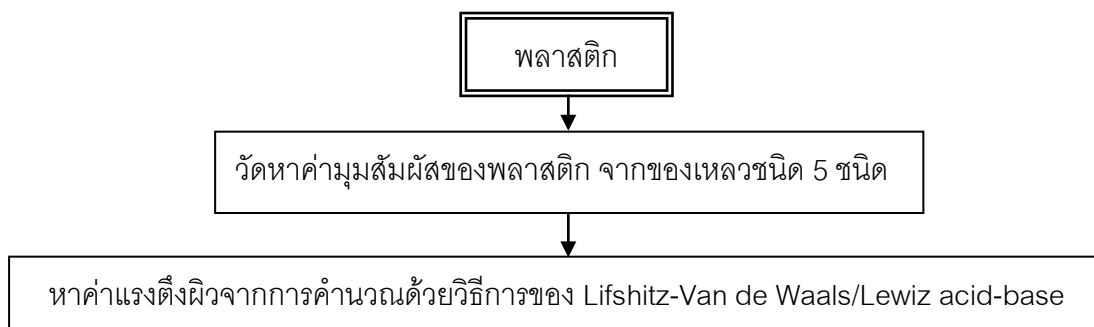
การทดลองที่ 3 ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกชนิดพีเอสและเอบีเอสด้วยสารเคลือบผิว ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบผิว ชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบฟองและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ

การทดลองที่ 4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการกวนผสมและการเกิดฟอง ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำอากาศ อัตราเร็วในการกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับไบกววน ระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง

การทดลองที่ 5 ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อวิธีการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการกวน เวลาที่ใช้ในการแยกและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ

#### 3.4.1 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติก

การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการแยกพลาสติกด้วยวิธีการของ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base โดยวัดหาค่ามุมสัมผัสของพลาสติกพีเอส (PS) และเอบีเอส (ABS) จากของเหลวชนิด 5 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ไดไอโอดีมีเทน (Diiodomethane) กลีเซอรอล (Glycerol) ฟอรัมาไมด์ (Formamide) และเตตระดีเคน (Tetradecane) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าแรงตึงผิว



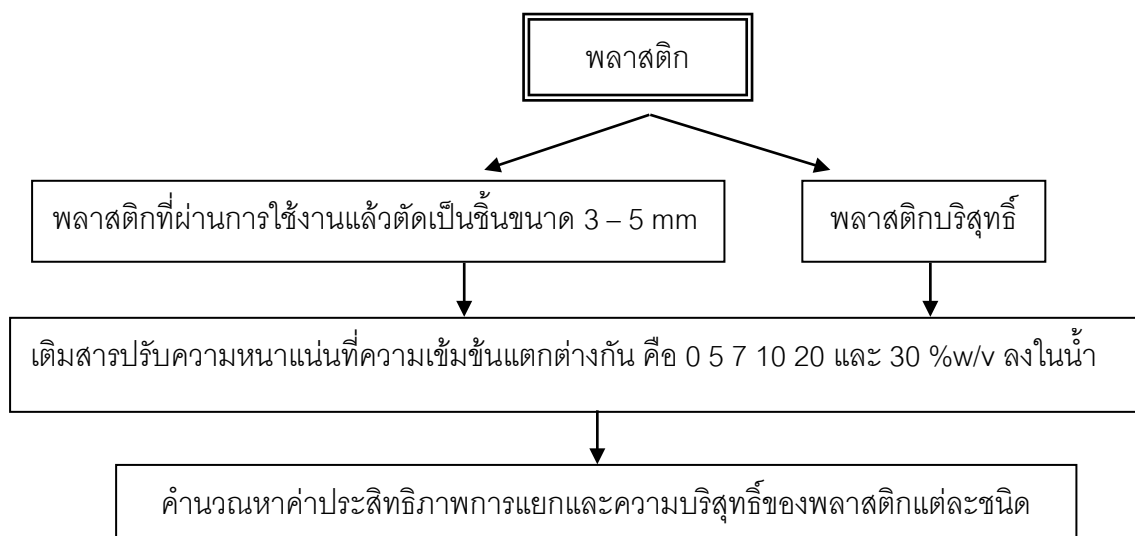
ภาพที่ 3 - 6 แผนผังสรุปการทดลองที่ 1

ตารางที่ 3 - 9 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของของเหลือ	น้ำกลั่น เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) ไดไอโอดมีเทน (Diiodomethane) กลีเซอรอล (Glycerol) และฟอร์มามิด (Formamide)
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ค่าแรงดึงดูดผิวของพลาสติก	คำนวณด้วยวิธีการของ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base

### 3.4.2 ศึกษาการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย - จม

การทดลองที่ 2 ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการแยกพลาสติกด้วยวิธีการลอย - จม ได้แก่ ความเข้มข้นของสารปรับความหนาแน่น โดยตัดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วทั้งพีเอสและเอบีเอสให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร 20 ชิ้น ใส่ลงในถังปฏิกิริยาซึ่งมีตัวกลางเป็นน้ำ เติมแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0 5 7 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v) เก็บพลาสติกที่แยกมาล้าง คำนวณหาประสิทธิภาพการแยก เปลี่ยนเป็นพลาสติกบริสุทธิ์ ทำการทดลองซ้ำเดิม



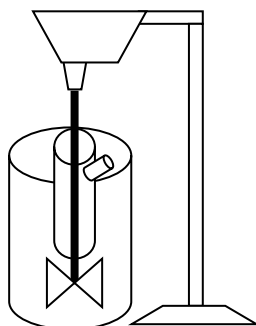
ภาพที่ 3 - 7 แผนผังสรุปการทดลองที่ 2

ตารางที่ 3 - 10 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	20 ชิ้น
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. ตัวกลาง	น้ำ
5. ชนิดของสารปรับความหนาแน่น	แคลเซียมคลอไรด์
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์	0 5 7 10 20 และ 30 %w/v
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพในการแยก	คำนวณ

### 3.4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก

การทดลองที่ 3 ทำการทดลองปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกทั้งสองชนิดด้วยสารเคลือบผิว เพื่อวิเคราะห์หาชนิด ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพและผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบฟองที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอย เงื่อนไข ในการทำให้ลอยใช้ท่ออากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.99 เซนติเมตร ความเร็วรอบในการกวน 675 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างท่อกับใบพัดกวน 1 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว 1 เซนติเมตร

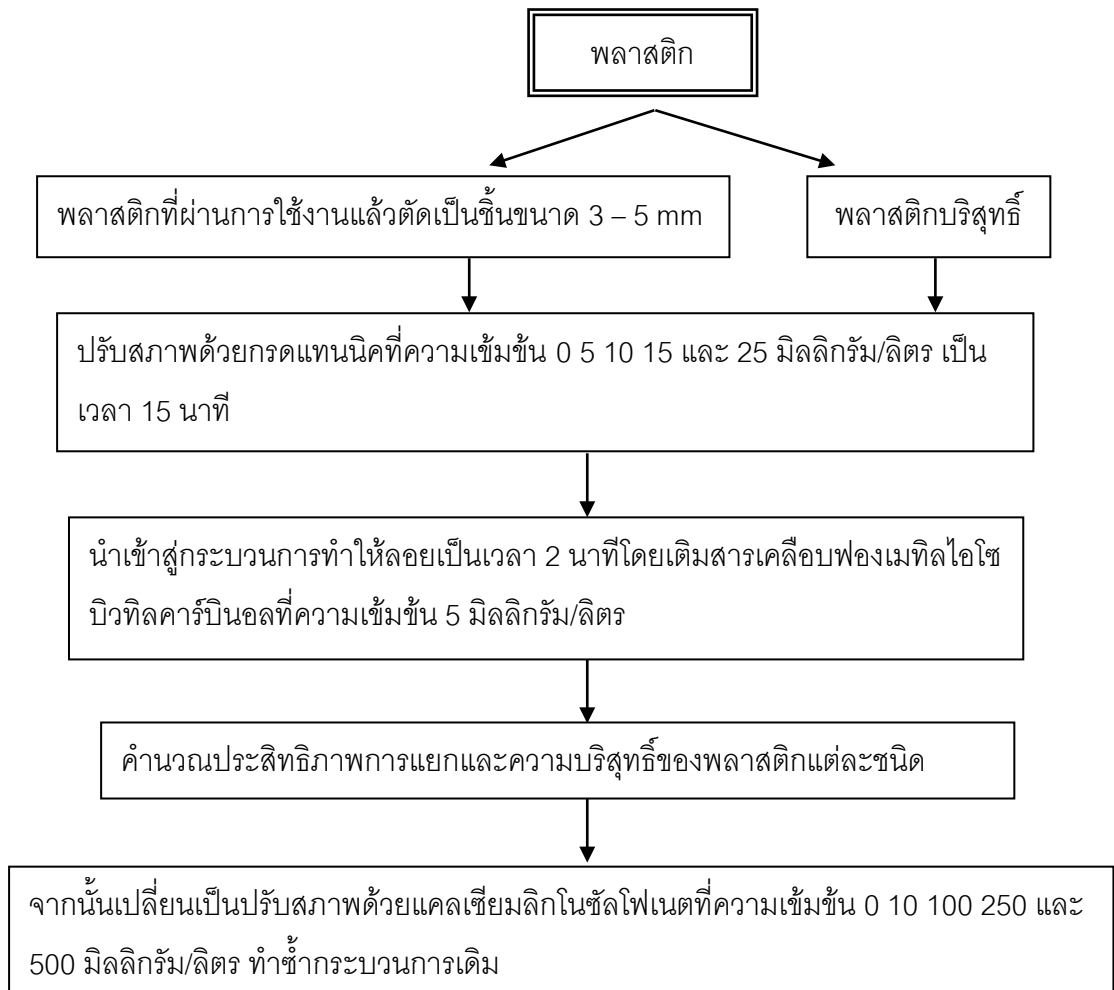


ภาพที่ 3 - 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก

การทดลองที่ 3.1 การศึกษาหาชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่เหมาะสม

นำพลาสติกทั้งส่วนที่ผ่านการใช้งานแล้วหรือพลาสติกบริสุทธิ์มาปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิว ได้แก่ กรดแทนนิกที่ความเข้มข้น 0 5 10 15 และ 25 มิลลิกรัม/ลิตร หรือแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตที่ความเข้มข้น 0 10 100 250 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก โดยในถังปฏิกริยาจะใช้ตัวกลางเป็นน้ำและเติมสารเคลือบฟองเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร





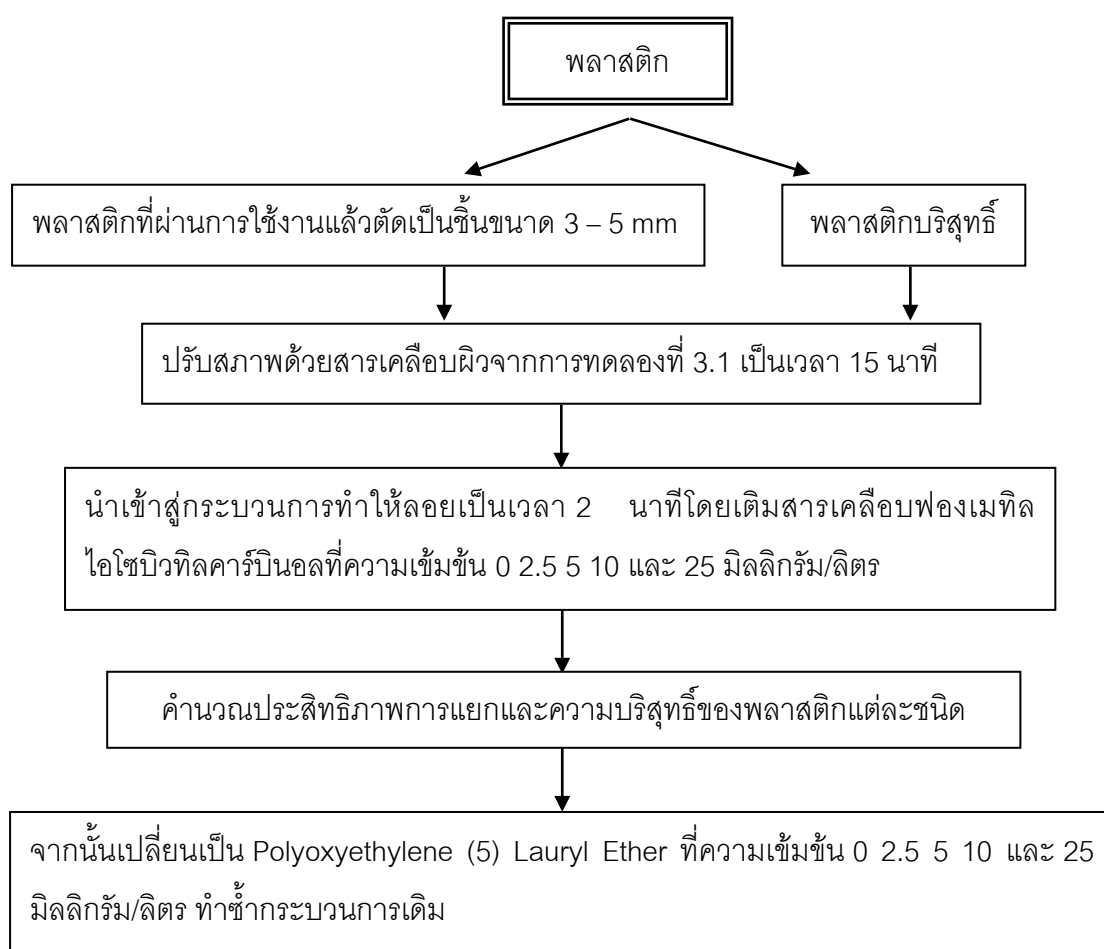
ภาพที่ 3 - 9 แผนผังสรุปการทดลองที่ 3.1

ตารางที่ 3 - 11 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.1

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	25 กรัม รวมทั้ง 2 ชนิด 50 กรัม
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. ชนิดของสารเคลือบฟอง	เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	5 มิลลิกรัม/ลิตร
6. เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ	15 นาที
7. เวลาที่ใช้ในกระบวนการทำให้ลอย	2 นาที
8. ตัวกลาง	น้ำ
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของสารเคลือบผิว	แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตและกรดแทนนิก
2. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	กรดแทนนิก; 0 5 10 15 และ 25 มิลลิกรัม/ลิตร แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต; 0 10 100 250 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการแยก	คำนวณจาก % recovery และ % grade

การทดลองที่ 3.2 การศึกษาหาชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบฟองที่เหมาะสม

นำพลาสติกทั้งส่วนที่ผ่านการใช้งานแล้วหรือพลาสติกบริสุทธิ์มาปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ได้จากการทดลองที่ 3.1 เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก โดยในถังปฏิบัติการจะใช้ตัวกลางเป็นน้ำและเติมสารเคลือบฟองเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลหรือ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ที่ความเข้มข้น 0 2.5 5 10 และ 25 มิลลิกรัม/ลิตร



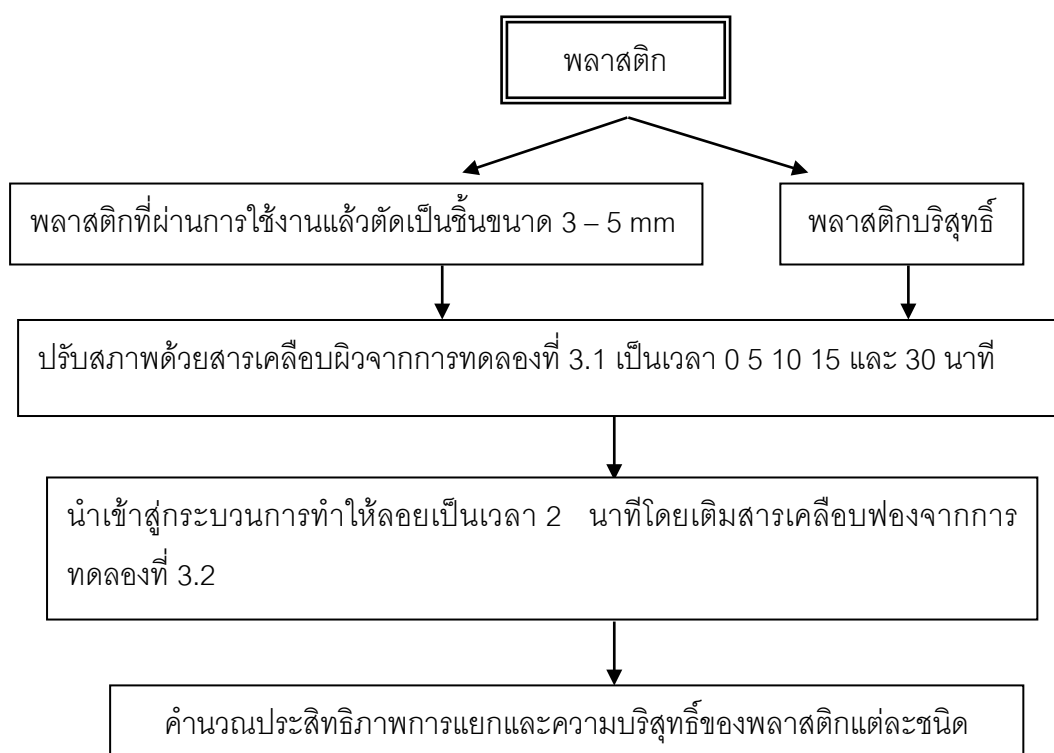
ภาพที่ 3 - 10 แผนผังสรุปการทดลองที่ 3.2

ตารางที่ 3 - 12 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.2

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	25 กรัม รวมทั้ง 2 ชนิด 50 กรัม
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. ชนิดของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
6. เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ	15 นาที
7. เวลาที่ใช้ในกระบวนการทำให้ลอย	2 นาที
8. ตัวกลาง	น้ำ
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของสารเคลือบฟอง	เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลและ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether
2. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	0 2.5 5 10 และ 25 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการแยก	คำนวณจาก % recovery และ % grade

### การทดลองที่ 3.3 การศึกษาหาเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสม

นำพลาสติกทั้งส่วนที่ผ่านการใช้งานแล้วหรือพลาสติกบริสุทธิ์มาปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ได้จากการทดลองที่ 3.1 เป็นเวลา 0 5 10 15 และ 30 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก โดยในถังปฏิบัติการจะใช้ตัวกลางเป็นน้ำและเติมสารเคลือบฟองที่ได้จากการทดลองที่ 3.2



ภาพที่ 3 - 11 แผนผังสรุปการทดลองที่ 3.3

ตารางที่ 3 - 13 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.3

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	25 กรัม รวมทั้ง 2 ชนิด 50 กรัม
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. ชนิดของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
6. ชนิดของสารเคลือบฟอง	จากการทดลองที่ 3.2
7. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	จากการทดลองที่ 3.2
8. เวลาที่ใช้ในกระบวนการทำให้ลอย	2 นาที
9. ตัวกลาง	น้ำ
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ	0 5 10 15 และ 30 นาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ประสิทธิภาพการแยก	คำนวณจาก % recovery และ % grade

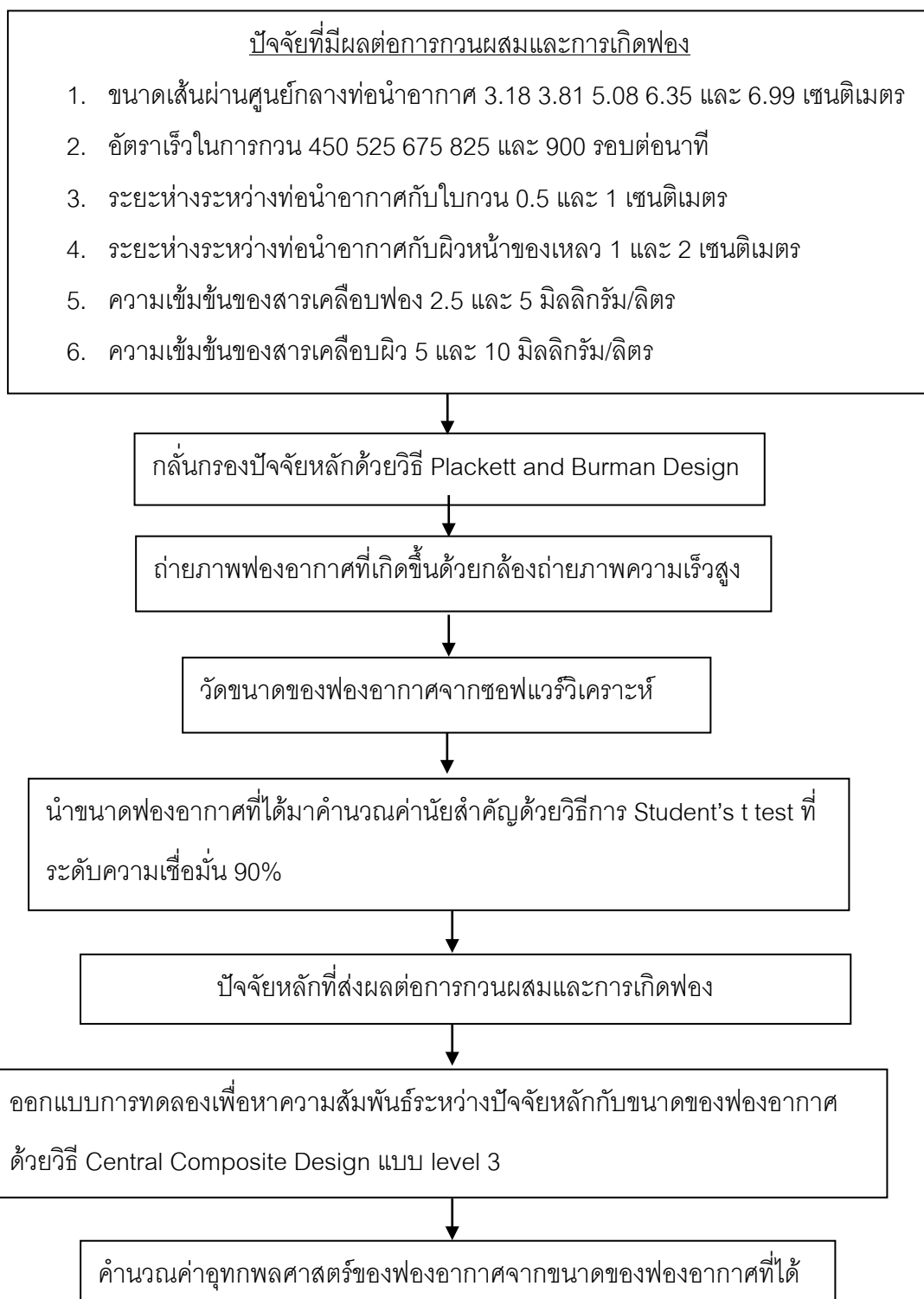
### 3.4.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกวนผสมและการเกิดฟอง

การทดลองที่ 4 ทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการกวนผสมและการเกิดฟอง โดยปัจจัยที่สนใจในการทดลองนี้ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำอากาศ อัตราเร็วในการกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับใบกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง รายละเอียดของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3-15

ตารางที่ 3 - 14 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลองที่ 4

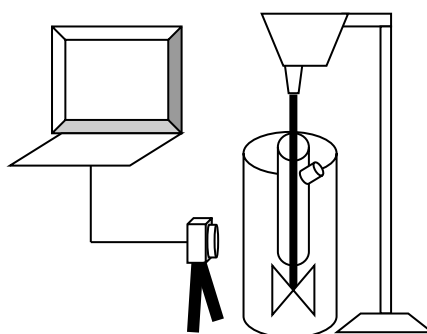
ปัจจัย	ค่าที่ใช้ในการทดลอง				
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำอากาศ (เซนติเมตร)	3.18	3.81	5.08	6.35
อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที)	450	525	675	825	900
ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับใบกวน (เซนติเมตร)	0.5		1		
ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับผิวหน้าของเหลว (เซนติเมตร)	1		2		
ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง (มิลลิกรัม/ลิตร)	2.5		5		
ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (มิลลิกรัม/ลิตร)	5		10		

ท่อนำอากาศยาว 14 เซนติเมตร ท่อแยกยาว 15 เซนติเมตรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.91 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างกันถึงปฏิกริยากับใบพัดกวนมีค่าเท่ากับ 2 เซนติเมตร จากนั้นถ่ายภาพฟองอากาศที่เกิดขึ้นด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง วัดขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ



ภาพที่ 3 - 12 แผนผังสรุปการทดลองที่ 4



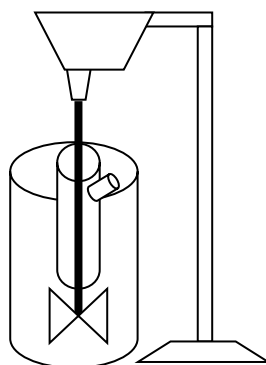


ภาพที่ 3 - 13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการกวนผสมและการเกิดฟอง  
ตารางที่ 3 - 15 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความยาวท่อ	14 เซนติเมตร
2. ความยาวท่อแยก	15 เซนติเมตร
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อแยก	1.91 เซนติเมตร
4. ระยะห่างระหว่างกันถึงปฏิกริยากับไบพัดกวน	2 เซนติเมตร
5. ตัวกลาง	น้ำ
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำอากาศ	3.18 3.81 5.08 6.35 และ 6.99 เซนติเมตร
2. อัตราเร็วในการกวน	450 525 675 825 และ 900 รอบต่อนาที
3. ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับไบกวน	0.5 และ 1 เซนติเมตร
4. ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับผิวหน้าของเหลว	1 และ 2 เซนติเมตร
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	2.5 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร
6. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ขนาดของฟองอากาศ	ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ
2. อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศ	คำนวณ

### 3.4.5 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย

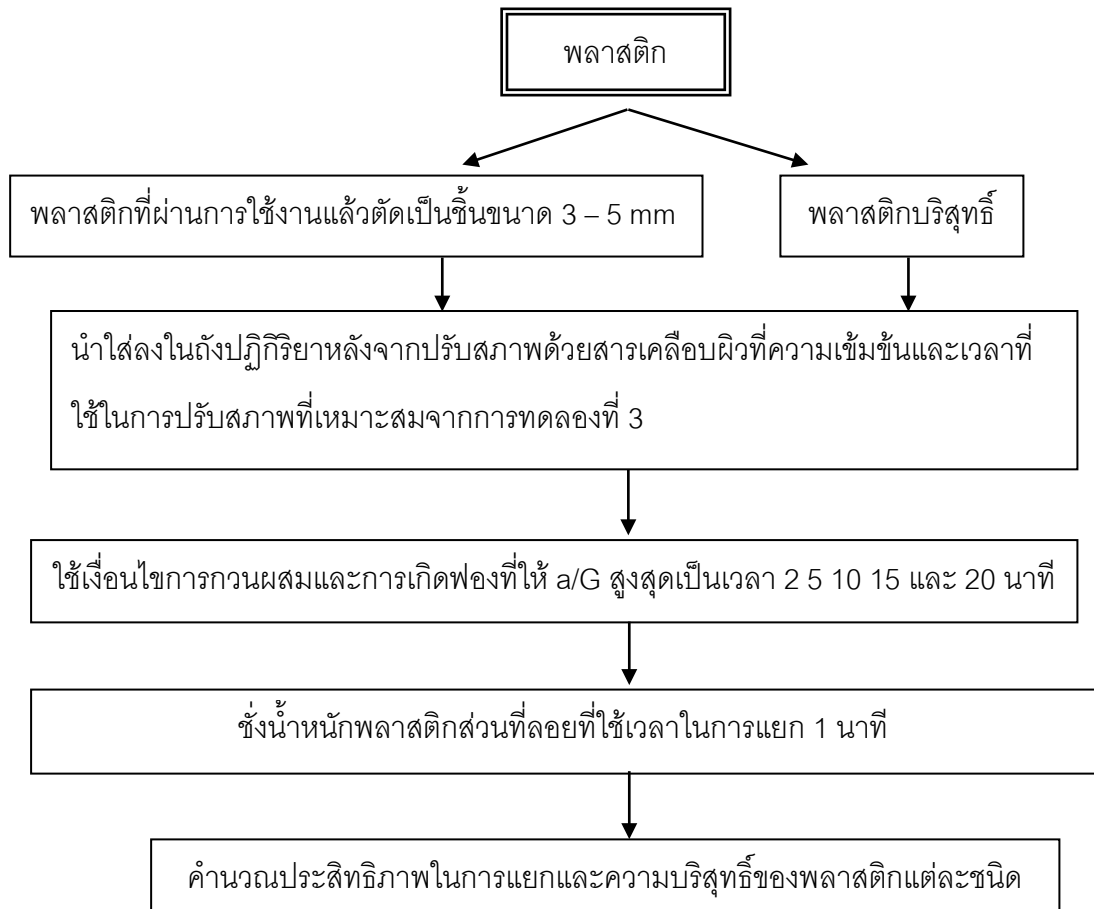
การทดลองที่ 5 ทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการทำให้ลอย ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย และอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เหมาะสม เงื่อนไขในการทำให้ลอย ใช้ ระยะห่างระหว่างท่อกับใบพัดควน 1 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว 1 เซนติเมตร



ภาพที่ 3 - 14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการแยกพลาสติกด้วยกระบวนการทำให้ลอย

#### การทดลองที่ 5.1 การศึกษาหาเวลาที่ใช้ในการทำให้ลอยที่เหมาะสม

นำพลาสติกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำกับสารเคลือบฟองจากการทดลองที่ 3 ด้วยเงื่อนไขการกวนผสมและการเกิดฟองที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์สูงสุดจากการทดลองที่ 4 ใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 5 10 15 และ 20 นาทีและใช้เวลาในการแยก 1 นาที จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกแต่ละชนิด



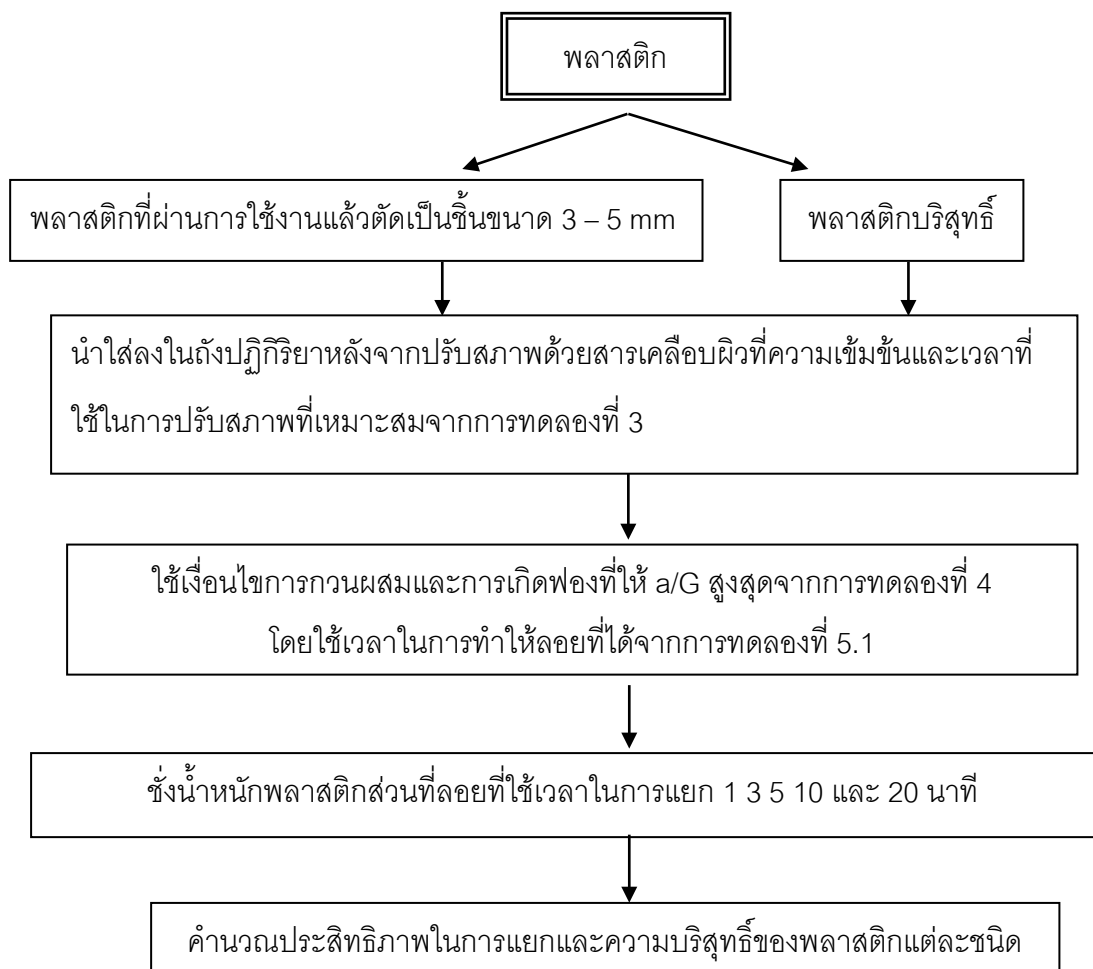
ภาพที่ 3 - 15 แผนผังสรุปการทดลองที่ 5.1

ตารางที่ 3 - 16 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.1

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	25 กรัม รวมทั้ง 2 ชนิด 50 กรัม
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์	จากการทดลองที่ 4
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
6. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	จากการทดลองที่ 3.2
7. เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ	จากการทดลองที่ 3.3
8. ตัวกลาง	น้ำ
9. เวลาที่ใช้ในการแยก	1 นาที
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. เวลาที่ใช้ในการกวน	2 5 10 15 และ 20 นาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ประสิทธิภาพในการแยก	คำนวณจาก % recovery และ % grade

การทดลองที่ 5.2 การศึกษาหาเวลาที่ใช้ในการแยกที่เหมาะสม

นำพลาสติกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำกับสารเคลือบฟองจากการทดลองที่ 3 ด้วยเงื่อนไขการกวนผสมและการเกิดฟองที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์สูงสุดจากการทดลองที่ 4 ใช้เวลาในการทำให้ลอยจากการทดลองที่ 5.1 และใช้เวลาในการแยก 1 3 5 10 และ 20 นาทีตามลำดับ จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกแต่ละชนิด



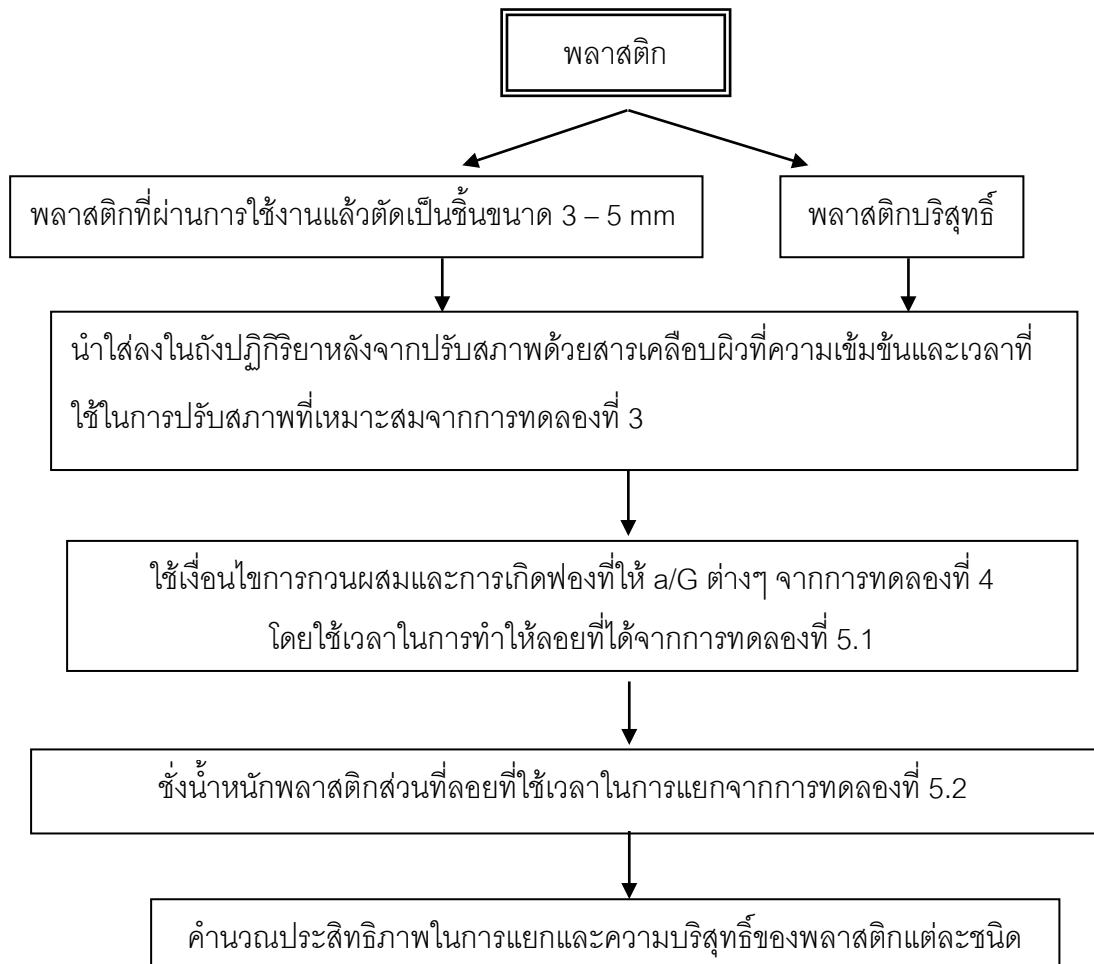
ภาพที่ 3 - 16 แผนผังสรุปการทดลองที่ 5.2

ตารางที่ 3 - 17 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.2

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	25 กรัม รวมทั้ง 2 ชนิด 50 กรัม
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์	จากการทดลองที่ 4
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
6. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	จากการทดลองที่ 3.2
7. เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ	จากการทดลองที่ 3.3
8. ตัวกลาง	น้ำ
9. เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย	จากการทดลองที่ 5.1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. เวลาที่ใช้ในการแยก	1 3 5 10 และ 20 นาที
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ประสิทธิภาพในการแยก	คำนวณจาก % recovery และ % grade

การทดลองที่ 5.3 การศึกษาผลของอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสม

นำพลาสติกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำกับสารเคลือบฟองจากการทดลองที่ 3 ด้วยเงื่อนไขการกวนผสมและการเกิดฟองที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) ต่างๆจากการทดลองที่ 4 โดยเลือกมา 3 ค่า คือ ค่าที่ให้  $a/G$  สูง ปานกลางและต่ำ ใช้เวลาในการทำให้ลอยจากการทดลองที่ 5.1 และใช้เวลาในการแยกจากการทดลองที่ 5.2 จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกแต่ละชนิด



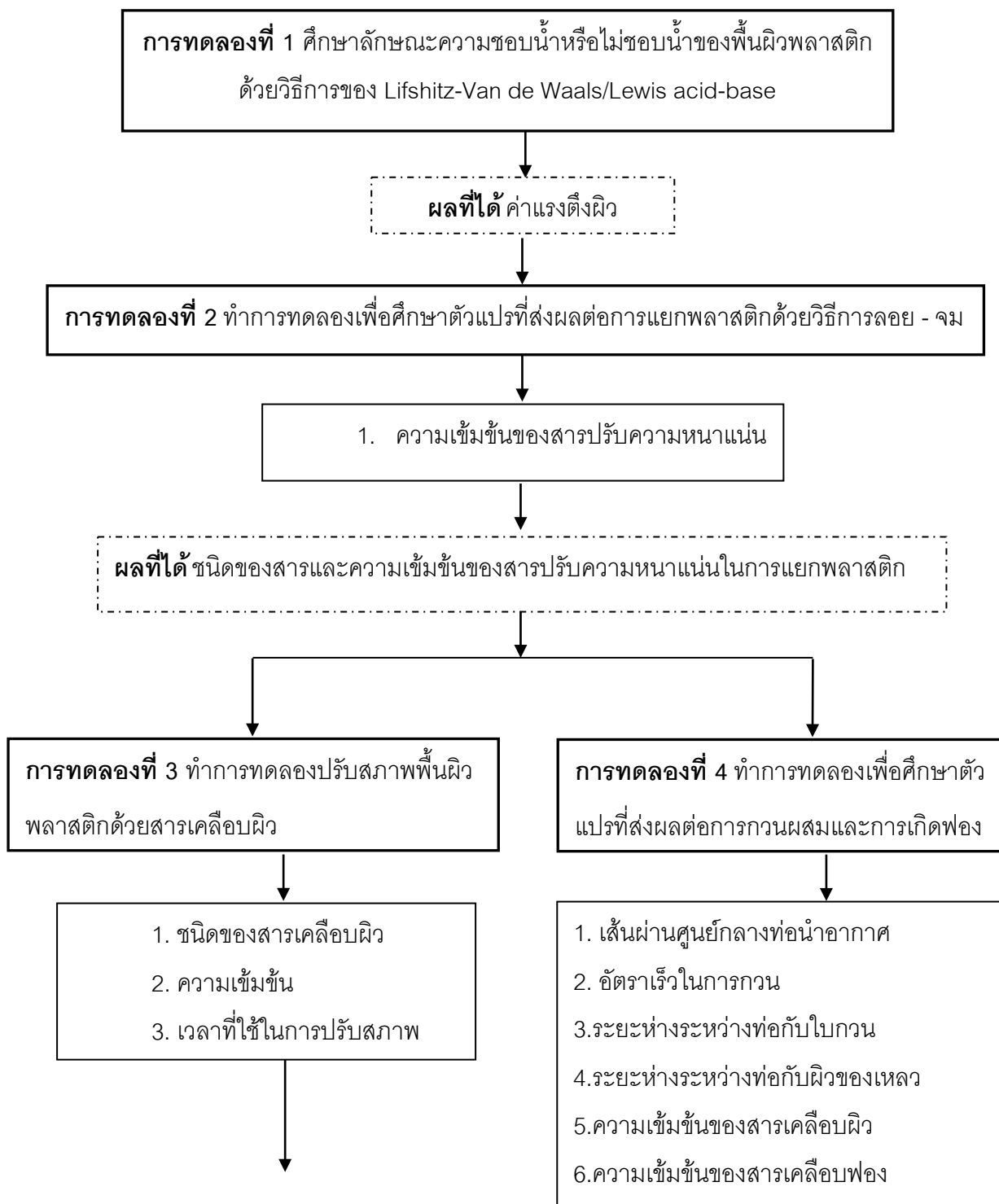
ภาพที่ 3 - 17 แผนผังสรุปการทดลองที่ 5.3

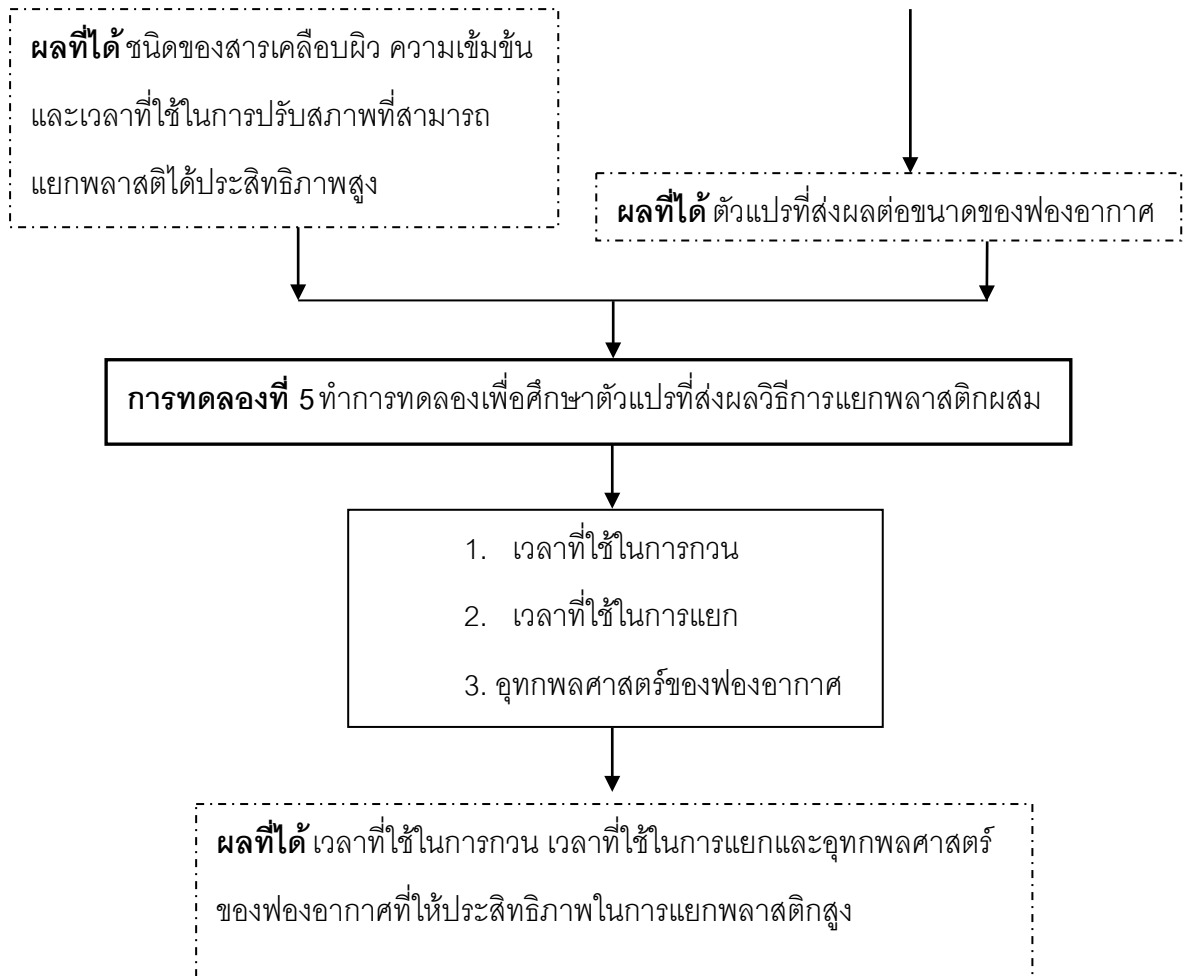
ตารางที่ 3 - 18 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 5.3

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ปริมาณพลาสติกแต่ละชนิด	25 กรัม รวมทั้ง 2 ชนิด 50 กรัม
2. ขนาดของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	3 – 5 มิลลิเมตร
3. ขนาดของพลาสติกบริสุทธิ์	3 – 5 มิลลิเมตร
4. ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว	จากการทดลองที่ 3.1
5. ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง	จากการทดลองที่ 3.2
6. เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ	จากการทดลองที่ 3.3
7. ตัวกลาง	น้ำ
8. เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย	จากการทดลองที่ 5.1
9. เวลาที่ใช้ในการแยก	จากการทดลองที่ 5.2
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์	สูง ปานกลางและต่ำ
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ประสิทธิภาพในการแยก	คำนวณจาก % recovery และ % grade



### 3.5 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงาน





## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้จะนำเสนอผลการศึกษาคีษการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว จากการใช้ไบกเวนดิงอากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปในน้ำเพื่อให้เกิดฟอง โดยเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกซึ่งในพลาสติกที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พลาสติกพีเอสและเอบีเอสทั้งแบบพลาสติกบริสุทธิ์และที่ผ่านการใช้งานแล้ว คีษการแยกพลาสติกด้วยวิธีการลอย – จมซึ่งอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของพลาสติก คีษการสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกทั้งในส่วนนของสารเคลือบผิว เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพและสารเคลือบฟอง สภาวะที่เหมาะสมในการกวนผสมและการเกิดฟอง โดยจะศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการนี้ อธิบายในรูปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) จากนั้นจะศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย ถ้าเราเข้าใจในส่วนนี้จะทำให้ออกแบบ ควบคุมหรือนำไปประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติได้อย่างเหมาะสม

#### 4.1 สมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติก

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาลักษณะสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติก 2 ชนิด ได้แก่ พีเอส (PS) และเอบีเอส (ABS) โดยอธิบายในรูปของค่าพลังงานพื้นผิว ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการของ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติก

##### 4.1.1 ค่าพลังงานอิสระพื้นผิวของพลาสติกและสารเคลือบผิว

ในการหาค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติกหรือแรงตึงผิว จะใช้วิธีการของ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base โดยทำการวัดค่ามุมสัมผัสของแข็งกับของเหลวที่ใช้ทดสอบที่รู้ค่าพลังงานพื้นผิว 5 ชนิด ของเหลวที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ น้ำกลั่น (Secondary distilled water: W) กลีเซอรอล (Glycerol: G) ฟอรัมาไมด์ (Formamide: F) ไดไอโอดิเมเทน (Diiodomethane: D)

เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol: E) ซึ่งค่าพลังงานพื้นผิวย่อยของของเหลวที่ใช้ทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4 - 1 ค่าพลังงานพื้นผิวของของเหลวที่ใช้ทดสอบ (Wang และคณะ, 2012)

ของเหลวที่ใช้ทดสอบ	$\gamma_L$	$\gamma_L^{LW}$	$\gamma_L^+$	$\gamma_L^-$
น้ำกลั่น	72.8	21.8	25.5	25.5
กลีเซอรอล	64.0	34.0	3.92	57.4
ฟอร์มาไมด์	58.0	39.0	2.28	39.6
ไดโอโดมีเทน	50.8	50.8	0	0
เอทิลีนไกลคอล	48.0	29.0	1.92	47.0

สำหรับของเหลวทั้ง 5 ชนิดสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มมีขั้ว ได้แก่ น้ำกลั่น กลีเซอรอล ฟอร์มาไมด์และเอทิลีนไกลคอล และกลุ่มที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ ไดโอโดมีเทน ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้น้ำกลั่น-กลีเซอรอล-ไดโอโดมีเทน (WGD) น้ำกลั่น-ฟอร์มาไมด์-ไดโอโดมีเทน (WFD) และน้ำกลั่น-เอทิลีนไกลคอล-ไดโอโดมีเทน (WED) ในการคำนวณเพื่อความแม่นยำของค่าพลังงานพื้นผิวที่ได้ (Wang และคณะ, 2012)

สำหรับค่าพลังงานพื้นผิวอิสระสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-1) และ (4-2)

$$\gamma_s = \gamma_s^{LW} + \gamma_s^{AB} \quad (4-1)$$

$$\gamma_L^{LW} + 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} (1 + \cos\theta) = 2 \left( \sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_L^+} \right) \quad (4-2)$$

ซึ่ง  $\gamma_s^{LW}$  หรือค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของแวนเดอวาลส์สามารถหาได้จากการวัดมุมสัมผัสด้วยของเหลวไม่มีขั้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ คือ ไดโอโดมีเทน ดังสมการที่ (4-3)

$$\gamma_s^{LW} = \left( \frac{(1 + \cos\theta) \sqrt{\gamma_L^{LW}}}{2} \right)^2 \quad (4-3)$$

ส่วนค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของลิวอิส กรด-เบสหรือ  $\gamma_s^{AB}$  สามารถหาได้จากสมการที่ (4-4)

$$\gamma_s^{AB} = \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} \quad (4-4)$$

ซึ่งค่า  $\gamma_S^+$ ,  $\gamma_S^-$  สามารถคำนวณได้จากการวัดมุมสัมผัสด้วยของเหลวที่มีหัว 2 ชนิด มีสมการเมทริกซ์ดังสมการที่ (4-5)

$$\begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_S^+} \\ \sqrt{\gamma_S^-} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_{p1}^-} & \sqrt{\gamma_{p1}^+} \\ \sqrt{\gamma_{p2}^-} & \sqrt{\gamma_{p2}^+} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (1 + \cos\theta_{p1})\gamma_{p1} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_{p1}^{LW}} \\ (1 + \cos\theta_{p2})\gamma_{p2} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_{p2}^{LW}} \end{pmatrix} \quad (4-5)$$

โดย  $\theta$  คือ มุมสัมผัส  
 $\gamma_S^{LW}, \gamma_S^+, \gamma_S^-$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวย่อยของของแข็ง  
 $\gamma_L^{LW}, \gamma_L^+, \gamma_L^-$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวย่อยของของเหลว

ซึ่งค่ามุมสัมผัสของพลาสติกและสารเคลือบผิวที่วัดจากของเหลว 5 ชนิด สามารถแสดงดังตารางที่ 4-2 และหลังจากนั้นนำผลจากตารางที่ 4-2 มาคำนวณค่าพลังงานอิสระพื้นผิวได้ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4 - 2 ค่ามุมสัมผัสของพลาสติกและสารเคลือบผิว

พื้นผิว	น้ำ	กลีเซอรอล	ฟอร์มาไมด์	ไดโอดีมีเทน	เอทิลีนไกลคอล
	(W)	(G)	(F)	(D)	(E)
พีเอส (PS)	76.43	64.91	51.84	30.11	46.99
เอบีเอส (ABS)	57.79	47.86	37.70	23.44	33.12
กรดแทนนิก (TA)*	12.66	38.23	25.73	40.74	Spreading
แคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต (LS)*	37.62	51.73	42.61	50.07	30.44

\* Wang และคณะ (2012)

ตารางที่ 4 - 3 ค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติกและสารเคลือบผิว (มิลลิจูล/ตารางเมตร)

พื้นผิว	$\gamma_S$	$\gamma_S^{LW}$				$\gamma_S^+$				$\gamma_S^-$			
		WGD	WFD	WED	Ave.	WGD	WFD	WED	Ave.	WGD	WFD	WED	Ave.
PS	44.75	44.18	44.18	44.18	44.18	0.06	0.07	0.02	0.05	6.31	6.21	6.84	6.45
ABS	48.92	46.69	56.69	46.69	46.69	0.58	0.20	0.02	0.27	15.78	18.38	21.12	18.43
TA	49.88	39.24	39.24	-	39.24	0.48	0.46	-	0.47	60.15	60.37	-	60.26
LS	41.38	34.24	34.24	34.24	34.24	0.26	0.27	0.26	0.26	49.01	48.88	49.00	48.96

ในงานวิจัยนี้พลาสติกที่นำมาหาค่าพลังงานพื้นผิวด้วยวิธีการ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base นั้นจะเป็นส่วนของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เนื่องจากพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นเม็ดพลาสติกบริสุทธิ์ จึงไม่สามารถวัดมุมสัมผัสได้ จากตารางที่ 4-3 เมื่อพิจารณาค่าพลังงานพื้นผิว ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของของแข็งนั้นในสารละลายตัวกลางหนึ่งๆ ผิวหน้าของของแข็งนั้นจะเปียกน้ำหรือชอบน้ำได้ก็ต่อเมื่อค่าพลังงานพื้นผิวนั้นใกล้เคียงหรือสูงกว่าค่าพลังงานพื้นผิวของสารละลายตัวกลาง จะเห็นว่า

- เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานพื้นผิวของพลาสติกด้วยกัน ค่าพลังงานพื้นผิวของเอปีเอส (48.92 มิลลิจูล/ตารางเมตร) มีค่ามากกว่าค่าพลังงานพื้นผิวของพีเอส (44.75 มิลลิจูล/ตารางเมตร) ทั้งในส่วนของกรด โดยพีเอสและเอปีเอสมีค่าเท่ากับ 0.05 และ 0.27 มิลลิจูล/ตารางเมตรตามลำดับ และในส่วนของเบส โดยพีเอสและเอปีเอสมีค่าเท่ากับ 6.45 และ 18.43 มิลลิจูล/ตารางเมตร แสดงว่าเอปีเอสมีความเป็นขั้วมากกว่าพีเอสจึงมีความชอบน้ำมากกว่า แนวน้ำมันที่ฟองอากาศจะไปเกาะติดบนพื้นผิวของเอปีเอสก็น้อยกว่า ทำให้แนวน้ำมันที่เอปีเอสจะลอยจึงต่ำกว่าพีเอส

- เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานพื้นผิวระหว่างพื้นผิวพลาสติกทั้งสองชนิดกับสารเคลือบผิว จะเห็นว่ากรดแทนนิกมีค่าพลังงานพื้นผิวมากกว่าพื้นผิวพลาสติกทั้งสองชนิด โดยค่าพลังงานพื้นผิวเอปีเอสมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานพื้นผิวของกรดแทนนิกมากกว่าค่าพลังงานพื้นผิวพีเอส ทำให้พื้นผิวเอปีเอสมีความชอบกรดแทนนิกมากกว่า ตรงข้ามกับแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต ซึ่งมีค่าพลังงานพื้นผิวต่ำกว่าพื้นผิวพลาสติกทั้งสองชนิด แต่ที่พื้นผิวเอปีเอสมีค่าพลังงานพื้นผิวมากกว่าแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตมากกว่าพื้นผิวพีเอส พื้นผิวเอปีเอสจึงมีความชอบแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตมากกว่าพีเอสด้วย

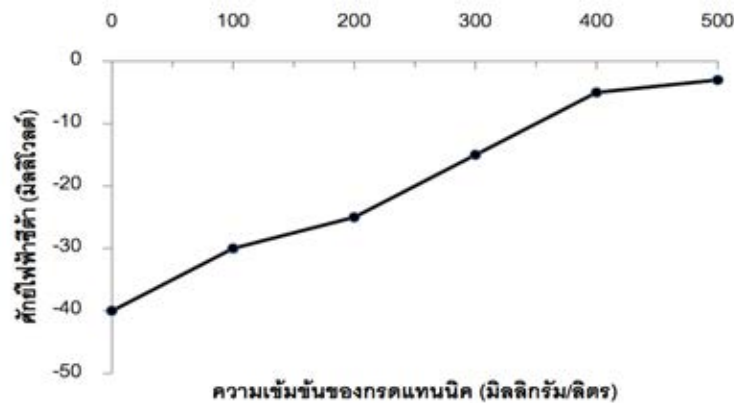
- เมื่อพิจารณาค่าพลังงานพื้นผิวในส่วนของสารเคลือบผิว จะเห็นว่าทั้งกรดแทนนิกและแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตมีค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของ Lewis acid - base ( $\gamma_S^+$  และ  $\gamma_S^-$ ) ไม่เท่ากับ 0 แสดงว่า กรดแทนนิกและแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตมีความเป็นขั้ว สามารถละลายน้ำได้ และค่าพลังงานพื้นผิวของกรดแทนนิกก็ยังมีค่ามากกว่าแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต นั้นหมายความว่าถ้าเปรียบเทียบความชอบน้ำ กรดแทนนิกจะมีความชอบน้ำมากกว่าแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต ทำให้ละลายในน้ำได้ดีกว่า การเข้าไปเคลือบพื้นผิวพลาสติกจึงน่าจะดีกว่า นอกจากนี้สารเคลือบผิวทั้งสองเป็นสารเคลือบผิวชนิดโมเลกุลใหญ่ (Macromolecule wetting agent) ส่วนที่ไม่มีขั้วจะถูกล้อมรอบด้วยส่วนที่มีขั้ว (Wang และคณะ, 2011) ซึ่งในกระบวนการทำ

ให้ลอยจะอาศัยสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกที่แตกต่างกัน และเนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่มีค่าพลังงานพื้นผิวดำ โดยมีค่าประมาณ 40 – 50 มิลลิจูล/ตารางเมตร จึงยึดติดกับฟองอากาศได้ง่าย ดังนั้นสารเคลือบผิวจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อปรับสภาพให้พื้นผิวพลาสติกชนิดใดชนิดหนึ่งมีความชอบน้ำ ไม่เกาะติดกับฟองอากาศ

จากผลที่ได้แสดงว่าการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสและเอบีเอส เนื่องจากเอบีเอสมีความชอบน้ำมากกว่าจึงน่าจะอยู่ในส่วนจม ในขณะที่พีเอสซึ่งมีความชอบน้ำน้อยกว่าน่าจะอยู่ในส่วนลอย และเมื่อทำการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิว กรดแทนนิกน่าจะให้ประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกดีกว่าแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต ดังนั้นเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ขั้นตอนต่อไป จะทำการทดลองในการแยกพลาสติกจริง

#### 4.1.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta potential)

ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกผสม เพราะถ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าในพีเอสหนึ่งๆได้ในช่วง -30 ถึง 30 มิลลิโวลต์ซึ่งเป็นช่วงไม่เสถียร (นริศรา จิรตระกูลชัย, 2549) พลาสติกจะมีความเป็นขั้วน้อยและมีแนวโน้มในการเกาะกลุ่มกัน การรวมกลุ่มของพลาสติกนี้จะทำให้พลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าจมได้ เพราะถูกพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาล้อมรอบ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกลดลง ในงานวิจัยนี้ความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่ใช้มีค่าระหว่าง 0 – 25 มิลลิกรัม/ลิตร พีเอสเท่ากับ 7 จาก Wang และคณะ (2012) พบว่าความเข้มข้นของกรดแทนนิกในช่วงนี้จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าระหว่างเอบีเอสกับกรดแทนนิกอยู่ในช่วง -40 ถึง -35 มิลลิโวลต์ ซึ่งอยู่ในช่วงเสถียร ทำให้แนวโน้มการเกาะกลุ่มกันของพลาสติกลดลง นอกจากนี้ผลยังแสดงว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเคลือบผิว ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าจะมีค่ามากขึ้นหรือติดลบน้อยลง หมายความว่ายิ่งเพิ่มความเข้มข้นของสารเคลือบผิวจะทำให้โอกาสที่พลาสติกจะรวมกลุ่มกันมีมากขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกจะลดลง เนื่องจากพลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าอาจถูกพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาล้อมรอบทำให้จมได้ (นริศรา จิรตระกูลชัย, 2549)



ภาพที่ 4 - 1 ศักย์ไฟฟ้าซีต้าของเอปี้เอสทีพีเอส 7 ณ ความเข้มข้นของกรดแทนนินต่างๆ

#### 4.1.3 ปฏิกริยาของค่าพลังงานอิสระพื้นผิว (Interaction interfacial free energy)

จากทฤษฎี DLVO ปฏิกริยาของค่าพลังงานอิสระระหว่างพื้นผิวของแข็งหรือสารเคลือบผิว (องค์ประกอบ 1) และน้ำ (องค์ประกอบ W) ( $\Delta G_{1W}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-6) ดังนี้

$$\Delta G_{1W} = \Delta G_{1W}^{LW} + \Delta G_{1W}^{AB} = -2 \left( \sqrt{\gamma_1^{LW} \gamma_W^{LW}} + \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_W^-} + \sqrt{\gamma_1^- \gamma_W^+} \right) \quad (4-6)$$

และปฏิกริยาของค่าพลังงานอิสระระหว่างพื้นผิวของแข็ง สารเคลือบผิว และน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-7) ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta G_{1W2} = \Delta G_{1W2}^{LW} + \Delta G_{1W2}^{AB} = & 2 \left( \sqrt{\gamma_1^{LW}} - \sqrt{\gamma_W^{LW}} \right) \left( \sqrt{\gamma_W^{LW}} - \sqrt{\gamma_2^{LW}} \right) \\ & + 2 \left( \sqrt{\gamma_W^+} (\sqrt{\gamma_1^-} + \sqrt{\gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_W^-}) \right. \\ & \left. + \sqrt{\gamma_W^-} (\sqrt{\gamma_1^+} + \sqrt{\gamma_2^+} - \sqrt{\gamma_W^+}) - \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+} \right) \quad (4-7) \end{aligned}$$

ซึ่งค่าปฏิกริยาของค่าพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติกหรือสารเคลือบผิวกับน้ำและค่าปฏิกริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติก น้ำและสารเคลือบผิวที่คำนวณได้ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-4 และ 4-5



ตารางที่ 4 - 4 ค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติกหรือสารเคลือบผิวกับน้ำ

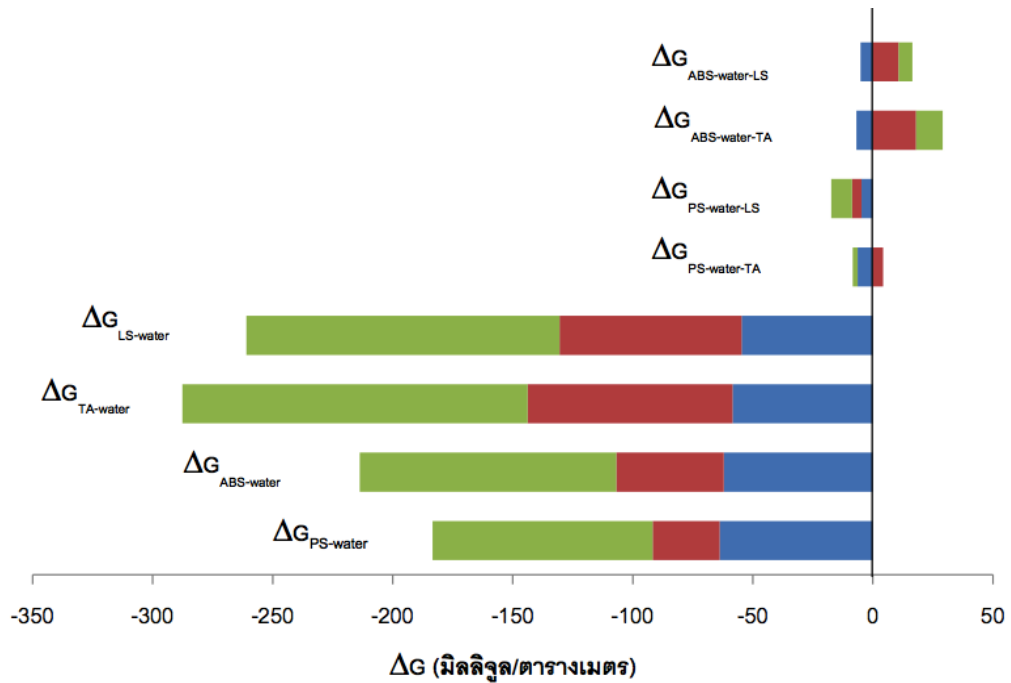
พื้นผิว	$\Delta G_{1W}^{LW}$	$\Delta G_{1W}^{AB}$	$\Delta G_{1W}$
พีเอส	-63.81	-27.91	-91.72
เอบีเอส	-62.07	-44.79	-106.86
กรดแทนนิก	-58.50	-85.32	-143.82
แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต	-54.64	-75.82	-130.46

ตารางที่ 4 - 5 ค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติก น้ำและสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิว	พีเอส			เอบีเอส		
	$\Delta G_{1W2}^{LW}$	$\Delta G_{1W2}^{AB}$	$\Delta G_{1W2}$	$\Delta G_{1W2}^{LW}$	$\Delta G_{1W2}^{AB}$	$\Delta G_{1W2}$
กรดแทนนิก	-6.31	4.27	-2.04	-6.90	17.98	11.08
แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต	-4.68	-3.99	-8.67	-5.12	10.77	5.65

ค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิว จะบ่งบอกถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าเกิดได้มากหรือน้อยเพียงใด ยิ่งติดลบมาก ปฏิกิริยานั้นจะเกิดได้มาก สำหรับค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวในส่วนของ Lifshitz-Van de Waals จะแสดงถึงค่าแรงดึงดูดแบบ hydrophobic ซึ่งถ้ามีค่าติดลบมากจะช่วยให้สารนั้นเข้าใกล้พื้นผิวพลาสติกมากขึ้น ส่วนค่าปฏิกิริยาพลังงานพื้นผิวอิสระในส่วนของ Lewis acid – base จะแสดงถึงความเป็นขั้วและการดูดซับของสารบนพื้นผิว โดยยังมีค่าติดลบมาก พื้นผิวนั้นจะดูดซับสารได้มากขึ้น จากตารางที่ 4-4 จะเห็นว่าค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างของเอบีเอสกับน้ำมีค่าติดลบมากกว่าพีเอส ถึงแม้ว่าในส่วนของ Lifshitz-Van de Waals จะติดลบน้อยกว่า แต่ในส่วนของ Lewis acid-base ติดลบมากกว่า ทำให้ค่าปฏิกิริยาพลังงานอิสระพื้นผิวโดยรวมของเอบีเอสติดลบมากกว่าพีเอส ดังนั้นน้ำจึงมาอยู่ที่ผิวหน้าของเอบีเอสมากกว่าพีเอส รวมถึงทำให้เกิดชั้นน้ำ (Hydration shell) ขึ้น โดยที่ชั้นน้ำที่ผิวของเอบีเอสมีความหนาที่มากกว่าของพีเอส (ภาพที่ 4-3)

สำหรับพลาสติกพีเอสและเอบีเอสกับสารเคลือบผิวในตัวกลางที่เป็นน้ำ สามารถเปรียบเทียบปฏิกิริยาพลังงานอิสระพื้นผิวได้ดังภาพที่ 4-2



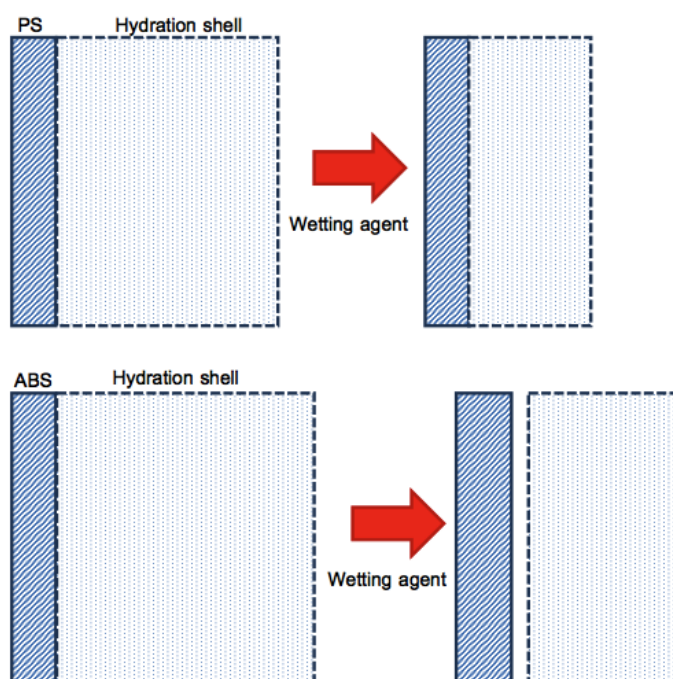
ภาพที่ 4 - 2 เปรียบเทียบปฏิกิริยาพลังงานอิสระพื้นผิวของพลาสติกและสารเคลือบผิว

จากภาพที่ 4-2 พบว่า

- ค่าปฏิกิริยาพื้นผิวระหว่างเอบีเอสกับน้ำมีค่าติดลบมากกว่าค่าปฏิกิริยาพื้นผิวระหว่างพีเอสกับน้ำ ( $\Delta G_{ABS-W} < \Delta G_{PS-W}$ ) ทำให้พื้นผิวเอบีเอสมีความชอบน้ำมากกว่า ชั้นน้ำจึงหนากว่าพีเอส
- ค่าปฏิกิริยาพื้นผิวระหว่างสารเคลือบผิวทั้งสองชนิดกับน้ำ ( $\Delta G_{TA-W}, \Delta G_{LS-W}$ ) มีค่าติดลบ ดังนั้นสารเคลือบผิวทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นขั้วและสามารถละลายน้ำได้
- เมื่อพิจารณาค่าปฏิกิริยาพื้นผิวระหว่างพีเอส น้ำและสารเคลือบผิว ( $\Delta G_{PS-W-TA}, \Delta G_{PS-W-LS}$ ) พบว่ามีค่าปฏิกิริยาในส่วนของ Lifshitz-Van de Waals ติดลบน้อยลง ทำให้ชั้นน้ำที่อยู่บนผิวของพีเอสบางลง ฟองอากาศจะไปเกาะติดกับผิวพลาสติกได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าปฏิกิริยาในส่วนของ Lewis acid-base กรดแทนนินมีค่าเป็นบวก ส่วนแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตยังคงมีค่าติดลบ หมายความว่าเมื่อเติมกรดแทนนิน กรดแทนนินจะทำให้เกิดแรงผลักระหว่างน้ำกับพีเอส ในขณะที่แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตยังคงมีแรงดึงดูดระหว่างน้ำกับพีเอสอยู่
- เมื่อพิจารณาค่าปฏิกิริยาพื้นผิวระหว่างเอบีเอส น้ำและสารเคลือบผิว ( $\Delta G_{ABS-W-TA}, \Delta G_{ABS-W-LS}$ ) พบว่ามีค่าปฏิกิริยาในส่วนของ Lifshitz-Van de Waals ติดลบ

น้อยลง ทำให้ชั้นน้ำที่อยู่บนผิวของเอบีเอส บางลง แต่ยังคงหนากว่าพีเอส และเมื่อพิจารณาค่าปฏิกิริยาในส่วนของ Lewis acid-base ของสารเคลือบผิวทั้งสองมีค่าเป็นบวกทั้งคู่ หมายความว่าเมื่อเติมสารเคลือบผิวทั้งสอง จะเกิดแรงผลักระหว่างน้ำกับเอบีเอส ซึ่งอาจส่งผลทำให้สารเคลือบผิวมีโอกาสมาเคลือบผิวเอบีเอสได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีพีเอส (ดังภาพที่ 4-3)

ดังนั้นกลไกการดูดซับของสารเคลือบผิวบนพื้นผิวพลาสติก คือ สารเคลือบผิวจะอาศัยแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ในการเข้าใกล้พื้นผิวพลาสติก จากนั้นสารเคลือบผิวจะถูกดูดซึมเข้าไปในชั้นน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน (Wang และคณะ, 2013)



ภาพที่ 4 - 3 แบบจำลองการดูดซับด้วยชั้นน้ำของกรดแทนนิกบนพื้นผิวพลาสติก

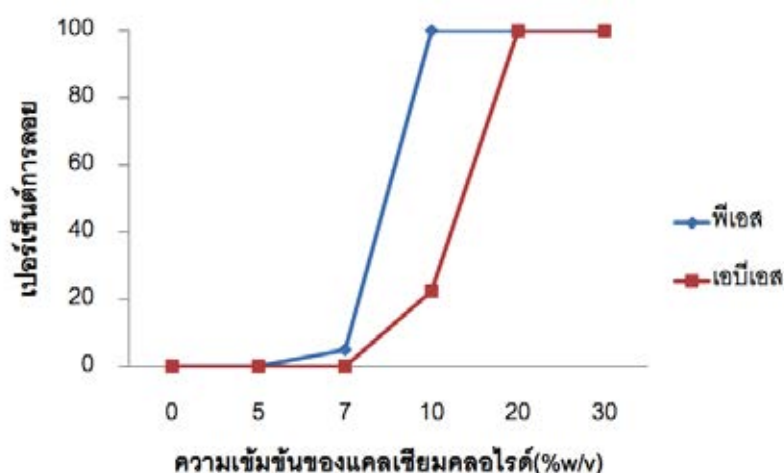
#### 4. 2 ผลการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย – จม

ในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย – จม ทั้งพลาสติกบริสุทธิ์ และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว การศึกษาทำได้โดยตัดพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วทั้งพีเอสและเอบีเอสให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 3 – 5 มิลลิเมตร ชนิดละ 20 ชิ้น ใสลงในถังปฏิกิริยาซึ่งมีตัวกลางเป็นน้ำ เติมแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0 5 7 10 20 และ 30

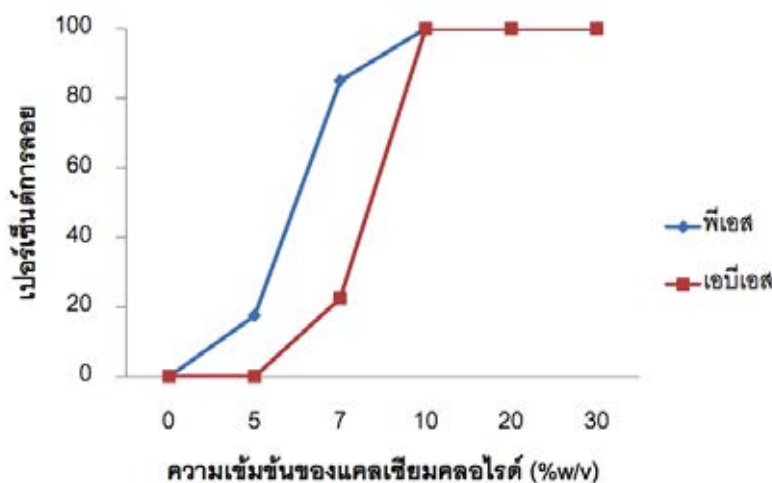
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v) เก็บพลาสติกที่แยกมาล้างด้วยน้ำเปล่า คำนวณหาประสิทธิภาพการแยก จากนั้นเปลี่ยนเป็นพลาสติกบริสุทธิ์ ทำการทดลองซ้ำเดิม ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังนี้

#### 4.2.1 เปอร์เซนต์การลอยของพลาสติก

การแยกด้วยวิธีการลอย – จม เป็นการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างพลาสติกทั้ง 2 ชนิดกับสารละลายตัวกลาง ถ้าพลาสติกมีความหนาแน่นมากกว่าสารละลายตัวกลางจะลอยขึ้นสู่ผิวด้านบน แต่ถ้าพลาสติกมีความหนาแน่นน้อยกว่าสารละลายตัวกลางจะจมลงสู่ผิวด้านล่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้พลาสติกที่ใช้มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.01 – 1.07 กรัม/ลบ.ซม. การใช้น้ำซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1 กรัม/ลบ.ซม. จึงไม่สามารถแยกได้ ดังนั้นตัวกลางจึงต้องมีการปรับความหนาแน่นให้มีค่าระหว่างความหนาแน่นของพลาสติกทั้ง 2 ชนิด โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารปรับความหนาแน่น จากผลการทดลองซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-4 และ 4-5 พบว่าพลาสติกพีเอสและเอบีเอสทั้งแบบบริสุทธิ์และที่เป็นขยะพลาสติกเมื่อแยกด้วยวิธีการลอย – จม ประสิทธิภาพในการแยกต่ำ เนื่องจากพลาสติกทั้งสองชนิดนั้นมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก โดยพลาสติกบริสุทธิ์ชนิดพีเอสและเอบีเอสมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.038 และ 1.071 กรัม/ลบ.ซม.ตามลำดับ ส่วนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วชนิดพีเอสและเอบีเอสมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.010 และ 1.021 กรัม/ลบ.ซม.ตามลำดับ ดังนั้นขั้นตอนต่อไปจึงเลือกใช้กระบวนการทำให้ลอยในการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอส



ภาพที่ 4 - 4 เปอร์เซนต์การลอยของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่างๆกัน



ภาพที่ 4 - 5 เปอร์เซ็นต์การล่อยของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่างๆกัน

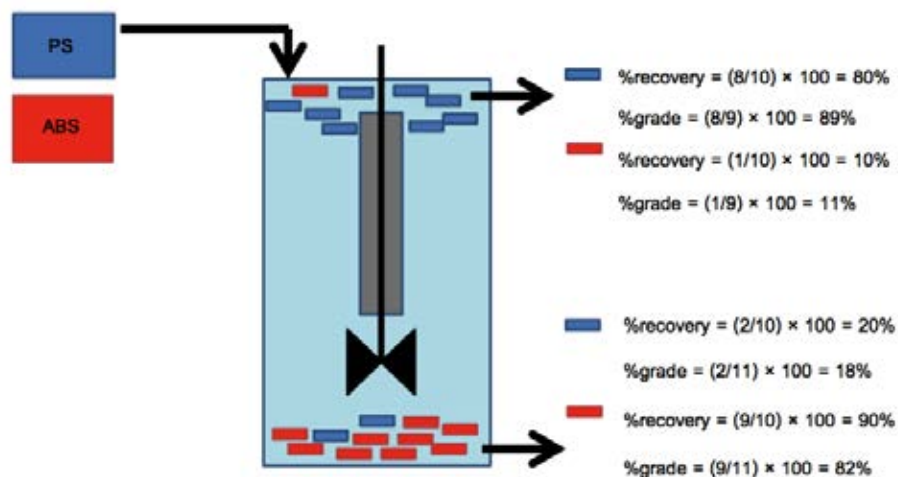
#### 4.3 ผลการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก

ในส่วนนี้ เป็นการทดลองเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก เนื่องจากวิธีการล่อย – จมยากต่อการแยกพลาสติกที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน โดยทำการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกทั้งสองชนิดด้วยสารเคลือบผิวเพื่อวิเคราะห์หาชนิด ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพและผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบผิวที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ล่อย เงื่อนไขในการทำให้ล่อยใช้ท่อนำอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.75 นิ้ว ความเร็วรอบในการกววน 675 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างท่อกับใบพัดกววน 1 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว 1 เซนติเมตร

##### 4.3.1 ชนิดของสารเคลือบผิว

เลือกใช้สารเคลือบผิว 2 ชนิด คือ กรดแทนนิก (Tannic acid) ที่ความเข้มข้น 0 5 10 15 และ 25 มิลลิกรัม/ลิตร และแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต (Calcium lignosulfonate) ที่ความเข้มข้น 0 10 100 250 และ 500 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 15 นาที ที่เลือกใช้สารเคลือบผิวสองชนิดนี้ในงานวิจัยเพราะว่าทั้งสองเป็นสารเคลือบชนิดโมเลกุลใหญ่ (Macromolecule wetting agent) ชั้นน้ำ (hydration shell) ที่ได้จะหนาแน่นกว่าสารเคลือบผิวที่มีโมเลกุลเล็ก จากผลการทดลองตอนที่ 1 ทราบว่าชั้นน้ำนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติก โดยช่วยให้สารเคลือบผิวเข้า

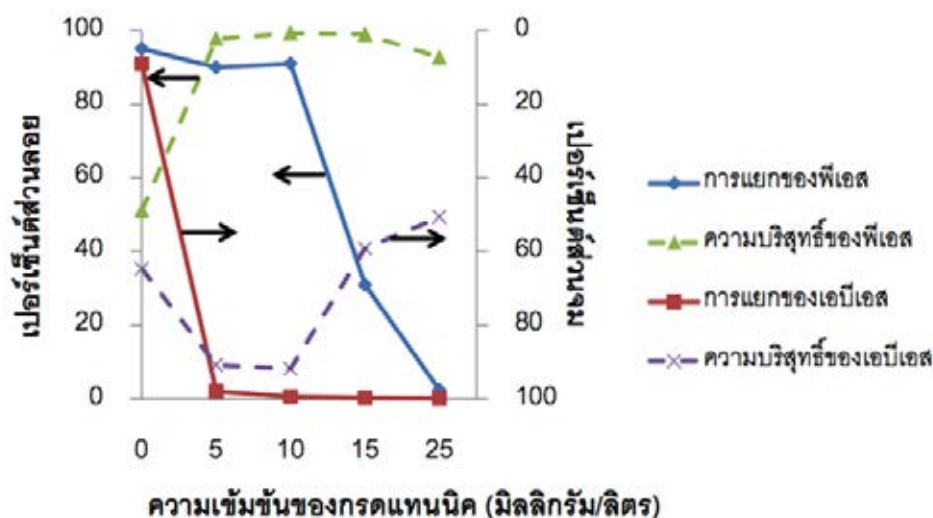
ใกล้พื้นผิวพลาสติกด้วยแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van de Waals attractive force) จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก โดยในถังปฏิกรณ์จะใช้ตัวกลางเป็นน้ำและเติมสารเคลือบฟองเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล (MIBC) ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร หลังจากทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาที จึงนำพลาสติกในส่วนที่ลอยมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์การแยกคำนวณได้จากน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้ต่อน้ำหนักพลาสติกชนิดนั้นที่ใส่เข้าไปในระบบทั้งหมด ส่วนความบริสุทธิ์สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้ต่อน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่แยกออกมาได้ทั้งหมด ผลการทดลองจะแสดงในรูปของกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ทั้งชนิดพีเอสและเอบีเอสในส่วนลอย หลังการทดลองพบว่าในส่วนลอยมักจะมีปริมาณพีเอสมากกว่าเอบีเอส กราฟนี้จึงแสดงผลเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพีเอสเป็นหลัก สำหรับพลาสติกเอบีเอสที่ส่วนใหญ่พบในส่วนจมจะสามารถคำนวณได้จาก 100% ลบออกด้วยค่าที่อ่านได้ในกราฟ เช่น ถ้าอ่านค่าเปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอสในส่วนลอยได้ 10% แสดงว่ามีเอบีเอสในส่วนจม 90% ดังภาพที่ 4-6



ภาพที่ 4 - 6 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของพลาสติก

จากภาพที่ 4-7 เป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ทั้งชนิดพีเอสและเอบีเอสที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆกันในส่วนลอย พบว่าสำหรับที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่สามารถแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้เพราะ

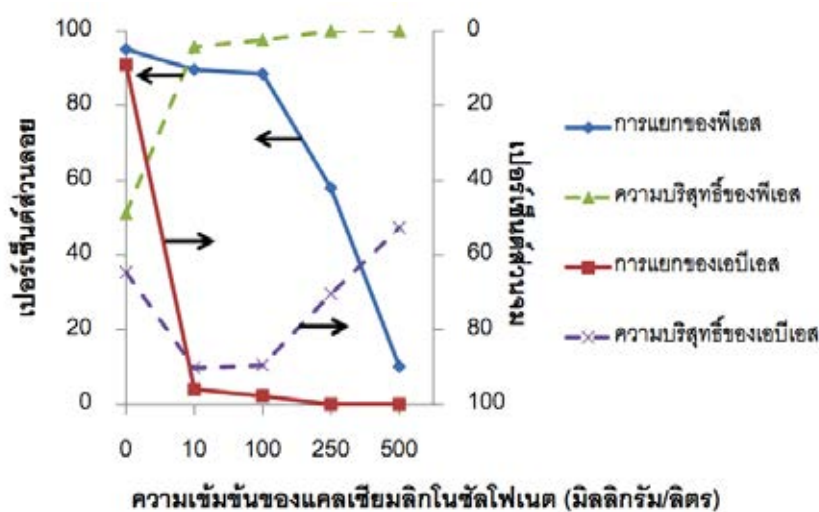
พีเอสและเอบีเอสต่างก็ลอยขึ้นมาโดยสามารถแยกพีเอสขึ้นมาในส่วนลอยได้ 95.06% และเอบีเอส 90.97% และในส่วนลอยมีความบริสุทธิ์พีเอส 51.10% และเอบีเอส 48.90% จะเห็นว่าความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งสองชนิดต่ำ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิกขึ้น เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอสและเอบีเอสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การแยกและเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งสองชนิดมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถแยกพีเอสขึ้นมาในส่วนลอยได้ 91.01% และเอบีเอสในส่วนลอยได้ 0.63% แสดงว่าในส่วนลอยมีพลาสติกเอบีเอสปะปนเพียง 0.63% ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ามีเอบีเอสในส่วนจม 99.37% ( $100 - 0.63 = 99.37$ ) ทำให้ได้ความบริสุทธิ์พีเอสในส่วนลอย 99.31% และความบริสุทธิ์ของเอบีเอสในส่วนจม 91.71% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิกจนถึง 15 มิลลิกรัม/ลิตร พลาสติกทั้งสองชนิดจะอยู่ในส่วนจมมากขึ้น สามารถแยกออกจากกันได้น้อยลงและได้ความบริสุทธิ์ต่ำลง



ภาพที่ 4 - 7 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆกัน

สำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต 0 มิลลิกรัม/ลิตร ก็ไม่สามารถแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4-8 ดังนั้นการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสจำเป็นต้องมีการปรับสภาพก่อนเสมอ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอสและเอบีเอสจะเพิ่มขึ้น ซึ่ง

เปอร์เซ็นต์การแยกและเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งสองชนิดมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถแยกพีเอสในส่วนลอยได้ 89.64 % และเอบีเอสในส่วนจม 95.98% ได้ความบริสุทธิ์พีเอสในส่วนลอย 95.71% และเอบีเอสในส่วนจม 90.25% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตขึ้น พลาสติกทั้งสองชนิดจะอยู่ในส่วนจมมากขึ้น สามารถแยกออกจากกันได้น้อยลงและได้ความบริสุทธิ์ต่ำลง

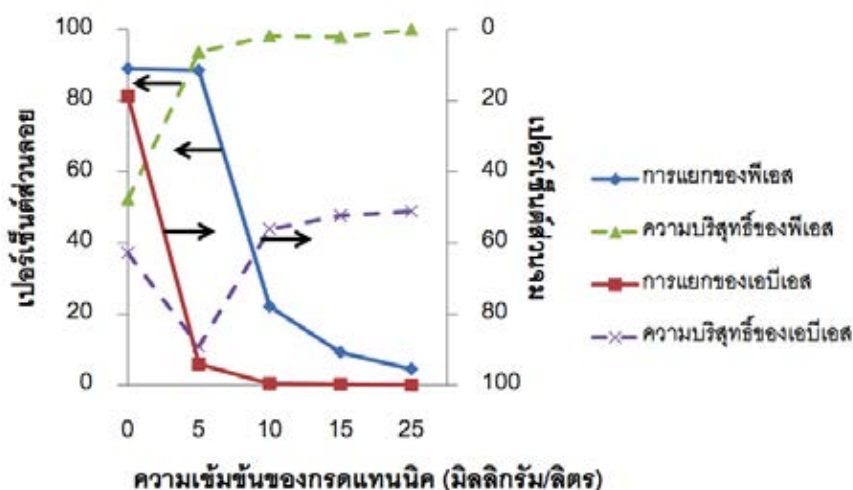


ภาพที่ 4 - 8 เปอร์เซนต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆกัน

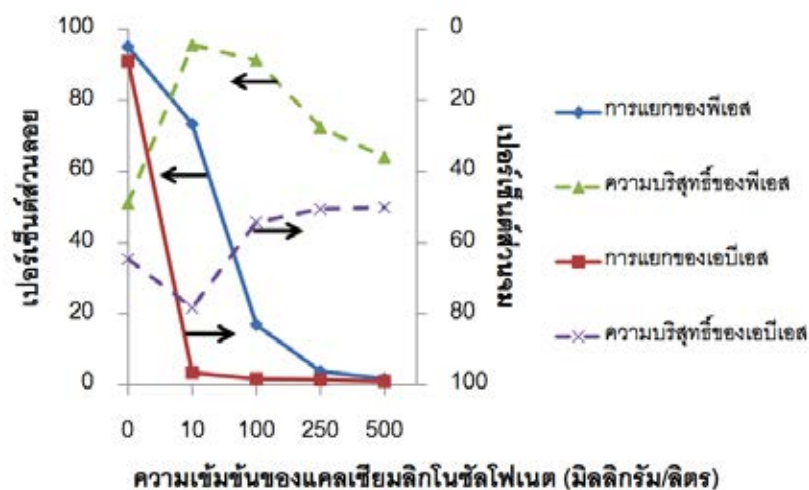
จากภาพที่ 4-9 พบว่าสำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 0 มิลลิกรัม/ลิตร ก็ไม่สามารถแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้เพราะพีเอสและเอบีเอสต่างก็ลอยขึ้นมาโดยสามารถแยกพีเอสขึ้นมาในส่วนลอยได้ 88.94% และเอบีเอสได้ 81.31% และในส่วนลอยมีความบริสุทธิ์พีเอส 52.24% และเอบีเอส 47.76% จะเห็นว่าความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งสองชนิดต่ำ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิกขึ้น เปอร์เซนต์การแยกของพีเอสและเอบีเอสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเปอร์เซนต์การแยกและเปอร์เซนต์ความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งสองชนิดมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถแยกพีเอสได้ 88.45% และเอบีเอส 94.07% ได้ความบริสุทธิ์พีเอส 93.71% และเอบีเอส 89.07% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิกเรื่อยๆ พลาสติกทั้งสองชนิดจะอยู่ในส่วนจมมากขึ้น สามารถแยกออกจากกันได้น้อยลงและได้ความบริสุทธิ์ต่ำลง



จากภาพที่ 4-10 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต 0 มิลลิกรัม/ลิตร ก็ไม่สามารถแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้เช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอสและเอบีเอสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การแยกและเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งสองชนิดมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถแยก พีเอสได้ 73.33 % และเอบีเอส 96.64% ได้ความบริสุทธิ์พีเอส 95.61% และเอบีเอส 78.37% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตขึ้น พลาสติกทั้งสองชนิดจะอยู่ในส่วนจมมากขึ้น สามารถแยกออกจากกันได้น้อยลงและได้ความบริสุทธิ์ต่ำลง ซึ่งสามารถสรุปประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสมจากการปรับสภาพด้วยกรดแทนนิกและแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต ได้ดังตารางที่ 4-6



ภาพที่ 4 - 9 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆกันในส่วนที่ลอย



ภาพที่ 4 - 10 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลไฟเนตต่างกัน

ตารางที่ 4 - 6 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกจากการปรับสภาพด้วยกรดแทนนิกและแคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต

พลาสติก	สารเคลือบผิว	
	กรดแทนนิก 10 มิลลิกรัม/ลิตร	แคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต 10 มิลลิกรัม/ลิตร
พลาสติกบริสุทธิ์		
เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอส (%)	91.01	89.64
เปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอส (%)	99.37	95.98
ความบริสุทธิ์ของพีเอส (%)	99.31	95.71
ความบริสุทธิ์ของเอบีเอส (%)	91.71	90.25
พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	กรดแทนนิก 5 มิลลิกรัม/ลิตร	แคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต 10 มิลลิกรัม/ลิตร
เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอส (%)	88.45	73.33
เปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอส (%)	94.07	96.64
ความบริสุทธิ์ของพีเอส (%)	93.71	95.61
ความบริสุทธิ์ของเอบีเอส (%)	89.07	78.37

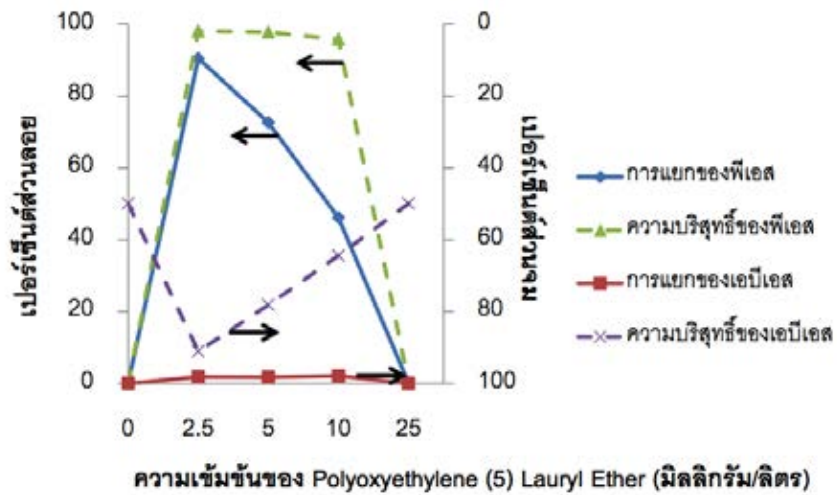
ในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกด้วยสารเคลือบผิว ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกเช่นเดียวกัน ที่ความเข้มข้นน้อยไป พื้นผิวพลาสติกยังปรับสภาพได้ไม่ดีพอ แม้เปอร์เซ็นต์การลอยของพลาสติกทั้งสองชนิดจะสูงแต่มีความบริสุทธิ์ต่ำ แต่ถ้าปรับสภาพที่ความเข้มข้นมากไป พื้นผิวจะถูกปรับสภาพให้ชอบน้ำมากเกินไป ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การลายน้อยลง สำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีงานวิจัยกล่าวถึงผลของสารเคลือบผิว ได้แก่ จากงานวิจัยของ Pongstabodee และคณะ (2008) ใช้แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตรและแคลเซียมคลอไรด์ 0.1 มิลลิกรัม/ลิตรในการปรับสภาพ แต่แคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตมีราคาแพงกว่า โดยแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตมีราคาประมาณ 25.4 บาทต่อ 1 กรัม ในขณะที่กรดแทนนิกมีราคาประมาณ 4.2 บาทต่อ 1 กรัม อีกทั้งปริมาณแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตที่ใช้ในการปรับสภาพยังมากกว่า ถึงแม้ว่าจะได้ประสิทธิภาพสูง แต่ก็ทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ส่วนงานวิจัยของ Wang และคณะ (2012) ใช้กรดแทนนิกความเข้มข้น 25 มิลลิกรัม/ลิตรในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกพีเอสกับเอบีเอส ได้ประสิทธิภาพการแยกใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่ใช้ความเข้มข้นเพียง 5 มิลลิกรัม/ลิตร จากตารางที่ 4-6 จะเห็นว่าการทดแทนนิกมีความเลือกสรรในการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้ดีกว่าแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนต ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้กรดแทนนิกเป็นสารเคลือบผิว

#### 4.3.2 ชนิดของสารเคลือบฟอง

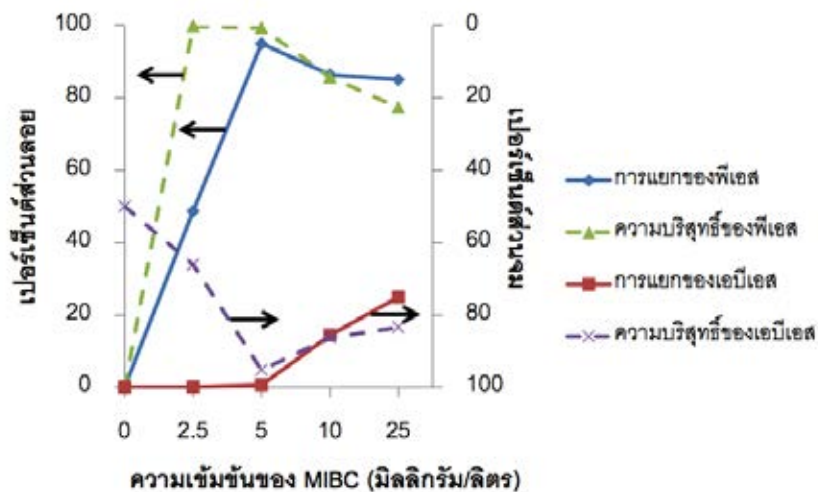
จากการทดลองในส่วนข้างต้นชนิดของสารเคลือบผิวที่เลือกใช้ในการปรับสภาพ คือ กรดแทนนิก เนื่องจากมีความเลือกสรรในการแยกพลาสติกผสม สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์จะใช้ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร และสำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะใช้ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตรในการปรับสภาพเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก โดยในถังปฏิบัติการจะใช้ตัวกลางเป็นน้ำและเติมสารเคลือบฟองเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลหรือ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ที่ความเข้มข้น 0 2.5 5 10 และ 25 มิลลิกรัม/ลิตร

จากภาพที่ 4-11 พบว่า Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติก โดยที่ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัม/ลิตร เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกทั้งพีเอสและเอบีเอสมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นจนถึง 2.5 มิลลิกรัม/ลิตร เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพีเอสและเอบีเอสมีค่าสูงสุด โดยแยกได้พีเอส 90.42% มีความบริสุทธิ์

อยู่ที่ 98.07% และแยกเอปีเอสได้ 98.22% มีความบริสุทธิ์อยู่ที่ 91.12% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆพบว่าเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพีเอสลดน้อยลงจนถึงความเข้มข้นที่ 25 มิลลิกรัม/ลิตร เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพีเอสกับเอปีเอสมีค่าเท่ากับ 0



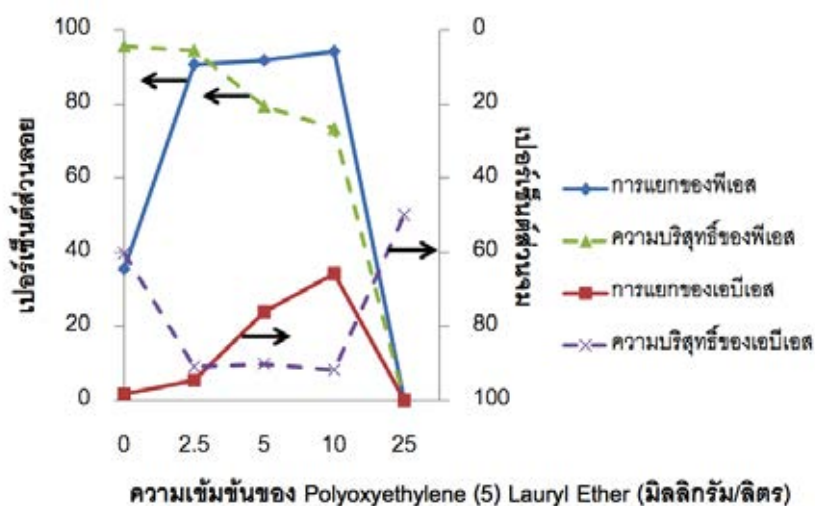
ภาพที่ 4 - 11 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ต่างๆกัน



ภาพที่ 4 - 12 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ MIBC ต่างๆกัน

สำหรับเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอลก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกบริสุทธิ์ เช่นเดียวกับ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether แต่จะส่งผลน้อยกว่า จากภาพที่ 4-12 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอสจะสูงขึ้น โดยสูงสุดที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยแยกพีเอสได้ 95.01% มีความบริสุทธิ์อยู่ที่ 99.34% และแยกเอบีเอสได้ 99.37% มีความบริสุทธิ์อยู่ที่ 95.22% และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้น เอบีเอสจะลอยมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอสต่ำลงและความบริสุทธิ์ของพีเอสและเอบีเอสก็ต่ำลงด้วยเช่นกัน

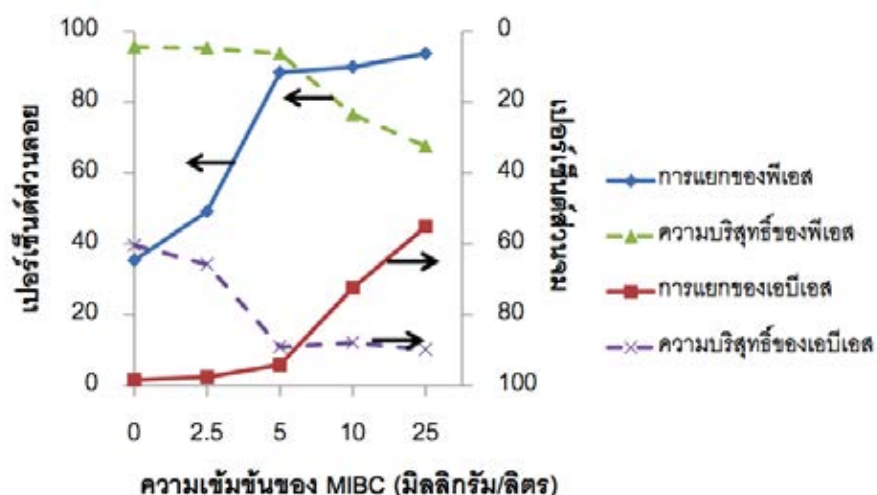
สำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว สารเคลือบฟองก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยก เช่นเดียวกัน จากภาพที่ 4-13 จะเห็นว่า Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ที่ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัม/ลิตร มีประสิทธิภาพการแยกพลาสติกสูงที่สุด โดยสามารถแยกพีเอสได้ 90.68% มีความบริสุทธิ์ 94.41% และแยกเอบีเอสได้ 94.63% มีความบริสุทธิ์ 91.04% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเรื่อยๆ พีเอสจะลอยมากขึ้น แต่เอบีเอสก็จะลอยมากขึ้นเช่นเดียวกัน ทำให้ความบริสุทธิ์ของพีเอสและเอบีเอสลดลง จนถึงความเข้มข้นที่ 25 มิลลิกรัม/ลิตร ทั้งพีเอสและเอบีเอสจะจมหมด



ภาพที่ 4 - 13 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ต่างๆกัน

จากภาพที่ 4-14 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอสจะสูงขึ้น โดยสูงสุดที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยแยกพีเอสได้ 88.45% มีความบริสุทธิ์ 93.71% และแยกเอบีเอสได้ 94.07% มีความบริสุทธิ์ 89.07% และเมื่อเพิ่มความ

เข้มข้นขึ้น เอบีเอสจะลอยมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอสต่ำลงและความบริสุทธิ์ของพีเอสและเอบีเอสก็ต่ำลงด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถสรุปประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสมจากการใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลและ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง ได้ดังตารางที่ 4-7



ภาพที่ 4 - 14 เปอร์เซนต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของ MIBC ต่างๆกัน

จากตารางที่ 4-7 จะเห็นว่าเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลมีความเลือกสรรในการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้ดีกว่า จากการทดลองจะเห็นว่าในการใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองในการแยกพลาสติก ถ้าปริมาณความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether มากไปประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกทั้งสองชนิดจะลดลง เนื่องจาก Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether สามารถลดแรงตึงผิวของสารละลายตัวกลางได้มากกว่าเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนล ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัม/ลิตร แรงตึงผิวของสารละลายตัวกลางที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองมีค่าเท่ากับ 56.6 มิลลินิวตัน/เมตร ในขณะที่เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลที่ความเข้มข้นเดียวกันมีค่าแรงตึงผิวเท่ากับ 66.8 มิลลินิวตัน/เมตร (ภาคผนวก ค) ทำให้ค่าแรงตึงผิวของสารละลายตัวกลางที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองมีค่าใกล้เคียงกับพื้นผิวพลาสติกมากกว่าตัวกลางที่ใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลเป็นสารเคลือบฟอง (พีเอสและเอบีเอสมีค่าพลังงานพื้นผิวเท่ากับ 44.75 และ 48.92 มิลลิจูล/ตารางเมตรตามลำดับ) พลาสติกนั้นเลยมีความชอบที่จะอยู่ใน

สารละลายที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองมากกว่า ทำให้เปอร์เซ็นต์การลอยของพลาสติกพีเอสและเอบีเอสต่ำกว่า ค่าแรงตึงผิวของสารละลายตัวกลางในการแยกพลาสติกจึงควรมีค่าระหว่าง  $\gamma_{PS} < \gamma_{Medium} < \gamma_{ABS}$  นอกจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่เลือกใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลเป็นสารเคลือบฟอง ได้แก่ Marques และคณะ (2000) Burat และคณะ (2009) Wang และคณะ (2012) เป็นต้น ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลเป็นสารเคลือบฟอง

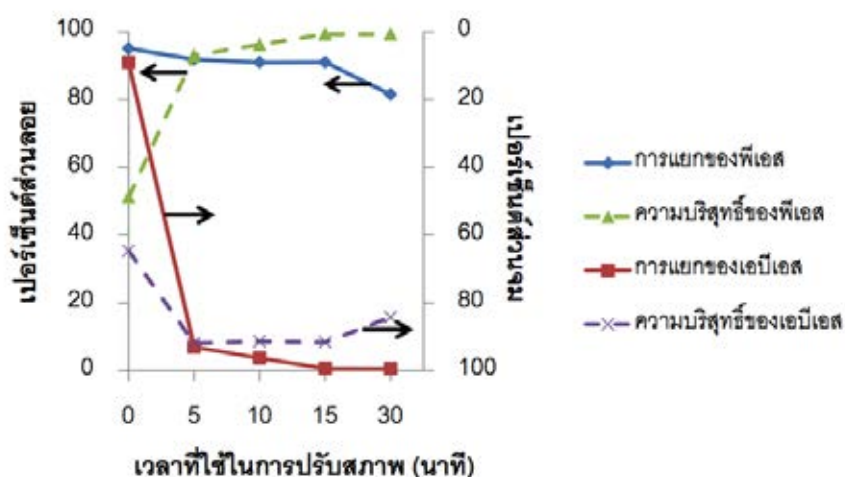
ตารางที่ 4 - 7 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกในการใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลและ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

พลาสติก	สารเคลือบฟอง	
พลาสติกบริสุทธิ์	Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 2.5 มิลลิกรัม/ลิตร	MIBC 5 มิลลิกรัม/ลิตร
เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอส (%)	90.42	95.01
เปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอส (%)	98.22	99.37
ความบริสุทธิ์ของพีเอส (%)	98.07	99.34
ความบริสุทธิ์ของเอบีเอส (%)	91.12	95.22
พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 2.5 มิลลิกรัม/ลิตร	MIBC 5 มิลลิกรัม/ลิตร
เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอส (%)	90.68	88.45
เปอร์เซ็นต์การแยกของเอบีเอส (%)	94.63	94.07
ความบริสุทธิ์ของพีเอส (%)	94.41	93.71
ความบริสุทธิ์ของเอบีเอส (%)	91.04	89.07

### 4.3.3 เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ

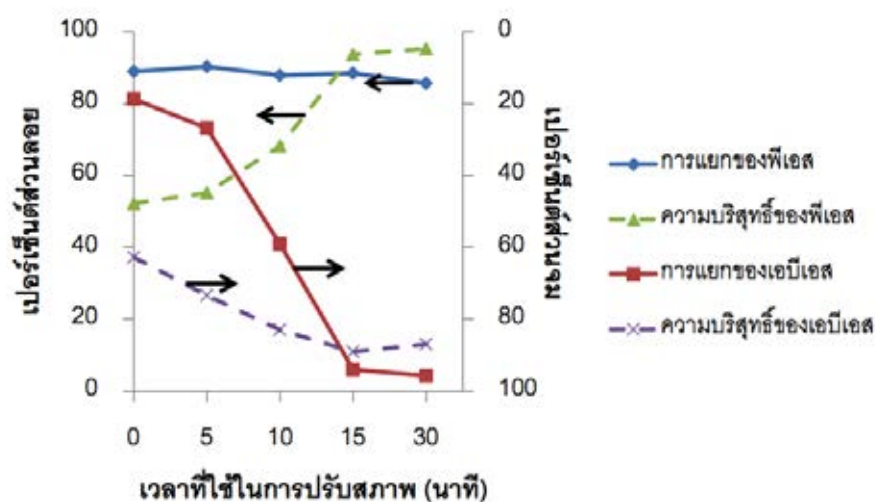
จากการทดลองในส่วนข้างต้นชนิดของสารเคลือบผิวที่เลือกใช้ในการปรับสภาพ คือ กรดแทนนิก เนื่องจากมีความเลือกสรรในการแยกพลาสติกผสม สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์จะใช้เวลาความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 10 มิลลิกรัม/ลิตร และสำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะใช้ความเข้มข้นของกรดแทนนิกเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับสภาพเป็นเวลา 0 5 10 15 และ 30 นาที จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการทำให้ลอยเป็นเวลา 2 นาทีเพื่อดูประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก โดยในถึงปฏิกิริยาจะใช้ตัวกลางเป็นน้ำและเติมสารเคลือบฟองที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า โดยสารเคลือบฟองที่เลือกใช้ คือ เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล (MIBC) ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากได้ประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกสูง

จากการทดลองพบว่า เมื่อไม่มีการปรับสภาพทั้งพีเอสและเอบีเอส ไม่ว่าจะเป็พลาสติกบริสุทธิ์หรือพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะมีความบริสุทธิ์ต่ำ แต่เมื่อปรับสภาพ ประสิทธิภาพการแยกจะสูงขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพทั้งพลาสติกบริสุทธิ์และที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เหมาะสม คือ 15 นาที และถ้าใช้เวลานานขึ้น เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอสจะลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง ดังภาพที่ 4-15 และ 4-16



ภาพที่ 4 - 15 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ปรับสภาพเป็นเวลาต่างๆกัน





ภาพที่ 4 - 16 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ปรับสภาพเป็นเวลาต่างๆกัน

ดังนั้นในการทดลองต่อไป สารเคลือบผิวที่ใช้ในการปรับสภาพพลาสติกพีเอสและเอบีเอส ทั้งพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะเลือกใช้กรดแทนนิน โดยพลาสติกบริสุทธิ์จะใช้ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจะใช้ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลาในการปรับสภาพ 15 นาที และสารเคลือบฟองที่เลือกใช้ คือ เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร แต่เพื่อศึกษาผลของอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม จะศึกษาผลของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ที่ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัม/ลิตรด้วย

#### 4.4 ผลการกวนผสมและการเกิดฟอง

ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกวนผสมและการเกิดฟองเพื่อดูค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการนี้ โดยปัจจัยที่สนใจในการทดลองนี้ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศ อัตราเร็วในการกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับใบกวน ระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว ความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง รายละเอียดของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4 - 8 ปัจจัยและค่าที่ใช้ในการทดลองที่ 4

ปัจจัย	ค่าที่ใช้ในการทดลอง				
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำอากาศ (เซนติเมตร)	3.18	3.81	5.08	6.35	6.99
อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที)	450	525	675	825	900
ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับใบกวน (เซนติเมตร)	0.5		1		
ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับผิวหน้าของเหลว (เซนติเมตร)	1		2		
ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง (มิลลิกรัม/ลิตร)	2.5		5		
ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (มิลลิกรัม/ลิตร)	5		10		

ท่อนำอากาศยาว 14 เซนติเมตร ท่อแยกยาว 15 เซนติเมตรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.43 เซนติเมตรและระยะห่างระหว่างกันถึงปฏิกริยากับใบพัดกวนมีค่าเท่ากับ 2 เซนติเมตร จากนั้นถ่ายภาพฟองอากาศที่เกิดขึ้นด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง วัดขนาดฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ

#### 4.4.1 ศึกษาปัจจัยหลักของกระบวนการทำให้ลอย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การจัดแบบการทดลองแบบ Plackett - Burman แบบ 12 การทดลองในการกลั่นกรองปัจจัยเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศ โดยปัจจัยที่สนใจในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศ (Induced air tube diameter) อัตราเร็วในการกวน (Rotation speed) ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับใบกวน (Spacing distance between tube and impeller) ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับผิวหน้าของเหลว (Spacing distance between tube and liquid surface) ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง (Concentration of frother) และความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (Concentration of wetting agent) แต่ละปัจจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ระดับสูงแทนด้วย +1 และระดับต่ำแทนด้วย -1

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศจะพิจารณาจากค่านัยสำคัญจาก Student's t test ที่ระดับนัยสำคัญ 90% ( $P \leq 0.10$ ) โดยเงื่อนไขของวิธีนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-9

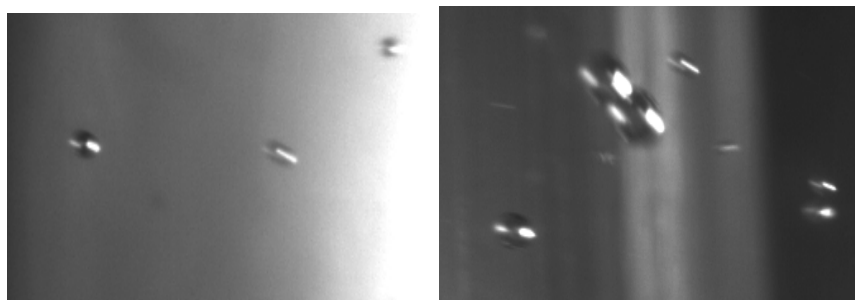
ตารางที่ 4 - 9 เงื่อนไขในการจัดการทดลองแบบ Plackett - Burman แบบ 12 การทดลอง

ปัจจัย	รหัสปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
		-1	+1
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศ (เซนติเมตร)	x1	3.18	5.08
อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที)	x2	450	525
ระยะห่างระหว่างท่ออากาศกับใบกวน (เซนติเมตร)	x3	0.5	1
ระยะห่างระหว่างท่ออากาศกับผิวหน้าของเหลว (เซนติเมตร)	x4	1	2
ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง (มิลลิกรัม/ลิตร)	x5	2.5	5
ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (มิลลิกรัม/ลิตร)	x6	5	10

เมื่อศึกษาการกลั่นกรองปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการทำให้ลอย โดยการเหนี่ยวนำอากาศจากบรรยากาศภายนอกผ่านใบพัดกวนด้วยการจัดการทดลองแบบ Plackett - Burman จากตารางที่ 4-10 พบว่าขนาดของฟองอากาศที่ได้จาก Plackett - Burman มีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ  $1.07 \pm 0.005$  มิลลิเมตรจากการทดลองที่ 10 และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศที่เล็กที่สุดเท่ากับ  $0.71 \pm 0.016$  มิลลิเมตรจากการทดลองที่ 9 ตัวอย่างขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการจัดการทดลองแบบ Plackett - Burman สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-17 นอกจากนี้จะเห็นว่า Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ที่ใช้เป็นสารเคลือบฟองในงานวิจัยสามารถลดขนาดของฟองอากาศได้

ตารางที่ 4 - 10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจากการจัดแบบการทดลองแบบ Plackett - Burman สำหรับกลิ่นกรองปัจจัยการเกิดฟองอากาศจากการเหนียวนำอากาศเข้าไปผ่านใบพัดกวน

การทดลอง	ปัจจัย						ขนาดของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	
1	5.08	450	1	1	2.5	5	0.92±0.015
2	5.08	525	0.5	2	2.5	5	1.00±0.002
3	3.18	525	1	1	5	5	0.92±0.024
4	5.08	450	1	2	2.5	10	0.80±0.003
5	5.08	525	0.5	2	5	5	0.97±0.001
6	5.08	525	1	1	5	10	0.91±0.039
7	3.18	525	1	2	2.5	10	0.94±0.099
8	3.18	450	1	2	5	5	0.77±0.080
9	3.18	450	0.5	2	5	10	0.71±0.016
10	5.08	450	0.5	1	5	10	1.07±0.005
11	3.18	525	0.5	1	2.5	10	0.91±0.031
12	3.18	450	0.5	1	2.5	5	0.79±0.016



ภาพที่ 4 - 17 ขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการจัดการทดลองแบบ Plackett - Burman ในการทดลองที่ 9 (ซ้าย) และสิ่งทดลอง 10 (ขวา)

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศจะพิจารณาจากค่านัยสำคัญ ซึ่งได้จาก Student's t test ที่ระดับนัยสำคัญ 90% (นัยสำคัญ  $\leq 0.10$ ) เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการจัดการทดลองแบบ Plackett – Burman มาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยจากตารางที่ 4-11 จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวนมีค่านัยสำคัญ 0.09 และ 0.10 ตามลำดับ ในขณะที่ปัจจัยอื่นๆ มีค่านัยสำคัญมากกว่า 0.10 ดังนั้นปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศ ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวน จากนั้นจะเลือก 2 ปัจจัยนี้มาวิเคราะห์ในรายละเอียดโดยใช้การจัดการทดลองแบบ CCD สำหรับการศึกษากinetikของฟองอากาศและการกวนผสมจากกระบวนการทำให้ลอยด้วยการเหนี่ยวนำอากาศเข้าไปผ่านใบพัดกวน

ตารางที่ 4 - 11 ผลทางสถิติของการจัดแบบการทดลองแบบ Plackett - Burman

ปัจจัย	ค่าเฉลี่ยผลรวม กำลังสอง	ค่า F	นัยสำคัญ
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนำอากาศ (เซนติเมตร)	0.032	3.47	0.09
อัตราเร็วในการกวน (รอบต่อนาที)	0.030	3.22	0.10
ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับใบกวน (เซนติเมตร)	0.003	0.23	0.64
ระยะห่างระหว่างท่อนำอากาศกับผิวหน้าของเหลว (เซนติเมตร)	0.009	0.80	0.39
ความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง (มิลลิกรัม/ลิตร)	0.000	0.00	0.96
ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (มิลลิกรัม/ลิตร)	0.000	0.03	0.87

#### 4.4.2 ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม

ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม งานวิจัยนี้เลือกใช้การจัดการทดลองแบบ CCD ในการวิเคราะห์ผลของปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศเพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับขนาดของฟองอากาศ จากการทดลองก่อนหน้าพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวน ดังนั้นสามารถจัดเงื่อนไขการทดลองแบบ CCD ได้ ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4 - 12 เงื่อนไขในการจัดการทดลองแบบ CCD

ปัจจัย	รหัส	ระดับของปัจจัย				
		-1.5	-1	0	1	1.5
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออากาศ (เซนติเมตร)	x1	3.18	3.81	5.08	6.35	6.99
อัตราเร็วในการกววน (รอบต่อนาที)	x2	450	525	675	825	900

โดยมีเงื่อนไข คือ ระยะห่างระหว่างท่อกับผิวหน้าของเหลว 1 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างท่อกับใบพัดกววน 1 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารเคลือบผิว (กรดแทนนิก) 5 มิลลิกรัม/ลิตร และความเข้มข้นของสารเคลือบฟอง ได้แก่ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 2.5 มิลลิกรัม/ลิตร กับ เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล (MIBC) 5 มิลลิกรัม/ลิตร

4.4.2.1 อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกววนผสมโดยใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

สำหรับการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกววนผสมโดยใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองโดยใช้การจัดการทดลองแบบ CCD ประกอบด้วยสิ่งทดลองจำนวน 11 การทดลองพบว่าขนาดของฟองอากาศที่ได้มีค่าแตกต่างกันในแต่ละสิ่งทดลอง โดยการทดลองที่ 1 ให้ขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่สุด มีค่าเท่ากับ  $1.28 \pm 0.018$  มิลลิเมตรและการทดลองที่ 10 ให้ขนาดของฟองอากาศที่เล็กที่สุดเท่ากับ  $0.82 \pm 0.043$  มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-13

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยจะสามารถหาสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศและปัจจัยที่ส่งผล ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกววน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแสดงดังตารางที่ 4-14

โดยจากตารางที่ 4-13 จะพบว่าค่าขนาดของฟองอากาศจากสมการที่ได้หรือค่าทำนายเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองหรือค่าสังเกตมีความคลาดเคลื่อนแบบ RSME สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.16 หรือคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 16% แสดงว่าขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายมีความผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 16%

ตารางที่ 4 - 13 ขนาดของฟองอากาศจากการจัดการทดลองแบบ CCD และขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

การทดลอง	ปัจจัย		ขนาดของฟองอากาศ (mm)		ค่าความคลาดเคลื่อนแบบ RSME
	ขนาดของท่อ (cm)	อัตราเร็วในการกวน (rpm)	ค่าสังเกต	ค่าทำนาย	
1	3.81	525	1.28±0.018	1.05	0.16
2	6.35	525	1.17±0.067	1.01	0.11
3	3.81	825	1.27±0.078	1.09	0.13
4	6.35	825	1.06±0.003	0.95	0.08
5	5.08	675	0.93±0.008	0.98	0.03
6	5.08	675	0.95±0.020	0.98	0.02
7	5.08	675	0.97±0.043	0.98	0.01
8	3.18	675	0.93±0.034	1.13	0.14
9	6.99	675	0.90±0.046	1.00	0.07
10	5.08	450	0.82±0.043	1.00	0.13
11	5.08	900	0.87±0.042	0.99	0.08

ตารางที่ 4 - 14 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจากขนาดของฟองอากาศที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองในการจัดการทดลองแบบ CCD

เทอมของสมการ	ค่าสัมประสิทธิ์	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน	ค่า t
ค่าคงที่	1.53993	3.04	0.49
$X_1$	-0.20419	1.62	-0.30
$X_2$	0.00017	0.01	0.03
$X_1X_1$	0.02546	0.33	0.49
$X_2X_2$	$3.35433 \times 10^{-7}$	0.00	0.10
$X_1X_2$	-0.00013	0.00	-0.25

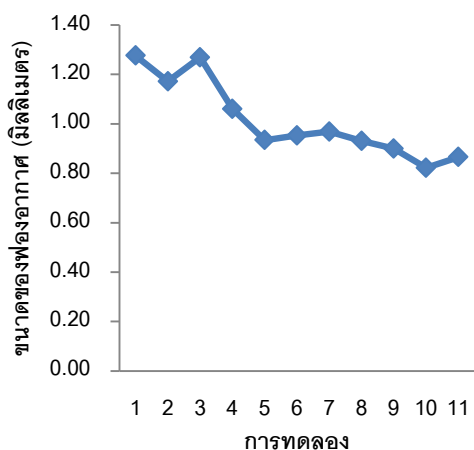
โดยค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและขนาดของฟองอากาศได้ ดังนี้

$$d_b = 1.53993 - 0.20419X_1 + 0.00017X_2 + 0.02546X_1^2 + 3.35433 \times 10^{-7}X_2^2 - 0.00013 X_1X_2$$

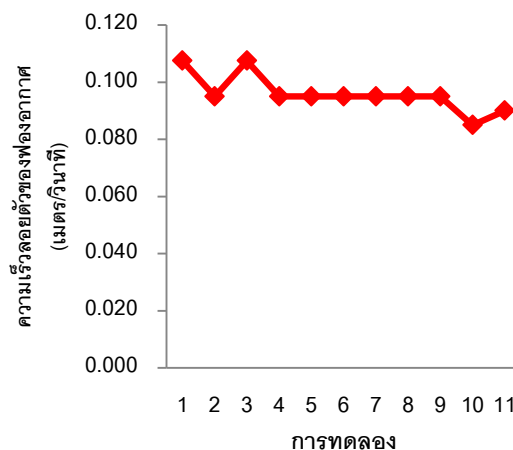
โดย  $d_b$  คือ ขนาดของฟองอากาศ หน่วย มิลลิเมตร  
 $X_1$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศ หน่วย เซนติเมตร  
 $X_2$  คือ อัตราเร็วในการกววน หน่วย รอบต่อนาที

จากผลการทดลอง สามารถคำนวณหาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกววนผสมอื่นๆ ได้ ดังนี้

- ขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ



(1)



(2)

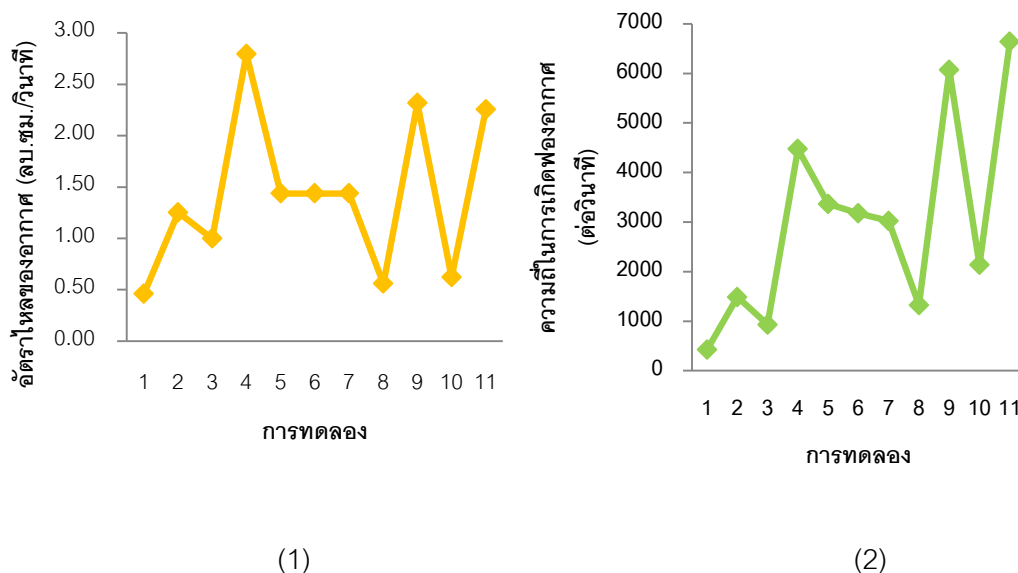
ภาพที่ 4 - 18 ขนาดของฟองอากาศ (1) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (2) ที่การทดลองต่างๆ

จากภาพที่ 4-18 พบว่าขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่สุดเท่ากับ 1.28 มิลลิเมตรจากสิ่งทดลองที่ 1 และขนาดของฟองอากาศเล็กที่สุดเท่ากับ 0.82 มิลลิเมตรจากการทดลองที่ 10 เมื่อนำ



ขนาดของฟองอากาศที่ได้มาคำนวณความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจากกราฟของ Grace et Wairegi (1986) พบว่าการทดลองที่ให้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมากที่สุดคือ การทดลองที่ 1 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.108 เมตร/วินาที และการทดลองที่ให้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 10 มีค่าเท่ากับ 0.085 เมตร/วินาที แสดงว่าขนาดท่อหน้าอากาศและอัตราเร็วในการกวนมีผลต่อขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ โดยขนาดท่อหน้าอากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการกวนมากจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง ส่งผลให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยลงด้วย

- อัตราการไหลของอากาศและความถี่ในการเกิดฟองอากาศ

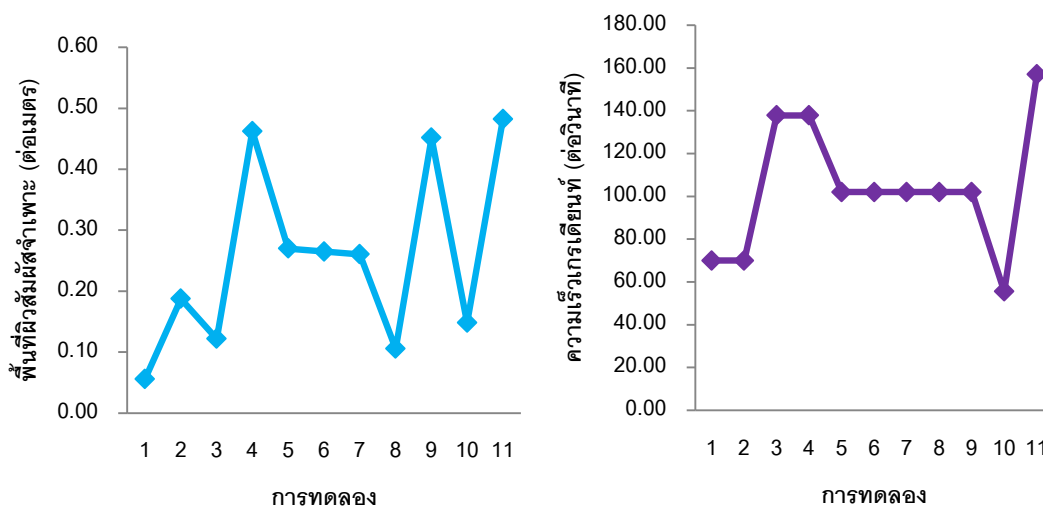


ภาพที่ 4 - 19 อัตราการไหลของอากาศ (1) และความถี่ในการเกิดฟอง (2) ที่การทดลองต่างๆ

จากภาพที่ 4-19 พบว่าการทดลองที่ให้ค่าอัตราการไหลของอากาศมากที่สุดคือ การทดลองที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2.79 ลบ.ชม./วินาที และการทดลองที่ให้ค่าอัตราการไหลน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.46 ลบ.ชม./วินาที เมื่อนำผลของอัตราการไหลของอากาศมาคำนวณหาความถี่ในการเกิดฟองอากาศ พบว่าการทดลองที่ให้ค่าความถี่ในการเกิดฟองมากที่สุด คือ การทดลองที่ 11 มีค่าเท่ากับ 6637.30 ต่อวินาที และการทดลองที่ให้ค่าความถี่ในการเกิดฟองน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 422.78 ต่อวินาที แสดงว่าขนาดท่อหน้าอากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการกวนมากจะทำให้อัตราการไหลของอากาศมากขึ้น นอกจากนี้อัตราการไหล

ของอากาศมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความถี่ในการเกิดฟอง ดังนั้นขนาดท่อนำอากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการกวนมากจะส่งผลให้ความถี่ในการเกิดฟองมากขึ้นด้วย

- พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและความเร็วเกรเดียนท์



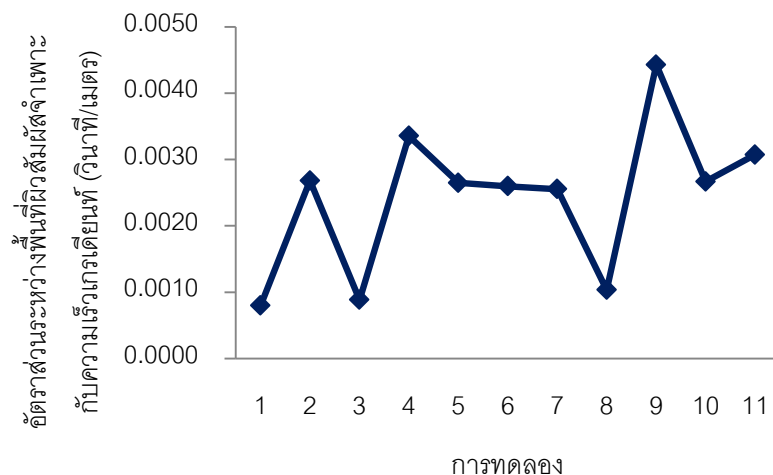
(1)

(2)

ภาพที่ 4 - 20 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (1) และความเร็วเกรเดียนท์ (2) ที่การทดลองต่างๆ

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจะบ่งบอกถึงโอกาสในการสัมผัสระหว่างพื้นผิวพลาสติกกับฟองอากาศ ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของฟองอากาศ ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศและอัตราการไหลของอากาศ ส่วนความเร็วเกรเดียนท์จะแสดงถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 4-20 พบว่าการทดลองที่ให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากที่สุดคือ การทดลองที่ 11 มีค่าเท่ากับ 0.482 ต่อเมตร และการทดลองที่ให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.056 ต่อเมตร สำหรับความเร็วเกรเดียนท์พบว่า การทดลองที่มีค่าความเร็วเกรเดียนท์มากที่สุดคือ การทดลองที่ 11 มีค่าเท่ากับ 157.04 ต่อวินาที และการทดลองที่ให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์น้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 10 มีค่าเท่ากับ 55.52 ต่อวินาที แสดงว่าขนาดของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวนมาก จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมีค่าน้อยลง แต่ความเร็วเกรเดียนท์ ตัวแปรที่มีผลหลัก คือ อัตราเร็วในการกวน ยิ่งอัตราเร็วในการกวนมากจะทำให้ความเร็วเกรเดียนท์มีค่ามากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการ

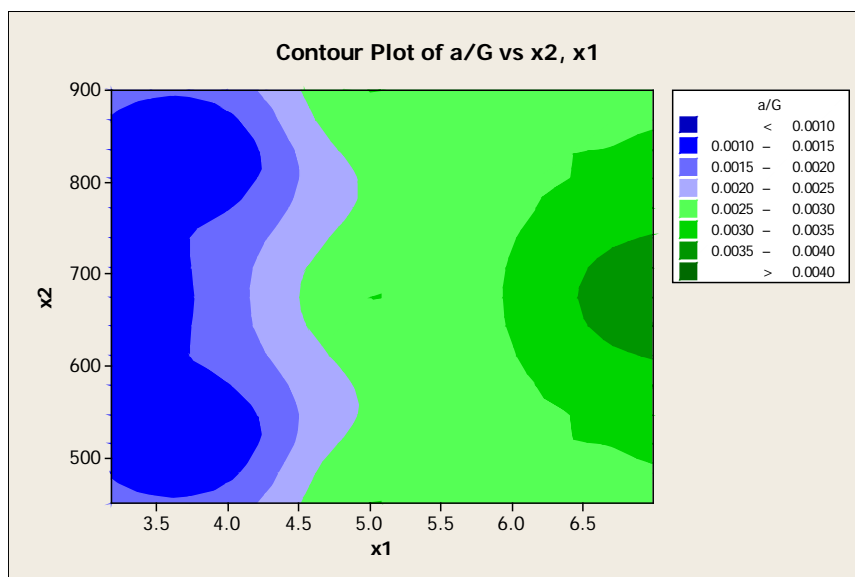
กวนผสมในรูปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) สามารถแสดงดังภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4 - 21 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ที่การทดลองต่างๆ

จากภาพที่ 4-21 จะเห็นว่าการทดลองที่ให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ที่สูงที่สุด คือ การทดลองที่ 9 โดยมีค่าเท่ากับ 0.0044 วินาที/เมตร ส่วนการทดลองที่ 1 ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.0008 วินาที/เมตร ดังนั้นในการทดลองที่ 5 สำหรับการให้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง จะเลือกใช้การทดลองที่ 9 เป็นเงื่อนไขในการเกิดฟองและการกวนผสมที่ดีที่สุดและการทดลองที่ 1 เป็นเงื่อนไขในการเกิดฟองและการกวนผสมที่แย่มากที่สุด

แผนภาพพื้นที่ผิวสะท้อนหรือพื้นที่ผิวตอบสนองจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) ที่เหมาะสม จากภาพที่ 4-22 จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวนยิ่งมาก ค่า a/G จะยิ่งสูงขึ้นโดยจะมีค่ามากกว่า 0.004 วินาที/เมตร ถ้าใช้ท่อนำอากาศช่วง 6.5 – 7.0 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 600 – 750 รอบต่อนาที



ภาพที่ 4 - 22 แผนภาพพื้นที่ผิวสะท้อนค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร่งเฉื่อยที่ขนาดของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกววนต่างๆ

4.4.2.2 อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมโดยใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล (MIBC) เป็นสารเคลือบฟอง

สำหรับการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมโดยใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล เป็นสารเคลือบฟองโดยใช้การจัดการทดลองแบบ CCD ประกอบด้วยการทดลองจำนวน 11 การทดลองพบว่าขนาดของฟองอากาศที่ได้มีค่าแตกต่างกันในแต่ละการทดลอง โดยการทดลองที่ 2 ให้ขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่สุด มีค่าเท่ากับ  $1.29 \pm 0.043$  มิลลิเมตรและการทดลองที่ 9 ให้ขนาดของฟองอากาศที่เล็กที่สุดเท่ากับ  $0.90 \pm 0.020$  มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4-15

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยจะสามารถหาสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศและปัจจัยที่ส่งผล ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกววน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของสมการแสดงดังตารางที่ 4-16

โดยจากตารางที่ 4-15 จะพบว่าค่าขนาดของฟองอากาศจากสมการที่ได้หรือค่าทำนายเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองหรือค่าสังเกตมีความคลาดเคลื่อนแบบ RSME สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.19 หรือคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 19% แสดงว่าขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายมีความผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 19%

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จากตารางที่ 4-16 เหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและขนาดของฟองอากาศได้ ดังนี้

$$d_b = 2.07629 + 0.09437 X_1 - 0.00365 X_2 - 0.00607X_1^2 + 2.92188 \times 10^{-6} X_2^2 - 0.00007X_1X_2$$

โดย  $d_b$  คือ ขนาดของฟองอากาศ หน่วย มิลลิเมตร

$X_1$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศ หน่วย เซนติเมตร

$X_2$  คือ อัตราเร็วในการกวน หน่วย รอบต่อนาที

ตารางที่ 4 - 15 ขนาดของฟองอากาศจากการจัดการทดลองแบบ CCD และขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้เมทิลไอโซบิวทิลเป็นสารเคลือบฟอง

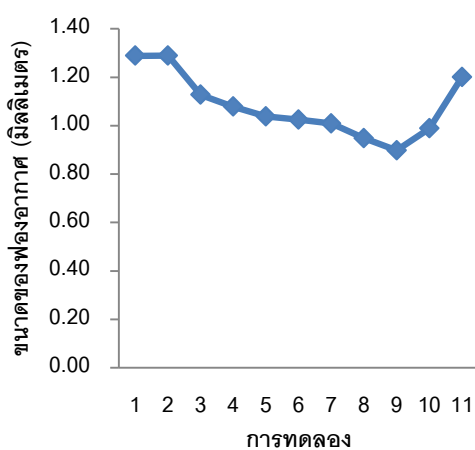
การทดลอง	ปัจจัย		ขนาดของฟองอากาศ (mm)		ค่าความคลาดเคลื่อนแบบ RMSE
	ขนาดของท่อ (cm)	อัตราเร็วในการกวน (rpm)	ค่าสังเกต	ค่าทำนาย	
1	3.81	525	1.29±0.019	1.05	0.17
2	6.35	525	1.29±0.043	1.01	0.19
3	3.81	825	1.13±0.056	1.09	0.03
4	6.35	825	1.08±0.025	0.95	0.09
5	5.08	675	1.04±0.068	0.98	0.04
6	5.08	675	1.02±0.004	0.98	0.03
7	5.08	675	1.01±0.082	0.98	0.02
8	3.18	675	0.95±0.029	1.13	0.13
9	6.99	675	0.90±0.020	1.00	0.07
10	5.08	450	0.99±0.020	1.00	0.01
11	5.08	900	1.20±0.009	0.99	0.15

ตารางที่ 4 - 16 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยจากขนาดของฟองอากาศที่ใช้เมทิลไฮโซบิวทิลเป็นสารเคลือบฟองในการจัดการทดลองแบบ CCD

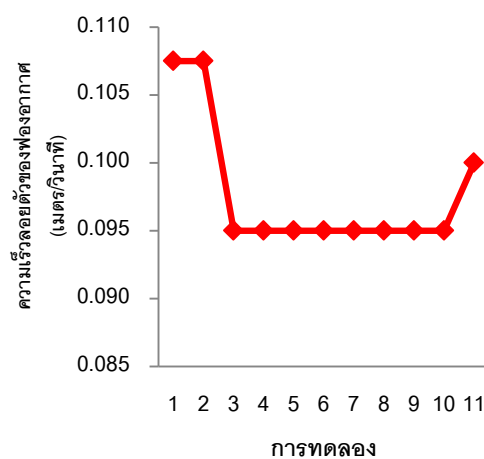
เทอมของ สมการ	ค่าสัมประสิทธิ์	ค่าความคลาดเคลื่อน มาตรฐาน	ค่า t
ค่าคงที่	2.07629	2.35	0.87
$X_1$	0.09437	1.25	0.21
$X_2$	-0.00365	0.00	-0.83
$X_1X_1$	-0.00607	0.25	-0.17
$X_2X_2$	$2.92188 \times 10^{-6}$	0.00	1.03
$X_1X_2$	-0.00007	0.00	-0.15

จากผลการทดลอง สามารถคำนวณหาตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมอื่นๆ ได้ ดังนี้

- ขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ



(1)

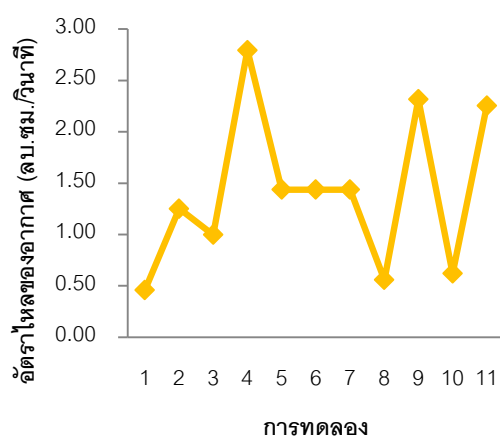


(2)

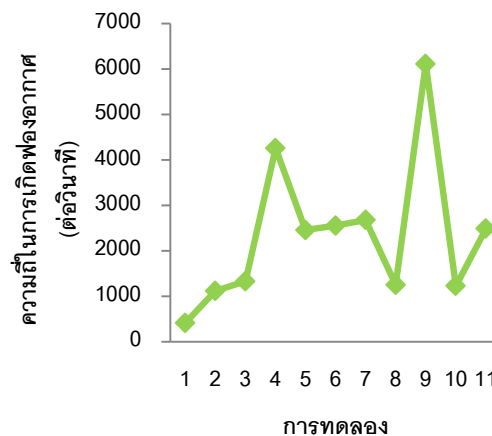
ภาพที่ 4 - 23 ขนาดของฟองอากาศ (1) และความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (2) ที่การทดลองต่างๆ

จากภาพที่ 4-23 พบว่าขนาดของฟองอากาศใหญ่ที่สุดเท่ากับ 1.28 มิลลิเมตรจากการทดลองที่ 1 และขนาดของฟองอากาศเล็กที่สุดเท่ากับ 0.82 มิลลิเมตรจากการทดลองที่ 10 และเมื่อนำขนาดของฟองอากาศที่ได้มาคำนวณความเร็วลอยตัวของฟองอากาศจากกราฟของ Grace et Wairegi (1986) พบว่าการทดลองที่ให้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมากที่สุดคือ การทดลองที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 0.108 เมตร/วินาที และการทดลองที่ให้ค่าความเร็วลอยตัวของฟองอากาศน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 3 4 5 6 7 8 9 และ 10 มีค่าเท่ากับ 0.095 เมตร/วินาที แสดงว่าขนาดท่ออากาศและอัตราเร็วในการกวนมีผลต่อขนาดของฟองอากาศและความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ โดยขนาดท่ออากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการกวนมากจะทำให้ขนาดของฟองอากาศเล็กลง ส่งผลให้ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศมีค่าน้อยลงด้วย

- อัตราการไหลของอากาศและความถี่ในการเกิดฟองอากาศ



(1)



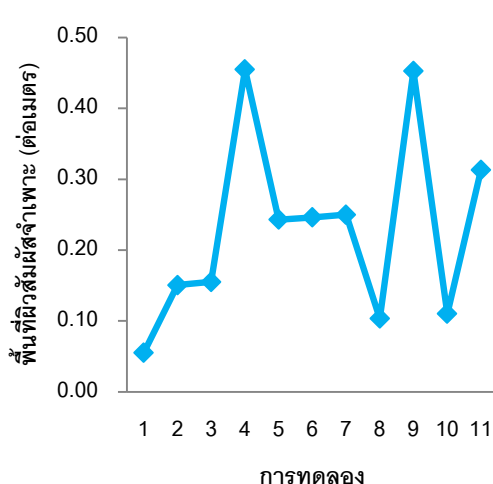
(2)

ภาพที่ 4 - 24 อัตราการไหลของอากาศ (1) และความถี่ในการเกิดฟอง (2) ที่การทดลองต่างๆ

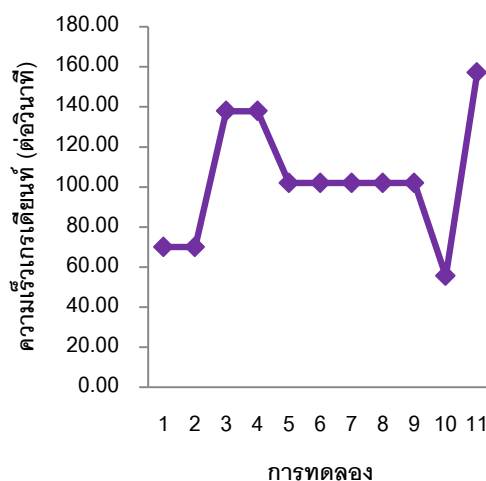
จากภาพที่ 4-24 พบว่าการทดลองที่ให้ค่าอัตราการไหลของอากาศมากที่สุดคือ การทดลองที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2.79 ลบ.ชม./วินาที และการทดลองที่ให้ค่าอัตราการไหลน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.46 ลบ.ชม./วินาที เมื่อนำผลของอัตราการไหลของอากาศมาคำนวณหาความถี่ในการเกิดฟองอากาศพบว่า การทดลองที่ให้ค่าความถี่ในการเกิดฟองมากที่สุด

คือ การทดลองที่ 9 มีค่าเท่ากับ 6112.68 ต่อวินาที และการทดลองที่ให้ค่าความถี่ในการเกิดฟองน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 411.28 ต่อวินาที แสดงว่าขนาดท่อนำอากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการกวนมากจะทำให้อัตราการไหลของอากาศมากขึ้น นอกจากนี้อัตราการไหลของอากาศมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความถี่ในการเกิดฟอง ดังนั้นขนาดท่อนำอากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการกวนมากจะส่งผลให้ความถี่ในการเกิดฟองมากขึ้นด้วย

- พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะและความเร็วเกรเดียนท์



(1)



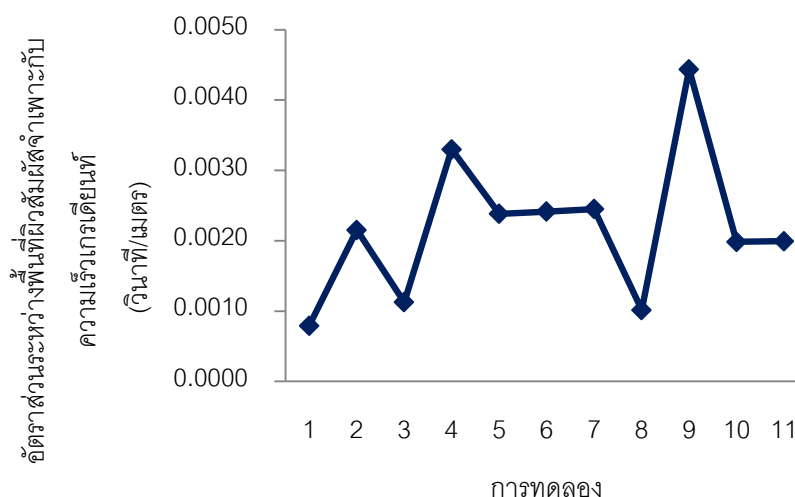
(2)

ภาพที่ 4 - 25 พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (1) และความเร็วเกรเดียนท์ (2) ที่การทดลองต่างๆ

จากภาพที่ 4-25 พบว่าการทดลองที่ให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมากที่สุดคือ การทดลองที่ 4 มีค่าเท่ากับ 0.454 ต่อเมตร และการทดลองที่ให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.055 ต่อเมตร สำหรับความเร็วเกรเดียนท์พบว่า การทดลองที่ให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์มากที่สุดคือ การทดลองที่ 11 มีค่าเท่ากับ 157.04 ต่อวินาที และการทดลองที่ให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์น้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 10 มีค่าเท่ากับ 55.52 ต่อวินาที แสดงว่าขนาดของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวนมาก จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะมีค่าน้อยลง แต่ความเร็วเกรเดียนท์ ตัวแปรที่มีผลหลัก คือ อัตราเร็วในการกวน ยิ่งอัตราเร็วในการกวนมากจะทำให้ความเร็วเกรเดียนท์มีค่ามากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะแสดงค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการ



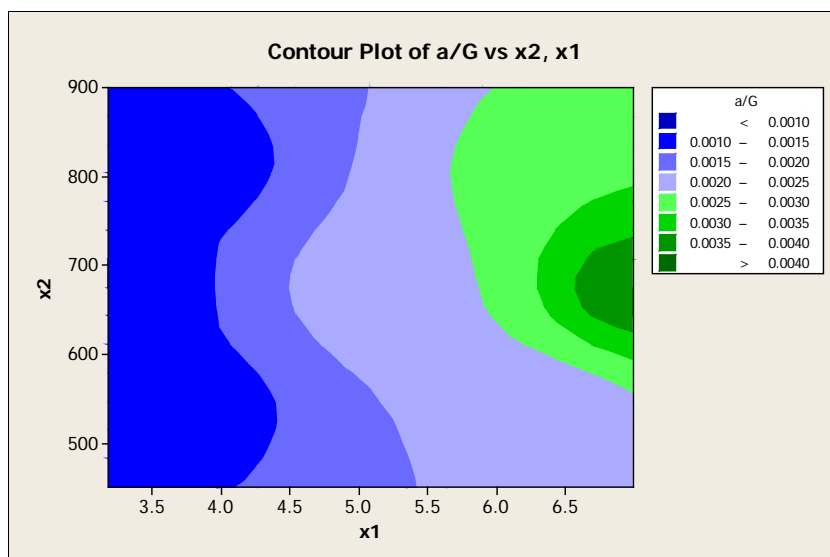
กวนผสมในรูปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) สามารถแสดงดังภาพที่ 4-26



ภาพที่ 4 - 26 อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ที่การทดลองต่างๆ

จากภาพที่ 4-26 จะเห็นว่าการทดลองที่ให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์สูงสุด คือ การทดลองที่ 9 โดยมีค่าเท่ากับ 0.0044 วินาที/เมตร ส่วนการทดลองที่ 1 ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.0008 วินาที/เมตร ดังนั้นในการทดลองที่ 5 สำหรับการใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล (MIBC) เป็นสารเคลือบฟอง จะเลือกใช้การทดลองที่ 9 เป็นเงื่อนไขในการเกิดฟองและการกวนผสมที่ดีที่สุดและการทดลองที่ 1 เป็นเงื่อนไขในการเกิดฟองและการกวนผสมที่แย่ที่สุด

แผนภาพพื้นที่ผิวสะท้อนหรือพื้นที่ผิวตอบสนองจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) ที่เหมาะสม จากภาพที่ 4-27 จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวนยิ่งมาก ค่า a/G จะยิ่งสูงขึ้นโดยจะมีค่ามากกว่า 0.004 วินาที/เมตร ถ้าใช้ท่อนำอากาศช่วง 6.5 – 7.0 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 600 – 750 รอบต่อนาที เช่นเดียวกับค่าที่ได้จากการใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether



ภาพที่ 4 - 27 แผนภาพพื้นที่ผิวสะท้อนค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ที่ขนาดของท่ออากาศและอัตราเร็วในการกววนต่างๆ

จากผลการทดลองของทั้ง Polyoxyethylene (5) Lauryl Eyher และเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บีนอล พบว่าเงื่อนไขที่ให้ค่า a/G สูงสุด คือ สิ่งทดลองที่ 9 (ขนาดของท่ออากาศ 6.99 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกววน 675 รอบต่อนาที) สามารถสรุปเปรียบเทียบผลทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกววนผสมได้ ดังตารางที่ 4-17

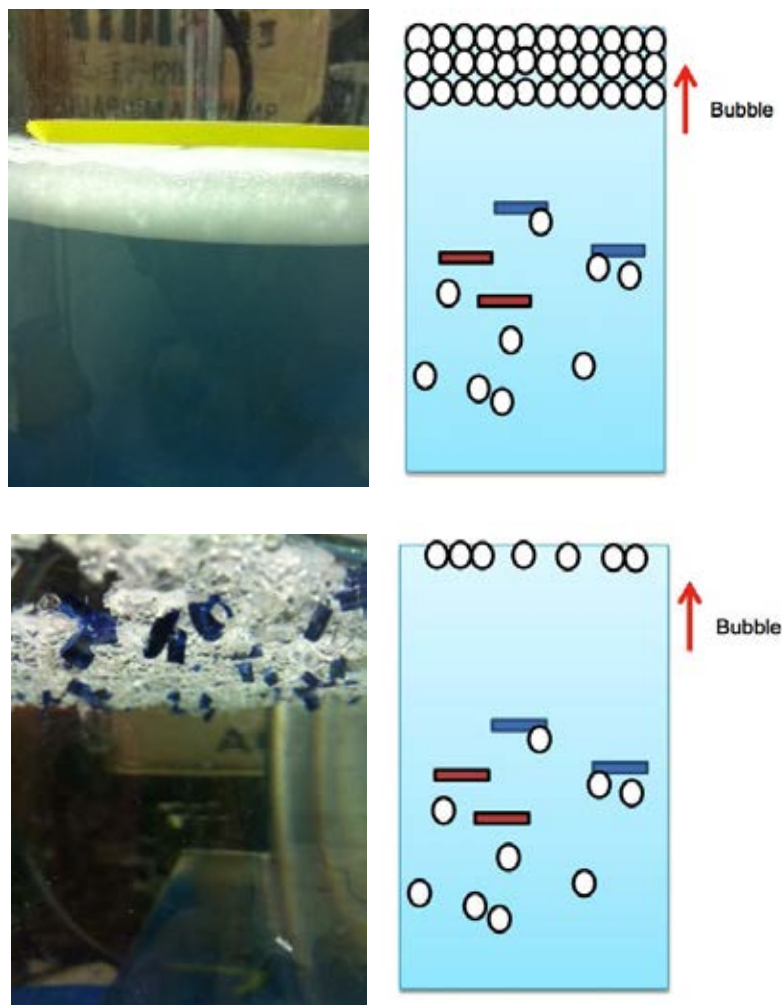
ตารางที่ 4 - 17 เปรียบเทียบผลทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกววนผสมระหว่าง Polyoxyethylene (5) Lauryl Eyher และเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บีนอล (MIBC)

อุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกววนผสม	Polyoxyethylene (5) Lauryl Eyher	MIBC
ขนาดของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	0.90±0.046	0.90±0.020
ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (เมตร/วินาที)	0.095	0.095
อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ซม./วินาที)	2.32	2.32
ความถี่ในการเกิดฟอง (ต่อวินาที)	6071.60	6112.68
พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะ (ต่อเมตร)	0.45	0.45
ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที)	102.00	102.00
อัตราส่วนระหว่าง a/G (วินาที/เมตร)	0.004	0.004

จากตารางที่ 4-17 จะเห็นว่าผลทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการรวมผสม โดยใช้สารเคลือบฟองทั้ง Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether และเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลเป็นสารเคลือบฟอง เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

- ลักษณะของฟองที่ได้จาก Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether มีลักษณะเหมือนโฟม ยิ่งใช้อัตราเร็วในการรวมมาก โฟมที่ได้จะฟองละเอียดมากขึ้น ในขณะที่ฟองที่ได้จากเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลจะไม่เกิดลักษณะโฟมลอยอยู่ผิวด้านบนของน้ำ เนื่องมาจากค่า HLB (Hydrophile – lipophile balance) ของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether มีค่ามากกว่าเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล โดย Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether มีค่า HLB เท่ากับ 10.3 ส่วนเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลมีค่า HLB เท่ากับ 6.3 ซึ่งค่า HLB นี้ ยิ่งมากจะส่งผลให้ฟองมีขนาดเล็ก (Zhang และคณะ, 2012) ซึ่งน่าจะดีเพราะจะทำให้ค่า  $a/G$  สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่า HLB มากจะทำให้ความหนาของชั้นโฟมมากขึ้น (Oh และคณะ, 1997) เพราะค่า HLB เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ ค่า HLB มากจะมีความชอบน้ำมากกว่า ทำให้ไม่ชอบไปเกาะฟองอากาศที่ถูกสร้างขึ้น จึงกลายเป็นโฟมหนาอยู่ผิวด้านบนของน้ำ แต่ที่ค่า HLB น้อย สารนั้นจะไม่ชอบน้ำ โมเลกุลของสารจึงไปเกาะติดฟองที่สร้างขึ้นได้มาก ทำให้ฟองอยู่ในสารละลายตัวกลางได้นานกว่า ดังนั้นเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลจึงอยู่ในสารละลายตัวกลางได้นานกว่า Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ซึ่งกลไกฟองที่เกิดขึ้นจากสารเคลือบฟอง Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether และเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-28 นอกจากนี้การที่เกิดโฟมขึ้นนั้นทำให้ยุ่งยากต่อการทำความสะอาดพลาสติกภายหลังการแยกอีกด้วย

- จากการทำการทดลองหาชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบฟองที่เหมาะสมตอนที่ 3 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ทั้งเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกจะต่ำลง เนื่องจาก Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether สามารถลดแรงตึงผิวของสารละลายตัวกลางได้มากกว่าเมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนล ทำให้ค่าแรงตึงผิวของสารละลายตัวกลางมีค่าใกล้เคียงกับพื้นผิวพลาสติก พลาสติกนั้นเลยมีความชอบที่จะอยู่ในสารละลาย (ภาคผนวก ค)



ภาพที่ 4 - 28 เปรียบเทียบฟองที่เกิดขึ้นระหว่างสารเคลือบฟอง Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether (บน) และเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล (ล่าง)

#### 4.5 ผลการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย

ในส่วนนี้จะทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการทำให้ลอย โดยจะศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย เวลาที่ใช้ในการแยกและอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมที่เหมาะสม จากการทดลองก่อนหน้านี้พบว่าสิ่งทดลองที่ 9 (ขนาดของท่อนำอากาศ 6.99 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 675 รอบต่อนาที) เป็นเงื่อนไขในการเกิดฟองและการกวนผสมที่ดีที่สุดและสิ่งทดลองที่ 1 (ขนาดของท่อนำอากาศ 3.81 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 525 รอบต่อนาที) เป็นเงื่อนไขในการเกิดฟองและการกวนผสมที่แย่ที่สุด นอกจากนี้ในการดูผลของอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมซึ่งในงานวิจัยนี้จะอธิบายในรูปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่

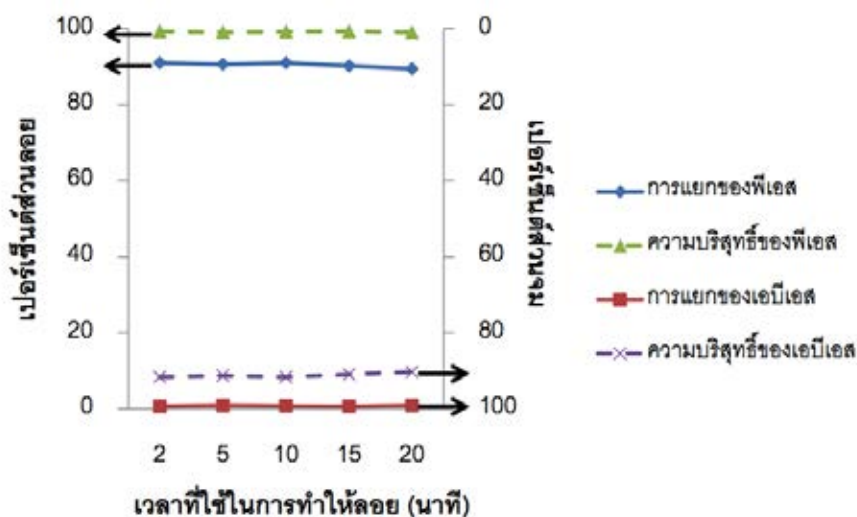
ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร่งเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) จะเพิ่มเงื่อนไขการเกิดฟองและการกวนผสมปานกลางเข้ามา โดยเลือกสิ่งทดลอง 5 (ขนาดของท่อนำอากาศ 5.08 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 675 รอบต่อนาที) แทนเงื่อนไขนี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างท่อกับใบพัดกวน 1 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างท่อกับผิวของเหลว 1 เซนติเมตร

#### 4.5.1 เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย

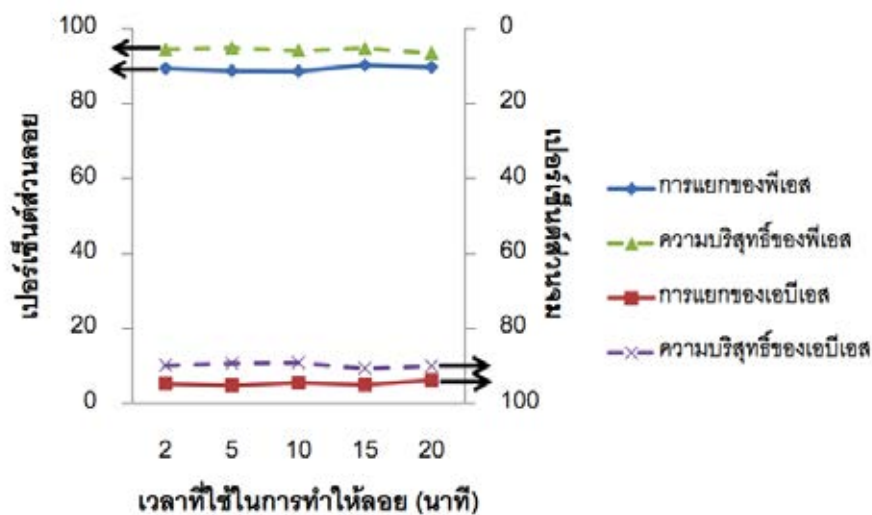
นำพลาสติกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วปรับสภาพด้วยกรดแทนนินความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำกับสารเคลือบฟองจากการทดลองที่ 3 โดยใช้เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลดความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยเงื่อนไขการกวนผสมและการเกิดฟองที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่อความเร่งเกรเดียนท์สูงสุดจากการทดลองที่ 4 คือ สิ่งทดลองที่ 9 (ขนาดของท่อนำอากาศ 6.99 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 675 รอบต่อนาที) ใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 5 10 15 และ 20 นาทีและใช้เวลาในการแยก 1 นาที จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกแต่ละชนิด

จากภาพที่ 4-29 และ 4-30 พบว่าในกระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศผ่านใบกวนนี้ เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่เวลาในการทำให้ลอยต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์ที่เวลาในการทำให้ลอย 2 นาที สามารถแยกพีเอสได้ 91.01% ได้ความบริสุทธิ์ 99.31% และแยกเอบีเอสได้ 99.37% ได้ความบริสุทธิ์ 91.71% ส่วนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เวลาในการทำให้ลอย 2 นาที สามารถแยกพีเอสได้ 89.32% ได้ความบริสุทธิ์ 94.45% และแยกเอบีเอสได้ 94.76% ได้ความบริสุทธิ์ 89.88% ในขณะที่เวลาในการทำให้ลอย 20 นาที สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์สามารถแยกพีเอสได้ 89.44% ได้ความบริสุทธิ์ 99.06% และสามารถแยกเอบีเอสได้ 99.15% ได้ความบริสุทธิ์ 90.37% มีความแตกต่างกันประมาณ 1% นอกจากนี้ยังใช้เวลามาก ยิ่งใช้พลังงานในการกวนมากขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา งานวิจัยของ Pongstabodee และคณะ (2008) ใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 นาที แต่ระบบการแยกที่ใช้มีขนาดเล็กกว่าและงานวิจัยของ Wang และคณะ (2012) ใช้เวลาในการทำให้ลอย 15 นาที แต่ประสิทธิภาพการแยกที่ได้มีค่า

ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะเลือกใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 นาทีเป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้ลอยที่เหมาะสม



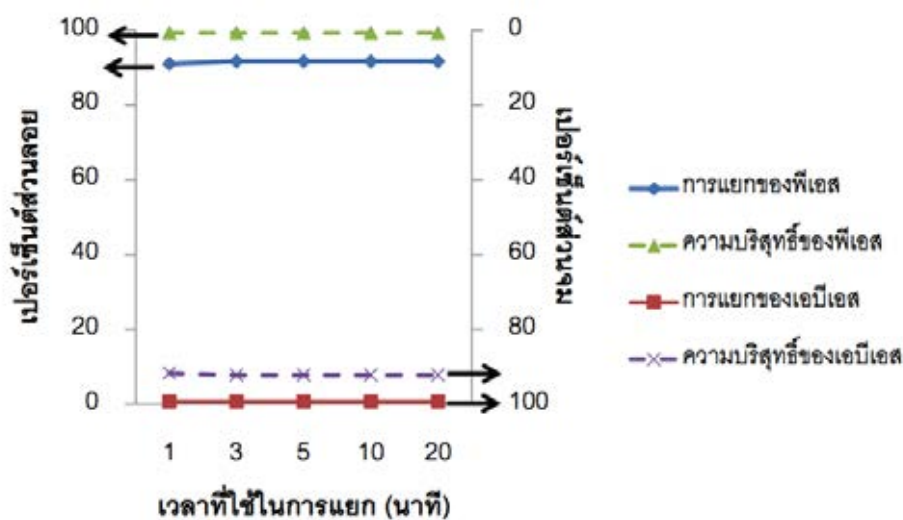
ภาพที่ 4 - 29 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เวลาในการทำให้ลอยต่างๆกันในส่วนลอย



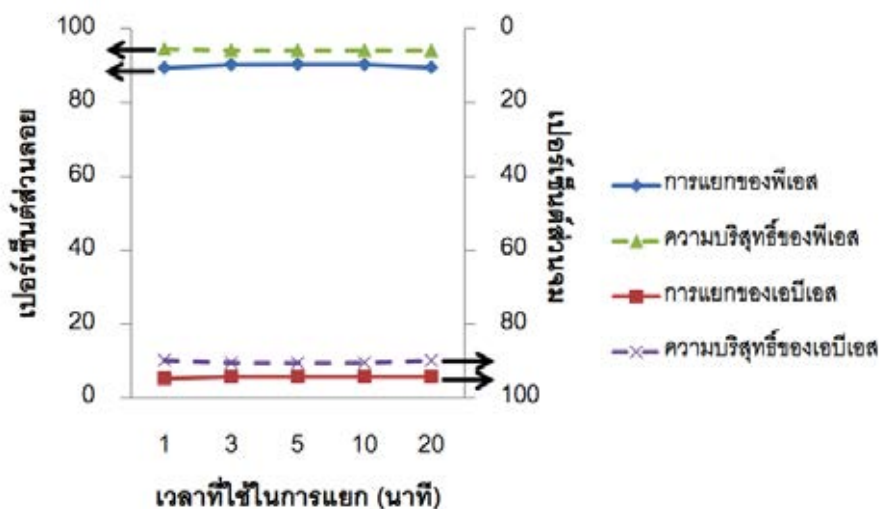
ภาพที่ 4 - 30 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้เวลาในการทำให้ลอยต่างๆกันในส่วนลอย

#### 4.5.2 เวลาที่ใช้ในการแยก

นำพลาสติกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วปรับสภาพด้วยกรดแทนนิกความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำกับสารเคลือบฟองจากการทดลองที่ 3 โดยใช้เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยเงื่อนไขการกวนผสมและการเกิดฟองที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์สูงสุดจากการทดลองที่ 4 คือ สิ่งทดลองที่ 9 (ขนาดของท่อนำอากาศ 6.99 เซนติเมตรและอัตราเร็วในการกวน 675 รอบต่อนาที) ใช้เวลาในการทำให้ลอยจากการทดลองที่ 5.1 คือ 2 นาทีและใช้เวลาในการแยก 1 3 5 10 และ 20 นาทีตามลำดับ จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกแต่ละชนิด



ภาพที่ 4 - 31 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เวลาในการแยกต่างๆกันในส่วนลอย



ภาพที่ 4 - 32 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้เวลาในการแยกต่างๆกันในส่วนลอย

จากภาพที่ 4-31 และ 4-32 พบว่าทั้งพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพีเอสและพีโพรพิลีนมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เนื่องจากในช่วง 1 นาทีแรก ยังมีพลาสติกพีเอสบางส่วนกำลังลอยขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาในการแยก 3 นาที เป็นเวลาในการแยกที่เหมาะสม สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เวลาในการแยก 3 นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การแยกพีเอสเท่ากับ 91.66% ได้ความบริสุทธิ์ 99.31% และเปอร์เซ็นต์การแยกพีโพรพิลีนมีค่าเท่ากับ 99.37% ได้ความบริสุทธิ์ 92.26% สำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว เปอร์เซ็นต์การแยกพีเอสมีค่าเท่ากับ 90.21% ได้ความบริสุทธิ์ 94.45% และเปอร์เซ็นต์การแยกพีโพรพิลีนมีค่าเท่ากับ 94.33% ได้ความบริสุทธิ์ 90.60%

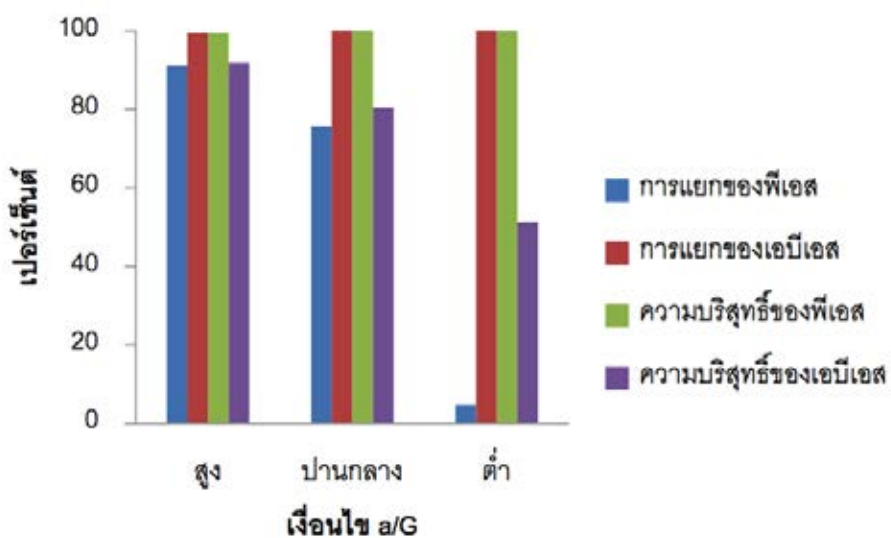
#### 4.5.3 ผลของอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่อการแยกพลาสติก

นำพลาสติกที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคลือบผิวที่ความเข้มข้นและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3 สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์และพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วปรับสภาพด้วยกรดแทนนิกความเข้มข้น 10 และ 5 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที ใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีตัวกลางเป็นน้ำกับสารเคลือบฟองจากการทดลองที่ 3 โดยใช้เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลดความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยเงื่อนไขการกวนผสมและการเกิด

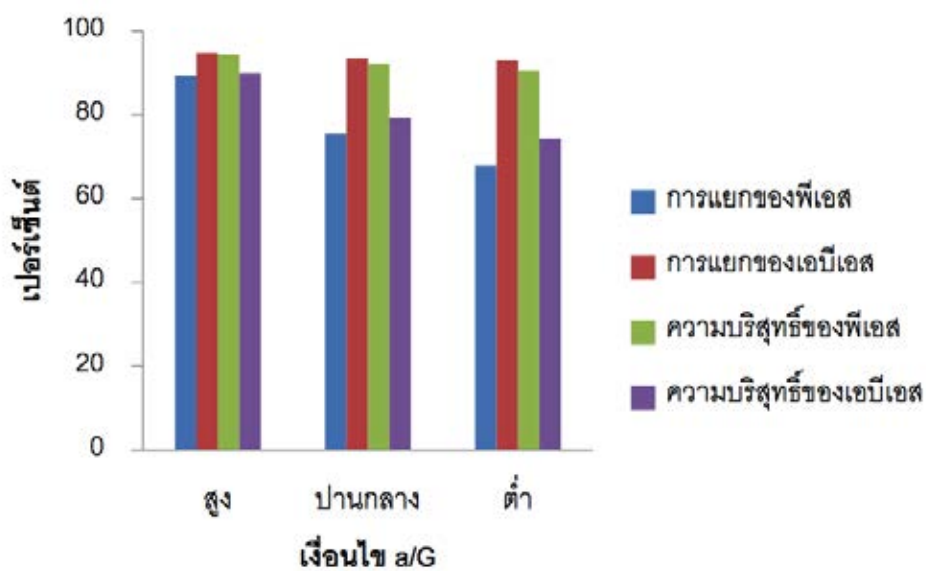


ฟองที่ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะต่อความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) ต่างๆจากการทดลองที่ 4 โดยเลือกมา 3 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ให้ค่า  $a/G$  สูง คือ สิ่งทดลองที่ 9 (ขนาดของท่อนำอากาศ 6.99 เซนติเมตรและอัตราในการหมุน 675 รอบต่อนาที) เงื่อนไขที่ให้ค่า  $a/G$  ปานกลาง คือ สิ่งทดลองที่ 5 (ขนาดของท่อนำอากาศ 5.08 เซนติเมตรและอัตราในการหมุน 675 รอบต่อนาที) และเงื่อนไขที่ให้ค่า  $a/G$  ต่ำ คือ สิ่งทดลองที่ 1 (ขนาดของท่อนำอากาศ 3.81 เซนติเมตรและอัตราในการหมุน 525 รอบต่อนาที) เพื่อดูผลของอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการหมุนผสมที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติก ใช้เวลาในการทำให้ลอยจากการทดลองที่ 5.1 คือ 2 นาที และใช้เวลาในการแยกจากการทดลองที่ 5.2 คือ 3 นาทีจากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกแต่ละชนิด

พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะจะบ่งบอกถึงโอกาสในการสัมผัสระหว่างพื้นผิวพลาสติกกับฟองอากาศ ส่วนความเร็วเกรเดียนท์จะแสดงถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ ยิ่งมีค่ามาก จะเพิ่มโอกาสในการสัมผัสระหว่างพื้นผิวพลาสติกกับฟองอากาศ ระบบมีความปั่นป่วนน้อย ฟองอากาศเกาะติดที่ผิวพลาสติกได้นาน แต่ถ้าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ มีค่าน้อย โอกาสในการเกาะติดของฟองอากาศที่ผิวพลาสติกก็จะน้อยลง ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำของอากาศจากบรรยากาศภายนอกผ่านใบกวนทำ ซึ่งท่อนำอากาศขนาดใหญ่และอัตราเร็วในการหมุนค่อนข้างสูงจะให้ค่า  $a/G$  สูง จากภาพที่ 4-33 และ 4-34 จะเห็นว่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติก โดยเงื่อนไขที่ให้ค่า  $a/G$  สูง จะมีเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกดีกว่า สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์ที่ค่า  $a/G$  สูง จะมีเปอร์เซ็นต์การแยกพีเอสเท่ากับ 91.01% ได้ความบริสุทธิ์ 99.31% และมีเปอร์เซ็นต์การแยกเอบีเอสเท่ากับ 99.37% ได้ความบริสุทธิ์ 91.71% ในขณะที่ค่า  $a/G$  ต่ำ จะมีเปอร์เซ็นต์การแยกพีเอสเท่ากับ 4.72% ได้ความบริสุทธิ์ 100% และมีเปอร์เซ็นต์การแยกเอบีเอสเท่ากับ 100% ได้ความบริสุทธิ์ 51.21% ส่วนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ค่า  $a/G$  สูง จะมีเปอร์เซ็นต์การแยกพีเอสเท่ากับ 89.32% ได้ความบริสุทธิ์ 94.45% และมีเปอร์เซ็นต์การแยกเอบีเอสเท่ากับ 94.76% ได้ความบริสุทธิ์ 89.88% ในขณะที่ค่า  $a/G$  ต่ำจะมีเปอร์เซ็นต์การแยกพีเอสเท่ากับ 67.81% ได้ความบริสุทธิ์ 90.55% และมีเปอร์เซ็นต์การแยกเอบีเอสเท่ากับ 92.93% ได้ความบริสุทธิ์ 74.28%



ภาพที่ 4 - 33 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกชีวสารถิที่ใช้เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่างๆกัน



ภาพที่ 4 - 34 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่างๆกัน

#### 4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว

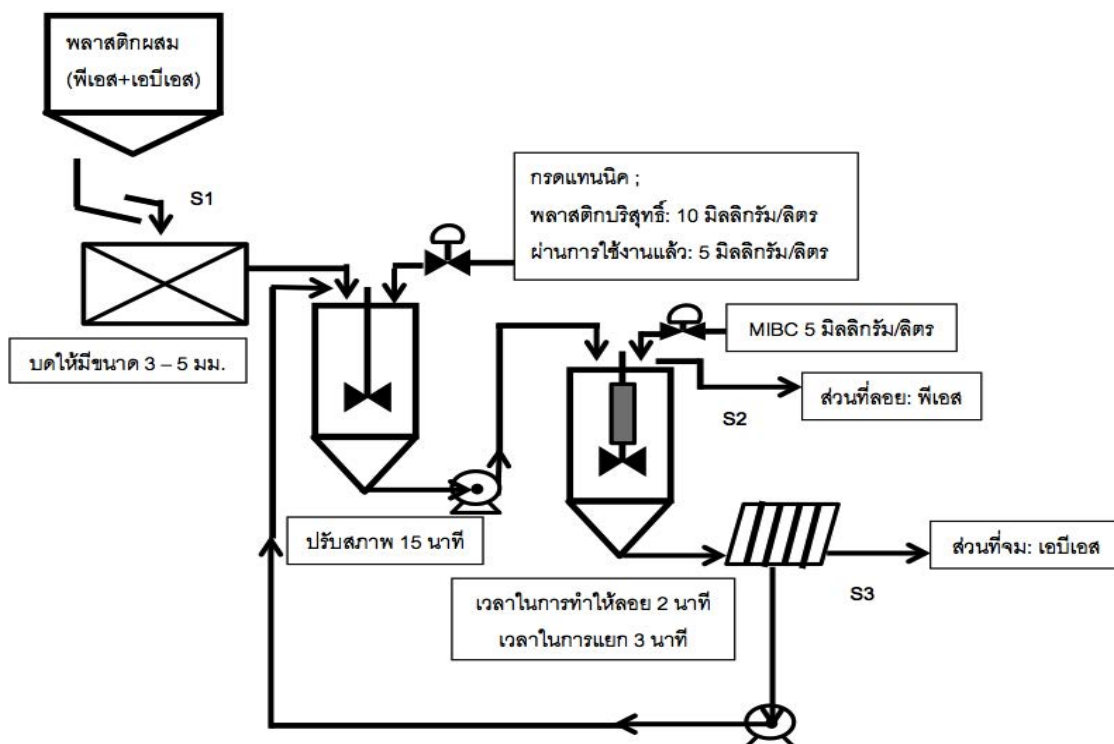
จากกระบวนการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว โดยการเหนี่ยวนำอากาศจากบรรยากาศภายนอกผ่านใบกวน สามารถสรุปค่าใช้จ่ายต้นทุนในการแยกได้ดังตารางที่ 4-18 ซึ่งเป็นราคาต้นทุนในระดับการทดลองของการแยก 1 ครั้ง ครั้งละ 50 กรัม โดยราคาต้นทุนรวมในการแยกเท่ากับ 0.284 บาทต่อ 1 ครั้ง ดังนั้นถ้าคิดราคาในการแยกเพื่อให้ได้พีเอสและเอบีเอสอย่างละ 1 กิโลกรัมต้องทำการแยกทั้งหมดประมาณ 40 ครั้ง คิดเป็นราคาต้นทุนเท่ากับ 11.37 บาท โดยเมื่อแยกพลาสติกทั้งสองชนิดออกจากกันสามารถขายพีเอสได้ในราคาประมาณ 25 บาทและเอบีเอสประมาณ 35 บาท รวมเท่ากับ 60 บาท ดังนั้นกำไรจากการแยกจะมีค่าประมาณ 49 บาท

ตารางที่ 4 - 18 ต้นทุนในระดับการทดลองของการแยกพลาสติกผสมต่อครั้ง (กรณีใช้พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว)

รายการ	ราคา	ปริมาณที่ใช้ต่อครั้ง	ราคา (บาท)
ค่าสารเคมี			
1. กรดแทนนิก	2,100 บาท/ 500 กรัม	0.0015 กรัม	0.006
2. MIBC	1,600 บาท/ 1,000 มล.	0.06 มล.	0.096
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ			
1. ค่าน้ำประปา	0.017 บาท/ลิตร	9 ลิตร	0.153
2. ค่าไฟฟ้า (ในการหมุนมอเตอร์)	0.875 บาท/ ชม.	2 นาที	0.029
รวมต่อครั้ง			0.284

\* คิดค่าไฟหน่วยละ 3.5 บาทและมอเตอร์ที่ใช้มีกำลัง 250 วัตต์

จากการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 4-35 และตารางที่ 4-19



ภาพที่ 4 - 35 สรุปกระบวนการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอย

ตารางที่ 4 - 19 สรุปประสิทธิภาพการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอย

พลาสติกบริสุทธิ์					
ตำแหน่ง	น้ำหนัก (%)	เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
		พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
S1	100.00	100.00	100.00	49.99	50.01
S2	45.81	91.01	0.63	99.31	0.69
S3	54.19	8.99	99.37	8.29	91.71
พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว					
ตำแหน่ง	น้ำหนัก (%)	เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
		พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
S1	100.00	100.00	100.00	49.98	50.02
S2	47.27	89.32	5.24	94.45	5.55
S3	52.73	10.68	94.76	10.12	89.88

เมื่อเปรียบเทียบผลของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าผลเป็นไปดังตารางที่ 4-20

ตารางที่ 4 - 20 เปรียบเทียบผลจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ

เงื่อนไข	งานวิจัยของ Pongstabodee และคณะ (2008)	งานวิจัยของ Wang และคณะ (2012)	งานวิจัยนี้
กระบวนการที่ใช้	กระบวนการทำให้ ลอยแบบเลือกสรร (Selective Flotation)	กระบวนการทำให้ ลอยแบบอากาศ ละลาย	กระบวนการทำให้ลอย โดยการเหนี่ยวนำ อากาศผ่านใบกวน
สารเคลือบผิว (มิลลิกรัม/ลิตร)	CaLS; 200 CaCl <sub>2</sub> ; 0.1	Tannic acid; 25	Tannic acid; 5
สารเคลือบฟอง (มิลลิกรัม/ลิตร)	MIBC; 0.01 ppm	Terpineol; 5	MIBC; 5
เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ (นาที)	2	15	15
เวลาในการทำให้ลอย (นาที)	2	15	2
เปอร์เซ็นต์การแยกพีเอส (%)	99	97.45	89.32
เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์พีเอส (%)	N/A	90.12	94.45
เปอร์เซ็นต์การแยกเอบีเอส (%)	96.3	89.38	94.76
เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์เอบีเอส (%)	N/A	97.24	89.88

จากการออกแบบระบบการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสและเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศจากบรรยากาศภายนอกผ่านใบกวน ในงานวิจัยนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการแยกพลาสติกและทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการแยกได้ดี คือ ขนาดของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวนที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ (a/G) ค่า a/G สูงจะมีประสิทธิภาพการแยกดี และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ Wang และคณะ (2012) ดังตารางที่ 4-20 จะเห็นว่า

- เวลาที่ใช้ในการทำให้ลายน้อยกว่า ในงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการทำให้ลอยเพียง 2 นาที แต่ได้ประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Wang และคณะ (2012) ซึ่งใช้เวลาในการทำให้ลอยถึง 15 นาที จึงสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าและในงานวิจัย

ของ Pongstabodee และคณะ (2008) แม้ว่าจะใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 นาที แต่ระบบการแยกที่ใช้มีขนาดเล็กกว่ามาก ทำให้ปริมาณพลาสติกที่แยกได้แต่ละครั้งน้อย

- ในงานวิจัยนี้มีการใช้ใบกวนเป็นแหล่งกำเนิดฟองจึงไม่จำเป็นที่จะต้องมีหัวกระจายอากาศ ซึ่งงานวิจัยอื่นส่วนมากจะใช้อุปกรณ์สร้างฟองอากาศเป็นหัวกระจายอากาศ (Diffuser) หรือแผ่นเพลทกระจายอากาศ แต่ข้อเสียคือ อาจเกิดการอุดตัน มีความดันสูญเสียสูง และสิ้นเปลืองพลังงานจากการใช้ปั๊มอากาศ นอกจากนี้ปั๊มอากาศอาจเสียหายจากการที่น้ำไหลย้อนเข้าไปผ่านหัวกระจายอากาศในกรณีที่ไม่ได้

- ระบบนี้สามารถแยกพลาสติกได้ปริมาณมากและพลาสติกไม่มีการเกาะกลุ่มกัน เพราะใบกวนที่ทำหน้าที่เหนี่ยวนำอากาศเข้ามาให้เกิดฟองแล้ว ยังทำหน้าที่กวนไม่ให้พลาสติกมีการเกาะกลุ่มกันอีกด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแยกดีกว่าระบบที่พลาสติกเกาะกลุ่มกันได้ เพราะพลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าอาจถูกพลาสติกที่มีความหนาแน่นมากกว่ามาล้อมรอบ ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกลดลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย ข้อเสนอแนะ และบทประยุกต์เชิงวิศวกรรม

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการแยกพลาสติกพีเอสบกัเอบีเอสด้วยกระบวนการทำให้ลอยตัว จากการใช้ใบพัดกวาดตึงอากาศจากบรรยากาศภายนอกเข้าไปในน้ำเพื่อให้เกิดฟอง โดยเริ่มต้นจากการศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกซึ่งในพลาสติกที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ พลาสติกพีเอสและเอบีเอสทั้งแบบพลาสติกบริสุทธิ์และที่ผ่านการใช้งานแล้ว ศึกษาการแยกพลาสติกด้วยวิธีการลอย – จมซึ่งอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของพลาสติก ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติกทั้งในส่วนของการเคลือบผิว เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพและสารเคลือบฟอง สภาวะที่เหมาะสมในการกวนผสมและการเกิดฟอง โดยจะศึกษาตัวแปรด้านอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมของฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการนี้ อธิบายในรูปอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนท์ ( $a/G$ ) จากนั้นจะศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- การศึกษาสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำของพื้นผิวพลาสติกพีเอสและเอบีเอสด้วยวิธีการของ Lifshitz-Van de Waals/Lewis acid-base พบว่าค่าพลังงานพื้นผิวของเอบีเอสมีค่ามากกว่าพีเอส จึงมีความเป็นขั้วมากกว่า ทำให้เอบีเอสมีความชอบน้ำมากกว่าพีเอส และการเติมสารเคลือบผิวลงไป จะทำให้ชั้นน้ำที่อยู่บนพื้นผิวพลาสติกบางลง ส่งผลให้สารเคลือบผิวมีโอกาสมาเคลือบผิวพลาสติกได้มากขึ้น เมื่อเทียบค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติก น้ำและสารเคลือบผิว พบว่าสารเคลือบผิวมีโอกาสเคลือบผิวเอบีเอสได้มากกว่าพีเอส จึงเกิดการแยก

- การศึกษาการแยกพลาสติกด้วยวิธีการลอย – จมโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารปรับความหนาแน่น พบว่าพีเอสและเอบีเอสมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันมาก ทำให้การแยกด้วยวิธีการลอย – จมไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงควรเลือกใช้กระบวนการทำให้ลอยในการแยกพลาสติกผสมทั้งสองชนิดนี้

- การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก โดยทำการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารเคลือบผิว สารเคลือบฟองและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ พบว่าสาร

เคลือบผิวที่เหมาะสม คือ กรดแทนนิก มีความเลือกสรรในการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้ดีกว่าแคลเซียมลิกโนซัลไฟเนต ส่วนสารเคลือบฟอง เมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลมีความเลือกสรรในการแยกพลาสติกพีเอสกับเอบีเอสได้ดีกว่า และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพที่เหมาะสม คือ 15 นาที

- การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกวนผสมและการเกิดฟอง ในกระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศจากบรรยากาศภายนอกผ่านใบกวน ปัจจัยหลักที่มีผลต่อขนาดของฟองอากาศ คือ ขนาดของท่อนำอากาศและอัตราเร็วในการกวน และค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนต์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกด้วย

- การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกพลาสติกผสมออกจากกันด้วยกระบวนการทำให้ลอย ค่าอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสม ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะกับความเร็วเกรเดียนต์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกพลาสติกด้วย โดยเงื่อนไขที่ให้ค่า  $a/G$  สูงจะมีเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกดีกว่า ประสิทธิภาพการแยกพลาสติกบริสุทธิ์สูงสุด โดยพีเอสเท่ากับ 91% และเอบีเอสเท่ากับ 99% และสำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ประสิทธิภาพการแยกพีเอสสูงสุดเท่ากับ 89% และเอบีเอสเท่ากับ 95% มีเงื่อนไขดังนี้ ขนาดของท่อนำอากาศ (6.99 เซนติเมตร) อัตราเร็วในการกวน (675 รอบต่อนาที) ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนล (5 มิลลิกรัม/ลิตร) ความเข้มข้นของกรดแทนนิก (10 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับพลาสติกบริสุทธิ์และ 5 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว) โดยปรับสภาพเป็นเวลา 15 นาทีและใช้เวลาในการทำให้ลอย 2 นาที ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงจะสามารถแยกพีเอสและเอบีเอสอย่างละ 1 กิโลกรัมราคา 60 บาทต้องทำการแยกทั้งหมดประมาณ 40 ครั้ง คิดเป็นราคาต้นทุนเท่ากับ 11.37 บาท ดังนั้นกำไรจากการแยกจะมีค่าประมาณ 49 บาท

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

- ควรมีการศึกษามูลการแยกพลาสติกพีเอสและเอบีเอสที่ผ่านการใช้งานแล้วจากวัสดุอื่นด้วย เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากันเพื่อให้สามารถแยกได้ในช่วงความหนาแน่นที่กว้างขึ้น

- ในงานวิจัยนี้ใช้ถังแก้วที่มีความจุประมาณ 12 ลิตรเป็นถังปฏิบัติการในการแยกพลาสติก ซึ่งยังไม่มีความสะดวกมากนักในการแยกพลาสติกออกจากระบบ อีกทั้งงานวิจัยยังเป็น



แบบทีละเท (Batch) ดังนั้นต่อไปควรออกแบบระบบให้สะดวกต่อการนำพลาสติกออกจากระบบได้และเป็นแบบต่อเนื่อง

- ควรศึกษาประสิทธิภาพการแยกของพลาสติกชนิดอื่นด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการทำให้ลอยโดยการเหนี่ยวนำอากาศจากบรรยากาศผ่านใบกวนเพื่อปรับปรุงกลไกทำงานให้สามารถแยกพลาสติกได้หลากหลายชนิดขึ้น
- งานวิจัยนี้อุณหภูมิที่ใช้คืออุณหภูมิห้องมีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งในความเป็นจริงเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม อุณหภูมิที่ใช้จะสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นควรมีการศึกษาถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกพลาสติกระหว่างพีเอสกับเอบีเอส
- งานวิจัยนี้มีการควบคุมความเข้มข้นของสารเคลือบผิวและสารเคลือบฟอง ซึ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม สารเหล่านี้ไม่ควรจะค้างอยู่บนผิวพลาสติกหลังจากการทำความสะอาด เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลให้มีคุณภาพด้อยกว่าที่ผลิตจากพลาสติกบริสุทธิ์ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของสารเหล่านี้ต่อกระบวนการผลิตหรือหาความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่เหมาะสม

### 5.3 บทประยุกต์ทางวิศวกรรม

ในการออกแบบกระบวนการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสและเอบีเอส ปริมาณ 25 กรัม ด้วยกระบวนการทำให้ลอย โดยการเหนี่ยวนำอากาศจากบรรยากาศภายนอกผ่านใบพัดกวน ปัจจัยสำคัญที่ควรนำมาพิจารณา มี 4 ส่วน คือ ลักษณะของพลาสติก การปรับสภาพพื้นผิวพลาสติก สารละลายตัวกลางและการสร้างฟองอากาศ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติก จากการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบขั้นต้นที่เหมาะสมในการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอสชนิดละ 25 กรัม ได้ประสิทธิภาพการแยกพลาสติกบริสุทธิ์สูงสุด โดยพีเอสเท่ากับ 91% และเอบีเอสเท่ากับ 99% และสำหรับพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ประสิทธิภาพการแยกพีเอสสูงสุดเท่ากับ 89% และเอบีเอสเท่ากับ 95% มีดังนี้

ตารางที่ 5 - 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบขั้นต้นสำหรับการแยกพลาสติกผสมระหว่างพีเอสกับเอบีเอส

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบขั้นต้น	
ขนาดของท่อนำอากาศ (เซนติเมตร)	6.99
อัตราเร็วในการกววน (รอบต่อนาที)	675
ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอล	5
ความเข้มข้นของกรดแทนนิก (มิลลิกรัม/ลิตร)	
- พลาสติกบริสุทธิ์	10
- พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว	5
เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ (นาที)	15
เวลาในการทำให้ออย (นาที)	2
เวลาที่ใช้ในการแยก (นาที)	3

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ขวัญชัย ดีเฝ้าพันธุ์. การเก็บกลับคืนทรัพยากรและนำกลับมาใช้ใหม่, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. คู่มือแนวทางการลด คัดแยกและใช้ประโยชน์ขยะมูลฝอยสำหรับอาสาสมัครพิทักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมหมู่บ้าน. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://sichon.wu.ac.th/file/engineer-envi-20110303-112245-BC3YD.pdf> [24 มิถุนายน 2555]
- จิรสา กรงกรด. สารลดแรงตึงผิว. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: [http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp\\_7\\_2548\\_surfactant.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_7_2548_surfactant.pdf) [24 มิถุนายน 2555]
- ณภัทร คุณาจิตพิมล. การแยกขยะพลาสติกผสมโดยวิธีจุ่ม-ลอยร่วมกับซีเล็กทีฟโฟลเทชั่นเทคนิค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- นริศรา จิตรระกูลชัย. การคัดแยก ABS และ HIPS ด้วยกระบวนการ Froth Flotation ที่ใช้ Surfactant. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2549.
- นิตา ร่มสัมพันธ์. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเอนไซม์โปรติเอสที่ใช้ลอกกากไหมจาก Bacillus sp. C4 ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.
- ธงชัย เถกิงศักดิ์ากุล. การคัดแยกขยะพลาสติกผสมโดยประยุกต์วิธีโน้มถ่วงและซีเล็กทีฟโฟลเทชั่นในคอลัมน์แบบกึ่งต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- บวรกิตติ เนคมานุรักษ์. การออกแบบระบบแยกพลาสติก HIPS และ ABS ที่ใช้ในเทคนิค Froth Flotation. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2549.
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยาและพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท้อป, 2551.

ฝ่ายสื่อสารองค์กร บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ: ปตท. (มหาชน), 2554.

พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. พลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2536.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. Zeta potential. [ออนไลน์]. 2010. แหล่งที่มา: [http://share.psu.ac.th /blog/easysci/17648](http://share.psu.ac.th/blog/easysci/17648) [20 สิงหาคม 2555]

มันสิน ตันฑุลเวศม์. วิศวกรรมกระดาษ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, กรม. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2544.

[ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: [www.onep.go.th/download/soe44/chap\\_9.doc](http://www.onep.go.th/download/soe44/chap_9.doc) [24 มิถุนายน 2555]

## ภาษาอังกฤษ

- AIChE. Mixing equipment (Impeller Type). 3<sup>rd</sup> edition. USA: American Institute of chemical engineers, 2001.
- Alter, H. The recovery of plastics from waste with reference to froth flotation. Resources, Conservation and Recycling. 43 (2005): 119 – 132.
- Bimal, P.S. Wetting mechanism in the flotation separation of plastics. Filtration & Separation. 35 (1998): 525 – 527.
- Burat, F., Guney, A. and Kangal, M.O. Selective separation of virgin and post – consumer polymers (PET and PVC) by flotation method. Waste Management. 29 (2009): 1807 – 1813.
- Carvalho, T., Durao, F., and Ferreira, C. Separation of packaging plastics by froth flotation in a continuous pilot plant. Waste Management. 30 (2010): 2209 – 2215.
- Chapple, D., Kresta, S.M., Wall, A. and Afacan, A. The effect of impeller and tank geometry on power number for a pitched blade turbine. Trans IChemE. 80 (2002): 364 – 372.
- Fraunholcz, N. Separation of waste plastics by froth flotation – a review, part 1. Mineral Engineering, 17 (2004): 261 – 268.
- Gorain, B.K., Franzidis, J.P. and Manlapig, E.V. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell part 1: effect on bubble size distribution. Minerals Engineering. 8 (1995): 615 – 635.
- Jirout, T., and Rieger, F. Impeller design for mixing of suspensions. Chemical Engineering Research and Design. 89 (2011): 1144 – 1151.
- Loubiere, K., Hebrard, G., and Guiraud, P. Dynamic of bubble growth and detachment from rigid and flexible orifices. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 81 (2003): 499 – 507.
- Marques, G.A. and Tenorio, J.A.S. Use of froth flotation to separate PVC/PET mixtures. Waste Management. 20 (2000): 265 – 269.
- McCabe, L., W., Smith, J., C., and Harriott, P. Unit operations of chemical engineering. Singapore: McGraw-Hill, 2001.

- Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton F. L., Stensel H. D. Wastewater engineering: treatment and reuse. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- National Metal and Materials Technology Center. Zeta potential a complete course in 5 minutes. [online]. 2008. Available from: <http://www.mtec.or.th/laboratory/powder/index.php/knowledge/18-zeta-potential-a-complete-cours-in-5-minutes> [2012, June 24]
- North American mixing forum. Mixing. [online]. 2012. Available from: <http://www.1mixing.net> [2012, June 24]
- Oh, J.T., Park, K.N., Park, J.W. and Kim, J.H. Effect of HLB value of surfactant on enzymatic deinking process. Ind. & Eng. Chemistry. 3 (1997): 7 – 12.
- Painmanakul, P., Sastaravet, P., Lersjintanakarn, S., and Khaodhiar, S. Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by induced air flotation (IAF) process. Chemical engineering research and design. 88 (2010): 693 – 702.
- Pongstabodee, S., Kunachitpimol, N., and Damronglerd, S. Combination of three-stage sink–float method and selective flotation technique for separation of mixed post–consumer plastic waste. Waste Management. 28 (2008): 475 – 483.
- Pohorecki, R., Moniuk, W., Bielski, P., and Sobieszuk, P. Diameter of bubbles in bubble column reactors operating with organic liquids. Chemical Engineering Research and Design. 83 (2005): 827–832.
- Ranade, V.V., and Joshi, J.B. Flow generated by pitched blade turbines. I. Measurement using laser Doppler anemometer. Chem. Eng. Commun. 81 (1989): 197 – 224.
- Rosen, M.J., and Kunjappu, J.T. Surfactants and interfacial phenomena. 4<sup>th</sup> Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2012.
- Sastry, V., S. et al. Solid-solid operations and equipment. [online]. 1999. Available from: <ftp://ftp.feq.ufu.br/Luis/Books/E-Books/Perry/Chap19.pdf> [2012, 14 July]
- Sardeing, R., Painmanakul, P., and Hebrard, G. Effect of surfactants on liquid-side mass transfer coefficients in gas–liquid systems: A first step to modeling. Chemical Engineering Science. 61 (2006): 6249 – 6260.

- Scheirs, J. Polymer recycling. Australia: John Wiley & Sons, 1998.
- Shashoua, Y. Conservation of plastics. Slovenia: Elsevier, 2008.
- Shen, H., Frossberg, E., and Pugh, R.J. Selective flotation separation of plastics by particle control. Resources, Conservation and Recycling. 33 (2001): 37-50.
- Shen, H., Frossberg, E., and Pugh, R.J. Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 196 (2002): 63 – 70.
- Shen, H., Frossberg, E., and Pugh, R.J. Selective flotation separation of plastics by chemical conditioning with methyl cellulose. Resources, Conservation and Recycling. 35 (2002): 229 – 241.
- Takoungsakdakun, T. and Pongstabodee, S. Separation of mixed post – consumer PET – POM – PVC plastic waste using selective flotation. Separation and Purification Technology. 54 (2007): 248 – 252.
- Tchobanoglous, G., Burton, L., F. and Stensel, H., D. Wastewater engineering treatment and reuse. 4<sup>th</sup> edition. Singapore: Metcalf & Eddy, Inc, 2002.
- Tomas, M., Linek, V., and Eva, P. Gas hold-up, mixing time and gas-liquid volumetric mass transfer coefficient of various multiple-impeller configurations: Rushton turbine, pitched blade and techmix impeller and their combinations. Chem. Eng. Sci. 58 (2003) 463 – 475.
- Wang, H., Guo, C., Fu, J., He, Z., Wei, L., Chen, X. and Zhuang, C. Adsorption behavior of weak hydrophilic substances on low – energy surface in aqueous medium. Applied Surface Science. 257 (2011): 7959 – 7967.
- Wang, H., Chen, X.L., Yang, G. and Li, Z. Application of dissolved air flotation on separation of waste plastics ABS and PS. Waste Management. 32 (2012): 1297 – 1305.
- Wang, H., Wang, C., Fu, J. and Gu, G. Wetting behavior and mechanism of wetting agents on low – energy surface. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 424 (2013): 10 – 17.

Wellman. Impeller. [online]. 2006. Available from: <http://www.wellman.co.th/dt05.html>

[2012, 14 July]

We-Ming, L., Hong-Zhang, W., Nai-Yu, C., and Yu-Li, L. Effect of the blade size on the vortex structure and gas dispersion in gas dispersion in gas-liquid stirred vessels with a single Rushton turbine impeller. Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) (2006) 166 – 175.

Wu, J., Zhu, Y. and Pullum, L. Impeller geometry effect on velocity and solids suspension. Trans IChemE. 79 (2001) 989 – 997.

Zhang, W., Nasset, J.E., Rao, R. and Finch, J.A. Characterizing frother through critical coalescence concentration (CCC) 95 – hydrophile – lipophile balance (HLB) relationship. Minerals. 2 (2012) 208 – 227.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
รายการคำนวณ

ตัวอย่างที่ ก-1 การคำนวณค่าพลังงานอิสระพื้นผิวของพีเอส

ของเหลวที่ใช้ทดสอบมี 5 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น กลีเซอรอล ฟอรัมาไมด์ ไดโอดีโอดีเทนและ เอทิลีนไกลคอล ซึ่งค่าพลังงานพื้นผิวของของเหลวแต่ละชนิดสามารถแสดงได้ดังตาราง

ตารางที่ 4-1 ค่าพลังงานพื้นผิวของของเหลวที่ใช้ทดสอบ

ของเหลวที่ใช้ทดสอบ	$\gamma_L$	$\gamma_L^{LW}$	$\gamma_L^+$	$\gamma_L^-$
น้ำกลั่น	72.8	21.8	25.5	25.5
กลีเซอรอล	64.0	34.0	3.92	57.4
ฟอรัมาไมด์	58.0	39.0	2.28	39.6
ไดโอดีโอดีเทน	50.8	50.8	0	0
เอทิลีนไกลคอล	48.0	29.0	1.92	47.0

ซึ่งของเหลวทั้ง 5 ชนิดนี้จะนำไปใช้หยดบนผิวพลาสติกเพื่อวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้นโดยมุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับพื้นผิวพีเอส สามารถแสดงได้ดังตารางที่

ตารางที่ 4-2 ค่ามุมสัมผัสของพีเอส

พื้นผิว	น้ำ (W)	กลีเซอรอล (G)	ฟอรัมาไมด์ (F)	ไดโอดีโอดีเทน (D)	เอทิลีนไกลคอล (E)
พีเอส (PS)	76.43	64.91	51.84	30.11	46.99

โดยค่าพลังงานอิสระพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากผลรวมของค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของ แวนเดอร์วาลส์กับค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของลิพิด ดังสมการที่ (4-1)

$$\gamma_s = \gamma_s^{LW} + \gamma_s^{AB} \quad (4-1)$$

ซึ่ง  $\gamma_s^{LW}$  หรือค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของแวนเดอร์วาลส์สามารถหาได้จากการวัดมุมสัมผัสด้วยของเหลวไม่มีขั้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ คือ ไดโอดีโอดีเทน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-3)

$$\gamma_s^{LW} = \left( \frac{(1+\cos\theta)\sqrt{\gamma_L^{LW}}}{2} \right)^2 \quad (4-3)$$

เนื่องจาก มุมสัมผัสที่วัดด้วยไดโอดมีเทนเท่ากับ 30.11 องศาและ  $\gamma_L^{LW}$  ของไดโอดมีเทนเท่ากับ 50.8 แทนค่าในสมการที่ (4-3)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \gamma_{PS}^{LW} &= \left( \frac{(1 + \cos(30.11))\sqrt{50.8}}{2} \right)^2 \\ \gamma_{PS}^{LW} &= 44.18 \end{aligned}$$

ซึ่ง  $\gamma_S^{AB}$  หรือค่าพลังงานพื้นผิวย่อยในส่วนของลิวอิสสามารถหาได้จากการวัดมุมสัมผัสด้วยของเหลวมีขั้ว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-4)

$$\gamma_S^{AB} = \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} \quad (4-4)$$

ซึ่งค่า  $\gamma_S^+, \gamma_S^-$  สามารถคำนวณได้จากการวัดมุมสัมผัสด้วยของเหลวมีขั้ว 2 ชนิด ( $p1$  แทนของเหลวมีขั้วชนิดที่หนึ่งและ  $p2$  แทนของเหลวมีขั้วชนิดที่สอง) มีสมการเมทริกซ์ดังสมการที่ (4-5)

$$\begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_S^+} \\ \sqrt{\gamma_S^-} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_{p1}^-} & \sqrt{\gamma_{p1}^+} \\ \sqrt{\gamma_{p2}^-} & \sqrt{\gamma_{p2}^+} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (1 + \cos\theta_{p1})\gamma_{p1} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_{p1}^{LW}} \\ (1 + \cos\theta_{p2})\gamma_{p2} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_{p2}^{LW}} \end{pmatrix} \quad (4-5)$$

WGD (น้ำกลั่น-กลีเซอรอล-ไดโอดมีเทน) ซึ่งของเหลวมีขั้ว ได้แก่ น้ำกลั่นและกลีเซอรอล โดยให้  $p1$  แทนน้ำกลั่น และ  $p2$  แทนกลีเซอรอล

เนื่องจาก มุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นเท่ากับ 76.43  
 มุมสัมผัสที่วัดด้วยกลีเซอรอลเท่ากับ 64.91  
 $\gamma_L^{LW}$  ของน้ำเท่ากับ 21.8  
 $\gamma_L^{LW}$  ของกลีเซอรอลเท่ากับ 34.0  
 $\gamma_W^-$  เท่ากับ 25.5 และ  $\gamma_W^+$  เท่ากับ 25.5  
 $\gamma_G^-$  เท่ากับ 57.4 และ  $\gamma_G^+$  เท่ากับ 3.92

แทนค่าในสมการที่ (4-5)

$$\text{จะได้} \quad \begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_{PS}^+} \\ \sqrt{\gamma_{PS}^-} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_W^-} & \sqrt{\gamma_W^+} \\ \sqrt{\gamma_G^-} & \sqrt{\gamma_G^+} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (1 + \cos\theta_W)\gamma_W - 2\sqrt{\gamma_{PS}^{LW}\gamma_W^{LW}} \\ (1 + \cos\theta_G)\gamma_G - 2\sqrt{\gamma_{PS}^{LW}\gamma_G^{LW}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_{PS}^+} \\ \sqrt{\gamma_{PS}^-} \end{pmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sqrt{25.5} & \sqrt{25.5} \\ \sqrt{57.4} & \sqrt{3.92} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (1 + \cos(76.43))(72.8) - 2\sqrt{(44.18)(21.8)} \\ (1 + \cos(64.91))(64.0) - 2\sqrt{(44.18)(34.0)} \end{pmatrix} \\
&= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ \sqrt{25.5}\sqrt{3.92} - \sqrt{57.4}\sqrt{25.5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{3.92} & -\sqrt{25.5} \\ -\sqrt{57.4} & \sqrt{25.5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1 + \cos(76.43))(72.8) - 2\sqrt{(44.18)(21.8)} \\ (1 + \cos(64.91))(64.0) - 2\sqrt{(44.18)(34.0)} \end{pmatrix} \\
&= -0.017693 \begin{pmatrix} 1.979899 & -5.049752 \\ -7.576279 & 5.049752 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 27.812816 \\ 13.624262 \end{pmatrix} \\
&= -0.017693 \begin{pmatrix} (1.979899 \times 27.812816) + (-5.049752 \times 13.624262) \\ (-7.576279 \times 27.812816) + (5.049752 \times 13.624262) \end{pmatrix} \\
&= -0.017693 \begin{pmatrix} -13.732578 \\ -141.918510 \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} \sqrt{\gamma_{PS}^+} \\ \sqrt{\gamma_{PS}^-} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0.242971 \\ 2.510964 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น  $\gamma_{PS}^+ = 0.06$  และ  $\gamma_{PS}^- = 6.31$

WFD (น้ำกลั่น-ฟอร์มาไมด์-ไดไฮโดรไมเทน) ซึ่งของเหลวมีขั้ว ได้แก่ น้ำกลั่นและฟอร์มาไมด์

โดยให้ p1 แทนน้ำกลั่น และ p2 แทนฟอร์มาไมด์

จากการคำนวณได้ค่า  $\gamma_{PS}^+ = 0.07$  และ  $\gamma_{PS}^- = 6.21$

WED (น้ำกลั่น-เอทิลีนไกลคอล-ไดไฮโดรไมเทน) ซึ่งของเหลวมีขั้ว ได้แก่ น้ำกลั่นและเอทิลีนไกลคอล โดยให้ p1 แทนน้ำกลั่น และ p2 แทนเอทิลีนไกลคอล

จากการคำนวณได้ค่า  $\gamma_{PS}^+ = 0.02$  และ  $\gamma_{PS}^- = 6.84$

ดังนั้น  $\gamma_{PS,ave}^+ = \frac{0.06+0.07+0.02}{3} = 0.05$  และ  $\gamma_{PS,ave}^- = \frac{6.31+6.21+6.84}{3} = 6.45$

$$\gamma_S^{AB} = \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-}$$

$$\gamma_{PS}^{AB} = \sqrt{0.05 \times 6.45} = 0.57$$

ดังนั้นค่าพลังงานอิสระพื้นผิวของพีเอสมีค่าเท่ากับ  $44.18 + 0.57 = 44.75$

ตัวอย่างที่ ก-2 การคำนวณค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพีเอส กรดแทนนิกและน้ำ

ค่าปฏิกิริยาของพลังงานอิสระพื้นผิวระหว่างพลาสติก น้ำและสารเคลือบผิวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-7)

$$\begin{aligned} \Delta G_{1W2} = \Delta G_{1W2}^{LW} + \Delta G_{1W2}^{AB} = & 2 \left( \sqrt{\gamma_1^{LW}} - \sqrt{\gamma_W^{LW}} \right) \left( \sqrt{\gamma_W^{LW}} - \sqrt{\gamma_2^{LW}} \right) \\ & + 2 \left( \sqrt{\gamma_W^+} (\sqrt{\gamma_1^-} + \sqrt{\gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_W^-}) \right. \\ & \left. + \sqrt{\gamma_W^-} (\sqrt{\gamma_1^+} + \sqrt{\gamma_2^+} - \sqrt{\gamma_W^+}) - \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+} \right) \quad (4-7) \end{aligned}$$

โดย 1 แทนพีเอส W แทนน้ำ และ 2 แทนกรดแทนนิก

เนื่องจาก  $\gamma_W^{LW}$  ของน้ำเท่ากับ 21.8

$\gamma_W^-$  เท่ากับ 25.5 และ  $\gamma_W^+$  เท่ากับ 25.5

$\gamma_S^{LW}$  ของพีเอสเท่ากับ 44.18

$\gamma_{PS}^-$  เท่ากับ 6.45 และ  $\gamma_{PS}^+$  เท่ากับ 0.05

$\gamma_S^{LW}$  ของกรดแทนนิกเท่ากับ 39.24

$\gamma_{TA}^-$  เท่ากับ 60.26 และ  $\gamma_{TA}^+$  เท่ากับ 0.47

แทนค่าลงในสมการที่ (4-7) จะได้

$$\Delta G_{PS-W-TA}^{LW} = 2(\sqrt{44.18} - \sqrt{21.8})(\sqrt{21.8} - \sqrt{39.24}) = -6.31$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{PS-W-TA}^{AB} = & 2(\sqrt{25.5}(\sqrt{6.45} + \sqrt{60.26} - \sqrt{25.5}) + \sqrt{25.5}(\sqrt{0.05} + \sqrt{0.47} - \\ & \sqrt{25.5}) - \sqrt{0.05 \times 60.26} - \sqrt{6.45 \times 0.47}) = 4.27 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } \Delta G_{PS-W-TA} = \Delta G_{PS-W-TA}^{LW} + \Delta G_{PS-W-TA}^{AB} = -6.31 + 4.27 = -2.04$$

ตัวอย่างที่ ก-3 การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกพลาสติก

เปอร์เซ็นต์การแยกคำนวณได้จากน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้ต่อน้ำหนักพลาสติกชนิดนั้นที่ใส่เข้าไปในระบบทั้งหมด สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-1)

$$\% \text{recovery} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้}}{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ใส่เข้าไปทั้งหมด}} \times 100 \quad (3-1)$$

เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์สามารถคำนวณได้จากน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ต้องการที่แยกออกมาได้ต่อน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่แยกออกมาได้ทั้งหมด สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-2)

$$\% \text{grade} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกชนิดที่ต้องการที่แยกออกมาได้}}{\text{น้ำหนักแห้งของพลาสติกทั้งหมดที่แยกออกมาได้}} \times 100 \quad (3-2)$$

ซึ่งพลาสติกพีเอสและเอบีเอสที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิก 0 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถแสดงได้ดังตารางที่ ค-1

ตารางที่ ค-1 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้นของกรดแทนนิก (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	23.78	22.75

ดังนั้นในส่วนลอยจะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพีเอสได้ ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแยกของพีเอส} = \frac{23.78}{25.01} \times 100 = 95.06\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของพีเอส} = \frac{23.78}{(23.78+22.75)} \times 100 = 51.10\%$$

ตัวอย่างที่ ก-4 การคำนวณขนาดฟองอากาศทำนายจากสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและขนาดของฟองอากาศที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

ตารางที่ 4-13 ขนาดของฟองอากาศจากการจัดการทดลองแบบ CCD และขนาดของฟองอากาศที่ได้จากสมการทำนายโดยใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

	ปัจจัย		ขนาดของฟองอากาศ (mm)
	ขนาดของท่อ (เซนติเมตร)	อัตราเร็วในการ การกวน (rpm)	ค่าสังเกต
การทดลอง	3.81	525	1.28±0.018

จากตารางที่ 4-13 จะทราบขนาดของฟองอากาศที่ได้จากการสังเกตที่เงื่อนไขต่างๆในการทดลองที่ 1 จากนั้นแทนค่าเงื่อนไขลงในสมการ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและขนาดของฟองอากาศที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

$$d_b = 1.53993 - 0.20419X_1 + 0.00017X_2 + 0.02546X_1^2 + 3.35433 \times 10^{-7}X_2^2 - 0.00013 X_1X_2$$

โดย  $X_1$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำอากาศ หน่วย เซนติเมตร

$X_2$  คือ อัตราเร็วในการกวน หน่วย รอบต่อนาที

จะได้

$$\begin{aligned} d_b &= 1.53993 - 0.20419(3.81) + 0.00017(525) + 0.02546(3.81)^2 + 3.35433 \times 10^{-7}(525)^2 - \\ &0.00013(3.81)(525) \\ &= 1.05 \end{aligned}$$

จากนั้นหาค่าความคลาดเคลื่อนแบบ RSME ได้จาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Y_t^S - Y_t^a)^2}$$

โดย  $Y_t^S$  คือค่าประมาณจากแบบจำลอง

$Y_t^a$  คือค่าที่ได้จากการสังเกต

T คือจำนวนคาบที่ใช้ในการประมาณแบบจำลอง



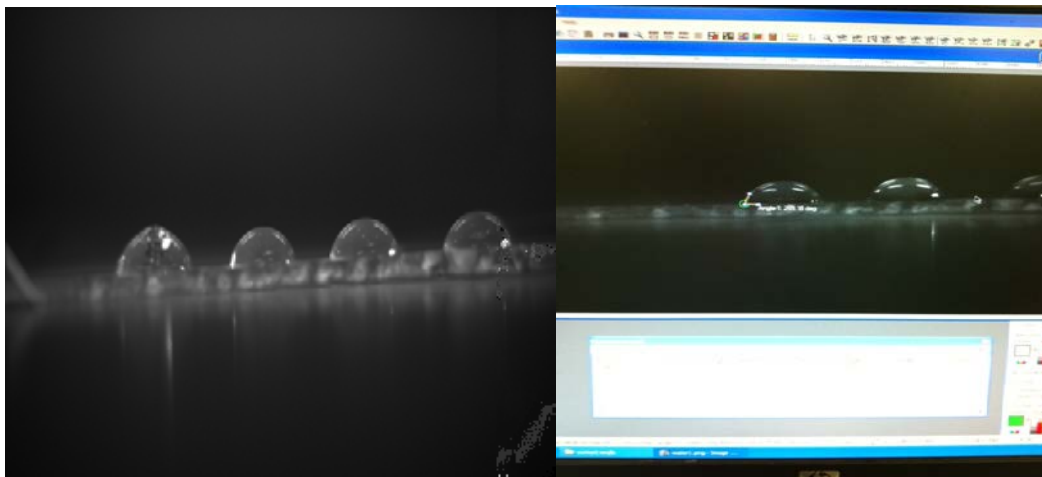
เนื่องจากค่าประมาณแบบจำลองเท่ากับ 1.05 ค่าที่ได้จากการสังเกตเท่ากับ 1.28 และจำนวนค่าที่ใช้ในการประมาณแบบจำลองเท่ากับ 2 แทนค่าลงในสมการจะได้

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{2}(1.05 - 1.28)^2} = 0.16$$

ดังนั้นในการทดลองที่ 1 ขนาดฟองอากาศที่ทำนายจากสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและขนาดของฟองอากาศที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองมีค่าเท่ากับ 1.05 มิลลิเมตรและมีความคลาดเคลื่อนแบบ RMSE เท่ากับ 0.16

ภาคผนวก ข

การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



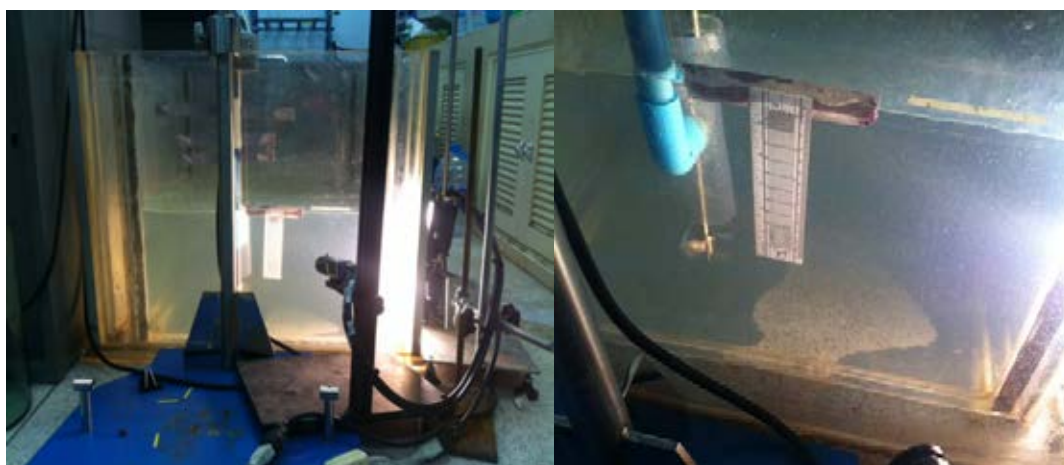
ภาพที่ ข-1 ตัวอย่างมุมสัมผัสและการวิเคราะห์มุมสัมผัสด้วยซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ



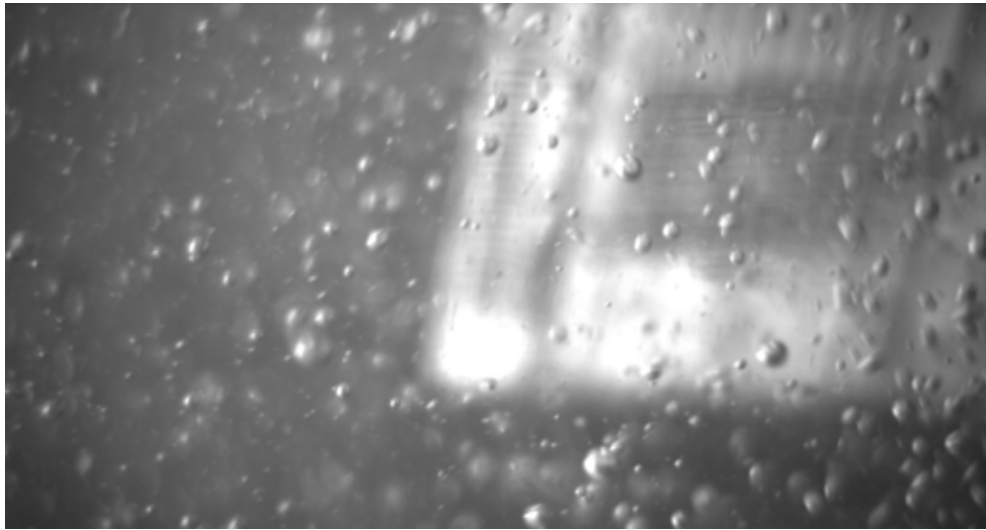
ภาพที่ ข-2 การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาขนาดของฟองอากาศโดยการจัดการทดลองแบบ Plackett – Burman



ภาพที่ ข-3 ตัวอย่างฟองอากาศที่ได้จากการจัดการทดลองแบบ Plackett -Burman



ภาพที่ ข-4 การทดลองเพื่อวิเคราะห์หาขนาดของฟองอากาศโดยการจัดการทดลองแบบ CCD



ภาพที่ ข-5 ตัวอย่างฟองอากาศที่ได้จากการจัดการทดลองแบบ CCD



ภาพที่ ข-6 การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการแยกพลาสติกผสม

ภาคผนวก ค

การศึกษาการแยกพลาสติกด้วยวิธีลอย-จม

ตารางที่ ค-1 ความหนาแน่นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ (%w/v)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
5	1.02
7	1.04
10	1.06
20	1.13
30	1.21

ตารางที่ ค-2 เปอร์เซ็นต์การลดยของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่างๆ

ความเข้มข้น ของแคลเซียม คลอไรด์ (%w/v)	ใส่เข้า (ชิ้น)		พีเอส-ลย (ชิ้น)			เอบีเอส-ลย (ชิ้น)			เปอร์เซ็นต์การ ลย (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	พีเอส	เอบีเอส
0	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0
7	20	20	1	1	1	0	0	0	5	0
10	20	20	20	20	20	5	4	4.5	100	22.5
20	20	20	20	20	20	20	20	20	100	100
30	20	20	20	20	20	20	20	20	100	100

ตารางที่ ค-3 เปอร์เซ็นต์การลดยของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของแคลเซียม  
คลอไรด์ต่างๆ

ความเข้มข้น ของแคลเซียม คลอไรด์ (%w/v)	ใส่เข้า (ชิ้น)		พีเอส-ลอย (ชิ้น)			เอบีเอส-ลอย (ชิ้น)			เปอร์เซ็นต์การ ลอย (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	พีเอส	เอบีเอส
0	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20	20	4	3	3.5	0	0	0	17.5	0
7	20	20	17	17	17	4	5	4.5	85	22.5
10	20	20	20	20	20	20	20	20	100	100
20	20	20	20	20	20	20	20	20	100	100
30	20	20	20	20	20	20	20	20	100	100



ภาคผนวก ง

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับพื้นผิวพลาสติก

ตารางที่ ง-1 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของกรดแทน  
นิกต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้น ของกรดแทน นิก (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	23.78	22.75	95.06	90.97	51.10	48.90
5	25.02	25.00	22.52	0.52	90.02	2.09	97.73	2.27
10	25.01	25.02	22.76	0.16	91.01	0.63	99.31	0.69
15	25.01	25.02	7.75	0.08	30.99	0.33	98.96	1.04
25	25.01	25.01	0.62	0.05	2.46	0.19	92.75	7.25

ตารางที่ ง-2 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของกรดแทน  
นิกต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้น ของกรดแทน นิก (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	23.78	22.75	95.06	90.97	51.10	48.90
5	25.02	25.00	22.52	0.52	90.02	2.09	97.73	2.27
10	25.01	25.02	22.76	0.16	91.01	0.63	99.31	0.69
15	25.01	25.02	7.75	0.08	30.99	0.33	98.96	1.04
25	25.01	25.01	0.62	0.05	2.46	0.19	92.75	7.25

ตารางที่ ง-3 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้น ของกรดแทน นิก (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.03	25.04	22.26	20.36	88.94	81.31	52.24	47.76
5	25.02	25.03	22.13	1.48	88.45	5.93	93.71	6.29
10	25.01	25.02	5.52	0.10	22.09	0.42	98.15	1.85
15	25.02	25.01	2.30	0.05	9.18	0.20	97.84	2.16
25	25.01	25.02	1.13	0.00	4.51	0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ง-4 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของกรดแทนนิกต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้น ของกรดแทน นิก (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.03	25.04	2.77	4.68	11.06	18.69	37.17	62.83
5	25.02	25.03	2.89	23.55	11.55	94.07	10.93	89.07
10	25.01	25.02	19.48	24.92	77.91	99.58	43.88	56.12
15	25.02	25.01	22.73	24.96	90.82	99.80	47.66	52.34
25	25.01	25.02	23.88	25.02	95.49	100.00	48.84	51.16

ตารางที่ ง-5 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้น ของแคลเซียม ลิกโนซัลโฟเนต (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	23.78	22.75	95.06	90.97	51.10	48.90
10	25.01	25.02	22.42	1.01	89.64	4.02	95.71	4.29
100	25.00	25.01	22.12	0.55	88.47	2.22	97.56	2.44
250	25.00	25.00	14.49	0.00	57.97	0.00	100.00	0.00
500	25.00	25.01	2.54	0.00	10.17	0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ง-6 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆ ในส่วนจม

ความเข้มข้น ของแคลเซียม ลิกโนซัลโฟเนต (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	1.24	2.26	4.94	9.03	35.36	64.64
10	25.01	25.02	1.59	24.01	6.37	95.98	6.22	93.78
100	25.00	25.01	2.88	24.45	11.53	97.78	10.54	89.46
250	25.00	25.00	10.51	25.00	42.03	100.00	29.59	70.41
500	25.00	25.01	22.46	25.01	89.83	100.00	47.31	52.69

ตารางที่ ง-7 เปรอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้น ของแคลเซียม ลิกโนซัลโฟเนต (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	23.78	22.75	95.06	90.97	51.10	48.90
10	25.01	25.01	18.34	0.84	73.33	3.36	95.61	4.39
100	25.02	25.02	4.24	0.40	16.94	1.60	91.37	8.63
250	25.01	25.04	0.94	0.36	3.77	1.44	72.42	27.58
500	25.01	25.02	0.41	0.23	1.65	0.93	64.03	35.97

ตารางที่ ง-8 เปรอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของแคลเซียมลิกโนซัลโฟเนตต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้น ของแคลเซียม ลิกโนซัลโฟเนต (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	1.24	2.26	4.94	9.03	35.36	64.64
10	25.01	25.01	6.67	24.17	26.67	96.64	21.63	78.37
100	25.02	25.02	20.78	24.62	83.06	98.40	45.77	54.23
250	25.01	25.04	24.06	24.68	96.23	98.56	49.37	50.63
500	25.01	25.02	24.60	24.79	98.35	99.07	49.81	50.19

ตารางที่ ง-9 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	25.00	25.01	22.61	0.45	90.42	1.78	98.07	1.93
5	25.00	25.00	18.15	0.43	72.59	1.71	97.70	2.30
10	25.01	25.01	11.53	0.51	46.10	2.05	95.74	4.26
25	25.01	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ง-10 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.02	25.01	25.02	100.00	100.00	49.99	50.01
2.5	25.00	25.01	2.39	24.57	9.58	98.22	8.88	91.12
5	25.00	25.00	6.85	24.57	27.41	98.29	21.81	78.19
10	25.01	25.01	13.48	24.49	53.91	97.95	35.50	64.50
25	25.01	25.00	25.01	25.00	100.00	100.00	50.01	49.99

ตารางที่ ง-11 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	8.84	0.41	35.36	1.65	95.55	4.45
2.5	25.01	25.03	22.68	1.34	90.68	5.37	94.41	5.59
5	25.00	25.02	22.95	5.96	91.81	23.83	79.39	20.61
10	25.02	25.03	23.56	8.55	94.18	34.15	73.38	26.62
25	25.01	25.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ง-12 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether ต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้นของ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	16.16	24.60	64.64	98.35	39.66	60.34
2.5	25.01	25.03	2.33	23.68	9.32	94.63	8.96	91.04
5	25.00	25.02	2.05	19.06	8.19	76.17	9.70	90.30
10	25.02	25.03	1.46	16.48	5.82	65.85	8.12	91.88
25	25.01	25.01	25.01	25.01	100.00	100.00	50.00	50.00

ตารางที่ ง-13 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอลต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้น ของ MIBC (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.5	25.00	25.02	12.17	0.02	48.67	0.07	99.86	0.14
5	25.01	25.02	23.76	0.16	95.01	0.63	99.34	0.66
10	25.02	25.01	21.62	3.60	86.41	14.39	85.73	14.27
25	25.00	25.01	21.27	6.23	85.06	24.92	77.33	22.67

ตารางที่ ง-14 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บีนอลต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้น ของ MIBC (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.02	25.01	25.02	100.00	100.00	49.99	50.01
2.5	25.00	25.02	12.83	25.00	51.33	99.93	33.92	66.08
5	25.01	25.02	1.25	24.86	4.99	99.37	4.78	95.22
10	25.02	25.01	3.40	21.41	13.59	85.61	13.70	86.30
25	25.00	25.01	3.73	18.78	14.94	75.08	16.59	83.41



ตารางที่ ง-15 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลต่างๆในส่วนลอย

ความเข้มข้น ของ MIBC (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	8.84	0.41	35.36	1.65	95.55	4.45
2.5	25.01	25.03	12.29	0.61	49.15	2.43	95.28	4.72
5	25.02	25.03	22.13	1.48	88.45	5.93	93.71	6.29
10	25.00	25.02	22.50	6.91	89.98	27.61	76.51	23.49
25	25.02	25.03	23.45	11.23	93.73	44.88	67.61	32.39

ตารางที่ ง-16 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ความเข้มข้นของเมทิลไอโซบิวทิลคาร์บิโนลต่างๆในส่วนจม

ความเข้มข้น ของ MIBC (mg/l)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	16.16	24.60	64.64	98.35	39.66	60.34
2.5	25.01	25.03	12.71	24.42	50.85	97.57	34.24	65.76
5	25.02	25.03	2.89	23.55	11.55	94.07	10.93	89.07
10	25.00	25.02	2.50	18.11	10.02	72.39	12.15	87.85
25	25.02	25.03	1.57	13.79	6.27	55.12	10.21	89.79

ตารางที่ ง-17 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ปรับสภาพที่เวลาต่างๆ  
ในส่วนลอย

เวลาที่ใช้ในการ ปรับสภาพ (นาทีก)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	23.78	22.75	95.06	90.97	51.10	48.90
5	25.01	25.01	22.97	1.73	91.84	6.91	93.00	7.00
10	25.01	25.01	22.75	0.91	90.99	3.63	96.16	3.84
15	25.01	25.02	22.76	0.16	91.01	0.63	99.31	0.69
30	25.00	25.01	20.37	0.15	81.47	0.58	99.29	0.71

ตารางที่ ง-18 เปอร์เซ็นต์การลอยและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ปรับสภาพที่เวลาต่างๆ  
ในส่วนจม

เวลาที่ใช้ในการ ปรับสภาพ (นาทีก)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
0	25.01	25.01	1.24	2.26	4.94	9.03	35.36	64.64
5	25.01	25.01	2.04	23.28	8.16	93.09	8.06	91.94
10	25.01	25.01	2.25	24.10	9.01	96.37	8.55	91.45
15	25.01	25.02	2.25	24.86	8.99	99.37	8.29	91.71
30	25.00	25.01	4.63	24.86	18.53	99.42	15.71	84.29

ตารางที่ ง – 19 ค่าแรงตึงผิวของสารละลายที่ความเข้มข้นต่างๆ

สารละลาย	แรงตึงผิว (mN/m)
MIBC 2.5 mg/l	69.6
MIBC 5 mg/l	65.8
MIBC 25 mg/l	66.8
Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 2.5 mg/l	73.3
Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 5 mg/l	68.0
Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 10 mg/l	62.8
Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether 25 mg/l	56.6

ภาคผนวก จ

การศึกษาปัจจัยหลักของกระบวนการทำให้ลอย

ตารางที่ จ-1 ผลทางสถิติจากการวิเคราะห์สมการถดถอยจากขนาดของฟองอากาศที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟองในการจัดการทดลองแบบ CCD

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.030	0.029	0.006	0.13	0.98
Linear	2	0.016	0.006	0.008	0.17	0.85
C1	1	0.015	0.004	0.015	0.34	0.58
C2	1	0.000	0.000	0.000	0.01	0.94
Square	2	0.011	0.011	0.005	0.12	0.89
C1*C2	1	0.010	0.011	0.011	0.24	0.65
C2*C2	1	0.000	0.000	0.000	0.01	0.93
Interaction	1	0.003	0.003	0.003	0.06	0.82
C1*C2	1	0.003	0.003	0.003	0.06	0.82
Residual Error	5	0.223	0.223	0.045		
Lack-of-Fit	3	0.223	0.223	0.074	255.16	0.00
Pure Error	2	0.001	0.001	0.000		
Total	10	0.252				

ตารางที่ จ-2 ผลทางสถิติจากการวิเคราะห์สมการถดถอยจากขนาดของฟองอากาศที่ใช้เมทิลไฮโซบิวทิลคาร์บิโนลเป็นสารเคลือบฟองในการจัดการทดลองแบบ CCD

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.040	0.040	0.008	0.3	0.90
Linear	2	0.002	0.033	0.017	0.63	0.57
C1	1	0.002	0.001	0.001	0.04	0.85
C2	1	0.000	0.018	0.019	0.68	0.45
Square	2	0.037	0.037	0.018	0.69	0.54
C1*C2	1	0.008	0.001	0.001	0.03	0.87
C2*C2	1	0.028	0.028	0.028	1.07	0.35
Interaction	1	0.001	0.001	0.001	0.02	0.88
C1*C2	1	0.001	0.001	0.001	0.02	0.88
Residual Error	5	0.133	0.133	0.027		
Lack-of-Fit	3	0.133	0.133	0.044	202.90	0.01
Pure Error	2	0.000	0.000	0.000		
Total	10	0.173				

ตารางที่ ๑-3 ผลทางอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมจากการจัดการทดลองแบบ CCD ที่ใช้ Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

การทดลอง	ขนาดของฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	ความเร็วลอยตัวของฟองอากาศ (เมตร/วินาที)	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ซม./วินาที)	ความถี่ในการเกิดฟอง (ต่อวินาที)
1	1.28	0.108	0.46	422.78
2	1.17	0.095	1.25	1487.15
3	1.27	0.108	1.00	931.52
4	1.06	0.095	2.79	4475.68
5	0.93	0.095	1.44	3366.30
6	0.95	0.095	1.44	3176.49
7	0.97	0.095	1.44	3023.25
8	0.93	0.095	0.56	1324.66
9	0.90	0.095	2.32	6071.60
10	0.82	0.085	0.62	2135.04
11	0.87	0.090	2.25	6637.31

ตารางที่ ๑-4 ผลทางอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมจากการจัดการทดลองแบบ CCD ที่ใช้  
Polyoxyethylene (5) Lauryl Ether เป็นสารเคลือบฟอง

การทดลอง	พื้นที่ผิวสัมผัส จำเพาะ (ต่อเมตร)	ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที)	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ ผิวสัมผัสจำเพาะกับ ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที/เมตร)
1	0.06	69.97	0.001
2	0.19	69.97	0.003
3	0.12	137.83	0.001
4	0.46	137.83	0.003
5	0.27	102.00	0.003
6	0.26	102.00	0.003
7	0.26	102.00	0.003
8	0.11	102.00	0.001
9	0.45	102.00	0.004
10	0.15	55.52	0.003
11	0.48	157.04	0.003



ตารางที่ ๑-5 ผลทางอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมจากการจัดการทดลองแบบ CCD ที่ใช้เมล็ด  
ไอโซบิวทิลคาร์บีนอลเป็นสารเคลือบฟอง

การทดลอง	ขนาดของ ฟองอากาศ (มิลลิเมตร)	ความเร็วลอยตัว ของฟองอากาศ (เมตร/วินาที)	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ซม./วินาที)	ความถี่ในการเกิด ฟอง(ต่อวินาที)
1	1.29	0.108	0.46	411.28
2	1.29	0.108	1.25	1115.93
3	1.13	0.095	1.00	1329.52
4	1.08	0.095	2.79	4258.83
5	1.04	0.095	1.44	2454.67
6	1.02	0.095	1.44	2554.26
7	1.01	0.095	1.44	2676.68
8	0.95	0.095	0.56	1252.38
9	0.90	0.095	2.32	6112.68
10	0.99	0.095	0.62	1228.09
11	1.20	0.100	2.25	2487.63

ตารางที่ ๑-6 ผลทางอุทกพลศาสตร์และการกวนผสมจากการจัดการทดลองแบบ CCD ที่ใช้เมล็ด  
ไอโซบิวทิลคาร์บีนอลเป็นสารเคลือบฟอง

การทดลอง	พื้นที่ผิวสัมผัส จำเพาะ (ต่อเมตร)	ความเร็วเกรเดียนท์ (ต่อวินาที)	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ ผิวสัมผัสจำเพาะกับ ความเร็วเกรเดียนท์ (วินาที/เมตร)
1	0.06	69.97	0.001
2	0.15	69.97	0.002
3	0.16	137.83	0.001
4	0.45	137.83	0.003
5	0.24	102.00	0.002
6	0.25	102.00	0.002
7	0.25	102.00	0.003
8	0.10	102.00	0.001
9	0.45	102.00	0.004
10	0.11	55.52	0.002
11	0.31	157.04	0.002

ภาคผนวก จ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกพลาสติกผสมออกจากกัน  
ด้วยกระบวนการทำให้ลอย

ตารางที่ ๑-1 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่เวลาในการทำให้ลอย  
ต่างๆในส่วนลอย

เวลาที่ใช้ใน การทำให้ลอย (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
2	25.01	25.02	22.76	0.16	91.01	0.63	99.31	0.69
5	25.01	25.01	22.67	0.21	90.62	0.85	99.07	0.93
10	25.00	25.01	22.75	0.18	91.01	0.72	99.22	0.78
15	25.01	25.01	22.56	0.15	90.22	0.61	99.33	0.67
20	25.01	25.01	22.37	0.21	89.44	0.85	99.06	0.94

ตารางที่ ๑-2 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เวลาในการทำให้ลอย  
ต่างๆในส่วนจม

เวลาที่ใช้ใน การทำให้ลอย (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความ บริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
2	25.01	25.02	2.25	24.86	8.99	99.37	8.29	91.71
5	25.01	25.01	2.35	24.80	9.38	99.15	8.64	91.36
10	25.00	25.01	2.25	24.83	8.99	99.28	8.30	91.70
15	25.01	25.01	2.45	24.86	9.78	99.39	8.96	91.04
20	25.01	25.01	2.64	24.80	10.56	99.15	9.63	90.37

ตารางที่ ข-3 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เวลาในการทำให้ลอยต่างๆในส่วนลอย

เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
2	25.02	25.03	22.35	1.31	89.32	5.24	94.45	5.55
5	25.00	25.01	22.17	1.21	88.68	4.85	94.81	5.19
10	25.01	25.01	22.15	1.38	88.57	5.52	94.14	5.86
15	25.01	25.01	22.56	1.25	90.23	5.01	94.74	5.26
20	25.01	25.01	22.41	1.55	89.62	6.21	93.52	6.48

ตารางที่ ข-4 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เวลาในการทำให้ลอยต่างๆในส่วนจม

เวลาที่ใช้ในการทำให้ลอย (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
2	25.02	25.03	2.67	23.72	10.68	94.76	10.12	89.88
5	25.00	25.01	2.83	23.80	11.32	95.15	10.63	89.37
10	25.01	25.01	2.86	23.63	11.43	94.48	10.79	89.21
15	25.01	25.01	2.44	23.76	9.77	94.99	9.32	90.68
20	25.01	25.01	2.60	23.46	10.39	93.79	9.97	90.03

ตารางที่ ๕-5 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่เวลาในการแยกต่างๆใน  
ส่วนลอย

เวลาที่ใช้ในการแยก (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
1	25.01	25.02	22.76	0.16	91.01	0.63	99.31	0.69
3	25.01	25.02	22.92	0.16	91.66	0.63	99.32	0.68
5	25.01	25.02	22.92	0.16	91.66	0.63	99.32	0.68
10	25.01	25.02	22.92	0.16	91.66	0.63	99.32	0.68
20	25.01	25.02	22.92	0.16	91.66	0.63	99.32	0.68

ตารางที่ ๕-6 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่เวลาในการแยกต่างๆใน  
ส่วนจม

เวลาที่ใช้ในการแยก (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
1	25.01	25.02	2.25	24.86	8.99	99.37	8.29	91.71
3	25.01	25.02	2.09	24.86	8.34	99.37	7.74	92.26
5	25.01	25.02	2.09	24.86	8.34	99.37	7.74	92.26
10	25.01	25.02	2.09	24.86	8.34	99.37	7.74	92.26
20	25.01	25.02	2.09	24.86	8.34	99.37	7.74	92.26

ตารางที่ ๑-7 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เวลาในการแยกต่างๆในส่วนลอย

เวลาที่ใช้ในการแยก (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
1	25.02	25.03	22.35	1.31	89.32	5.24	94.45	5.55
3	25.01	25.01	22.56	1.42	90.21	5.67	94.09	5.91
5	25.00	25.01	22.56	1.42	90.25	5.67	94.09	5.91
10	25.01	25.01	22.56	1.42	90.22	5.67	94.09	5.91
20	25.01	25.01	22.37	1.42	89.45	5.67	94.04	5.96

ตารางที่ ๑-8 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่เวลาในการแยกต่างๆในส่วนจม

เวลาที่ใช้ในการแยก (นาที)	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
1	25.02	25.03	2.67	23.72	10.68	94.76	10.12	89.88
3	25.01	25.01	2.45	23.59	9.79	94.33	9.40	90.60
5	25.00	25.01	2.44	23.59	9.75	94.33	9.37	90.63
10	25.01	25.01	2.45	23.60	9.78	94.33	9.40	90.60
20	25.01	25.01	2.64	23.59	10.55	94.33	10.06	89.94

ตารางที่ ๑-9 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เงื่อนไขทางอุทก  
พลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่างๆในส่วนลอย

เงื่อนไข a/G	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
สูง	25.01	25.02	22.76	0.16	91.01	0.63	99.31	0.69
ปานกลาง	25.01	25.01	18.93	0.00	75.67	0.00	100.00	0.00
ต่ำ	25.01	25.01	1.18	0.00	4.72	0.00	100.00	0.00

ตารางที่ ๑-10 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกบริสุทธิ์ที่ใช้เงื่อนไขทางอุทก  
พลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่างๆในส่วนจม

เงื่อนไข a/G	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
สูง	25.01	25.02	2.25	24.86	8.99	99.37	8.29	91.71
ปานกลาง	25.01	25.01	6.08	25.01	24.33	100.00	19.57	80.43
ต่ำ	25.01	25.01	23.83	25.01	95.28	100.00	48.79	51.21



ตารางที่ จ-11 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่างๆในส่วนลอย

เงื่อนไข a/G	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนลอย (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
สูง	25.02	25.03	22.35	1.31	89.32	5.24	94.45	5.55
ปานกลาง	25.00	25.01	18.88	1.62	75.51	6.47	92.10	7.90
ต่ำ	25.01	25.02	16.96	1.77	67.81	7.07	90.55	9.45

ตารางที่ จ-12 เปอร์เซ็นต์การแยกและความบริสุทธิ์ของพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ใช้เงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์ของฟองอากาศและการกวนผสมต่างๆในส่วนจม

เงื่อนไข a/G	ใส่เข้า (กรัม)		ส่วนจม (กรัม)		เปอร์เซ็นต์การแยก (%)		เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (%)	
	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส	พีเอส	เอบีเอส
สูง	25.02	25.03	2.67	23.72	10.68	94.76	10.12	89.88
ปานกลาง	25.00	25.01	6.12	23.39	24.49	93.53	20.74	79.26
ต่ำ	25.01	25.02	8.05	23.25	32.19	92.93	25.72	74.28

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวภัทรศิริ พักแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 19 เดือนธันวาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานประชุม International Conference on Environmental and Hazardous Substance Management towards a Green Economy จัดที่โรงแรมอิมพีเรียล ควีนส์ปาร์ก ในชื่อหัวข้อ Study of Bubble Hydrodynamic and Mixing Parameters in Induced Air Flotation (IAF) with Mixing Devices for Plastic Separation Process วันที่ 21 – 23 พฤษภาคม 2556