



การแยกไมโครพลาสติกด้วยไมโคร/นาโนบับเบิลเทคโนโลยี



โดย

นางสาวฉัตรวรรณ พูลวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การแยกไมโครพลาสติกด้วยไมโคร/นาโนบับเบิลเทคโนโลยี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

MICRO/NANO-BUBBLES TECHNOLOGY FOR MICROPLASTICS SEPARATION



By
MISS Thittawan POOLWONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การแยกไมโครพลาสติกด้วยไมโคร/นาโนบับเบิลเทคโนโลยี
โดย	นางสาวธิดารรณ พูลวงศ์
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจิระจำเนียร)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	
	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)	
	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)	
	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน)	
	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ์)	

61402228 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : ไมโครพลาสติก, ไมโคร/นาโนบับเบิลเทคโนโลยี, การบำบัดน้ำเสีย

นางสาว อธิวรรณ พูลวงศ์: การแยกไมโครพลาสติกด้วยไมโคร/นาโนบับเบิลเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องและเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC), polyamide 6 (PA 6), polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) และ polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 38-106, 106-1,000 และ 1,000-3,000 ไมโครเมตร ออกจากรูน้ำ ด้วยเทคโนโลยี micro/nano-bubbles โดยใช้ชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น วิธีการดำเนินงานในขั้นแรกเป็นการบดและ sieve พลาสติกชนิดต่างๆ เพื่อให้ได้ผง microplastic ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ต้องการสำหรับนำไปทดสอบการแยกออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองที่ติดตั้งขึ้น โดยเติม microplastic ที่น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g ลงในถังสอยตะกอน จากนั้นผลิตน้ำ bubbles ด้วยเครื่องผลิต MNBs โดยใช้เวลาที่ microplastic สัมผัส bubbles เป็น 10, 20 และ 30 นาที จากนั้น microplastic ที่ถูกแยกออกจากน้ำจะผ่านส่วนน้ำล้นไปยังปีกเกอร์เพื่อนำไปกรองและชั่งน้ำหนัก microplastic ที่แห้งแล้วเพื่อคำนวณ %removal efficiency ติดตามการเกิดของ MNBs โดยทำการวัดค่า zeta-potential และวัดการกระจายตัวของขนาด MNBs ผลการวิจัยพบว่า ค่า zeta-potential ที่ติดลบแสดงถึงประจุลบที่ผิวของ MNBs เมื่อใช้เวลาในการผลิต MNBs เพิ่มขึ้น ค่า zeta-potential มีแนวโน้มที่ติดลบมากขึ้น โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเล็กลงตามเวลาในการผลิต MNBs ที่เพิ่มขึ้นด้วย microplastic แต่ละชนิดมีความสามารถในการล่อยที่แตกต่างกัน microplastic ชนิด PLA ล่อยได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น PVC, PET, PS, PBAT, PA 6 และ PBS ตามลำดับ หากเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นความสามารถในการล่อยของ microplastic จะเพิ่มขึ้นด้วย และ microplastic ที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถล่อยได้ดีกว่า microplastic ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ รวมไปถึงการเปลี่ยนก๊าซที่ใช้ผลิต MNBs จากการใช้ air เป็น CO₂ จะทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยก PA 6 และ PBS ออกจากน้ำดีขึ้น แต่ผลจะตรงกันข้ามกับ PLA ซึ่งแสดงว่าชนิดของ MNBs มีอิทธิพลต่อการเลือกจับกับ microplastic

61402228 : Major POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

Keyword : MICROPLASTIC, MICRO/NANO-BUBBLES TECHNOLOGY, WATER TREATMENT

MISS Thittawan POOLWONG : Micro/nano-bubbles technology for microplastics separation Thesis advisor : Associate Professor Dr. Supakij Suttiruengwong

This research aimed to study the use of micro/nano-bubbles (MNBs) technology to investigate the factors that affect the process and the efficiency improvement of microplastic separation from water by MNBs production experiment set. Polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC), polyamide 6 (PA 6), polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) and polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) with average particle sizes in the range of 38-106, 106-1,000 and 1,000-3,000 micrometers were used. In the first part of the experiment, Microplastics were ground and sieved to obtain a microplastic powder with an average particle size within the desired range for the water separation test by the MNBs production experiment set. Microplastics with an initial weight of 0.50 g were poured into the flotation tank. MNBs water was generated into the MNBs generator and exposed to microplastics for 10, 20 and 30 minutes to separate microplastics from the water. The microplastics after the separation were weighted and computed for %removal efficiency. In addition, the size distribution of MNBs and the zeta-potential were measured to study the stability and surface charge of MNBs. It was found that the overall charge of MNBs in water was negative. Also, the increase of the zeta-potential as the increases of MNBs generated time, indicating the negative charge on the surface of MNBs in water. For the same microplastic initial weight and particle size range, the removal efficiency of PLA microplastics was the highest, followed by PVC, PET, PS, PBAT, PA 6 and PBS respectively for all given exposed times. The longer the exposed time, the better the removal of microplastics. Microplastic with smaller particles size floats better than microplastics with larger particles size. Including the conversion of gas used to generate MNBs from air to CO₂ will improve the efficiency of separating PA 6 and PBS from water. The results were in contrast to PLA, indicating that the type of MNBs influenced the selectivity of microplastic binding.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยให้ข้อคิดเห็น และ คำแนะนำในการทำการวิจัยมาโดยตลอด ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส ผู้เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ไทยถาวร เลิศวิทยาประสิทธิ์ ผู้เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ในการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยในเรื่อง การแยกไมโครพลาสติคด้วยไมโคร/นาโนบับเบิลเทคโนโลยี และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและ วิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่อบรม สั่งสอนข้าพเจ้าตลอดเวลาที่ได้ศึกษาที่ภาควิชา ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียร ระลึก และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรม วัสดุ ที่ได้ให้คำแนะนำ ควบคุมดูแล และอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย คุณลูก กวาง อุ่นศิริ และคุณหรรษา สังข์ทอง เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้ให้ คำแนะนำในการจัดทำเอกสารและใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลห การ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์บุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องผลิตไมโคร/ นาโนบับเบิล บริษัท เอ็กซ์เซล ซุปเปอร์แพค จำกัด และบริษัท อาร์ แอนด์ บี ฟู้ด ซัพพลาย จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเพื่อเม็ดพลาสติก รวมถึงบริษัท แอนตัน พาร์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความ อนุเคราะห์การใช้เครื่องวัดความหนาแน่น

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาในเรื่องการเรียน และการใช้ชีวิตใน ช่วงเวลาที่รู้สึกลำบาก รวมถึงให้โอกาสทางการศึกษา และช่วยเหลือเรื่องค่าใช้จ่าย จนการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคุณศรัสุตา ก้อนทอง ผู้ช่วยวิจัยในกลุ่มการวิจัยวัสดุเพื่อความยั่งยืน (Sustainable Materials Laboratory) เพื่อนๆ และน้องๆ ปริญญาโท ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคน ที่ เป็นที่ปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

นางสาว อิตววรรณ พูลวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 แนวคิดงานวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พลาสติก.....	5
2.2 พลาสติกชนิดพอลิโอสไตรีน.....	6
2.3 พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	7
2.4 พลาสติกชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์.....	8
2.5 พลาสติกชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	9
2.6 พลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด	9
2.7 พลาสติกชนิดพอลิเอไมด์	10

2.8	พลาสติกชนิดพอลิไพลีเอทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	11
2.9	ผลกระทบของขยะพลาสติกต่อสภาวะแวดล้อม	12
2.10	ไมโครพลาสติก	13
2.11	เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล	14
2.12	กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	16
2.13	การดูดซับของตะกอนบนฟองอากาศ	18
2.14	ทฤษฎี Electrical double layer	20
2.15	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1	วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
3.3	การดำเนินงานวิจัย	34
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	38
4.1	เตรียม microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อนำไปทดสอบการแยกออกจากน้ำ ด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น	38
4.2	ติดตามการเกิดของ micro/nano-bubbles ชุดการทดลองที่ติดตั้งขึ้น	42
4.3	ติดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles	45
4.4	ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน ออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น	45
4.5	การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน ออกจากน้ำ	53
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1	สรุปผลการทดลอง	57
5.2	ข้อเสนอแนะ	57
ภาคผนวก	59

ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบ	60
ภาคผนวก ข นำเสนอผลงานวิจัย	64
รายการอ้างอิง	66
ประวัติผู้เขียน	72



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ก่อน-หลังการบำบัด	23
ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการละลายน้ำและความหนาแน่นของก๊าซ.....	26
ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพในการกำจัด amine ที่ความเข้มข้นในการป้อนแตกต่างกันของ กระบวนการ DAF และ F-NBs ที่มีและไม่มี polyaluminum	28
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดเดี่ยว และ microplastic ผสม ออกจากน้ำด้วย air MNBs.....	52



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิไสตรีน [14]	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์ [18].....	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะลิฟาติกและอะโรมาติกพอลิเอไมด์ [22]	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท.....	11
รูปที่ 2.8 การลอยตัวของมาโครบับเบิล ไมโครบับเบิล และนาโนบับเบิล	14
รูปที่ 2.9 กระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย [32]	18
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการสัมผัสกับฟองอากาศ	19
รูปที่ 2.11 โครงสร้าง Electrical double layer [34].....	21
รูปที่ 2.12 ความเข้มข้นของ MP ที่มีขนาดต่างกันก่อน-หลังการบำบัด	22
รูปที่ 2.13 เข้มข้นของ MP ที่มีรูปร่างต่างกันก่อน-หลังการบำบัด.....	23
รูปที่ 2.14 ค่า zeta-potential ของตัวอย่างน้ำ O ₂ , อากาศ, N ₂ , CO ₂ และ Xe MNB.....	24
รูปที่ 2.15 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำ O ₂ , อากาศ, N ₂ , CO ₂ และ Xe MNB	25
รูปที่ 2.16 กราฟ calibration curve ของ amine	27
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ amine ที่ตกตะกอน ที่ pH 10.5.....	27
รูปที่ 2.18 ขนาดและค่า zeta potential ของตะกอน amine ขนาดนาโนเทียบกับค่า pH.....	28
รูปที่ 2.19 ปริมาณ amine ที่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการ DAF และ F-NBs ที่มีและไม่มี polyaluminum.....	28

รูปที่ 2.20 แผนผังของระบบสร้าง nano-microbubbles และเครื่อง Laser Particle Size Analyzer	29
รูปที่ 2.21 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวของขนาด nano-microbubbles a) ทันทีกหลังสร้าง nano-microbubbles, b) 1 นาที, c) 5 นาที และ d) 10 นาที, MIBC 100 mg/L ที่ T= 22°C	30
รูปที่ 2.22 ผลของเวลาต่อขนาด nano-microbubbles.....	30
รูปที่ 2.23 ค่า zeta-potential ของ nano-microbubbles ที่ pH 10, MIBC 100 mg/L ที่ T= 22°C	31
รูปที่ 2.24 แสดงการก่อกินของอนุภาค chalcopyrite เมื่อเทียบกับเวลา ในกรณีที่มีและไม่มี nano-microbubbles, MIBC 1.2 kg/t, KAX = 0.4 kg/t.....	32
รูปที่ 2.25 แสดงการก่อกินของ chalcopyrite (+14.36-38 และ +5-14.36 ไมโครเมตร) เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการลอยตัว, MIBC 1.2 kg/t, KAX = 0.4 kg/t.....	32
รูปที่ 3.1 แสดงชุดการทดลองการผลิต MNBs.....	36
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 38-106 ไมโครเมตร.....	39
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร.....	40
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร	42
รูปที่ 4.4 ค่า zeta-potential ของน้ำ air MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที.....	42
รูปที่ 4.5 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำ air MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที	43
รูปที่ 4.6 ค่า zeta-potential ของน้ำ CO ₂ MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที	44
รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำ CO ₂ MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที.....	44
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที.....	46

รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที.....	47
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 38-106 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที.....	48
รูปที่ 4.11 ลักษณะการเกาะกลุ่มกันในระหว่างลอยตัวของ microplastic ชนิด ก) PLA, ข) PBAT และ ค) PBS ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร.....	49
รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของ microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร.....	50
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ผสม ชนิด PBS, PLA และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g อัตราส่วนของ microplastic แต่ละชนิดเป็น 1:1:1 เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที.....	52
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PA 6, PBS และ PLA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร ความน้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air และ CO ₂ MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที	54
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PA 6 และ PBS ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร ความน้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air และ CO ₂ MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที	55

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผลิตภัณฑ์พลาสติกถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน โดยมีปริมาณการผลิตมากกว่า 370 ล้านตันต่อปี [1] ซึ่งผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกทั่วไป (conventional plastic) สามารถปนเปื้อนในธรรมชาติได้ เช่น ในแหล่งน้ำ [2] ผลิตภัณฑ์พลาสติกเหล่านี้สามารถแตกออกเป็นชิ้นพลาสติกขนาดใหญ่ หรือมาโครพลาสติก (macroplastic) ได้ และมาโครพลาสติกสามารถแตกออกเป็นพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร หรือที่เรียกว่าไมโครพลาสติก (microplastics) ได้ในเวลาต่อมา สำหรับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) แม้ว่าจะสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradation) แต่การย่อยสลายทางชีวภาพนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานและต้องใช้สภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพยังสามารถเกิดการย่อยสลายได้จากกระบวนการแบบดั้งเดิม เช่น การย่อยสลายตามสภาพอากาศ การย่อยสลายด้วยแสง การออกซิเดชัน เป็นต้น โดยไมโครพลาสติกที่เกิดจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพยังสามารถคงอยู่ได้นานอีกด้วย [3] ดังนั้นหากจะพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงควรพิจารณาถึงพลาสติกทุกชนิด

ไมโครพลาสติกที่เกิดจากการแตกออกของพลาสติกขนาดใหญ่เรียกว่า ไมโครพลาสติกทุติยภูมิ (secondary microplastics) ซึ่งการแตกอาจเกิดจากกระบวนการทางกล (mechanical action) โฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) หรือการย่อยสลายทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีไมโครพลาสติกอีกประเภทหนึ่งที่มีต้นกำเนิดแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่าไมโครพลาสติกปฐมภูมิ (primary microplastics) ซึ่งเป็นพลาสติกขนาดเล็กที่ตั้งใจผลิตจากอุตสาหกรรม [4] ไมโครพลาสติกเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศได้ทั้งหมด แม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อเหล่านี้ยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่การสะสมของไมโครพลาสติกที่เพิ่มขึ้นก็เป็นภัยคุกคามต่อโลกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

การแยกไมโครพลาสติกเหล่านี้กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก โดยกระบวนการลอยตัว (Flotation) เป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการใช้แยกไมโครพลาสติกออกจากรู้น้ำมากกว่าการใช้วิธีการกรอง (filtration) และการตกตะกอน (sedimentation) เนื่องจากวิธีการกรองนั้นสารผสมทั้งหมดที่มีอนุภาคที่ต้องการกรองต้องผ่านเครื่องมือกรองเพื่อทำการกรอง แต่กระบวนการลอยตัวจะดักอนุภาคบนพื้นผิวน้ำที่ผ่านการแยกโดยกระบวนการลอยตัวแล้วนำมากรองเท่านั้น และสำหรับวิธีการตกตะกอน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องมีการควบคุมปริมาณสารตกตะกอนและค่า pH อย่างระมัดระวัง และสารตกตะกอนอาจทำให้เกิดความเป็นพิษหากใช้ไม่ถูกต้อง [5] เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการลอยตัวแทบไม่ต้องใช้สารเคมีในการแยกอนุภาคออกจากรู้น้ำ ในบรรดาเทคนิคต่างๆ

กระบวนการลอยตัวเป็นเทคนิคที่ใช้แต่เดิมเพื่อแยกแร่ธาตุ [6] ต่อมาเทคนิคนี้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาการแยกส่วนผสมของพลาสติก (plastic mixtures) ซึ่งเป็นการใช้ฟองอากาศทั่วไปในระหว่างการลอยเพื่อแยกส่วนผสมพลาสติกที่มีประจุและความหนาแน่นแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งการแยกพลาสติกขึ้นอยู่กับประเภทของส่วนผสมพลาสติก และได้รับอิทธิพลจากขนาด ความหนาแน่น รูปร่าง และความไม่ชอบน้ำของพลาสติก [7, 8]

ฟองอากาศขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่นาโนเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า) ถึงไมโครเมตร (1-100 ไมโครเมตร) เมื่อรวมกันจะถูกเรียกว่าฟองอากาศขนาดไมโคร/นาโน (micro/nano-bubbles; MNBs) เนื่องจากลักษณะเฉพาะบนพื้นผิวของ MNBs ที่มีประจุลบ และพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ เทคโนโลยี MNBs จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสำหรับการบำบัดผิวหนัง [9] ประจุที่พื้นผิวของ MNBs สามารถวัดได้จากความเร็วของการเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรด (electrodes) ที่มีประจุตรงข้ามในเซลล์อิเล็กโทรโฟรีซิส (electrophoresis cell) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าศักย์ซีตา (zeta potential) โดยหากค่าศักย์ซีตาของ MNBs ในน้ำมีค่าติดลบแสดงว่าพื้นผิวของ MNBs มีประจุลบ [10] และเนื่องจากเทคโนโลยี MNBs สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียได้โดยที่ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดำเนินไม่มาก และเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่จะช่วยลดขนาดของโรงบำบัดน้ำเสียในโรงงาน และปรับปรุงคุณภาพของน้ำได้ [11] ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะนำเทคโนโลยี MNBs มาประยุกต์ใช้สำหรับการแยก ไมโครพลาสติกออกจากน้ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในการแยกไมโครพลาสติกชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต MNBs ที่ติดตั้งขึ้น รวมไปถึงศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกไมโครพลาสติกชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำ

1.2 แนวคิดงานวิจัย

แนวคิดงานวิจัยนี้คือศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง และเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด Polystyrene (PS), Polyethylene terephthalate (PET), Polyvinyl chloride (PVC), Polybutylene succinate (PBS), Polylactic acid (PLA), Polyamide 6 (PA 6) และ Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 38-106, 106-1,000 และ 1,000-3,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำ ด้วยเทคโนโลยี micro/nano-bubbles โดยใช้ชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

1.3.2 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน ออกจากน้ำ

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 ชนิดของ microplastic ที่นำมาทดสอบการแยกออกจากน้ำ ได้แก่ Polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC), polyamide 6 (PA 6), polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) และ polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT)

1.4.2 microplastic ที่นำมาทดสอบการแยกด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles (MNBs) ที่ติดตั้งขึ้นมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 38-106, 106-1,000 และ 1,000-3,000 ไมโครเมตร

1.5 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบการทดลองและวางแผนวิธีการทดลอง

1.5.3 ดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 เตรียม microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อนำไปทดสอบการแยกออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

ทำการบดเม็ดพลาสติกชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA6 และ PBAT ด้วยเครื่องบด จากนั้นจึงนำไป sieve เพื่อให้ได้ผง microplastic ที่มีขนาดอนุภาค 1,000-3,000, 106-1,000 และ 38-106 ไมโครเมตร ทำการวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเฉลี่ย รวมไปถึงนำเม็ดพลาสติกไปทดสอบวัดค่าความหนาแน่น

ส่วนที่ 2 ติดตามการเกิดของ micro/nano-bubbles

ผลิต air MNBs และ CO₂ MNBs ในน้ำเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที ทำการวัดค่า zeta-potential และวัดการกระจายตัวของขนาด MNBs

ส่วนที่ 3 ติดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles

ทำการจัดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubble (MNBs) โดยใช้ท่อ PVC และใช้เครื่องผลิต MNBs (RMUTT 04 MNB Generator) สำหรับผลิต MNBs ในการทดลอง

ส่วนที่ 4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

ทดลองการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000-3,000, 106-1,000 และ 38-106 ไมโครเมตร ที่เตรียมไว้ในส่วนที่ 1 ออกจากน้ำ

ส่วนที่ 5 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำ

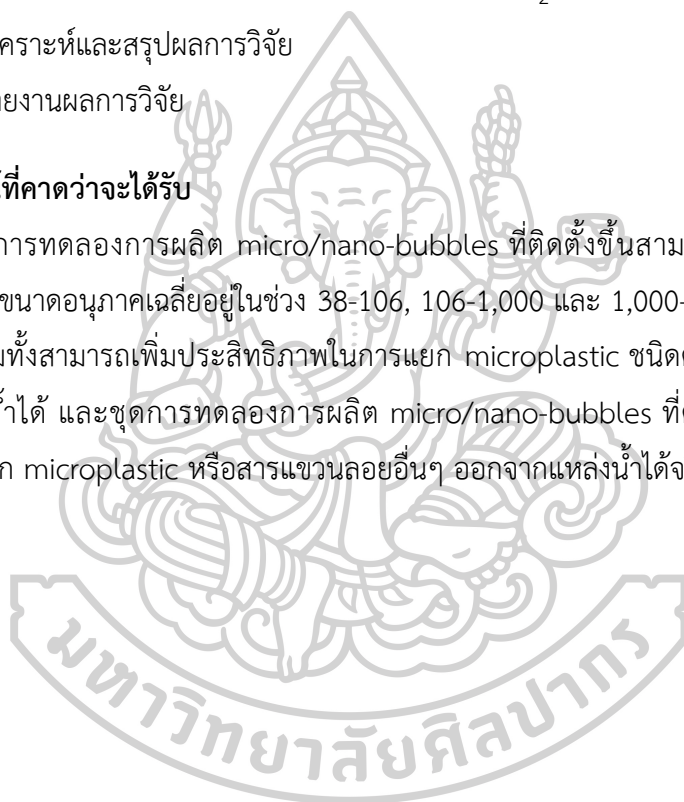
เลือก microplastic ที่แยกออกจากน้ำได้ยากที่สุด 2 ชนิด จากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 4 มาทดลองการแยกออกจากน้ำ โดยทำการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ รวมถึงเปลี่ยนก๊าซที่ใช้ในการผลิต MNBs จาก air เป็น CO_2

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.5.5 รายงานผลการวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้นสามารถแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 38-106, 106-1,000 และ 1,000-3,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำได้ รวมทั้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำได้ และชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้แยก microplastic หรือสารแขวนลอยอื่นๆ ออกจากแหล่งน้ำได้จริง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก

พลาสติกจัดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาว ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟลูออรีน, คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น

ในบางครั้งพบว่ามีการใช้คำว่า “พลาสติก” และ “พอลิเมอร์” ในความหมายเดียวกัน หรือใกล้เคียงกัน หากแปลตามรากศัพท์คำว่า พอลิเมอร์ หรือ polymer มาจากคำกรีก 2 คำ คือ คำว่า poly แปลว่ามาก และคำว่า mer แปลว่าหน่วย พอลิเมอร์จึงแปลว่า สารที่มีโมเลกุลประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันต่อกันเป็นสายยาว [12]

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [13] ได้แก่

2.1.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

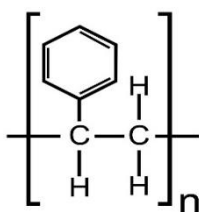
มีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรง หรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวนี้ สามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพหรือโครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนมากนัก พลาสติกประเภทนี้สามารถขึ้นรูปโดยการฉีดขณะที่พลาสติกถูกทำให้อ่อนตัว และไหลได้ด้วยความร้อนและความดันเข้าไปในแม่พิมพ์ ภายหลังจากที่พลาสติกไหลเข้าจนเต็มแม่พิมพ์จะถูกทำให้เย็นตัว และเมื่อถอดออกจากแม่พิมพ์จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างตามต้องการ เมื่อใช้เสร็จแล้วสามารถนำกลับมารีไซเคิล (recycle) ได้โดยการบด และหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้อีก แต่พลาสติกประเภทนี้มีข้อเสียและขีดจำกัดของการใช้งาน คือไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ เพราะอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปทรง ตัวอย่างเช่น ขวดน้ำดื่มไม่เหมาะสำหรับใช้บรรจุน้ำร้อนจัดหรือเดือด

2.1.2 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห ซึ่งจะหลอมเหลวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลทำให้มีรูปร่างที่ถาวร ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน และหากได้รับความร้อนสูงเกินไปจะทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออก การผลิตพลาสติกชนิดเทอร์โมเซตติงจะแตกต่างจากพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกคือ ในขั้นตอนแรกต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเพียงบางส่วนให้มีการเชื่อมโยงโมเลกุลเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย และยังสามารถหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน จึง

สามารถขึ้นรูปภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงได้ เมื่อผลิตภัณฑ์มีรูปร่างตามต้องการแล้ว ให้คงอุณหภูมิไว้ประมาณ 200-300°C เพื่อให้ได้โครงสร้างแบบร่างแหที่เสถียรและแข็งแรง สามารถนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบโดยไม่ต้องรอให้เย็น เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะแข็งตัวอยู่ภายในแม่พิมพ์ ดังนั้น การให้ความร้อนในกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมเซตกลับทำให้วัสดุแข็งขึ้น ต่างจากกระบวนการผลิตพลาสติกเทอร์โมพลาสติกที่การให้ความร้อนจะทำให้พลาสติกนิ่ม และหลอมเหลว พลาสติกเทอร์โมเซตเมื่อใช้งานเสร็จแล้วไม่สามารถนำมาผ่านการหลอมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือรีไซเคิลได้อีก และถ้าให้ความร้อนมากเกินไปจะทำให้พลาสติกเกิดการสลายตัวหรือไหม้โดยไม่เกิดการหลอมเหลว ตัวอย่างของพลาสติกในกลุ่มนี้เช่น เบคเคอไลต์ และเมลามีน เป็นต้น

2.2 พลาสติกชนิดพอลิสไตรีน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิสไตรีน [14]

พอลิสไตรีน (polystyrene : PS) ผลิตขึ้นมาจากสไตรีนมอนอเมอร์ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมเหลวเมื่อทำให้อุ่นและแข็งตัวเมื่อเย็นลง พอลิสไตรีนที่บริสุทธิ์จะใสไม่มีสีและยืดหยุ่นได้จำกัด

พอลิสไตรีนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่เป็นชนิดที่เรียกว่า expanded polystyrene (EPS) เป็นชนิดที่ได้จากการผสมพอลิสไตรีนร้อยละ 90-95 กับสารทำให้ขยายตัว (ที่ใช้กันมากคือเพนเทนหรือคาร์บอนไดออกไซด์) ร้อยละ 5-10 ซึ่งพลาสติกพอลิสไตรีนที่เป็นของแข็งถูกทำให้เป็นโฟมโดยการให้ความร้อน ส่วนพอลิสไตรีนอีกชนิดหนึ่งคือ extruded polystyrene (XPS) มีชื่อทางการค้าคือ styrofoam เป็นชนิดที่มีการเติมอากาศไว้ในช่องว่างตามเนื้อโฟมทำให้มีค่าการนำความร้อนต่ำ ใช้ในงานก่อสร้าง และใช้เป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร และยังมีชนิดที่เป็นแผ่นเรียกว่า polystyrene paper foam (PSP) ใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร เช่น กล่องหรือถาดใส่อาหาร

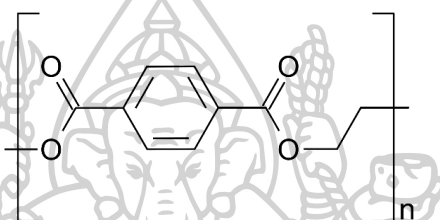
ข้อควรระวังในการใช้พลาสติกชนิดพอลิสไตรีน

1. การใช้ภาชนะโฟมพลาสติก EPS ใส่อาหารที่ร้อน เช่น กาแฟร้อน ๆ หรือการที่โฟมสัมผัสกับกรด เช่น น้ำมะนาว แล้วนำไปเข้าไมโครเวฟ ก็สามารถทำให้สไตรีนมอนอเมอร์ในโฟมพลาสติกละลายออกมาผสมในอาหารได้

2. การเผาไหม้พลาสติกพอลิสไตรีนทำให้เกิดก๊าซพิษสไตรีนออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของของมะเร็ง

การรีไซเคิลโพลีสไตรีนมีปัญหาในเรื่องไม่คุ้มทุนเป็นสำคัญ เนื่องจากคุณภาพของพลาสติกที่รีไซเคิลได้จะต่ำกว่าก่อนผ่านการรีไซเคิล ดังนั้นพลาสติกที่รีไซเคิลได้จึงไม่สามารถนำกลับมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เดิมได้ ต้องทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ด้อยคุณภาพลงไป เช่น โฟมบรรจุอาหารไม่สามารถรีไซเคิลกลับมาใส่อาหารได้อีก ต้องนำไปทำเป็นโพลีกันกระแทก ฉนวนฝ้าผนัง และถาดในโรงอาหาร เป็นต้น [15]

2.3 พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate : PET) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ที่ผลิตขึ้นได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) กับ ไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) หรือระหว่างเอทิลีนไกลคอลกับกรดเทเรฟทาลิก (terephthalic acid) แต่ในปัจจุบันนิยมใช้ไดเมทิลเทเรฟทาเลต นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเคมี เช่น แอนติโมนีไตรออกไซด์ (antimony trioxide) หรือแอนติโมนีไตรแอซีเตต (antimony triacetate)

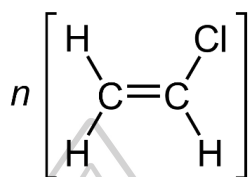
พลาสติกชนิดนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีเนื้อใส (A-PET) และกลุ่มที่เป็นผลิตภัณฑ์ขาว (C-PET) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีคุณสมบัติที่มีน้ำหนักเบา รวมทั้งกันก๊าซและแอลกอฮอล์ได้ดี [16] จึงนิยมนำไปผลิตเป็นขวดน้ำดื่ม ขวดน้ำอัดลม ขวดน้ำมันสำหรับปรุงอาหาร และถุงขนมขบเคี้ยว

ข้อควรระวังในการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต [17]

1. ขวดบรรจุน้ำดื่มถูกออกแบบมาเพื่อใช้เพียงครั้งเดียว ไม่ได้ออกแบบมาสำหรับให้นำมาทำความสะอาดใหม่โดยใช้ความร้อนสูงหรือขัดถูแล้วนำมาใช้ซ้ำ ขวดที่ใช้แล้วควรนำไปผ่านกระบวนการรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่มากกว่าการนำกลับมาใช้ซ้ำ แม้ว่าการใช้ซ้ำนั้นอาจไม่มีอันตรายจากสารที่หลุดออกมา แต่ผู้บริโภคอาจได้รับอันตรายจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์เนื่องจากการทำความสะอาดที่ไม่ดีพอ

2. สารอะซีทัลดีไฮด์ (acetaldehyde) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิเอทิลีน เทเรพทาเลตในกระบวนการหลอมขึ้นรูปสามารถแพร่ออกจากผลิตภัณฑ์เข้าไปปนเปื้อนของที่บรรจุ อยู่ในภาชนะได้ ซึ่งอะซีทัลดีไฮด์เป็นสารที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริการะบุว่าเป็ สารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในคน รวมทั้งอาจส่งผลกระทบต่อพัฒนาการทางสมอง

2.4 พลาสติกชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพอลิไวนิลคลอไรด์ [18]

พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride : PVC) หรือที่เรียกกันว่า พีวีซี เป็นพลาสติกที่ได้ จากไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (vinyl chloride monomer) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ได้มาจากเอทิลีน (ethylene) และคลอรีน (chlorine) และเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือหลอมเป็นของเหลว ได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง [19] เวลานำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้องผ่านการเติม สารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อให้สามารถขึ้นรูปและได้คุณสมบัติที่ต้องการ

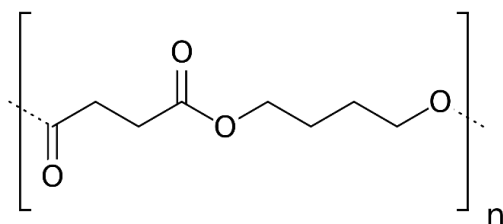
ในด้านการค้าพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นสินค้าที่มีมูลค่ามากในอุตสาหกรรมเคมี มากกว่า 50% ของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผลิตได้ทั่วโลกถูกใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยเป็นส่วนหนึ่งของตัวอาคาร ทั้งนี้เพราะพอลิไวนิลคลอไรด์มีราคาที่ย่อมเยา และคงทน นอกจากนี้พอลิไวนิลคลอไรด์ยังถูก ประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย ในรูปแบบของพลาสติกแข็ง เช่น ขอบกันกระแทก, ตัวบัตร์ต่างๆ, ท่อ และในปัจจุบันได้มีการนำพอลิไวนิลคลอไรด์มาปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมือนกับไม้เพื่อใช้แทนไม้จาก ธรรมชาติอย่างแพร่หลาย [18]

ข้อควรระวังในการใช้พลาสติกชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์

1. สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพพอลิไวนิลคลอไรด์ เช่น สารพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ได้แก่ ฟาธาเลท (phthalate) สารแต่งสีซึ่งมีตะกั่ว (lead) และแคดเมียม (cadmium) สารทำให้คงตัว (stabilizers) เช่น แบเรียม (barium) ในกรณีที่ใช้ใส่หรือห่อหุ้มอาหาร สารเหล่านี้สามารถแพร่กระจายออกมาปนเปื้อนในอาหารได้

2. เมื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ซึ่งมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบเผาไหม้จะให้ก๊าซที่เป็นกรด สารพิษ ไดออกซิน (dioxin) และสารออร์แกโนคลอรีนอื่นๆ ในควันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะมีไฮโดรเจน คลอไรด์ (hydrogen chloride) ซึ่งรวมตัวกับความชื้น (น้ำ) ได้เป็นกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

2.5 พลาสติกชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

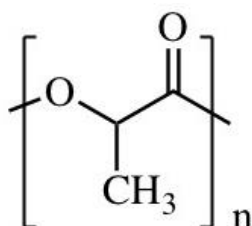
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate : PBS) เป็นพอลิเอสเตอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างกรดซัคซินิก (succinic acid) และ 1,4- บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตขึ้นได้จากทั้งแหล่งปิโตรเคมีหรืออาศัยวัตถุดิบจากธรรมชาติ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัย 2 แนวทางหลัก ได้แก่

1. กระบวนการ trans-esterification โดยอาศัยซัคซิเนตไดเอสเตอร์ (succinate diesters) เป็นมอนอเมอร์

2. กระบวนการ direct esterification โดยอาศัยกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออล ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ในการผลิตเม็ดเรซินของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติให้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นอีกหนึ่งพลาสติกทางเลือก การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้กำลังขยายขอบเขตทั้งในทางบรรจุภัณฑ์ และกลุ่มผลิตภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (disposal items) เช่น พลาสติกทางการแพทย์ วัสดุทางวิศวกรรม วัสดุทางการแพทย์ โดยบรรจุภัณฑ์จากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีทั้งในรูปแบบของฟิล์ม ถัง หรือกล่อง ทั้งสำหรับอาหารและเครื่องสำอาง นอกจากนี้ในปัจจุบันพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตได้ถูกพัฒนาไปใช้ทางการแพทย์ทั้งในรูปแบบของฟิล์มและวัสดุที่ควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยและยาฆ่าแมลง รวมไปถึงการขึ้นรูป PBS เป็นตาข่ายที่ใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ [20]

2.6 พลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด



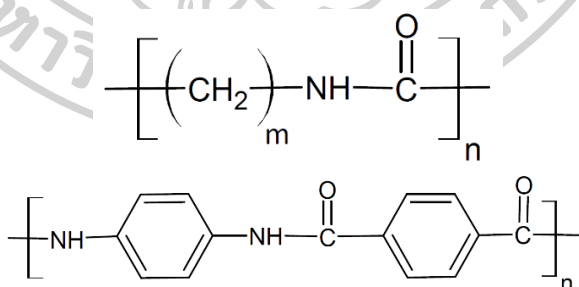
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid : PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพ (bioplastic) สามารถย่อยสลายได้ ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) เช่น ผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดหรือม่พืชขึ้นให้ละเอียดเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคส นำไปผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้ผลผลิตเป็นกรดแลคติก (lactic acid) จากนั้นผ่านกระบวนการทางเคมีได้ lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) กลับในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์

พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติขวางกัน (barrier properties) ดี เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) คุณสมบัติพิเศษคือมีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไปแต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน การขึ้นรูปสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการการอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีด (Injection molding) เป็นต้น จึงนิยมนำไปผลิตเป็นฟิล์มสำหรับหุ้มอาหาร ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร เช่น กล่อง จาน ช้อน มีด ส้อม ตะเกียบ แก้วน้ำ ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง ถุงหูหิ้ว ถุงใส่กล่อง เป็นต้น รวมไปถึงเส้นใยและสิ่งทอนำมาใช้ในงานด้านการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์

สำหรับข้อควรระวังในการใช้พลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิดนั้นยังไม่พบข้อมูลการเกิดพิษแบบเฉียบพลัน และนอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดยังไม่พบองค์ประกอบของสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ [21]

2.7 พลาสติกชนิดพอลิเอไมด์



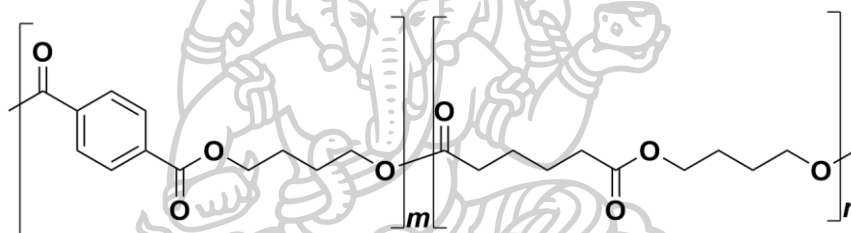
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะลิฟาติกและอะโรมาติกพอลิเอไมด์ [22]

พอลิเอไมด์ (polyamide : PA) หรือ ชื่อที่ถูกใช้โดยทั่วไปทางการค้า คือ ไนลอน (nylon) เป็นพลาสติกที่ได้จากการกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของเอไมด์ (amide, CHONH) และกรดอินทรีย์ มีการเพิ่มสารแต่งเติม (filler และ additives) ประเภทกราไฟต์ (graphite) และโมลิบดีนัมไดซัลไฟต์ (molybdenum disulphite) ทำให้เพิ่มสมบัติให้ดียิ่งขึ้น

พอลิเอไมด์เมื่อเป็นฟิล์มจะมีลักษณะโปร่งใส แต่เมื่อนำมาหล่อ (cast nylon) จะทึบแสงมีสีขาว ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี ปิดผนึกด้วยความร้อนได้แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากจึงไม่นิยมใช้เป็นชั้นปิดผนึก มีสมบัติเด่นคือ แข็งแรงเหนียว ต้านทานแรงดึง และแรงฉีกขาดได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสี ไม่เสีรูปร่างง่ายเหมาะสำหรับงานรับแรงมากๆ สามารถยืดหยุ่นได้ (flexible) และทนการบิดพับงอได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนและกลิ่นต่างๆได้ดี แต่ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้น้อย

พอลิเอไมด์นิยมนำมาผลิตเป็นส่วนประกอบของเครื่องจักร และอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารสำหรับงานรับแรงมากๆ ทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสี เช่น ทำเฟือง ล้อ ลูกกลิ้ง สำหรับอุปกรณ์ลำเลียง รวมทั้งใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร ที่ต้องการความคงทน แข็งแรง แต่ป้องกันการซึมผ่านเข้าออกของก๊าซได้ปานกลาง [23]

2.8 พลาสติกชนิดพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (polybutylene adipate-co-terephthalate : PBAT) เป็นโคพอลิเอสเตอร์ชนิดหนึ่งของกรดอะดิพิก (adipic acid), 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และไดเมทิล เทเรฟทาเลท (dimethyl terephthalate) ในกระบวนการสังเคราะห์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์จากกรดอะดิพิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ความยาวของสายโซ่จะถูกควบคุมให้สั้นโดยการเติม 1,4-บิวเทนไดออล ที่มากเกินไปลงในปฏิกิริยา

2. พอลิเอสเตอร์ของไดเมทิล เทเรฟทาเลท (DMT) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ตัวที่ 2 ที่จะถูกใช้กับผลิตภัณฑ์ของขั้นที่ 1 ในการสังเคราะห์เป็นโคพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนอะดิเพท เทเรฟทาเลท

3. TBOT ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) ของพอลิเอสเตอร์ของกรดอะดิพิก และ DMT เพื่อใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์พอลิบิวทิลีนอะดิเพท เทเรฟทาเลทแบบสุ่ม

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทถูกจำแนกเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่สามารถมีโครงสร้างเป็นผลึกที่แน่นอน เนื่องจากขาดความเป็นระเบียบของโครงสร้าง

จึงนำไปสู่คุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย เช่น จุดหลอมเหลวมีช่วงกว้าง ค่า Modulus และความแข็งแรงต่ำ แต่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ในทางการตลาดทั่วไปพอลิเอทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทเป็นพลาสติกทางเลือกหนึ่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สามารถทดแทนการใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene : LDPE) โดยพลาสติกทั้งสองมีคุณสมบัติที่เหมือนกันรวมถึงความยืดหยุ่นและการคืนรูป จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน อาทิเช่น ถุงพลาสติกและพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม ถุงเพาะชำที่ย่อยสลายได้ และการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร และเป็นสารเคลือบกันน้ำสำหรับวัสดุอื่นๆ [24]

2.9 ผลกระทบของขยะพลาสติกต่อสภาวะแวดล้อม

ขยะพลาสติก คือ พลาสติกที่ใช้แล้วถูกทิ้งเป็นขยะพลาสติก ส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้อีกในลักษณะที่แตกต่างไปจากเดิม และอีกส่วนหนึ่งถูกนำไปกำจัดทิ้งโดยวิธีการต่างๆ เช่น การฝังกลบ การหลอม และการรีไซเคิล โดยขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดังนี้

1. ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำจากการเพิ่มของค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (biological oxygen demand, BOD) และค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (chemical oxygen demand, COD) เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ หรือสารอาหารในแหล่งน้ำในปริมาณสูง ทำให้จุลินทรีย์มีความต้องการใช้ออกซิเจนในน้ำสูงขึ้นด้วย ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศทางน้ำ

2. เกิดการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อม เช่น การย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะฝังกลบหรือการคอมโพสท์ (compost) อาจทำให้สารเติมแต่งต่างๆ รั่วไหลปนเปื้อนไปกับแหล่งน้ำใต้ดินและบนดิน ซึ่งสารบางชนิดอาจมีความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ

3. เกิดมลภาวะจากขยะอันเนื่องมาจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกทิ้ง หรือตกลงในสิ่งแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย นอกจากนี้การใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้อาจทำให้ผู้บริโภคเข้าใจผิดว่าจะสามารถกำจัดได้ง่ายและรวดเร็วทำให้มีการใช้งานเพิ่มขึ้น และพลาสติกที่ย่อยสลายได้บางชนิดอาจใช้เวลานานหลายปีในการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ และก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์ที่กินกินพลาสติกเข้าไปเนื่องจากไม่สามารถย่อยได้ในกระเพาะของสัตว์

4. ความเป็นพิษของคอมโพสท์ที่ได้จากการหมักพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากมีสารตกค้างหรือสารเติมแต่งที่มีพิษ และส่งผลกระทบต่อพืชและสัตว์ที่อยู่ในดิน ดังนั้นจึงต้องศึกษาความเป็นพิษของคอมโพสท์ด้วย ชิ้นส่วนที่เกิดจากการหักเป็นชิ้นเล็กๆ เกิดการสะสมอยู่ในดินที่ใช้ทางการเกษตรในปริมาณเล็กน้อยจะช่วยให้อากาศหมุนเวียนได้ดี แต่อย่างไรก็ตามอาจเกิดการสะสมของเศษพลาสติกมากเกินไปส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดิน และปริมาณผลิตผลที่เพาะปลูกได้

5. เกิดสารประกอบที่ไม่ย่อยสลาย เช่น สารประกอบประเภทอะโรมาติกจากการย่อยสลายของพลาสติกบางชนิด โดยส่วนที่เป็นอะโรมาติกในพลาสติกจะเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบขนาดเล็ก เช่น กรดเทรฟทาลิก (terephthalic acid) ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่ดีนิก

6. การตกค้างของสารเติมแต่งที่เติมลงในพลาสติกที่ย่อยสลายได้ เพื่อปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เมื่อพลาสติกเกิดการย่อยสลายสารเติมแต่งเหล่านี้ อาจปนเปื้อนอยู่ในสภาวะแวดล้อมได้ เช่น สารพลาสติกไซเซอร์ที่มักเติมในพลาสติกเพื่อความยืดหยุ่น และสารตัวเติมที่มักเติมลงในพลาสติกเพื่อให้ราคาถูกลงส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์จึงมักเกิดการสะสมในดินและสภาพแวดล้อม [25]

2.10 ไมโครพลาสติก

ไมโครพลาสติก (Microplastics) คือ พลาสติกหรือเศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ไมโครพลาสติกปฐมภูมิ (Primary microplastics) คือ พลาสติกที่ถูกผลิตให้มีขนาดเล็กตั้งแต่ต้น ตัวอย่างเช่น เม็ดพลาสติกที่เป็นวัสดุตั้งต้นของการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก เม็ดพลาสติกที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เป็นต้น โดยในกรณีของพลาสติกที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดนั้น มีชื่อทางการค้าว่า ไมโครบีดส์ (Micro-beads) หรือที่เราเรียกว่า “เม็ดสครับ” ได้มีการจดสิทธิบัตรตั้งแต่ปี 2523 เพื่อนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ดูแลผิวหรือเครื่องสำอาง (ครีมขัดผิว ครีมอาบน้ำ ยาสีฟัน ฯลฯ) ซึ่งมีการใช้ไมโครพลาสติกชนิดนี้กันอย่างแพร่หลายและมีการใช้เพิ่มขึ้นต่อเนื่อง นอกจากนี้ ไมโครพลาสติกชนิดนี้ยังสามารถเกิดได้จากการฉลอก/ขีดข่วน จากกระบวนการผลิตพลาสติกขนาดใหญ่ จากยางล้อระหว่างการขับขี่พาหนะ หรือเส้นใยสังเคราะห์ที่หลุดออกมาในน้ำทิ้งจากการซักผ้า

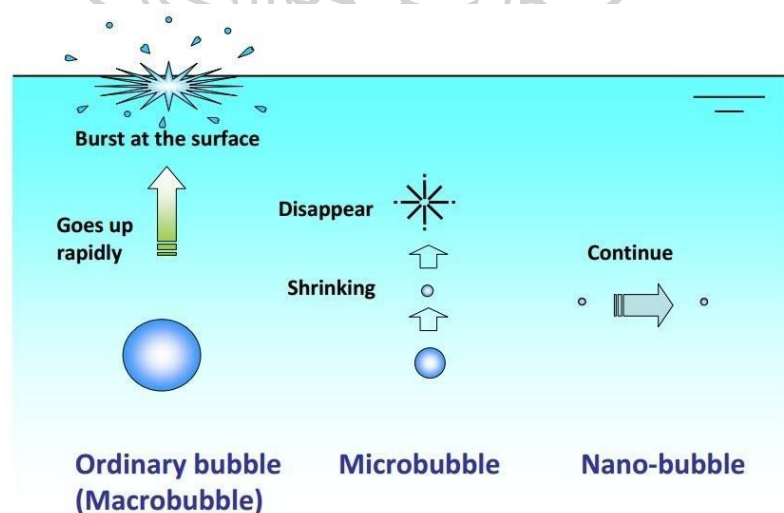
2. ไมโครพลาสติกทุติยภูมิ (Secondary microplastics) คือ พลาสติกที่มาจากการแตกหักของผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการทางเคมี ชีวภาพ และกายภาพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำให้สารเติมในพลาสติกหลุดออกจากพลาสติก ทำให้โครงสร้างของพลาสติกเกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็ก กลายเป็นสารแขวนลอยปะปนอยู่ในแม่น้ำและทะเล และอาจถูกสัตว์เล็กและใหญ่กินเป็นอาหาร

ไมโครพลาสติกที่เรารู้จักข้างต้นนั้นเหมือนกับพลาสติกทั่วไปที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ยิ่งไปกว่านั้นไมโครพลาสติกยังมีขนาดเล็กมากจนมีบางส่วนหลุดลอดไปจากขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียแพร่กระจายอยู่ในแม่น้ำทะเล และแหล่งน้ำต่างๆ ได้ โดยมักจะเจอ secondary microplastics ซึ่งเกิดจากการแตกหักจากขยะพลาสติกที่กระจายอยู่ทั่วไป แต่อาจสังเกตเห็น primary microplastics ได้ยากกว่า องค์การระหว่างประเทศเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources : IUCN) จึงได้ทำการศึกษาปริมาณของ primary microplastics ในทะเล โดยในรายงานปี 2560 เปิดเผยว่า

primary microplastics เป็นไมโครพลาสติกที่ถูกพบในแม่น้ำและทะเลทั่วโลกในรูปแบบของขยะ ประมาณ 0.8-2.5 ล้านตันต่อปี ซึ่งร้อยละ 98 ของ ปริมาณดังกล่าวมาจากกิจกรรมทางบก มีเพียง ร้อยละ 2 เท่านั้น ที่มาจากกิจกรรมทางทะเล โดย primary microplastics ที่ปล่อยลงสู่ทะเลมากกว่า ครึ่งคือเส้นใยสังเคราะห์จากการซักล้างและจากยางล้อที่สึกหรือขณะขับซี (ร้อยละ 34.8 และ 28.3 ตามลำดับ) ซึ่งจะพบเส้นใยสังเคราะห์มากที่สุดในทะเลแถบเอเชียด้วย โดยเส้นทางที่นำ ไมโครพลาสติกเหล่านี้ลงสู่มหาสมุทรมาจากการชะล้างถนนมากถึงร้อยละ 66 รองลงมาคือ ระบบ บำบัดน้ำเสียร้อยละ 25 การพัดพาของลมร้อยละ 7 และอื่นๆ ร้อยละ 2 [26]

2.11 เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล

ไมโครนาโนบับเบิล (Micro/nano bubbles : MNBs) เป็นเทคโนโลยีฟองอากาศที่มี อนุภาคนาโนขนาดเล็กมากระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตร ฟองอากาศระดับไมโครเมตร หรือ ไมโครบับเบิล (MBs) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-100 ไมโครเมตร มองเห็นเป็นน้ำมีลักษณะคล้ายสี ของนมและค่อยๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ส่วนฟองอากาศระดับนาโนเมตร หรือ นาโนบับเบิล (NBs) มีเส้น ผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร มีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและคงอยู่ในน้ำ ได้นานกว่าฟองอากาศทั่วไปหลายเดือน เนื่องจากนาโนบับเบิลมีพื้นที่ผิวของอากาศจำนวนมาก ไม่ รวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่ ทำให้สามารถละลายหรือแทรกตัวในตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ ได้มากกว่าสภาวะปกติหลายเท่าตัว และทำให้มีแรงลอยตัวต่ำ จึงทำให้การลอยขึ้นสู่ผิวน้ำช้ากว่า ฟองอากาศทั่วไป



รูปที่ 2.8 การลอยตัวของมาโครบับเบิล ไมโครบับเบิล และนาโนบับเบิล

นอกจากฟองอากาศอนุภาคนาโน หรือนาโนบับเบิล เหล่านี้จะมีขนาดเล็กมากและ สามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้นานแล้วนาโนบับเบิลยังมีพื้นที่ผิวของอากาศจำนวนมากและมีประจุลบ ล้อมรอบจำนวนมาก ทำให้นาโนบับเบิลมีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากฟองอากาศทั่วไป [27]

เทคโนโลยี MNBs จัดเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ปลอดภัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายสาขา [28] อาทิเช่น

การแพทย์และยา สำหรับสาขาทันตกรรม เทคโนโลยี MNBs สามารถใช้ในการทำความสะอาดในช่องปาก นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานในการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมโดยสามารถช่วยลดการใช้สบู่หรือน้ำยาสารเคมีได้อีกด้วย และยังสามารถนำไปใช้เกี่ยวกับการช่วยเสริมการออกฤทธิ์ของยาให้สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายหรือมีประสิทธิภาพในการออกฤทธิ์บำบัดโรคได้ดีขึ้น

การเกษตร เช่น ในอุตสาหกรรมผักหรือผลไม้สด มีรายงานว่า น้ำที่มีฟองก๊าซขนาดเล็ก (MNBs) มีประสิทธิภาพในการล้างทำความสะอาดและรักษาความสดได้ ส่วนอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์ (Aquaculture) ในฟาร์มเลี้ยงกุ้งมีการนำเทคโนโลยี MNBs เข้ามาช่วยสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพ และปริมาณของผลผลิตทั้งยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดหรือการดูแลคุณภาพน้ำที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงกุ้งหรือสัตว์น้ำชนิดอื่นๆ ได้ ในอุตสาหกรรมการเพาะปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (Hydroponics) คุณภาพของน้ำจัดได้ว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญและต้องคำนึงถึงอย่างมาก จึงมีการนำเทคโนโลยี MNBs เข้าไปช่วยในการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน เนื่องจากเทคโนโลยี MNBs สามารถเพิ่มปริมาณค่าการละลายของก๊าซในน้ำได้ ทำให้น้ำที่ใช้เพาะปลูกมีคุณสมบัติดีส่งผลให้ผลผลิตมีการเจริญเติบโตหรือมีคุณภาพที่ดีตามมาด้วย

อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มหลากหลายประเภท เช่น ในงานทดลองของศูนย์วิจัยในประเทศญี่ปุ่นได้มีการรายงานว่า การนำน้ำที่ผ่านการทำให้เกิดฟองขนาดเล็กมาล้างทำความสะอาดอาหารทะเลสด ซึ่งช่วยให้รักษาความสดได้ดีกว่าการล้างด้วยกรรมวิธีปกติ นอกจากนี้การนำน้ำที่มีฟองของก๊าซไอโซนขนาดเล็กไปใช้ในการล้างทำความสะอาดหรือฆ่าเชื้อในวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอาหารก็ส่งผลที่ดีเช่นกัน

การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment) เช่น การเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโดยเทคโนโลยี MNBs สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือโอโซนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน อีกทั้งเทคโนโลยี MNBs ยังสามารถนำมาใช้ในการแยกไขมันที่ปนอยู่ในน้ำเสีย (Fats-water separation) ของโรงงานเพื่อให้ง่ายต่อการบำบัดในขั้นต่อไปได้ง่ายขึ้น และด้วยการที่ MNBs มีพื้นที่สัมผัสที่สูงมาก จึงทำให้มีความสามารถในการดันสารแขวนลอยในน้ำขึ้นสู่ผิวน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับ Bubble ที่มีขนาดใหญ่ จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบลอยตะกอนแบบการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Dissolved air Flotation หรือ DAF) ได้ [29]

ด้านอื่นๆ เช่น การควบคุมโครงสร้างและพัฒนาสมบัติของวัสดุ การควบคุมการไหลของคอนกรีตและการใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ตลอดจนธุรกิจเกี่ยวกับสุขภาพและความงามรวมไปถึงกลุ่มธุรกิจเกี่ยวกับการดูแลสิ่งแวดล้อม

2.12 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Process) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

2.12.1 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological Wastewater Treatment Process) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสิ่งสกปรก ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ปะปนมาในน้ำเสีย และเปลี่ยนสารอินทรีย์เหล่านั้นให้เป็นแก๊สลอยขึ้นสู่อากาศหรือตกตะกอนที่ไม่มีการย่อยสลายได้อีกต่อไป

2.12.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Chemical Wastewater Treatment Process) มีหน้าที่กำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดเล็ก หรือของแข็งที่ตกตะกอนด้วยตัวเองได้ช้าที่ปะปนมากับน้ำเสีย จำเป็นต้องใช้สารเคมีเพื่อช่วยในการรวมตัวให้ตะกอนหรืออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นก่อนจะตกตะกอนหรือจมตัวลง

2.12.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Wastewater Treatment Process) ส่วนใหญ่ทำหน้าที่ในกำจัดของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ที่ปะปนมากับน้ำเสียซึ่งสามารถตกตะกอนหรือจมตัวด้วยตัวเองได้ง่ายเนื่องจากมีขนาดใหญ่ โดยมากการบำบัดแบบนี้จะเป็นขั้นตอนแรกในระบบบำบัดน้ำเสียก่อนนำไปบำบัดด้วยกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

สิ่งเจือปนที่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้ด้วยวิธีทางกายภาพ ได้แก่ กรวด ทราย ไขมัน และน้ำมันที่ไม่ละลายน้ำ รวมถึงของแข็งขนาดใหญ่ เช่น เศษกระดาษ เศษอาหาร พลาสติก เศษผ้า อุปกรณ์ที่ใช้ในบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ได้แก่ ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด ถังดักกรวดทราย ถังดักไขมัน ถังตกตะกอน เป็นต้น

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพเป็นการใช้หลักการทางกายภาพ เช่น แรงโน้มถ่วง (Gravity force) แรงเหวี่ยง หรือแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เป็นต้น เพื่อกำจัดหรือขจัดเอาสิ่งสกปรกออกจากน้ำเสีย โดยเฉพาะสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ จึงนับเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียขั้นแรกที่ถูกนำมาใช้ก่อนที่น้ำเสียจะถูกนำไปบำบัดขั้นต่อไป การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพมีหลายวิธี ได้แก่

1. การกรองด้วยตะแกรง (Screening) เป็นการดักเศษอาหารต่างๆ จำพวก เศษไม้ เศษกระดาษ ผ้า พลาสติก หรือเศษชิ้นส่วนขนาดใหญ่ต่างๆ ที่ไหลมากับน้ำเสีย

2. การตัดย่อย (Comminution) เป็นการลดขนาดหรือปริมาตรของของแข็งให้มีขนาดเล็กลง และมีขนาดสม่ำเสมอเป็นของแข็งที่เน่าเปื่อยได้ เช่น เศษเนื้อ กระดูกหมู กระดูกไก่ เป็นต้น

3. การดักกรวดทราย (Grit Removal) โดยอาจใช้ถังดักกรวดทรายซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้แยกเอาของแข็งที่น้ำหนักมาก เช่น กรวดทราย เศษโลหะ เศษไม้ เศษกระดูก ออกจากน้ำเสีย

4. การกำจัดน้ำมันและไขมัน (Oil and Grease Removal) น้ำเสียจากอุตสาหกรรมหลายประเภทมีน้ำมันหรือไขมันปนอยู่ด้วย เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากไขมันหรือน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำจึงลอยตัวอยู่เหนือน้ำ จึงให้อาศัยหลักการดังกล่าวแยกไขมันและน้ำมันออกจากกันได้ซึ่งเราเรียกว่าถังดักไขมัน

5. การตกตะกอน (Sedimentation) การตกตะกอนเป็นการแยกเอาของแข็งที่มีน้ำหนักมากกว่าน้ำออกจากน้ำเสียโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก

6. การทำให้ลอย (Flotation) เป็นการแยกของแข็งที่ตกตะกอนได้ยาก หรือมีลักษณะครึ่งจมครึ่งลอย หรือมีน้ำหนักเบาออกจากส่วนที่เป็นของเหลวโดยใช้ฟองอากาศเป็นตัวพาหรือยกสิ่งสกปรกให้ลอยสูงขึ้นสู่ผิวของของเหลวกลายเป็นฝ้าซึ่งกวาดออกหรือตักออกโดยใช้คนหรือเครื่องมือกล หรือบางกรณีที่ใช้ในการกำจัดน้ำมันที่ปะปนมากับน้ำเสียในปริมาณไม่มาก วิธีนี้จะใช้ในการแยกตะกอนน้อยกว่าวิธีตกตะกอน เพราะใช้เวลาน้อยกว่าในการแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย แต่ต้องใช้เครื่องจักรกลและพลังงานมากกว่าของวิธีตกตะกอน โดยวิธีการทำให้ตะกอนลอยขึ้นมาอยู่ด้วยกัน 3 วิธีคือ

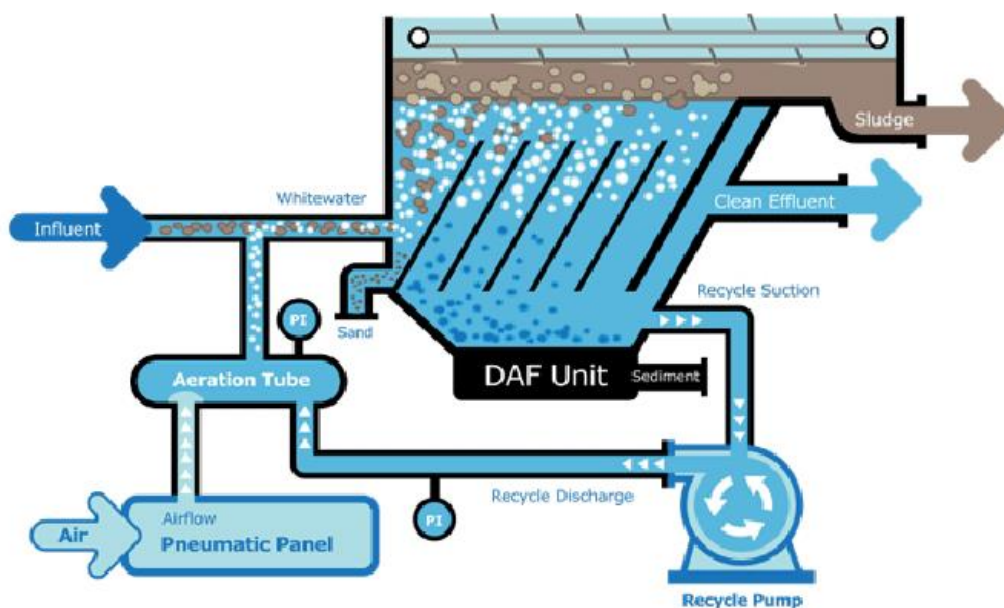
1) การลอยตัวด้วยสุญญากาศ (Vacuum Flotation) หลักการคือ การเป่าอากาศจนน้ำเสียถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมี 2 วิธีได้แก่ การเป่าอากาศลงไปใต้น้ำเสียโดยตรง หรือจะให้อากาศเข้าไปในเครื่องสูบน้ำ ระบบนี้จะใช้ถังปิด ซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว โดยภายในถังจะมีสภาพเป็นสุญญากาศ เมื่อดังนี้ถูกเปิดออก อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะแยกออกมาจากน้ำในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ ซึ่งพาตะกอนในน้ำเสียลอยขึ้นมาบนผิวน้ำในลักษณะที่เป็นฝ้าไข (Scum) และสามารถแยกออกได้โดยการกวาดหรือการสูบออก

2) การลอยตัวด้วยอากาศ (Air Flotation) หลักการคือ ใช้การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรงที่ความดันบรรยากาศ ในการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร นำพาตะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ตะกอนที่ลอยขึ้นมาจะถูกกวาดทิ้งออกไป วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเท่ากับวิธีการลอยตัวด้วยอากาศละลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำกว่า [30]

3) การลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Dissolved air Flotation หรือ DAF) หลักการคือ การเป่าอากาศลงไปใต้น้ำเสียภายใต้ความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 2-3 เท่า โดยส่วนใหญ่ที่ 4-6 บาร์เกจ อากาศจะละลายในน้ำมากขึ้น ขณะที่ลดความดันของน้ำอิมตัวลงไปที่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อากาศส่วนเกินจากจุดการละลายอิมตัวจะเกิดเป็นฟองก๊าซขนาดเล็ก ขนาดในช่วง 20-100 ไมโครเมตร เมื่อฟองอากาศเหล่านี้เคลื่อนที่ชนกับอนุภาคของแข็งในถังลอยตะกอน

(flotation tank) ตะกอนของแข็งจะลอยสู่ผิวหน้าด้านบนของถังเพื่อทำการกำจัดต่อไป ขณะที่น้ำส่วนใสจะไหลออกทางด้านข้างบริเวณกลางถังเพื่อนำไปใช้หรือบำบัดต่อ

การบำบัดน้ำขั้นต้นด้วยระบบ DAF เป็นวิธีหนึ่งที่มีข้อดีคือใช้พื้นที่และการลงทุนต่ำ สามารถเดินเครื่อง และปรับแต่งความเข้มข้นสารเคมีที่ใช้รวมตะกอนอย่างรวดเร็ว สามารถออกแบบเป็นชุดอุปกรณ์ขนาดเล็กที่เคลื่อนย้ายสู่ภาคสนามสะดวก และช่วยลดค่าความขุ่นของน้ำโดยตรงเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน ประหยัดค่าสารเคมีในการทำลายเชื้อโรค [31]

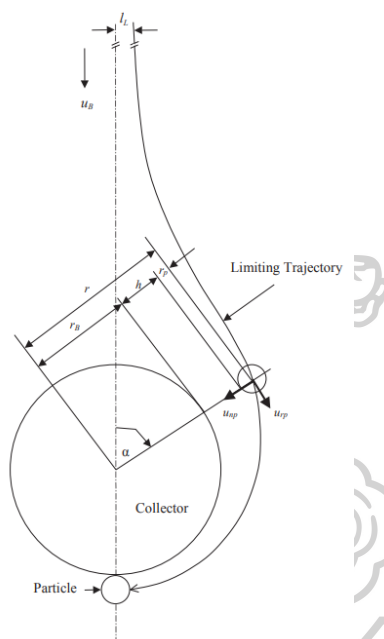


รูปที่ 2.9 กระบวนการลอยตะกอนด้วยอากาศละลาย [32]

2.13 การดูดซับของตะกอนบนฟองอากาศ

ในโซนสัมผัสฟองอากาศและตะกอนจะเคลื่อนที่ อย่างปั่นป่วนแรงกระทำระหว่างฟองอากาศกับตะกอน ประกอบด้วยแรงหลัก 2 แรง คือ แรงไฮโดรไดนามิกส์ และแรงพื้นผิว แรงไฮโดรไดนามิกส์เกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศขึ้นสู่ผิวน้ำ ในขณะที่ฟองอากาศเคลื่อนที่จะเกิดการชนเป้า ซึ่งคืออนุภาคหรืออนุภาคที่ตกตะกอนที่เกิดจากการรวมตัว ถ้าเป้าหมายอยู่ในรัศมีการชนจึงมีโอกาสที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ชน แต่ถ้าเป้าหมายอยู่ห่างออกไปการรวมตัวเป็นอนุภาคที่ตกตะกอน-ฟองจะน้อยลงหรือไม่เกิดขึ้น ส่วนแรงพื้นผิวประกอบด้วยแรงลอนดอน-แวนเดอวาล (London-vander Waals Forces) แรงอิเล็กโตรสแตติก และแรงไฮโดรโฟบิก ในขณะที่ฟองอากาศเคลื่อนที่ขึ้น น้ำที่อยู่ด้านบนของฟองจะถูกบีบอัดให้เคลื่อนที่ไปด้านข้างไปตามผิวสัมผัสฟองไปสู่ด้านล่างของฟอง ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดปรากฏการณ์ขึ้น 2 กรณีคือ เป้าหมายมีขนาดเล็ก หรือใกล้เคียงกับฟอง และในอีกกรณีคือเป้าหมายเป็นอนุภาคที่ตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าฟองมาก ถ้าเป้าหมายมีขนาดเล็กอนุภาคหรืออนุภาคที่ตกตะกอนที่อยู่บริเวณด้านบนของฟองในแนวแกนที่ฟองสามารถ

เคลื่อนที่ชนได้จะเคลื่อนที่ตามทิศทางของน้ำที่ถูกบีบอัด อนุภาคจะเคลื่อนออกด้านข้างและสัมผัสกับฟองที่บริเวณด้านล่างของฟอง แสดงตามรูปที่ 2.10 ถ้าผลลัพธ์ของแรงพื้นผิวเป็นแรงดึงดูดอนุภาคจะถูกดึงดูดให้ออกจากกระแสการไหลและยึดติดกับฟองอยู่ทางด้านใต้ฟองในขณะที่ฟองเคลื่อนที่ขึ้น ส่วนในกรณีที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ ฟองที่มีขนาดเล็กจะให้ผลของแรงผลักไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic Repulsion Forces) ต่ำกว่าแรงดึงดูด ฟองจะเกาะติดและกระจายในอนุภาคที่ตกตะกอน คล้ายกับว่าอนุภาคที่ตกตะกอนทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ยึดฟองอากาศหลายๆ ฟองเข้าด้วยกัน ถ้าแรงลอยตัวสุทธิมากกว่าแรงโน้มถ่วงอนุภาคที่ตกตะกอนจะลอยสู่ผิวน้ำ



รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและการสัมผัสกับฟองอากาศ

แรงพื้นผิวเป็นแรงที่เกิดจากการกระทำของแรงระหว่างฟอง-ฟอง หรืออนุภาค-อนุภาค หรืออนุภาค-ฟอง (อนุภาคในที่นี้รวมถึงอนุภาคที่ตกตะกอนด้วย) แรงพื้นผิวเป็นพันธะทุติยภูมิเกิดระหว่างพื้นผิวของวัตถุ (ทั้งอนุภาคและฟอง) โดยทั่วไปเรียกรวมๆ ว่าแรงลอนดอน-แวนเดอวาล เป็นแรงดึงดูดซึ่งมีผลให้วัตถุเข้าใกล้กัน ถ้าเป็นฟองอากาศซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วแรงกระทำคือไดโพลเหนี่ยวนำชั่วคราว หรือเรียกอีกอย่างว่า London-dispersion ถ้าเป็นอนุภาคอาจเกิดแรงไดโพลถาวร แรงไดโพลเหนี่ยวนำและ แรงไดโพลเหนี่ยวนำชั่วคราว

แรงอิเล็กโตรสแตติก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแรงผลัก เกิดขึ้นจากประจุที่ผิวอนุภาค ซึ่งมีประจุเหมือนกัน โดยที่ประจุที่ผิวของอนุภาคแสดงในเทอมของศักย์ซีต้า (Zeta-Potential) ถ้ามีค่ามากแรงอิเล็กโตรสแตติกจะมีค่ามากตาม

แรงไฮโดรโฟบิก เป็นแรงดึงดูดระยะทางไกล จุดกำเนิดของแรงไฮโดรโฟบิกนี้ยังไม่แน่ชัดแต่เชื่อว่าเกิดจากการเติมสารลดแรงตึงผิว หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แอลกอฮอล์ เมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลาย โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการดูดซับบนผิวอนุภาค และ

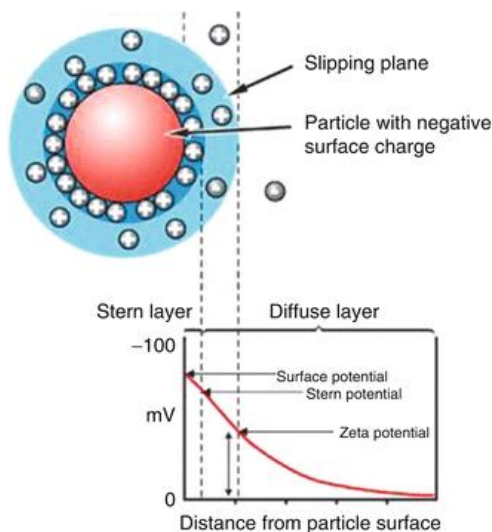
ส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค-อนุภาค โดยอิทธิพลของแรงนี้มีระยะใกล้หรือไกลขึ้นกับสารลดแรงตึงผิวที่เติม โดยระยะห่างของแรงมีค่าอยู่ในช่วง 0–15 นาโนเมตร แรงไฮโดรโฟบิกสามารถเกิดระหว่างพื้นผิวที่ต่างกัน เช่น พื้นผิวของอนุภาคกับฟองอากาศ โดยเฉพาะระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสมบัติของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วยส่วนหัวที่มีขั้วกับส่วนหางที่ไม่มีขั้ว ทำให้เกิดกลไกการดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของสสาร ในระบบ DAF ที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจึงเกิดแรงไฮโดรโฟบิกขึ้นเช่นกัน [31]

2.14 ทฤษฎี Electrical double layer

อนุภาคหลายชนิดมีประจุไฟฟ้าบนผิว เนื่องจากสามารถเลือกดูดไอออนบางชนิดมาติดบนผิวได้ ซึ่งอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในน้ำมักชอบดูดไอออนลบมากกว่าไอออนบวก เพราะไอออนบวกจะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบอยู่ทำให้ไอออนบวกไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคได้แบบชิดเท่ากับไอออนลบ ดังนั้นอนุภาคในน้ำส่วนมากจึงเป็นประจุลบมากกว่าประจุบวก

ทฤษฎี Electrical double layer ผู้สร้างคือ Helmholtz และพัฒนาให้สมบูรณ์ขึ้นโดย Gouy, Chapman และ Stern ซึ่งอธิบายถึงโครงสร้างที่ปรากฏบนพื้นผิวของอนุภาคเมื่อสัมผัสกับโดย double layer หมายถึงชั้นของประจุไฟฟ้าที่ขนานกัน 2 ชั้นที่อยู่รอบๆ วัตถุ ชั้นแรกประกอบด้วยไอออนที่ผิวอนุภาค และเคาเตอร์ไอออน (Counter-ion) หรือไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุที่อยู่บนผิว รวมทั้งไอออนอื่นๆ ที่อยู่ห่างจากผิวอนุภาคประมาณเท่ากับรัศมีของไอออนที่มีน้ำล้อมรอบ โดยไอออนจะดูดซับบนอนุภาคเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี เรียกว่าชั้นนี้ว่าชั้นสเตอร์น (Stern Layer) ชั้นที่สองประกอบด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับชั้นสเตอร์น โดยจะดึงดูดไอออนที่พื้นผิวผ่านแรงคูลอมบ์ ชั้นที่สองนี้จะเกี่ยวข้องกับอนุภาคอย่างหลวมๆ เป็นไอออนอิสระที่เคลื่อนที่ในของไหล ภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และการเคลื่อนที่ด้วยความร้อน จึงเรียกว่าชั้นกระจาย (Diffuse layer)

ค่าของศักย์ที่ Diffuse layer จะเป็นค่าที่ควบคุมความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ในหลายระบบ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคที่มีประจุจะเป็นไปได้เมื่อมีการซ้อนทับของ Diffuse layer ตัวอย่างเช่น เมื่อให้สนามไฟฟ้าเพื่อทำให้อนุภาคของแข็งที่อยู่ในน้ำเคลื่อนที่ เมื่อนั้นประจุที่อนุภาคและไอออนที่อยู่ใน Stern Layer จะเกิดการเคลื่อนไปด้วย ซึ่งก่อให้เกิดระนาบของการแยกที่เรียกว่า Shear plane ความแตกต่างระหว่างศักย์ของสารละลายและศักย์ของ Shear plane ที่เกิดขึ้นนั้นเรียกว่า Zeta-potential (ζ) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถวัดได้จากการทดลอง และจะเป็นค่าที่ใช้แทนค่า Stern potential ซึ่งเป็นค่าที่เมื่อทำการทดลองจะไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้น Electrical double layer จึงมีความสำคัญต่อการศึกษาประจุที่ผิวของอนุภาค [33]



รูปที่ 2.11 โครงสร้าง Electrical double layer [34]

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

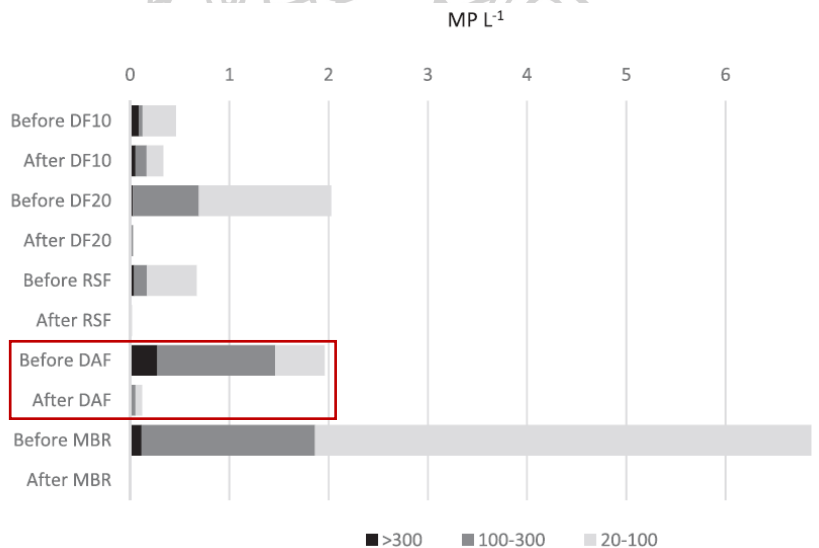
จากงานวิจัยของ Julia Talvitie และคณะ [35] ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการบำบัดขั้นสุดท้ายที่แตกต่างกันเพื่อกำจัด microplastics (MP) ออกจากน้ำทิ้ง โดยจะใช้กระบวนการ discfilter (DF), rapid sand filtration (RSF), dissolved air flotation (DAF) และ membrane bioreactor (MBR) นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบชนิดของ MP (ขนาดและรูปร่าง) ที่ถูกกำจัดออกและชนิดที่ยังเหลืออยู่ในน้ำทิ้งหลังจากการบำบัด โดยจะเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่างอัตโนมัติตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อรวบรวมการเปลี่ยนแปลงการกำจัด MP และความเข้มข้นในหนึ่งวัน รวมไปถึงทำการวิเคราะห์ FTIR สำหรับทุกตัวอย่างในการศึกษา และสุดท้ายจะประเมินสัดส่วนของ primary และ secondary MPs ในน้ำทิ้งขั้นสุดท้าย

การทดลองจะเริ่มจากการสูบน้ำตัวอย่างน้ำเสียระหว่างเดือนเมษายน 2014 และสิงหาคม 2015 โดยการปั้มน้ำ (ความลึก ~1 เมตร) จากกระแสน้ำเสียด้วยปั้มน้ำไฟฟ้าลงในอุปกรณ์กรอง จากนั้นน้ำเสียจะถูกกรองด้วยตัวกรองที่มี mesh-sizes ขนาด 300, 100 และ 20 ไมโครเมตร ทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาด >300, 100-300 และ 20-100 ไมโครเมตร ตามลำดับ ขั้นตอนนี้จะได้ข้อมูลก่อนทำการบำบัดน้ำเสีย แล้วนำน้ำเสียจากขั้นตอนแรกเข้าสู่กระบวนการ dissolved air flotation (DAF) ซึ่งเป็นการบำบัดระดับตติยภูมิแบบเต็มรูปแบบ โดยใน DAF น้ำจะอิมตัวไปด้วยอากาศที่ความดันสูงเมื่อปั้มน้ำไปยัง flotation tank ที่ 1 atm ฟองอากาศที่ถูกลอยเข้ามาในน้ำจะกระจายตัวออกไปเกาะติดกับของแข็งที่แขวนลอยอยู่ทำให้ของแข็งลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ซึ่งก่อนการทำให้ลอยตัวจะมีการเติมสารเคมีที่ทำให้เกิดการตกตะกอน Polyaluminium Chloride (PAX) ปริมาณ 40 mg/L ลงในน้ำเสีย เพื่อเพิ่มการตกตะกอน โดยตัวอย่างจะถูกเก็บซ้ำปริมาณสามชุดทุก 15 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตัวอย่างจะถูกกรองด้วยตัวกรองที่มี mesh-sizes ขนาด 300, 100 และ 20 ไมโครเมตร

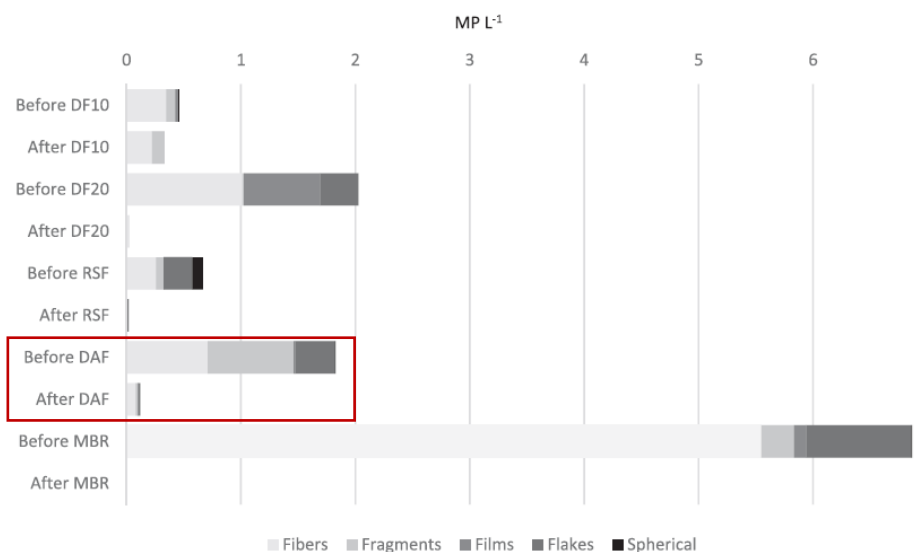
หลังจากนั้นตัวอย่างจะถูกเก็บรวบรวมในงานเลี้ยงเชื้อและเก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง ขั้นตอนนี้จะได้ข้อมูลหลังทำการบำบัดน้ำเสียไปเปรียบเทียบกับขั้นตอนแรก ตัวอย่างทั้งหมดได้รับการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย FTIR spectroscopy อนุภาคที่ถูกเลือกจะถูกแยกออกจากตัวอย่างทั้งหมดแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นและวางลงบนหน้าต่าง ZnSe ปล่อยให้แห้งประมาณหนึ่งชั่วโมง หลังจากนั้นแต่ละหน้าต่างถูกถ่ายภาพและวิเคราะห์ด้วย FTIR ซึ่ง FTIR สเปกตรัมถูกบันทึกในโหมด transmittance ในช่วงความยาวคลื่น $700-4000\text{ cm}^{-1}$ ที่ความละเอียด 4 cm^{-1} และสแกนจำนวน 15 ครั้ง

จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการ DAF สามารถกำจัด MP ที่มีขนาด >20 ไมโครเมตรได้ถึง 95% โดยความเข้มข้นของ MP จะลดลงอย่างชัดเจนจาก $2.0 (\pm 0.07)$ ถึง $0.1 (\pm 0.04)\text{ MPL}^{-1}$ และคาดว่ากระบวนการนี้จะสามารถกำจัดพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อควรระวังคือในการเก็บตัวอย่างถ้าเก็บปริมาณน้อยเกินไปจะมีโอกาสที่จะสุ่มเก็บได้บริเวณที่ไม่มี MP และก่อนทำการกรองตัวอย่างทุกครั้งควรล้างตัวกรองให้สะอาดเพื่อลดการปนเปื้อนและความผิดพลาดในการนับจำนวน MP

สำหรับความเข้มข้นของ MP ที่มีขนาดต่างกันก่อน-หลังการบำบัดจะแสดงในรูปที่ 2.12 และความเข้มข้นของ MP ที่มีรูปร่างต่างกันก่อน-หลังการบำบัดจะแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ความเข้มข้นของ MP ที่มีขนาดต่างกันก่อน-หลังการบำบัด



รูปที่ 2.13 เข้มข้นของ MP ที่มีรูปร่างต่างกันก่อน-หลังการบำบัด

จากการทดสอบหาชนิดของ MP จากตัวอย่างน้ำก่อนและหลังกระบวนการ DAF ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ก่อนเข้ากระบวนการ DAF จะสัมผัส PES, PE, PP, PS, PVA, Polyamide และ Polyacrylates ส่วนหลังเข้ากระบวนการ DAF จะสัมผัส PES, PE, PP, PS, PU, PVC, Polyamide, Polyacrylates และ Alkyd resin โดยปริมาณของ MP ชนิดต่างๆ จะแสดงในตารางที่ 2.1

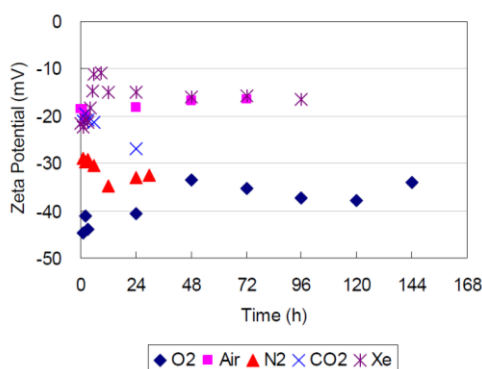
ตารางที่ 2.1 ชนิดและปริมาณของพอลิเมอร์ก่อน-หลังการบำบัด

Polymers	DF10		DF20		RSF		DAF		MBR	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
PES (%)	75.36	66.67	45.89	100	18.16	28.38	24.10	82.24	70.08	100
PE (%)	14.49	33.33	0.66		30.99	1.86	47.08	12.01	3.42	
PP (%)			4.11		1.71	1.86	8.82	0.88	15.8	
PS (%)	2.9					26.53	8.54	1.68		
PU (%)			16.45					0.27	1.36	
PVC (%)			32.89		16.35	1.86		0.27	1.36	
PVA (%)	4.35				0.1		0.05			
Polyamide (%)	1.45						1.7	0.88	2.76	
Acrylamide (%)	1.45									
Polyacrylates (%)					32.07	26.53	9.71	0.88	4.40	
Alkyd resin (%)						1.86		0.88	1.40	
PPO (%)						11.14				
EVA (%)									0.04	
Total amount	6	2	5	1	6	8	7	9	9	1

งานวิจัยของ Fernanda Yumi Ushikubo และคณะ [36] ทำการวัด Zeta-potential ของ Micro- และ nano-bubbles (MNB) ที่ผลิตด้วยก๊าซชนิดต่างๆ และเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับอิทธิพลของชนิดของก๊าซต่อประจุที่ผิวของ MNB โดย MNB ถูกผลิตขึ้นในน้ำบริสุทธิ์เนื่องจากความบริสุทธิ์ของน้ำเป็นสิ่งสำคัญ ในการทดลองต้องแน่ใจได้ว่าค่า zeta-potential ที่วัดได้ในน้ำไม่ได้รับผลกระทบจากไอออนหรือสิ่งสกปรก โดยก๊าซที่ใช้ในการสร้าง MNB คือ O₂, N₂, CO₂, Xe และ air MNB ถูกสร้างขึ้นจากเครื่องโดยใช้วิธีการให้แรงเฉือนสูงที่ได้จากปั๊มส่งไปยังน้ำและก๊าซเพื่อทำการ

ผสม ในงานวิจัยนี้จะเรียกน้ำที่เกิดขึ้นหลังจากการสร้าง MNB ว่า “น้ำ MNB” ค่า zeta-potential จะวัดโดยใช้ Zeta Potential Analyzer ที่มีการติดตั้งกล้อง CCD และกล้อง optical microscope ที่สามารถตรวจจับความเคลื่อนไหวของอนุภาคเมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังทำการวัด DO concentration ด้วยเครื่อง high performance DO meter และวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter ถูกตั้งค่าให้วัดค่าอัตโนมัติที่อุณหภูมิ 20°C

ค่า zeta-potential ที่วัดได้ในน้ำหลังจากการสร้าง MNB โดยใช้ก๊าซชนิดต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าค่าทั้งหมดนั้นเป็นค่าลบ ค่าลบนี้แสดงว่ามีการดูดซับแบบพิเศษของ OH⁻ อยู่ที่พื้นผิวของ MNB ถึงแม้ว่าค่าทั้งหมดจะเป็นค่าลบแต่ก็พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่างคือ O₂ และ N₂ MNB แสดงค่า absolute zeta-potential ที่สูงกว่า (34-45 และ 29-35 mV ตามลำดับ) ในขณะที่ในอากาศ, CO₂ และ Xe MNB ให้ค่า absolute zeta-potential ที่ต่ำกว่า (17-20, 20-27 และ 11-22 mV ตามลำดับ) ในรูปจะเห็นว่าค่า zeta-potential เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเทียบกับเวลา แม้ว่าความหนาแน่นของอนุภาค MNB ที่กระจัดกระจายจะลดลงตามเวลา (ข้อมูลเชิงคุณภาพ) ดังนั้น zeta-potential ไม่ได้เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของจำนวนฟองในน้ำ แต่ขนาดของ zeta-potential บ่งบอกถึงความเสถียรของระบบคอลลอยด์ ทฤษฎี DLVO (Deryaguin-Landau-Verwey-Overbeek) จะกล่าวถึงความสมดุลระหว่างการดูดของแรง Van der Waals และการผลักของแรงประจุไฟฟ้า เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ผิวมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยทั่วไปแล้วค่าสัมบูรณ์ขั้นต่ำที่ 30 mV จะถูกพิจารณาว่าทำให้เกิดการกระจายตัวของ MNB ในน้ำที่เสถียร นอกจากนี้ค่าประจุไฟฟ้าสามารถบ่งบอกถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แตกต่างกันที่ผิวระหว่างแก๊สและของเหลว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่า zeta-potential ที่พบในก๊าซต่างชนิดกันอาจบ่งบอกถึงโครงสร้างที่แตกต่างกันบริเวณต่อประสานที่ผิวและ MNB อาจมีความเสถียรที่แตกต่างกันตามชนิดของก๊าซ

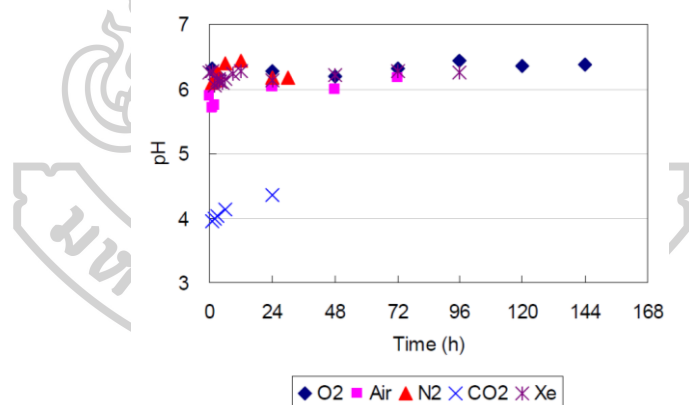


รูปที่ 2.14 ค่า zeta-potential ของตัวอย่างน้ำ O₂, อากาศ, N₂, CO₂ และ Xe MNB

สำหรับ DO concentration พบว่ามีค่าสูงในน้ำ O₂ MNB (40.8 mg L⁻¹) แล้ว DO concentration จะลดลงตามเวลาจนกระทั่งความอิ่มตัว (9.1 mg L⁻¹ ที่ 20°C) ในวันที่สามหลังจาก

การเกิดฟอง น้ำ air MNB แสดง DO concentration เริ่มต้นที่ 10.7 mg L^{-1} หลังจาก 2 ชั่วโมงค่าจะลดลงเป็น 9.5 mg L^{-1} และในการวัดถัดไป 1 วันหลังจากการสร้างฟอง DO concentration จะอยู่ที่ 9.0 mg L^{-1} แสดงว่าแม้ว่าจะถึงจุดอิ่มตัวของออกซิเจนที่ละลายในน้ำแล้วค่า zeta-potential ก็ยังคงเสถียรในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในน้ำตัวอย่างที่มี N_2 , CO_2 และ Xe จะพบว่า DO concentration จะลดลง (0.8 , 0.8 และ 0.2 mg L^{-1} ตามลำดับ) เนื่องจากมีการปล่อยออกซิเจนออกจากน้ำ และ DO concentration จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจนเข้าสู่ความสมดุลของความอิ่มตัว

ค่า pH ของตัวอย่างน้ำ MNB จะแสดงในรูปที่ 2.15 ในขณะที่ก๊าซส่วนใหญ่มีค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 6.1 ถึง 6.4 น้ำ CO_2 MNB จะแสดงค่า pH ประมาณ 4.0 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ H^+ ซึ่งเกิดจากการละลายของ CO_2 ในน้ำ การเปลี่ยนแปลงค่า pH อาจส่งผลต่อค่า zeta-potential ของตัวอย่างนั้นคือ ที่ $\text{pH} > 3$ ฟองอากาศจะเป็นประจุลบ ในขณะที่ $\text{pH} < 2$ ฟองอากาศก็จะเป็นบวก จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าค่า pH ที่ต่ำจะทำให้ค่า absolute zeta-potential ต่ำลง ในทางตรงกันข้ามในกรณีของน้ำอากาศ MNB การเปลี่ยนแปลงของ pH นั้นน้อยเกินไปที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า zeta-potential นอกจากนี้ น้ำ Xe MNB ยังแสดงค่า pH ที่คล้ายกับ O_2 และ N_2 แต่แสดงค่า absolute zeta-potential ที่ต่ำกว่า ดังนั้นสรุปได้ว่าค่า absolute zeta-potential ที่ต่างกันในก๊าซต่างๆ ไม่เพียงเป็นผลมาจากค่า pH แต่ขึ้นกับอย่างอื่นด้วย



รูปที่ 2.15 ค่า pH ของตัวอย่างน้ำ O_2 , อากาศ, N_2 , CO_2 และ Xe MNB

ชนิดของก๊าซอาจมีส่วนต่อโครงสร้างของฟองอากาศ โดยการศึกษาจลนพลศาสตร์ของฟองอากาศได้ข้อสรุปว่าความดันไอภายในฟองไม่เพียงพอที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างที่ผิวของฟอง อย่างไรก็ตามหากขนาดของฟองอากาศลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งก็คือในกรณีของ NB ชนิดของก๊าซอาจมีบทบาทสำคัญในโครงสร้างของส่วนต่อประสาน นอกจากนี้คุณสมบัติเช่น ความสามารถในการละลาย และความหนาแน่นของก๊าซเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินโครงสร้างและความเสถียรของฟองอากาศ ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของก๊าซที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างเช่น ความสามารถในการละลายที่สูงของก๊าซส่งผลให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ขึ้น

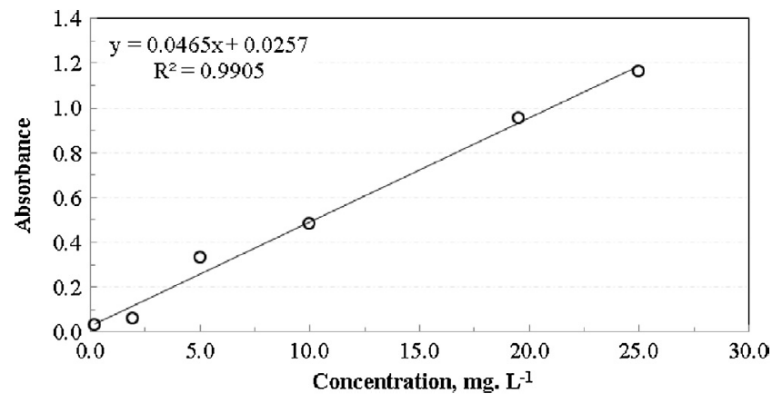
ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการละลายน้ำและความหนาแน่นของก๊าซ

Table 1. Solubility in water and density of different gases
(Source: Lide, 1995-1996)

Gas	Solubility at 293.15 K, 101.3 kPa (10 ⁵ mol gas/mol H ₂ O)	Density at 298.15 K, 101.3 kPa (kg/m ³)
O ₂	2.501	1.404
N ₂	1.274	1.229
CO ₂	70.07	1.931
Xe	9.051	5.761

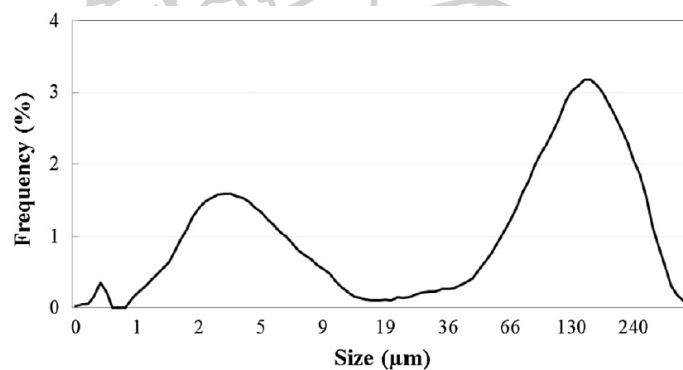
งานวิจัย ของ S. Calgaroto และคณะ [9] ได้นำเสนอเทคนิค dissolved air flotation (DAF) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการแยกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อกำจัด decyl-trimethyl-ether-amine ออกจากน้ำ ในการทดลองจะทำการเตรียมสารละลาย amine (2-500 mg L⁻¹) ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนกับ cationic decyl trimethyl-ether-amine ที่มี molecular weight 195 g mol⁻¹ เพื่อนำไปใช้ตลอดการทดลอง จากนั้นจะถูกนำไปหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค amine ด้วยการเลี้ยวเบนของลำแสงเลเซอร์และค่า zeta-potential ของอนุภาค amine ด้วยเครื่อง ZetaSizer Nano ZS (red badge) Instrument นอกจากนี้ยังทำการเสริมสร้างการตกตะกอนและปรับปรุงการลอยโดยใช้สารละลาย NaCl เพื่อให้ผิวหน้าของอนุภาค amine เสถียร และ pre-polymerized coagulant Acquafloc 18 เพื่อทำการตกตะกอน และมีการใช้ NaOH และ HCl สำหรับการปรับค่า pH ให้มีค่ามากกว่า 10.5 การกำจัดอนุภาคของ amine โดยกระบวนการ DAF จากเครื่องผลิตฟองอากาศในที่นี้จะกล่าวถึงการลอยแบบปกติด้วย MBs, NBs และ F-NBs ที่จะทำในน้ำที่มีแต่ NBs หลังจากแยก MBs ออกไปเท่านั้น โดย MBs ที่วัดได้จากเครื่อง ZetaSizer Nano ZS จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 30-100 ไมโครเมตร และ NBs มีขนาดระหว่าง 300-800 นาโนเมตร

ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของอนุภาค amine ทดสอบได้ด้วยวิธีการ colorimetric method โดยเติม chloroform 25 มิลลิลิตร, สารละลาย bromocresol green buffer 10 มิลลิลิตร (bromocresol green, potassium biphthalate และ 0.1 โมลาร์ NaOH) และตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ใน separating funnel หลังจากกวนสารละลายจะกลายเป็นสีเหลืองซึ่งบ่งบอกถึงการมีอยู่ของ amine หลังจากทำการแยกส่วนคลอโรฟอร์มออกแล้วจะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง spectrophotometer โดย blank ที่มาจาก chloroform เพียงอย่างเดียว และสารละลาย amine มาตรฐาน 5, 10, 15 และ 25 mg L⁻¹ ถูกนำมาใช้ในการสร้างกราฟ calibration curve (รูปที่ 2.16)



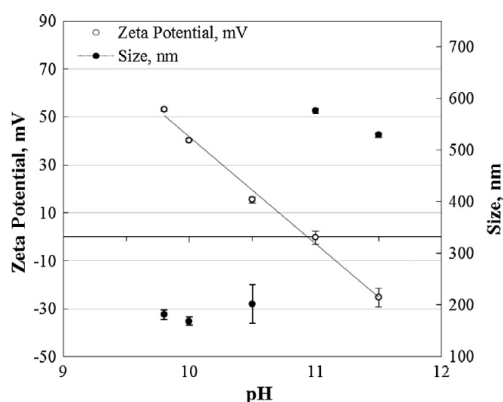
รูปที่ 2.16 กราฟ calibration curve ของ amine

amine species ที่ไม่ละลายน้ำเหล่านี้มีการกระจายขนาดอนุภาคที่กว้างคือตั้งแต่อนุภาคที่มองเห็นได้ (มิลลิเมตร), อนุภาคคอลลอยด์ (ไมโครเมตร) และอนุภาคที่มองไม่เห็น (นาโนเมตร) รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ amine ที่ตกตะกอนที่ pH 10.5 ความเข้มข้นของ amine ที่ 250 mg L⁻¹ หลังจาก 5 นาที พบว่าส่วนใหญ่จะเจออนุภาคที่มีขนาดประมาณ 130 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถมองเห็นได้ง่าย รองลงมาจะเป็นอนุภาคขนาดเพียงไม่กี่ไมโครเมตร (<10 ไมโครเมตร) และส่วนที่เหลือเป็นอนุภาคขนาดนาโน (<1 ไมโครเมตร)



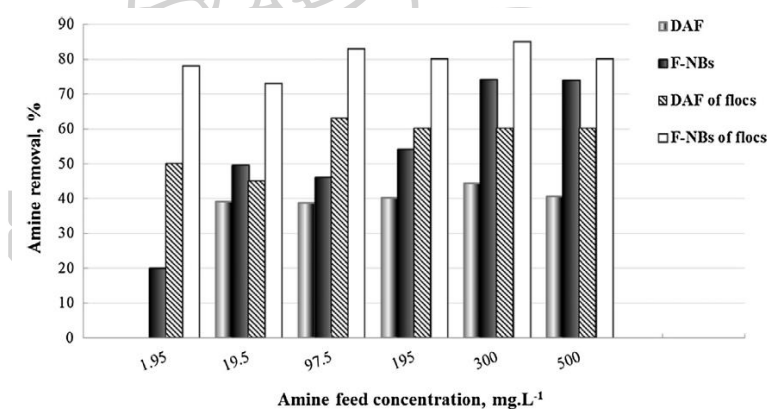
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ amine ที่ตกตะกอนที่ pH 10.5

รูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนมีจุด isoelectric ที่ pH ประมาณ 11 ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับ pH ของการตกตะกอน และมีขนาดใหญ่สุดที่เกือบ 600 นาโนเมตร เมื่ออนุภาคมีประจุอยู่พอสมควรอนุภาคจะมีขนาดเล็กกว่า 200 นาโนเมตร ซึ่งบ่งบอกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคป้องกันการเติบโตของขนาดอนุภาค



รูปที่ 2.18 ขนาดและค่า zeta potential ของตะกอน amine ขนาดนาโนเทียบกับค่า pH

รูปที่ 2.19 แสดงการกำจัด amine โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ DAF และ F-NBs และตารางที่ 2.3 จะสรุปผลลัพธ์จากการกระบวนการที่มีและไม่มี polyaluminum ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ F-NBs มีประสิทธิภาพมากกว่า และ polyaluminum จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพที่เป็นเช่นนี้เชื่อว่าในกระบวนการ DAF การปรากฏตัวของ MBs จะแสดงถึงความเร็วที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะใช้เวลาที่อนุภาค amine จะติดกับพื้นผิวของฟองอากาศ (microbubble/precipitates) ค่อนข้างสั้น นอกจากนี้ยังพบการแตกหักของตะกอนบางส่วนในระหว่างกระบวนการอีกด้วย



รูปที่ 2.19 ปริมาณ amine ที่ถูกกำจัดด้วยกระบวนการ DAF และ F-NBs ที่มีและไม่มี polyaluminum

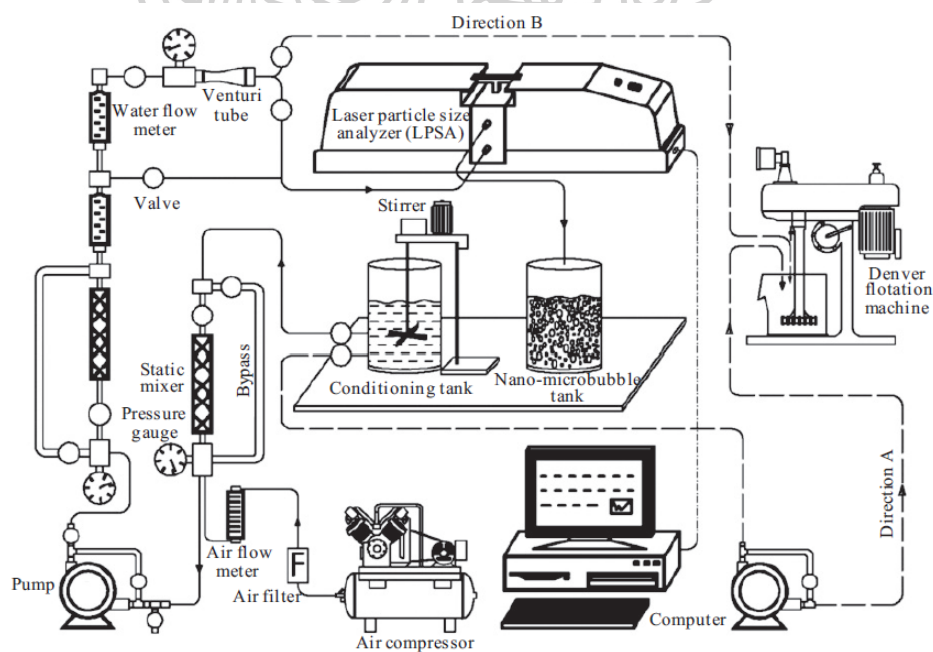
ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพในการกำจัด amine ที่ความเข้มข้นในการบ่อนแตกต่างกันของกระบวนการ DAF และ F-NBs ที่มีและไม่มี polyaluminum

Feed amine concentration, mg L ⁻¹	Residual amine concentration after DAF, mg L ⁻¹	Residual amine concentration after F-NBs, mg L ⁻¹	Residual amine concentration after flocculation + DAF, mg L ⁻¹	Residual amine concentration after flocculation + F-NBs, mg L ⁻¹
0.195	0.1	0.08	0.1	0.02
1.95	0.8	0.6	0.8	0.02
19.5	9	7	10	6
195	78	56	57	35
500	322	140	250	160

^a This concentration was chosen as the most suitable for flotation in terms of size and weight of the flocs formed.

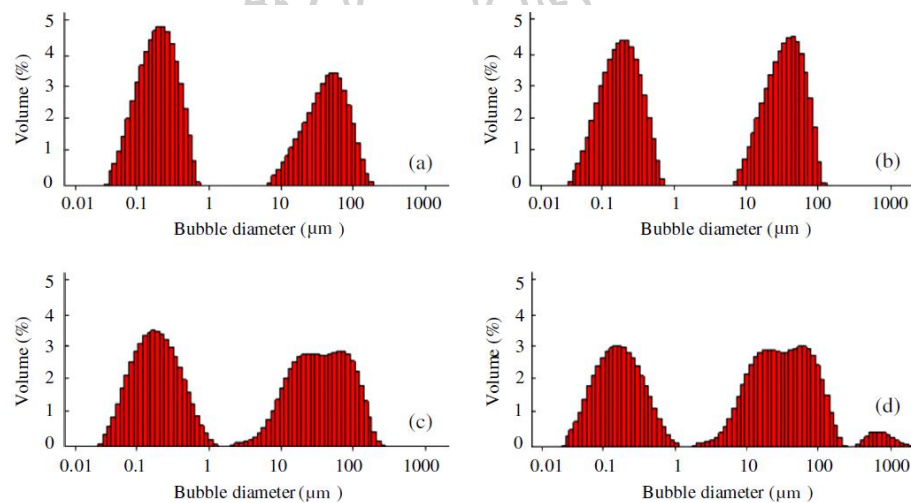
งานวิจัยของ Ahmadi Rahman และคณะ [37] มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการ innovative cavitation nano-microbubble flotation ที่เป็นนวัตกรรมสำหรับการกู้คืนอนุภาค chalcopyrite กลับมา โดยจะตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดและการประเมินความเสถียรของ nano-microbubbles ที่สร้างขึ้น รวมไปถึงการประเมินบทบาทของ nano-microbubbles ต่อการกู้คืนอนุภาค chalcopyrite กลับมา ในการทดลองจะใช้ตัวอย่าง chalcopyrite ที่มีความบริสุทธิ์ การกระจายตัวของขนาดอนุภาค chalcopyrite นั้นวัดด้วยเครื่องมือ cyclosizer การกระจายตัวของขนาดของตัวอย่าง ค่า D_{100} และ D_{50} ของอนุภาค chalcopyrite จะเท่ากับ 38 และ 15.8 ไมโครเมตร ตามลำดับ Potassium Amyl Xanthate (KAX) ถูกใช้เป็นตัว collector และ Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC, $M_w = 102.18$ g/mol) ถูกใช้เป็นตัวทำฟอง รวมทั้ง HCl และ NaOH ถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างของเยื่อกระดาษ น้ำกลั่นที่เตรียมโดยเครื่อง water distillation instrument ใช้สำหรับการเตรียมสารละลายและเยื่อกระดาษทั้งหมด

รูปที่ 2.20 แสดงแผนผังของระบบสร้าง nano-microbubbles สารละลาย nano-microbubbles ถูกถ่ายโอนไปยังเครื่อง Laser Particle Size Analyzer (LPSA) เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของขนาดฟองอากาศ ค่า zeta-potential ของสารละลาย nano-microbubbles (ฟองและน้ำ) จะถูกวัดเป็นฟังก์ชันของเวลาที่ pH=10 โดยใช้เครื่อง zetasizer instrument ซึ่งข้อมูลที่ได้แต่ละจุดคือค่าเฉลี่ยของการวัดสองครั้งที่อุณหภูมิห้อง เครื่อง Du Nouy Ring Tensiometer ถูกนำมาใช้เพื่อวัดแรงตึงผิวของสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันที่ $22 \pm 1^\circ\text{C}$

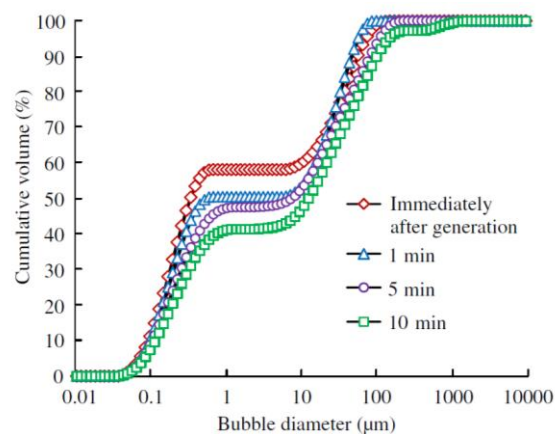


รูปที่ 2.20 แผนผังของระบบสร้าง nano-microbubbles และเครื่อง Laser Particle Size Analyzer

รูปที่ 2.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของขนาดของ nano-microbubbles เป็นฟังก์ชันของเวลา ตามรูปที่ 2.21a กราฟจะปรากฏพีคจำนวนสองพีคในช่วงขนาดนาโนและไมครอนขึ้นทันทีหลังจากผลิตฟอง ขนาด nano-microbubble เฉลี่ย ; $D_b(0.5)$ ในช่วงนี้พบว่าเป็น 358 นาโนเมตร (รูปที่ 2.22) รูปที่ 2.21b และ c ยืนยันการเกิดขึ้นของพีคจำนวนสองพีคเมื่อเวลาในการผลิตฟอง 1 และ 5 นาที หนึ่งในพีคนี้เกิดขึ้นในช่วงขนาดนาโนเมตร ขณะที่อีกพีคหนึ่งเกิดขึ้นในช่วงขนาดไมโครเมตร ขนาด nano-microbubble เฉลี่ยที่เวลา 1 และ 5 นาที พบว่าเป็น 580 และ 7.87 ไมโครเมตร ตามลำดับ ตามที่ปรากฏในรูปที่ 2.23 และสุดท้ายหลังจากผลิต nano-microbubble เป็นเวลา 10 นาที กราฟจะปรากฏพีคจำนวนสามพีคดังแสดงในรูปที่ 2.21d ขนาดเฉลี่ยของ nano-microbubble ; $D_b(0.5)$ วัดได้ 13.24 ไมโครเมตร (ภาพที่ 2.22) การเพิ่มขึ้นของขนาดเฉลี่ยของ nano-microbubble ในช่วงเวลาหนึ่งๆ อาจเกิดจากการรวมตัวกันทำให้เกิดฟองที่ใหญ่ขึ้น

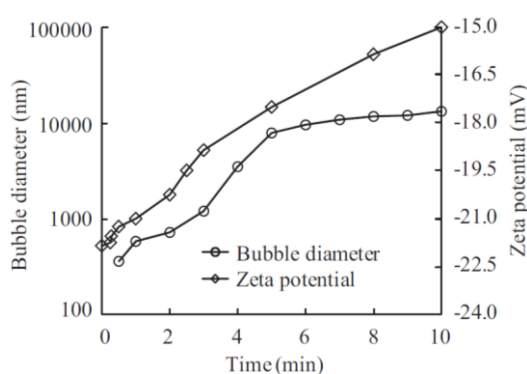


รูปที่ 2.21 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวของขนาด nano-microbubbles a) ทันทีหลังสร้าง nano-microbubbles, b) 1 นาที, c) 5 นาที และ d) 10 นาที, MIBC 100 mg/L ที่ $T = 22^{\circ}\text{C}$



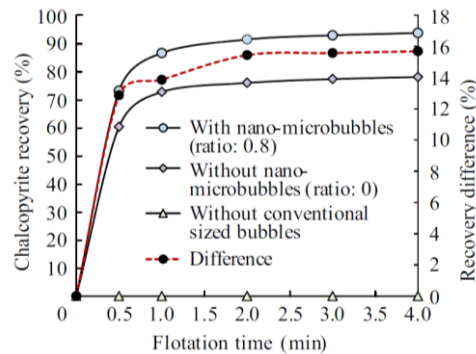
รูปที่ 2.22 ผลของเวลาต่อขนาด nano-microbubbles

รูปที่ 2.23 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า zeta-potential ของ nano-microbubbles ที่ pH 10 ในช่วงเวลา 10 นาที นับตั้งแต่ผลิตฟอง รูปนี้แสดงให้เห็นว่าค่า absolute zeta potential จะลดลงจากประมาณ 22 mV เป็น 15 mV อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าในระบบคอลลอยด์มีแนวโน้มที่จะผลักกันเมื่อมีค่า zeta potential ที่สูง ในกรณีการกระจายตัวของฟองอากาศที่มีค่า zeta-potential สูงจะทำให้เกิดแรงผลัก ซึ่งเป็นการป้องกันการรวมตัวกันและช่วยเพิ่มเสถียรภาพของฟองอากาศ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของขนาด nano-microbubble เฉลี่ยจึงสามารถเชื่อมโยงกับผลของการรวมตัวกัน เนื่องจากการลดลงของค่า zeta-potential ที่พื้นผิวฟองอากาศเมื่อเวลาผ่านไป



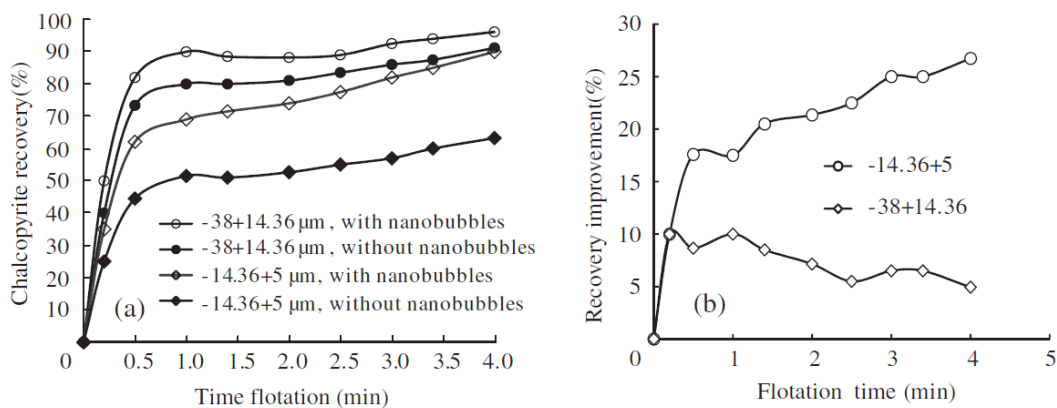
รูปที่ 2.23 ค่า zeta-potential ของ nano-microbubbles ที่ pH 10, MIBC 100 mg/L ที่ $T = 22^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 2.24 แสดงการกักตัวของอนุภาค chalcopyrite เมื่อเทียบกับเวลา ในกรณีที่มีและไม่มี nano-microbubbles ที่เวลา 0.5, 1, 2, 3 และ 4 นาที กราฟแสดงให้เห็นว่าการกักตัวของ chalcopyrite กรณีที่มีการ nano-microbubbles สูงกว่ากรณีที่ไม่มี ความแตกต่างของการกักตัวของ chalcopyrite ไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เป็น 4 นาที ดังนั้นความแตกต่างสูงสุดในการกักตัวจะอยู่ที่ 0.5 นาทีแรกของการลอย ภายในกรอบเวลานี้ nano-microbubbles มีที่ขนาดเฉลี่ยที่เล็กมีความเข้มข้นสูง ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าเนื่องจากมีค่า absolute zeta potential ที่สูงขึ้น (รูปที่ 2.22) เมื่อเวลาผ่านไปขนาดของ nano-microbubbles จะเพิ่มขึ้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.23 พื้นผิวที่มีประสิทธิภาพและความเข้มข้นของปริมาตรจะลดลง ความจริงที่ว่าเส้นกราฟที่มี nano-microbubbles อยู่เหนือเส้นกราฟอื่นๆ แสดงว่าการมีอยู่ของ nano-microbubbles ได้ปรับปรุงจลนพลศาสตร์ในการลอย แต่ยิ่งไปกว่านั้นจากรูปที่ 2.24 จะเห็นว่าการมีแค่ nano-microbubbles ไม่สามารถช่วยให้เกิดการลอยตัวของอนุภาค chalcopyrite ในกรณีที่ไม่มีฟองขนาดปกติได้ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่า nano-microbubbles ไม่ได้มีผลโดยตรงต่อการลอยของอนุภาค chalcopyrite



รูปที่ 2.24 แสดงการกู้คืนของอนุภาค chalcopyrite เมื่อเทียบกับเวลา ในกรณีที่มีและไม่มี nano-microbubbles, MIBC 1.2 kg/t, KAX = 0.4 kg/t

รูปที่ 2.25 แสดงการกู้คืนของ chalcopyrite เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการลอยตัวสำหรับสองช่วงขนาดอนุภาค (+14.36-38 และ +5-14.36 ไมโครเมตร) ในกรณีที่มีและไม่มี nano-microbubbles สำหรับอัตราส่วน nano-microbubbles เท่ากับ 0.8 จากรูปที่ 2.25a อนุภาคขนาดเล็กกว่านั้นมียัตราการลอยที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคที่ใหญ่กว่าเนื่องจากความสามารถในการลอยตัวต่ำ โดยการกู้คืนของ chalcopyrite ในช่วงขนาดอนุภาคทั้งสองนั้นสูงกว่ากรณีที่มี nano-microbubbles นอกจากนี้จากรูปที่ 2.25b เป็นที่ชัดเจนว่าในการกู้คืนในกรณีที่ไม่มีและมี nano-microbubbles สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะดีกว่าอนุภาคใหญ่กว่า หลังจากลอยอยู่ในน้ำ 4 นาที การกู้คืนของอนุภาค +14.36-38 ไมโครเมตร กรณีมี nano-microbubbles นั้นเป็น 4.93% ซึ่งสูงกว่ากรณีไม่มี nano-microbubbles ในขณะที่อนุภาค +5-14.36 ไมโครเมตร มีการกู้คืนเป็น 26.73% ดังนั้น nano-microbubble จึงมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกู้คืนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ามากกว่าอนุภาคที่ใหญ่กว่า เหตุผลหนึ่งที่เป็นไปได้คือผลกระทบของ nano-microbubbles ต่อการเพิ่มขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กกว่านั้นจะสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่กว่า



รูปที่ 2.25 แสดงการกู้คืนของ chalcopyrite (+14.36-38 และ +5-14.36 ไมโครเมตร) เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการลอยตัว, MIBC 1.2 kg/t, KAX = 0.4 kg/t

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 PS ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เอ็กซ์เซล ซุปเปอร์แพค จำกัด
- 3.1.2 PET ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท อาร์ แอนด์ บี ฟู้ด ซัพพลาย จำกัด (มหาชน)
- 3.1.3 PVC ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท อาร์ แอนด์ บี ฟู้ด ซัพพลาย จำกัด (มหาชน)
- 3.1.4 PBS จากบริษัท โชวา เดนโกะ เกรด bionolle™ 1001MD
- 3.1.5 PLA จากบริษัท เนเซอร์เวิร์คส์ เกรด Ingeo™ 3052D
- 3.1.6 PA 6
- 3.1.7 PBAT จากบริษัท เนเซอร์เวิร์คส์ เกรด Ecoflex® C1200
- 3.1.8 ถังน้ำขนาด 8 ลิตร จำนวน 1 ถัง
- 3.1.9 เครื่องผลิต micro/nano-bubble (RMUTT 04 MNB Generator) จำนวน 1 เครื่อง
- 3.1.10 ปีมลัม จำนวน 1 เครื่อง
- 3.1.11 สายยางขนาด 3/8 นิ้ว จำนวน 1 สาย
- 3.1.12 สายยางขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 1 สาย
- 3.1.13 สายยางขนาด 5/8 นิ้ว จำนวน 1 สาย
- 3.1.14 ตัวต่อสายยาง จำนวน 1 อัน
- 3.1.15 ท่อ PVC ขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 1 เส้น
- 3.1.16 ท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว จำนวน 1 เส้น
- 3.1.17 ข้อต่อสามทางขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 1 ตัว
- 3.1.18 ข้องอ 90° ขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 2 ตัว
- 3.1.19 วาล์วปรับระดับน้ำขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 1 ตัว
- 3.1.20 ข้องอ 45° ขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 1 ตัว
- 3.1.21 ข้อต่อตรงเกลียวใน ขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 3 ตัว
- 3.1.22 หัวกันไหลเกลียวนอก ขนาด 3/4 นิ้ว x 1/2 นิ้ว จำนวน 3 ตัว
- 3.1.23 ฝาครอบขนาด 2 นิ้ว จำนวน 1 ตัว
- 3.1.24 กาวทาท่อ PVC จำนวน 1 กระป๋อง
- 3.1.25 ปีกเกอร์ขนาด 2 ลิตร จำนวน 5 ใบ
- 3.1.26 หลอดทดลองพร้อมที่วางหลอดทดลอง จำนวน 1 ชุด
- 3.1.27 ซ้อนตักสาร จำนวน 2 อัน
- 3.1.28 กระบอกฉีดยา ขนาด 50 มิลลิลิตร จำนวน 1 อัน

- 3.1.29 กระจกทรง ขนาด 70 มิลลิเมตร จำนวน 4 ก่อง
- 3.1.30 งานเพาะเชื้อแก้วขนาด 100x15 มิลลิเมตร จำนวน 18 คู่
- 3.1.31 ชุดกรองบูชเนอร์ จำนวน 1 ชุด
- 3.1.32 ปีมสำหรับกรองสาร จำนวน 1 เครื่อง
- 3.1.33 ตู้อบ จำนวน 1 ตู้
- 3.1.34 เครื่องชั่งน้ำหนัก จำนวน 1 เครื่อง
- 3.1.35 เทอร์โมมิเตอร์ จำนวน 1 อัน
- 3.1.36 เครื่องปั่น ยี่ห้อ MRC Laboratory Equipment Manufacturer รุ่น KM-1500
- 3.1.37 เครื่อง Particle size distribution analyzer ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA-950
- 3.1.38 เครื่อง Gas pycnometer ยี่ห้อ Anton Paar รุ่น Ultrapyc 5000
- 3.1.39 กล้อง Optical microscope ยี่ห้อ SEEK ที่มีการติดตั้งโปรแกรม seekscope i-Measure HD
- 3.1.40 เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Clean Instruments รุ่น PH30
- 3.1.41 เครื่อง Zetasizer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Nano ZS

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 น้ำ RO (Reverse osmosis)
- 3.2.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ หรือน้ำยาล้างจาน (Anionic-surfactant)
- 3.2.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide : CO₂)

3.3 การดำเนินงานวิจัย

- 3.3.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.3.2 ออกแบบการทดลองและวางแผนวิธีทดลอง
- 3.3.3 ดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 เตรียม microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อนำไปทดสอบการแยกออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

ทำการบดเม็ดพลาสติกชนิด PS, PET, PVC, PBS และ PLA ด้วยเครื่องปั่น ยี่ห้อ MRC Laboratory Equipment Manufacturer รุ่น KM-1500 แต่เม็ดพลาสติกชนิด PA6 และ PBAT มีความแข็งและเหนียวจึงไม่สามารถบดเพื่อให้กลายเป็นผง microplastic ได้โดยตรง ต้องใช้วิธีการแช่เม็ดพลาสติกในไนโตรเจนเหลวก่อน แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องปั่นร่วมด้วย จากนั้นจึงนำไป sieve ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 18, 140 และ 400 mesh เพื่อให้ได้ผง microplastic ที่มีขนาดอนุภาค 1,000-3,000, 106-1,000 และ 38-106 ไมโครเมตร เพื่อยืนยันว่า microplastic ที่เตรียมได้มีขนาด

อนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ต้องการ จึงทำการวัดขนาดอนุภาคของ microplastic ด้วยเครื่อง Particle size distribution analyzer ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA-950 และกล้อง Optical microscope ยี่ห้อ SEEK ในการถ่ายภาพและวัดขนาด microplastic จะใช้โปรแกรม seekscope i-Measure HD จากนั้น เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค จึงนำรูป microplastic ที่ถ่ายได้ไปวิเคราะห์ด้วย โปรแกรม JMicroVision ต่อไป รวมไปถึงนำเม็ดพลาสติกไปทดสอบวัดค่าความหนาแน่นด้วยเครื่อง Gas pycnometer ยี่ห้อ Anton Paar รุ่น Ultrapyc 5000

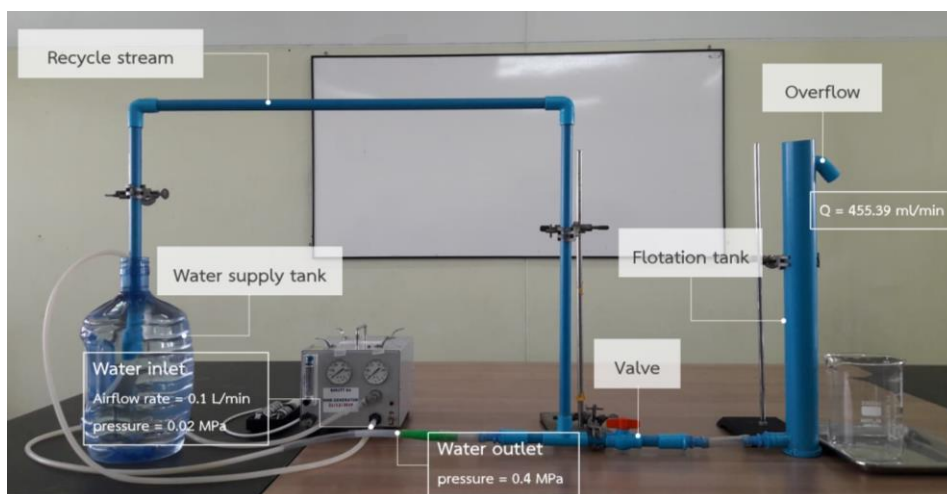
ส่วนที่ 2 ติดตามการเกิดของ micro/nano-bubbles ชุดการทดลองที่ติดตั้งขึ้น

ผลิต air MNBs ในน้ำเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที จากนั้นสุ่มตัวอย่างน้ำ air MNBs ที่ผลิตที่เวลาต่างๆ ด้วยกระบอกฉีดยาขนาด 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในคิวเวท (Cuvette) แล้วทำการวัดค่า zeta-potential และวัดการกระจายตัวของขนาด air MNBs โดยใช้เครื่อง Zetasizer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Nano ZS

ผลิต CO₂ MNBs ในน้ำเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที จากนั้นสุ่มตัวอย่างน้ำ air MNBs ที่ผลิตที่เวลาต่างๆ ด้วยกระบอกฉีดยาขนาด 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในคิวเวท (Cuvette) แล้วทำการวัดค่า zeta-potential และวัดการกระจายตัวของขนาด air MNBs โดยใช้เครื่อง Zetasizer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Nano ZS

ส่วนที่ 3 ติดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles

ทำการจัดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubble (MNBs) โดยใช้ท่อ PVC กระบวนการเริ่มต้นโดยน้ำจากถังจ่ายน้ำ (water supply tank) ขนาด 8 ลิตร ไหลเข้าเครื่องผลิต MNBs (RMUTT 04 MNB Generator) โดยมีการต่อป้อนลมกับเครื่องผลิต MNBs น้ำผ่านสายยาง ขนาด 3, 4 และ 5 หุน และผ่านวาล์วปรับระดับน้ำ (valve) เข้าสู่ถังลอยตะกอน (flotation tank) จากนั้นน้ำจะผ่านส่วนน้ำล้น (overflow) นอกจากนี้ยังสร้างท่อสำหรับกระแสรีไซเคิล (recycle stream) เพื่อลดความดันอันเมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังลอยตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงชุดการทดลองการผลิต MNBs

ส่วนที่ 4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

ทดสอบประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000, 106-1,000 และ 38-106 ไมโครเมตร ออกจากน้ำ โดยเติม microplastic ที่น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g ลงในถังลอยตะกอน จากนั้นผลิตน้ำ air MNBs ด้วยเครื่องผลิต MNBs โดยใช้เวลาที่ microplastic สัมผัส air MNBs เป็น 10, 20 และ 30 นาที microplastic ที่ถูกแยกออกจากน้ำจะผ่านส่วนน้ำล้นไปยังบีกเกอร์เพื่อนำไปกรองและอบให้แห้งด้วยตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง microplastic ที่แห้งแล้วถูกชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณ %removal efficiency โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่ง %removal efficiency คือปริมาณ microplastic ที่แยกออกจากน้ำจากปริมาณ microplastic ทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในระบบ แล้วคิดให้เป็นค่าร้อยละโดยการคูณด้วย 100 สมการของ %removal efficiency แสดงดังสมการที่ 3.1 จากผลการทดลองจะเลือกชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองในส่วนต่อไป โดยการทดลองเป็นแบบ continuous process และมีการวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าเครื่องผลิต MNB และหลังจากออกจากเครื่องผลิต MNB

$$\% \text{removal efficiency} = \frac{\text{ปริมาณ microplastic ที่แยกออกจากน้ำ}}{\text{ปริมาณ microplastic ทั้งหมดที่ใส่เข้าไปในระบบ}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบการแยก microplastic ผสม ชนิด PBS, PLA และ PBAT ขนาด 1,000-3,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำ โดยเติม microplastic ผสมที่น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g อัตราส่วนของ microplastic แต่ละชนิดเป็น 1:1:1 ลงในถังลอยตะกอน ผลิตน้ำ air MNBs ด้วยเครื่องผลิต MNBs โดยใช้เวลาที่ microplastic สัมผัส air MNBs เป็น เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที จากนั้น microplastic ที่ถูกแยกออกจากน้ำจะผ่านส่วนน้ำล้นไปยังบีกเกอร์เพื่อนำไป

กรองและอบให้แห้งด้วยตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง microplastic ที่แห้งแล้วถูกชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณ %removal efficiency โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยการทดลองเป็นแบบ continuous process

ส่วนที่ 5 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำ

ทดสอบเบื้องต้นโดยการแยก microplastic ชนิด PBS ที่มีขนาดอนุภาค 1,000-3,000 ไมโครเมตร ซึ่งเป็น microplastic ที่แยกออกจากน้ำได้ยากที่สุด ที่น้ำหนัก 2.1 g ในน้ำ air MNBs ปริมาตร 1 ลิตร ที่ผ่านการผลิต air MNBs เป็นเวลา 30 นาที กรณีมีการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ หรือน้ำยาล้างจานปริมาณ 0.5 g เทียบกับกรณีไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยในการทดลองจะทำในบีกเกอร์ และการทดลองเป็นแบบ batch process

ทำการเลือก microplastic ที่แยกออกจากน้ำได้ยากที่สุด 2 ชนิด จากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 4 ซึ่งได้แก่ PA 6 และ PBS ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร และ 106-1,000 ไมโครเมตร โดยทำการเปลี่ยนก๊าซที่ใช้ในการผลิต MNBs จาก air เป็น CO₂ โดยทำการแยก microplastic ออกจากน้ำ โดยเติม microplastic ที่น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g ลงในถังลอยตะกอน จากนั้นผลิตน้ำ CO₂ MNBs ด้วยเครื่องผลิต MNBs โดยใช้เวลาที่ microplastic สัมผัส CO₂ MNBs เป็น 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที จากนั้น microplastic ที่ถูกแยกออกจากน้ำจะผ่านส่วนน้ำล้นไปยังบีกเกอร์เพื่อนำไปกรองและอบให้แห้งด้วยตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง microplastic ที่แห้งแล้วถูกชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณ %removal efficiency โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย การทดลองเป็นแบบ continuous process

3.3.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

3.3.5 รายงานผลการวิจัย

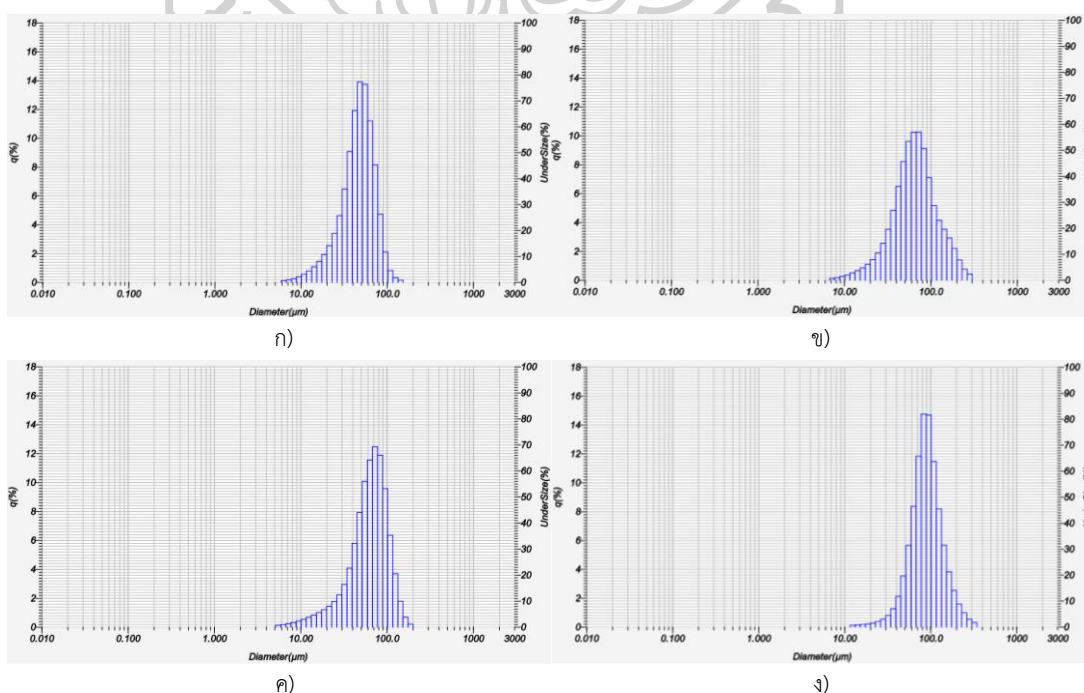
บทที่ 4

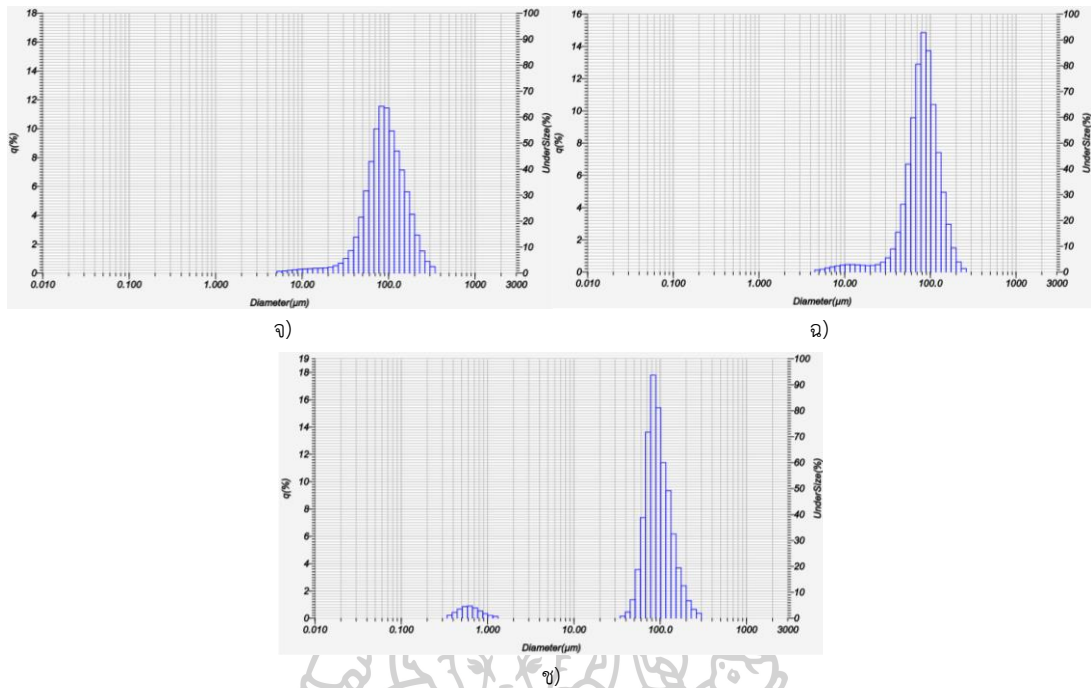
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 เตรียม microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันเพื่อนำไปทดสอบการแยกออกจากน้ำ ด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

ทำการบดเม็ดพลาสติกชนิด PS, PET, PVC, PBS และ PLA ด้วยเครื่องบด แต่เม็ดพลาสติกชนิด PA6 และ PBAT ไม่สามารถบดเพื่อให้กลายเป็นผง microplastic ได้โดยตรง ต้องใช้วิธีการแช่เม็ดพลาสติกในไนโตรเจนเหลวก่อน แล้วจึงนำไปบดด้วยเครื่องบดร่วมด้วย จากนั้นจึงนำไป sieve ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 18, 140 และ 400 mesh เพื่อให้ได้ผง microplastic ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000, 106-1,000 และ 38-106 ไมโครเมตร

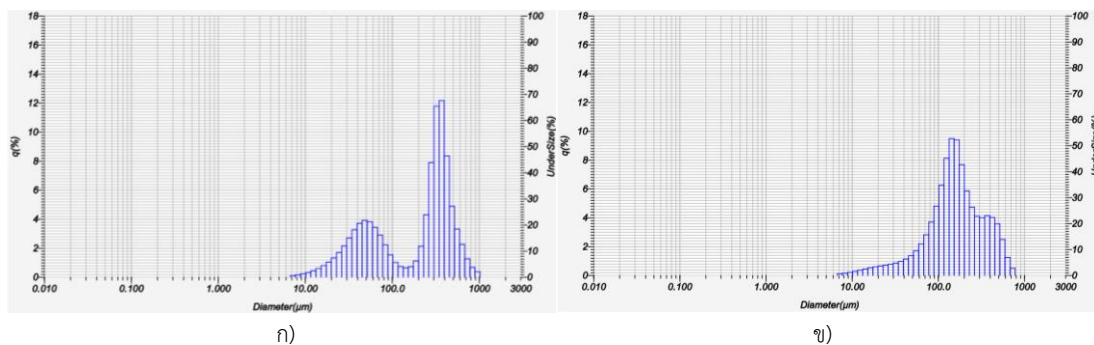
เพื่อยืนยันว่า microplastic ที่เตรียมได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ต้องการ จึงทำการวัดขนาดอนุภาคของ microplastic ด้วยเครื่อง Particle size distribution analyzer ยี่ห้อ Horiba รุ่น LA-950 โดยใช้หลักการ Laser scattering พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่อยู่ระหว่างตะแกรงร่อนขนาด 140 และ 400 mesh คือ 48.7 ± 20.3 , 75.9 ± 46.4 , 67.1 ± 30.7 , 96.9 ± 44.4 , 101.4 ± 52.8 , 86.0 ± 37.3 และ 95.3 ± 42.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วง 38-106 ไมโครเมตร ตามต้องการ โดย microplastic ชนิด PS มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด และ microplastic ชนิด PLA มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic จะเป็นแบบ monomodal แต่ microplastic ชนิด PBAT จะเป็นแบบ bimodal การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแสดงในรูปที่ 4.1

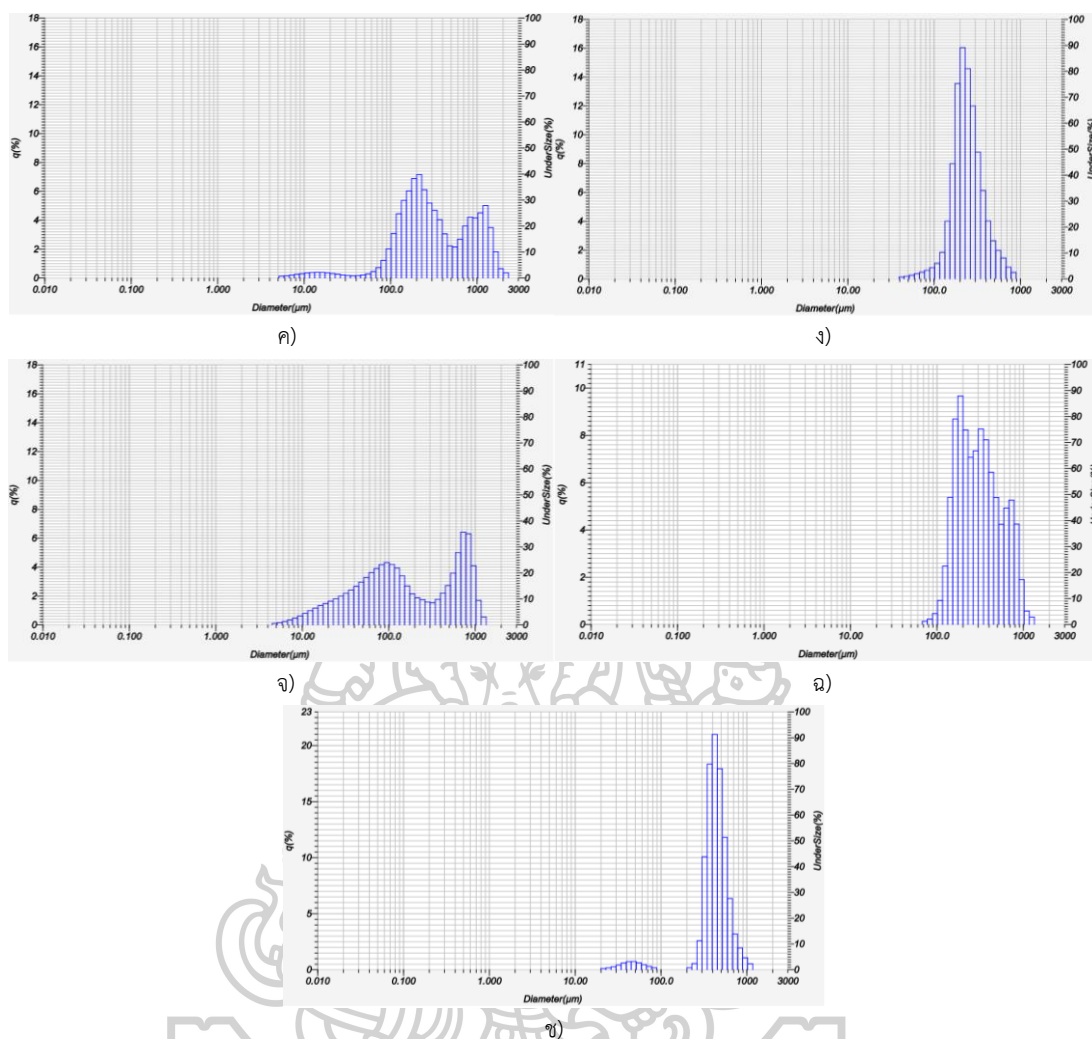




รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 38-106 ไมโครเมตร

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่อยู่ระหว่างตะแกรงร่อนขนาด 18 และ 140 mesh คือ 253 ± 198 , 198 ± 142 , 484 ± 447 , 263 ± 120 , 305 ± 321 , 365 ± 223 และ 447 ± 159 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร ตามต้องการ โดย microplastic ชนิด PET มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด และ microplastic ชนิด PVC มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุด ซึ่งส่วนใหญ่การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic จะเป็นแบบ bimodal แต่ microplastic ชนิด PBS และ PA6 จะเป็นแบบ monomodal การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแสดงในรูปที่ 4.2



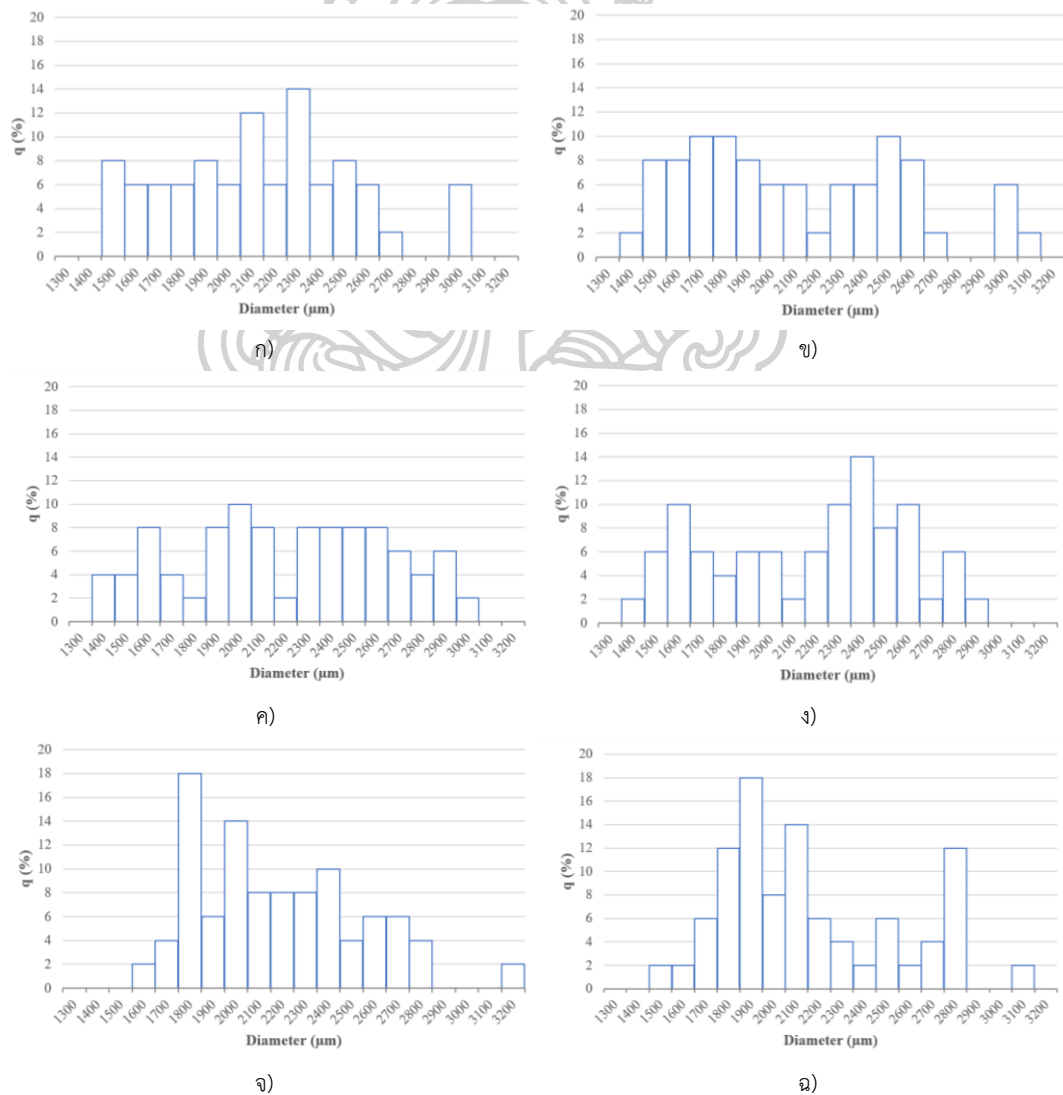


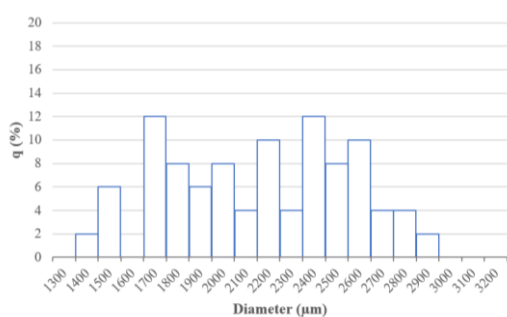
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร

แต่วิธีการวัดขนาดอนุภาคของ microplastic ด้วยเครื่อง Particle size distribution analyzer ไม่สามารถใช้วัดขนาดอนุภาคของ microplastic ที่อยู่บนตะแกรงร่อนขนาด 18 mesh ได้ เนื่องจาก microplastic ที่อยู่บนตะแกรงร่อนขนาด 18 mesh ไม่สามารถกระจายตัวในตัวอย่างได้ในระหว่างการวัด ดังนั้น ในการวัดขนาดอนุภาคของ microplastic ที่อยู่บนตะแกรงร่อนขนาด 18 mesh จึงต้องใช้กล้อง Optical microscope แทน โดยใช้กล้อง Optical microscope ยี่ห้อ SEEK ในการถ่ายภาพและวัดขนาด microplastic จะใช้โปรแกรม seekscope i-Measure HD ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ microplastic ที่อยู่บนตะแกรงร่อนขนาด 18 mesh ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT คือ $2,092 \pm 394$, $2,062 \pm 457$, $2,155 \pm 437$, $2,120 \pm 421$, $2,133 \pm 352$, $2,106 \pm 382$ และ $2,107 \pm 391$ ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร ตามต้องการ จากนั้นเพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของขนาดอนุภาค จึงนำรูป microplastic ที่ถ่ายได้ไป

วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม JMicroVision ต่อไป การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะแสดงในรูปที่ 4.3 โดย microplastic ชนิด PET มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กที่สุด และ microplastic ชนิด PVC มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่ที่สุด ซึ่งการกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ทุกชนิดจะเป็นแบบ multimodal

และเมื่อนำเม็ดพลาสติกไปทดสอบวัดค่าความหนาแน่นด้วยเครื่อง Gas pycnometer ยี่ห้อ Anton Paar รุ่น Ultrapyc 5000 พบว่า ความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของเม็ดพลาสติกชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT คือ 1.4163 ± 0.0011 , 1.4169 ± 0.0049 , 1.3818 ± 0.0041 , 1.3220 ± 0.0010 , 1.2982 ± 0.0013 , 1.1863 ± 0.0003 และ 1.2659 ± 0.0058 g/cm³ ตามลำดับ จะเห็นว่า microplastic ชนิด PET มีความหนาแน่นมากที่สุด รองลงมาจะเป็น microplastic ชนิด PS, PVC, PBS, PLA, PBAT และ PA6 ตามลำดับ



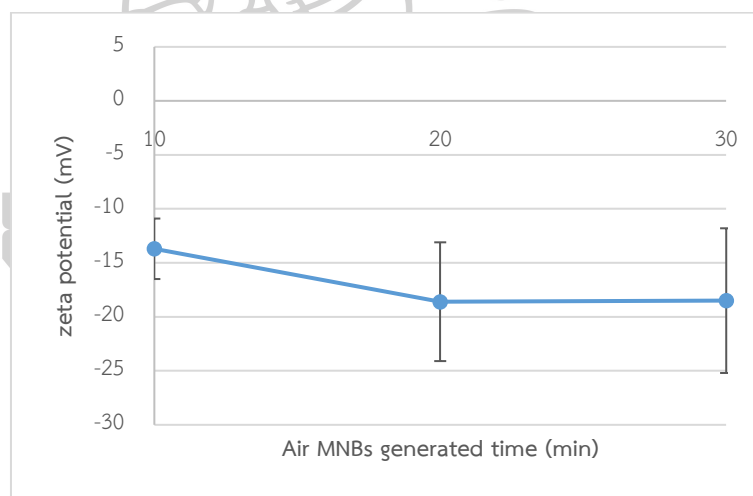


ช)

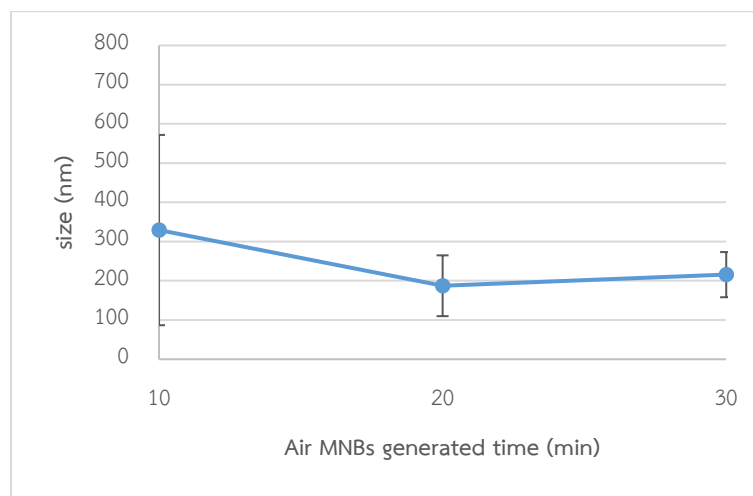
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร

4.2 ติดตามการเกิดของ micro/nano-bubbles ชุดการทดลองที่ติดตั้งขึ้น

การติดตามการเกิด และวัดการกระจายตัวของขนาด air MNBs โดยจะทำการผลิต air MNBs ในน้ำ เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที จากนั้นสุ่มตัวอย่างไปวัดค่า zeta-potential และวัดการกระจายตัวของขนาด air MNBs โดยใช้เครื่อง Zetasizer ยี่ห้อ Malvern รุ่น Nano ZS จะแสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



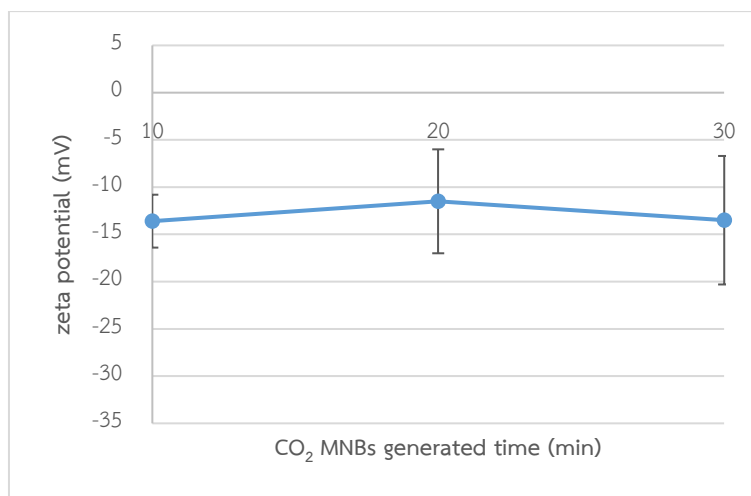
รูปที่ 4.4 ค่า zeta-potential ของน้ำ air MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที



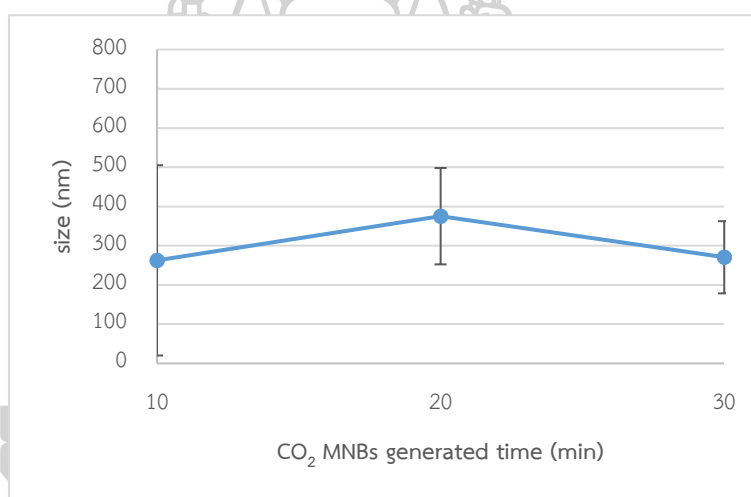
รูปที่ 4.5 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำ air MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

ค่า zeta-potential มีแนวโน้มติดลบเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการผลิต air MNBs เพิ่มขึ้น โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเล็กลงตามเวลาในการผลิต air MNBs ที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ushikubo และคณะ ที่พบว่าค่า zeta-potential ของน้ำที่ผ่านการผลิต MNBs เป็นเวลา 30 นาที มีค่าเป็น -17 ถึง -20 mV โดยค่า zeta-potential ที่มีค่าลบนี้แสดงถึง OH^- ที่อยู่บริเวณพื้นผิวของ MNBs โดยค่า zeta-potential เป็นตัวบ่งบอกถึงความเสถียรของระบบคอลลอยด์ตามทฤษฎี DLVO (Deryaguin-Landau-Verwey-Overbeek) ซึ่งกล่าวถึงความสมดุลระหว่างการดูดของแรง Van der Waals และการผลักของแรงประจุไฟฟ้า เนื่องจากประจุไฟฟ้าที่ผิวมีความสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบคอลลอยด์ โดยทั่วไปแล้วค่าสัมบูรณ์ขั้นต่ำที่ 30 mV จะถูกพิจารณาว่าทำให้เกิดการกระจายตัวของ MNBs ในน้ำที่เสถียร [38] และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กเป็นตัวบ่งบอกถึงความเสถียรของ MNBs ในระบบด้วยเช่นกัน เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กจะสามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้นานกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ [11]

การติดตามการเกิด และวัดการกระจายตัวของขนาด CO_2 MNBs โดยจะทำการผลิต CO_2 MNBs ในน้ำ เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที จากนั้นสุ่มตัวอย่างไปวัดค่า zeta-potential และวัดการกระจายตัวของขนาด CO_2 MNBs จะแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 ค่า zeta-potential ของน้ำ CO₂ MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที



รูปที่ 4.7 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำ CO₂ MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

จะเห็นว่าค่า zeta-potential และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำ CO₂ MNBs เมื่อใช้เวลาในการผลิต CO₂ MNBs เพิ่มขึ้น มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยค่า zeta-potential ของน้ำ CO₂ MNBs มีแนวโน้มติดลบน้อยกว่าน้ำ air MNBs โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของน้ำ CO₂ MNBs จะมีแนวโน้มใหญ่กว่าน้ำ air MNBs แสดงถึงการกระจายตัวของ CO₂ MNBs ในน้ำที่เสถียรน้อยกว่าการกระจายตัวของ air MNBs และค่าสัมบูรณ์ของค่า zeta-potential ของตัวอย่างน้ำ CO₂ MNBs ต่ำกว่าค่าสัมบูรณ์ของค่า zeta-potential ของตัวอย่างน้ำ air MNBs ซึ่งอาจสัมพันธ์กับค่า pH ของตัวอย่างน้ำ CO₂ MNBs ที่ต่ำ [39]

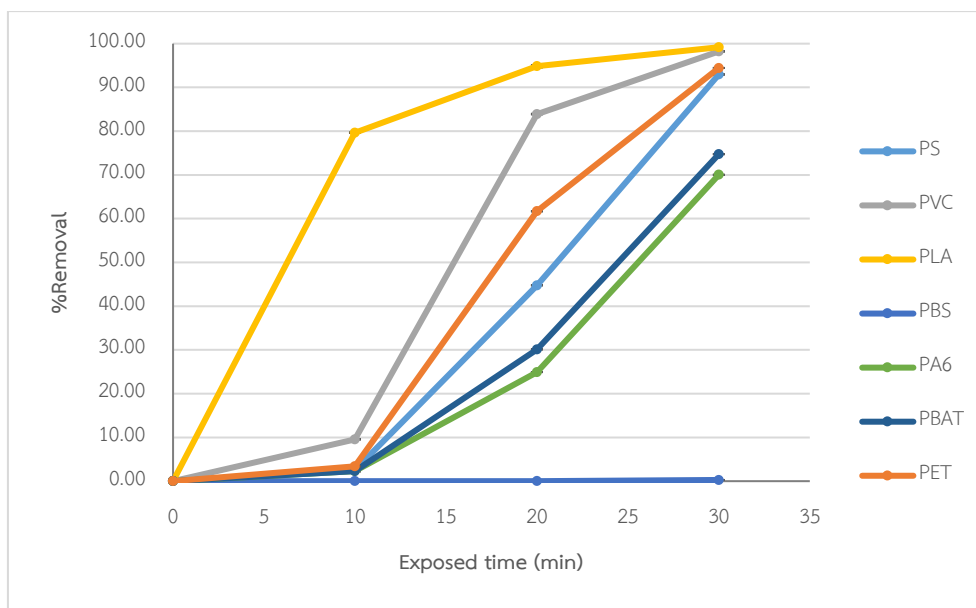
4.3 ติดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles

ทำการจัดตั้งชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubble (MNBs) โดยใช้ท่อ PVC กระบวนการเริ่มต้นโดยน้ำจากถังจ่ายน้ำ (water supply tank) ไหลเข้าเครื่องผลิต micro/nano-bubble (RMUTT 04 MNB Generator) ด้วยอัตราการไหลของอากาศ (airflow rate) 0.1 L/min ที่ความดัน 0.02 MPa โดยเครื่องผลิต MNBs จะมีส่วนที่ป้อนก๊าซซึ่งเราสามารถปรับเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่ใช้ผลิต MNBs ได้ และน้ำ MNBs จะไหลออกจากเครื่องด้วยความดันขาออก 0.4 MPa น้ำผ่านวาล์วน้ำ (valve) ปรับระดับน้ำ เข้าสู่ถังลอยตะกอน (flotation tank) จากนั้นน้ำจะผ่านส่วนน้ำล้น (overflow) ดังรูปที่ 3.1 เพื่อลดความดันอันเมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังลอยตะกอน

ในการทดสอบการลอยของ microplastic จะเริ่มจากนำ microplastic ไปจมในน้ำแล้วเติมลงในถังลอยตะกอน จากนั้นเปิดเครื่องผลิต MNBs น้ำ MNBs จะไหลผ่านวาล์วปรับระดับน้ำไปยังถังลอยตะกอน แล้วทำการจับเวลาเมื่อน้ำ MNBs สัมผัสกับ microplastic ที่เวลาต่างๆ microplastic จะลอยขึ้น และไหลผ่านส่วนน้ำล้นลงไปยังบีกเกอร์ จากนั้นนำน้ำที่มี microplastic ไปกรองและอบให้แห้งเพื่อนำไปคำนวณหา %Removal efficiency ต่อไป

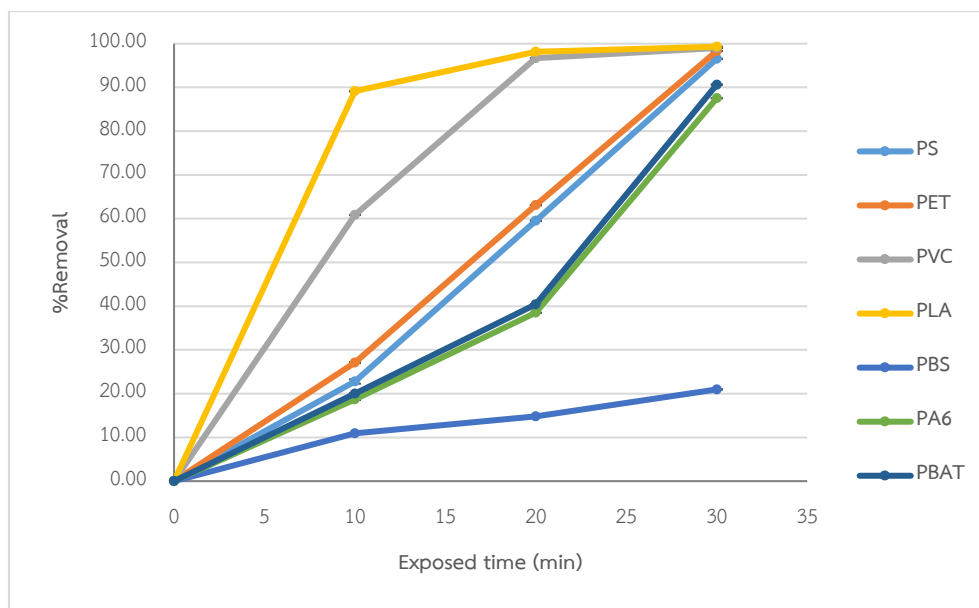
4.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกันออกจากน้ำด้วยชุดการทดลองการผลิต micro/nano-bubbles ที่ติดตั้งขึ้น

ทดสอบประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000, 106-1,000 และ 38-106 ไมโครเมตร ที่น้ำหนักเริ่มต้นของ microplastic เป็น 0.50 g ออกจากน้ำด้วยการสัมผัส air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที



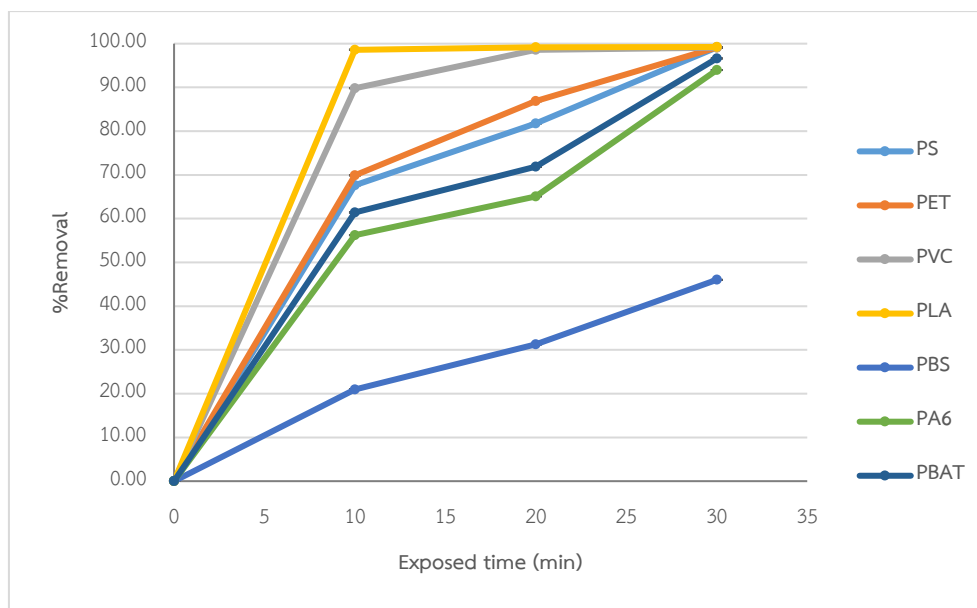
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 10 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 2.49, 3.36, 9.55, 0.00, 79.66, 2.27 และ 2.29 ตามลำดับ ที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 20 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 44.77, 61.69, 83.90, 0.00, 94.83, 24.93 และ 30.13 ตามลำดับ และที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 30 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 92.96, 94.45, 98.22, 0.27, 99.18, 70.03 และ 74.74 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 10 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 22.78, 27.10, 60.83, 10.90, 89.12, 18.65 และ 20.03 ตามลำดับ ที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 20 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 14.84, 63.08, 96.68, 38.48 และ 40.43 ตามลำดับ และที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 30 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 20.96, 98.31, 99.00, 90.64 และ 90.64 ตามลำดับ

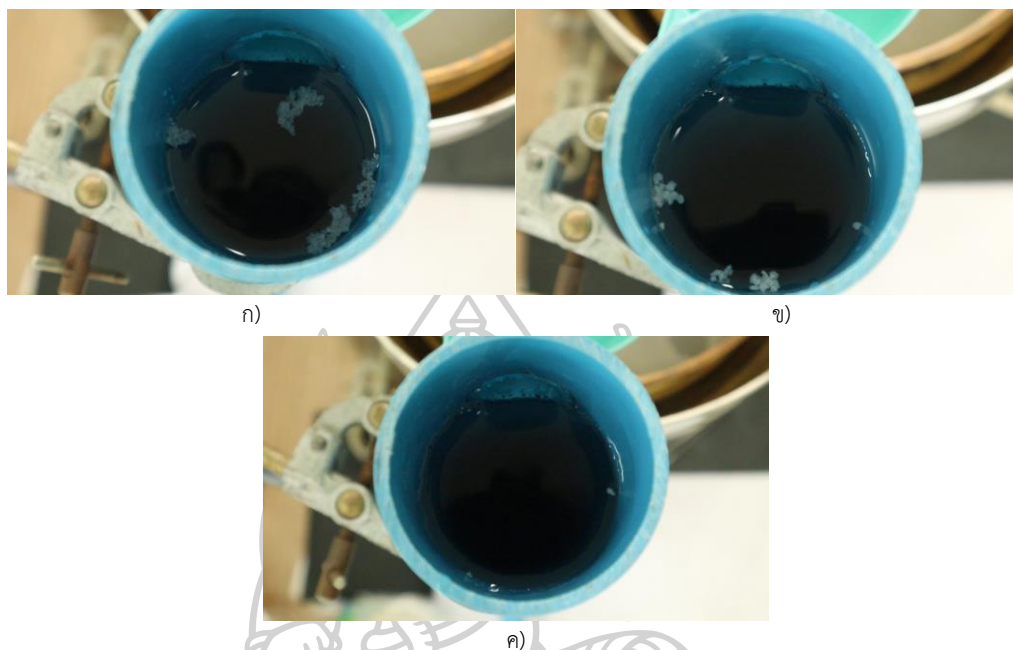


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 38-106 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 10 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 38-106 ไมโครเมตร ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 67.64, 69.91, 89.83, 20.98, 98.62, 56.23 และ 61.42 ตามลำดับ ที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 20 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 81.78, 86.85, 98.56, 31.26, 99.14, 65.11 และ 71.89 ตามลำดับ และที่เวลาในการสัมผัส air MNBs 30 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 99.14, 99.13, 99.07, 46.02, 99.24, 93.97 และ 96.62 ตามลำดับ

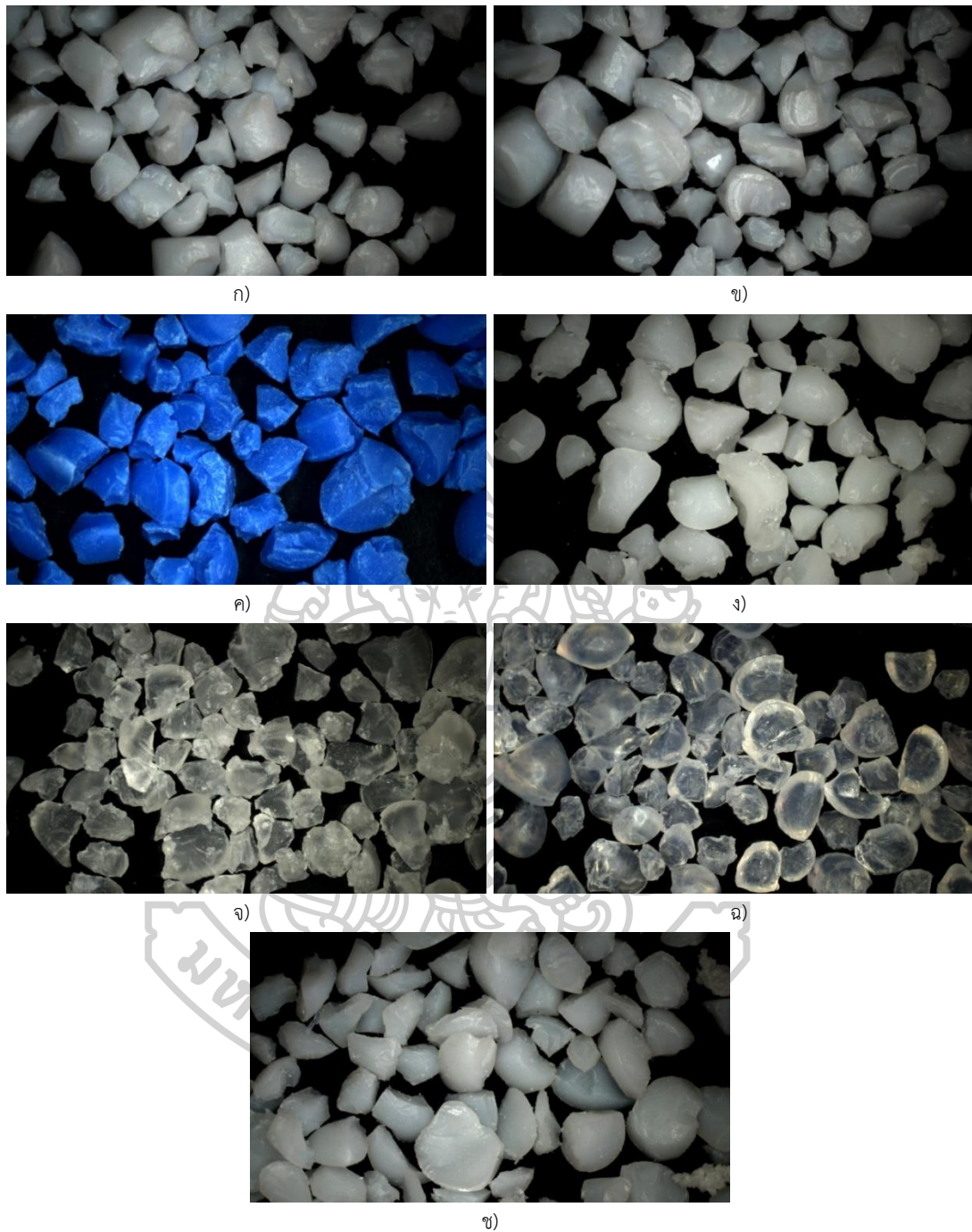
จากผลการทดสอบพบว่า กรณีที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วงเดียวกัน และเวลาในการสัมผัสกับ air MNBs ที่เท่ากัน microplastic แต่ละชนิดมีความสามารถในการลอยที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อเรียงตามความสามารถในการลอย พบว่า microplastic ชนิด PLA ลอยได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น microplastic ชนิด PVC, PET, PS, PBAT, PA 6 และ PBS ตามลำดับ จะเห็นว่า microplastic ที่มีความหนาแน่นต่ำมีแนวโน้มที่จะถูกแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่า microplastic ที่มีความหนาแน่นสูง ความหนาแน่นของ microplastic ส่งผลต่อความสามารถในการแยกแต่ไม่ใช่ทั้งหมด จึงคาดว่าความสามารถในการลอยของ microplastic มีปัจจัยอื่นๆ เกี่ยวข้องอีกหลายปัจจัย เช่น การเกาะกลุ่มกันในระหว่างลอยตัวของ microplastic โดย microplastic ชนิด PLA, PVC, PET และ PS จะเกาะ

กันเป็นกลุ่มใหญ่ microplastic ชนิด PBAT และ PA6 มีการเกาะกลุ่มเช่นเดียวกันแต่จะขนาดเล็กกว่า ส่วน microplastic ชนิด PBS ไม่เกิดการเกาะกลุ่มกันลอย ซึ่งลักษณะการเกาะกลุ่มลอยจะแสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะการเกาะกลุ่มกันในระหว่างลอยตัวของ microplastic ชนิด ก) PLA, ข) PBAT และ ค) PBS ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร

และการที่ MNBs มีพื้นผิวที่มีประจุเป็นลบ ก็ส่งผลต่อความสามารถในการสัมผัสติดกับ microplastic จึงได้เลือก microplastic ชนิด PS และ PET ซึ่งมีผิวสัมผัสที่คล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 สำหรับเปรียบเทียบค่า zeta-potential จากงานวิจัยของ Carlos และคณะ พบว่า microplastic ชนิด PET มีค่า zeta-potential ที่ติดลบน้อยกว่า microplastic ชนิด PS [40] ซึ่งค่า zeta-potential ที่แตกต่างกันของ microplastic จะส่งผลต่อความสามารถในการสัมผัสกับ MNBs จากงานวิจัยของ Swart และคณะ พบว่า microplastic ที่มีค่า zeta-potential ที่ติดลบน้อยกว่า มีความสามารถในการสัมผัสกับ MNBs ได้ดีกว่า microplastic ที่มีค่า zeta-potential ที่ติดลบมากกว่า ส่งผลให้ถูกแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่า [41]



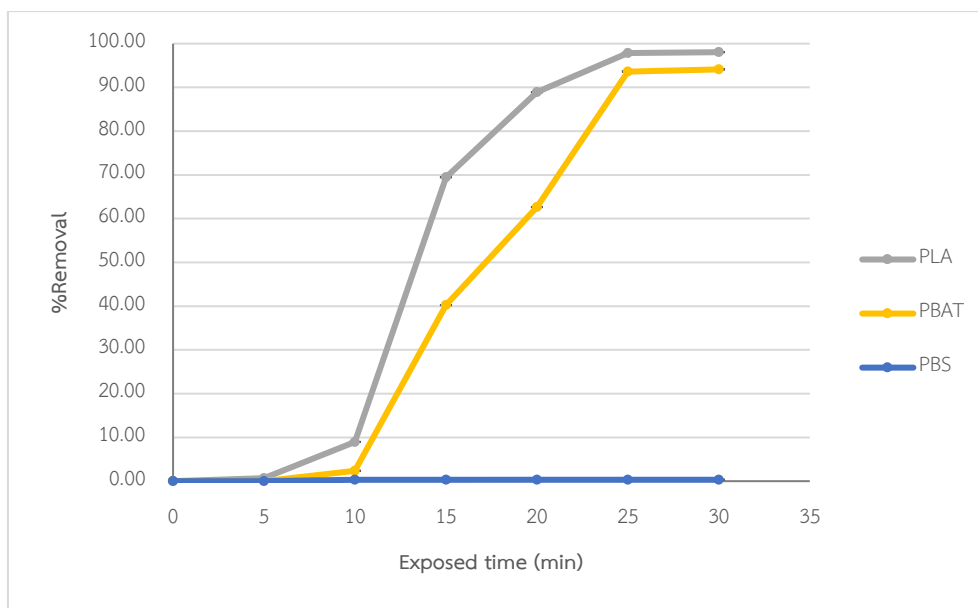
รูปที่ 4.12 ลักษณะพื้นผิวของ microplastic ชนิด ก) PS, ข) PET, ค) PVC, ง) PBS, จ) PLA, ฉ) PA 6 และ ช) PBAT ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร

นอกจากนี้ความสามารถในการลอยของ microplastic ทุกชนิดมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับเวลาที่ microplastic สัมผัสกับ air MNBs และขนาดอนุภาคของ microplastic หากเวลาที่ใช้สัมผัสเพิ่มขึ้นความสามารถในการลอยของ microplastic จะเพิ่มขึ้นด้วย และ microplastic ที่มีอนุภาคเฉลี่ยขนาดเล็กสามารถลอยได้ดีกว่า microplastic ที่มีอนุภาคเฉลี่ยขนาดใหญ่ โดยจาก

งานวิจัยของ Han และคณะ กล่าวว่าประสิทธิภาพการชนหรือสัมผัสกันระหว่าง MNBs และ microplastic ขึ้นกับขนาดของ MNBs และ microplastic สำหรับอนุภาคขนาดเล็ก จำเป็นต้องมี MNBs ขนาดเล็กเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการชนระหว่าง MNBs และ microplastic ที่สูง ในทำนองเดียวกัน สำหรับอนุภาคขนาดใหญ่หากต้องการให้ประสิทธิภาพในการชนระหว่าง MNBs และ microplastic สูง น้ำ MNBs จำเป็นต้องมีฟองอากาศขนาดใหญ่ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของขนาดอนุภาคต่อขนาดฟองอากาศ คือประมาณ 2 ต่อ 1 [42]

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าเครื่องผลิต MNBs และหลังจากออกจากเครื่องผลิต MNBs พบว่า อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าเครื่องผลิต MNBs จะอยู่ที่ 29.0°C และเมื่อทำการผลิต MNBs เป็นเวลา 10, 20, 30 และ 40 นาที อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเครื่องเครื่องผลิต MNBs จะอยู่ที่ 30.0, 30.5, 30.7 และ 30.7°C ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเวลาในการผลิต MNBs เพิ่มขึ้น อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเครื่องจะเพิ่มขึ้นด้วยและหลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ โดยในกระบวนการมีการป้อนน้ำเข้าที่มีอุณหภูมิคงที่ 29.0°C ตลอดการทดลอง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทอุณหภูมิทำให้อุณหภูมิของน้ำขาออกเริ่มคงที่ที่เวลา 30 นาที ซึ่งจากงานวิจัยของ Pourkarimi และคณะกล่าวว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจะไปลดอัตราการเกิดคาวิเทชัน (cavitation) ซึ่งจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศเพิ่มขึ้น [6] แต่จากผลการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อขนาดของ MNBs ไม่มากนัก ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีนี้จึงคาดว่าจะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการพา microplastic ลอยของ MNBs

จากการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่า microplastic ชนิด PBS, PLA และ PBAT ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) มีแนวโน้มที่จะแยกออกจากกันได้ หาก microplastic 3 ชนิดนี้ผสมกันอยู่ในน้ำ โดยคาดว่า microplastic ผสมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยยิ่งเล็กลงยิ่งแยกออกจากกันได้ง่าย จึงได้ทำการทดลองการแยก microplastic ผสม ชนิด PBS, PLA และ PBAT ขนาด 1,000-3,000 ไมโครเมตร ที่น้ำหนักเริ่มต้นของ microplastic ผสม เป็น 0.50 g อัตราส่วนของ microplastic แต่ละชนิดเป็น 1:1:1 ออกจากน้ำด้วยการสัมผัส air MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ผสม ชนิด PLA และ PBAT ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g อัตราส่วนของ microplastic แต่ละชนิดเป็น 1:1:1 เมื่อสัมผัสกับ air MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดเดี่ยว และ microplastic ผสมออกจากร้ำด้วย air MNBs

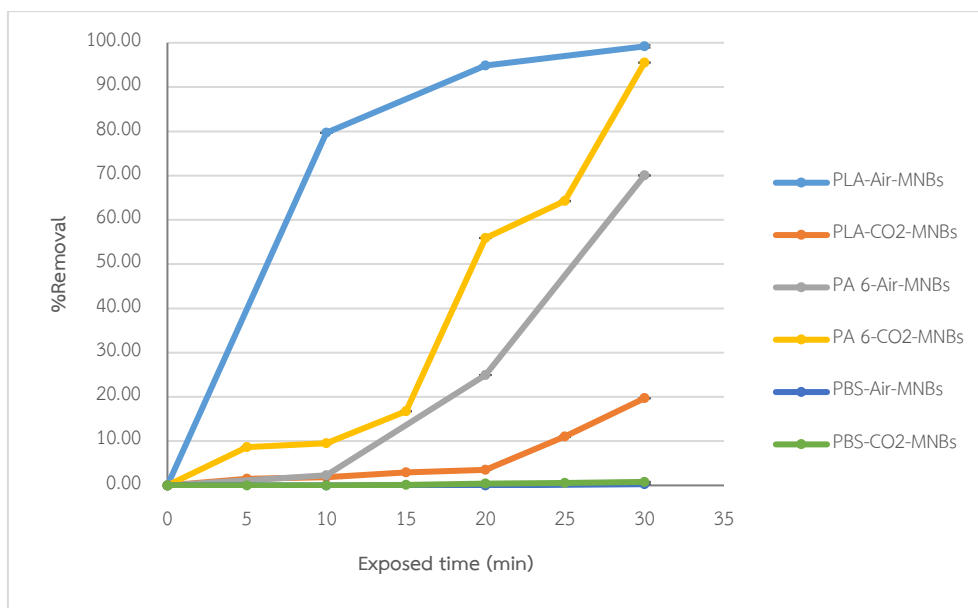
เวลาที่ microplastic สัมผัสกับ air MNBs (นาที)	%Removal					
	Microplastic ชนิดเดี่ยว			Microplastic ผสม		
	PLA	PBAT	PBS	PLA	PBAT	PBS
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	-	-	-	0.68	0.00	0.00
10	79.66	2.29	0.00	8.97	2.36	0.30
15	-	-	-	69.48	40.24	0.30
20	94.83	30.13	0.00	88.9	62.65	0.32
25	-	-	-	97.89	93.64	0.32
30	99.18	74.74	0.27	98.05	94.12	0.32

จากตารางที่ 4.1 ในกรณีเวลาที่ microplastic สัมผัสกับ air MNBs เท่ากัน จะเห็นว่า microplastic ชนิด PLA ใน microplastic ผสมลอยได้ช้าลงเมื่อเทียบกับการทดลองที่ทดสอบการแยก microplastic ออกจากน้ำที่ละชนิด แต่ microplastic ชนิด PBAT ใน microplastic ผสมลอยได้เร็วขึ้น และ microplastic ชนิด PBS ใน microplastic ผสมลอยแค่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากในระหว่างทดสอบ microplastic ชนิด PLA และ PBAT จะเกาะกลุ่มกันลอย แต่ microplastic ชนิด PBS จะไม่เกาะกลุ่ม ทำให้ microplastic ชนิด PLA ช่วยพาให้ microplastic ชนิด PBAT ลอยได้เร็วขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน microplastic ชนิด PBAT ก็ดึงให้ microplastic ชนิด PLA ลอยได้ช้าลง ดังนั้น หากต้องการศึกษาการแยก microplastic ผสมออกจากน้ำในอนาคตอาจต้องปรับวิธีการทดลองเพิ่มเติม

4.5 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิดต่างๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน ออกจากน้ำ

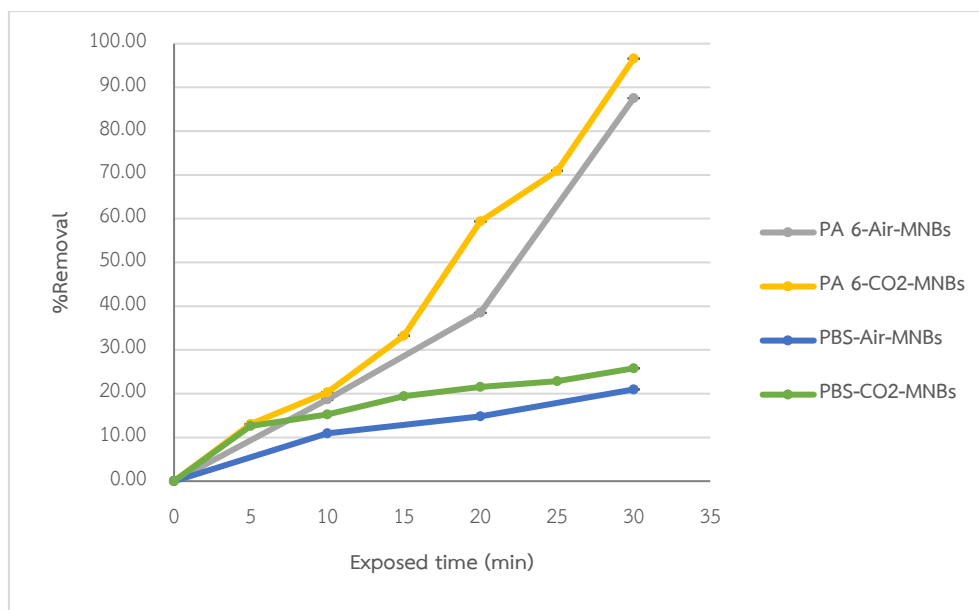
ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยการแยก microplastic ชนิด PBS ที่มีขนาดอนุภาค 1,000-3,000 ไมโครเมตร ซึ่งเป็น microplastic ที่แยกออกจากน้ำได้ยากที่สุด ที่น้ำหนัก 2.1 g ในน้ำ air MNBs ปริมาตร 1 ลิตร ที่ผ่านการผลิต air MNBs เป็นเวลา 30 นาที กรณีมีการเติมสารลดแรงตึงผิว ชนิดประจุลบ หรือน้ำยาล้างจานปริมาณ 0.5 g เทียบกับกรณีไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว พบว่าไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ออกจากน้ำได้ ซึ่งที่ผลการทดสอบเป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะวิธีในการทดสอบที่ใส่สารลดแรงตึงผิวหลังจากที่ผลิต air MNBs ผ่านเครื่องผลิต MNB ออกมาแล้ว และเนื่องจากเครื่องผลิต MNBs ที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์มาจากมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิร จึงไม่สามารถใส่สารลดแรงตึงผิวในน้ำก่อนที่จะเข้าเครื่องผลิต MNBs ได้ เพราะสารลดแรงตึงผิวที่เติมเข้าไปอาจส่งผลต่อปั๊มที่อยู่ภายในเครื่องได้ จึงได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ออกจากน้ำ โดยเปลี่ยนมาใช้วิธีการเปลี่ยนก๊าซที่ใช้ในการผลิต MNBs แทน

ดังนั้น จากขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยส่วนที่ 4 ได้ทำการเลือก microplastic ที่แยกออกจากน้ำได้ยากที่สุด 2 ชนิด ได้แก่ PA 6 และ PBS ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร และ 106-1,000 ไมโครเมตร รวมถึง microplastic ชนิด PLA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร ที่ลอยได้ดีที่สุดมาทดสอบเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยทำการเปลี่ยนก๊าซที่ใช้ในการผลิต MNBs จาก air เป็น CO₂ โดยทำการแยก microplastic ออกจากน้ำ ที่น้ำหนักเริ่มต้นของ microplastic ผสม เป็น 0.50 g เวลาในการสัมผัส CO₂ MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที



รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PA 6, PBS และ PLA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร ความน้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air และ CO₂ MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลของการแยก microplastic ชนิด PA 6, PBS และ PLA ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000-3,000 ไมโครเมตร พบว่า ที่เวลาในการสัมผัส CO₂ MNBs 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PA 6 ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 8.63, 9.54, 16.75, 55.88, 64.23 และ 95.52 ตามลำดับ สามารถแยก microplastic ชนิด PBS ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 0.00, 0.00, 0.14, 0.37, 0.58 และ 0.79 ตามลำดับ และสามารถแยก microplastic ชนิด PLA ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 1.47, 1.85, 2.91, 3.54, 11.02 และ 19.68 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพในการแยก microplastic ชนิด PA 6 และ PBS ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร ความน้ำหนักเริ่มต้น 0.50 g เมื่อสัมผัสกับ air และ CO₂ MNBs เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที

ส่วน microplastic ชนิด PA 6 และ PBS ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร พบว่า ที่เวลาในการสัมผัส CO₂ MNBs 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที สามารถแยก microplastic ชนิด PA 6 ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 13.05, 20.30, 33.25, 59.38, 70.96 และ 96.58 ตามลำดับ และสามารถแยก microplastic ชนิด PBS ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 106-1,000 ไมโครเมตร ออกจากน้ำได้เฉลี่ยร้อยละ 12.63, 15.21, 19.38, 21.52, 22.86 และ 25.79 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่า microplastic ชนิด PA 6 และ PBS จะลอยได้ดีขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่ใช้ผลิต MNBs จากการใช้ air เป็น CO₂ เนื่องจากความแตกต่างของค่า zeta-potential ของ MNBs ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถของ MNBs ในการจับกับ microplastic โดยจากงานวิจัยของ Ushikubo และคณะ กล่าวว่าความแตกต่างของค่า zeta-potential ของ MNBs ที่ผลิตจากก๊าซต่างชนิดบ่งบอกถึงโครงสร้างที่แตกต่างกันในส่วนบริเวณต่อประสานที่ผิวระหว่างก๊าซและของเหลว โดยน้ำ MNBs ที่ผลิตจาก CO₂ จะมีความเป็นกรดเมื่อเทียบกับน้ำ MNBs ที่ผลิตจาก air ที่มีความเป็นด่าง [36] ในกรณีของ microplastic ชนิด PA 6 ที่มีหมู่ amide ในโครงสร้างซึ่งมีความเป็นด่างจึงคาดว่าจะชอบสัมผัสกับ MNBs ที่ผลิตจาก CO₂ มากกว่า ทำให้ลอยขึ้นสู่น้ำได้เร็วกว่าเมื่อทำการลอยด้วย MNBs ที่ผลิตจาก CO₂ เทียบกับเมื่อทำการลอยด้วย MNBs ที่ผลิตจาก air และนอกจากนี้ MNBs มีความเสถียรที่แตกต่างกันตามชนิดของก๊าซที่ใช้ผลิต โดย air MNBs นั้นมีขนาดเฉลี่ยที่เล็กกว่า เมื่อเทียบกับ CO₂ MNBs ภายใต

เงื่อนไขเดียวกัน โดยงานวิจัยของ Pourkarimi และคณะ กล่าวว่าซึ่งสิ่งนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณการละลายของแก๊สแต่ละชนิดในน้ำ โดยหากความสามารถในการละลายของแก๊สบริสุทธิ์ในน้ำเพิ่มขึ้นขนาดเฉลี่ยของ MNBs จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ความเสถียรของ MNBs ในน้ำลดลง [6] CO₂ สามารถละลายในน้ำได้ดีกว่า air ด้วยเหตุนี้ทำให้ CO₂ MNBs มีความเสถียรในน้ำน้อยกว่า air MNBs จึงพามicroplastic ลอยขึ้นสู่มิวน้ำได้เร็วกว่า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ออกจากน้ำ ส่วน microplastic ชนิด PLA จะได้ผลที่ตรงกันข้ามเมื่อเปลี่ยนชนิดของแก๊สที่ใช้ผลิต MNBs จากการใช้ air เป็น CO₂ บ่งชี้ว่าชนิดของก๊าซที่ใช้ในการผลิต MNBs ส่งผลให้ MNBs มีอิทธิพลต่อการเลือกจับกับ microplastic



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ประจุที่ผิวของ air MNBs และ CO₂ MNBs เป็นประจุลบ โดยค่า zeta-potential ที่ติดลบมากกว่าของน้ำที่มี air MNBs แสดงถึงความเสถียรที่มากกว่าและขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับน้ำ CO₂ MNBs โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเล็กลงตามค่า zeta-potential ที่เพิ่มขึ้นด้วย

microplastic แต่ละชนิดมีความสามารถในการล่อยที่แตกต่างกัน microplastic ชนิด PLA ล่อยได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น microplastic ชนิด PVC, PET, PS, PBAT, PA 6 และ PBS ตามลำดับ โดยความสามารถในการล่อยของ microplastic ทุกชนิดมีแนวโน้มที่จะสอดคล้องกับเวลาที่ microplastic สัมผัสกับ air MNBs และขนาดอนุภาคของ microplastic หากเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นความสามารถในการล่อยของ microplastic จะเพิ่มขึ้นด้วย และ microplastic ที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถล่อยได้ดีกว่า microplastic ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

ชนิดของก๊าซที่ใช้ผลิต MNBs มีผลต่อประสิทธิภาพการแยก microplastic ออกจากน้ำ โดย microplastic ชนิด PA 6 และ PBS จะถูกแยกได้ดีขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่ใช้ผลิต MNBs จากการใช้ air เป็น CO₂ แต่จะได้ผลที่ตรงกันข้ามสำหรับ microplastic ชนิด PLA บ่งชี้ว่าชนิดของก๊าซที่ใช้ในการผลิต MNBs ส่งผลให้ MNBs มีอิทธิพลต่อการเลือกจับกับ microplastic ซึ่งความแตกต่างของค่า zeta-potential ของ MNBs ที่ผลิตจากก๊าซต่างชนิดกันบ่งบอกถึงโครงสร้างที่แตกต่างกันในส่วนบริเวณต่อประสานที่ผิวระหว่างก๊าซและของเหลว และ MNBs มีความเสถียรที่แตกต่างกันตามชนิดของก๊าซที่ใช้ผลิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) น้ำที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำ RO ซึ่งเป็นน้ำที่มีความบริสุทธิ์เนื่องจากผ่านกระบวนการกรองมาก่อน แต่ในแหล่งน้ำที่มี microplasticปนเปื้อนส่วนมากจะไม่ใช่ น้ำบริสุทธิ์ เพราะฉะนั้นจึงควรศึกษาการแยก microplastic โดยนำน้ำจากแหล่งน้ำจริงมาทำการศึกษาก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม
- 2) ถังล่อยตะกอนที่ใช้ในงานวิจัยทำจากท่อ PVC ซึ่งมีลักษณะทึบ หากต้องการศึกษาลักษณะการล่อยตัวของ microplastic ในระหว่างกระบวนการแยกอย่างชัดเจนสามารถทำจากวัสดุอื่นที่มีความโปร่งใสแทนได้ และเนื่องจากเป็นการวิจัยเบื้องต้นถังล่อยตะกอนที่ออกแบบจึงมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับในทางอุตสาหกรรม หากต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมจึงควรศึกษาผลของขนาดถังล่อยตะกอนต่อกระบวนการแยก microplastic เพิ่มเติม

- 3) เม็ดพลาสติกชนิด PS, PET, PVC, PBS, PLA, PA 6 และ PBAT ที่ใช้ในกระบวนการแยกเป็นเม็ดพลาสติกที่ยังไม่เคยผ่านการใช้งานมาก่อน และในงานวิจัยศึกษาการแยก microplastic ที่ละชนิด ซึ่งในความเป็นจริงหากนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม microplastic ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำจะมาจากชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านการใช้งานมาก่อน ซึ่งมีการเติมสารเติมแต่งในเนื้อพลาสติกในระหว่างกระบวนการผลิต และเป็นการปนเปื้อนของ microplastic หลายชนิด ดังนั้นงานวิจัยที่จะทำต่อไปในอนาคตควรเป็นการศึกษาผลของสารเติมแต่งต่อประสิทธิภาพในการแยก microplastic ออกจากน้ำ รวมถึงศึกษากระบวนการแยกของ microplastic ผสมหลายๆ ชนิดออกจากน้ำด้วยโดยใช้เทคโนโลยี MNBs
- 4) ในงานวิจัยเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ในทางอุตสาหกรรมหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ออกจากน้ำโดยการใช้ก๊าซ CO₂ ในการผลิต MNBs ต้องคำนึงถึงค่า pH ของน้ำที่ลดลงที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำหลังผ่านกระบวนการแยก รวมไปถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย
- 5) อุณหภูมิที่สูงขึ้นของน้ำ MNBs จะส่งผลกระทบต่อขนาดเฉลี่ยของ MNBs โดยหากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากจะทำให้ขนาดเฉลี่ยของฟองอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการพามicroplastic ลอยของ MNBs ดังนั้น ในระหว่างการทดสอบจึงควรคำนึงถึงอุณหภูมิของน้ำหลังจากออกจากเครื่องผลิต MNBs
- 6) หากผู้ที่สนใจต้องการทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก microplastic ออกจากน้ำ โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว ควรทดลองเติมสารลดแรงตึงผิวในน้ำก่อนที่จะเข้าเครื่องผลิต MNBs และควรคำนึงถึงผลของสารลดแรงตึงผิวที่เติมเข้าไปต่อปั๊มที่อยู่ภายในเครื่องผลิต MNBs



ภาคผนวก



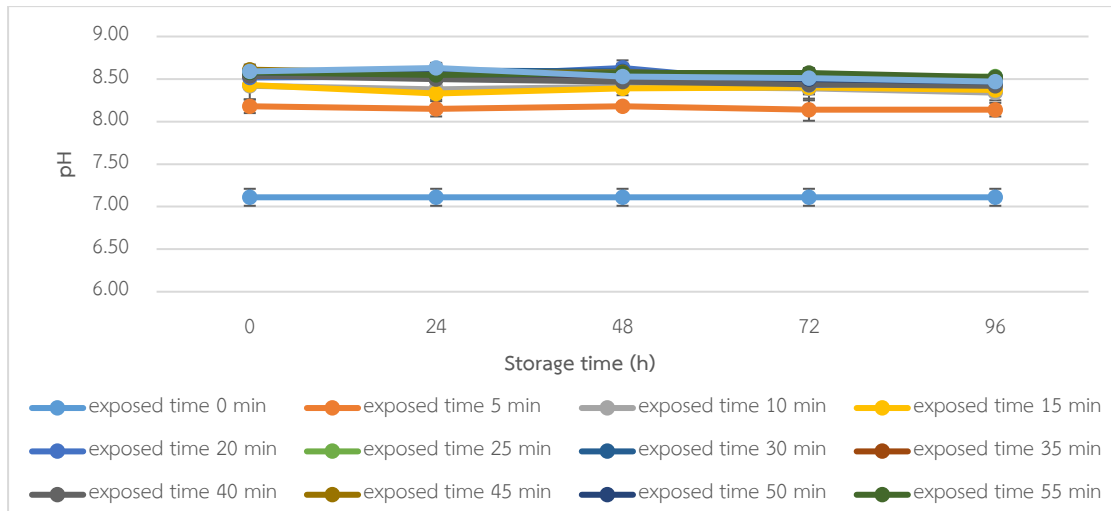
ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลความหนาแน่นของเม็ดพลาสติก

ชนิดพลาสติก	ครั้งที่	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PS	1	1.1420	1.4163
	2	1.1411	1.4174
	3	1.1428	1.4152
	Average	1.1420	1.4163
	S.D.	0.0009	0.0011
PET	1	1.1390	1.4172
	2	1.1355	1.4217
	3	1.1434	1.4119
	Average	1.1393	1.4169
	S.D.	0.0040	0.0049
PVC	1	1.1738	1.3771
	2	1.1681	1.3839
	3	1.1676	1.3845
	Average	1.1698	1.3818
	S.D.	0.0034	0.0041
PBS	1	1.2453	1.2967
	2	1.2432	1.2989
	3	1.2431	1.2990
	Average	1.2439	1.2982
	S.D.	0.0012	0.0013
PLA	1	1.2205	1.3228
	2	1.2223	1.3209
	3	1.2210	1.3223
	Average	1.2213	1.3220
	S.D.	0.0009	0.0010

ชนิดพลาสติก	ครั้งที่	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PA 6	1	1.3628	1.1865
	2	1.3635	1.1859
	3	1.3628	1.1864
	Average	1.3630	1.1863
	S.D.	0.0004	0.0003
PBAT	1	1.2702	1.2702
	2	1.2812	1.2593
	3	1.2723	1.2681
	Average	1.2746	1.2659
	S.D.	0.0058	0.0058

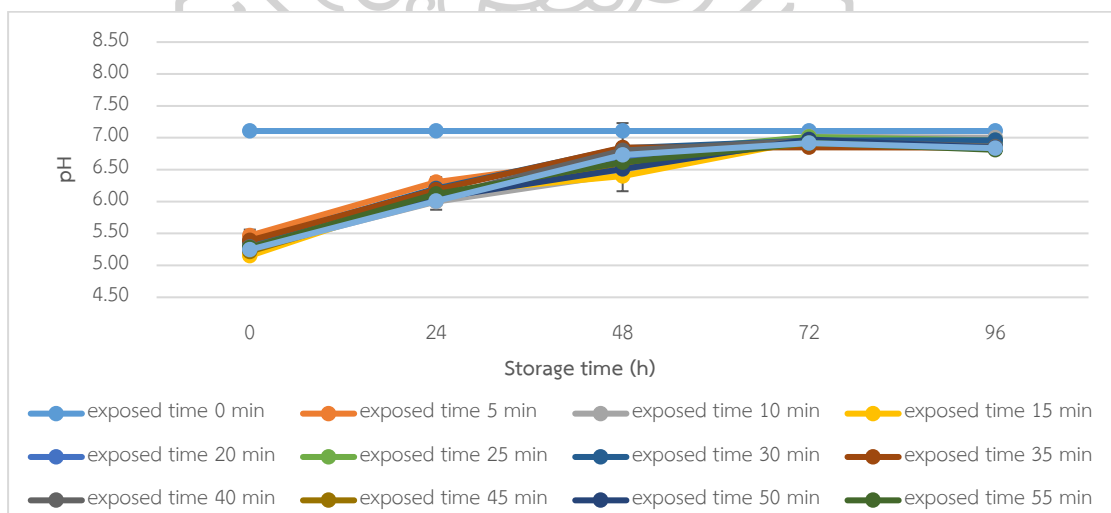
ผลการวัด pH ของน้ำ MNBs

ทำการวัด pH ของตัวอย่างน้ำ air MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที ด้วยเครื่อง pH meter พบว่าค่า pH อยู่ในช่วง 8.14-8.61 และเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำเป็นเวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง พบว่าค่า pH มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำ air MNBs ไว้เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ดังรูปที่ ก.1 การเปลี่ยนแปลงของค่า pH สามารถส่งผลต่อค่า zeta-potential ของตัวอย่างน้ำ โดยสารละลายน้ำที่มีฟองอากาศจะมีจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) อยู่ในช่วง 2-3 เมื่อ pH < 2 ฟองอากาศจะมีประจุเป็นบวก และที่ pH > 3 ฟองอากาศจะมีประจุเป็นลบ [43]



รูปที่ ก. 1 ค่า pH ของน้ำ air MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที และเก็บไว้เป็นเวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

นอกจากนี้ได้ทำการวัด pH ของตัวอย่างน้ำ CO₂ MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที พบว่าค่า pH อยู่ในช่วง 5.15-7.00 แสดงว่าประจุโดยรวมของน้ำ CO₂ MNBs เป็นลบเช่นเดียวกับตัวอย่างน้ำ air MNBs และเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำเป็นเวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ค่า pH ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับค่า pH ของน้ำก่อนผลิต CO₂ MNBs ดังรูปที่ ก. 2 และจากการเพิ่มขึ้นของ H⁺ ที่เกิดจากการสลายตัวของ CO₂ ในน้ำ จึงส่งผลให้ตัวอย่างน้ำ CO₂ MNBs มีค่า pH ที่ต่ำ



รูปที่ ก. 2 ค่า pH ของน้ำ CO₂ MNBs ที่ผลิตเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 นาที และเก็บไว้เป็นเวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง



ภาคผนวก ข
นำเสนอผลงานวิจัย

ได้มีการนำเสนอผลงานวิจัยแบบโปสเตอร์ (poster presentation) ทางออนไลน์ หัวข้อ Ultrafine Bubbles As Potential Microplastics Removal (หัวข้อตาม Proceedings ชื่อเรื่อง Separation of Microplastic Particles by Flotation with Ultrafine Bubbles) ในงาน Silpakorn International Conference on Total Art and Science (SICTAS) 2021 วันที่ 4-5 พฤศจิกายน พ.ศ.2564 ที่มหาวิทยาลัยศิลปากรเป็นเจ้าจัด



รายการอ้างอิง

1. Europe, P. *Plastics-The Facts 2020-An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*. 2020; Available from: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>.
2. Jambeck, J.R., et al., *Plastic waste inputs from land into the ocean*. *Science*, 2015. 347(6223): p. 768-771.
3. Wei, X.-F., et al., *Microplastics generated from a biodegradable plastic in freshwater and seawater*. *Water Research*, 2021. 198: p. 117123.
4. Auta, H.S., C.U. Emenike, and S.H. Fauziah, *Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions*. *Environment International*, 2017. 102: p. 165-176.
5. M. Bruni, R. Shrestha, and D. Spuhler. *Further Resources: Water Purification*. Available from: <https://sswm.info/sswm-university-course/module-6-disaster-situations-planning-and-preparedness/further-resources-0>.
6. Pourkarimi, Z., B. Rezai, and M. Noaparast, *Effective parameters on generation of nanobubbles by cavitation method for froth flotation applications*. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2017. 53: p. 920-942.
7. Guo, J., et al., *Research on Flotation Technique of Separating PET from Plastic Packaging Wastes*. *Procedia Environmental Sciences*, 2016. 31: p. 178-184.
8. Pita, F. and A. Castilho, *Separation of plastics by froth flotation. The role of size, shape and density of the particles*. *Waste Management*, 2017. 60: p. 91-99.
9. Calgaroto, S., A. Azevedo, and J. Rubio, *Separation of amine-insoluble species by flotation with nano and microbubbles*. *Minerals Engineering*, 2016. 89: p. 24-29.
10. Agarwal, A., W.J. Ng, and Y. Liu, *Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment*. *Chemosphere*, 2011. 84(9): p. 1175-1180.

11. Marui, T., *An Introduction to Micro/Nano-Bubbles and their Applications*. WMSCI 2010 - The 14th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Proceedings, 2010. 1: p. 43-48.
12. BAGS AND GLOVES CO., L. ความรู้เกี่ยวกับพลาสติกเบื้องต้น. Available from: <https://www.bagglove.com/th/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B8%B9%E0%B9%89%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4/>.
13. BLISSPAC CO., L. พลาสติกคืออะไร. 2016; Available from: <http://www.blisscoverbag.com/article/5/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3-2>.
14. Findlay, C. *Generalized molecular structure of polystyrene*. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Generalized-molecular-structure-of-polystyrene_fig42_325324706.
15. อาสาสมัครวิกิพีเดีย. พอลิสไตรีน. 2015; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%AA%E0%B9%84%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%99>.
16. อาสาสมัครวิกิพีเดีย. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต. 2023; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%AA%E0%B9%84%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%99>.
17. วัฒนากมลกุล, ภ.ก. ผลิตภัณฑ์พลาสติกกับอาหาร. 2012; Available from: <https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/86/%E0%B8%9C%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%A0%E0%B8%B1%E0%B8%93%E0%B8%91%E0%B9%8C%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%9A%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%AB%E0%B8%B2%E0%B8%A3/>.
18. อาสาสมัครวิกิพีเดีย. พอลิไวนิลคลอไรด์. 2015; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9E%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%AA%E0%B9%84%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%99>.
19. मुखसुररण, व. โพลีไวนิลคลอไรด์. 2008; Available from: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=12>.

20. contributors, W. *Polybutylene succinate*. 2019; Available from: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Special:CiteThisPage&page=Polybutylene_succinate&id=889576881.
21. 05, P.C.E. พลาสติก PLA (*Polylactic acid*). Available from: <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics%E0%B9%84%E0%B8%9A%E0%B9%82%E0%B8%AD%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81/%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81-pla-polylactic-acid/>.
22. CROW. *POLYAMIDES*. 2015; Available from: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyamide%20type.html>.
23. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. and ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. Nylon หรือ *Polyamide* / ไนลอน. Available from: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2272/nylon-%E0%B8%AB%E0%B8%A3%E0%B8%B7%E0%B8%AD-polyamide-%E0%B9%84%E0%B8%99%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%99>.
24. contributors, W. *Polybutylene adipate terephthalate*. 2019; Available from: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Special:CiteThisPage&page=Polybutylene_adipate_terephthalate&id=898829694.
25. บุรณสิงห์, ณ. ขยะพลาสติก : ภัยใกล้ตัว. 2016; Available from: <https://dl.parliament.go.th/backoffice/viewer2300/web/viewer.php>.
26. น้อยบุญญะ, น. “ไมโครพลาสติก” สิ่งเล็ก ๆ ใกล้ตัวเรา. Available from: <https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/ArticlesAnalysis/microplastics.pdf>.
27. ทองดอนเอ, ด.ร., เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบำบัดกับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ. p. 1-9.
28. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ศ.เส. การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ *Micro/nano-bubble* สู่นาคอุตสาหกรรมไทย. 2010; Available from: <http://www2.mtec.or.th/eventnstda/Template/index.aspx?contentid=183&eventid=S10031>.
29. Company, W. *Microbubble for Dissolved Air Flotation (DAF)*. Available from: <https://www.wanzer.co.th/microbubble-generation/>.
30. SRISATTIT, A.P.D.T., *Physical Wastewater Treatment Process*. 2011.

31. ศรีรัตน์ชัชวาล, แ. and อ. ปิติรักษ์สกุล, กระบวนการลอยตะกอนแบบอากาศละลาย. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2016. 1: p. 205-217.
32. *What is a DAF?* ; Available from: <https://www.jwce.com/knowledge-center/what-is-a-daf/>.
33. contributors, W. *Double layer (surface science)*. 2023; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_\(surface_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_(surface_science)).
34. Williams, P.M., *Zeta Potential*, in *Encyclopedia of Membranes*, E. Drioli and L. Giorno, Editors. 2016, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 2063-2064.
35. Talvitie, J., et al., *Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies*. Water Research, 2017. 123: p. 401-407.
36. Ushikubo, F.Y., et al., *Zeta-potential of Micro- and/or Nano-bubbles in Water Produced by Some Kinds of Gases*. IFAC Proceedings Volumes, 2010. 43(26): p. 283-288.
37. Ahmadi, R., et al., *Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles*. International Journal of Mining Science and Technology, 2014. 24(4): p. 559-566.
38. Meegoda, J., S. Aluthgun Hewage, and J. Batagoda, *Application of the Diffused Double Layer Theory to Nanobubbles*. Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids, 2019. 35.
39. Najafi, A.S., et al., *A novel method of measuring electrophoretic mobility of gas bubbles*. Journal of Colloid and Interface Science, 2007. 308(2): p. 344-350.
40. Pestana, C., et al., *Potentially Poisonous Plastic Particles: Microplastics as a Vector for Cyanobacterial Toxins Microcystin-LR and Microcystin-LF*. Environmental Science & Technology, 2021.
41. Swart, B., et al., *Microbubble-microplastic interactions in batch air flotation*. Chemical Engineering Journal, 2022. 449: p. 137866.
42. Han, M., *Modeling of DAF: The effect of particle and bubble characteristics*. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA, 2002. 51: p. 27-34.

43. Brandon, N.P., et al., *Interfacial electrical properties of electrogenerated bubbles*.
Journal of Applied Electrochemistry, 1985. 15(4): p. 485-493.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธิตวรรณ พูลวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	11 เมษายน 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	61/50 หมู่ 18 ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12130

