การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในพลาสติกชีวภาพโดยการวัดคาร์บอน-14

นางสาวฐมาพร พลอยกระโทก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Determining the Modern carbon content of Bio-Plastics by Measurement of Carbon-14

Miss Thamaborn Ploykrathok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology
Department of Nuclear Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในพลาสติกชีวภาพโดยการวัดคาร์บอน-14
โดย	นางสาวฐมาพร พลอยกระโทก
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทรโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทรโยธา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ฐมาพร พลอยกระโทก : การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในพลาสติกชีวภาพโดยการวัดคาร์บอน-14 (Determining the Modern carbon content of Bio-Plastics by Measurement of Carbon-14) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. สุพิชชา จันทรโยธา , อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล, 51 หน้า.

ในปัจจุบันมีความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรซึ่งสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติมาใช้เพื่อลดปัญหาการกำจัดขยะ เนื่องจากค่าโมเดิร์นคาร์บอนจะเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีปริมาณผลิตผลทางการเกษตรเท่าไรในพลาสติกชีวภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวัดค่าโมเดิร์นคาร์บอนในพลาสติกชีวภาพโดยวิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาณรังสีของคาร์บอน-14 ที่ถูกดูดซับไว้จะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว จากนั้นปริมาณสารชีวมวลจะหาได้โดยเปรียบเทียบค่าโมเดิร์นคาร์บอนที่ตรวจวัดได้กับค่าโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบทางการเกษตร ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลังและน้ำตาลอ้อย ในการศึกษาได้สุ่มเก็บพลาสติกชีวภาพชนิดต่างๆ เช่น พอลิแลคติก แอซิด พอลิบิวทีลีนซัคซิเนท ยางเทอร์โมพลาสติก มาวัดค่าโมเดิร์นคาร์บอน ผลการวิจัยพบว่ามีเพียงพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติก แอซิด เท่านั้นที่มีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนใกล้เคียงกับวัตถุดิบทางการเกษตร ในขณะที่พลาสติกชีวภาพอื่น ๆ มีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนต่ำกว่าร้อยละ 50 ซึ่งหมายความว่าตัวอย่างพลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่มีการผสมวัตถุดิบอื่นที่ไม่ใช่ผลผลิตทางเกษตรหรือมีปริมาณผลิตผลทางการเกษตรน้อยกว่าร้อยละ 50 ค่าความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์เท่ากับ 8.8 เปอร์เซ็นต์โดยยืนยันจากปริมาณชีวมวลที่ใช้บนฉลากสินค้า ดังนั้น การศึกษานี้จึงสามารถบ่งชี้ถึงสัดส่วนของวัตถุดิบทางการเกษตรที่นำมาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพได้ มีประโยชน์ในด้านการตรวจสอบและสามารถยกระดับอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกชีวภาพของประเทศในอนาคตได้

ภาควิชา	วิศวกรรมนิวเคลียร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา	2557	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5570173221 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: MODERN CARBON / BIO-PLASTICS / CARBON-14 / CARBON DIOXIDE ABSORPTION

THAMABORN PLOYKRATHOK: Determining the Modern carbon content of Bio-Plastics by Measurement of Carbon-14. ADVISOR: ASSOC. PROF. SUPITCHA CHANYOTHA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SIRIWATTANA BANCHORNDHEVAKUL, 51 pp.

Presently, there is an increase interest in the development of bio-plastics products from agricultural material which biodegradable in order to reduce the problem of waste disposal. Since the amount of the modern carbon in bio-plastics can indicate how much the amount of agricultural materials contain in the bio-plastics product. Thus, this research aims to determine the modern carbon in bio-plastic using the carbon dioxide absorption method. The radioactivity of carbon-14 contained in the sample is measured by liquid scintillation counter. The percentage of bio-based content in the sample was determined by comparing the observed modern carbon content with the value contain in agricultural raw materials such as Tapioca starch and sugar. This research randomly selected various types of bio-plastics from the market, for example, Polylactic acid, Polybutylene succinated, and Thermoplastics, to find the quantity of modern carbon. The results from the experiments show that only Polylactic acid samples have the modern carbon content close to the agricultural materials while the other bio-plastics types are found to have the quantity of the modern carbon content less than 50%. In other words, almost of these bio-plastics samples were mixed with other material which is not the agricultural material. The error of the analysis is 8.8%, It was confirmed by plant-based that identified on product labels. Therefore, this study can specify the ratio of the raw material, especially agricultural material in the bio-plastics production. Moreover, the methodology of this study is beneficial in inspection aspect and improve the bio-plastic manufacturing industry in the future.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Nuclear Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Nuclear Technology Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับสามารถสำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายๆท่าน

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา จันทรโยธา และรองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุลอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความรู้ และช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ พร้อมทั้งให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์กับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายทั้งหมดในงานวิจัย

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการไอโซโทปไฮโดรโลยี กลุ่มวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวุฒิไกร กุลสวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำด้านเทคนิคต่างๆในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คาร์บอน-14

สุดท้าย ขอขอบพระคุณครอบครัวและบุคคลใกล้ชิดที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจจนสามารถประสบความสำเร็จในทำวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง 1

สารบัญรูปภาพ 1

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.5 แผนการดำเนินงาน 3

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics)[8] 6

2.1.1 พลาสติกชีวภาพ 6

2.1.2 พลาสติกปิโตรเคมีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 7

2.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable) 8

2.3 วัตถุดิบชีวมวล (Bio-based material) 9

2.4 ปริมาณสารชีวมวล [10] 9

2.5 แหล่งคาร์บอนชีวภาพ หรือคาร์บอนจากสิ่งมีชีวิต (Bio-based or organic carbon source) 9

2.6 ปริมาณคาร์บอนใหม่หรือสัดส่วนคาร์บอนชีวภาพ 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.7 ไอโซโทปเสถียร 12
2.8 การวิเคราะห์โดยการวัดคาร์บอน-14 13
2.9 เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว 14
2.10 มาตรฐานปริมาณสารชีวมวลในพลาสติกชีวภาพ 15
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย 16
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 16
3.2 ชนิดของตัวอย่าง 18
3.3 การเตรียมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง [13] 23
3.4 การทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ 26
3.5 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซิลทิลเลชั่นค็อกเทล (scintillation cocktail) 28
3.6 การวัดคาร์บอน-14 ในตัวอย่าง 31
3.7 การแก้ไอโซโทปของคาร์บอน 32
3.8 การคำนวณปริมาณร้อยละโมเดิร์นคาร์บอนในสารประกอบอินทรีย์ 33
3.9 การคำนวณปริมาณสารชีวมวล 33
บทที่ 4 ผลการวิจัย 34
4.1 การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง 34
4.2 การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบชีวมวล 36
4.3 การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในตัวอย่างพลาสติกชีวภาพ 37
4.4 การหาปริมาณสารชีวมวลในตัวอย่างพลาสติกชีวภาพ 39
4.5 การหาค่าความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ 41
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย 42
5.1 ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิจัย 42
5.2 การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

5.3 ระบบทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ และการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 44
5.4 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน 45
5.5 ปริมาณชีวมวลในตัวอย่าง 45
5.6 ความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์.....46
5.7 ข้อเสนอแนะ 46
รายการอ้างอิง 47
ภาคผนวก.....48
ภาคผนวก ก 49
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาในการเลือกวิธีวิเคราะห์.....4

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับวิธีวิเคราะห์โดย LSC.....5

ตารางที่ 3.1 ประเภทของตัวอย่างพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....18

ตารางที่ 4.1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสันดาปและสิ่งที่เหลืออยู่จากการสันดาป 34

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบชีวมวล.....36

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ.....37

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารชีวมวลในตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ.....39

ตารางที่ 5.1 ปริมาณโมเดิร์นจากการทดลองของ Molnar.....45

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับในซิลทิลเลชั่นค็อกเทล.....50

ตารางที่ ก. 2 ค่าความแรงรังสีของคาร์บอน-14 ในตัวอย่าง.....51

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับพลาสติกชนิดอื่น....6
รูปที่ 2.2 Polylactic acid ใช้ผลิตภาชนะบรรจุ....7
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพ....8
รูปที่ 2.4 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ....8
รูปที่ 2.5 สัดส่วนของคาร์บอน-14ต่อคาร์บอน-12 ในวัฏจักรคาร์บอน....11
รูปที่ 2.6 กระบวนการนำคาร์บอน-14 จากอากาศเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร....11
รูปที่ 2.7 หลักการถ่ายเทพลังงานของสารรังสี....14
รูปที่ 2.8 กระบวนการถ่ายเทพลังงานจากสารรังสีไปที่หัววัดรังสี....14
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA....20
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพ Bio-TPE....20
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกปิโตรเลียม PBAT....21
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในประเทศไทย....21
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในหน่วยงานวิจัย....22
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในต่างประเทศ....22
รูปที่ 3.7 ถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง....23
รูปที่ 3.8 การร้อยลวดนำไฟฟ้าผ่านตัวอย่าง....24
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง....25
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของฝาถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง....26
รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงระบบเก็บแก๊สและทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์....27
รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซิลทิลเลชั่นคอกเทล....29
รูปที่ 3.13 ระบบเก็บแก๊สและทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์....30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.14 ระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....30
รูปที่ 3.15 เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงของ PerkinElmer รุ่น Tri-Carb 3110 TR.....31
รูปที่ 4.1 สิ่งที่เหลืออยู่ในกระบอกตัวอย่างหลังการเผาไหม้ของพลาสติก.....35
รูปที่ 4.2 สิ่งที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้ของพลาสติก.....35
รูปที่ 4.3 แผนภาพเปรียบเทียบปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของกลุ่มตัวอย่าง.....38
รูปที่ 4.4 แผนภาพเปรียบเทียบปริมาณสารชีวมวลของกลุ่มตัวอย่าง.....40
รูปที่ 4.5 ฉลากบนผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ระบุปริมาณ 100% plant-based.....41
รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงของสารที่ทำให้บริสุทธิ์.....44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลาสติกมากขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ทำมาจากพลาสติกบางชนิดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ บางชนิดใช้แล้วทิ้ง โดยส่วนใหญ่แล้วพลาสติกที่นำมาใช้ในชีวิตประจำวันมักจะถูกใช้เพียงครั้งเดียวแล้วทิ้งไป ทำให้ปัญหาการกำจัดขยะที่เกิดจากพลาสติกมีปริมาณมากขึ้นทุกวัน เนื่องจากขยะพลาสติกเป็นขยะที่กำจัดได้ค่อนข้างยาก การปล่อยทิ้งไว้หรือฝังกลบตามวิธีการกำจัดในปัจจุบันเพื่อให้ย่อยสลายไปเองนั้นใช้เวลานานหลายร้อยปี และพลาสติกบางประเภทแทบจะไม่ย่อยสลาย ต้องนำไปผ่านกระบวนเพื่อช่วยในการย่อยสลายและบางกระบวนการก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม เช่นการเผา ดังนั้นปัญหาการย่อยสลายของพลาสติกจึงมีความสำคัญ แนวทางการแก้ไขปัญหาที่สำคัญคือการทำให้พลาสติกสามารถย่อยสลายเองได้ในเวลาอันรวดเร็วและไม่สร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม การผลิตพลาสติกชีวภาพ (bio- plastics) เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหา ซึ่งพลาสติกชนิดนี้ผลิตมาจากวัตถุทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง [1] มีคุณสมบัติคือสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) โดยใช้เวลาไม่นาน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green product) และที่สำคัญคือเป็นวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนได้ ต่างจากพลาสติกโดยทั่วไปที่ทำมาจากวัตถุดิบปิโตรเคมีซึ่งใช้เวลาในการย่อยสลายนานมาก ใช้แล้วหมดไปและต้องอาศัยเวลานานกว่าจะทดแทนขึ้นมาใหม่ แต่คุณสมบัติการใช้งานของพลาสติกทั้งสองชนิดแทบจะไม่มีความแตกต่างกัน

การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนเป็นวิธีการหนึ่งที่นำมาใช้ในพิสูจน์พลาสติกชีวภาพ โดยปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน (modern carbon) นี้คือปริมาณของคาร์บอน-14 และสามารถคำนวณไปเป็นปริมาณสารชีวมวล (bio-based content) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงสัดส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับพลาสติกปิโตเลียมในพลาสติก โดยพลาสติกชีวภาพ 100 เปอร์เซ็นต์จะมีปริมาณคาร์บอน-14 เท่ากับในธรรมชาติ ในขณะที่พลาสติกปิโตรเลียม 100 เปอร์เซ็นต์จะไม่มีโมเดิร์นคาร์บอนหรือคาร์บอน-14 เลย ในประเทศสหรัฐอเมริกา หน่วยงาน United State Department of Agriculture (USDA) ได้มีการจัดตั้ง BioPreferred Program เพื่อกำหนดปริมาณสารชีวมวล ในผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะถูกกำหนดปริมาณสารชีวมวลแตกต่างกันไปตามกลุ่มผลิตภัณฑ์ [2] เพื่อให้เป็นมาตรฐานการผลิตพลาสติกชีวภาพในประเทศ และสมาคมพลาสติกชีวภาพของประเทศญี่ปุ่น ได้กำหนดปริมาณสารชีวมวลที่สูงว่าร้อยละ 25 จึงจะสามารถใช้ตรา BiomassPLA ได้ สำหรับชนิดของพลาสติกชีวภาพในปัจจุบันนั้นมีอยู่มากมาย แต่ที่กำลังได้รับความสนใจในตลาดโลกคือพลาสติกชนิด

พอลิบิวทีลีน ซัคซิเนท (Polybutylene succinate, PBS) และพอลิแลคติค แอซิด (Polylactic acid, PLA) ที่ผลิตจากผลผลิตทางการเกษตร เพราะสามารถผลิตขึ้นใหม่ได้ง่าย มีแนวโน้มว่าฐานการผลิตพลาสติกทั้งสองชนิดจะเกิดขึ้นในประเทศที่มีผลผลิตทางการเกษตรสูง โดยเฉพาะประเทศไทย

ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในพลาสติกชีวภาพที่มีในประเทศไทย ว่าแต่ละผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษานั้น มีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนมากน้อยเพียงใด โดยจะเลือกตัวอย่างพลาสติกชีวภาพจากกลุ่มภาชนะบรรจุใช้แล้วทิ้งที่มีการผลิตขึ้นในประเทศไทย โดยนำมาวิเคราะห์คาร์บอน-14 ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถนำไปใช้ได้กับทุกผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้รับการยอมรับตามมาตรฐานของ American Society for Testing and Material (ASTM) [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนที่มีอยู่ในพลาสติกชีวภาพโดยการวัดคาร์บอน-14

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพชนิดย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีจำหน่ายอยู่ในประเทศ

1.3.2 เตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซินทิลเลชันค็อกเทล (Scintillation cocktail)

1.3.3 วัดคาร์บอน-14 เพื่อนำมาวิเคราะห์โมเดิร์นคาร์บอนที่มีในตัวอย่างด้วยเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว

1.3.4 เปรียบเทียบปริมาณสารชีวมวลที่มีในตัวอย่างกับพลาสติกชีวภาพที่ทราบค่าปริมาณสารชีวมวล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดปริมาณมาตรฐานสารชีวมวลในพลาสติกชีวภาพในอนาคต

1.4.2 เพื่อยกระดับสินค้าอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในประเทศให้มีคุณภาพ และเป็นที่ยอมรับในตลาดสากล

1.4.3 เพื่อพัฒนาห้องปฏิบัติการทดสอบมาตรฐานเพื่อรับรองคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพภายในประเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.5 แผนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับพลาสติกชีวภาพและการวิเคราะห์ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน

1.5.2 สำรวจและสุ่มเลือกตัวอย่างพลาสติกชีวภาพจากอุตสาหกรรมในประเทศ ที่จะนำมาใช้ในการวิจัย

1.5.3 สันดาปตัวอย่างพลาสติกในถังความดันสูงให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.4 เก็บแก๊สและทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์

1.5.5 ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรงด้วยซินทิลเลชันค็อกเทล

1.5.6 วัดคาร์บอน-14 ในสารละลายที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว (Liquid scintillation counter, LSC)

1.5.7 คำนวณปริมาณร้อยละของโมเดิร์นคาร์บอนและปริมาณสารชีวมวล ที่มีอยู่ในพลาสติกชีวภาพและเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้กับพลาสติกชีวภาพที่ทราบค่าปริมาณสารชีวมวล

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 Norton และ Devlin [4] ศึกษาการนำวิธีวิเคราะห์หาปริมาณสารชีวมวลที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรม โดยเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์สามแบบตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D6866-05 ได้แก่ วิธีทดสอบด้วยเครื่อง Acceleration mass spectrometer (AMS) วิธีการสังเคราะห์เบนซีน (Benzene synthesis) และวิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide absorption) ว่าวิธีการวิเคราะห์แต่ละแบบให้ผลการทดลองเป็นอย่างไร จากการทดลองพบว่าสามารถเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์โดย AMS และ การสังเคราะห์เบนซีน ค่าปริมาณชีวมวลที่วัดจากทั้งสองวิธีนี้ มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก ซึ่งได้ค่าความไม่แน่นอนจากการวิเคราะห์คือ ±3% ในขณะที่วิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ก็สามารถวิเคราะห์ปริมาณสารชีวมวลได้เป็นบางตัวอย่าง และปริมาณชีวมวลที่ได้ไม่เท่ากับค่าจากทั้งสองวิธีแรก แต่คลาดเคลื่อนไปไม่มาก ค่าความไม่นอนจากการวิเคราะห์ไม่สามารถหาได้เนื่องจากมีข้อมูลที่จำกัด จึงต้องการข้อมูลเพื่อศึกษาเพิ่มเติม

1.6.2 Norton และคณะ [5] ศึกษาความถูกต้องของการวัดคาร์บอน-14 โดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยการนำคาร์บอนไปสังเคราะห์เบนซีน เพื่อหาปริมาณสารชีวมวลของผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรม โดยตั้งสมมติฐานว่าผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความหลากหลายของส่วนประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ มีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดที่จะสามารถนำวิธีการวิเคราะห์คาร์บอน-14 มาใช้วิเคราะห์ได้ในทุก ๆ ผลิตภัณฑ์โดยที่มีความแม่นยำสูง จากการทดลองจะได้ว่าวิธีการวิเคราะห์นี้มีความถูกต้องแล้วสามารถเชื่อถือได้เมื่อนำไปใช้วิเคราะห์ตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว โดยตัวอย่างที่นำมาใช้เป็นพลาสติกชนิด PLA และตัวอย่าง bio-ethanol พบว่าค่าความถูกต้องในการวัดคาร์บอน-14 มีค่าอยู่ในช่วง 3% และค่า R_2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 มาก (0.999, 0.9988, 0.9997)

1.6.3 Noakes และคณะ [6] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวัดของแต่ละวิธีการทดสอบ โดยการหาค่าความเที่ยงตรง (precision) ในการวัด พบว่า วิธีการวัดด้วย AMS ให้ค่าความเที่ยงตรงอยู่ที่ 0.88% วิธีการสังเคราะห์เบนซีนให้ค่าความเที่ยงตรงที่ ±1.86% และวิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ค่าความเที่ยงตรงที่ ±8.8% จากการทดลองจะพบว่า วิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ให้ค่าความเที่ยงตรงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสองวิธีแรก เมื่อนำทั้งสามวิธีทดสอบมาเปรียบเทียบเวลา ราคาของเครื่องวัด และค่าใช้จ่ายของการทดสอบต่อตัวอย่าง จะพบว่าเครื่อง AMS เป็นเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่ ราคาสูง มักนำไปใช้ในตัวอย่างที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง มีปริมาณตัวอย่างน้อย และใช้เวลาในการวิเคราะห์ไม่มาก เทียบกับวิธีการสังเคราะห์เบนซีนและวิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทดสอบด้วยเครื่อง LSC ที่ราคาค่าใช้จ่ายของเครื่องมือและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่อตัวอย่างต่ำกว่า ดังนั้นในการจะเลือกใช้วิธีการทดสอบใดก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและข้อจำกัดต่าง ๆ ของงาน เพราะในแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป

ตารางที่ 1.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาในการเลือกวิธีวิเคราะห์

Method	Precision (%)	Preparation time (hr)	Analysis time (min)	Analysis cost (USD)	Instrument cost (USD)
AMS	0.88	2	20	$400	$2.5M
Benzene synthesis	1.86	6	1300	$250	$100,000
CO_2 absorption	8.8	3	130	$250	$100,000

1.6.4 Molnar และคณะ [7] ได้ทำการทดลองวัดคาร์บอน-14 โดยเปรียบเทียบปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนจาก 2 วิธี คือการวัดด้วย GPC และ LSC โดยการเตรียมตัวอย่างใช้วิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าทั้งสองการวิธีให้ผลการวัดที่ดีในการทดสอบกับตัวอย่างหลากหลายชนิด และได้ทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ พบว่าผลของการวัดให้ค่าความไม่แน่นอนประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์สำหรับตัวอย่างที่มาจากแหล่งคาร์บอนในปัจจุบัน (recent carbon)

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับวิธีวิเคราะห์โดย LSC

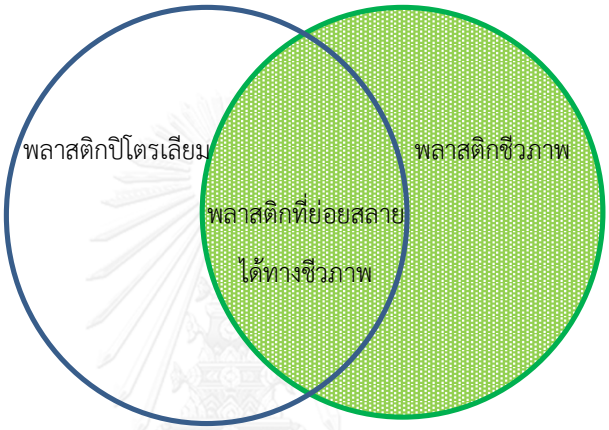
Sample	A ^{14}C, pMC	Description
S-1	5140.7 ± 46	NPP sample
S-2	222.3 ± 3.2	NPP sample
S-3	27.6 ± 1.5	Geological sample
S-4	756.3 ± 7.8	NPP sample
S-5	577.2 ± 6.3	NPP sample
S-6	6891.0 ± 61	NPP sample
S-7	112.6 ± 2.2	Environmental sample
S-8	116.4 ± 2.2	Environmental sample

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics)[8]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ พลาสติกชีวภาพ และพลาสติกปิโตรเคมีที่ผสมสารเติมแต่งที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพกับพลาสติกชนิดอื่น

2.1.1 พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกที่ผลิตหรือสังเคราะห์ขึ้นมาจากพืชหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ ไม่รวมถึงพลาสติกที่ผลิตมาจากแหล่งวัตถุดิบปิโตรเคมี พลาสติกชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.1.1.1 พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวไม่ได้ทางชีวภาพ (Non-Compostable)

พลาสติกประเภทนี้จะสังเคราะห์ขึ้นจากพืชหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แต่มีคุณสมบัติเหมือนกับพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบจากปิโตรเคมี (Petro-based) ทุกประการ คือไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานหลายร้อยปี พลาสติกชีวภาพชนิดนี้ที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อทดแทนพลาสติกจากแหล่งวัตถุดิบที่มาจากฟอสซิล (fossil carbon source) หรือปิโตรเคมีซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไป กว่าจะเกิดขึ้นมาใหม่ต้องใช้เวลานานซึ่งสวนทางกับอัตราการใช้พลาสติกในปัจจุบัน จึงต้องมีการคิดค้นแหล่งวัตถุดิบที่จะมาทดแทนเพื่อให้สามารถใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบได้อย่างไม่สิ้นสุด ตัวอย่างพลาสติกเช่น Polyurethanes (PU)

2.1.1.2 พลาสติกชีวภาพชนิดสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Compostable)

พลาสติกประเภทนี้สังเคราะห์ขึ้นจากพืชหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม เช่น แบคทีเรีย รา สาหร่าย เป็นต้น ใช้เวลาในการย่อยสลายไม่กี่เดือนซึ่งต่างจากพลาสติกทั่วไป คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการของพลาสติกประเภทนี้คือ สามารถสลายตัวทางชีวภาพแล้วกลายเป็นปุ๋ย โดยปุ๋ยที่เกิดขึ้นนี้จะต้องมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับปุ๋ยหมักตามธรรมชาติ (Compost) ไม่มีสิ่งแปลกปลอมตกค้างอยู่ในระบบนิเวศ ตัวอย่างพลาสติกเช่น Polybutylene succinate (PBS) และ Polylactic acid (PLA)

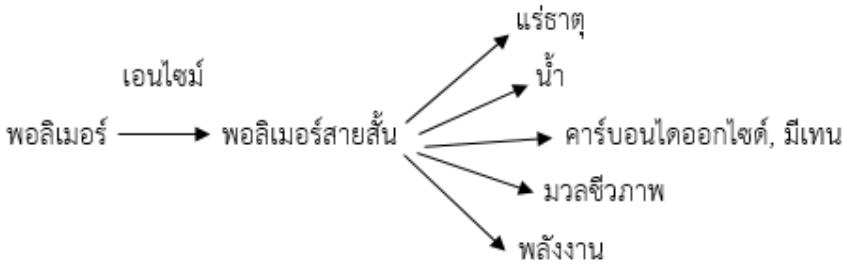
รูปที่ 2.2 Polylactic acid ใช้ผลิตภาชนะบรรจุ

2.1.2 พลาสติกปิโตรเคมีที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

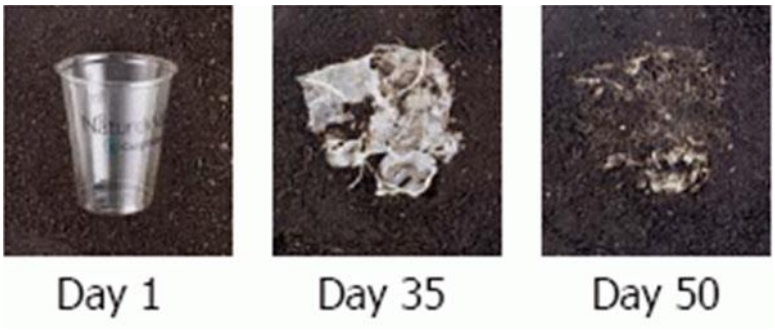
พลาสติกที่ผลิตจากปิโตเลียม (petroleum-based plastic) หรืออุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในการย่อยสลายพลาสติกชนิดนี้จะสามารถย่อยสลายได้โดยผ่านกระบวนการต่าง ๆ [9] เช่น การย่อยสลายด้วยความร้อน การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradable) การย่อยสลายโดยผ่านกระบวนการออกซิเดชั่น (Oxidative degradable) หรือใช้สารเคมี เป็นต้น ซึ่งเมื่อย่อยสลายแล้วทำให้เกิดสิ่งตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม แตกต่างจากพลาสติกชีวภาพที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้โดยผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์จึงไม่เกิดสิ่งตกค้างในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ พลาสติกชีวภาพยังเป็นพลาสติกที่ใช้แหล่งวัตถุดิบที่สามารถทดแทนใหม่ได้ตลอด ในบางครั้งการผลิตพลาสติกปิโตรเลียมจะมีการใส่พลาสติกชีวภาพผสมด้วย ซึ่งทำให้พลาสติกปิโตรเลียมสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากการย่อยของจุลินทรีย์ ทำให้พลาสติกที่ถูกย่อยแตกละเอียดเป็นผง

2.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable)

การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพ จะเกี่ยวของกับการย่อยสลายของพอลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ (microorganism) เนื่องจากสายพอลิเมอร์ในพลาสติกมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ จึงมีกระบวนการในการย่อยสลายเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ซึ่งเกิดได้ 2 แบบ ใช้คือ แบบใช้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายพอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ (endo-enzyme) และแบบใช้เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุด (monomer) ที่อยู่ด้านปลายของสายพอลิเมอร์ (exo-enzyme) เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งก็คือกระบวนบวนการแมแทบอลิซึม (metabolism) ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์จนได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ (biomass)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการย่อยสลายทางชีวภาพ



รูปที่ 2.4 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

2.3 วัตถุดิบชีวมวล (Bio-based material)

แหล่งวัตถุดิบที่มาจากพืชหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้เองทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์แล้วกลายเป็นปุ๋ยธรรมชาติ ตัวอย่างวัตถุดิบชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพ เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย เป็นต้น วัตถุดิบชีวมวลนี้ถือว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ จึงทำให้เป็นวัตถุดิบที่มีใช้อย่างไม่จำกัด ต่างจากแหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม

2.4 ปริมาณสารชีวมวล [10]

ปริมาณสารชีวมวลเป็นปริมาณคาร์บอนจากชีวมวล (bio-based carbon) ของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ แสดงเป็นสัดส่วนของน้ำหนัก (fraction weight) หรือ ร้อยละของน้ำหนักคาร์บอนจากสิ่งมีชีวิตทั้งหมด (total organic carbon) ของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าในผลิตภัณฑ์มีคาร์บอนที่มาจากสิ่งมีชีวิตมากน้อยเพียงใด แนวคิดในการหาค่าปริมาณสารชีวมวลคล้ายกับการหาค่าอายุของวัตถุ โดยจะใช้วิธีการหาสัดส่วนคาร์ของคาร์บอน-14 ในตัวอย่างเทียบกับคาร์บอน-14 ของสารมาตรฐาน

2.5 แหล่งคาร์บอนชีวภาพ หรือคาร์บอนจากสิ่งมีชีวิต (Bio-based or organic carbon source)

คาร์บอนที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิต เช่น พืชหรือสัตว์ ที่เพิ่งตายแล้วไม่นาน โดยที่สิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะยังมีคาร์บอนใหม่ หรือคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 (C-14/C-12) ในปริมาณที่คงที่เทียบเท่ากับชั้นบรรยากาศ เนื่องจากสิ่งมีชีวิตที่เพิ่งตายจะหยุดรับคาร์บอน-14 ในธรรมชาติและเริ่มมีการสลายตัวของคาร์บอน-14 ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่เป็นแหล่งคาร์บอนชีวภาพจะมีปริมาณคาร์บอน-14 ลดลงครึ่งหนึ่งต้องใช้เวลาถึง 5,730 ปี ซึ่งจะแตกจากสิ่งมีชีวิตที่ตายมานานแล้วหลักแสนหรือล้านปี จนทำให้กลายเป็นซากดึกดำบรรพ์ (fossil) ทำให้ค่าสัดส่วนแหล่งคาร์บอนใหม่จะเป็นศูนย์ เนื่องจากคาร์บอน-14 ได้สลายตัวไปเกือบหมด

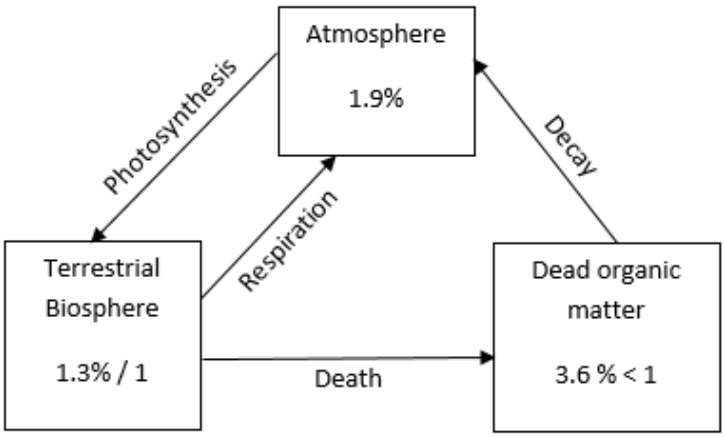
2.6 ปริมาณคาร์บอนใหม่หรือสัดส่วนคาร์บอนชีวภาพ

ปริมาณที่เป็นสัดส่วนระหว่าง คาร์บอน-14 กับ คาร์บอน-12 โดยอาศัยทฤษฎีที่ว่าในกระบวนการสังเคราะห์แสงในพืชจะมีการหายใจรับเอาคาร์บอน-14 จากอากาศที่อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป โดยคาร์บอน-14 นี้ ได้มาจากรังคอสมิกที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลกและทำให้เกิดนิวตรอนอิสระ (free neutron) ซึ่งเป็นตัวที่จะไปทำปฏิกิยากับไนโตรเจน-14 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน-14 และทำให้เกิดเป็นคาร์บอน-14

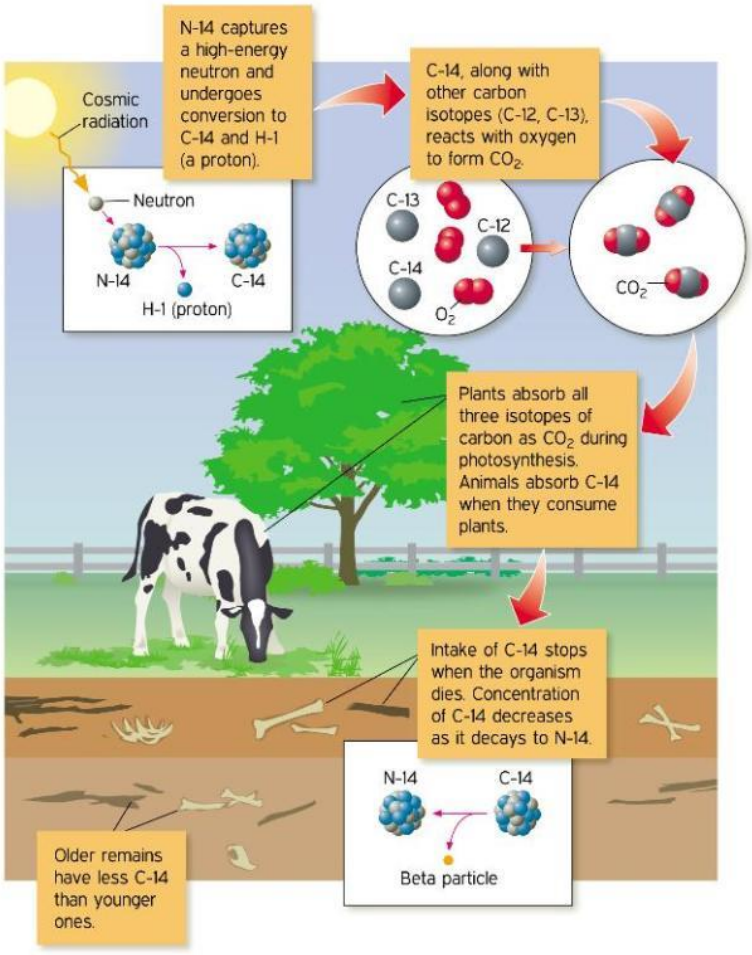
$$ {}_{0}^{1}n + {}_{7}^{14}N \longrightarrow {}_{6}^{14}C + {}_{1}^{1}p $$

คาร์บอน-14 ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาข้างบนจะถูกออกซิไดซ์ (oxidize) อย่างรวดเร็วในชั้นบรรยากาศเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ($^{14}CO_2$) ปะปนอยู่ในอากาศ ทำให้เมื่อพืชหายใจนำคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป จึงมีทั้งคาร์บอนไดออกไซด์ที่คาร์บอนเป็นคาร์บอน-14 และ คาร์บอน-12 เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง จากนั้นเมื่อพืชตายลงหรือถูกสิ่งมีชีวิตอื่นกินเข้าไป คาร์บอน-14 จะหมุนเวียนไปตามห่วงโซ่อาหาร จนกระทั่งสัดส่วนของคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 ในสิ่งมีชีวิตเท่ากับในชั้นบรรยากาศ เมื่อสิ่งมีชีวิตตายจึงหยุดการได้รับคาร์บอน-14 จึงทำให้สัดส่วนระหว่าง คาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 ลดลง และเมื่อเวลานานมากพอคาร์บอน-14 จะสลายตัวจนหมดทำให้สัดส่วนระหว่างคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 เท่ากับศูนย์ ซึ่งในกรณีเช่นนี้ได้แก่ พวกเชื้อเพลิงฟอสซิล (ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี) ที่เกิดมาจากสิ่งมีชีวิตที่ตายไปแล้วนานหลายล้านปี ในขณะที่สัดส่วนระหว่างสัดส่วนคาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 ของวัตถุดิบชีวมวลยังมีค่าใกล้เคียงกับสัดส่วนระหว่าง คาร์บอน-14 ต่อคาร์บอน-12 ในธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.5 สัดส่วนของคาร์บอน-14ต่อคาร์บอน-12 ในวัฏจักรคาร์บอน



รูปที่ 2.6 กระบวนการนำคาร์บอน-14 จากอากาศเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร

2.7 ไอโซโทปเสถียร

ไอโซโทปของธาตุหลายชนิด มีสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากมวลที่ต่างกัน สำหรับธาตุที่เลขมวลต่ำ ๆ ผลต่างของมวลจะมีค่ามากพอที่จะมีผลต่อกระบวนการทางฟิสิกส์ ทางเคมี และทางชีววิทยา หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงแยกลำดับส่วน (fractionate) ของไอโซโทป หรือมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแต่ละไอโซโทป ผลของกระบวนการเปลี่ยนแปลงแยกลำดับส่วนไอโซโทป (isotope fractionation) ในน้ำและสารละลาย ทำให้มีปริมาณของไอโซโทปที่เป็นองค์ประกอบเฉพาะ (อัตราส่วนของไอโซโทปหนักต่อไอโซโทปเบา)

องค์ประกอบของไอโซโทปเสถียรในธาตุที่มีมวลน้อย เช่น ออกซิเจน ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยทั่วไปจะรายงานด้วยค่าของเดลตา (delta, d) ใช้สัญลักษณ์ δ ออกเสียงว่า เดลตา (delta) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนหนึ่งในพันส่วน ใช้สัญลักษณ์ ‰ เรียกว่า per mill โดยการเปรียบเทียบว่าค่ามากกว่า (enrichment) หรือน้อยกว่า (depletion) ค่าของสารมาตรฐาน สามารถคำนวณ δ ได้จาก

$$\delta = \left(\frac{\mathbf{Rsample}}{\mathbf{Rstandard}} - 1\right) \times 1000\ ‰$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

R เป็นอัตราส่วนระหว่างไอโซโทปหนักกับไอโซโทปเบาในตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ค่าของ δ เป็นบวก หมายความว่า ตัวอย่างมีไอโซโทปหนักมากกว่าสารมาตรฐาน และค่าของ δ เป็นลบ หมายความว่า ตัวอย่างมีไอโซโทปหนักน้อยกว่าสารมาตรฐาน

การใช้สารมาตรฐานไอโซโทปเสถียรหลายชนิด สำหรับการวิเคราะห์และรายงานองค์ประกอบของไอโซโทป โดยการกำหนดให้สารมาตรฐานมีองค์ประกอบของไอโซโทปเป็น 0 ‰ การรายงานสัดส่วนไอโซโทปเสถียรของคาร์บอน จะเปรียบเทียบสารมาตรฐาน PDB (Pee Dee Belemnite) หรือสารมาตรฐาน VPDB (Vienna PDB)

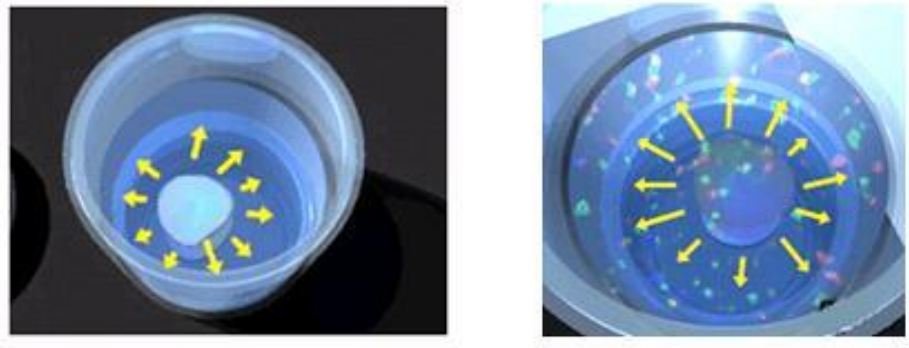
ปัจจุบันใช้สารมาตรฐาน VSMOW และ VPDB ของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศหรือ IAEA (International Atomic Energy Agency) สำหรับใช้ปรับเทียบค่าของเดลตาในหน่วย per mill ขณะที่ห้องปฏิบัติการบางแห่ง อาจจะวิเคราะห์สารประกอบที่มีสัดส่วนไอโซโทปเสถียรที่มีปริมาณสูง โดยรายงานเป็นร้อยละ หรือ ppm แทนที่จะแสดงสัดส่วนเป็น per mil

2.8 การวิเคราะห์โดยการวัดคาร์บอน-14

การวิเคราะห์หาปริมาณสัดส่วนคาร์บอนชีวภาพจากพลาสติกที่มีส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบชีวมวลกับปิโตรเคมี ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D 6866 จะเป็นการวัดปริมาณสัดส่วนคาร์บอนชีวภาพ (bio-base carbon) ในตัวอย่าง ซึ่งจะต้องนำตัวอย่างไปสันดาปเพื่อให้ได้คาร์บอนที่อยู่ในรูปคาร์บอนไดออกไซด์และทำการตรึงคาร์บอนโดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 วิธีแตกต่างกัน คือ การแยกมวลด้วยเครื่องเร่งอนุภาค Accelerator mass spectrometry (AMS) การสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของเบนซีน (benzene synthesis) และ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 absorption) เทคนิคการวัดคาร์บอนด้วยวิธีสังเคราะห์ให้เป็นเบนซีนและวิธีแยกมวลด้วยเครื่องเร่งอนุภาคเป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ตัวอย่างได้หลากหลายมากกว่าและมีค่าความไม่แน่นอนการวัดที่อยู่ในช่วงที่สูงกว่าวิธีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการวิเคราะห์ในตัวอย่าง แต่เครื่อง Accelerator mass spectrometry (AMS) เป็นเครื่องมือที่จำเพาะและราคาสูง ในประเทศไทยจึงยังไม่มีการใช้งานแพร่หลาย ราคาในการวิเคราะห์ต่อตัวอย่างค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการทดสอบวิธีอื่น ส่วนวิธีสังเคราะห์ให้เป็นเบนซีน เป็นวิธีที่ต้องผ่านการเปลี่ยนรูปคาร์บอนให้เป็นสารประกอบหลายขั้นตอน ทำให้การวิเคราะห์แต่ละตัวอย่างใช้เวลานานและค่าใช้จ่ายสูง จึงเป็นข้อจำกัดในการทำงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิควิเคราะห์กัมมันตรังสีคาร์บอนโดยวิธีดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และวัดด้วยเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว (Liquid Scintillation Counter)

2.9 เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว

เครื่องวัดที่เหมาะสำหรับการวัดรังสีที่มีค่าความแรงรังสีต่ำและมีความไวต่อรังสี (sensitivity) ในการวัดสูง เช่น รังสีแอลฟา เบต้า หรือแกมมาพลังงานต่ำ มักนำไปใช้ในการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อม (Naturally Occurring Radioactive Material, NORM) หลักการทั่วไปของเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว[11] คือ รังสีที่ปล่อยออกมาจะไปกระตุ้นโมเลกุลของตัวทำละลายทำให้อยู่ในสภาวะเร่ง (excitation) จากนั้นโมเลกุลของตัวทำละลายจะคายพลังงานออกมาถ่ายเทให้กับสารเรืองแสง (scintillator) สารเรืองแสงเมื่อถูกกระตุ้นจะปล่อยแสงออกมาและนับวัดแสงด้วยหลอดวัดแสงทวีคูณ (photomultiplier tubes) ผลจากการวัดรังสีจะอยู่ในรูปค่านับวัดรังสีต่อหน่วยเวลา (count per minute)

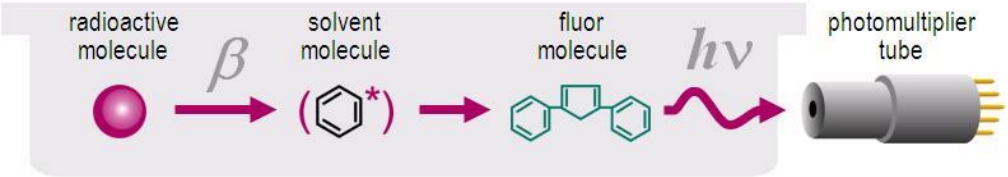


ก ข

รูปที่ 2.7 หลักการถ่ายเทพลังงานของสารรังสี

ก) อนุภาคเบต้าถูกปล่อยออกมาจากสารรังสี และไปกระตุ้นโมเลกุลตัวทำละลายให้อยู่ในสภาวะเร่ง

ข) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากตัวทำละลายจะถ่ายเทให้กับสารเรืองแสง และปล่อยแสงออกมา



รูปที่ 2.8 กระบวนการถ่ายเทพลังงานจากสารรังสีไปที่หัววัดรังสี

2.10 มาตรฐานปริมาณสารชีวมวลในพลาสติกชีวภาพ

หน่วยงาน United State Department of Agriculture(USDA) ได้จัดตั้ง Bio Preferred Program [2] เพื่อเป็นมาตรฐานในการกำหนดปริมาณสารชีวมวลในผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ โดยผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะถูกกำหนดปริมาณสารชีวมวลแตกต่างกันไปตามกลุ่มผลิตภัณฑ์ เพื่อให้เป็นมาตรฐานการผลิตพลาสติกชีวภาพในประทศ โดยล่าสุดในปี 2013 มีกลุ่มผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 7 กลุ่ม

2.10.1 วัสดุก่อสร้าง (Construction)

2.10.2 อุปกรณ์เกี่ยวการเพาะปลูก (Groundkeeping)

2.10.3 สารหล่อลื่น (Industial Lubticants and Fluid)

2.10.4 สารทำความสะอาด สารซักล้าง (Janitorial)

2.10.5 ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดที่ใช้กับคน (Personal Care)

2.10.6 ภาชนะใส่อาหาร (Food Service)

2.10.7 ผลิตภัณฑ์อื่นๆ (Miscellanrous)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์

3.1.1.1 ถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง (High Pressure Combustion Bomb)

3.1.1.2 กระบอกใส่ตัวอย่าง

3.1.1.3 ลวดนำไฟฟ้า (Fe ignation wire)

3.1.1.4 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Ignation unit)

3.1.1.5 ระบบทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์

3.1.1.6 ระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

3.1.1.7 เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว PerkinElmer Tri-Carb 3110 TR

3.1.1.8 ปั๊มดูดอากาศ (Vacuum pump)

3.1.1.9 กระบอกสแตนเลส

3.1.1.10 ถังเก็บแก๊ส (Storage tank)

3.1.1.11 ขวดแก้วสำหรับใส่ตัวอย่าง (Vial)

3.1.1.12 หลอดแก้ว 2 ทางเพื่อสำหรับใส่ซินทิลเลชัน ค็อกเทล

3.1.1.13 บีกเกอร์ (Beaker)

3.1.1.14 เข็มฉีดยา (Syringe)

3.1.1.14 ตู้ดูดควัน (Fume hood)

3.1.1.16 ตู้อบไล่ความชื้น

3.1.1.17 ตู้เย็น

3.1.1.18 เกจวัดความดัน

3.1.1.19 เครื่องชั่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.2.1 โพแทสเซียม ไอโอไดด์ (Potassium Iodide, KI)

3.1.2.2 ไอโอดีน (Iodine, I_2)

3.1.2.3 ซิลเวอร์ ไนเตรท (Silver Nitrate, AgNo3)

3.1.2.4 โพแทสเซียม ไดโครเมท (Potassium dichromate, $K_2Cr_2O_7$)

3.1.2.4 กรดซัลฟูริค (Sulfuric, H_2SO_4)

3.1.2.5 เอทิล แอกอฮอล์ 95% (95% Ethyl alcohol)

3.1.2.6 ไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen)

3.1.2.7 โทลูอีน (Toluene)

3.1.2.8 เมทานอล (Methanol)

3.1.2.9 2,5- diphenyloxazole (PPO)

3.1.2.10 1,4-bis[2-methylstyryl]-benzene (Bis-MSB)

3.1.2.11 Carbosorb E

3.1.2.12 แก๊สออกซิเจน (Oxygen gas)

3.1.2.13 แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen gas)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 ชนิดของตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วยเม็ดพลาสติกและพลาสติกที่อยู่ในรูปบรรจุภัณฑ์ โดยมีการแบ่งประเภทดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ประเภทของตัวอย่างพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ประเภท	รหัส	ตัวอย่าง
วัตถุดิบชีวมวล	-	อ้อย
	-	มันสำปะหลัง
เม็ดพลาสติกชีวภาพ	PLA	พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic acid, PLA)
	PBS1	พอลิบิวทีลีน ซัคซิเนท (Polybutylene succinate, PBS) ชนิดที่ 1
	PBS2	พอลิบิวทีลีน ซัคซิเนท (Polybutylene succinate, PBS) ชนิดที่ 2
	Bio-TPE	ยางเทอร์โมพลาสติก(Thermoplastic Elastomers, Bio-TPE)
เม็ดพลาสติกปิโตรเลียม	PBAT	พอลิบิวทีลีน อะดิเพทโคเทอเรพธาเรท (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT)
	PP	พอลิพอพิลีน (Polypropylene, PP)
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศ	BP1	ถุงพลาสติก 1
	BP2	ถุงพลาสติก 2
	BP3	แก้วน้ำพลาสติก
	BP4	ขวดน้ำพลาสติก
	BP5	กล่องพลาสติก
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากหน่วยงานวิจัย	BPX1	ซองพลาสติก (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
	BPX2	ฟิล์มพลาสติก (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศ	BPA	ขวดนมพลาสติก (USA)
	BPB	ขวดน้ำพลาสติก (Australia)

3.2.1 เม็ดพลาสติกชีวภาพ 4 ตัวอย่าง ได้แก่ พอลิแลคติก แอซิด ได้มาจากศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) พอลิบิวทีลีน ซัคซิเนท ชนิดที่ 1 กับ 2 ได้มาจากบริษัท พีทีที โพลีเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด (PTTPM) และยางเทอร์โมพลาสติก

3.2.2 เม็ดพลาสติกปิโตรเลียม 2 ตัวอย่าง ได้แก่ พอลิบิวทีลีน อะดิเพทโคเทอเรพธาเรท และพอลิพอพิลีน

3.2.3 ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่วางจำหน่ายในประเทศไทย 5 ตัวอย่าง ได้แก่ BP1-BP5

3.2.4 ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากหน่วยงานวิจัยที่เชื่อถือได้ 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ซองพลาสติกชีวภาพของผลิตภัณฑ์กล้วยตากจิราพรที่สูตรการผลิตคิดขึ้นโดยภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ฟิล์มพลาสติกที่ผลิตโดยภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ คณะอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.2.5 ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่วางจำหน่ายในต่างประเทศ 2 ตัวอย่าง ได้แก่ ขวดนมเปรี้ยวพลาสติกจากประเทศสหรัฐอเมริกา (USA) และ ขวดน้ำดื่มจากประเทศออสเตรเลีย (Australia) ซึ่งทั้งสองผลิตภัณฑ์นี้เป็นจะเป็นตัวอย่างที่ใช้ยืนยันวิธีการวิเคราะห์ เนื่องจากทราบค่าปริมาณของส่วนผสมที่มาจากพืชที่ระบุไว้บนฉลากผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน

นอกจากพลาสติกทั้ง 5 กลุ่มข้างต้นแล้ว ในการทดลองนี้จะนำพืชที่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพมาทดสอบด้วย [12] คือ อ้อยและมันสำปะหลัง เพื่อให้เป็นตัวแทนของตัวอย่างที่มีคาร์บอน-14 เทียบเท่ากับในธรรมชาติ

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกชีวภาพ Bio-TPE

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเม็ดพลาสติกปิโตรเลียม PBAT

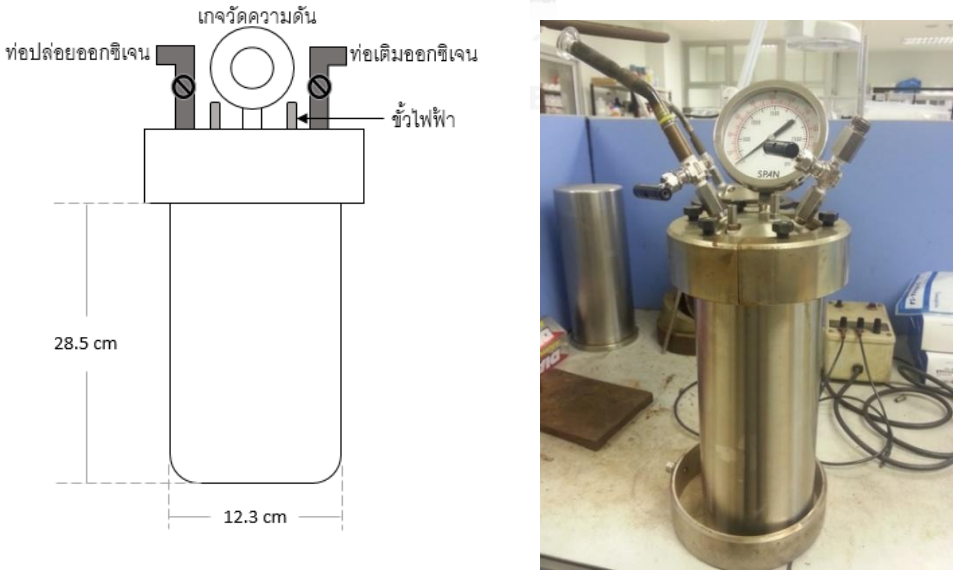
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในประเทศไทย

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในหน่วยงานวิจัย

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในต่างประเทศ

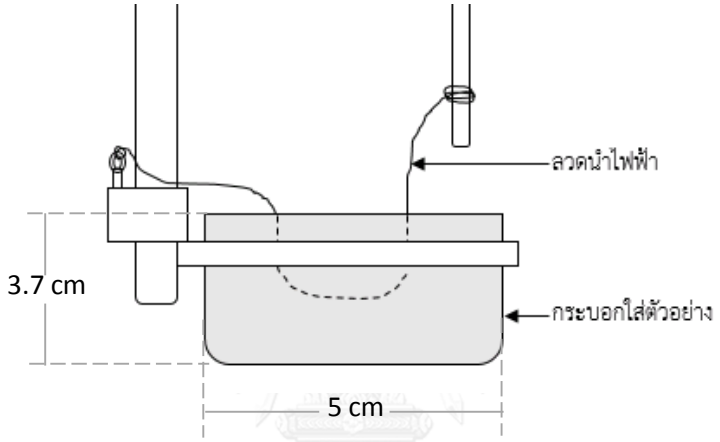
3.3 การเตรียมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง [13]

พลาสติกที่นำมาใช้ในการทดสอบ จะต้องนำไปตัดให้เป็นชิ้นเล็กก่อน เพื่อให้ตัวอย่างสัมผัสกับออกซิเจนได้มากที่สุดและสามารถใส่ลงในกระบอกตัวอย่างได้ จากนั้นนำตัวอย่างเข้าไปไว้ในตู้อบความชื้นอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนการสันดาป เพื่อให้ตัวอย่างมีความชื้นน้อยที่สุด เนื่องจากความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการสันดาป ตัวอย่างพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยจะอยู่ในรูปของแข็ง ดังนั้นจะต้องทำการเปลี่ยนรูปให้ตัวอย่างอยู่ในรูปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนโดยใช้วิธีสันดาปโดยใช้ออกซิเจนความดันสูง (oxygen bomb) ก่อนเริ่มทำการทดสอบจะต้องทดลองสันดาปตัวอย่างพลาสติกแต่ละชนิดที่น้ำหนักต่างๆก่อนเพื่อคำนวณปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยที่ได้ต่อน้ำหนักของตัวอย่าง ทำให้สามารถกำหนดปริมาณแก๊สที่ได้ให้เพียงพอสำหรับขั้นตอนต่อไป ปริมาณตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนที่มีอยู่ในตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่างด้วยถังสันดาปนี้จะใช้ออกซิเจนที่มีแรงดันสูงประมาณ 20-25 เท่าของความดันบรรยากาศ (atm) และทำให้เกิดการสันดาปโดยการจุดด้วยกระแสไฟฟ้า ดังขั้นตอนต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 ถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง

3.2.1 ชั่งตัวอย่างใส่ในกระบอกใส่ตัวอย่างที่ทำมาจากเหล็ก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอก 5 เซนติเมตร สูง 3.7 เซนติเมตร ปริมาณตัวอย่างที่ใช้สำหรับการสันดาปประมาณ 5-10 กรัม จากนั้นนำกระบอกใส่ตัวอย่างไปวางในห่วงที่ติดกับแท่งเหล็กที่ยื่นออกมาจากฝาถังสันดาปด้านหนึ่ง แล้วพันลวดนำไฟฟ้ากับแท่งเหล็กที่ยื่นออกมาจากฝาถังทั้งสองด้าน ให้ลวดที่ร้อยทั้งสองด้านผ่านตัวอย่างในกระบอก ข้อควรระวังในขั้นตอนนี้คือ ไม่ให้ลวดสัมผัสกับกระบอกตัวอย่าง ให้สัมผัสโดนเฉพาะตัวอย่างเท่านั้น

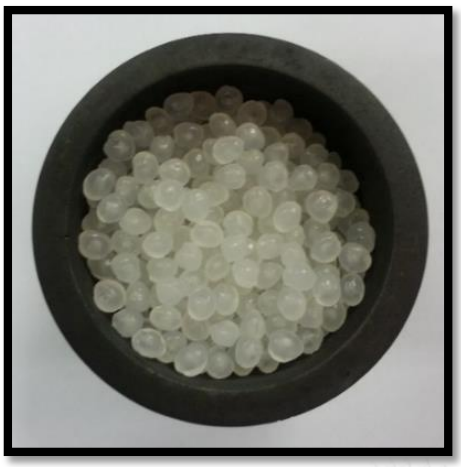


รูปที่ 3.8 การร้อยลวดนำไฟฟ้าผ่านตัวอย่าง

3.2.2 นำฝาถังไปประกอบกับตัวถัง บนฝาถังจะประกอบไปด้วยช่องสำหรับให้อากาศเข้าออกสองช่อง โดยทั้งสองช่องจะมีวาล์วสำหรับปิดเปิด ข้างๆช่องอากาศทั้งสองจะมีขั้วไฟสองขั้วสำหรับต่อกับสายไฟจากเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า และมีเกจสำหรับวัดความดันภายในถัง

3.2.3 แล้วเปิดวาล์วทั้งสองด้านของถังสันดาปต่อสายออกซิเจนที่วาล์วบนฝาถังด้านหนึ่งเพื่อใช้ออกซิเจนไล่อากาศออกจากถังประมาณ 3 นาที จากนั้นปิดวาล์วอีกด้านหนึ่งเพื่ออัดก๊าซออกซิเจนเข้าไปในถัง ให้ความดันอยู่ที่ 20-25 เท่าของความดันบรรยากาศ เมื่อได้ความดันที่ต้องการแล้ว ปิดการจ่ายออกซิเจน ปิดวาล์วและถอดสายออกซิเจน

3.2.4 ทำการสันดาปโดยกดสวิทซ์บนเครื่องจุดระเบิดเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่เส้นลวด เมื่อตัวอย่างเกิดการสันดาปจากของแข็งกลายเป็นแก๊สแล้ว สามารถสังเกตได้จากเข็มบนหน้าปัดของเกจวัดความดันจะพบว่าความดันจะเพิ่มมากขึ้นจากตอนที่อัดออกซิเจน และเมื่อจับที่ตัวถังสันดาปดันจะร้อน



ก

ข

ค

ง

รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง

ก) ชั่งตัวอย่างใส่ในกระบอกตัวอย่าง

ข) ร้อยลวดนำไฟฟ้าผ่านตัวอย่าง

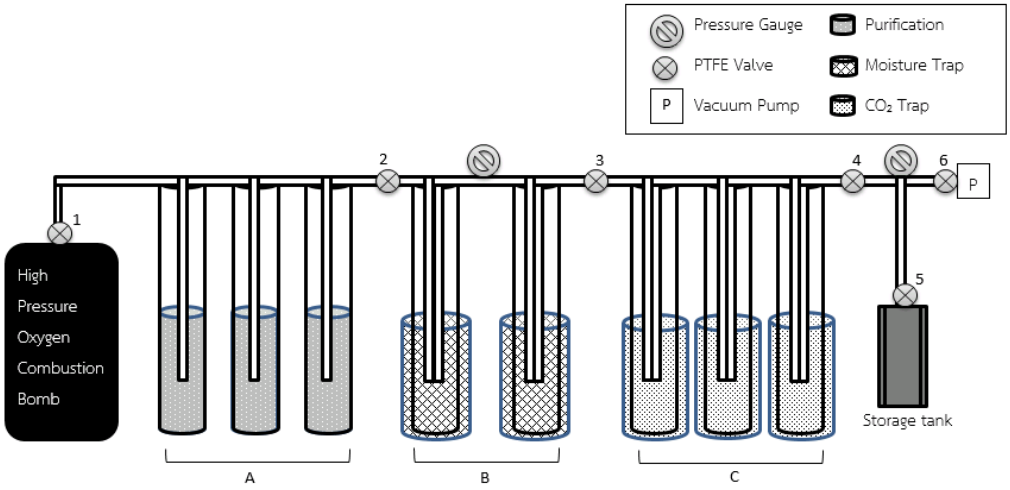
ค) เติมออกซิเจนเข้าสู่ถังสันดาป

ง) นำสายไฟมาต่อที่ขั้วไฟฟ้าบนฝาถัง

รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของฝาถังสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง

3.4 การทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์

หลังจากได้คาร์บอนไดออกไซด์จากการสันดาปแล้ว จะต้องนำมาผ่านกระบวนเพื่อทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ก่อน เพราะหลังจากการสันดาปอาจจะมีแก๊สหรือสารประกอบตัวอื่น ๆ นอกเหนือจากคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ นอกจากกนี้ยังมีไอน้ำที่ได้จากการสันดาปปะปนอยู่ด้วย ซึ่งทำให้แก๊สมีความชื้น ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงต้องมีการทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปราศจากความชื้นและสารประกอบที่ไม่ต้องการ โดยกระบวนการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ จะเป็นกระบวนการที่ให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสันดาปตัวอย่างไหลผ่านสารละลายชนิดต่างๆ เพื่อจับสิ่งที่ปะปนมาและตกตะกอน ให้เหลือไว้เฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ และให้คาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกับดักจับความชื้น ซึ่งเป็นสารละลายที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งแต่ไม่ต่ำมากไปจนทำให้แก๊สเป็นของแข็งได้ เมื่อผ่านกับดับนี้ จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์ไม่มีมีสิ่งปนเปื้อน และเป็นอากาศแห้ง ซึ่งมีขั้นตอนโดยละเอียดดังต่อไปนี้ (ภาพประกอบระบบทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ แสดงในรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 แผนภาพแสดงระบบเก็บแก๊สและทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์

3.3.1 ต่อถังสันดาปที่ภายในบรรจุแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตัวเข้ากับระบบเก็บแก๊สที่วาล์วตัวที่ 1 และถังเก็บแก๊สที่วาล์วตัวที่ 5 จากนั้นเปิดปั๊มดูดอากาศและเปิดวาล์วตัวที่ 2-6 เพื่อดูดอากาศที่ค้างอยู่ในระบบออก เช็คระบบให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศ โดยดูจากเกจวัดความดันให้อยู่ที่ 760 มิลลิเมตรปรอท

3.3.2 ปิดวาล์วตัวที่ 4 เช็คความดันจากเกจวัดความดันจนแน่ใจว่าระบบไม่มีการรั่วของอากาศ จากนั้นเปิดวาล์วตัวที่ 1 ทีละน้อย ค่อย ๆ ให้คาร์บอนไดออกไซด์ไหลเข้าสู่ระบบ

3.3.3 คาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านเข้าสู่ชุดกับดัก A ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วที่บรรจุสารละลาย 3 ชนิด โดยหลอดแรกบรรจุสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์และไอโอดีน (KI/I_2) เพื่อจับออกไซด์ของฟอสฟอรัส ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ หลอดที่สองบรรจุสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) สำหรับตกตะกอนสารประกอบเฮไลด์ (halide) และไอกรด หลอดสุดท้ายบรรจุสารละลายของกรดซัลฟูริกและโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เพื่อจับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)

3.3.4 เมื่อผ่านชุดกับดัก A ทั้ง 3 หลอดแล้ว คาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านชุดกับดัก B ซึ่งเป็นหลอดแก้วที่แช่อยู่ในของเหลวผสมระหว่างไนโตรเจนเหลวกับแอลกอฮอล์ แก๊สที่ผ่านกับดับนี้จะถูกลดอุณหภูมิจนต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง อุณหภูมิของชุดกับดักประมาณ -70 องศาเซลเซียส เพื่อควบแน่นไอน้ำที่มากับแก๊ส จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านชุดกับดัก C ซึ่งเป็นหลอดแก้วที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว ชุดกับดักนี้จะมีอุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส เมื่อแก๊สผ่านหลอดแก้วทั้ง 3 หลอดนี้จะถูกลดอุณหภูมิจนกลายเป็นของแข็งเกาะอยู่ในหลอดแก้ว

3.3.5 ปิดวาล์วตัวที่ 3, 6 และเปิดวาล์วตัวที่ 4,5 เอาไนโตรเจนเหลวออกจากหลอดแก้วในชุดกับดัก C ปล่อยให้คาร์บอนไดออกไซด์ในหลอดแก้วทั้ง 3 หลอดระเหิดเข้าสู่ถังเก็บแก๊สที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว

3.3.6 วางถังเก็บแก๊สไว้ที่อุณหภูมิ รอให้น้ำแข็งที่เกาะอยู่ที่ถังละลายหมด คาร์บอนไดออกไซด์จะกลับเข้าสู่สถานะแก๊สอีกครั้ง นำไปชั่งน้ำหนักหาปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้

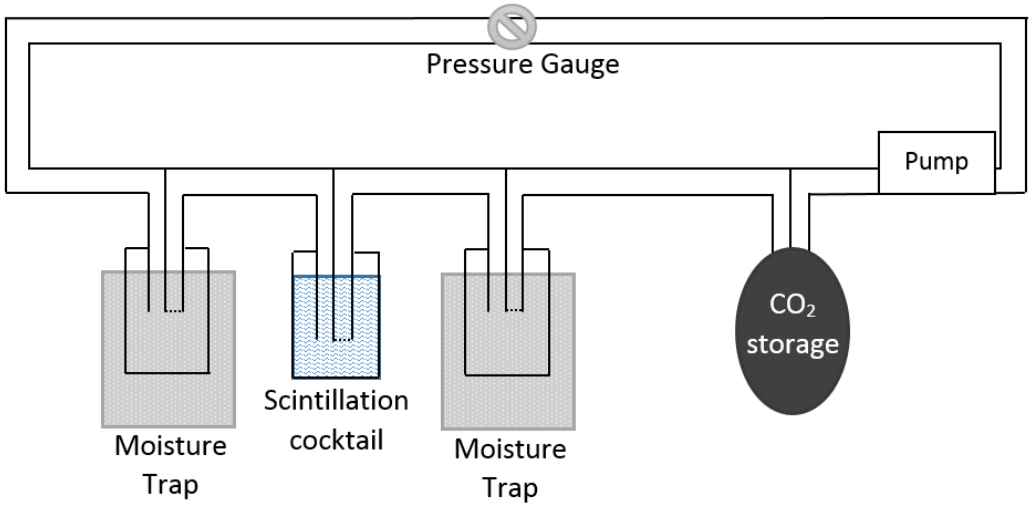
3.5 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซิลทิลเลชั่นค็อกเทล (scintillation cocktail)

3.4.1 เตรียมซินทิลเลชันค็อกเทลที่จะนำมาใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผสมสารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbosorb) กับสารเรืองแสงชนิด Permafluor V ในอัตราส่วน 1:1 เตรียมภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเพื่อป้องกันไม่ให้สัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ปริมาณของซินทิลเลชันค็อกเทลที่ใช้ 20 มิลลิลิตรจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3 กรัม การเตรียมซินทิลเลชัน ค็อกเทลสำหรับเอาไว้ใช้ทำได้โดยบรรจุในปริมาณที่ต้องการใช้ต่อตัวอย่างลงในขวดแก้วสำหรับวัดในเครื่องวัดสีแบบเรืองแสงในของเหลว บรรจุขวดแก้วไว้ในภาชนะทึบแสงและนำไปเก็บไว้ในตู้เย็น

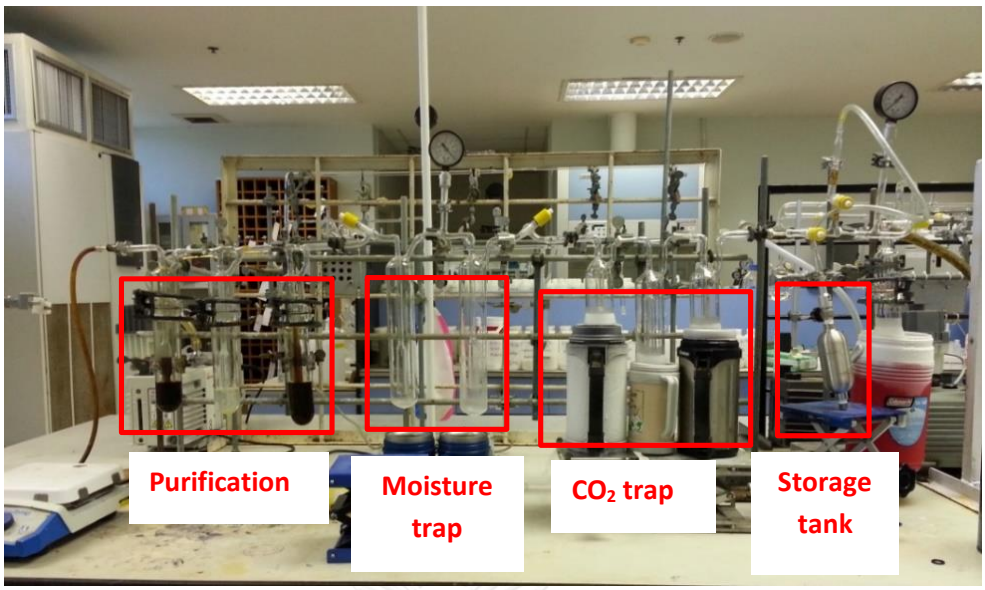
3.4.2 นำซินทิลเลชันค็อกเทลที่เตรียมไว้มาบรรจุในหลอดแก้วที่จะใช้ต่อเข้ากับระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เข็มฉีดยาดูดซินทิลเลชันค็อกเทลออกจากขวดแก้วถ่ายเข้าสู่หลอดแก้ว 2 ทางในบรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นนำหลอดแก้วไปแช่ในน้ำเย็นจัดก่อนนำไปต่อเข้าสู่ระบบต่อไป

3.4.3 การเตรียมระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จะต้องเตรียมให้ทั้งระบบเป็นสุญญากาศก่อนโดยใช้ปั๊มดูดอากาศ จากนั้นปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในถังเก็บเข้าสู่ระบบในปริมาณที่มากเกินพอให้ซินทิลเลชันค็อกเทลดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณ 6 กรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อซินทิลเลชันค็อกเทล 20 มิลลิลิตร

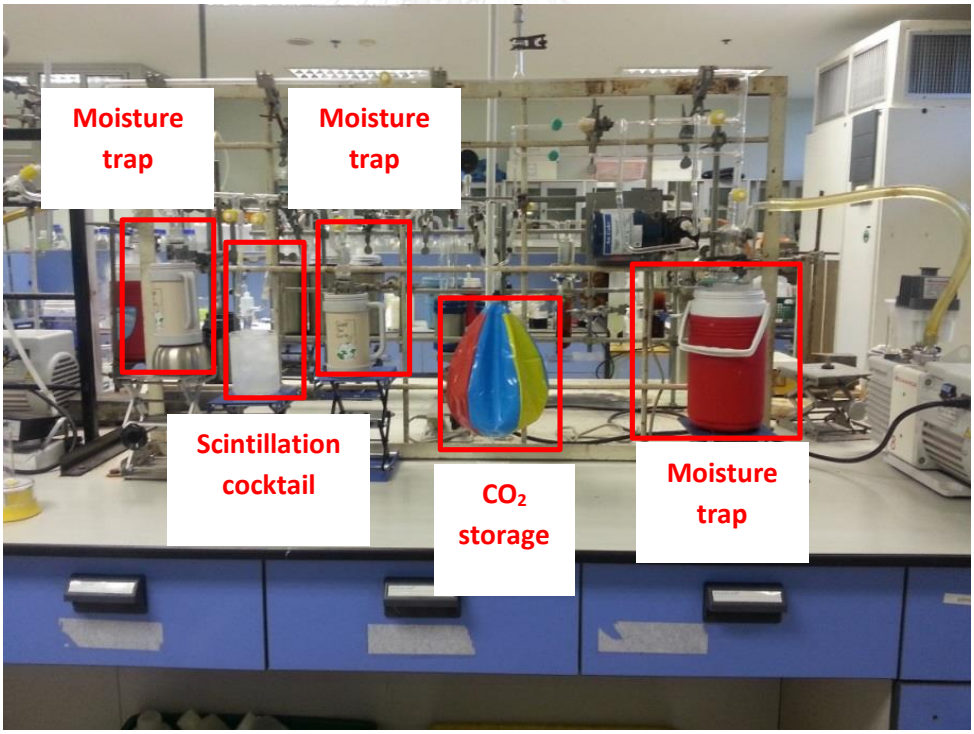
3.4.4 ต่อหลอดแก้วที่บรรจุซินทิลเลชันค็อกเทลเข้าสู่ระบบ และเปิดปั๊มดันอากาศให้คาร์บอนไดออกไซด์ไหลเวียนในระบบ จากนั้นรอให้ซินทิลเลชันค็อกเทลดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จนอิ่มตัวประมาณ 20 นาที นำซินทิลเลชันค็อกเทลถ่ายใส่ขวดแก้วที่จะใช้ในเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลว โดยซินทิลเลชันค็อกเทลที่ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จนอิ่มตัวมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด



รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซิลทิลเลชั่นคอกเทล



รูปที่ 3.13 ระบบเก็บแก๊สและทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์



รูปที่ 3.14 ระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

3.6 การวัดคาร์บอน-14 ในตัวอย่าง

การนับวัดรังสีจะวัดการเรืองแสงในซินทิลเลชันค็อกเทล โดยใช้เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลวของ PerkinElmer รุ่น Tri-Carb 3110 TR การวัดแต่ละตัวอย่างจะตั้งเวลาให้วัด 50 นาที เป็นจำนวน 20 รอบ รวมเวลาทั้งหมดของการวัด 1 ตัวอย่างเท่ากับ 1000 นาที เปิด window อยู่ในช่วง 100-440 ค่านับวัดของเครื่องจะเป็นหน่วย CPM ประสิทธิภาพในการวัด (Efficiency) ของเครื่องประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณจากสูตร

$$\text{Efficiency} = \text{CPM}/\text{DPM}$$

Efficiency = ประสิทธิภาพในการวัด

CPM = Count per minute

DPM = Disintegration per minute

ในการวัดตัวอย่างแต่ละรอบจะใส่สารมาตรฐาน และแบคกราวน์เข้าไปวัดด้วย เพื่อจะนำข้อมูลไปใช้คำนวนค่าโมเดิร์นคาร์บอนของตัวอย่างที่อยู่ในชุดเดียวกัน และนำค่านับวัดที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและใช้เป็นตัวแทนของแต่ละตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.15 เครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงของ PerkinElmer รุ่น Tri-Carb 3110 TR

3.7 การแก้ไอโซโทปของคาร์บอน

ค่าความแรงรังสีที่ได้จากการวัดจะเป็นการวัดจากปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตัวอย่าง ซึ่งในการหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน จะใช้คาร์บอนได้จากสิ่งมีชีวิตเท่านั้น จึงต้องนำไปคำนวณแก้ค่าคาร์บอนของคาร์บอนเนต (δ13) ซึ่งเป็นสัดส่วนของไอโซโทปเสถียร C-13/C-12 ในทุกๆตัวอย่าง ก่อนที่จะนำไปคำนวณค่าโมเดิร์นคาร์บอน โดยค่าที่นำมาใช้นั้นจะเป็นค่าตามมาตรฐานของ VPBD คือ -25 per mil [14] สำหรับตัวอย่างพืช โดยสูตรทั่วไปในการหาค่า δ13 คือ

$$\delta 13\ (‰) = \left(\frac{\left(\frac{C-13}{C-12}\right)\text{sample}}{\left(\frac{C-13}{C-12}\right)\text{standard}} - 1 \right) \times 1000 \qquad [15]$$

$\left(\frac{C-13}{C-12}\right)\text{sample}$ คือ สัดส่วนไอโซโทปเสถียรของตัวอย่าง

$\left(\frac{C-13}{C-12}\right)\text{standard}$ คือ สัดส่วนไอโซโทปเสถียรของสารมาตรฐาน

เมื่อได้ค่า δ13 จะต้องนำไปแทนในสูตรที่ใช้คำนวณหาค่าความแรงรังสีของตัวอย่าง จากสูตร

$$A_{sn} = A_s \times (1 - 2(25 + \delta 13)/1000) \qquad [14]$$

A_s คือ ค่าความแรงรังสีที่วัดได้จริง (The measured sample activity)

A_{sn} คือ ความแรงรังสีของคาร์บอน-14 ในตัวอย่าง (The normalized sample activity)

δ13 คือ ค่าไอโซโทปเสถียร

ค่า A_{sn} ที่ได้จะเป็นค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณหาร้อยละโมเดิร์นคาร์บอน ซึ่งเป็นค่าที่นำไปใช้อ้างอิงกับค่าความแรงรังสีของสารมาตรฐาน เพื่อคำนวณออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ในธรรมชาติ (%Nat)

3.8 การคำนวณปริมาณร้อยละโมเดิร์นคาร์บอนในสารประกอบอินทรีย์

สารมาตรฐานที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำตาลอ้อย ซึ่งเป็น secondary standard ที่เทียบค่าความแรงรังสีมาจาก primary standard Oxalic acid ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารมาตรฐานของคาร์บอน-14 ที่มีความแรงรังสีเท่ากับในธรรมชาติก่อนปี 1950 ในการคำนวณหาค่าโมเดิร์นคาร์บอนจะต้องคำนวณหาค่าความแรงรังสีของตัวอย่าง และสารมาตรฐานก่อน จากนั้นสามารถหาค่าโมเดิร์นคาร์บอน ดังสมการ

$$pMC = (A_{sn}/A_{on}) \times 100 \qquad [15]$$

pMC = ร้อยละโมเดิร์นคาร์บอน

A_{sn} = ค่าความแรงรังสีของคาร์บอน-14 ในตัวอย่าง

A_{on} = ค่าความแรงรังสีของคาร์บอน-14 ในสารมาตรฐาน

3.9 การคำนวณปริมาณสารชีวมวล

ปริมาณสารชีวมวลเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณวัตถุดิบที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต ซึ่งในงานวิจัยนี้หมายถึงปริมาณของวัตถุดิบทางการเกษตรที่นำมาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพ สมมติฐานของปริมาณสารชีวมวล คือ วัตถุดิบที่ผลิตขึ้นมาจากสิ่งมีชีวิต ได้แก่พืช หรือ สิ่งที่ปลูกทดแทนได้ใหม่จะต้องมีปริมาณสารชีวมวลเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ การคำนวณหาปริมาณสารชีวมวลจะใช้การเปรียบเทียบจากปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของตัวอย่างพลาสติกกับปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของพืชที่นำมาใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพ

$$\text{ปริมาณสารชีวมวล}(\%) = (pMC_{sample} / pMC_{nat}) \times 100$$

pMC_{sample} คือ ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของตัวอย่าง

pMC_{nat} คือ ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของพืช

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง

จากการทดลองนำตัวอย่างพลาสติกชนิดต่าง ๆ มาสันดาปด้วยออกซิเจนความดันสูง โดยเริ่มต้นชั่งตัวอย่างพลาสติกมาในปริมาณที่เท่ากัน จากนั้นนำมาสันดาปด้วยออกซิเจนเพื่อสังเกตคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากพลาสติกแต่ละประเภท และการเผาไหม้ของพลาสติก พบว่า พลาสติกแต่ละประเภทเมื่อสันดาปในน้ำหนักที่เท่ากันให้คาร์บอนไดออกไซด์ต่างกัน และพลาสติกบางชนิดพบสิ่งที่เหลืออยู่จากการสันดาป ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสันดาปและสิ่งที่เหลืออยู่จากการสันดาป

ประเภท	ตัวอย่าง	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)	คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ (กรัม)	สิ่งที่เหลืออยู่หลังการสันดาป
เม็ดพลาสติกชีวภาพ	PLA	10	16.7	-
	PBS1	10	18.9	-
	PBS2	10	16.2	-
	Bio-TPE	10	17.2	-
เม็ดพลาสติกปิโตรเลียม	PBAT	10	10.5	-
	PP	10	8.8	√
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศ	BP1	10	9.2	√
	BP2	10	11.5	-
	BP3	10	11.8	-
	BP4	10	9.7	√
	BP5	10	8.1	√
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากหน่วยงานวิจัย	BPX1	10	20.3	-
	BPX2	10	16.7	-
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศ	BPA	10	19.1	-
	BPB	10	17.4	-

√ แสดงถึงตัวอย่างมีสิ่งที่เหลือจากการสันดาป

รูปที่ 4.1 สิ่งที่เหลืออยู่ในกระบอกตัวอย่างหลังการเผาไหม้ของพลาสติก

รูปที่ 4.2 สิ่งที่เหลืออยู่หลังการเผาไหม้ของพลาสติก

4.2 การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบชีวมวล

การศึกษาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในวัตถุดิบชีวมวลจะใช้ตัวอย่างที่เป็นวัตถุดิบทางการเกษตรมาวิเคราะห์ โดยนำพืชชนิดที่นิยมนำมาผลิตพลาสติกชีวภาพสองชนิด คือ อ้อย และมันสำปะหลัง ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนที่ได้จากทั้งสองตัวอย่างเป็นปริมาณโมเดิร์นตามสมมติฐานที่เทียบเท่ากับในธรรมชาติ ค่าโมเดิร์นคาร์บอนจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 112 จึงเลือกกำหนดให้ค่ามากที่สุดเป็นตัวแทนสารที่มีปริมาณสารชีวมวลเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นจะใช้ค่าโมเดิร์นคาร์บอนของน้ำตาลอ้อยเปรียบเทียบกับค่าโมเดิร์นคาร์บอนของตัวอย่างแต่ละกลุ่ม เพื่อหาความสัมพันธ์เป็นร้อยละโมเดิร์นคาร์บอนที่มีอยู่ในธรรมชาติ

วิธีการคำนวณปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน

ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของอ้อย $= (A_{sn}/A_{on}) \times 100$

$$= \frac{\mathbf{6.8675 \pm 0.08}}{\mathbf{6.1240 \pm 0.09}} \times 100$$

$$= 112.1472 \pm 2.18\ \%$$

ตารางที่ 4.2 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบชีวมวล

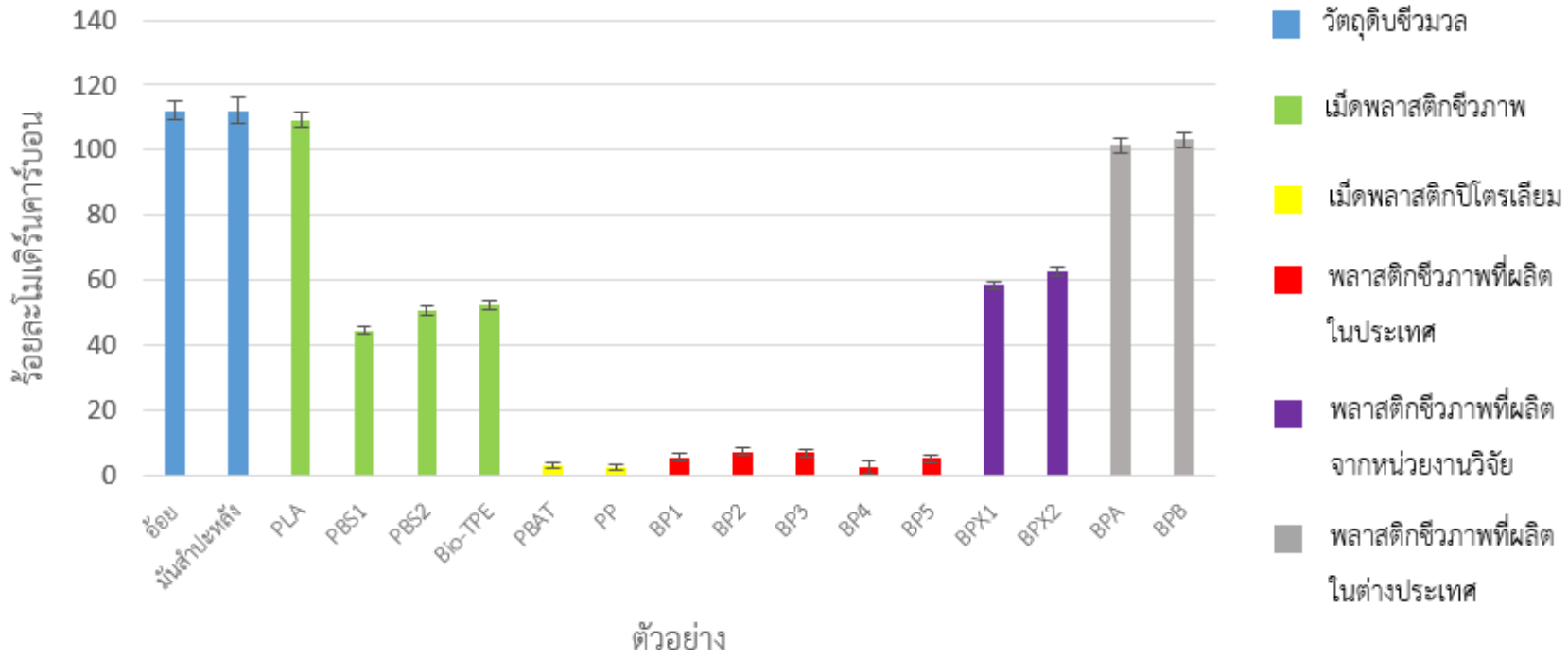
ชนิดของวัตถุดิบชีวมวล	**ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน (%)**	**ปริมาณชีวมวล (%)**
อ้อย	112.15 ± 2.18	100.00 ± 2.75
มันสำปะหลัง	112.05 ± 2.49	99.91 ± 4.03

4.3 การหาปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในตัวอย่างพลาสติกชีวภาพ

ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4.3 และแผนภาพเปรียบเทียบรูปที่ 4.3 จะพบว่า พลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิดมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนประมาณร้อยละ 109 ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบจากธรรมชาติมากที่สุด ส่วนพอลิบิวทีลีนซัคซิเนท ชนิดที่ 1, 2 และยางเทอร์โมพลาสติกมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 40-50 ในขณะที่พลาสติกชนิดพอลิบิวทีลีน อะดิเพทโคเทอเรพธาเรทกับพอลิพอพิลีนมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-3 ส่วนผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตเพื่อการค้าในประเทศไทยทั้ง 5 ตัวอย่าง ไม่มีตัวอย่างใดมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนเกินร้อยละ 10 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศทั้งสองตัวอย่างมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 100 และผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากหน่วยงานวิจัยในประเทศ 2 ตัวอย่างมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนอยู่ที่ร้อยละ 58 และ 62

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนในตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ

ประเภท	**ตัวอย่าง**	**ร้อยละโมเดิร์นคาร์บอน** $(A_{sn}/A_{on}) \times 100$
เม็ดพลาสติกชีวภาพ	PLA	109.19 ± 2.37
	PBS1	44.41 ± 1.34
	PBS2	50.71 ± 1.36
	Bio-TPE	52.19 ± 1.21
เม็ดพลาสติกปิโตรเลียม	PBAT	2.74 ± 0.98
	PP	2.14 ± 0.92
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศ	BP1	5.36 ± 1.15
	BP2	7.06 ± 1.24
	BP3	6.85 ± 1.12
	BP4	3.29 ± 1.79
	BP5	5.10 ± 1.07
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากหน่วยงานวิจัย	BPX1	58.28 ± 1.29
	BPX2	62.45 ± 1.48
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศ	BPA	101.41 ± 2.43
	BPB	103.11 ± 2.12



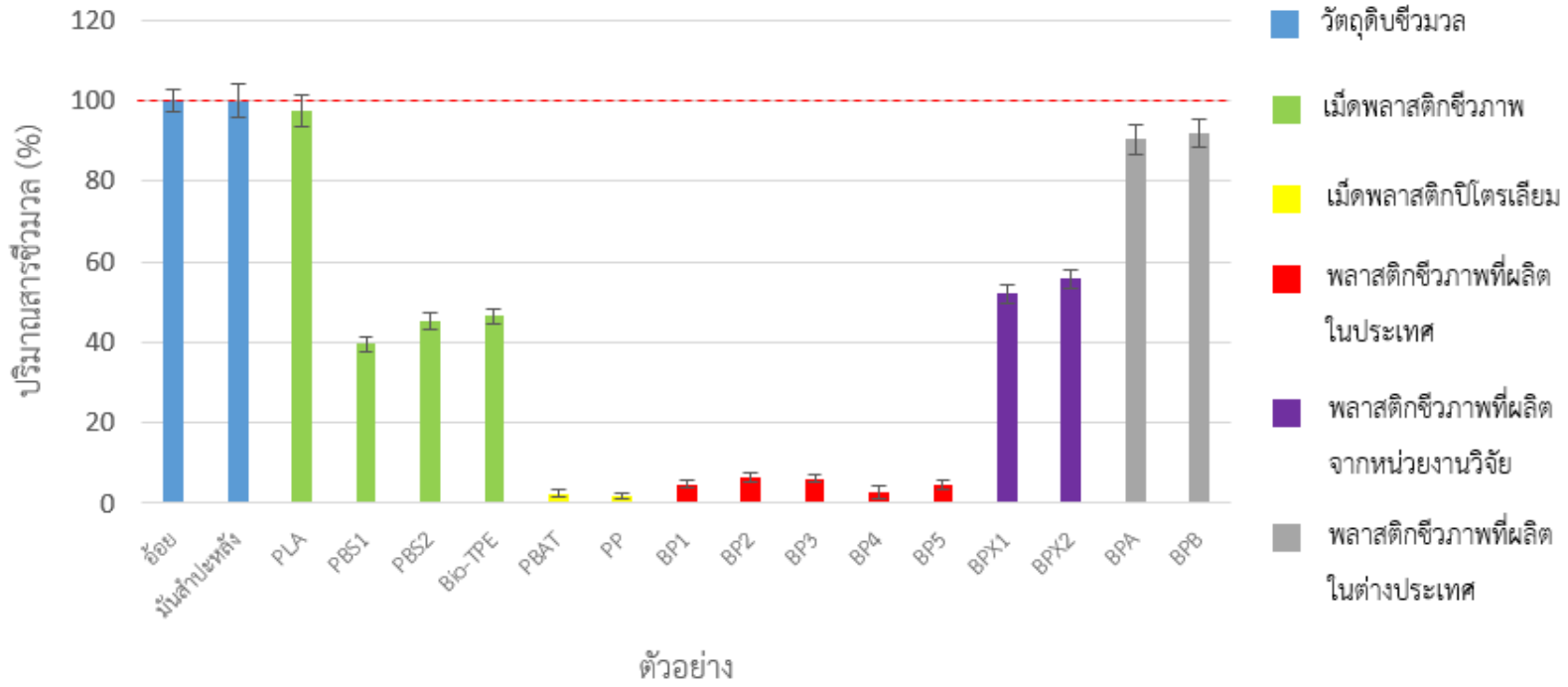
รูปที่ 4.3 แผนภาพเปรียบเทียบปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของกลุ่มตัวอย่าง

4.4 การหาปริมาณสารชีวมวลในตัวอย่างพลาสติกชีวภาพ

จากการคำนวณปริมาณสารชีวมวลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และแผนภาพเปรียบเทียบรูปที่ 4.4 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพชนิดเดียวที่สุ่มมาทดลองแล้ว มีปริมาณชีวมวลสูงถึงร้อยละ 97 ส่วนพอลิบิวทีลีนซัคซิเนททั้งสองชนิดกับยางเทอร์โมพลาสติกมีปริมาณชีวมวลถึงร้อยละ 50 และพลาสติกชนิดพอลิบิวทีลีนอะดิเพทโคเทอเรพธาเรทกับพอลิพอพิลีนมีปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 1-3 ส่วนผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศไทยทั้ง 5 ตัวอย่าง มีปริมาณสารชีวมวลต่ำมากอยู่ในช่วงร้อยละ 2- 7 ในขณะที่ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศทั้ง 2 ตัวอย่างมีปริมาณสารชีวมวลมากกว่าร้อยละ 90 และผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากหน่วยงานวิจัยในประเทศ 2 ตัวอย่างมีปริมาณสารชีวมวลอยู่ที่ร้อยละ 52 และ 56

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารชีวมวลในตัวอย่างพลาสติกชนิดต่างๆ

ประเภท	**ตัวอย่าง**	**ปริมาณสารชีวมวล (%)** $(pMC_{sample} / pMC_{nat}) \times 100$
เม็ดพลาสติกชีวภาพ	PLA	97.36 ± 3.90
	PBS1	39.60 ± 1.79
	PBS2	45.22 ± 1.95
	Bio-TPE	46.53 ± 1.90
เม็ดพลาสติกปิโตรเลียม	PBAT	2.44 ± 0.88
	PP	1.91 ± 0.82
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศ	BP1	4.78 ± 1.04
	BP2	6.30 ± 1.13
	BP3	6.11 ± 1.02
	BP4	2.93 ± 1.60
	BP5	4.55 ± 0.97
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากหน่วยงานวิจัย	BPX1	51.96 ± 2.21
	BPX2	55.68 ± 2.39
พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศ	BPA	90.42 ± 3.74
	BPB	91.93 ± 3.62



รูปที่ 4.4แผนภาพเปรียบเทียบปริมาณสารชีวมวลของกลุ่มตัวอย่าง

4.5 การหาค่าความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์

จากการทดลองสามารถหาค่าความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ได้โดยการนำตัวอย่างพลาสติกชีวภาพที่ทราบปริมาณส่วนผสมของพืช ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าของพลาสติกชีวภาพตัวอย่าง BPA และ BPB มาคำนวณหาปริมาณชีวมวลได้ค่าเท่ากับ 90.42 และ 91.93 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน (Error) ในการวัดประมาณ 8.8 เปอร์เซ็นต์ โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ระบุบนฉลากผลิตภัณฑ์ที่ระบุว่าพลาสติกผลิตมาจากพืช 100 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.5 ฉลากบนผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ระบุปริมาณ 100% plant-based

บทที่ 5
สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้สุ่มเลือกตัวอย่างหลากหลายประเภทเพื่อทดสอบวิธีวิเคราะห์ว่าสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณคาร์บอน-14 ในปริมาณต่างกัน และสามารถวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่มีคุณสมบัติหรือรูปแบบของพลาสติกต่าง ๆ กันได้หรือไม่ จากผลการทดลอง พบว่าวิธีวิเคราะห์ด้วยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยซินทิลเลชันคอกเทลสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นพลาสติกที่อยู่ในรูปแบบของเม็ดพลาสติก หรือรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว ก็สามารถใช้วิธีทดสอบนี้ได้ ซึ่งตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สุ่มมาใช้ในการทดลอง มีทั้งถุงพลาสติกที่มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกบาง ๆ ขาดง่าย กล่องพลาสติกที่มีลักษณะแข็งปานกลางและเหนียว และขวดน้ำกับแก้วน้ำพลาสติกที่มีลักษณะแข็งและหนา ตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกันนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เช่นเดียวกัน แตกต่างกันที่การเตรียมตัวอย่างให้สามารถนำไปสันดาปได้ยากง่ายต่างกัน เพราะต้องนำพลาสติกที่จะนำมาทดสอบนั้นมาทำให้เป็นชิ้นเล็กพอที่จะใส่ลงในกระบอกตัวอย่าง และนำไปอบไล่ความชื้นก่อนนำมาสันดาป เพื่อให้พลาสติกสามารถเผาไหม้ได้ดี ถ้าพลาสติกมีความชื้นมากจะทำให้ลวดนำไฟฟ้าไม่ร้อนจะทำให้ไม่เกิดการเผาไหม้ ส่วนปริมาณพลาสติกชีวภาพที่จะนำมาใช้อาจมากน้อยต่างกันเนื่องจากส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติก และชนิดของพลาสติก ซึ่งถ้าในพลาสติกนั้นมีการผสมส่วนประกอบที่มาจากสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบน้อย คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ก็จะน้อย เพราะไม่มีคาร์บอนให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ ในส่วนของชนิดพลาสติกก็ส่งผลกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้หลังจากการสันดาป อย่างเช่น พลาสติกที่มีสารซัลเฟอร์เจือปน ซึ่งสารนี้ก็จะทำให้เกิดสารประกอบซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้

5.2 การเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่าง

ในขั้นตอนการเตรียมคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวอย่างพลาสติก พบว่าน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตัวอย่างหลังจากสันดาปมีปริมาณมากน้อยไม่เท่ากัน เมื่อชั่งปริมาณตัวอย่างเริ่มต้นเท่ากัน โดยตัวอย่างพลาสติกที่เผาไหม้หมดจนไม่มีเหลือในกระบอกตัวอย่าง จะได้คาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากกว่าตัวอย่างพลาสติกที่ผ่านการสันดาปแล้ว มีสิ่งที่เหลืออยู่ในกระบอกตัวอย่าง จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าพลาสติกชีวภาพ หรือพลาสติกที่มีปริมาณสารชีวมวลมาก จะเป็นพลาสติกที่เผาไหม้หมด และได้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่างในปริมาณที่สูงกว่าพลาสติกปิโตรเลียม หรือพลาสติกที่มีปริมาณสารชีวมวลต่ำ เนื่องจากว่าพลาสติกปิโตรเลียม หรือพลาสติกที่มีสารชีวมวลต่ำมีส่วนผสมที่เจือจนด้วยสารชนิดอื่นต่อกรัมของตัวอย่างมากกว่า ส่วนปริมาณตัวอย่างที่ทดลองสันดาปในพลาสติกทั้ง 5 กลุ่ม พบว่าน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ประมาณ 10 กรัมต่อตัวอย่าง จะทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 8-20 กรัม ซึ่งมากพอสำหรับใช้ในขั้นตอนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการดูดซับในซินทิลเลชันค็อกเทลประมาณ 3 กรัมต่อซินทิลทิลเลชันค็อกเทล 20 กรัม โดยกลุ่มตัวอย่างที่สันดาปแล้วได้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมมากที่สุดคือ เม็ดพลาสติกชีวภาพ พลาสติกชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากหน่วยงานวิจัยในประเทศ และพลาสติกชีวภาพที่ผลิตในต่างประเทศ ส่วนกลุ่มตัวอย่างที่สันดาปได้คาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมต่ำ คือ เม็ดพลาสติกปิโตรเลียม และพลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศไทย ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้แตกต่างกันไปตามชนิดของผลิตภัณฑ์พลาสติกขึ้นอยู่ปัจจัยหลายประการเช่น น้ำหนักของตัวอย่าง การเผาไหม้ของตัวอย่าง และการหายไประหว่างระบบเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ถังเก็บ ดังนั้น การคำนวณน้ำหนักของตัวอย่างในตอนเริ่มต้นจึงมีความสำคัญกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

5.3 ระบบทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ และการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในขั้นตอนการทำให้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์เป็นขั้นตอนที่ต้องกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มากับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากการสันดาป สิ่งที่อาจเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เช่น NO_x SO_x CO สารประกอบเฮไลด์ (halide) และไอกรด รวมถึงแก๊สที่ไม่ใช่คาร์บอนไดอออกไซด์ คือ N_2 และ O_2 ซึ่งการเกิดปฏิกิริยากับสารที่ทำให้บริสุทธิ์ทั้ง 3 ชนิดสามารถสังเกตได้ โดยการเกิดปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไนเตรท ในตอนแรกเป็นสารละลายสีใสจะเกิดเป็นตะกอนสีขาวขุ่น การเกิดปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมท จะพบว่าในตอนแรกสารละลายเป็นสีน้ำตาลเข้มอมเหลือง เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะทำให้เกิดสารละลายเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลอมเขียว ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาในหลอดของโพแทสซียมไอไอไดด์จะไม่เห็นชัดมากนัก แต่ทุกหลอดที่เกิดปฏิกิริยาจะให้ความร้อนออกมา เมื่อจับที่หลอดจะร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสารที่ปนเปื้อนอยู่ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยเข้าสู่ระบบ จากการทดลองพบว่าพลาสติกชีวภาพไม่ค่อยมีการเกิดปฏิกิริยากับสารที่ใช้ในการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งต่างจากพลาสติกปิโตรเลียมและพลาสติกที่มีปริมาณสารชีวมวลต่ำ จะเกิดปฏิกิริยากับสารทั้ง 3 ชนิด ทำให้เปลี่ยนสีและเกิดความร้อนในระบบสูงมาก จากการทดลองพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากพลาสติกปิโตรเลียมมีการปนเปื้อนของสารหรือแก๊สชนิดอื่นมากกว่าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยากับสารที่ทำให้บริสุทธิ์มากกว่าพลาสติกชีวภาพ

รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงของสารที่ทำให้บริสุทธิ์

5.4 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอน

ค่าที่ได้จากการวัดตัวอย่างในรูปคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสงในของเหลวค่าได้จากเครื่องจะเป็นค่านับว่าในหน่วย Count per minute (CPM) เมื่อนำค่า CPM มาคำนวณค่าความแรงรังสีของตัวอย่างเปรียบเทียบกับค่าความแรงรังสีของสารมาตรฐานแล้ว พบว่าปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนจากพืช คือ อ้อยและมันสำปะหลัง วัดปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนได้ประมาณร้อยละ 112 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าโมเดิร์นคาร์บอนจากการทดลองของ Molnar [7] ที่ค่าโมเดิร์นคาร์บอนของตัวอย่างในสิ่งแวดล้อมประมาณร้อยละ 112-116 และใกล้เคียงรายงานของ Society of the Plastics Industry Bioplastics Council [10] ที่ระบุไว้ว่าปริมาณสารชีวมวล 100 % จะเท่ากับร้อยละโมเดิร์นคาร์บอน 107.5 จากการทดลองนี้จะได้ว่า ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนของวัตถุดิบชีวมวลที่ได้จากวิธีวิเคราะห์นี้คือร้อยละ 112 ซึ่งเป็นปริมาณสารชีวมวลที่เท่ากับในธรรมชาติ โดยจะนำค่าโมเดิร์นคาร์บอนที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบหาปริมาณสารชีวมวลในตัวอย่างได้ เนื่องจากปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณสารชีวมวล

ตารางที่ 5.1 ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนจากการทดลองของ Molnar

Sample	A ^{14}C, pMC	Description
S-7	112.6 ± 2.2	Environmental sample
S-8	116.4 ± 2.2	Environmental sample

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.5 ปริมาณชีวมวลในตัวอย่าง

ปริมาณโมเดิร์นคาร์บอนที่มีอยู่ในพลาสติก สามารถคำนวณเป็นปริมาณสารชีวมวลได้ ผลการทดลองพบว่า พอลิแลคติก แอซิดน่าจะเป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรทั้งหมด ไม่มีการผสมพลาสติกสังเคราะห์ เป็นพลาสติกชีวภาพที่เชื่อถือได้ว่าผลิตมาจากวัตถุดิบจากธรรมชาติ 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิบิวทีลีน ซัคซิเนทและยางเทอร์โมพลาสติก พบปริมาณสารชีวมวล ไม่เกินร้อยละ 50 ทำให้ทราบว่ามีการผสมพลาสติกสังเคราะห์ในพลาสติกชีวภาพปริมาณเกินครึ่งหนึ่งของพลาสติก ส่วนพลาสติกชนิดพอลิบิวทีลีน อะดิเพทโคเทอเรพธาเรทกับพลาสติกชนิดพอลิพอพิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์จากปิโตรเลียมทำให้ปริมาณโมเดิร์นที่วัดได้น้อยมาก ซึ่งค่าที่วัดได้เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าแบคกราวน์ จากผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในประเทศไทยที่

ทดลองสุ่มมาทั้ง 5 ตัวอย่างพบว่าแต่ละตัวอย่างมีปริมาณสารชีวมวล ไม่ถึงร้อยละ 10 ของพลาสติก ทำให้ทราบว่าในผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นำมาเป็นตัวอย่างนั้นมีการผสมพลาสติกชีวภาพน้อยมาก เมื่อเทียบกับพลาสติกชีวภาพที่ผลิตขึ้นโดยหน่วยงานวิจัยให้ผลที่ต่างออกไป ซึ่งการผลิตพลาสติกชีวภาพนั้นจะมีการผสมขึ้นตามสูตรการผลิตที่ศึกษา โดยวัดปริมาณสารชีวมวลได้ร้อยละ 52 และ 56 ส่วนผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผ่านการรับรองว่าเป็นพลาสติกชีวภาพในต่างประเทศที่มีการผสมวัตถุดิบจากธรรมชาติมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งจากการทดสอบนี้สามารถบอกได้ว่า พลาสติกชีวภาพที่ผลิตในประเทศไทยนั้นยังมีการผสมวัตถุดิบจากธรรมชาติในสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพลาสติกชีวภาพในต่างประเทศ

5.6 ความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์

5.6.1 การวัดตัวอย่างที่ทราบส่วนผสมเป็นวิธีที่ใช้ยืนยันการวิเคราะห์ว่ามีความถูกต้องหรือไม่ มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริงไปมากน้อยเพียงใด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเอาตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพของต่างประเทศเป็นตัวอย่างที่ใช้ยืนยันวิธีวิเคราะห์ เนื่องจากทราบปริมาณส่วนผสมที่มาจากพืชบนฉลากผลิตภัณฑ์ จากการทดลองพบว่าค่าที่วัดได้จากตัวอย่าง BPA และ BPB มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ระบุไว้บนฉลากประมาณ 8.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับการทดลองของ Noakes [6] และ น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM [3] ที่ระบุค่าไว้เท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ทราบว่าวิธีวิเคราะห์นี้เป็นวิธีที่ให้ค่าการวิเคราะห์ที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM แต่ข้อดีคือ เป็นวิธีวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ในเวลาไม่นาน จึงสามารถทำได้ในงานที่มีตัวอย่างหลายชนิด และที่สำคัญค่าใช้จ่ายถูกกว่าวิธีอื่น

5.6.2 นอกจากการยืนยันด้วยฉลากผลิตภัณฑ์แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้รับการยืนยันจากเจ้าของสูตรของผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่ผลิตขึ้นโดยหน่วยงานวิจัย โดยได้รับการยืนยันจากตัวอย่างซองพลาสติก (BPX1) ว่าปริมาณสารชีวมวลที่ใช้อยู่ในช่วงค่า 51.96 ± 2.21 เปอร์เซ็นต์

5.7 ข้อเสนอแนะ

ควรแยกกลุ่มตัวอย่างพลาสติกชีวภาพกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้สามารถวิเคราะห์ผลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. อุตสาหกรรมไบโอพลาสติก. 2014; Available from: http://www.nesdb.go.th/ portals/0/tasks/dev_ability /Profile/industry/อุตสาหกรรมไบโอพลาสติก.pdf.
2. *BioPreferred Program Product Categories* 2014; Available from: http://www.bio preferred.gov/files/BioPreferred%20Product%20Categories%20June%202013.pdf.
3. *Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis*. 2008, ASTM International: West Conshohocken, PA.
4. Norton A. G. and D.L. S., *Determining the modern carbon content of biobased products using radiocarbon analysis.* Bioresource Technology, 2006. 97: p. 2084-2090
5. Norton A. G., Hood G. D., and D.L. S., *Accuracy of radioanalytical procedures used to determine the biobased content of manufactured products.* Bioresource Technology 2007. 98: p. 1052-1056.
6. Noakes J., et al., *A comparison of analytical methods for the certification of biobased product.* The Arizona Board of Regents on behalf of the University of Arizona, 2006: p. 259-271.
7. Molnar M., *Refining the CO2 absorption method for low-level 14C liquid scintillation counting in the ATOMKI.* The Arizona Board of Regents on behalf of the University of Arizona, 2006: p. 407-415.
8. *BIODEGRADABLE PLASTIC* เมื่อพลาสติกเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. Available from: http://vcharkarn.com/varticle/38208.
9. พูนศักดิ์ สักกทัตติยกุล., พลาสติกชีวภาพ (*bioplastic)*. 2551; Available from: http://www.thaigoodview.com/node/17034.
10. Society of the Plastics Industry Bioplastics Council., *UNDERSTANDING BIOBASED CARBON CONTENT*. 2012.
11. *Principles and Applications of Liquid Scintillation Counting*. 2004.

12. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติองค์การมหาชน, นวัตกรรมพลาสติกชีวภาพไทย. 2014, กรุงเทพฯ: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
13. Gupta K. S. and P.A. H., *Radiocarbon Practice at ANU*. 1985, Radiocarbon Laboratory: Research School of Pacific Studies, Australian National University, CANBERRA. p. 28-34.
14. Stuiver M and P. HA., *Discussion: Reporting of 14C Data.* RADIOCARBON, 1977. 13(9): p. 355-363.
15. Oleary H. M., *Carbon Isotope in Photosynthesis.* BioScience, 1988. 38(5): p. 328-336.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับในซิลทิลเลชั่นค็อกเทล

ตัวอย่าง	ปริมาณซิลทิลเลชั่นคอกเทล Carbosorb 1 : 1 Permafluor V (มิลลิลิตร)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ (กรัม)
อ้อย	20	2.6451
มันสำปะหลัง	20	2.7681
PLA	20	2.7653
PBS1	20	2.8209
PBS2	20	3.0120
Bio-TPE	20	3.2548
PBAT	20	2.8846
PP	20	3.2382
BP1	20	2.5829
BP2	20	2.8823
BP3	20	2.8948
BP4	20	2.6319
BP5	20	2.7896
BPA	20	2.8880
BPB	20	2.8113
BPX1	20	2.5829
BPX2	20	2.7896

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก. 2 ค่าความแรงรังสีของคาร์บอน-14 ในตัวอย่าง

ตัวอย่าง	**ค่าความแรงรังสี** A_{sn} (CPM) = A_s x (1 -2(25+ δ13)/1000)
อ้อย	6.8675
มันสำปะหลัง	6.8616
PLA	6.4852
PBS1	3.0121
PBS2	3.0998
Bio-TPE	2.6375
PBAT	0.1628
PP	0.1273
BP1	0.3283
BP2	0.4326
BP3	0.4193
BP4	0.2015
BP5	0.2787
BPA	6.2101
BPB	6.3141
BPX1	3.9300
BPX2	4.2112

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฐมาพร พลอยกระโทก เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน 2531 ณ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาระดับปริญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำเร็จการศึกษาปี 2552 ประสบการณ์ทำงานในปี 2553-2555 ได้เข้าทำงานที่บริษัท โรงงานเภสัชกรรม เจเอสพี (ประเทศไทย) จำกัด ตำแหน่งผู้ควบคุมการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University