การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยเครื่องมือการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ความไม่แน่นอน

นางสาววีณา ชุติมานิตสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF MALEIC ANHYDRIDE PRODUCTION PROCESS BY LIFE CYCLE ASSESSMENT TOOL UNDER UNCERTAINTY

Miss Weena Chutimanitskul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยเครื่องมือการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ความไม่แน่นอน
โดย	นางสาววีณา ชุติมานิตสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.สุรเทพ เชียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.สุรเทพ เชียวหอม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วีณา ชุติมานิตสกุล : การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยเครื่องมือการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ความไม่แน่นอน. (DEVELOPMENT OF MALEIC ANHYDRIDE PRODUCTION PROCESS BY LIFE CYCLE ASSESSMENT TOOL UNDER UNCERTAINTY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ. ดร.สุรเทพ เชียวหอม, 113 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน คือ นอร์มอล-บิวเทน นอร์มอล-เพนเทน และโพรเพน โดยการจำลองกระบวนการผลิตด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยประยุกต์ใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ (cradle-to-gate) ด้วยดัชนีชี้วัด IMPACT 2002+ ในโปรแกรม SimaPro พร้อมทั้งทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลและการดำเนินการในกระบวนการผลิต รวมถึงศึกษาการทำข่ายงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิต ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าในการผลิตโดยใช้นอร์มอล-บิวเทนเป็นวัตถุดิบจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดทั้งในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อพิจารณาแบบขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบกับขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร่วมกัน (cradle-to-gate) การผลิตโดยใช้นอร์มอล-บิวเทนเป็นวัตถุดิบมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการผลิตโดยใช้นอร์มอล-เพนเทนเป็นวัตถุดิบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 การผลิตโดยใช้โพรเพนเป็นวัตถุดิบส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทั้งในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ส่วนการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบของกระบวนการผลิตโดยใช้นอร์มอล-บิวเทน โพรเพน และนอร์มอล-เพนเทนเป็นวัตถุดิบลงร้อยละ 5.45 12.62 และ 23.72 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต วีณา ชุติมานิตสกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา 2552	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

4970579521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MALEIC ANHYDRIDE / HYSYS SIMULATION / LIFE CYCLE ASSESSMENT / ENVIRONMENTAL IMPACTS / IMPACT 2002+

WEENA CHUTIMANITSKUL : DEVELOPMENT OF MALEIC ANHYDRIDE PRODUCTION PROCESS BY LIFE CYCLE ASSESSMENT TOOL UNDER UNCERTAINTY. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAIRIT SATAYAPRASERT, Dr.Ing., THESIS CO-ADVISOR : SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 113 pp.

This research study on maleic anhydride production processes by using different raw materials, which are n-butane, n-pentane and propane. Process simulation is performed using commercial software. In order to study in environmental impacts, life cycle assessment is applied to evaluate environmental impacts of maleic anhydride production processes. Environmental impacts are evaluated according to cradle-to-gate approach by IMPACT 2002+ in SimaPro and assessed under uncertainty of data and operation of process. Moreover, heat exchanger network is applied in order to improve the production process. The result shows that the n-butane route is more environmentally favorable than n-pentane and propane route both in the raw material production phase and in the maleic anhydride production phase. In cradle-to-gate framework, the n-butane route has environmental impacts lower than of that the n-pentane route at 100% confidence level. The propane route has the highest environmental impacts both in the raw material production phase and in the maleic anhydride production phase. Heat exchanger network can decrease environmental impacts in the raw material production phase about 5.45, 12.62 and 23.72% for n-butane, propane and n-pentane route, respectively.

Department : Chemical Engineering Student's Signature Weena Chutimanitskul

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2009 Co-Advisor's Signature Soorathep Kheawhom

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางในการทำงานวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดียิ่ง

และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร (กรรมการ) และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์และตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ท้ายที่สุด ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณครอบครัว และเพื่อนทุกท่านที่คอยช่วยเป็นกำลังใจในระหว่างการศึกษา และสนับสนุนผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... 4

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 4

1.6 เนื้อหาในแต่ละบท..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 หลักการและทฤษฎีการประเมินวัฏจักรชีวิต..... 6

2.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์..... 26

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 46

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 52

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์..... 52

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย..... 55

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์..... 56

4.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์..... 56

4.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน..... 75

4.3 การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์..... 79

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 90
5.1 บทสรุป..... 90
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 92
รายการอ้างอิง..... 93
ภาคผนวก..... 99
ภาคผนวก ก. แผนผังการจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์..... 100
ภาคผนวก ข. การคำนวณข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 107
ภาคผนวก ค. ค่า factor สำหรับวิธี IMPACT 2002+..... 112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 113

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คำจำกัดความย่อของ LCA ในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14000	9
2.2	เครื่องมือสำหรับจัดการและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	10
2.3	โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการศึกษา LCA ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน	16
2.4	เปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต	17
2.5	วิธีการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	19
2.6	สสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบที่ใช้ในวิธี IMPACT 2002+	21
2.7	สารอ้างอิงในแต่ละประเภทผลกระทบที่ใช้ในวิธี IMPACT 2002+	22
2.8	ค่า Equivalency factors	24
2.9	สมบัติทั่วไปของมาเลอิกแอนไฮไดรด์	26
2.10	แนวโน้มความต้องการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์	29
2.11	ค่าเฉลี่ยลักษณะเฉพาะของมาเลอิกแอนไฮไดรด์	33
2.12	เปรียบเทียบเทคโนโลยีของการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	34
2.13	ปริมาณการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ตามชนิดเครื่องปฏิกรณ์	49
4.1	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	58
4.2	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	58
4.3	ปริมาณของเสียที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	59
4.4	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน	76
4.5	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน	76
4.6	ปริมาณของเสียที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน	77
4.7	เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน	80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ หน้า

4.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน..... 84

4.9 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน..... 87

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แผนผังการประเมินวัฏจักรชีวิต	7
2.2	ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต	12
2.3	โครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์	26
2.4	สัดส่วนการใช้ประโยชน์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์	29
2.5	เส้นทางกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	30
2.6	กำลังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	31
2.7	แผนผังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน	35
2.8	กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน	37
2.9	แผนผังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน	39
2.10	กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน	40
2.11	แผนผังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่าโพรเพน	42
2.12	กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน	45
2.13	โครงข่ายปฏิกิริยาที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์	51
3.1	ขอบเขตของระบบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	52
3.2	กรอบการทำงานร่วมกันระหว่างการจำลองกระบวนการผลิตและการประเมินวัฏจักรชีวิต	55
4.1	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์	60
4.2	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศน์	60
4.3	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน	61
4.4	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร	61

ภาพที่ หน้า

4.5 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Gate” เมื่อให้ค่าน้ำหนักของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน..... 63
4.6 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์..... 64
4.7 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศน์..... 64
4.8 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน..... 65
4.9 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร..... 65
4.10 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Gate” เมื่อให้ค่าน้ำหนักของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน..... 67
4.11 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์..... 68
4.12 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศน์..... 68
4.13 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน..... 69
4.14 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร..... 69
4.15 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Gate” เมื่อให้ค่าน้ำหนักของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน..... 71
4.16 ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ..... 72
4.17 ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตสารตั้งต้น..... 72
4.18 ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์..... 73

ภาพที่		หน้า
4.19	ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์แบบ “Cradle-to-Gate”	75
4.20	ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบ “Cradle-to-Gate”	78
4.21	ตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน	80
4.22	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ	81
4.23	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	81
4.24	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนแบบ “Cradle-to-Gate”	82
4.25	ตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน	83
4.26	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ	84
4.27	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์	85
4.28	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทนแบบ “Cradle-to-Gate”	85
4.29	ตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน	86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่		หน้า
4.30	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ.....	88
4.31	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	88
4.32	ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน แบบ “Cradle-to-Gate”.....	89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม โดยใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester Resin, UPR) ซึ่งนำไปใช้ในการผลิตเรซินเส้นใยแก้วเสริมกำลัง (fiber glass-reinforced resin) สำหรับการก่อสร้าง ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ และผลิตภัณฑ์ทางทะเล (marine product) ใช้ในการผลิตยาฆ่าแมลง ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเติมแต่งในอาหาร และใช้เป็นสารโคพอลิเมอร์ (copolymer) ร่วมกับสารปิโตรเคมีตัวอื่น ๆ เช่น สไตรีน เอทิลีน ไวนิวคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งพบว่าแนวโน้มความต้องการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และความต้องการใช้ทั่วโลกเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 6-7 ในปี 2006 [1]

กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีหลายวิธีด้วยกัน เริ่มครั้งแรกในปี 1933 โดย ฮาลคอน เทคโนโลยี (Halcon Technology) โดยการใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้น ในกระบวนการที่เรียกว่าการออกซิเดชันของเบนซีน [2] ในปี 1974 การใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้นถูกแทนที่ด้วยสารตั้งต้นตัวอื่นคือ บิวทีน และนอร์มอล-บิวเทน [2] เนื่องจากนอร์มอล-บิวเทนมีราคาถูกกว่า หาได้ง่ายและมีความเป็นพิษน้อยกว่าเบนซีน

นอกจากนี้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ยังเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในกระบวนการผลิตพทาลิกแอนไฮไดรด์อีกด้วย โดยในปัจจุบันกระบวนการออกซิเดชันของนอร์มอล-บิวเทนถือว่าเป็นกระบวนการผลิตหลักในอุตสาหกรรมการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [3]

ในปัจจุบันมีการศึกษาถึงการนำสารตั้งต้นตัวอื่น ๆ มาใช้ในการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เช่น นอร์มอล-เพนเทน [4-6] โพรเพน [7-9] และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ [10-12] เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของสารตั้งต้นนั้น ๆ โดยพบว่า มีการศึกษาถึงการใช้นอร์มอล-เพนเทนและโพรเพนมากกว่าไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น ๆ เนื่องจากราคาที่ถูกกว่าและหาได้ง่ายกว่าไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวานาเดียมไพโรฟอสเฟต

โดยมีสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในช่วง 350-450 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 1-4 ความดันบรรยากาศ โดยมีสัดส่วนสายป้อนระหว่างไฮโดรคาร์บอนต่อออกซิเจนหรืออากาศแตกต่างกันไปตามชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ คือ น้อยกว่าร้อยละ 2.4 โดยโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบด (fixed beds) ร้อยละ 3.6-5 โดยโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized beds) และ มากกว่าร้อยละ 4 โดยโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดหมุนวน (circulating fluidized beds) เนื่องจากขึ้นกับข้อจำกัดของความสามารถในการเผาไหม้ (flammability limits) [13-14] โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ร้อยละ 80 และค่าการเลือกเกิดร้อยละ 70 [15] ส่วนการออกซิเดชันของนอร์มอล-เพนเทนได้ผลิตภัณฑ์เป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพทาลิกแอนไฮไดรด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมโดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ 90 และค่าการเลือกเกิดที่ 41 และ 22 ตามลำดับ [5] และการออกซิเดชันผ่านโพรเพนได้มาเลอิกแอนไฮไดรด์และกรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมโดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่ 37.4 และมีค่าการเลือกเกิดที่ 53.6 และ 38.9 ตามลำดับ [8] ส่วนผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากทั้งสามกระบวนการผลิตเป็นคาร์บอนออกไซด์ กรดอะคริลิก และสารประกอบหนักเล็กน้อย

เนื่องจากสารพิษที่ปล่อยจากกระบวนการผลิตมีผลต่อสุขภาพมนุษย์และต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง รวมถึงก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ เช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถึงแม้ไม่ใช่สารก่อมะเร็ง แต่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ก็ถูกจัดเป็นสารประเภทกัดกร่อน ดังนั้นมาเลอิกแอนไฮไดรด์จึงอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อการสัมผัสต่าง ๆ ทั้งทางตา ผิวหนัง การหายใจ และการกิน ส่งผลให้เกิดแผลไหม้ได้ในบริเวณที่ถูกสัมผัส และถ้ามีความเข้มข้นมากกว่า 2.5 ส่วนในล้านส่วน ทำให้เกิดการระคายเคืองที่รุนแรงได้ [3] หรือกรดซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่ได้จากกระบวนการผลิต ทำให้เกิดความเป็นกรดในดินและน้ำได้

ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากอุตสาหกรรมเคมีเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง อันก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมตามมา โดยศึกษาถึงการใช้สารตั้งต้นในการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิดคือ นอร์มอล-บิวเทน นอร์มอล-เพนเทน และโพรเพน ในส่วนของกระบวนการผลิตทางผู้วิจัยได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากบทความทางวิชาการและสิทธิบัตรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยการสร้างแบบจำลองด้วยแกรม HYSYS เพื่อรวมรวบข้อมูลมวลสารและพลังงานที่ใช้ในการผลิตสำหรับใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต พร้อมทั้งประเมินวัฏจักรชีวิต

ภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลและกระบวนการผลิต ซึ่งอาจส่งผลต่อข้อมูลของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งประเมินได้ ในขั้นสุดท้ายได้เสนอแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้โครงข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงาน อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิตลงอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาและสร้างกระบวนการเลียนแบบของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านสารตั้งต้นที่ต่างกัน เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ โดยการใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต
2. เพื่อวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของข้อมูลและกระบวนการผลิตร่วมกัน
3. พัฒนาปรบปรุงกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยวิธีกระบวนการนอร์มอล-บิวเทน(nC4) วิธีกระบวนการนอร์มอล-เพนเทน(nC5) และวิธีกระบวนการโพรเพน(C3)
2. ใช้การเลียนแบบกระบวนการผลิตเพื่อศึกษาข้อมูลมวลสารขาเข้า สารขาออกและพลังงานของกระบวนการผลิตโดยใช้โปรแกรม Hyprotech ในการเลียนแบบกระบวนการผลิต
3. ทำการวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยการใช้โปรแกรม SimaPro ด้วยวิธี IMPACT 2002+ ซึ่งเป็นเครื่องมือในการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยประเมินผลกระทบทั้งในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Cradle-to-Gate)
4. ประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอนของข้อมูลและกระบวนการผลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ทำการเสนอวิธีการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Network) เพื่อลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีค่าลดลง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. แนวทางในการพิจารณากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม

2. ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

3. ภายหลังทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อให้ได้ซึ่งกระบวนการผลิตที่ส่งผลกระทบลดลง

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม Hyprotech Version 3.1 เพื่อทำการจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์
3. ศึกษาการใช้โปรแกรม SimaPro เพื่อประเมินวัฏจักรชีวิตในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในเงื่อนไขต่าง ๆ
4. ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่แตกต่างกัน
5. ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตภายใต้ความไม่แน่นอน
6. พัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลง
7. วิเคราะห์ สรุปผลงานวิจัย และจัดทำผลการวิจัย

1.6 เนื้อหาในแต่ละบท

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาสำหรับงานวิจัยนี้ และกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ขอบเขตของงานวิจัยที่ได้ศึกษา วิธีการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยอธิบายถึงหลักการและความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) ขั้นตอนและกรอบการดำเนินงานของ LCA รวมถึงโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต และอธิบายถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro เพื่อเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต นอกจากนี้ยังกล่าวถึงรายละเอียดและสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ การนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ในส่วนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากบทความทางวิชาการที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนการวิจัย และวิธีที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต

บทที่ 4 ในบทนี้จะนำผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตจากโปรแกรม HYSYS มาประเมินวัฏจักรชีวิตโดยพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบไปจนถึงกระบวนการสังเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro ผลจากการประเมินที่ได้จะแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบผลกระทบด้านต่าง ๆ ที่เกิดจากการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ รวมถึงอธิบายและวิเคราะห์ผลที่เกิดจากกระบวนการผลิต พร้อมทั้งทำการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ความไม่แน่นอน สุดท้ายกล่าวถึงผลการประเมินวัฏจักรชีวิตที่ได้หลังจากการพัฒนากระบวนการ โดยการทำโครงข่ายแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 5 จะกล่าวสรุปถึงผลกระทบด้านต่าง ๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ รวมถึงข้อเสนอแนะของการทำงานวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

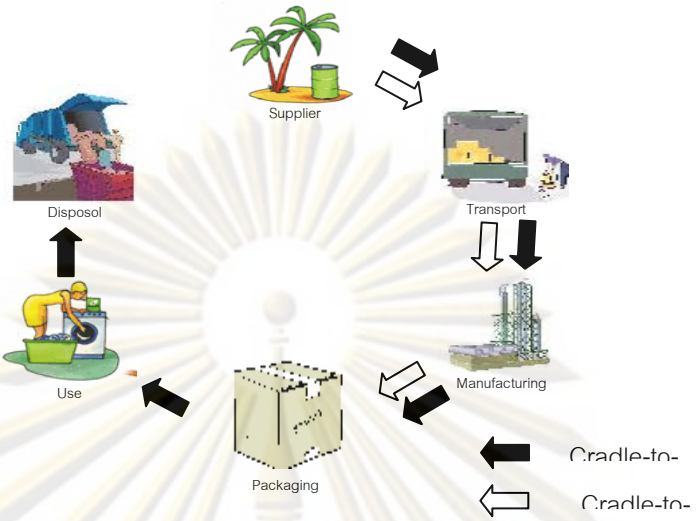
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) ประโยชน์จากการนำการประเมินวัฏจักรชีวิตไปประยุกต์ใช้ ขั้นตอนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิต รวมถึงโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต และอธิบายถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro สำหรับใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต นอกจากนี้ยังกล่าวถึงรายละเอียดและสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ การนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ และกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ส่วนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากวารสารทางวิชาการที่เกี่ยวกับการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต

2.1 หลักการและทฤษฎีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

2.1.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากขั้นตอนต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับผลิตภัณฑ์ทั้งวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่การออกแบบ การใช้พลังงานและวัตถุดิบ การขนส่งและการแจกจ่าย กระบวนการผลิต การใช้งานผลิตภัณฑ์ การใช้ใหม่หรือแปรรูป รวมทั้งการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์หลังจากการใช้งาน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพิจารณาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle-to-Grave) หรืออาจประเมินผลกระทบแบบ “Cradle-to-Gate” ซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบโดยครอบคลุมในขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบหรือพลังงานจนถึงกระบวนการผลิต [16-18] ซึ่งแสดงความแตกต่างดังภาพที่ 2.1 โดยพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมไปถึงผลต่อระบบนิเวศน์ สุขภาพอนามัยของมนุษย์ การใช้ทรัพยากรและปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกเป็นหลัก โดยอาศัยข้อมูลการใช้ทรัพยากรทั้งวัตถุดิบและปริมาณพลังงาน รวมถึงการปล่อยของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ทั้งนี้เพื่อนำผลไปใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อกำหนดนโยบายการออกแบบผลิตภัณฑ์ การปรับกระบวนการผลิต หรือเพิ่มทางเลือกในการผลิตเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2.1 แผนผังการประเมินวัฏจักรชีวิต **[19]**

มีคำนิยามเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตไว้ต่าง ๆ **[16]** ดังนี้

- สมาคมพิษวิทยาด้านสิ่งแวดล้อมแหละสารเคมี (Society of environment toxicology and chemical: SETAC) ได้ให้นิยามของ LCA ว่า “เป็นกระบวนการที่ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาครอบคลุมถึงกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกันในรูปของวัตถุดิบและพลังงาน ซึ่งการประเมินนี้จะทำตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด เช่น กระบวนการผลิต การบรรจุ การคัดแยก การบำรุงรักษาและการแปรรูปใช้ใหม่ รวมถึงกิจกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยยึดหลักของระบบนิเวศน์ สุขอนามัย และการนำทรัพยากรมาใช้เป็นหลัก”

- ส่วนองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) ได้นิยามความหมายของ LCA ไว้ในอนุกรมมาตรฐา ISO14040 ว่า “เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต”

LCA เป็นเครื่องมือด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมหนึ่งที่ถูกบรรจุอยู่ใน International Standard for Organization (ISO) 14000 ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม

(Environmental Management Standard) มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับ LCA มีทั้งหมด 7 ฉบับ [16] ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.2 ประวัติความเป็นมาของการประเมินวัฏจักรชีวิต

จากวิกฤตพลังงานในช่วงปี พ.ศ. 2513 ทำให้ประเทศประเทศต่าง ๆ มีนโยบายการประหยัดพลังงานซึ่งส่งผลต่อการปลูกจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อม การศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตจึงถูกพัฒนาขึ้นและขยายรวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบจากการแพร่ของมลพิษและของเสียที่เกิดขึ้น ต่อมาใน พ.ศ. 2523 ภาครัฐของประเทศต่าง ๆ ได้ให้ความสนใจในการศึกษานี้มากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์สำหรับเปรียบเทียบความรุนแรงของปัญหาที่ต่างประเภทกัน เช่น การทำให้โลกร้อนขึ้นและการลดลงของทรัพยากร เป็นต้น

การประเมินวัฏจักรชีวิตได้ถูกนำเข้ามาใช้ในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2540 โดย เครือข่ายผู้ที่สนใจด้าน LCA ของประเทศไทย (Thai LCA Network) ถูกตั้งขึ้นที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [16]

2.1.3 วัตถุประสงค์ของการประเมินวัฏจักรชีวิต

เป็นการพิจารณาข้อมูลการใช้พลังงาน การใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม หรือพิจารณาจากข้อมูลของสารขาเข้าและสารขาออกของผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ [16]

ผลที่ได้สามารถนำใช้ในการเลือกตัดสินใจกระบวนการผลิตว่าทางเลือกไหน มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยสุด หรือเพื่อบอกว่า ในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์นั้น ขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร ดังนั้นการประเมินวัฏจักรชีวิตจึงเป็นเพียงเครื่องมือที่ใช้ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางด้านสิ่งแวดล้อม ไม่ได้แทนที่เครื่องมือวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมชนิดอื่น ๆ ซึ่งถูกกำหนดขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะอย่าง ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และคุณลักษณะของเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมแต่ละชนิด [20]

ตารางที่ 2.1 คำจำกัดความย่อของ LCA ในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14000

Standard	Focus
ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework	คำแนะนำสู่โครงร่าง หลักการและข้อกำหนดสำหรับการศึกษา LCA โดยเฉพาะการแนะนำในเรื่องการพิจารณาถึงความสำคัญในการศึกษา LCA
ISO 14041 Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and life cycle inventory analysis	คำแนะนำในการทำ Life cycle inventory ให้คำจำกัดความของเป้าหมาย กำหนดขอบเขต ระบบผลิตภัณฑ์ การเก็บข้อมูลและการส่งผลของรายงาน
ISO 14042 Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment	คำแนะนำเรื่องโครงสร้างของผลของการเก็บข้อมูลเพื่อความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์กับระบบผลิตภัณฑ์ที่กำลังศึกษาอยู่
ISO 14043 Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation	คำแนะนำถึงการแปลผลจากการเก็บข้อมูล LCA และการศึกษา LCA
ISO/TR 14047 Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14042 – Life cycle impact assessment	เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14042 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
ISO/TR 14048 Environmental management - Life cycle assessment - LCA Data Documentation Format	เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างรูปแบบเอกสารของข้อมูลด้าน LCA
ISO 14049 Environmental management - Life cycle assessment - Examples of application of ISO14041 to goal and scope definition and inventory analysis	เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14041 สำหรับจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2.2 เครื่องมือสำหรับจัดการและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม [20]

เครื่องมือ	LCA (Life Cycle Assessment)	RA (Risk Assessment)	EIA (environmental Impact Assessment)	EPE (Environmental Performance Evaluation)
วัตถุประสงค์รวม	เพื่อทำความเข้าใจในโครงสร้างทางสิ่งแวดล้อมของระบบและระบุลำดับในการปรับปรุงได้	เพื่อประเมินผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในสถานการณ์ที่เป็นอันตราย	เพื่อประเมินผลกระทบด้านบวกและด้านลบ ต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการในอนาคต	เพื่อจัดหาข้อมูลที่เชื่อถือและพิสูจน์ได้เกี่ยวกับสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมขององค์กร
ข้อดี	สะดวกในการพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถพิจารณาได้ทั้งระดับโลกและระดับภูมิภาค	ประเมินผลกระทบระดับพื้นที่และภูมิภาคต่อเป้าหมายเฉพาะ	ประเมินผลกระทบทั้งด้านบวกและด้านลบและพิจารณาผลกระทบของโครงการในระดับพื้นที่	มีการวัดสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์โดยตรงกับนโยบายและเป้าหมาย
ข้อเสีย	ไม่ได้พิจารณาถึงเรื่องเวลา	- ไม่ได้พิจารณาตลอดวงจรชีวิต - ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณการใช้ทรัพยากร	วิเคราะห์ผลกระทบระดับโลกภูมิภาคและตลอดวงจรชีวิตได้ยาก	ให้ความสัมพันธ์ที่ไม่สมบูรณ์ในการวัดสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม
ผู้ใช้, อุตสาหกรรม	- มุ่งเน้นในการปรับปรุง - กลยุทธ์ในการวางแผนระยะยาว - ติดต่อสื่อสาร	เพื่อตรวจสอบการยอมรับของความเสี่ยง	- เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการทางกฎหมาย - ชี้วัดความต้องการในการเปลี่ยน	- เพื่อวัดสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมและการปรับปรุง - เพื่อชี้วัดกลยุทธ์โอกาสทางธุรกิจ
หน่วยงานรัฐ	ใช้สนับสนุนการคิดแบบครบวงจร	เพื่ออธิบายสถานการณ์ที่ยอมรับได้ในการจัดสรรลำดับทรัพยากรให้เป็นไปตามข้อกำหนดกฎหมาย	เป็นเหมือนข้อมูลเข้าที่ใช้ช่วยในการตัดสินใจต่อการยอมรับแผนโครงการ	เพื่อติดตามความก้าวหน้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 เครื่องมือสำหรับจัดการและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (ต่อ)

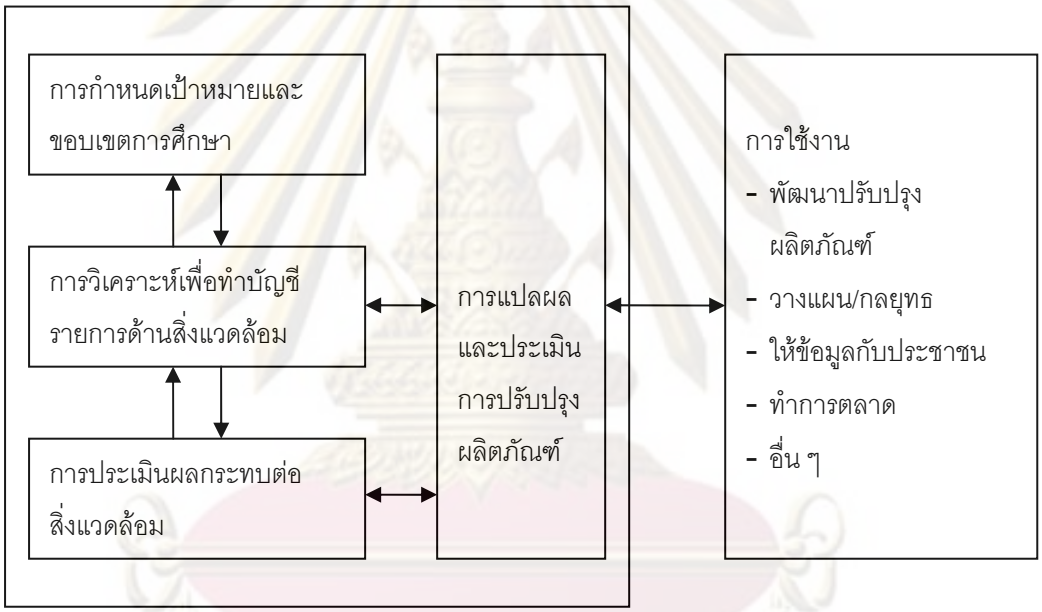
เครื่องมือ	LCA (Life Cycle Assessment)	RA (Risk Assessment)	EIA (environmental Impact Assessment)	EPE (Environmental Performance Evaluation)
หน่วยงานเอกชน	ใช้สนับสนุนการคิดแบบครบวงจร แต่ยังมีข้อสงสัยในการประยุกต์ใช้	เพื่อคัดค้านการยอมรับสถานการณ์ที่เป็นอันตราย	เพื่อคัดค้านการยอมรับต่อแผนโครงการ	ไม่ได้นำไปใช้
เป้าหมายของการวิเคราะห์	ผลิตภัณฑ์หรือการบริการ	สถานการณ์ความเป็นพิษ	แผนสร้างโครงการ โดยทั่วไปเป็นโครงการก่อสร้าง	กิจกรรมต่างๆขององค์กร
การจำกัดพื้นที่	ไม่จำกัด	จำกัดเขตหรือพื้นที่	จำกัดเขตหรือพื้นที่	จำกัดกิจกรรมในองค์กร
พิจารณาผลกระทบทางด้านใด	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมจากการใช้ทรัพยากรและของเสียที่เกิดขึ้น	ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และเป้าหมายทางสิ่งแวดล้อม	ผลกระทบทั้งหมดของโครงการต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่	ผลกระทบที่สัมพันธ์กับกิจกรรมขององค์กร
การแปลผล	การประเมินผลกระทบ	เปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ยอมรับได้	ต้นทุนและกำไรทางสิ่งแวดล้อม	ระบุการชี้วัดที่ตรงกับปัญหาของสมรรถนะ
การเปรียบเทียบ	หน่วยหน้าที่	สถานการณ์ที่ต้องการ การเปรียบเทียบ	โครงการ	หน่วยการทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิต [16]

ในการศึกษาการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิต นั้นแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก และทั้ง 4 ขั้นตอนหลักมีความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2.2 โดยทั้ง 4 ขั้นตอน ได้แก่

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal and Scope definition)
2. การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory Analysis)
3. การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Impact Assessment)
4. การแปลผล (Life Cycle Interpretation)



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต [16]

2.1.5.1. **การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา** (Goal and Scope Definition)

การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาของการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นขั้นตอนในการกำหนดสิ่งที่ต้องการศึกษาให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ว่าต้องการศึกษาเพื่ออะไร สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อด้านใด

- **การกำหนดเป้าหมาย** (Goal)

หลักสำคัญในการกำหนดเป้าหมายคือ ควรกำหนดเหตุผลและจุดมุ่งหมายในการศึกษาเพื่อประโยชน์ในการนำผลการศึกษาไปเผยแพร่หรือใช้งานต่อและควรกำหนดให้ชัดเจน

- **การกำหนดขอบเขตของการศึกษา** (Scope)

ขอบเขตของการศึกษาเป็นตัวกำหนดสิ่งต่าง ๆ ทั้ง ระบบ ขอบเขต ความต้องการข้อมูล สมมติฐาน และข้อจำกัดของข้อมูล เพื่อให้แน่ใจว่าในการวิเคราะห์นั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้จึงควรกำหนดรายละเอียดของขอบเขตให้เพียงพอ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบ่งชี้และกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินและกำหนดการรวบรวมสิ่งเป็นประโยชน์ต่อเป้าหมายของการศึกษา LCA ซึ่งควรประกอบด้วย

1. **หน้าที่ของผลิตภัณฑ์** (function)

เป็นการระบุหน้าที่ และคุณลักษณะต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจน เนื่องจากผลิตภัณฑ์หนึ่ง ๆ อาจมีหลายหน้าที่ ซึ่งจะทำให้การศึกษามีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นการเลือกหน้าที่จึงควรสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

2. **หน่วยการทำงาน** (functional Unit)

เป็นหน่วยพื้นฐานหรือตัวอ้างอิงในการจัดเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสารขาเข้าและสารขาออกของระบบ จึงควรกำหนดให้ชัดเจน วัดค่าได้ และตั้งให้อยู่บนพื้นฐานของหน้าที่เดียวกัน และสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบวงจรชีวิตของหลายผลิตภัณฑ์ได้

3. **ปริมาณอ้างอิง** (reference flow)

ในการกำหนดหน่วยการทำงานต้องมีการกำหนดปริมาณอ้างอิงด้วยเพื่อใช้สำหรับคำนวณหาสารขาเข้าและสารขาออกของระบบ

4. **ขอบเขตของระบบ** (system boundary)

เป็นขอบเขตระหว่างผลิตภัณฑ์ (Product system) กับสิ่งแวดล้อม หรือกับผลิตภัณฑ์อื่น โดยที่ระบบผลิตภัณฑ์คือ ระบบที่ถูกจำลองขึ้นจากกระบวนการย่อย (unit process) หลายกระบวนการมาเชื่อมต่อกันซึ่งประกอบด้วย กระบวนการย่อย ผังการไหลของ

ทรัพยากร วัตถุดิบหรือพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ และผังการไหลของผลิตภัณฑ์หรือของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่าง ๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม

5. ข้อกำหนดคุณภาพของข้อมูล

บทสรุปจะมีคุณภาพดีได้นั้นย่อมเกิดจากข้อมูลที่มีคุณภาพ ดังนั้นการกำหนดคุณภาพของข้อมูลควรคลอบคลุมถึงสิ่งต่าง ๆ เช่น ช่วงเวลาของข้อมูล ลักษณะที่มาข้อมูล ด้านเทคโนโลยีเกี่ยวกับข้อมูล และต้องอธิบายหากมีการใช้สมมติฐานกับข้อมูล เพื่อให้ผู้อ่านผลการศึกษาได้ทราบถึงที่มาของข้อมูล และผลการวิเคราะห์อย่างแท้จริง

2.1.5.2 **การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม** (Life Cycle Inventory Analysis)

จุดประสงค์เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมและการคำนวณข้อมูลที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา รวมถึงการสร้างผังของระบบผลิตภัณฑ์ไปจนถึงการคำนวณหาปริมาณสารขาเข้าและขาออกของระบบผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงทรัพยากรและพลังงานที่ใช้ หรือการปล่อยของเสียออกสู่อากาศ น้ำ และดิน ทำให้ทราบว่าในกระบวนการผลิตมีการใช้ทรัพยากรและปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณเท่าใด ซึ่งในการวิเคราะห์รายการด้านสิ่งแวดล้อมนั้นควรจะพิจารณาในประเด็นต่าง ๆ ได้แก่ การเก็บรวบรวมข้อมูล การคำนวณ ความถูกต้องของข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกับกับระบบย่อย การกำหนดขอบเขตของระบบให้เหมาะสมขึ้น (Refining system boundaries) และการปันส่วน

2.1.5.3 **การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์** (Life Cycle Impact Assessment)

การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ หรือเป็นการแปลงค่าข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลการใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสียออกจากระบบในระหว่างกระบวนการผลิต หรือจากสารขาเข้าและขาออกเพื่อเป็นการเตรียมข้อมูลสำหรับใช้ในการแปลผลการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป การประเมินผล

กระทบมี 2 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย การจำแนกข้อมูลเข้าไปอยู่ในกลุ่มของผลกระทบ (Classification) และการกำหนดบทบาท (Characterization)

2.1.5.4 **การแปลผล** (Life Cycle Interpretation)

การแปลผลของผลการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมเป็นการนำผลการศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมและการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาเชื่อมโยง เพื่อนำมาวิเคราะห์ สรุปผลและอธิบายถึงสิ่งที่ได้มาจากผลลัพธ์ รวมถึงการจัดทำรายงานเพื่อสรุปการแปลผลการศึกษาให้สามารถเข้าใจง่าย สมบูรณ์ครบถ้วนและมีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

หลังจากทำการประเมินวงจรชีวิตจะทำให้ทราบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใดเป็นอันตรายที่สุดและเกิดจากกระบวนการใด เพื่อจะวิเคราะห์หาวิธีที่เหมาะสมในการแก้ไขและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านต่างๆ คือ ปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ เทคโนโลยี และความต้องการของผู้บริโภค

2.1.6 **โปรแกรมสำเร็จรูป**

เนื่องจากการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตมีความเกี่ยวข้องกับตัวเลขจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อความสะดวก และมีคุณภาพ จึงมีการโปรแกรมสำเร็จรูปมาใช้ช่วยในการคำนวณ ซึ่งในอดีตนั้นใช้ Microsoft Excel หรือ Spreadsheets ในการคำนวณ ทำให้เป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย และยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการผลิตที่มีขั้นตอนมาก ๆ อีกทั้งสามารถเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลการประเมินวัฏจักรชีวิตที่ทำไว้ทั่วโลกได้ ตัวอย่างโปรแกรมสำเร็จรูปที่นิยมใช้สำหรับการศึกษา LCA แสดงในตารางที่ 2.3 และในตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต

2.1.6.1 **โปรแกรม** SimaPro 6.0 (System for Integrated Environmental Assessment of Products) [21]

โปรแกรม SimaPro ถูกสร้างขึ้นในปี พ.ศ. 2533 สำหรับในโครงการของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ โดย Mr. Mark Goedkoop ของบริษัท Pre Consultants โดยมุ่งเน้นไปที่การจัดการวัฏจักรชีวิตและการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยการพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์และการบริการ ด้วยโปรแกรมที่เป็นที่รู้จักกันดี ในชื่อของ SimaPro LCA Software ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตของระบบ

ตารางที่ 2.3 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการศึกษา LCA ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน **[20]**

โปรแกรมสำเร็จรูป	ผู้ผลิตโปรแกรม	ประเทศ
SimaPro 5.1,6	Pre'Consultants	เนเธอร์แลนด์
GaBi 3.2	IKP Stuttgart	เยอรมัน
TEAM 3.0	Ecobilan	ฝรั่งเศส
LCAiT	Chalmers	สวีเดน
KCL-Eco	KCL	ฟินแลนด์
Umberto 4.1	Ifu / ifeu	เยอรมัน
EcoPro	EMPA, sinum	สวิตเซอร์แลนด์
Boustead	Boustead	อังกฤษ
NIRE-LCA	NIRE / AIST	ญี่ปุ่น*
JEMAI-LCA	JEMAI	ญี่ปุ่น*

* มีเฉพาะภาษาญี่ปุ่นเท่านั้น

ในปัจจุบัน SimaPro ได้มีการขยายการใช้งานไปถึงกระบวนการผลิตและการบริการ และล่าสุด SimaPro 6.0 เป็นโปรแกรมที่ทำการเก็บข้อมูล วิเคราะห์ผลและแสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์และการบริการ ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองขึ้นเองได้ง่าย และสามารถวิเคราะห์ผลในรูปของตัวเลขทำให้ชัดเจนและง่ายต่อการเข้าใจ สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมมีดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต [22]

หัวข้อ	EDIP PC-tool	EPS4.0 Design System	Gabi 3	SimaPro4.0	TEAM	Umberto3.5
ประเทศ	Denmark	Sweden	Germany	Netherlands	France	Germany
จำนวนลิขสิทธิ์ที่ขายได้	100	>200	250	>600	>200	>350
เวลาที่ใช้ในการศึกษา	< 1 สัปดาห์	< 1 สัปดาห์	< 1 เดือน	< 1 วัน	< 1 วัน	< 1 สัปดาห์
วิธีในการประเมินผลกระทบ	EDIP, Environmental method	EPS	Eco Indicator + Create your own method	EI95, EI99, EP97, CML, EDIP, EPS	CML, EPA, IPCC, CVCH	Eco Indicator, Swiss eco point
เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 14040	+	+	+	+	+	+
แสดงผลในตาราง	+	+	+	+	+	+
แสดงผลในรูปกราฟ	+	+	+	+	+	+
การปรับปรุงข้อมูล	ช่วงเวลาอื่น	ทุกปี	ช่วงเวลาอื่น	ทุก2ปี	ทุกปี	ช่วงเวลาอื่น
แสดงผลในแต่ละประเภทของผลกระทบ	+	+	+	+	+	+
สามารถผลเพื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ได้	+	+	+	+	+	+

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต (ต่อ)

หัวข้อ	EDIP PC-tool	EPS4.0 Design System	Gabi 3	SimaPro4.0	TEAM	Umberto3.5
สามารถดึงผลการประเมินออกจากโปรแกรมได้	+	+	+	+	+	+
ตรงตามเป้าหมาย สำหรับวิศวกรออกแบบ	+	+	+	+	+	+
ตรงตามเป้าหมาย สำหรับวิศวกรสิ่งแวดล้อม	+	+	+	+	+	+
ตรงตามเป้าหมาย สำหรับผู้เชี่ยวชาญ LCA	-	+	+	+	+	+
มีฐานข้อมูล	+	+	+	+	+	+
สามารถเพิ่มข้อมูลเข้าไปใหม่ได้	+	+	+	+	+	+

\+ หมายถึง มีคุณสมบัตินั้นในโปรแกรม

\- หมายถึง ไม่มีคุณสมบัตินั้นในโปรแกรม

ที่มา: JonBrink (2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. กำหนดขอบเขตและเป้าหมาย: การกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของการศึกษาและประเมินผล
2. การรวบรวมข้อมูล: เป็นการอ้างอิงข้อมูลจากข้อมูลพื้นฐานของโปรแกรม
3. การประเมินผลกระทบ: โปรแกรมมีวิธีการประเมินผลกระทบหลายแบบ ประกอบด้วย EPS, EDIP, Eco-indicator, IMPACT 2002+, CML, IPCC และ Cumulative energy demand

2.1.6.2 วิธีการประเมินค่าผลลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

วิธีในการประเมินค่าผลลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในโปรแกรม SimaPro มีหลายวิธี ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 วิธีการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

วิธีการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	กลุ่มผลกระทบ	ผลการประเมินค่าผลกระทบ
EPS	สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์, การใช้ทรัพยากร	Endpoint
EDIP	สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์, การใช้ทรัพยากร	Midpoint
Eco-indicator	สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์, การใช้ทรัพยากร	Endpoint
IMPACT 2002+	สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์, การใช้ทรัพยากร, ภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง	Endpoint
CML	สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์	Midpoint
IPCC	ภาวะโลกร้อน	Midpoint
Cumulative energy demand	พลังงาน	Midpoint

จากตารางที่ 2.5 พบว่าค่าผลกระทบที่ได้จากการประเมินถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ขั้นกลาง ผลที่ได้จากการประเมินผลกระทบจะอยู่ในรูปของกิโลกรัมสมมูลของสารอ้างอิงในแต่ละประเภทผลกระทบ และขั้นสุดท้าย ผลที่ได้จากการประเมินผลกระทบจะอยู่ในรูปหน่วยของค่า

ผลกระทบของแต่ละกลุ่มผลกระทบ ในงานวิจัยนี้เลือกวิธีในการประเมินผลกระทบแบบครอบคลุมถึงขั้นสุดท้ายและครอบคลุมถึงผลกระทบในทุก ๆ ด้าน

นอกจากกลุ่มผลกระทบเป้าหมายในแต่ละวิธีการประเมินค่าผลกระทบจะแตกต่างกันแล้ว ในแต่ละวิธียังมีการศึกษาถึงสารเคมีที่ต่างชนิดกันด้วย ดังนั้นในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะต้องเลือกวิธีที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยพิจารณาถึง 2 สิ่งต่อไปนี้พร้อมกัน

1. เลือกกลุ่มของผลกระทบให้ตรงกับเป้าหมายที่ต้องการศึกษา โดยพิจารณาว่าการศึกษาของเราต้องการศึกษาถึงผลกระทบด้านใดบ้าง

2. เลือกวิธีการประเมินผลกระทบให้ตรงกับสารเคมี ทั้งนี้เนื่องจากในวิธีหนึ่ง ๆ นั้นอาจไม่ได้ทำการศึกษาและ/หรือเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสารเคมีที่มีอยู่ในจำนวนมากได้ทุกตัว ดังนั้นหากเลือกวิธีในการประเมินไม่เหมาะสมทำให้การประเมินผลกระทบผิดพลาดไปได้

2.1.6.2 **การประเมินผลกระทบโดย** Impact 2002+

ในปัจจุบันวิธีการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมีหลายวิธี เช่น Eco-scarcity Method, Environmental Theme Method, Environmental Design of Industrial Products (EDPI), Eco-indicator Method และอื่น ๆ แต่วิธี IMPACT 2002+ เป็นวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตใหม่ที่มีการพัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการรวมผลกระทบขั้นกลาง (midpoint) และ ผลกระทบขั้นสุดท้ายโดยรวมเป็นกลุ่มผลกระทบ (damage) โดยการเชื่อมโยงกับบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม วิธี IMPACT 2002+ เป็นแนวคิดและวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่สำหรับใช้ประเมินเปรียบเทียบระหว่างความเป็นพิษต่อมนุษย์ (Human toxicity) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ (Ecotoxicity) วิธี IMPACT 2002+ ยังมีระบบการให้น้ำหนักที่สนับสนุนข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธี Impact 2002+ มีดังนี้ แจกแจงประเภทของผลกระทบจากวัตถุดิบ พลังงานและของเสีย ออกเป็น 14 ประเภท และจัดเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ตามลักษณะของกลุ่มเป้าหมาย **[23, 24]** ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และมีการให้น้ำหนักหรือความสำคัญและรวมคะแนนเป็นคะแนนเดียว

Midpoint characterization factors จะอยู่บนหลักของความเท่ากัน เช่น midpoint characterization score อยู่ในหน่วยของ kg-equivalents ของสารที่เปรียบเทียบต่อสารอ้างอิง ตารางที่ 2.7 แสดงสารอ้างอิง และ damage unit ที่ใช้ใน IMPACT 2002+

ตารางที่ 2.6 สสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบที่ใช้ใน วิธี IMPACT 2002+

กลุ่มเป้าหมายของการทำลาย (หน่วย)	ประเภทของผลกระทบ	สสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ
Human Health (Disability Adjusted Life Years :DALYs)	สารก่อมะเร็งและสารไม่ก่อมะเร็ง ผลกระทบด้านการหายใจจากอินทรีย์สาร ผลกระทบด้านการหายใจจากอนินทรีย์สาร สารแผ่รังสี การลดลงของชั้นโอโซน	arsenic, cadmium methane, benzene CO, SO_x, NH_3 Nuclear energy production CFCs, HFCs
Ecosystem Quality (Potentially Disappeared Fraction : PDF)	ระบบนิเวศน์เป็นพิษในน้ำ ระบบนิเวศน์เป็นพิษในดิน ภาวะความเป็นกรด/ภาวะอูโทรฟิเคชันในดิน ภาวะความเป็นกรดในน้ำ ภาวะอูโทรฟิเคชันในดิน การใช้พื้นที่	phenol, methanol styrene, xylene SO_x, NO_x, NH_3 So_x, NO_x, NH_3, HCl Phosphate, nitrate Grassland, wood
Resource Depletion (MJ surplus Energy)	การใช้สินแร่ การใช้เชื้อเพลิง	cupper, nickel, zinc crude oil, coal
Climate change (kg_{eq} CO_2 into air)	ภาวะโลกร้อน	CO2, methane, CFCs

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 สารอ้างอิงในแต่ละประเภทผลกระทบที่ใช้ใน วิธี IMPACT 2002+ **[23]**

Midpoint category	Midpoint reference substance	Damage category	Damage unit
Human toxicity (carcinogens + non-carcinogens)	kg_{eq} chloroethylene into air	Human health	DALY
Respiratory (inorganics)	Kg_{eq} PM2.5 into air		
Ionizing radiations	Bq_{eq} carbon-14 into air		
Ozone layer depletion	Kg_{eq} CFC-11 into air		
Photochemical oxidation [=Respiratory (organics) for human health]	Kg_{eq} ethylene into air		
Aquatic ecotoxicity	Kg_{eq} triethylene glycol into water	Ecosystem quality	PDF * m^2 * yr
Terrestrial ecotoxicity	Kg_{eq} triethylene glycol into soil		
Terrestrial acidification/nitrification	Kg_{eq} SO_2 into air		
Land occupation	m^2_{eq} organic arable land-year		
Aquatic acidification	Kg_{eq} SO_2 into air		Under development
Aquatic eutrophication	Kg_{eq} PO_4^{3-} into water		Under development
Global warming	Kg_{eq} CO_2 into air	Climate change (life support system)	Kg_{eq} CO_2 into air

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 สารอ้างอิงในแต่ละประเภทผลกระทบที่ใช้ใน วิธี IMPACT 2002+ **(ต่อ)**

Midpoint category	Midpoint reference substance	Damage category	Damage unit
Non-renewable energy	MJ Total primary non-renewable or kg_{eq} crude oil (860 kg/m^3)	Resources	MJ
Mineral extraction	MJ addition energy or kg_{eq} iron (in ore)		

ขั้นตอนในการประเมิน **[24]** แบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

1. Classification เป็นขั้นตอนในการจัดกลุ่มข้อมูลขาเข้าและขาออกว่ามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทใด เพราะสารหนึ่งชนิดอาจมีผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน เช่น นอร์มอล-บิวเทน ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม มีผลกระทบต่อการหายใจจากสารอินทรีย์ ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในน้ำและดิน เป็นต้น

2. Characterization เป็นขั้นตอนในการแปลงค่าสารแต่ละตัวในกลุ่มผลกระทบเดียวกันให้อยู่ในรูปตัวเลขที่บอกถึงค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารแต่ละตัวมีศักยภาพในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องนำมาเทียบอ้างอิงกับสารพื้นฐาน โดยดูจากค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบ (potential environment impact) ของสารแต่ละตัว ซึ่งคำนวณมาจากความรู้ทางวิทยาศาสตร์ ตารางที่ 2.8 แสดงตัวอย่างค่า Characterization factors ของก๊าซหรือสารต่างๆ ที่เป็นเป็นสาเหตุของผลกระทบทั้ง 14 ประเภท

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 ค่า Equivalency factors

สารเคมี	สูตรเคมี	Characterization factors
Carcinogen		(kg C_2H_3Cl eq / kg)
Chloroethane	C_2H_3Cl	1
Dichloroethane	$C_2H_2Cl_2$	2.477
Acrylonitrile	CH_2CHCN	1.521
Formaldehyde	CH_2O	0.906
Aquatic ecotoxicity		(kg TEG eq / kg)
Acetic acid	CH_3COOH	3.882
Acrolein	C_3H_4O	901.340
Benzene	C_6H_6	0.024
Phenol	C_6H_5OH	0.977
Global Warming		kg CO_2 eq / kg
Carbon dioxide	CO_2	1
Carbon monoxide	CO	1.57
Methane	CH_4	7
Chloroform	CCl_4	9

ทำการคำนวณหาศักยภาพของผลกระทบนั้น ๆ ด้วยสมการ 2.1

Characterization = Characterization factor x kg emission (2.1)

3. Damage Assessment เป็นขั้นตอนในการแปลค่าผลกระทบขั้นกลาง (midpoint) เป็นผลกระทบขั้นปลาย (endpoint) หรือเป็นการแปลงค่าขนาดของผลกระทบในหน่วยของสารอ้างอิงเป็นค่าผลกระทบในหน่วยผลกระทบของทั้ง 4 ประเภท สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

Damage assessment = Damage factor x Characterization (2.2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน่วยของ Damage assessment จะแตกต่างกันไปตามกลุ่มของผลกระทบ คือ

ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์: DALY (Disability Adjusted Life Year) คือ การสูญเสียปีสุขภาวะอาจเกิดจากปีที่สุญเสียไปเพราะการตายไปก่อนถึงเวลาอันควร หรือปีที่สูญเสียเพราะมีชีวิตอยู่ด้วยความเจ็บป่วยพิการ

ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์: PDF*m^2* yr (Potentially Disappeared Fraction of species over a certain area and during a certain time) คือ สัดส่วนการสูญหายของความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตต่อพื้นที่เนื่องจากผลกระทบหรือภาระทางสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบต่อภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง: kg CO_2 eq คือ ปริมาณของผลกระทบของภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะให้ขึ้นอยู่กับผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ และสุขภาพมนุษย์นั้นไม่แม่นยำเพียงพอที่จะเชื่อมโยง Damage characterization factor ได้ ดังนั้นการแปลผลจึงแปลผลโดยตรงที่ระดับขั้นกลาง (midpoint)

ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร: MJ primary คือ ปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการสกัดแร่หรือเชื้อเพลิง

4. Normalization เป็นขั้นตอนในการหาความสำคัญของศักยภาพของแต่ละผลกระทบที่มีความสัมพันธ์ต่อผลกระทบที่เกิดจากกิจกรรมของสังคมในภาพรวม ขั้นตอนนี้จะทำการเทียบหาค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ต่ออายุการใช้งาน และสัดส่วนของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ต่อคนต่อปี ดังสมการที่ 2.3

Normalization = Damage assessment / Normalization value (2.3)

หน่วยของ Normalization ที่ได้ จะอยู่ในรูป Pt (per people per year)

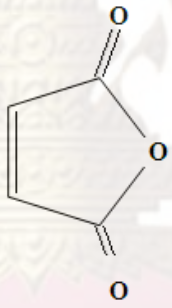
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. Weighting เป็นการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะของผลกระทบทั้ง 4 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ ภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง และการใช้ทรัพยากร ซึ่งค่า weighting มีได้หลายแบบขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้ต้องการให้น้ำหนักด้านไหน สมการการคำนวณถูกแสดงในสมการที่ 2.4

Weighting = Weighting factor x Normalization (2.4)

2.2 มาเลอิกแอนไฮไดรด์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นไฮไดรด์ของซิส-บิวทีนไดโอนิกหรือมาเลอิกเอซิด ชื่ออื่น ๆ ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ มีทั้ง 2,5-ฟูแรนไดโอน ไดไฮโดร-2,5-ไดออกโซฟูแรน มาเลอิกเอซิดแอนไฮไดรด์ หรือ ซิส-บิวเทนไดโอนิกแอนไฮไดรด์ มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

2.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (CAS No. 80-62-6) มีสถานะเป็นของแข็งใส ไม่มีสี หรือมีสีขาว ที่อุณหภูมิห้อง มีกลิ่นฉุน ละลายได้ในน้ำ แอซีโทน แอลกอฮอล์ และไดออกเซน ละลายได้บ้างในคลอโรฟอร์ม และเบนซีน ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต พอลิเอสเตอร์เรซิน แอลคิดเรซิน ฟูมาริกแอซิด และทาร์ทาริกแอซิด ฟาทาลิกแอซิด และสารสำหรับผลิตยาฆ่าแมลง

มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารที่เสถียรภายใต้สภาวะการใช้และการเก็บปกติ สารนี้สามารถระเหิดกลายเป็นไอได้ง่าย และเกิดการสลายตัวช้า ๆ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะกลายเป็นกรดมาเลอิก

(maleic acid) และเมื่อสัมผัสกับสารออกซิไดซ์จะทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิด ส่วนลักษณะสำคัญทางกายภาพถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.9 [3]

ตารางที่ 2.9 สมบัติทั่วไปของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

คุณสมบัติ	มาเลอิกแอนไฮไดรด์
สูตรโครงสร้าง	$C_4H_2O_3$
มวลโมเลกุล	98.01 g/mol
ความหนาแน่น	1.314 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	52.85 °C (326 K)
จุดเดือด	202 °C (475.15 K)
ความดันไอ	0.16 มม.ปรอท
ความสามารถในการละลายน้ำ	572 g/l (30 °C)
ความสามารถในการละลายไซลีน	163.2 g/l (30 °C)
ความสามารถในการละลายเบนซีน	439.4 g/l (35 °C)

2.2.2 การเก็บรักษา

โดยทั่วไป มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเก็บอยู่ในสภาวะหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 55 – 60 องศาเซลเซียส ในถังสเตนเลสสตีล หรือถังอลูมินัมบริสุทธิ์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถถูกเก็บไว้ได้นานหลายสัปดาห์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในก๊าซเฉื่อยบรรยากาศ [3]

2.2.3 รูปทั่วไปทางการค้าและการขนส่ง

ในทางการค้าและการขนส่ง มาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถกระทำได้ใน 2 รูปแบบ [3] คือ

1. ของเหลว ถูกขนส่งในระยะทางไกล ๆ ที่อุณหภูมิ 60 - 80 องศาเซลเซียส โดยถังบรรจุ หรือรถบรรทุกที่หุ้มด้วยฉนวน ภาชนะบรรจุจะอยู่กับอุปกรณ์ให้ความร้อน

2. ของแข็ง ถูกส่งอย่างรวดเร็วในรูปก้อนยาและก้อนกลมเล็ก ๆ หนัก 0.5 - 2.0 กรัม ภาชนะบรรจุเป็น Multiple paper bags เชื่อมกับพอลิเอทิลีนชนิดเส้นตรงหรือเป็นชนิดฟิล์มแข็ง ซึ่งสามารถเก็บได้นานในที่เย็นและแห้ง

2.2.4 การใช้ประโยชน์

มาเลิกแอนไฮไดรด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้มาก โดยภาพที่ 2.4 แสดงสัดส่วนการใช้ประโยชน์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และยังพบว่าแนวโน้มความต้องการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 2.10

2.2.4.1 ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต

มาเลอิกแอนไฮไดรด์ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิเอสเตอร์เรซินที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งถูกใช้ต่อไปสำหรับใน เรือ รถยนต์ รถบรรทุก อาคาร ท่อ และผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กโทรนิกค์ เช่นในการผลิตเป็นเรซินเส้นใยแก้วเสริมกำลัง (Fiber glass-reinforced-resin) ส่วนประกอบรถยนต์

2.2.4.2 lube oil adhesives

มาลเอิกแอนไฮไดรด์ถูกใช้ในการผลิต Lube oil adhesives ซึ่งใช้เป็น prolong oil-change intervals และ เพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักร เช่น Ash less dispersants

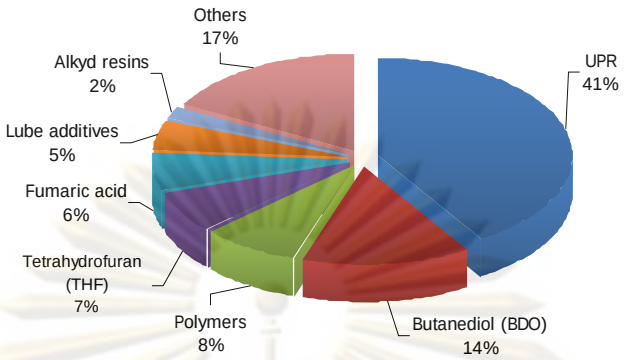
2.2.4.3 ใช้เป็นสารเติมแต่งอาหาร

ฟูมาริก (Fumaric) และมาลิก (malic) ถูกผลิตจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ใช้เป็นสารให้ความหวานร่วมกับน้ำตาลเทียม ผลิตเป็นอัลคิด เรซิน (alkyd resins) และอาหารสัตว์

2.2.4.4 ใช้เป็นสารโคพอลิเมอร์

มาเลอิกแอนไฮไดรด์มักถูกใช้ป็นสารโคพอลิเมอร์กับสารตัวอื่น ๆ เช่น สไตรีน เอทิลีน ไวนิวคลอไรด์ อะคลิโลไนไตรล์ เป็นต้น เช่น ฟอร์มเป็นโคพอลิเมอร์ร่วมกับ มอนอ-ออโท-เมทิล-โอลิโกเอทิลีน ไกลคอล ไวนิล เอสเตอร์ ถูกใช้ในทางเภสัชวิทยา และยังเป็นพอลิมาเลอิกแอนไฮไดรด์ใช้เป็น preventer และ corrosion inhibitor ได้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.4 สัดส่วนการใช้ประโยชน์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [25]

ตารางที่ 2.10 แนวโน้มความต้องการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [25]

(tones)	2001-02	2002-03	2003-04	2004-05	2005-06	2006-07E
Agro chemicals	669	668	765	741	759	775
UPR	7,718	7,711	8,059	8,557	9,237	9,745
Alkyd resins	729	728	763	808	852	894
Food acids	5,985	5,979	6,427	6,635	6,996	7,205
Lube additives	1,338	1,336	1,485	1,483	1,534	1,580
Others	3,353	3,349	3,599	3,717	3,881	4,037
Total	19,791	19,771	21,098	21,942	23,258	24,235

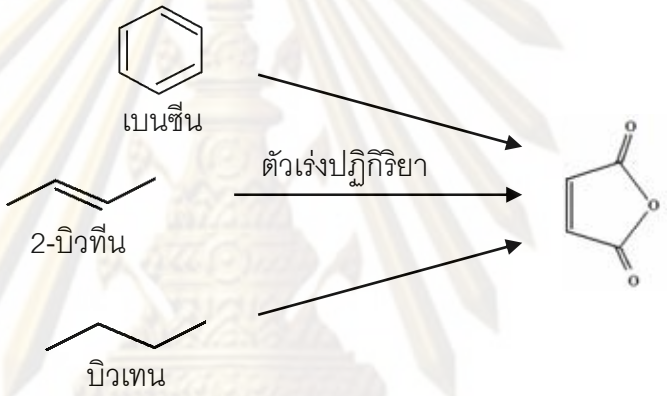
2.2.5 พิษวิทยา

มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีอันตรายต่อสุขภาพอนามัย ทั้งการสัมผัสทางการหายใจ ทางผิวหนัง การกินหรือกลืน และการสัมผัสถูกตา โดยเมื่อมีการหายใจเอาไอระเหยของสารนี้เข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูกและลำคอ หายใจติดขัด และเกิดแผลไหม้บริเวณลำคอได้ และเนื่องจากสารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน อาจทำให้เกิดแผลไหม้บนผิวหนังได้เมื่อมีการสัมผัสถูกผิวหนัง และทำให้อักเสบที่ลำคอ เกิดอาการปวดท้อง อาเจียน เจ็บคอและทำให้เกิดแผลไหม้ในระบบทางเดินอาหารเมื่อมีการกินหรือกลืน และถ้ามีการสัมผัสถูกตาอาจทำให้เกิดแผลไหม้บริเวณดวงตา ตาบวม ตาแดง และทำให้ความสามารถในการมองเห็นลดลง 0.25 ppm หรือ 1 mg/m^3 คือความเข้มข้นเริ่มต้นที่ทำให้เกิดอาการเหล่านี้ และที่ความเข้มข้นมากกว่า 2.5 ppm จะทำให้เกิดความ

ระคายเคืองอย่างรุนแรง และเมื่อพิจารณาค่า LD_{50} ในหนูทดลองทางปาก พบว่ามีค่า LD_{50} 481 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [3]

2.2.6 กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีอยู่ด้วยกัน 3 กระบวนการ โดยการผลิตจากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันทั้ง 3 กระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 คือ เบนซีน บิวทีน และนอร์มอล-บิวเทน และยังสามารถเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ในกระบวนการผลิตพทาลิกแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 2.5 เส้นทางกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เริ่มมีการผลิตในอุตสาหกรรมครั้งแรกในปี พ.ศ. 2476 โดย Halcon Technology ผ่านกระบวนการผลิตที่เรียกว่า การออกซิเดชันของเบนซีน โดยการใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

$$C_6H_6 + 4.5\ O_2 \longrightarrow C_4H_2O_3 + 2\ CO_2 + 2\ H_2O \qquad (1)$$

สภาวะที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.1-0.2 MPa บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วย วาดาเนียมเปอร์ออกไซด์ (vanadium peroxide) และโมลิบดินัมออกไซด์ (molybdenum oxide) [2] ซึ่งในเวลานั้นถือได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตหลักในการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ แต่เมื่อราคาของเบนซีนที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีการคิดค้นพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนในการผลิต โดยต่อมาในปี ค.ศ. 1962 Petro-Tex ปัจจุบันคือ Denka เป็นบริษัทแรกที่ทำการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การออกซิเดชัน

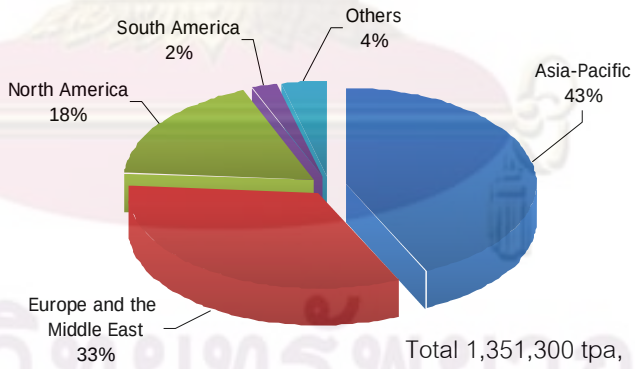
ของบิวทีน โดยการใช้บิวทีนเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 360-440 องศาเซลเซียส [2] มีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้

$$C_4H_8 + 3\,O_2 \longrightarrow C_4H_2O_3 + 3\,H_2O \qquad (2)$$

และต่อมาในปี ค.ศ. 1974 Monsanto เริ่มทำการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้นอร์มอล-บิวเทนเป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เรียกกระบวนการนี้ว่า การออกซิเดชันของบิวเทน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้

$$n\text{-}C_4H_{10} + 3.5\,O_2 \longrightarrow C_4H_2O_3 + 4\,H_2O \qquad (3)$$

ซึ่งในปีค.ศ. 2000 พบว่ายังมีการใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้นอยู่เกือบร้อยละ 30 ของอัตราการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทั่วโลก และอีกเกือบร้อยละ 70 เป็นการใช้บิวเทนเป็นสารตั้งต้น ส่วนที่เหลือเล็กน้อยเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากกระบวนการผลิตพทาลิกแอนไฮไดรด์ ภาพที่ 2.6 แสดงกำลังการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทั่วโลก ในปี 2006



ภาพที่ 2.6 กำลังการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [25]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาเหตุของการแทนที่เบนซีนด้วยนอร์มอล-บิวเทน [13, 14] คือ

1. ราคาเบนซีนที่สูงกว่านอร์มอล-บิวเทน
2. การเปลี่ยนเบนซีนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ทำให้เกิดการลดลงของผลผลิตโดยมวล เนื่องจากการสูญเสียคาร์บอน 2 อะตอมการ
3. ปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเบนซีนจัดเป็นสารก่อมะเร็งซึ่งมีความเป็นพิษมากกว่า ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการควบคุมสำหรับสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย
4. การใช้เบนซีนเป็นสารตั้งต้นทำให้เกิดสารประกอบหนักเป็นผลพลอยได้ เช่น พทาลิกแอนไฮไดรด์ และ เบนโซคิโนน ในขณะที่นอร์มอล-บิวเทน เกิดเป็นผลพลอยได้น้อยกว่าการใช้เบนซีน เช่น คาร์บอนออกไซด์ และกรด

นอกจากสารตั้งต้นทั้ง 3 ที่กล่าวมาจะพบในอุตสาหกรรมการผลิตแล้ว ในปัจจุบันมีการศึกษาถึงการนำสารตั้งต้นอื่น ๆ มาใช้ในการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เช่น นอร์มอล-เพนเทน [4-6] โพรเพน [7-9] เพนทีน [10] ไซโคลเฮกเซน [11] โครโทแอลดีไฮด์ [12]

ในงานวิจัยนี้ สารตั้งต้นที่ศึกษา คือ นอร์มอล-บิวเทน นอร์มอล-เพนเทน และโพรเพน เนื่องจากในกรณีนอร์มอล-บิวเทนเป็นสารตั้นต้นที่นิยมใช้กันในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งมีการพัฒนามาจากการใช้เบนซีนเพราะว่าราคาของเบนซีนซึ่งเป็นสารตั้งต้นมีราคาเพิ่มขึ้น และประกอบกับการใช้เบนซีนจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้นอร์มอล-บิวเทนและบิวทีน จึงเป็นสาเหตุให้ในปัจจุบันนิยมใช้นอร์มอล-บิวเทน ส่วนในการเลือกศึกษาการใช้โพรเพนและนอร์มอล-เพนเทน เนื่องจากมีการศึกษาการใช้เป็นสารตั้งต้น 2 ชนิดนี้มากกว่าไฮโดรคาร์บอนอื่นและหาได้ง่ายกว่าไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น ๆ พร้อมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของสารตั้งต้นโดยการนำมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้น [26]

คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ได้ ต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.9 และมีสีขาว โดยตารางที่ 2.11 แสดงลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

ตารางที่ 2.11 ค่าเฉลี่ยลักษณะเฉพาะของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [3, 27]

ลักษณะ	ค่า
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ต่ำสุด	99.9
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส) ต่ำสุด	52.5
จำนวนกรด (mg KOH/g) ต่ำสุด	1440
สีในสภาวะหลอมเหลว (APHP) สูงสุด	20
ปริมาณเถ้า (ppm) สูงสุด	10
ปริมาณเหล็ก (ppm) สูงสุด	5
ความสามารถในการละลายน้ำ (4 g / 10 ml H_2O)	ละลายหมดและเป็นสารละลายใส

2.2.6.1 **กระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน**

สารตั้งต้นนอร์มอล-บิวเทน และอากาศ จะถูกเพิ่มความดันและอุณหภูมิแยกกัน เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (oxidize) กลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากจะใช้อากาศแล้วยังสามารถใช้ก๊าซออกซิเจนร่วมกับก๊าซเฉื่อยอื่น ๆ ได้ เช่น ก๊าซฮีเลียม หรือก๊าซออกซิเจนเพียงอย่างเดียว โดยอัตราการป้อนระหว่างนอร์มอล-บิวเทนกับอากาศขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ ตารางที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีของการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบดและเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด โดยความเข้มข้นของนอร์มอล-บิวเทนที่ร้อยละ 1.5 – 10 [13, 14] โดยมีความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 2.4 โดยโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิกซ์เบด (fix beds) ร้อยละ 3.6-5 โดยโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด (fluidized beds) และ มากกว่าร้อยละ 4 โดยโมลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดหมุนวน (circulating fluidized beds) เนื่องจากอาจเกิดการลุกติดไฟ (Flammable) และอุณหภูมิต้องไม่สูงเกินไปเพราะทำให้สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์แทน โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 350 – 450 องศาเซลเซียส ความดัน 1 – 3 atm ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการดำเนินการคือ วาดาเนียมไพโรฟอสเฟต (VPO) [28, 29]

ตารางที่ 2.12 เปรียบเทียบเทคโนโลยีของการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ **[14]**

	Fixed Bed	Fluid Bed
เครื่องปฏิกรณ์	หลายท่อ	1 เครื่อง
กำลังการผลิต	ต่ำ	สูง
ความเข้มข้นบิวเทน	น้อยกว่า ร้อยละ 2	ร้อยละ 4-5
ต้นทุน	สูง	ต่ำ
การควบคุมอุณหภูมิ	ยาก	Steam coil
การระบายความร้อน	ยาก	ง่ายกว่า
การขยายขนาด	ง่าย	ยาก
การสึกกร่อนของตัวเร่งปฏิกิริยา	ไม่สำคัญ	สำคัญ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยเป็นปฏิกิริยาการออกซิเดชันของนอร์มอล-บิวเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นปฏิกิริยาหลัก และเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงหลักคือเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดง

$$C_4H_{10} + 3.5\ O_2 \longrightarrow C_4H_2O_3 + 4\ H_2O \qquad \Delta H = -1236\ kJ/mol \qquad (3)$$

ซึ่งมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ดังนี้

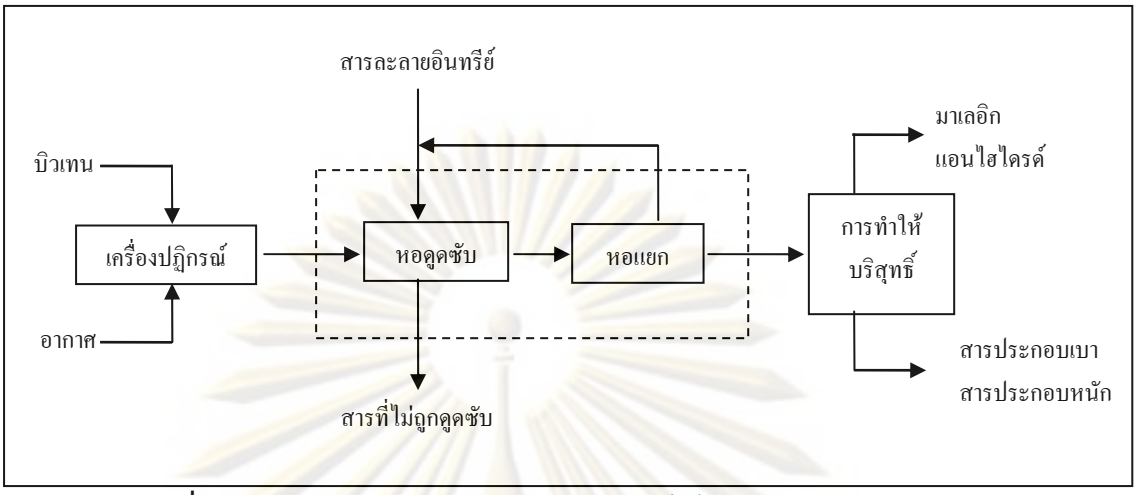
$$C_4H_{10} + 6.5\ O_2 \longrightarrow 4\ CO_2 + 5\ H_2O \qquad \Delta H = -2654\ kJ/mol \qquad (4)$$

$$C_4H_{10} + 4.5\ O_2 \longrightarrow 4\ CO + 5\ H_2O \qquad \Delta H = -1521\ kJ/mol \qquad (5)$$

นอกจากปฏิกิริยาข้างเคียง (4) และ (5) แล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่น ๆ ด้วย คือ กรดอะซิติก กรดอะคลิลิก พทาลิกแอนไฮไดรด์ กรดฟูมาริก **[30-32]**

กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนการแยกสาร และส่วนการทำให้บริสุทธิ์ โดยภาพที่ 2.7 แสดงแผนผังของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.7 แผนผังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

เครื่องปฏิกรณ์: ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยใช้ตัวเร่งวาดาเนียมไพโรฟอสเฟต (VPO) โดยป้อนนอร์มอล-บิวเทนในอากาศหรือก๊าซออกซิเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของนอร์มอล-บิวเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์และสารประกอบอื่นๆ

การแยกสาร: ในส่วนนี้มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะถูกแยกออกจากสารประกอบอื่นโดยการดูดซับด้วยสารละลายอินทรีย์ไดบิวทิวพทาเลต ส่วนที่ไม่ถูกดูดซับจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม หลังจากนั้นทำการแยกสารละลายอินทรีย์เพื่อนำกลับไปใช้ใหม่โดยการกลั่นแยก

การทำให้บริสุทธิ์: มาเลอิกที่แยกได้จากสารละลายอินทรีย์จะถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นเพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ตามต้องการ

การจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านสารตั้งต้นนอร์มอล-บิวเทนประกอบด้วย 5 หน่วยปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์: เครื่องปฏิกรณ์ (CRV-100)

- นอร์มอล-บิวเทนและอากาศถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (CRV-100) โดยมีสัดส่วนที่ร้อยละ 2 นอร์มอล-บิวเทนโดยโมล ในอากาศ โดยใช้วาดาเนียมไพโรฟอสเฟต (VPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และปฏิกิริยาดำเนินการที่อุณหภูมิ 404 องศาเซลเซียส และความดัน 330 กิโล

ปาสคาล [15] มีค่าการเปลี่ยนแปลงของนอร์มอล-บิวเทน เท่ากับร้อยละ 79.40 และค่าการเลือกเกิดร้อยละ 71.20

2. การแยกสาร: หอดูดซับ (T-100) และหอกลั่นแยก (T-101)

- สารที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ (CRV-100) ประกอบด้วยก๊าซผสมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ คาร์บอนออกไซด์ สารตั้งต้นที่ไม่ทำปฏิกิริยา และสารประกอบอื่น ก๊าซดังกล่าวถูกปรับความดันและอุณหภูมิสายก่อนเข้าหอดูดซับที่ 122 กิโลปาลคาล และ 125 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าหอดูดซับ (T-100) ที่ความดัน 825-885 torr ด้วยสารละลายอินทรีย์ไดบิวทิวพทาเลตเพื่อแยกมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากสารประกอบอื่น [33-34] สารที่ถูกดูดซับได้จากหอดูดซับ (T-100) จะถูกปรับอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าหอกลั่นแยกเพื่อแยกสารละลายด้วยหอกลั่นแบบ Partial distillation ซึ่งมีความดันภายในหอช่วง 50-87 torr สารที่ไม่ถูกควบแน่นจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม [32, 35-36]

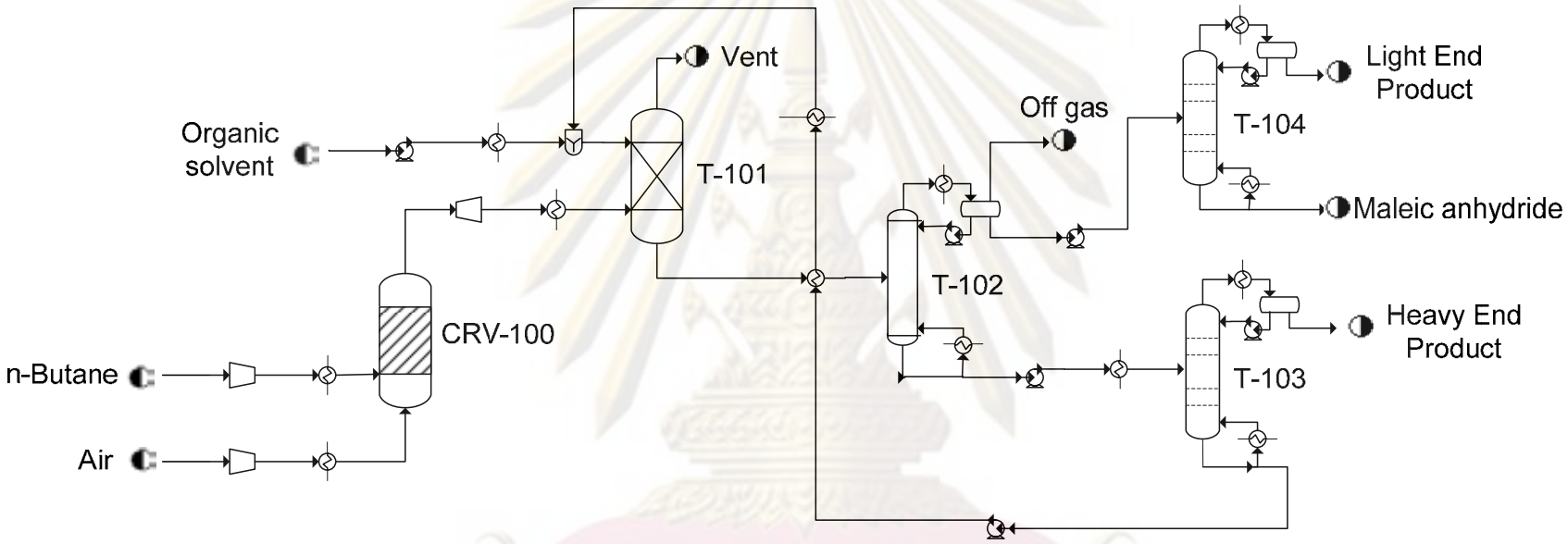
3. การทำให้บริสุทธิ์: หอกลั่นสารละลาย (T-102) และหอกลั่นผลิตภัณฑ์

- หอกลั่นสารละลาย (T-102) ทำหน้าที่ในการกลั่นแยกสารละลายกับสารประกอบอื่นจากสารที่แยกได้ของหอแยก (T-101) ทางด้านล่างหอ เพื่อทำให้บริสุทธิ์ก่อนนำกลับไปใช้ใหม่ [32] โดยปรับสภาวะก่อนเข้าหอกลั่นที่มีความดัน 2-30 กิโลปาสคาล ส่วนสารที่แยกได้จากด้านบนของหอกลั่นแยก (T-101) ทำการกลั่นผลิตภัณฑ์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ตามที่ต้องการ โดยใช้ความดันภายในหอกลั่นแยก 100-760 มิลลิเมตรปรอท [37-38]

2.2.4.2 **กระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน**

สารตั้งต้นนอร์มอล-เพนเทน และอากาศ ทำปฏิกิริยากันที่ 320-380 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการดำเนินการคือ วาดาเนียมไพโรฟอสเฟต (VPO) [28] ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) โดยเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันของนอร์มอล-เพนเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดง

$$C_5H_{12} + 5\,O_2 \longrightarrow C_4H_2O_3 + CO_2 + 5\,H_2O \quad \Delta H = -1851\ kJ/mol \quad (6)$$



ภาพที่ 2.8 กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ดังนี้

$$2\ C_5H_{12} + 8.5\ O_2 \longrightarrow C_8H_4O_3 + 2\ CO_2 + 10\ H_2O \quad \Delta H = -1638\ kJ/mol \quad (7)$$

$$C_5H_{12} + 5.5\ O_2 \longrightarrow 5\ CO + 6\ H_2O \quad \Delta H = -1852\ kJ/mol \quad (8)$$

$$C_5H_{12} + 8\ O_2 \longrightarrow 5\ CO_2 + 6\ H_2O \quad \Delta H = -3268\ kJ/mol \quad (9)$$

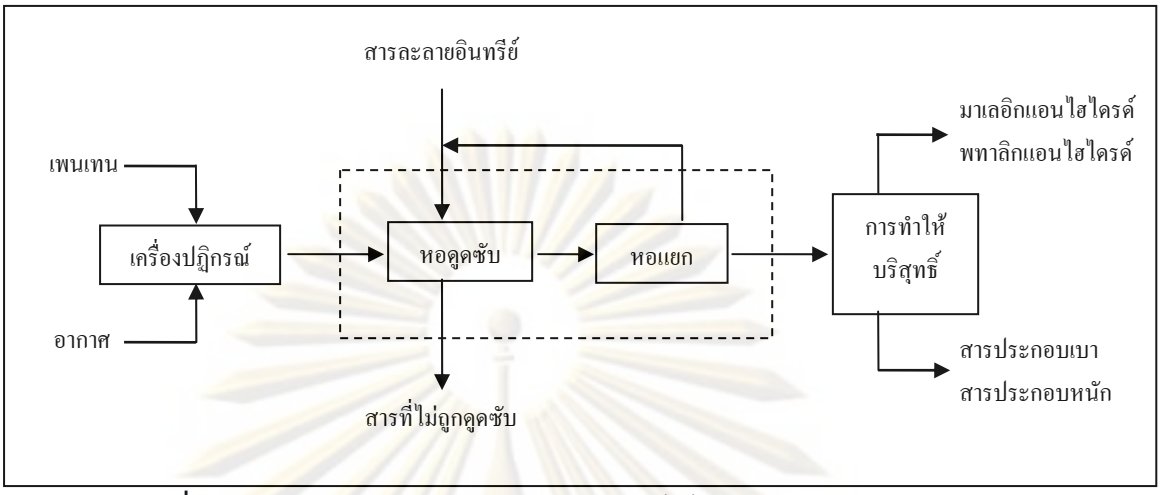
นอกจากปฏิกิริยาข้างเคียง (7) – (9) แล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่น ๆ ด้วย [10, 39] คือ กรดอะซิติก กรดอะคลิลิก ซิทราโคนิก แอนไฮไดรด์ ซินนามัลดีไฮด์ ซึ่งจะเกิดที่ความเข้มข้นของนอร์มอล-เพนเทนสูง ซึ่งปฏิกิริยาที่ (7) เป็นปฏิกิริยาการเกิดพทาลิกแอนไฮไดรด์ซึ่งถือผลิตภัณฑ์พลอยได้

กระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนการแยกสาร และส่วนการทำให้บริสุทธิ์ โดยภาพที่ 2.9 แสดงแผนผังของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

เครื่องปฏิกรณ์: ปฏิกิริยาออกซิเดชันของนอร์มอล-เพนเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดขึ้นด้วยการใช้วาดาเนียมไพโรฟอสเฟต (VPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในการออกซิเดชันของนอร์มอล-เพนเทนเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงหลักเป็นพทาลิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของกระบวนการผลิตนี้

การแยกสาร: สารที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์เป็นก๊าซผสมที่มีทั้งมาเลอิกแอนไฮไดรด์ พทาลิกแอนไฮไดรด์ คาร์บอนออกไซด์ สารตั้งต้นที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา และสารประกอบอื่นๆ โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพทาลิกแอนไฮไดรด์จะถูกดูดซับลงมาพร้อมกันด้วยสารละลายไดบิวทิวพทาเลต ก่อนทำการแยกสารละลายออกจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยการกลั่นแยก

การทำให้บริสุทธิ์: มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กลั่นแยกได้จากหอกลั่นแยกถูกทำให้บริสุทธิ์เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ตามต้องการโดยการใช้หอกลั่น ส่วนพทาลิกแอนไฮไดรด์ถูกแยกออกจากสารละลายเพื่อกลายเป็นผลิตภัณฑ์และให้มีความบริสุทธิ์ตามต้องการด้วยการกลั่น และสารละลายอินทรีย์ที่แยกได้นั้นถูกป้อนกลับไปใช้ใหม่



ภาพที่ 2.9 แผนผังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

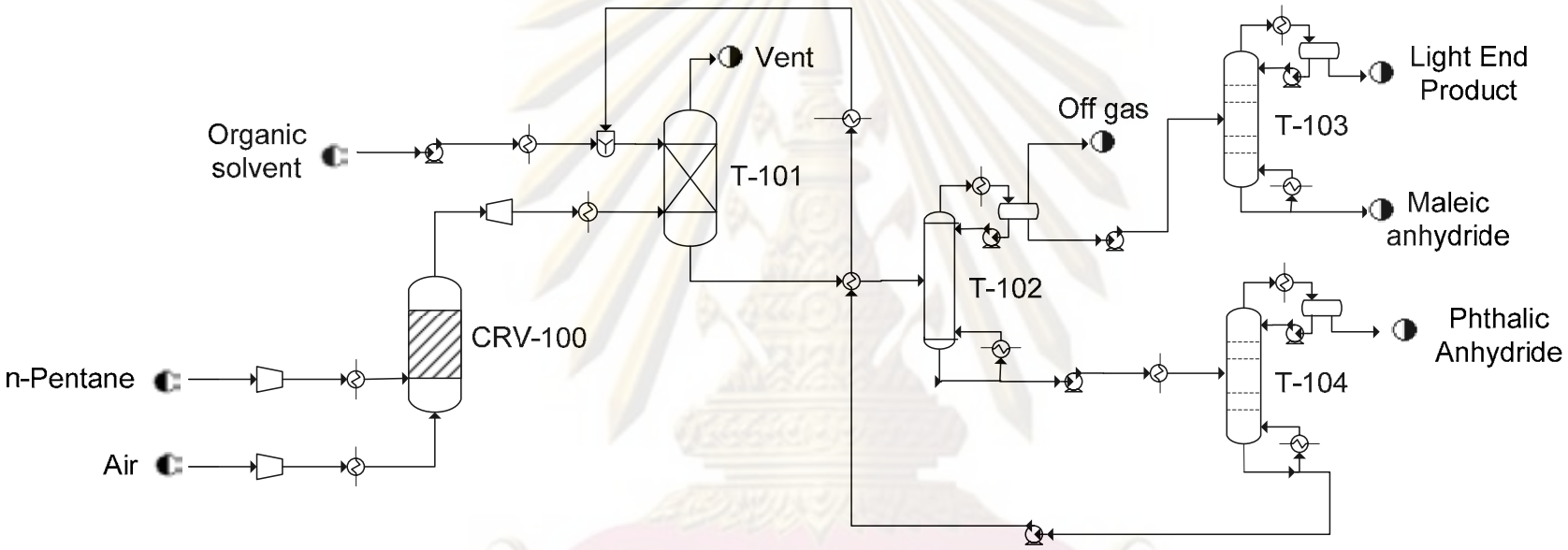
การจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ประกอบด้วย 5 หน่วยปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์: เครื่องปฏิกรณ์ (CRV-100)

- ปฏิกิริยาออกซิเดชันของนอร์มอล-เพนเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดขึ้นด้วยการใช้วาดาเนียมไพโรฟอสเฟต (VPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่สัดส่วนสายป้อน ร้อยละ 1 โดยโมลนอร์มอล-เพนเทนในอากาศ โดยมีสภาวะในเครื่องปฏิกรณ์ (CRV-101) ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ [5] มีค่าการเปลี่ยนแปลงของนอร์มอล-เพนเทนร้อยละ 90 และมีค่าการเลือกเกิดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพทาลิกแอนไฮไดรด์เท่ากับร้อยละ 41 และ 22

2. การแยกสาร: หอดูดซับ (T-100) และหอกลั่นแยก (T-101)

- เทคนิคการดูดซับถูกนำมาใช้สำหรับการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากก๊าซตัวอื่น ๆ ด้วยสารละลายอินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นสารละลายในการดูดซับคือ ไดบิวทิวพทาเลต ซึ่งมาเลอิกแอนไฮไดรด์และพทาลิกแอนไฮไดรด์จะถูกดูดซับลงมาพร้อมกัน [40] โดยปรับความดันและอุณหภูมิก่อนเข้าหอดูดซับที่ 915 torr และ 125 องศาเซลเซียส เพื่อเข้าหอดูดซับ (T-100) ที่มีความดัน 825-885 torr จากนั้นจึงทำการแยกสารละลายด้วยหอกลั่นแยก (T-101) แบบ Partial distillation มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกแยกออกทางด้านบนของหอกลั่น และพทาลิกแอนไฮไดรด์ถูกแยกออกทางด้านล่างหอกลั่น โดยมีความดันในหอกลั่นแยก (T-101) ที่ 50-87 torr



ภาพที่ 2.10 กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การทำให้บริสุทธิ์: หอกลั่นมาเลอิกแอนไฮไรด์ (T-102) และหอกลั่นพทาลิกแอนไฮไดรด์ (T-103)ผลิตภัณฑ์

- มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกทำให้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยหอกลั่นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (T-102) โดยปรับความดันเป็น 1 ความดันบรรยากาศ ก่อนเข้าหอกลั่น (T-102) ที่ความดัน 100-760 มิลลิเมตรปรอท ส่วนการแยกพทาลิกแอนไฮไดรด์จากสารละลายอินทรีย์ให้มีที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยปรับให้มีความดัน 30 กิโลปาสคาล ก่อนเข้าหอกลั่นพทาลิกแอนไฮไดรด์ (T-103) ที่ความดัน 2-30 กิโลปาสคาล ส่วนสารละลายอินทรีย์ที่แยกได้ถูกปรับสภาวะใหม่ก่อนนำกลับไปใช้ใหม่

2.2.4.3 **กระบวนการผลิตผ่านโพรเพน**

จากสิทธิบัตร US Patent 7,019,165 B2 **[9]** ศึกษาการออกซิเดชันของโพรเพนบนตัวเร่งปฏิกิริยา NbPMo11V ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส พบว่าโพรเพนมีค่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 29 และมีค่าการเลือกเกิดเป็นมาเลอิกแอนๆไฮไดรด์ร้อยละ 20.9 และให้ผลิตภัณฑ์ร่วมเป็นกรดอะซิติกที่การเลือกเกิดร้อยละ 14.8 และงานวิจัยของ Jie Tang และคณะ **[8]** ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 37.4 ที่ค่าการเลือกเกิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์เท่ากับร้อยละ 53.6 โดยให้กรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมเช่นเดียวกันที่ค่าการเลือกเกิดร้อยละ 58.9 บนตัวเร่งปฏิกิริยา VMoO ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการออกซิเดชันของโพรเพนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ถูกแสดงดังสมการข้างล่าง

$$C_3H_8 + 7\,O_2 \longrightarrow C_4H_2O_3 + 2\,CO_2 + 7\,H_2O \qquad \Delta H = -1333\ kJ/mol \qquad (10)$$

ซึ่งมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น ดังนี้

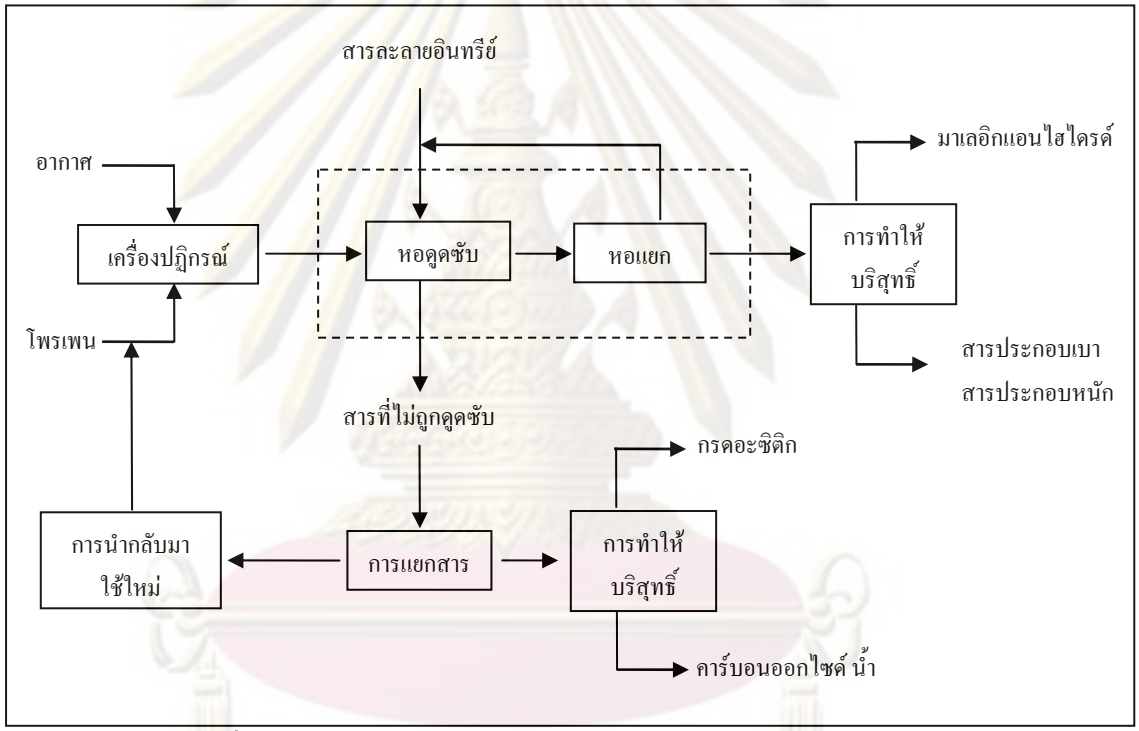
$$C_3H_8 + 3\,O_2 \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 2\,H_2O \qquad \Delta H = -1207\ kJ/mol \qquad (11)$$

$$C_3H_8 + 3.5\,O_2 \longrightarrow 3\,CO + 4\,H_2O \qquad \Delta H = -1192\ kJ/mol \qquad (12)$$

$$C_3H_8 + 5\,O_2 \longrightarrow 3\,CO_2 + 4\,H_2O \qquad \Delta H = -2041\ kJ/mol \qquad (13)$$

นอกจากปฏิกิริยาข้างเคียง (11) – (13) แล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่น ๆ [7-9] ด้วย กรดอะคลิลิก โพรไพลีน ซึ่งปฏิกิริยาที่ (11) เป็นปฏิกิริยาการเกิดกรดอะซิติกซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้

การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรผ่านโพรเพน ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนการแยกสาร ส่วนการทำให้บริสุทธิ์ และส่วนการนำสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ โดยภาพที่ 2.11 แสดงแผนผังของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน



ภาพที่ 2.11 แผนผังกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

เครื่องปฏิกรณ์: โพรเพนและออกซิเจนถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยการใช้ VMoO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงอื่น ๆ ร่วมด้วย และมีกรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้

การแยกสาร: ทำการแยกสาร 2 ส่วน คือ การแยกมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และการแยกกรดอะซิติก การแยกมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำได้โดยวิธีเดียวกับกระบวนการอื่น ๆ คือการดูดซับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยสารละลายอินทรีย์ไดบิวทิวพทาเลตก่อนและทำการแยกสารละลายด้วย

การกลั่นแยกแล้วนำสารละลายที่แยกได้กลับไปใช้ใหม่ และการแยกกรดอะซิติกทำได้โดยการดูดซับด้วยน้ำก่อนเข้าสู่ส่วนการทำให้กรดอะซิติกบริสุทธิ์ [41-42]

การทำให้บริสุทธิ์: มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ถูกแยกได้จากการกลั่นแยกสารละลายถูกทำให้มีความบริสุทธิ์ตามต้องการด้วยหอกลั่น ส่วนกรดอะซิติกเนื่องจากเป็น azoetrope กับน้ำทำให้ไม่สามารถกลั่นแยกจากกันได้ง่ายจึงใช้เทคนิคอื่น ๆ เช่น การกลั่นสกัดด้วยไตรบิวทิวลามีน (tributylamine) [43] ที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติ การใช้เทคนิคการสกัดด้วยสารละลาย เช่น เอทิลอะซิเตรต เมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์ (MTBE) [44-45] ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการสกัดด้วยเมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์ แล้วกลั่นแยกสารละลายกับกรดอะซิกติกออกจากกัน

ส่วนสารละลายเมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์ที่แยกจากกรดอะซิติกถูกปรับสภาวะเพื่อให้แยกจากน้ำและถูกแยกด้วยไอน้ำก่อนนำกลับไปใช้ใหม่

การนำกลับมาใช้ใหม่: ก๊าซที่เหลือจากการดูดซับกรดอะซิติกซึ่งส่วนใหญ่คือสารตั้งต้นโพรเพนและออกซิเจนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้าสู่ส่วนนี้เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยทำการควบแน่นน้ำและตามด้วยโพรเพน โดยโพรเพนทำการกลั่นให้บริสุทธิ์อีกครั้งก่อนนำกลับไปใช้ใหม่ ส่วนสารที่ไม่ถูกควบแน่นจะถูกเปลี่ยนคาร์บอกมอนอไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนำกลับไปใช้ใหม่เป็นสายออกซิเจน

การจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ประกอบด้วย 14 หน่วยปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

เครื่องปฏิกรณ์: เครื่องปฏิกรณ์ (CRV-100)

- การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพนเกิดขึ้นด้วยการใช้ VMoO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1 atm โดยการใช้สัดส่วนสายป้อนที่ โพรเพน:อากาศ = 1:3 (ปริมาตร) [8] มีค่าการเปลี่ยนแปลงของโพรเพนร้อยละ 37.4 และมีค่าการเลือกเกิดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์และกรดอะซิติกเท่ากับร้อยละ 53.6 และ 38.9 ตามลำดับ

การแยกสาร: การแยกมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ประกอบด้วยหอดูดซับ (T-100) และหอกลั่นแยก (T-101) และการแยกกรดอะซิติกประกอบด้วย หอดูดซับ (T-103) และหอกลั่น (T-104)

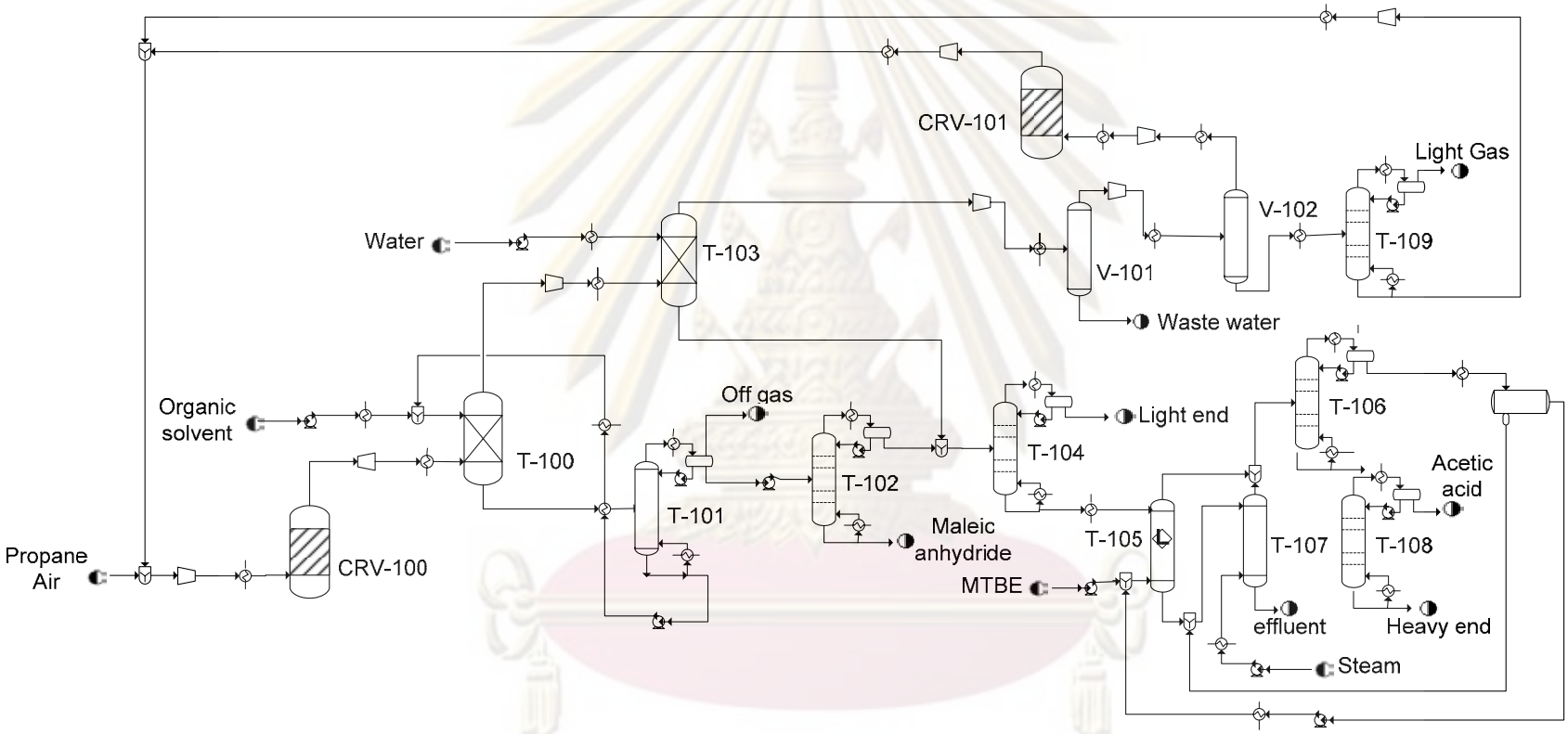
- การแยกมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำได้โดยวิธีเดียวกับกระบวนการอื่น ๆ คือการดูดซับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยสารละลายอินทรีย์ไดบิวทิวพทาเลต ด้วยหอดูดซับ (T-100) ที่มีความดัน 825-885 torr จากนั้นจึงทำการแยกสารละลายด้วยหอกลั่นแยก (T-101) แบบ Partial distillation มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกแยกออกทางด้านบนของหอกลั่น และนำสารละลายอินทรีย์ที่แยกได้กลับไปใช้ใหม่ หอกลั่นแยก (T-101) ที่ใช้มีความดันช่วง 50-87 torr

- การแยกกรดอะซิติกทำได้โดยการดูดซับด้วยน้ำ โดยทำการเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิเพื่อให้แยกได้ดีขึ้น ก่อนเข้าสู่หอดูดซับ (T-103) ด้วยน้ำที่มีความดันประมาณ 10 บรรยากาศ แล้วจึงเข้าสู่หอกลั่น (T-104) เพื่อแยกสารประกอบที่เบากว่ากรดอะซิติกด้วยความดันปกติ ก่อนป้อนเข้าสู่ส่วนการทำกรดอะซิติกบริสุทธิ์

ส่วนการทำให้บริสุทธิ์: การทำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ให้บริสุทธิ์โดยหอกลั่นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (T-102) และการทำกรดอะซิติกให้บริสุทธิ์ประกอบด้วย หอสกัด (T-105) หอกลั่นแยกสารละลาย (T-106) หอ stripping (T-107) และหอกลั่นแยกกรดอะซิติก (T-108)

- การทำให้มาเลอิกแอนไฮไดร์บริสุทธิ์ โดยป้อนสายที่แยกได้จากหอกลั่นแยก (T-101) เข้าสู่หอกลั่นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (T-102) เพื่อให้ได้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 ที่ความดัน 100-760 มิลลิเมตรปรอท

- การทำให้กรดอะซิติกบริสุทธิ์โดยการสกัดด้วยสารละลายเมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์ที่หอสกัด (T-105) ที่สภาวะปกติก่อนทำการกลั่นแยกสารละลายกับกรดอะซิกติกออกจากกันที่ความดันปกติด้วยหอกลั่นแยกสารละลาย (T-106) โดยสารละลายเมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์ที่แยกจากกรดอะซิติกทำการลดความดันและอุณหภูมิเพื่อแยกจากน้ำก่อนนำกลับไปใช้ใหม่ ส่วนที่มีน้ำปนอยู่มากทำการแยกสารละลายเมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์ด้วยไอน้ำที่หอ stripping (T-107) ด้วยความดันปกติเช่นกัน ก่อนนำสารละลายเมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์กลับไปใช้ใหม่เช่นเดียวกัน ส่วนกรดอะซิติกที่แยกได้จากหอกลั่นแยกสารละลาย (T-106) ถูกทำให้บริสุทธิ์เพิ่มขึ้นโดยการกลั่นแยกสารประกอบหนักที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศด้วยหอกลั่นแยกกรดอะซิติก (T-108) เพื่อให้ได้กรดอะซิติกมีความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 99.9



ภาพที่ 2.12 กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การนำกลับมาใช้ใหม่: ถังแยกน้ำ (V-101) ถังแยกโพรเพน (V-102) หอกลั่นแยกโพรเพน (T-109) และเครื่อง CO-convertor (CRV-101)

- ก๊าซที่เหลือจากการดูดซับกรดอะซิติกซึ่งส่วนใหญ่คือสารตั้งต้นโพรเพนและออกซิเจนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้าสู่ส่วนนี้เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยขั้นต้นเพิ่มความดันและลดอุณหภูมิและป้อนเข้าสู่ถังแยก (V-101) เพื่อแยกน้ำและสารที่ไม่ควบแน่นออกก่อนแล้วจึงลดอุณหภูมิอีกครั้งเพื่อแยกโพรเพนที่ถังแยก (V-102) แล้วทำการกลั่นโพรเพนให้บริสุทธิ์อีกครั้งก่อนนำกลับไปใช้ใหม่ที่ความดัน 60-80 บรรยากาศด้วยหอกลั่นแยกโพรเพน (T-109) ส่วนสารที่ไม่ควบแน่นจากถังแยก (V-102) ถูกป้อนเข้าสู่ CO-Converter เพื่อเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ **[41]** ที่ความดัน 3,500 กิโลปาสคาล และอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ก่อนนำออกซิเจนกลับไปใช้ใหม่

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Azapagic และคณะ (1999) **[46]** ได้ศึกษากระบวนการผลิตลิควิดคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน ซึ่งมีการปล่อย SO_2, NO_x และ VOCs ออกจากกระบวนการผลิต เพื่อเลือกกระบวนการผลิตที่มีความเหมาะสมที่สุดจึงหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตเข้าช่วยในการตัดสินใจ โดยจำแนกวิธีที่ใช้ในการกำจัด SO_2, NO_x และ VOCs ซึ่งในการกำจัดสารแต่ละตัวจะมีวิธีและกระบวนการกำจัดที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสม นอกจากนี้ยังมีการแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิตออกเป็นขั้นตอนย่อยๆ จากโครงการด้านสิ่งแวดล้อมของสหประชาชาติ

A. Tukker (2000) **[47]** ได้ศึกษาความแตกต่างระหว่างวิธีการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment : EIA) กับ การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) พบว่าการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (EIA) เป็นการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเฉพาะในส่วนของโรงงานว่ามีผลกระทบทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร ส่วนการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) นั้นเป็นการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงอายุของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่สามารถนำไปเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการได้

W.R. Johns และคณะ (2006) **[48]** งานวิจัยนี้ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ ปัญหาจากกระบวนการผลิตที่มีหลายผลิตภัณฑ์ และการ reuse หรือ recycle ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีความแตกต่างกัน โดย reuse คือการใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแห่งหนึ่งมาใช้ในอีกกระบวนการหนึ่ง ส่วน recycle คือการนำมาใช้ใหม่ในกระบวนการเดิม โดยงานวิจัยนี้ทำการศึกษาว่าในการพัฒนากระบวนการผลิตระหว่างการ reuse และการ recycle นั้นทางเลือกไหนที่จะให้ผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากสุด โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือในการศึกษา

A. Singh และคณะ (2007) **[49]** ได้ศึกษาการใช้ LCA ในการเปรียบเทียบความแตกต่างในการออกแบบกระบวนการผลิตของกลุ่มอุตสาหกรรมที่มีการเชื่อมต่อในการแลกเปลี่ยนมวลและความร้อนซึ่งกัน โดยใช้โปรแกรม TRACI เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดย USEPA ในการประเมินผลกระทบ ซึ่งในการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการออกแบบที่ต่างกันและระบุศักยภาพการแลกเปลี่ยนในผลกระทบแต่ละประเภท ข้อมูลนี้ให้ความเข้าใจเกี่ยวกับการช่วยเหลือเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมของ industrial ecosystems และเพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนา eco-effective symbiosis สำหรับการทำให้นำมาใช้ประโยชน์ได้อีก (reuse) การเอาไปใช้ใหม่ (recycle) และการอนุรักษ์แหล่งทรัพยากร

K.G.Harding และคณะ (2007) **[50]** ได้ใช้เครื่องมือการประเมินจักรชีวิตช่วยในการตัดสินทางเลือกของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ระหว่าง สารอินทรีย์ (เอ็มไซม์) และสารอนินทรีย์ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) และยังศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการใช้แอลกอฮอล์ต่างชนิดกันคือ เอทานอลและเมทานอซ พร้มทั้งศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากของการนำกลับมาใช้ใหม่ที่สัดส่วนต่าง ๆ พบว่า การใช้เอมไซม์มีผลกระทบต่อสิงแวดล้อมน้อยกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และการนำกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่มากกว่ามีผลกระทยต่อสิ่งแวด้อมน้อยกว่าเช่นกัน

R. K. Foolmaan และคณะ (2008) **[51]** ได้ทำการเปรียบเทียบทางเลือกในการกำจัดขวด Polyethylene Terephthalate (PET) เนื่องจากปริมาณการใช้มีมากขึ้น โดยใช้การปนะเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องอมือในการตัดสินใจ โดยแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษา คือ การฝังกลบร้อยละ 100 การเผาไหม้ร้อยละ 100 และการฝังกลบร้อยละ 50 กับการเผาไหม้ร้อยละ 50 โดยใช้โปรแกรม SimaPro

5.1 และดัชนีชี้วัด Eco-indicator 99 พบว่า ประมาณร้อยละ 90 ของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมาจากขั้นตองการประกอบชิ้นส่วนและการกำจัดโดยวิธีการเผาร้อยละ 100 นั้นเป็นวิธีที่ดีที่สุด

C. Kiwjaroun และคณะ (2009) **[52]** ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเปรียบเทียบกันระหว่างกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤต โดยการจำลองกระบวนการผลิตผ่านโปรแกรม Hysys.Plant Version 3.2 เพื่อเก็บข้อมูลวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมและทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี Eco-indicator 99 ในโปรแกรม SimaPro@7.0 พบว่าการผลิตโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 38 โดยการผลิตด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสและการผลิตโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประมาณ 74 และ 102 Pt ตามลำดับ เนื่องจากมีการใช้พลังงานมากในขั้นตอนการเปลี่ยนสภาวะเมทานอล ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาและการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่

H. Sugiyama และคณะ (2005) **[53]** ได้ศึกษาการนำหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้กับการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยทำการพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของสารขาเข้าในขั้นตอนของการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมและนำเสนอวิธีการหาประเภทของรูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นให้มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลโดยใช้หลักการRank Order Correlation Coefficient กับ Maximum Likelihood Estimation (MLE) method จากนั้นทำ Monte Carlo Simulation ในการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

S. N. Djomo และคณะ (2008) **[54]** ทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเปรียบเทียบระหว่างการใช้มันสำปะหลังในการผลิตไฮโดรเจนกับการใช้มันสำปะหลังเป็นอาหารสัตว์ โดยการใช้วิธี IMPACT 2002+ ผลการศึกษาพบว่าการผลิตไฮโดรเจนจากมันสำปะหลังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้เป็นอาหารสัตว์โดยตรง ซึ่งสามารถลดปริมาณก๊าซที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ลดปริมาณพลังงานที่ไม่สามารถทดแทนได้ และลดผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์

Viral P. Shah และคณะ (2008) **[55]** ศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบทำความร้อนและทำความเย็น 3 ระบบ คือ เตาเผาอากาศร้อนและเครื่องทำอากาศเย็น หม้อต้มน้ำร้อนและเครื่องทำอากาศเย็น และปั๊มอากาศร้อน บนช่วงการศึกษา 35 ปี โดยใช้วิธี IMPACT2002+ พบว่าปั๊มอากาศร้อนส่งผลกระบบน้อยที่สุด และพบว่าประสิทธิภาพที่สูงจะลดผลกระทบของทั้งระบบ อีกทั้งและพบอีกว่าการใช้พลังงานทดแทนแทนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินจะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology **[56]** ได้แสดงอัตราการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทั่วโลกไว้ ดังตารางที่ 2.13 จากตารางกล่าวได้ว่าการผลิตจากบิวเทนมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้น แต่อัตราการผลิตจากเบนซีนลดลง ในขณะที่อัตราการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2.13 แสดงปริมาณการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ตามชนิดของเครื่องปฏิกรณ์

Reactor (feed)	1993 Actual[a]		2002 Actual[b]	
	kt/yr	%	kt/yr	%
Fixed bed (butane)	369	43.0	704	51.8
Fixed bed (benzene)	325	37.9	388	28.5
Fluid bed (butane)	127	14.8	217	16.0
Fixed bed (phthalic anhydride coproduct)	37	4.3	50	3.7
Total	858	100.0	1359	100.0

[a]*Maleic Anhydride World Survey*, Tecnon (U.K.) Ltd., London, 1992. [b]Industry source

B. D. Brown และคณะ (1972) **[57]** ได้ศึกษาการเร่งปฏิกิริยาของการออกซิเดชันเบนซีนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนตัวเร่งปฏิกิริยา วาดาเดียม/โมลิบดินัม เพื่อแสดงปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการก๊าซและก๊าซ-ของแข็ง ผลตรงกับกลไกซึ่งเบนซีนและออกซิเจนเคลื่อนตัวเพื่อฟอร์มบนตัวเร่งปฏิกิริยา การหลุดหรือคายการดูดซับ และทำปฏิกิริยาให้มาเลอิกแอนไฮไดรด์อย่างสมบูรณ์ในวัฏภาคก๊าซ บนพื้นฐานของกลไกที่เสนอนี้ kinetic ของแต่ละปฏิกิริยาถูก

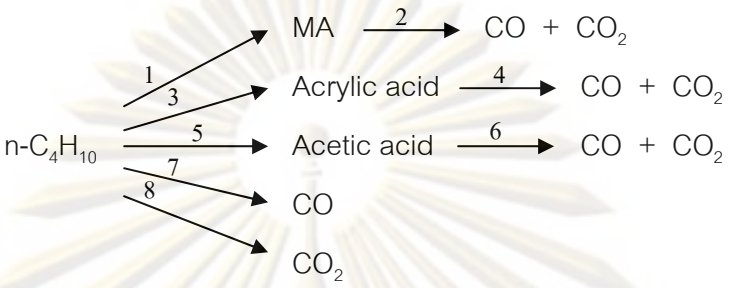
ศึกษาอย่างลึกซึ้ง การออกซิเดชันเกิน (over-oxidation) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์พบว่าไม่พบสัญญาณภายใต้สภาวะของปฏิกิริยา ความสัมพันธ์ทาง kinetic ของ homogeneous decomposition ของเบนซีน-ออกซิเจน และการออกซิเดชันของเบนซีน-ออกซิเจนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลักฐาน ผลแสดงว่าจุดสำคัญทั้งหมดของแอนไฮไดรด์เกิดจากปฏิกิริยาการผสมกันของก๊าซและก๊าซ-ของแข็ง ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ถูกผลิตอย่างสมบูรณ์ในการเร่งปฏิกิริยา

K. Shima และคณะ (1997) **[14]** ได้ทำการศึกษาการใช้ $(VO)_2P_2O_7$ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับการออกซิเดชันของบิวเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ของวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะในการทำปฏิกิริยาเมื่อถูกใช้เป็นตัวเร่ง พบ ว่าที่วิธีการเตรียมที่ต่างกันเป็นผลให้พื้นที่ผิวเฉพาะต่างกัน แต่ก็ไม่มีผลต่อธรรมชาติของ active site activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งที่ความเข้มข้นสูงประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาของ $(VO)_2P_2O_7$ จะสูงกว่า และไม่เพียงแต่การกระตุ้นของบิวเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น แต่การ reoxidation ของตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีความสำคัญในการออกซิเดชันของบิวเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา $(VO)_2P_2O_7$ เช่นกัน พร้อมทั้งได้ศึกษาและทำการเปรียบเทียบเทคโนโลยีอุตสาหกรรมที่ใช้ในการผลิตระหว่างเทคโนโลยี fixed bed และ fluidized bed และศึกษาคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาของ $(VO)_2P_2O_7$

Xavier Domènech และคณะ (2002) **[58]** ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อประเมินปฏิกิริยาเคมีจากการพิจารณาสิ่งแวดล้อม วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้เพื่อใช้วิธีนี้เป็นเครื่องมือเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมเพื่อ green chemistry โดยกรณีศึกษาเป็นการเปรียบเทียบการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จาก 2 ทาง โดยการใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อยืนยันว่าทางหนึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่สุด จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการประเมินวัฏจักรชีวิตสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินสำหรับการประเมินสิ่งแวดล้อมของปฏิกิริยาเคมี เพราะการประเมินวัฏจักรชีวิตนับรวมขั้นตอนวงจรชีวิตทั้งหมดของกระบวนการผลิต และอภิปรายผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามกลุ่มของผลกระทบ

M. Dente และคณะ (2003) **[59]** ได้ศึกษา kinetic ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของบิวเทนเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น VPO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด

พบว่าได้ถูกสร้างแบบจำลอง 8 ปฏิกิริยา ที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของบิวเทน รวมถึงการเผาไหม้ของอะซิติกแอซิดและอะไคลิกแอซิด ดังปฏิกิริยา ดังนี้



ภาพที่ 2.13 แสดงโครงข่ายปฏิกิริยาที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์

M. J. Lorences และคณะ (2003) **[30]** ได้ศึกษาเทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับกระบวน การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากปฏิกิริยาการออกซิเดชันของบิวเทน โดยกระบวนการใหม่ให้ผลผลิตที่สูงกว่าและการลงทุนที่ต่ำกว่า และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ด้วยการลดปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนให้น้อยลง ซึ่งได้ศึกษาถึงผลกระทบหลายอย่างที่มีผลต่อค่าการเลือกเกิดของมาเลอิกแอนไฮไดรด์กับผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยมีผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็น อะซิติกแอซิด และ อะไคลิกแอซิดและผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ไม่ต้องการเป็น ฟูมาริกแอซิด มีทาไคลิกแอซิด และ พทาลิกแอซิด และศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยในการทดลองได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น vanadium phosphorus oxide (VPO) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด ภายใต้สภาวะต่าง ๆ พบว่าที่ความเข้มข้นของบิวเทนร้อยละ 4 และความเข้มข้นออกซิเจนร้อยละ 9 ให้อัตราการเกิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์ดีที่สุด และยังเป็นการป้องกันการเกิดผลิตภัณฑ์พลอดได้ที่ไม่ต้องการได้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

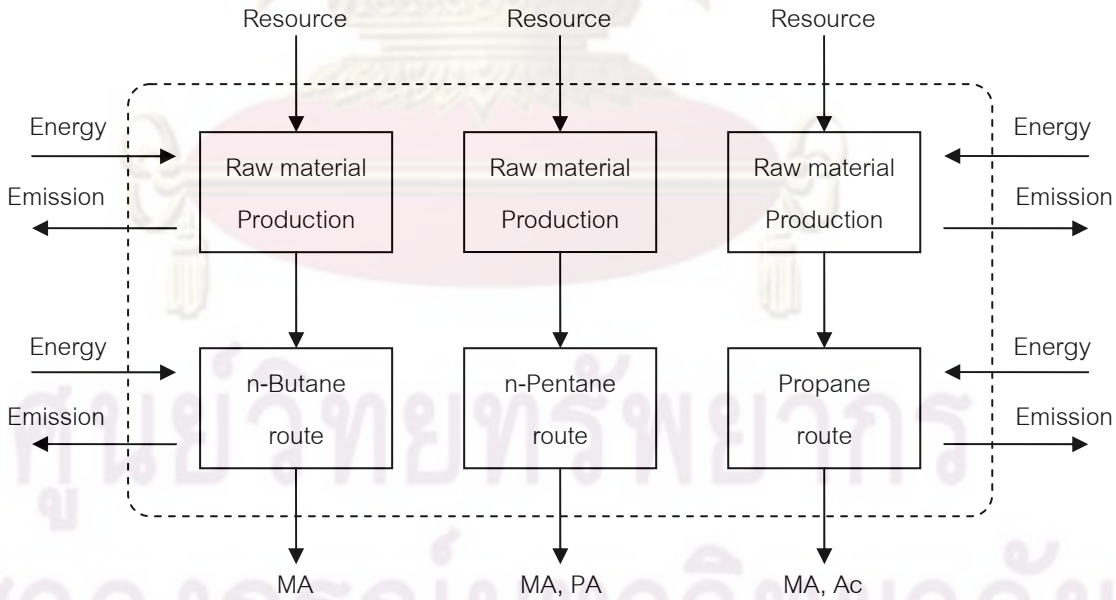
บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์

3.1.1 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย (Goal and Scope Definition)

3.1.1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย (Objective and purpose)

เพื่อประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากทางเลือกต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของระบบการศึกษาของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์แบบ “Cradle-to-gate” ซึ่งมีขอบเขตของระบบเฉพาะขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ สำหรับขั้นอตนการขนส่ง การนำไปใช้ การใช้ซ้ำ การบำรุงรักษา การนำกลับมาใช้ใหม่และการกำจัดของเสีย ไม่ได้นำมาพิจารณา



ภาพที่ 3.1 ขอบเขตของระบบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

3.1.1.2 **หน่วยหน้าที่** (functional unit)

หน่วยการทำงาน (Functional unit) ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้คือ ปริมาณการผลิต 1 กิโลกรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

3.1.1.3 **ข้อสมมุติฐานและข้อจำกัด** (Limitation and Assumption)

การออกแบบและจำลองกระบวนการผลิตที่ใช้ในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยนี้ ได้เก็บรวบรวมมาจากบทความจากเอกสารทางวิชาการระดับนานาชาติและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องและจำลองกระบวนการผลิตด้วยโปรแกรม HYSYS และใช้ฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์จากโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0

นอกจากนี้การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่ประเมินถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.2 **การทำบัญชีรายการ** (Life Cycle Inventory: LCI)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลด้านการใช้วัตถุดิบ พลังงาน รวมถึงของเสียที่ปล่อยออกจากการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ด้วยทางเลือกต่าง ๆ คือ การผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน การผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน และการผลิตผ่านโพรเพน โดยมีขอบเขตการศึกษาดังที่ได้อธิบายในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาไว้แล้ว โดยทำสมดุลมวลสารและพลังงานจากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตผ่านโปรแกรม Hysys.Plant Version 3.1

3.1.3 **การประเมินผลกระทบ** (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

ในการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์แบบ “Cradle-to-Gate” ของงานวิจัยนี้ใช้ฐานข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0 และใช้วิธี IMPACT 2002+ เป็นวิธีในแยกประเภทและหาค่าผลกระทบ ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกพัฒนาจากวิธี IMPACT 2002 ร่วมกับ Eco-indicator 99, CML และ IPCC

วิธีการประเมินผลกระทบในงานวิจัยนี้มีขั้นตอน คือ การทำ Characterization เพื่อทราบถึงปริมาณหรือค่าน้ำหนักผลกระทบที่เกิดขึ้นในด้านต่างๆ การหาค่าผลกระทบ (Damage assessment) การเทียบหน่วย (normalization) และการทำให้น้ำหนักผลกระทบมีคะแนนเดี่ยว (single score) ซึ่งค่าแฟกเตอร์ (factor) สำหรับนำมาคูณกับข้อมูลที่ได้เก็บรวมรวมข้อมูลเพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี IMPACT 2002+ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

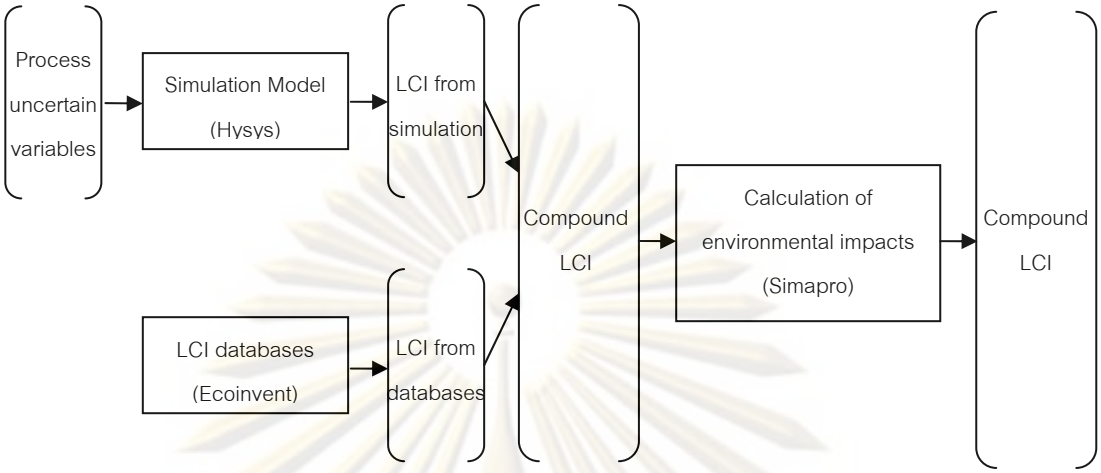
3.1.5 **การแปลผล** (life Cycle Interpretation)

ในขั้นตอนการแปลผล เป็นการประเมินโอกาสที่เป็นไปได้ในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ จากขั้นตอนของการประเมินผลกระทบ ทำให้สามารถชี้ชัดลงไปได้อย่างชัดเจนถึงกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และควรมีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุง เพื่อทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดีขึ้น

3.1.6 **การประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ความไม่แน่นอน**

งานวิจัยนี้ศึกษาความไม่แน่นอนของข้อมูลและกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลให้เกิดปริมาณมวลสารและพลังงานในกระบวนการผลิตเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดความไม่แน่นอนเกิดขึ้นของการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้ความไม่แน่นอนของบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมจากฐานข้อมูลของโปรแกรมด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.2 กรอบการทำงานร่วมกันระหว่างการจำลองกระบวนการผลิตและการประเมินวัฏจักรชีวิต

3.1.7 การพัฒนากระบวนการผลิต

การปรับปรุงพัฒนากระบวนการผลิตสามารถทำได้หลายทาง เช่น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีความเหมาะสมมากขึ้น การพัฒนาสารตั้งต้นอื่นที่เหมาะสมในการนำมาผลิต การพัฒนาวิธีการนำสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ รวมถึงการทำโครงข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger network) เพื่อลดการใช้พลังงานก็เป็นทางเลือกหนึ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลจากการทำโครงข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger network) เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน ค่าใช้จ่าย และลดผลกระทบอันมีต่อสิ่งแวดล้อม

3.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.4.1 โปรแกรม Hysys.Plant Version 3.1 สำหรับการจำลองกระบวนการผลิต

3.4.2 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro©6.0 สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

3.4.3 โปรแกรม Microsoft Office XP® สำหรับการจัดทำรายงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิจัยและวิจารณ์จากการประเมินค่าผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จาการใช้นอล์มอล-บิวเทน นอล์มอล- เพนเทน และโพรเพนเป็นสารตั้งต้น โดยใช้ IMPACT 2002+ เป็นวิธีในการประเมินค่าผลกระทบ ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

4.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ในงานวิจัยนี้ การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จะทำการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน (n-C4) นอร์มอล-เพนเทน (n-C5) และโพรเพน (C3) โดยกำหนดหน่วยการทำงาน (Functional unit) สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ปริมาณ 1 กิโลกรัมของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อให้ข้อมูลปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบตั้งอยู่บนพื้นฐานเดียวกันและสามารถเปรียบเทียบผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมของแต่ละกระบวนการได้

การแสดงผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะแสดงผลทั้งในขั้นปลาย (Endpoint) โดยขั้นปลายแสดงผลในรูปของหน่วยเฉพาะที่แตกต่างไปตามกลุ่มประเภทของผลกระทบ และหลังการเทียบหน่วยและให้น้ำหนักของผลกระทบแล้วซึ่งแสดงผลในลักษณะของกราฟที่ให้ค่าน้ำหนักของผลกระทบแล้วและในลักษณะของกราฟเชิงเดี่ยว (single score) เนื่องจากเป็นวิธีการแสดงผลที่ง่ายต่อความเข้าใจ และแสดงผลออกมาในลักษณะการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบแยกย่อย ซึ่งจำแนกผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ออกเป็นผลกระทบย่อย ๆ เช่น ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human health) ผลกระทบต่อการลดลงของชั้นโอโซน (Ozone layer depletion) ผลกระทบต่อโลกร้อน (Global warming) ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในน้ำ (Aquatic exotoxicity) ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดิน (Terrestrial ecotoxicity) เป็นต้น

4.1.1 **การทำบัญชีรายการ** (Life Cycle Inventory: LCI)

ในการประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับมวลสาร พลังงาน และของเสียที่ปลดปล่อยออกจากกระบวนการต่าง ๆ ตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบ “Cradle-to-Gate” ซึ่งมีขอบเขตของระบบเฉพาะขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลของโปรแกรมในการประเมินวัฏจักรชีวิต ส่วนขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์เก็บข้อมูลผ่านการจำลองกระบวนการผลิตด้วยโปรแกรม HYSYS

ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ หมายถึง ขั้นตอนตั้งแต่การได้มาหรือการสกัดวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติ ผ่านกระบวนการต่าง ๆ จนกลายมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เช่น การผลิตนอร์มอล-บิวเทน การผลิตออกซิเจน เป็นต้น

ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ หมายถึง ขั้นตอนตั้งแต่การนำวัตถุดิบมาเข้าสู่กระบวนการผลิตเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์

มวลสารทั้งปริมาณของวัตถุดิบและของเสียที่ปลดปล่อยจากกระบวนการผลิต รวมถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกแสดงในตารางที่ 4.1 – 4.3 โดยแสดงเป็นต่อ 1 กิโลกรัมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ตามหน่วยการทำงาน

4.1.2 **การประเมินผลกระทบ** (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

จากตารางที่ 4.1 ถึง ตารางที่ 4.3 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิต ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต และปริมาณสารที่ปล่อยจากกระบวนการผลิตสู่สิ่งแวดล้อม จากตารางดังกล่าวพบว่าแต่ละกระบวนการผลิตมีการใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน ดังนั้นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นย่อมแตกต่างกัน ในขั้นตอนนี้จะทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี IMPACT 2002+

ตารางที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	นอร์มอล-บิวเทน (n-C4)	นอร์มอล-เพนเทน (n-C5)	โพรเพน (C3)
มาเลอิกแอนไฮไดรด์	1.0000	1.0000	1.0000
พทาลิกแอนไฮไดรด์	-	0.8167	-
กรดอะซิติก	-	-	0.4420

ตารางที่ 4.2 ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

	นอร์มอล-บิวเทน (n-C4)	นอร์มอล-เพนเทน (n-C5)	โพรเพน (C3)
วัตถุดิบ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)			
นอร์มอล-บิวเทน	0.8822	-	-
นอร์มอล-เพนเทน	-	1.9965	-
โพรเพน	-	-	1.5158
อากาศ	21.4268	79.0035	-
ออกซิเจน	-	-	3.1387
ไดบิวทิวพทาเลต	0.0008	0.0022	0.0018
น้ำ	-	-	0.3000
เมทิลเทอร์เทียรีบิวทิวอีเทอร์	-	-	0.000001
พลังงาน (กิโลจูนต่อชั่วโมง)			
พลังงานทำความร้อน	17,075.2810	68,341.7043	46,445.5869
พลังงานทำความเย็น	31,846.0417	111,596.1244	107,040.4389
พลังงานไฟฟ้า	6,367.1315	3,713.3024	29,862.9366

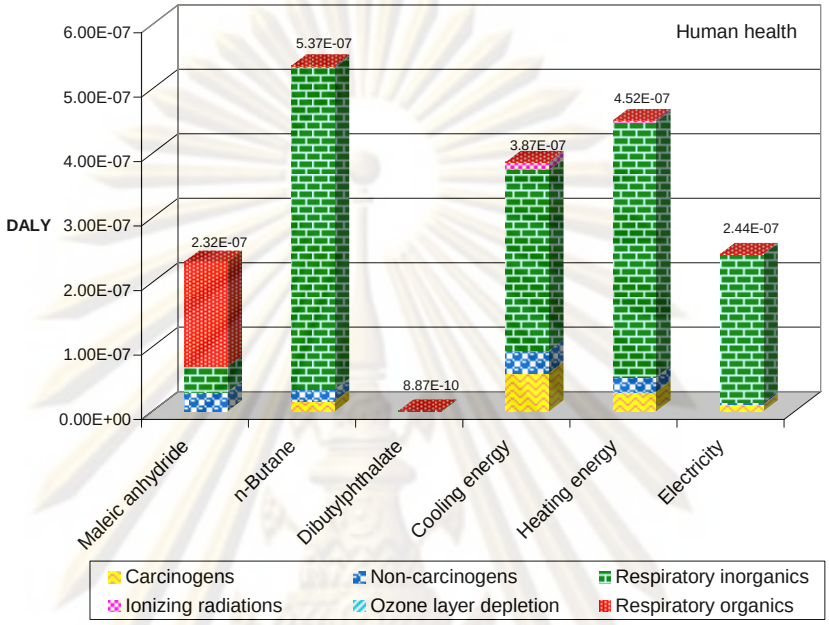
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

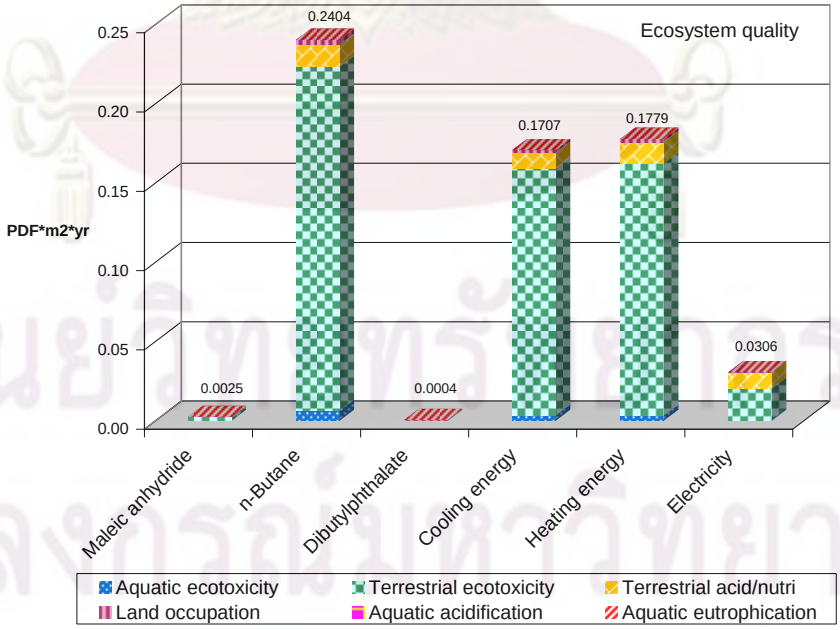
	นอร์มอล-บิวเทน (n-C4)	นอร์มอล-เพนเทน (n-C5)	โพรเพน (C3)
ของเสียที่ปล่อยสู่อากาศ (กก./ชม.)			
นอร์มอล-บิวเทน	0.1726	-	-
ไอโซ-บิวเทน	0.0441	-	-
นอร์มอล-เพนเทน	-	0.1897	-
ไอโซ-เพนเทน	-	0.0998	-
โพรเพน	-	-	0.1786
โพรไพรีน	-	-	0.0758
ออกซิเจน	3.4268	13.9029	0.0624
ไนโตรเจน	16.6670	61.4535	-
มาเลอิกแอนไฮไดรด์	0.0013	0.0013	0.0001
น้ำ	0.7975	2.1011	0.0305
คาร์บอนมอนอกไซด์	0.0535	0.1636	0.0001
คาร์บอนไดออกไซด์	0.0826	1.1936	1.2644
กรดอะซิติก	0.0158	0.0107	0.0001
กรดอะคิลิกแอซิด	0.0097	-	-
กรดเมทาไคลิก	0.0007	-	-
ไดบิวทิวพทาเลต	0.0008	0.0022	-
ของเสียที่ปล่อยสู่น้ำ (กก./ชม.)			
มาเลอิกแอนไฮไดรด์	-	-	0.0010
น้ำ	0.0320	0.0663	1.8626
กรดอะซิติก	0.0031	0.0007	0.0023
กรดอะคิลิกแอซิด	0.0010	-	0.0347
พทาลิกแอนไฮไดรด์	0.0004	-	-
กรดฟูมาลิก	0.0009	-	-
ไดบิวทิวพทาเลต	-	-	0.0018

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

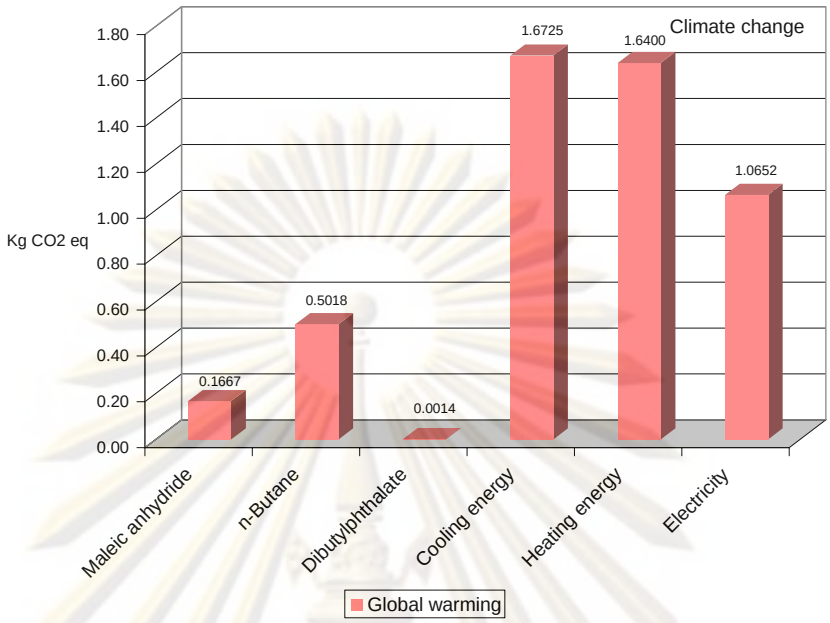
4.1.2.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน



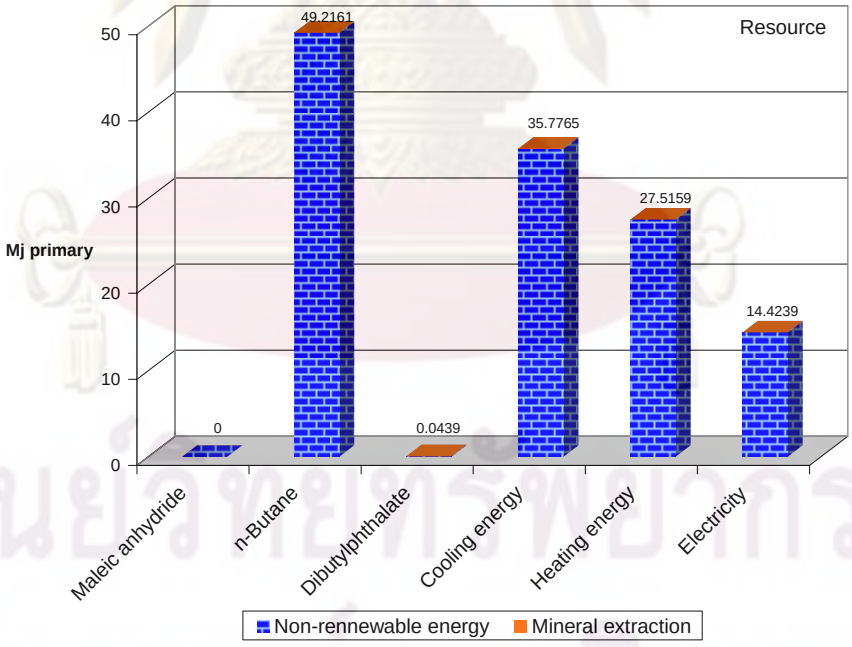
ภาพที่ 4.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์



ภาพที่ 4.2 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศน์



ภาพที่ 4.3 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง

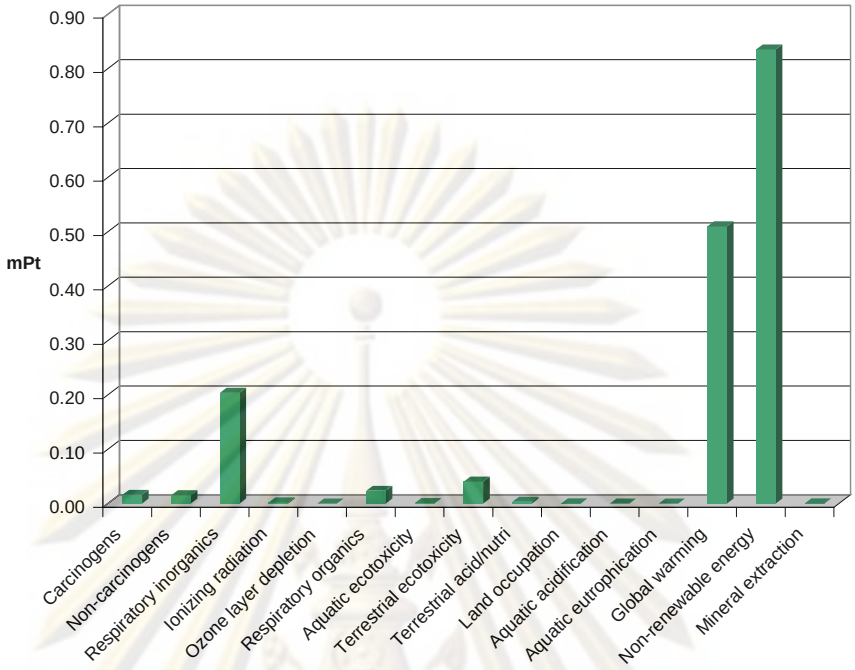


ภาพที่ 4.4 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ด้านผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร

จากภาพที่ 4.1-4.4 พิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์พบว่า ในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบทั้งหมดส่งผลกระทบชัดเจนในด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ ในขณะที่ขั้นตอนกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์มากที่สุด ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์พบว่ามีผลกระทบมากในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดินในทุกขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบ ผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนพบว่าทุกขั้นตอนส่งผลกระทบในด้านนี้ และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรมีการใช้พลังงานที่ไม่สามารถทดแทนได้มากกว่าการสกัดแร่ธาตุ เนื่องจากนอร์มอล-บิวเทนและพลังงานที่ใช้ในระบบต่างได้มาจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้แร่ธาตุ

เมื่อพิจารณาถึงแต่ละสาร พบว่าขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบ นอร์มอล-บิวเทนส่งผลกระทบสูงกว่าขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบอื่น และมากกว่าผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยส่งผลกระทบสูงสุดในกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพในด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดิน และผลกระทบต่อการลดลงทรัพยากรในด้านการใช้พลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ โดยมีผลกระทบโดยรวมประมาณ 5.37E-7 DALY 0.2404 PDF*m^2*yr และ 49.2161 MJ primary ส่วนพลังงานในระบบความเย็นส่งผลกระทบสูงสุดที่ผลกระทบต่ออากาศเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ 1.6725 kg CO_2 eq

ส่วนขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลกระทบโดยรวมน้อยกว่าขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบทั้งหมด โดยขั้นตอนนี้ส่งผลกระทบชัดเจนต่อสุขภาพมนุษย์ในด้านผลกระทบจากการหายใจจากสารอินทรีย์เนื่องจากการปล่อยสารตั้งต้นที่ไม่ทำปฏิกิริยาและกรดอะซิติก รองลงมาคือผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สู่อากาศ และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็งเนื่องจากการปล่อยสารประกอบหนักที่เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงในกระบวนการผลิตและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่สูญเสียในกระบวนการผลิต และในขั้นตอนนี้ยังส่งผลชัดเจนต่อภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนออกไซด์ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมีผลกระทบในด้านดังกล่าว และในขั้นตอนนี้ไม่มีผลกระทบในด้านการลดลงของทรัพยากรเนื่องจากในขั้นนี้พิจารณาเฉพาะผลกระทบจากการปล่อยสารพิษ/สารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมอันเกิดจากกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว

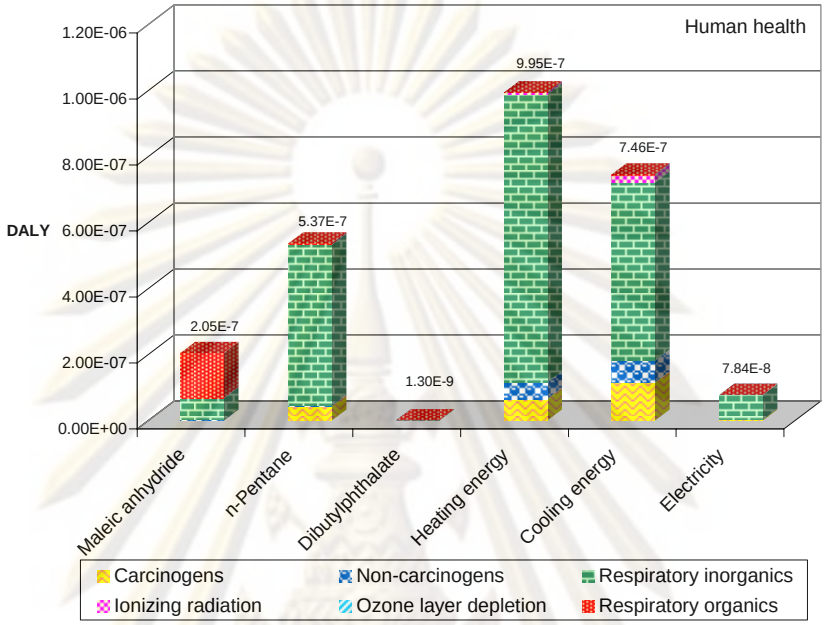


ภาพที่ 4.5 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Gate” เมื่อให้ค่าน้ำหนักของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

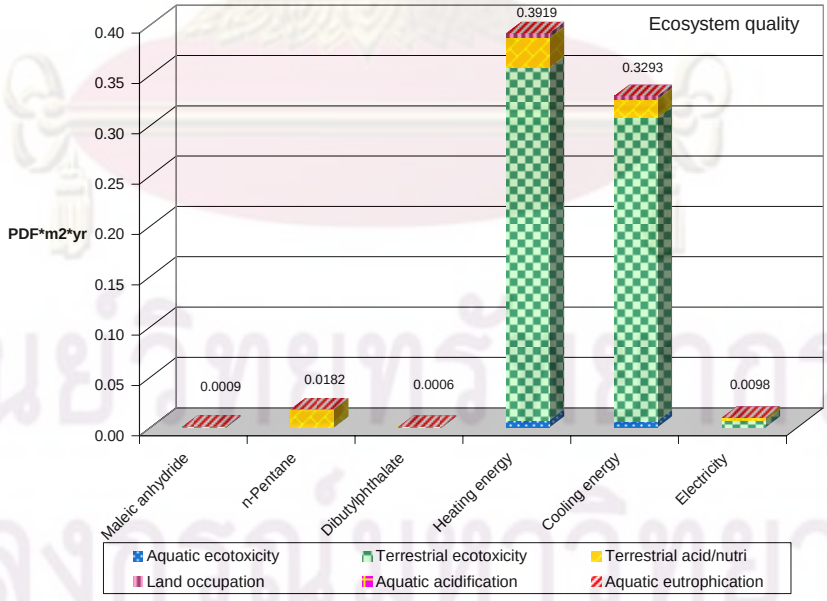
จากภาพที่ 4.5 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อพิจารณาแบบ “Cradle-to-Gate” โดยแสดงผลแบบเมื่อเทียบหน่วยและให้ค่าน้ำหนักแล้วพบว่า การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในด้านการใช้พลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ที่ประมาณ 0.8352 mPt รองลงมาคือ ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่ประมาณ 0.5098 mPt และผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ที่ประมาณ 0.2038 mPt ซึ่งสาเหตุหลักของผลกระทบดังกล่าวมาจากขั้นตอนการผลิตพลังงานในระบบความเย็นและขั้นตอนการผลิตนอร์มอล-บิวเทน โดยคิดเป็นร้อยละ 28.53 และ 28.31 ของผลกระทบทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

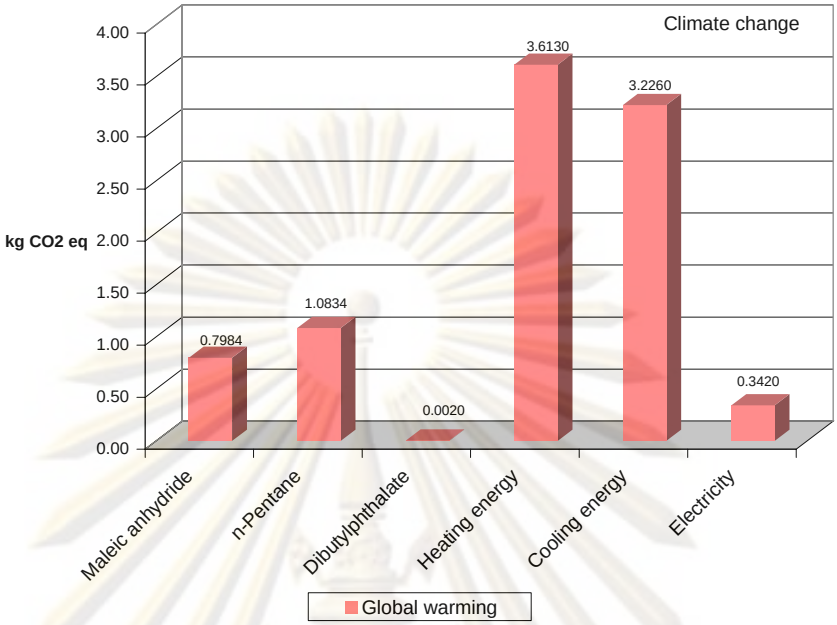
4.1.2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน



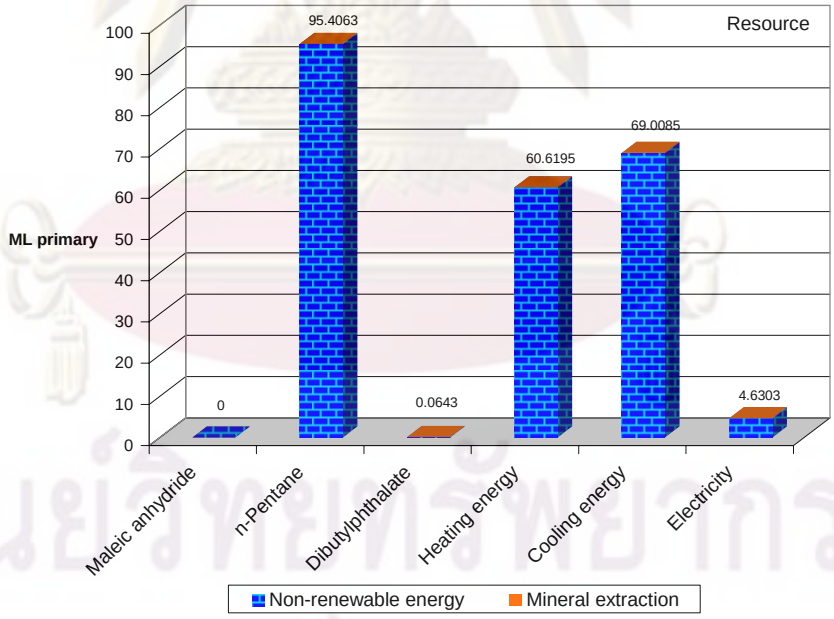
ภาพที่ 4.6 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์



ภาพที่ 4.7 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศน์



ภาพที่ 4.8 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน



ภาพที่ 4.9 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นปลายของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน ด้านผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร

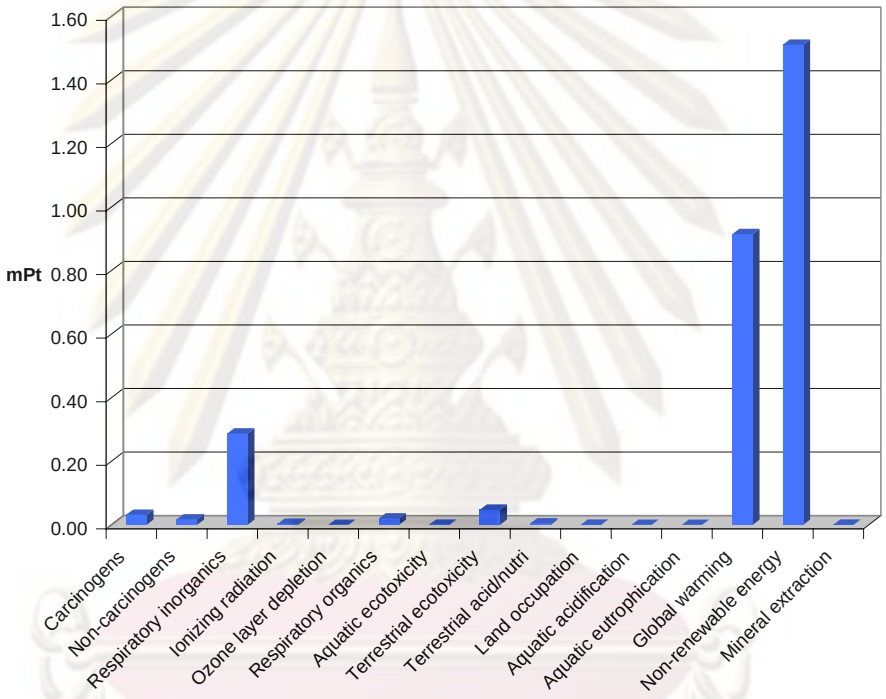
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 4.6 - 4.9 พิจารณาผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์พบว่า ในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบทั้งหมดส่งผลกระทบชัดเจนในด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ ในขณะที่ขั้นตอนกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์มากที่สุด ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์พบว่ามีผลกระทบมากในขั้นตอนการผลิตพลังงานให้ความร้อนและพลังงานให้ความเย็นในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดิน และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรมีการใช้พลังงานที่ไม่สามารถทดแทนได้มากกว่าการสกัดแร่ธาตุ เนื่องจากนอร์มอล-เพนเทนและพลังงานที่ใช้ในระบบต่างได้มาจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้แร่ธาตุ ในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบแต่ละชนิดและในขั้นตอนกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ล้วนส่งผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน

เพื่อพิจารณาแต่ละสาร พบว่าขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบพลังงานให้ความร้อนแก่กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลกระทบสูงกว่าขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบอื่น และมากกว่าผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยส่งผลกระทบสูงสุดในกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพในด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดิน และผลกระทบต่อภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง โดยส่งผลกระทบประมาณ 9.95E-7 DALY 0.3919 PDF*m^2*yr และ 3.6130 kg CO_2 eq ส่วนผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรเกิดขึ้นสูงสุดที่ขั้นตอนการผลิตนอร์มอล-เพนเทนในด้านการใช้พลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ประมาณ 95.4063 MJ Primary

ส่วนขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากนอร์มอล-เพนเทนส่งผลกระทบโดยรวมน้อยกว่าขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบรวมกันทั้งหมด โดยขั้นตอนนี้ส่งผลกระทบมากในกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ด้านผลกระทบจากการหายใจจากสารอินทรีย์ประมาณ 2.05E-7 DALY เนื่องจากสารตั้งต้นเพนเทนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ข้างเคียง รองลงมาคือผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์เนื่องจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สู่อากาศ และยังส่งผลกระทบต่อภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนโดยส่งผลต่อภาวะโลกร้อน 0.7984 kg CO_2 eq เนื่องจากก๊าซคาร์บอนออกไซด์ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมีผลกระทบในด้านดังกล่าว และในขั้นตอนนี้ไม่มีผลกระทบในด้านการลดลงของทรัพยากรเนื่องจากในขั้นนี้พิจารณาเฉพาะผลกระทบจากการปล่อยสารพิษ/สารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมอันเกิดจากกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว

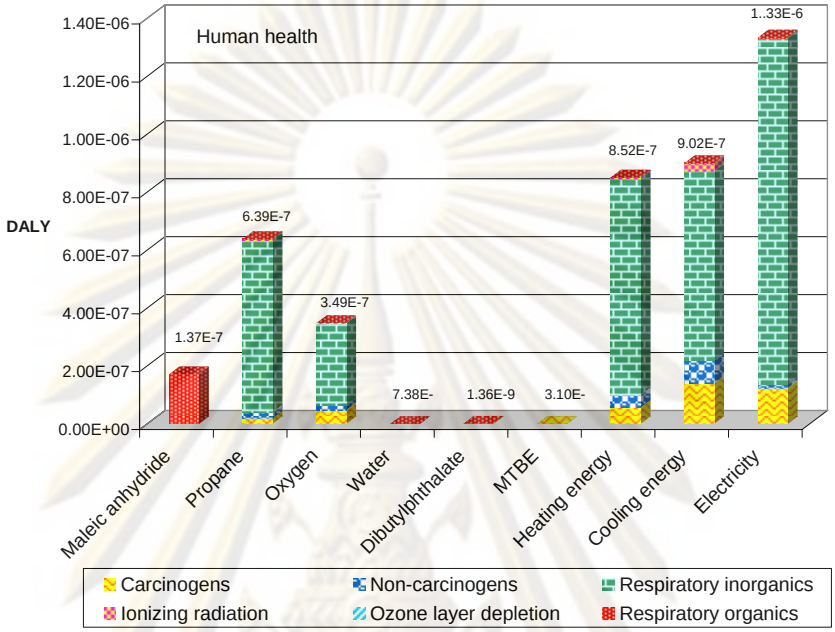
จากภาพที่ 4.10 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อพิจารณาแบบ “Cradle-to-Gate” พบว่า การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในด้านการใช้พลังงานที่ไม่สามารถทดแทนใหม่ได้ที่ประมาณ 1.5111 mPt รองลงมาคือ ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนที่ประมาณ 0.9156 mPt และผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ที่ประมาณ 0.2875 mPt ซึ่งสาเหตุหลักมาจากขั้นตอนการผลิตพลังงานให้ความร้อนและพลังงานในระบบให้ความเย็น โดยคิดเป็นร้อยละ 32.80 และ 31.97 ของผลกระทบทั้งหมด



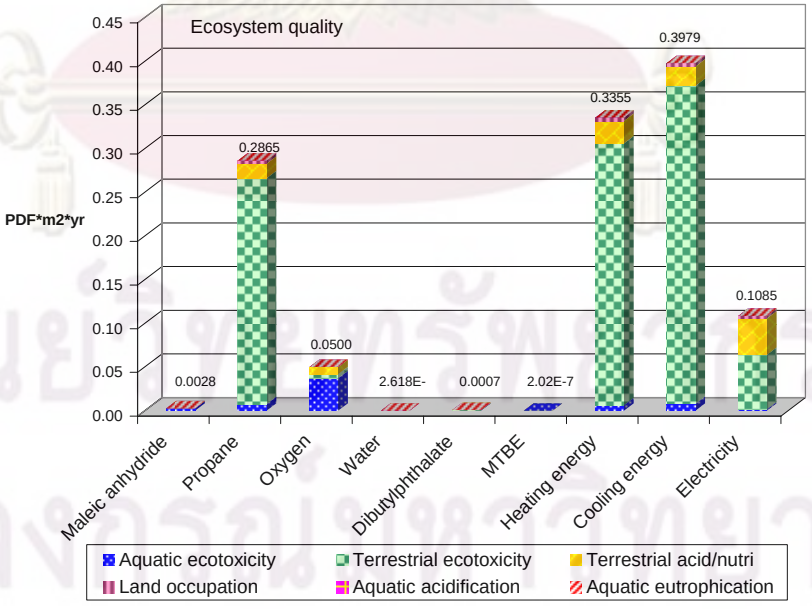
ภาพที่ 4.10 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Gate” เมื่อให้ค่าน้ำหนักของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

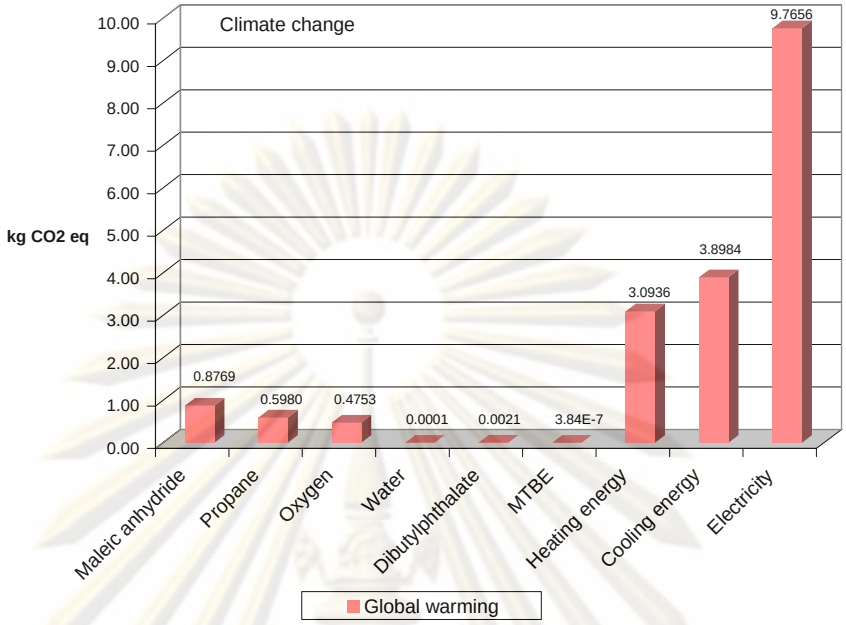
4.1.2.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในการผลิตผ่านโพรเพน



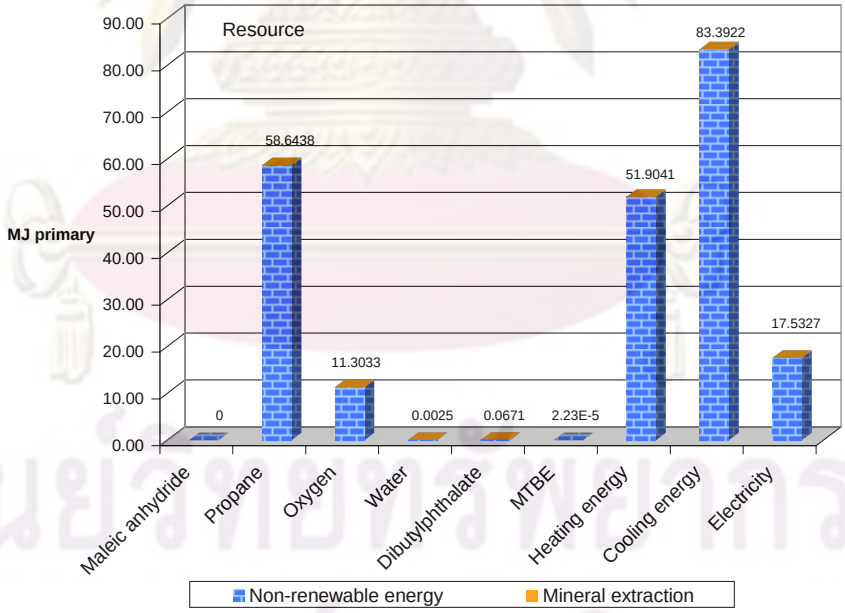
ภาพที่ 4.11 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นกลางของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์



ภาพที่ 4.12 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นกลางของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศน์



ภาพที่ 4.13 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นกลางของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน

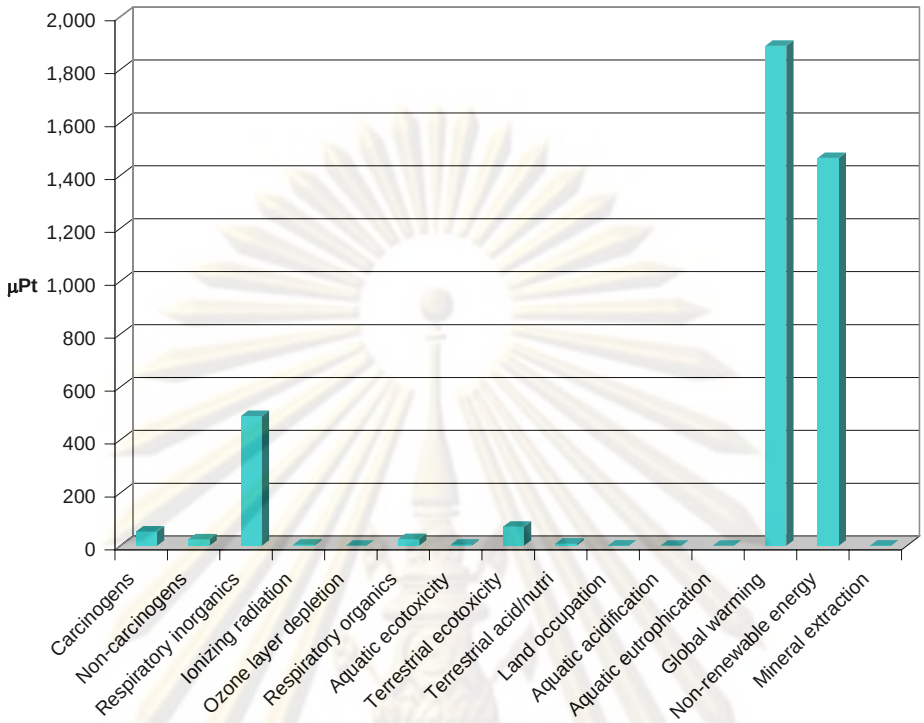


ภาพที่ 4.14 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบขั้นกลางของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน ด้านผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร

จากภาพที่ 4.11 – 4.14 พบว่าผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์พบว่า ในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบทั้งหมดส่งผลกระทบชัดเจนในด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ ในขณะที่ขั้นตอนกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์มากที่สุด ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์พบว่ามีผลกระทบมากในขั้นตอนการผลิตพลังงานและสารตั้งต้นโพรเพนโดยส่งผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดิน และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรมีการใช้พลังงานที่ไม่สามารถทดแทนได้มากกว่าการสกัดแร่ธาตุ เนื่องจากโพรเพนและพลังงานที่ใช้ในระบบต่างได้มาจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้แร่ธาตุ โดยในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบแต่ละชนิดและในขั้นตอนกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ส่งผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนทั้งสิ้น

เพื่อพิจารณาแต่ละสาร พบว่าผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ในด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ส่งผลกระทบสูงสุดในส่วนของขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ โดยขั้นตอนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับการผลิตส่งผลกระทบสูงสุด โดยส่งผลกระทบประมาณ 1.33E-6 DALY และยังส่งผลกระทบสูงสุดในด้านผลกระทบต่ออากาศเปลี่ยนแปลงมากที่สุดอีกด้วย โดยส่งผลกระทบประมาณ 9.7656 kg CO_2 eq และพบอีกว่าขั้นตอนในการผลิตวัตถุดิบส่งผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรมากที่สุดในด้านพลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ โดยการผลิตพลังงานในการให้ความเย็นส่งกระทบสูงสุดในด้านนี้และในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในดินด้วย โดยมีค่าผลกระทบประมาณ 83.3922 MJ primary และ 0.3979 PDF*m^2*yr

ส่วนขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากโพรเพนส่งผลกระทบโดยรวมน้อยกว่าขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบรวมกันทั้งหมด โดยขั้นตอนนี้ส่งผลกระทบในกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์มากที่สุดในด้านผลกระทบจากการหายใจจากสารอินทรีย์โดยมีผลกระทบรวมประมาณ 1.73E-7 DALY ผลกระทบดังกล่าวเกิดเนื่องจากการปล่อยทิ้งซึ่งสารตั้งต้นโพรเพนที่ไม่ทำปฏิกิริยาสู่สิ่งแวดล้อม และผลกระทบต่อภาวะอากาศเปลี่ยนแปลงมากกว่าขั้นตอนการผลิตสารตั้งต้นโพรเพนและออกซิเจน โดยส่งผลต่อภาวะโลกร้อน 0.8769 kg CO_2 eq เนื่องจากก๊าซคาร์บอนออกไซด์ที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน และผลกระทบต่อระบบนิเวศน์เพียงเล็กน้อยประมาณ 0.0028 PDF*m^2*yr และในขั้นตอนนี้ไม่มีผลกระทบในด้านการลดลงของทรัพยากรเนื่องจากในขั้นนี้พิจารณาเฉพาะผลกระทบจากการปล่อยสารพิษ/สารเคมีสู่สิ่งแวดล้อมอันเกิดจากกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว

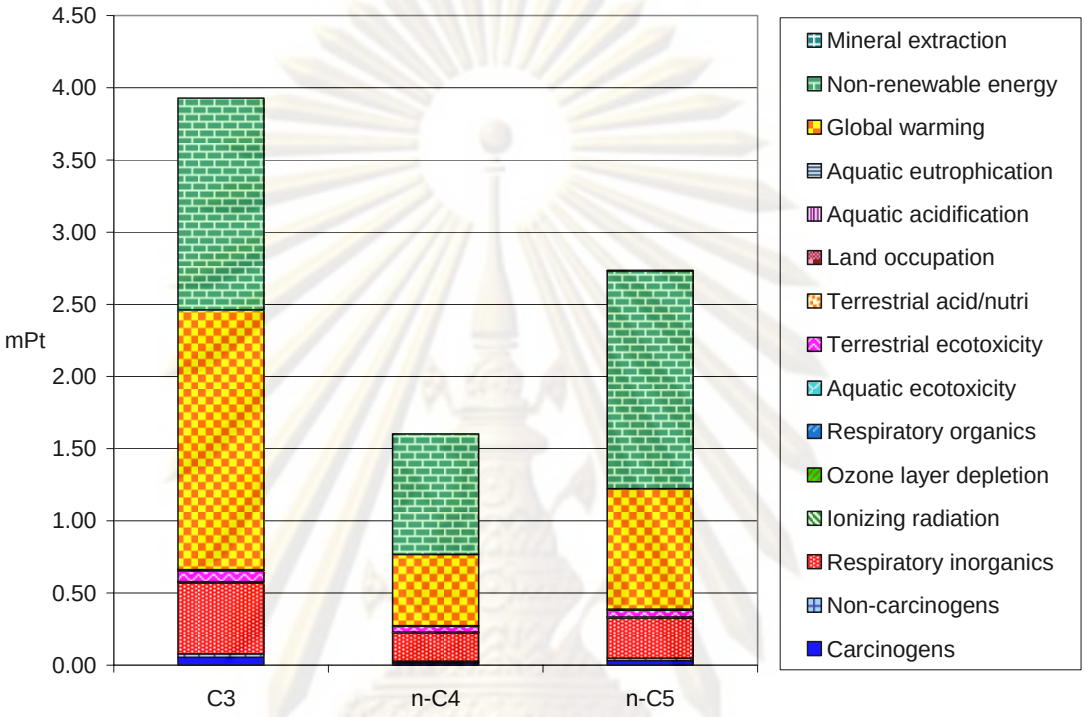


ภาพที่ 4.15 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Gate” เมื่อให้ค่าน้ำหนักของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

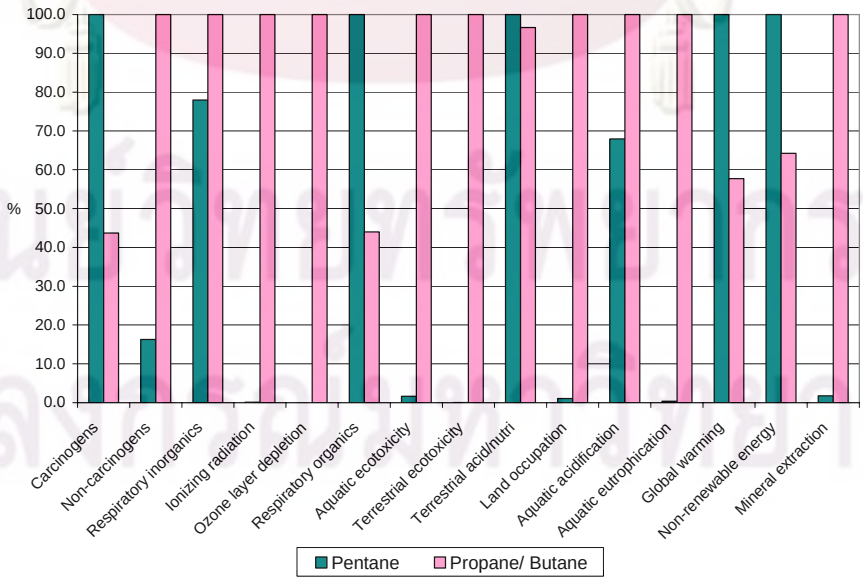
จากภาพที่ 4.15 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อพิจารณาแบบ “Cradle-to-Gate” พบว่า การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในด้านภาวะโลกร้อนที่ประมาณ 1.8897 mPt รองลงมาคือ การใช้พลังงานที่ไม่สามารถทดแทนใหม่ได้ที่ประมาณ 1.4657 mPt และผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ที่ประมาณ 0.4904 mPt ซึ่งสาเหตุหลักมาจากขั้นตอนการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตและพลังงานในระบบให้ความเย็น โดยคิดเป็นร้อยละ 32.11 และ 27.18 ของผลกระทบทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2.4 การเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

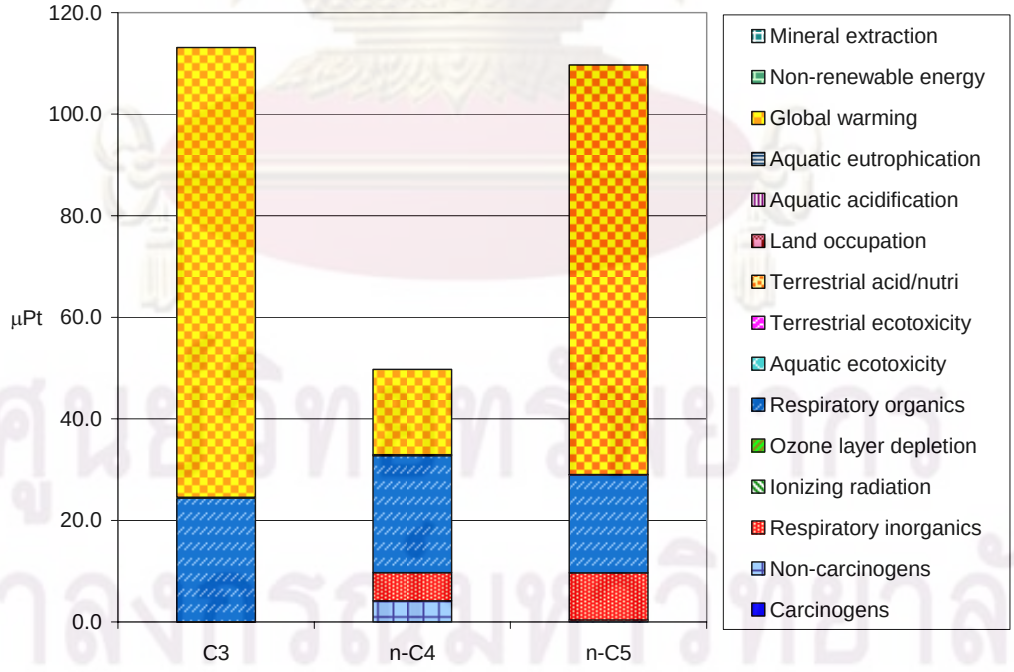


ภาพที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ



ภาพที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตสารตั้งต้น

จากการประเมินผลกระทบของแต่ละกระบวนการผลิต พบว่าผลกระทบส่วนใหญ่เกิดจากพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต เมื่อทำการเปรียบเทียบการผลิตจากกระบวนการต่าง ๆ พบว่ากระบวนการผลิตผ่านโพรเพนมีผลกระทบในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบสูงที่สุดที่ประมาณ 3.9284 mPt ดังภาพที่ 4.16 จากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตผ่านโพรเพนมีการใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทนและนอร์มอล-เพนเทนอยู่ร้อยละ 56.52 และ 20.50 ตามลำดับ กระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทนมีการใช้พลังงานโดยรวมน้อยกว่ากระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน แต่มีการใช้ปริมาณของสารตั้งต้นในการผลิตมากกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของขั้นตอนการผลิตระหว่างนอร์มอล-บิวเทนและนอร์มอล-เพนเทนที่ปริมาณ 1 กิโลกรัม ดังภาพที่ 4.17 พบว่านอร์มอล-เพนเทนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่านอร์มอล-บิวเทน และโพรเพนในด้านสารก่อมะเร็ง การทำลายระบบการหายใจจากสารอินทรีย์ ภาวะโลกร้อน พลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทนส่งผลกระทบสูงสุดในด้านนี้ โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบที่ประมาณ 2.7337 mPt ส่วนกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประมาณ 1.6021 mPt

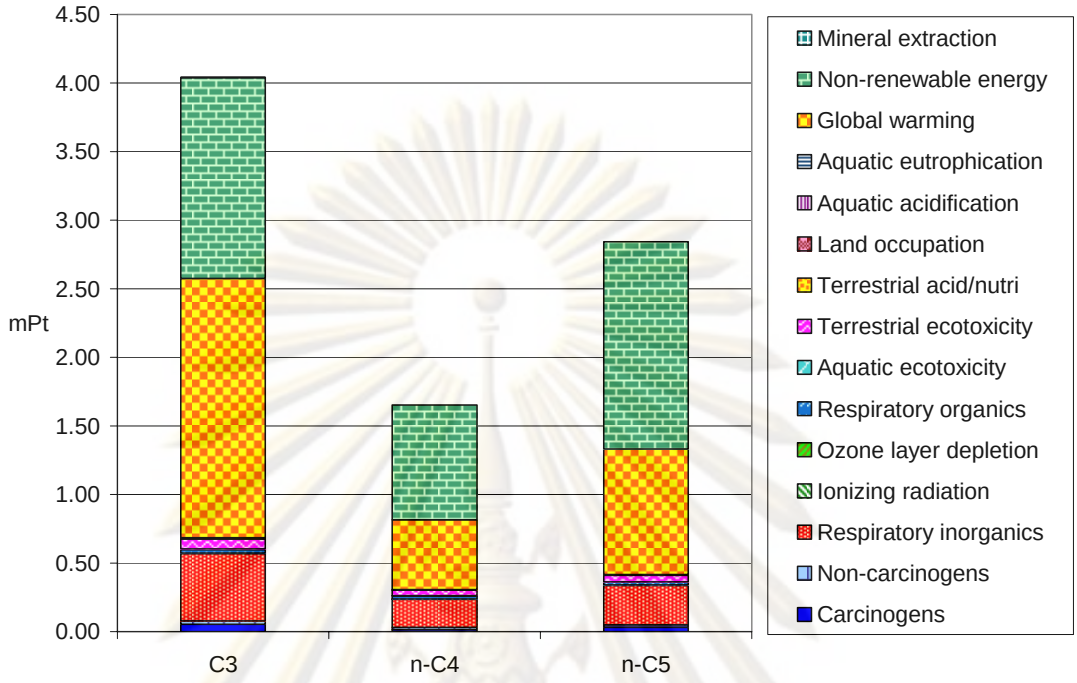


ภาพที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากขั้นตอนในการจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อจำแนกสารว่ามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทใด พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ส่งผลกระทบในด้านภาวะโลกร้อน ดังนั้นกระบวนการผลิตผ่านโพรเพนมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด จึงส่งผลให้ผลกระทบด้านดังกล่าวสูงที่สุดดังภาพที่ 4.18 และทั้งสามกระบวนการผลิตมีผลกระทบในด้านที่คล้ายกันคือผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากการปล่อนสารไฮไดรคาร์บอนและกรดอะซิติก จากผลการศึกษาพบว่านอร์มอล-เพนเทนมีการปล่อยสารดังกล่าวน้อยที่สุด ทำให้มีผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์น้อยที่สุด ส่วนผลกระทบจากการหายใจจากสารอนินทรีย์เกิดจากการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นผลกระทบดังกล่าวจึงพบน้อยในขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน และในขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน ยังพบผลกระทบด้านสารไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการเกิดของสารประกอบอื่น อย่างไรก็ตาม ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของขั้นตอนของการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประมาณ 0.0497 mPt ส่วนกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทนและโพรเพนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประมาณ 0.1097 mPt และ 0.1131 mPt ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.19 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อพิจารณาแบบ “Cradle-to-Gate” พบว่า การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยสุดในทุกด้าน ยกเว้นด้านผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์และการลดลงของชั้นโอโซนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทนส่งผลกระทบน้อยกว่า และการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทนยังส่งผลกระทบมากที่สุดในด้านพลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ ส่วนผลกระทบด้านอื่นๆ การผลิตผ่านโพรเทนส่งมากกระทบมากที่สุด โดยส่งผลกระทบประมาณ 4.0416 mPt ส่วนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทนและนอร์มอล-เพนเทน ส่งผลกระทบประมาณ 1.6519 mPt และ 2.8434 mPt ตามลำดับ โดยสาเหตุหลักของทั้ง 3 กระบวนการเกิดจากขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์แบบ “Cradle-to-Gate”

4.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการประเมินวัฏจักรชีวิตภายใต้ความไม่แน่นอนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ อันเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ที่หน่วยหน้าที่ (Functional unit) ของกระบวนการผลิต คือ การผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 1 กิโลกรัม

4.2.1 การทำบัญชีรายการ (Life Cycle Inventory: LCI)

การทำบัญชีรายการเมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ ส่งผลทำให้ร้อยละผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมถึงปริมาณของเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตารางที่ 4.4 – 4.6 แสดงถึงปริมาณเหล่านั้น

ตารางที่ 4.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน

ผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	นอร์มอล-บิวเทน (n-C4)	นอร์มอล-เพนเทน (n-C5)
มาเลอิกแอนไฮไดรด์	1.0000	1.0000
พทาลิกแอนไฮไดรด์	-	0.8575
กรดอะซิติก	-	-

ตารางที่ 4.5 ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน

	นอร์มอล-บิวเทน (n-C4)	นอร์มอล-เพนเทน (n-C5)
วัตถุดิบ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)		
นอร์มอล-บิวเทน	0.8790 - 0.8924	-
นอร์มอล-เพนเทน	-	1.553 – 3.1949
โพรเพน	-	-
อากาศ	21.3481 – 21.6745	61.5447 – 126.4251
ออกซิเจน	-	-
ไดบิวทิวพทาเลต	0.0008 – 0.0009	0.0019 – 0.0030
พลังงาน (กิโลจูนต่อชั่วโมง)		
พลังงานทำความร้อน	16,381 – 17,666	68,341 – 103,838
พลังงานทำความเย็น	30,737 – 33,323	68,341 – 103,838
พลังงานไฟฟ้า	6,339 – 6,444	2,831 – 5,790

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ปริมาณของเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน

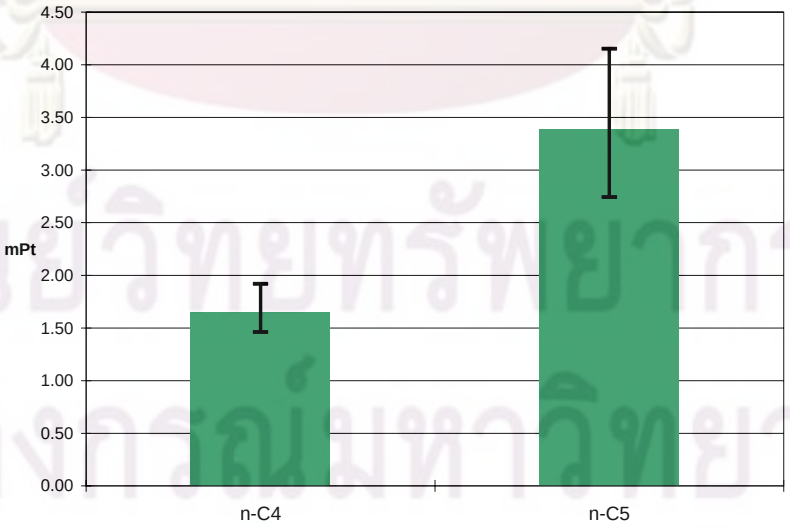
	นอร์มอล-บิวเทน (n-C4)	นอร์มอล-เพนเทน (n-C5)
ของเสียที่ปล่อยสู่อากาศ (กก./ชม.)		
นอร์มอล-บิวเทน	0.1566 – 0.1987	-
ไอโซ-บิวเทน	0.0439 – 0.0446	-
นอร์มอล-เพนเทน	-	0.0295 – 0.8802
ไอโซ-เพนเทน	-	0.0228 – 0.1597
ออกซิเจน	3.4048 – 3.4984	10.4354 – 23.5950
ไนโตรเจน	16.8597 – 16.6058	47.8730 – 98.3408
มาเลอิกแอนไฮไดรด์	0.0013	0.0013
น้ำ	0.7529 – 0.8369	1.8006 – 2.6470
คาร์บอนมอนอกไซด์	0.0226 – 0.0834	0.1628 – 0.2299
คาร์บอนไดออกไซด์	0.0395 – 0.1162	1.1009 – 1.4645
กรดอะซิติก	0.0149 – 0.0166	0.0103 – 0.0139
กรดอะคิลิกแอซิด	0.0092 – 0.0105	-
กรดเมทาไคลิก	0.00071 – 0.00073	-
ไดบิวทิวพทาเลต	0.00080 – 0.00086	0.0019 – 0.0030
ของเสียที่ปล่อยสู่น้ำ (กก./ชม.)		
น้ำ	0.0302 – 0.0334	0.0591 – 0.0795
กรดอะซิติก	0.0029 – 0.0032	0.0005 – 0.0014
กรดอะคิลิกแอซิด	0.0010 – 0.0012	-
พทาลิกแอนไฮไดรด์	0.00044 – 0.00045	-
กรดฟูมาลิก	0.00085 – 0.00087	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 **การประเมินผลกระทบ** (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

จากตารางที่ 4.4 – 4.6 ในขั้นตอนการทำบัญชีรายการ ลักษณะของข้อมูลประกอบด้วยช่วงของข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดและค่าน้อยที่สุด ดังนั้นในขั้นตอนของการประเมินผลกระทบจะทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีการจำลองแบบมอลติคาร์โล ซึ่งคือการสุ่มตัวอย่างของข้อมูลในช่วงของข้อมูลที่มีอยู่แล้วทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยวิธี IMPACT 2002+ โดยงานวิจัยนี้ ทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 10,000 ครั้ง และทำการแปลผลที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SimaPro ในการสุ่มตัวอย่างและประเมินผลกระทบเป็นแบบขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบกับขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Cradle-to-Gate)

จากภาพที่ 4.20 พบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์แบบ Cradle-to-Gate ภาพใต้ความไม่แน่นอนนั้น กระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน (n-C5) ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน (n-C4) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 โดยกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน (n-C4) มีความแปรผันได้ของผลกระทบอยู่ในช่วงระหว่าง 1.4614 – 1.9192 mPt ส่วนกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน (n-C5) มีความแปรผันได้ของผลกระทบอยู่ในช่วงระหว่าง 2.7437 – 4.1522 mPt



ภาพที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอนแบบ “Cradle-to-Gate”

4.3 การพัฒนากระบวนการผลิต

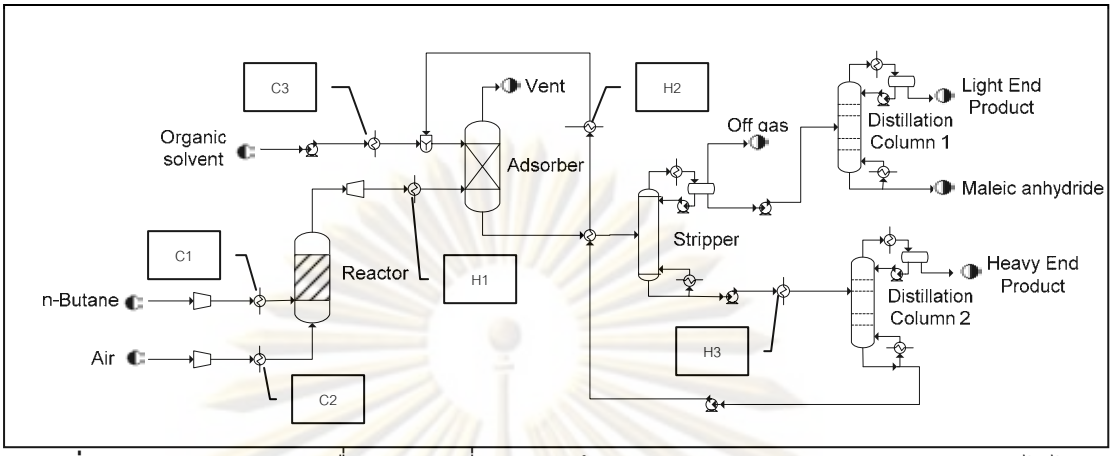
การพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีร้อยละของผลผลิตเพิ่มขึ้น การเลือกวิธีการหรือการเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์ในการผลิต การเลือกใช้เชื้อเพลิงในการให้พลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกพัฒนากระบวนการผลิตโดยการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Network: HEN) เนื่องจากผลการศึกษา พบว่า ผลกระทบของกระบวนการผลิตส่วนหนึ่งมาจากพลังงานที่ใช้ในการผลิต ทั้งนี้เป็นการลดปริมาณพลังงานเพื่อใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และประหยัดค่าใช้จ่าย

ในงานวิจัยนี้ ทำการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จากการผลิตทั้ง 3 ทางเลือก โดยการกำหนดผลต่างอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อน (ΔT) เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และใช้วิธี IMPACT 2002+ ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งช่วงของการศึกษาออกเป็น 3 ช่วง คือ ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบกับขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Cradle-to-Gate) เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

4.3.1 การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

4.3.1.1 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Network: HEN)

ภาพที่ 4.21 แสดงตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทำข่านงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดูผลการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ที่ภาคผนวก ข. จากการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่าพลังงานให้ความร้อนลดลงเหลือ 3,589.8383 กิโลจูนต่อชั่วโมง และพลังงานในการลดอณหภูมิลลดลงเหลือ 11,806.2518 กิโลจูนต่อชั่งโมง ทำให้ลดพลังงานของทั้งกระบวนการผลิตได้ถึงร้อยละ 8.22



ภาพที่ 4.21 ตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

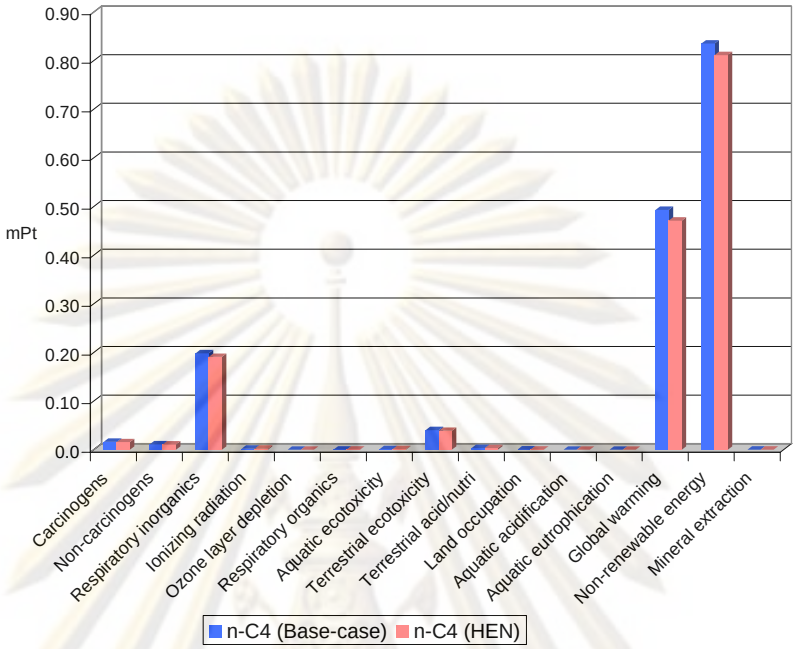
4.3.1.2 **การทำบัญชีรายการ** (Life Cycle Inventory: LCI)

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

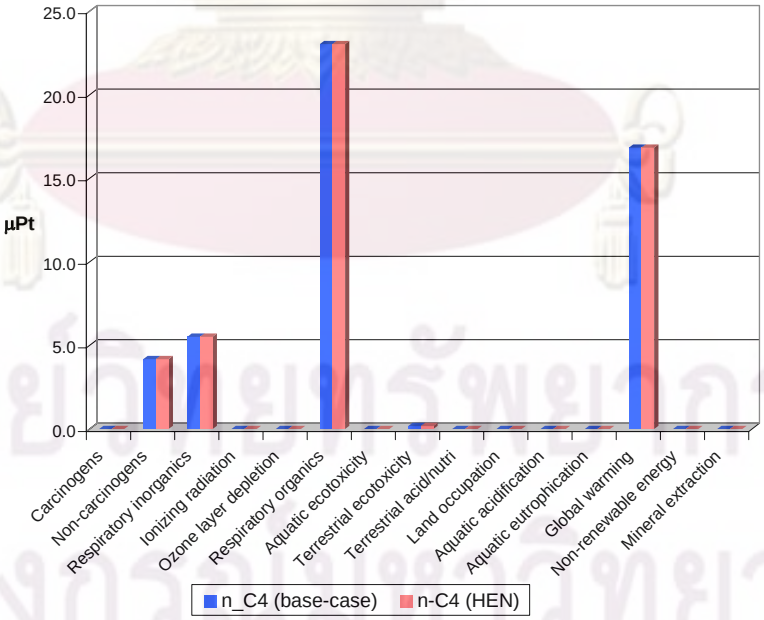
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ก่อนทำข่ายงาน (กิโลจูน/ชั่วโมง)		หลังทำข่ายงาน (กิโลจูน/ชั่วโมง)	
	พลังงานให้ความร้อน	พลังงานให้ความเย็น	พลังงานให้ความร้อน	พลังงานให้ความเย็น
H1	-	4,246.6516	-	2,194.3329
H2	-	5,398.4505	-	5,178.8898
H3	-	4,433.0291	-	4,433.0291
C1	765.0488	-	360.4728	-
C2	5,096.6570	-	3,229.3655	-
C3	0.0119	-	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

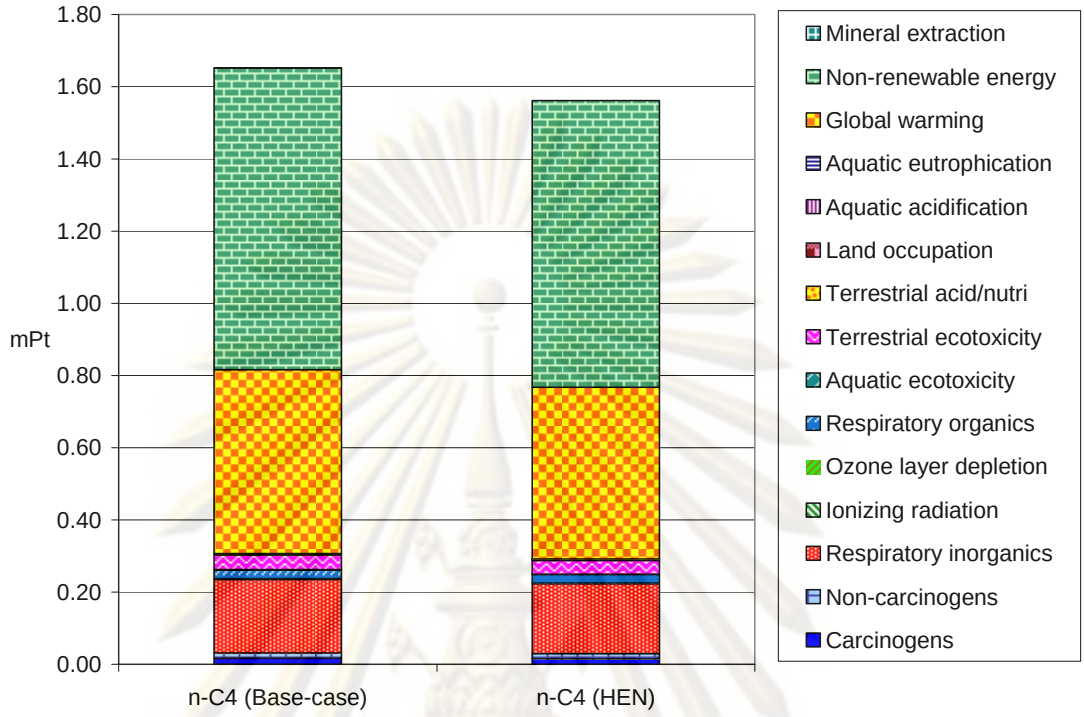
4.3.1.3 การประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)



ภาพที่ 4.22 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ



ภาพที่ 4.23 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทน ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

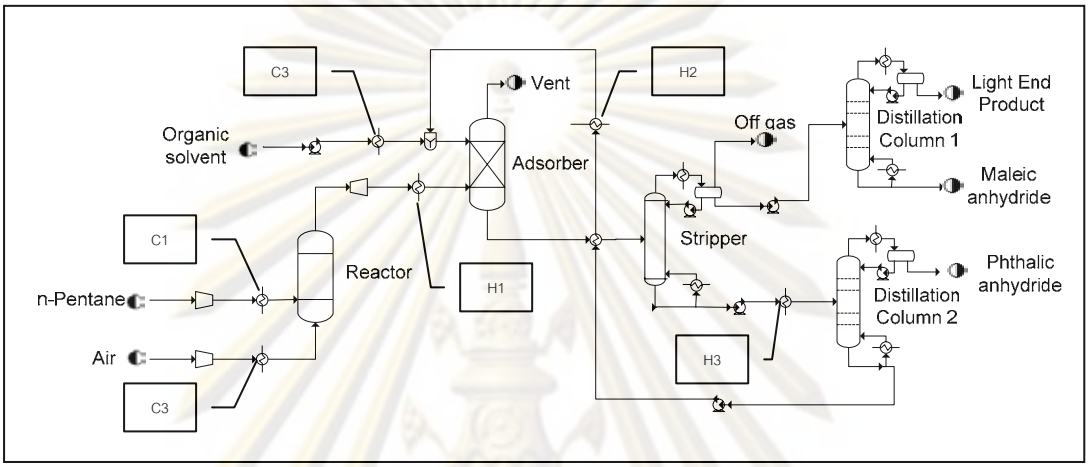


ภาพที่ 4.24 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนแบบ “Cradle-to-Gate”

จากภาพที่ 4.22 พบว่าการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนมีผลต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทุก ๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านพลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้และภาวะโลกร้อน โดยลดผลกระทบในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการใช้พลังงานในระบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจึงส่งผลแค่ในส่วนของการผลิตพลังงานเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และไม่มีผลต่อผลกระทบในขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังแสดงในภาพที่ 4.23 โดยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบลงร้อยละ 5.45 จากการลดใช้พลังงานได้ร้อยละ 8.22 ทำให้สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์จาก 1.6519 mPt เป็น 1.5619 mPt ดังแสดงในภาพที่ 4.24

4.3.2 การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

4.3.2.1 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Network: HEN)



ภาพที่ 4.25 ตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน

ภาพที่ 4.25 แสดงตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทำข่านงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดูผลการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ที่ภาคผนวก ข. จากการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่าพลังงานให้ความร้อนลดลงเหลือ 25,902.9217 กิโลจูนต่อชั่วโมง และลดการใช้พลังงานในการลดอุณหภูมิ ทำให้ลดพลังงานของทั้งกระบวนการผลิตได้ถึงร้อยละ 33.70

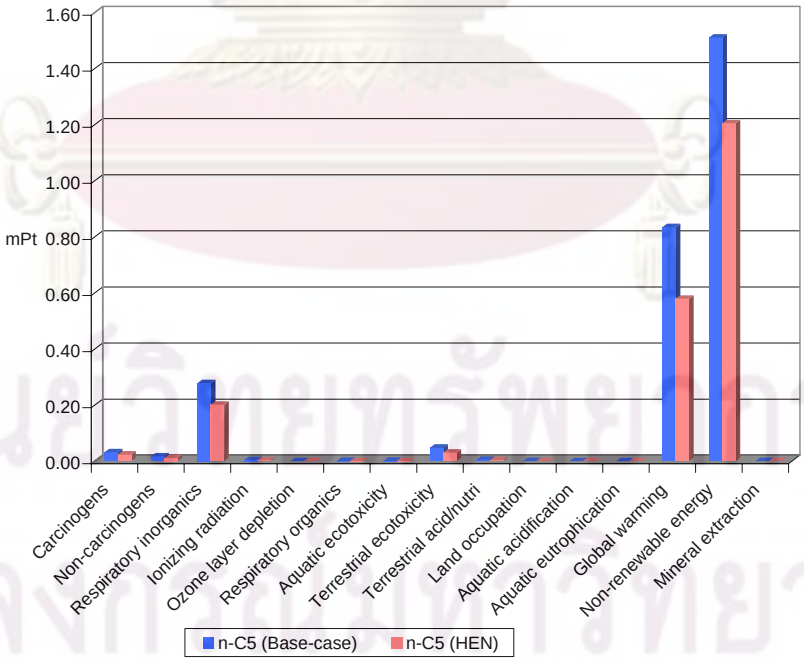
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2.2 **การทำบัญชีรายการ** (Life Cycle Inventory: LCI)

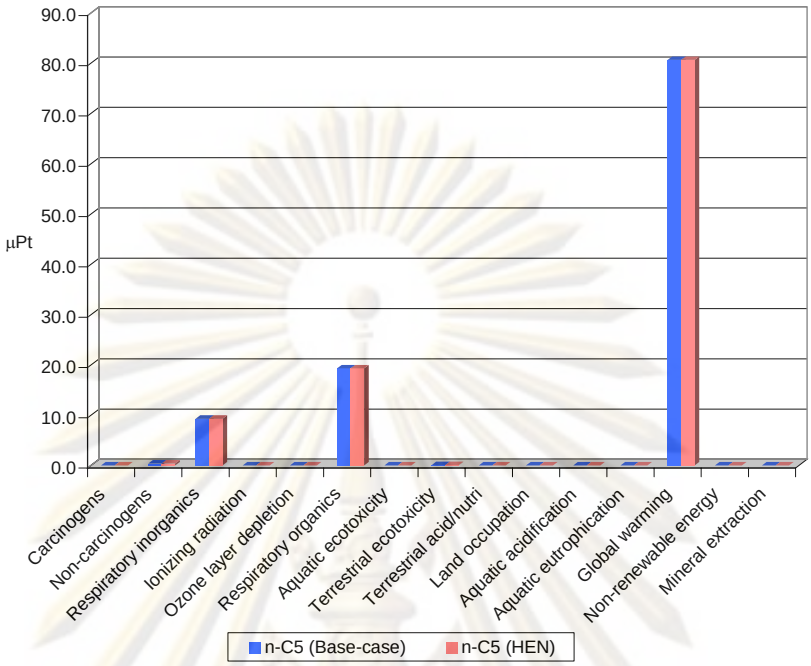
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ก่อนทำข่ายงาน (กิโลจูน/ชั่วโมง)		หลังทำข่ายงาน (กิโลจูน/ชั่วโมง)	
	พลังงานให้ความร้อน	พลังงานให้ความเย็น	พลังงานให้ความร้อน	พลังงานให้ความเย็น
H1	-	25,626.8024	-	1,300.4100
H2	-	17,288.0512	-	10,666.1656
H3	-	13,936.3461	-	13,936.3461
C1	2,370.0394	-	-	-
C2	28,578.2069	-	-	-
C3	0.0316	-	-	-

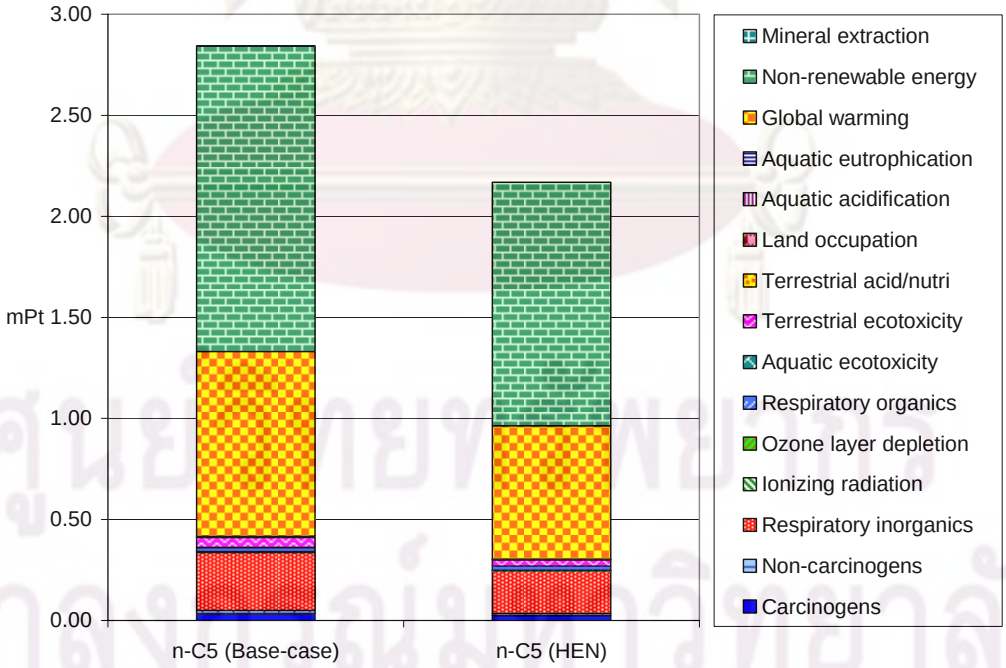
4.3.2.3 **การประเมินผลกระทบ** (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)



ภาพที่ 4.26 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ



ภาพที่ 4.27 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

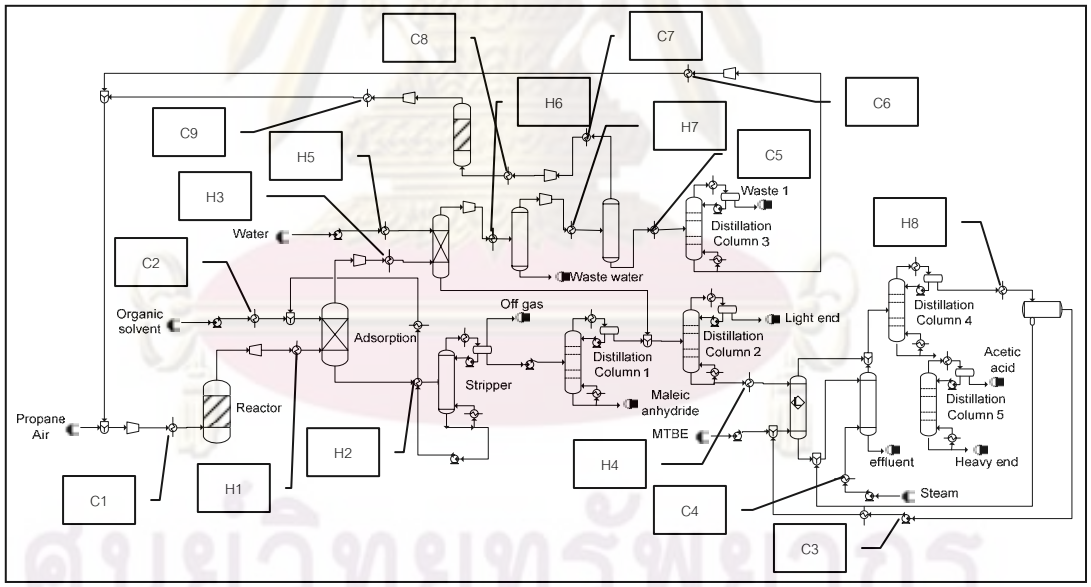


ภาพที่ 4.28 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน แบบ “Cradle-to-Gate”

จากภาพที่ 4.26 พบว่าการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทุก ๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านพลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้และภาวะโลกร้อน โดยลดผลกระทบในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการใช้พลังงานในระบบให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจึงส่งผลแค่ในส่วนของการผลิตพลังงานเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และไม่มีผลต่อผลกระทบในขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังภาพที่ 4.27 โดยลดผลกระทบลงร้อยละ 23.72 จากการลดใช้พลังงานได้ร้อยละ 33.70 ทำให้สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทั้งสองขั้นตอนจาก 2.8434 mPt เป็น 2.1689 mPt ดังแสดงในภาพที่ 4.28

4.3.3 การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

4.3.3.1 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Network: HEN)



ภาพที่ 4.29 ตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านโพรเพน

ภาพที่ 4.29 แสดงตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทำข่านงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดูผลการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ที่ภาคผนวก ข. จากการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่าพลังงานให้ความร้อนลดลงเหลือ 29,605.6231 กิโลจูนต่อ

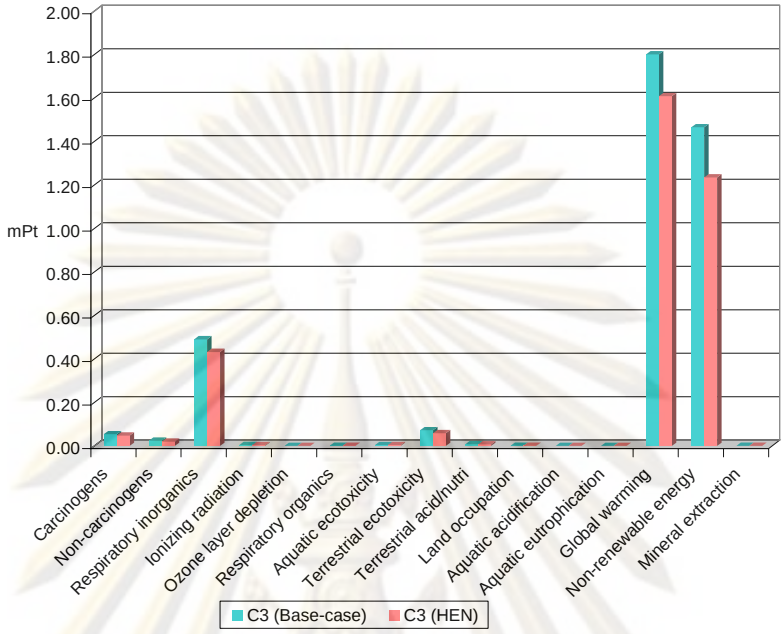
ชั่วโมง และลดการใช้พลังงานในการลดอุณหภูมิ ทำให้ลดพลังงานของทั้งกระบวนการผลิตได้ถึงร้อยละ 20.19

4.3.4 **การทำบัญชีรายการ** (Life Cycle Inventory: LCI)

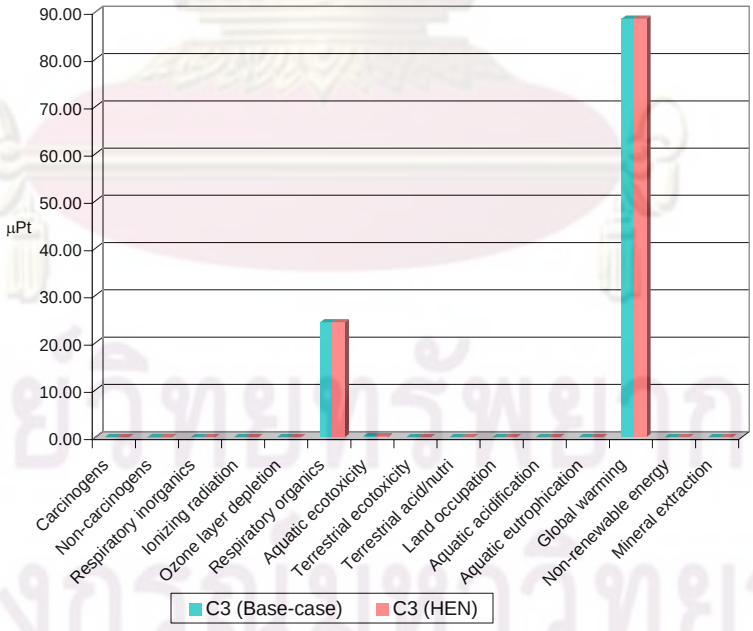
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ก่อนทำข่ายงาน (กิโลจูน/ชั่วโมง)		หลังทำข่ายงาน (กิโลจูน/ชั่วโมง)	
	พลังงานให้ความร้อน	พลังงานให้ความเย็น	พลังงานให้ความร้อน	พลังงานให้ความเย็น
H1	-	6,763.2108	-	2,897.3447
H2	-	4,850.3569	-	3,197.2604
H3	-	15,057.5117	-	3,033.4012
H4	-	1,118.9641	-	156.3159
H5	-	3.3523	-	3.3523
H6	-	6,616.9810	-	6,616.9810
H7	-	3,629.4483	-	3,629.4483
H8	-	1,241.4469	-	1,241.4469
C1	8,579.4122	-	-	-
C2	0.0262	-	-	-
C3	356.9480	-	-	-
C4	669.3829	-	-	-
C5	962.6482	-	-	-
C6	120.4152	-	-	-
C7	3,087.7240	-	-	-
C8	3,865.8662	-	-	-
C9	863.8662	-	-	-

4.3.5 การประเมินผลกระทบ (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

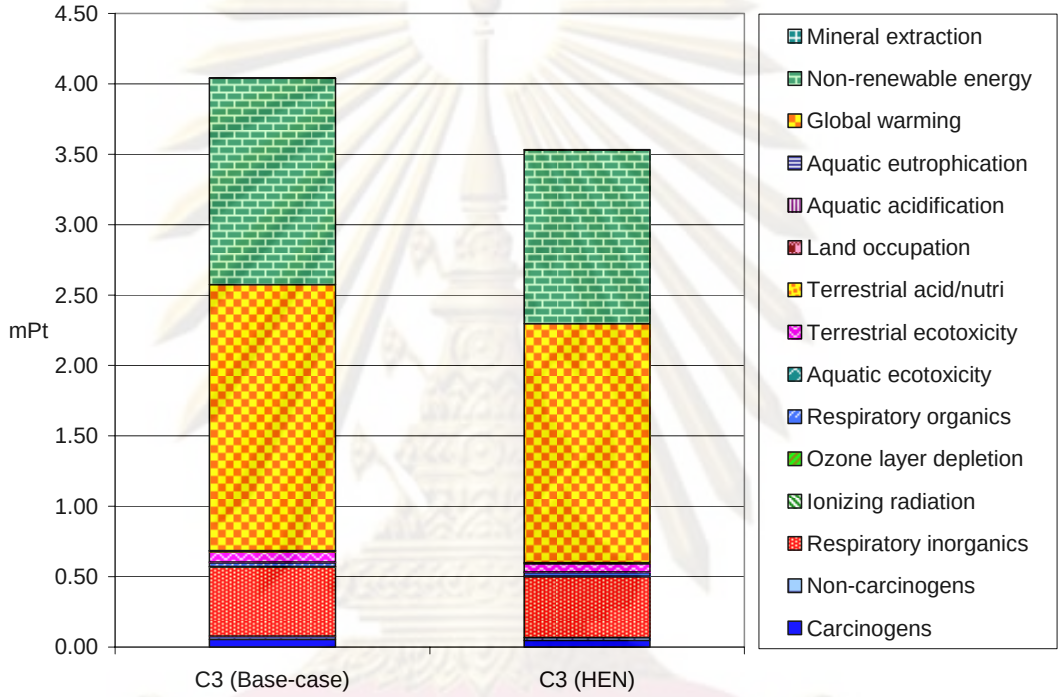


ภาพที่ 4.30 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านโพรเพน ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ



ภาพที่ 4.31 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตผ่านโพรเพน ขั้นตอนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากภาพที่ 4.30 – 4.31 พบว่าการทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนลดผลกระทบอย่างชัดเจนในด้านพลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้และภาวะโลกร้อน โดยลดผลกระทบในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบเพียงอย่างเดียว โดยลดผลกระทบลงร้อยละ 12.62 จากการลดใช้พลังงานได้ร้อยละ 20.19 ทำให้สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของทั้งสองขั้นตอนจาก 4.0416 mPt เป็น 3.5334 mPt ดังแสดงในภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.32 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการออกแบบข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพนแบบ “Cradle-to-Gate”

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตพอลิเอสเตอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว สารประกอบโคพอลิเมอร์และเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารอื่น ๆ โดยความต้องการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ส่วนแรก คือ การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพื่อศึกษาว่าในกระบวนการผลิตมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร และขั้นตอนใดส่งผลกระทบสูงสุด โดยพิจารณาถึงการใช้สารตั้งต้นต่างกันเพื่อทำให้ทราบว่าทางเลือกใดมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ส่วนที่สอง การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้สารตั้งต้นต่างกันภายใต้ความไม่แน่นอน ส่วนที่สาม การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์โดยการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายหลังการทำโครงข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

5.1 บทสรุป

จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0 ด้วยวิธี IMPACT 2002+ ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้สารตั้งต้นต่างกัน

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไดรด์ที่มีการใช้สารตั้งต้นต่างกัน พบว่า ทั้งในขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ การใช้โพรเพนเป็นสารตั้งต้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในทุกด้าน เนื่องจากการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการนำสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยและการทำให้บริสุทธิ์ของกรดอะซิติกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบ “Cradle-to-Gate” กระบวนการผลิตมาเลอิก

แอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพนจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดด้วย ยกเว้นผลกระทบด้านพลังงานที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ ซึ่งกระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทนส่งผลกระทบสูงสุดในด้านนี้ และจากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่เกิดจากพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จากการให้คะแนนเชิงเดี่ยวสามารถสรุป ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

นอร์มอล-บิวเทน $<$ นอร์มอล-เพนเทน $<$ โพรเพน

ดังนั้นการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทนเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือของการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

5.1.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอน

การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ภายใต้ความไม่แน่นอนจากการสุ่มตัวอย่าง 10,000 ครั้ง และแปลผลที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยืนยันผลได้ว่ากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-เพนเทน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 100 ทั้งนี้ เนื่องจากขั้นตอนการผลิตนอร์มอล-เพนเทนมีผลกระทบมากกว่าขั้นตอนการผลิตนอร์มอล-บิวเทน และการเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ทำให้กระบวนการผลิตมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น

5.1.3 การพัฒนากระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์

จากผลการประเมินผลกระทบ พบว่าผลกระทบส่วนใหญ่เกิดจากการใช้พลังงาน การทำข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นการลดพลังงานที่ใช้ในระบบ โดยทำให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากกระบวนการผลิตได้ จากการศึกษาพบว่า การทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงทุกด้าน

กระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทนสามารถลดพลังงานของกระบวนการผลิตได้น้อยลงร้อยละ 8.22 ส่วนกระบวนการผลิตผ่านโพรเพนและนอร์มอล-เพนเทนลดพลังงานได้ร้อยละ 20.19 และ 33.70 ตามลำดับ ถึงแม้กระบวนการผลิตผ่านนอร์มอล-บิวเทนจะลดพลังงานได้น้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ แต่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมยังคงน้อยที่สุดเช่นเดิม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การกำหนดขอบเขตในการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ “Cradle-to-Grave” ทำให้การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมีความสมบูรณ์ขึ้น

2. ในการออกแบบกระบวนการผลิตหากใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือให้มีความเหมาะสมมากขึ้น ทำให้ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมน้อยลง ตัวอย่าง การนำสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน หากใช้วิธีอื่น เช่น เทคนิค Pressure Swing Adsorption (PSA) อาจทำให้ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมลดลง แต่เนื่องจากโปรแกรมการจำลองกระบวนการผลิตไม่สามารถจำลองอุปกรณ์นี้ได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเป็นวิธีการควบแน่นแทน

3. ในส่วนของการพัฒนากระบวนการผลิต สามารถทำได้หลายวิธีนอกจากวิธีการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ การปรับเปลี่ยนวิธีหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงเรื่องค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเพื่อประกอบการพิจารณาศึกษาถึงความเป็นไปได้ร่วมด้วย

4. เนื่องจากโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro และวิธี IMPACT2002+ ที่ใช้ในการประเมินผลกระทบทางสิงแวดล้อมเป็นโปรแกรมที่มีการศึกษาและพัฒนาในค่าปัจจัยต่าง ๆ รวมทั้งการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญกับผลกระทบในแต่ละประเภทมาจากกลุ่มประเทศยุโรป ดังนั้นการศึกษาและคำนวณหาค่าปัจจัยต่าง ๆ ใหม่เพื่อให้เป็นค่าที่เหมาะสมกับประเทศไทยมากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] News & Press release distribution network today. Maleic anhydride Consumption[Online]. (n.d.). Available from: http://www.newswiretoday.com [2009]

[2] Alain, C. and Gilles, L. Petrochemical Process 2: 301-310.

[3] Kurt, L., et al. Maleic and fumaric acid. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry 20 (2003): 463-473.

[4] Bignardi, G., et al. Influence of the oxidation state of vanadiumon the reactivity of V/P/O, catalyst for the oxidation of n-pentane to maleic andphthalic anhydrides. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 244 (2006): 244-251.

[5] Albonetti, S., et al. A Comparison of the Reactivity of "Nonequilibrated" and "Equilibrated" V-P-O Catalysts: Structural Evolution, Surface Characterization, and Reactivity in the Selective Oxidation of n-Butane and n-Pentane. Journal of catalysis 160 (1996): 52-64.

[6] Cavani, F., Colombo, A., Giuntoli, F., Gobbi, E., Trifirò, F., and Vazquez, P. Role of surface properties of the vanadyl pyrophosphate in the formation of maleic and phthalic anhydrides by n-pentane oxidation. Catalysis Today 32 (1996): 125-132.

[7] Dillon, C. J., Holles, J. H., Davis, M. E., and Labinger, J. A. Heteropolyacid-based catalysts for selective alkane oxidation: mechanism of formation of maleic anhydride from propane. Catalysis Today 80 (2003): 189-195.

[8] Tang, J., Chen, C. X., Li, W. S., and Zhou, X. P. Highly efficient conversion of propane to maleic anhydride and acetic acid by partial oxidation. Applied Catalysis A: General 287 (2005): 197-202.

[9] Davis, M. E., Dillon, C. J., Holles, J. ., Labinger, J. A., and Brait, A. Polyoxometallate catalysts and catalytic processes. U.S. Patent 6,914,029, 2005.

[10] Sookraj, S. H., and Engelbrecht, D. Selective oxidation of light hydrocarbons over promoted vanadyl pyrophosphate. Catalysis Today 49 (1999): 161-169.

[11] Chen, X. C., Tang, J., Li, W. S., Au, C. T., and Zhou, X. P. The partial oxidation of C4-C6 alkane to maleic anhydride, 2-methyl maleic anhydride, and acetic acid over MoVO catalysts. Catalysis Letters 111 (2006): 103-109.

[12] Cicmenec, P., Syslova, K., and Tichy, J. The partial oxidation of Crotonaldehyde over V-Mo-O catalyst. Topics in Catalysis 45 (2007): 229-232.

[13] Centi, G., Cavani, F., and Trifirò, F. Selective oxidation by Heterogeneous Catalysis. : Hardcover, 2000.

[14] Shima, K., and Hatano, M. Maleic anhydride by heterogeneous oxidation of n-butane. Applied Surface Science 121/122 (1997): 452-460.

[15] Duda, M., Machhammer, O., and Weck, A. Method for the production of maleic anhydride. U.S. Patent 7,345,167 B2, 2008.

[16] ฝ่ายธุรกิจและสิ่งแวดล้อม. คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. นนทบุรี: สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547.

[17] Rebizer, G., et al. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and acope definition, inventory analysis, and applications. Environment International 30 (2004): 701-720.

[18] Pennington, D. W., et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. Environment International 30 (2004): 721-739.

[19] Protert & Gamble. Part I: The LCA Approach[Online]. 2005. Available from: http://scienceinthebox.com [2009]

[20] สิทธิกร ผลพอตน. การประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549.

[21] PRé Consultants. SimaPro[Online]. 2005. Available from: http://www.pre.nl/simapro/htm [2009]

[22] Jonbrink, A. K., et al. LCA software survey. Sweden: IVF Research Publication, 2000.

[23] Humbert, S., Margni, M., and Jolliet, O. IMPACT2002+ UserGuide. Switzerland: 2005.

[24] Jolliet, O., et al. IMPACT 2002+ : A New Life Cycle Impact Assessmenr Methodology. Int. J. LCA 8 (2003): 324-330.

[25] A Standard & Poor's Company. Crisil Research[Online]. 2007. Available from: http://www.crisil.com [2009]

[26] Centi, G., et al. Synthesis of Phthalic and Maleic Anhydride from n-Pentane. 1. Kinetic Analysis of the Reaction Network. Ind. Eng. Chem. Res. 28 (1989): 400-406.

[27] Lummus Technology. ALMA Maleic Anhydride[Online]. (n.d.). Available from: http://www.Lummus.CBI.com [2009]

[28] Sookraj, S. H. Process for producing a vanadium phosphorus oxide catalyst. U.S. Patent 6,228,798, 2001.

[29] Higgins, R., and Hutchings, G. J. Production of maleic anhydride and catalysts therefore. U.S. Patent 4,147,661, 1979.

[30] Lorences, M. J., Patience, G. S., Diez, F. V., and Coca, J. Butane oxidation to Maleic Anhydride : Kinetic Modeling and Byproduct. Ind. Eng. Chem. Res. 42 (2003): 6730-6742.

[31] Brown, H. C., and Alumbaugh, W. H. Process for the preparation and recovery of maleic anhydride. U.S. Patent 5,631,387, 1997.

[32] Rahn, R., Week, A., and Kaibel, G. Method for purifying an organic solvent for the purposes of absorption of maleic acid anhydride. U.S. Patent 6,921,830 B2, 2005.

[33] Franklin, F. C. Maleic anhydride recovery. U.S. Patent 3,965,123, 1976.

[34] White, J. E. Recovery of maleic anhydride. U.S. Patent 4,118,403, 1978.

[35] Katsumoto, K., and Lind, W. H. Maleic anhydride recovery using nonaqueous medium. U.S. Patent 3,891,680, 1975.

[36] Marquis, D. M. Anhydride separation process. U.S. Patent 4,071,540, 1978.

[37] Suzuki, S., Horino, H., and Ohishi, T. Radical polymerization initiator and process for its preparation. U.S. Patent 3,939,138, 1976.

[38] Brown, H. C., Alumbaugh, W. H., and Burnett, J. C. Process for the purification of maleic anhydride. U.S. Patent 6,090,245, 2000.

[39] Cavani, F., and Trifirò, F. The characterization of the surface properties of V-P-O-Based catalysts by probe molecules. Applied Catalysis A: General 157 (1997): 195-221.

[40] Jones, L. O., and Baiel, J. J. Method for recovering phthalic anhydride/maleic anhydride mixtures by distillation. U.S. Patent 5,869,700, 1999.

[41] Paradis, S. G., Marquis, D. M., and Bakshi, K. R. Maleic anhydride production. U.S. Patent 4,231,943, 1980.

[42] Bertola, A., and Cassarino, S. High productivity process to produce maleic anhydride from n-butane. U.S. Patent 6,040,460, 2000.

[43] Lei, Z., Li, C., Li, Y., and Chen, B. Separation of acetic acid and water bu complex extractive distillation. Separation and Purification Technology 36 (2004): 131-138.

[44] De Dietrich Process System. Recovery of Acetic Acid by means of Liquid-Liquid Extraction[Online]. 2005. Available from: http://www.qvf.com [2009]

[45] Koga, K., and Kishimoto, R. Method of recovery acetic acid. U.S. Patent 4,353,784, 1982.

[46] Azapagic, A., et al. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization. Chemical Engineering Journal 73 (1999): 1-21.

[47] Tukker, A.,. Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review 20 (2000): 435-456.

[48] Johns, W. R., Kokossis, A., and Thompson, F. A flowsheeting approach to integrated life cycle analysis. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 4 (2008): 557-564.

[49] Singh, A., et al. Environmental impact assessment of different design schemes of an industrial ecosystem. Resources, Conservation and Recycling 51 (2007): 294-313.

[50] Harding, K. G., et al. A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel. Journal of Cleaner Production 16 (2008): 1368-1378.

[51] Foolmaun, R. K., and Ramjeawon, T. Life Cycle Assessment (LCA) of PET bottles and comparative LCA of three disposal option in Mauritius. International Journal of Environment and Waste Management 2 (2008): 125-138.

[52] Kiwjaroun, C., Tubtimdee, C., and Piumsomboon P. LCA studies comparing biodiesel synthesized by conventional and supercritical methanal methods. Journal of Cleaner Production 17 (2009): 143-153.

[53] Sugiyama, H., et al. Using Standard Statistics to Consider Uncertainty in Industry-Based Life Cycle Inventory Databases. Int. J. LCA 10 (2005): 399-405.

[54] Djoma, S. N., Humbert, S., and Blumberga, D. Life cycle assessment of hydrogen produced from potato steam peels. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 3067-3072.

[55] Shah, V. P., Debella, D. C., and Ries, R. J. Life cycle assessment of residential heating and cooling system in four regions in the United States. Energy and Buildings 40 (2008): 503-513.

[56] Felthpuse, T. R., et al. Maleic anhydride, maleic acid, and fumic acid. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology 15 (2005): 481–501.

[57] Brown, B. D., et al. Gas phase interaction with catalytic oxidation reaction. Proc. R. SOC. Lond. A 326 (1972): 215-227.

[58] Domènech, X., Ayllón, J. A., and Pera, J. How Green Is Chemical Reaction? Application of LCA to Green Chemistry. Environ. Sci. Technol. 36 (2002): 5517-5512.

[59] Dente, M., et al. Selective oxidation of n-butane to maleic anhydride in fluid bed reactors: detailed kinetic investigation and reactor modeling. Chemical Engineering Science 58 (2003): 643–648.

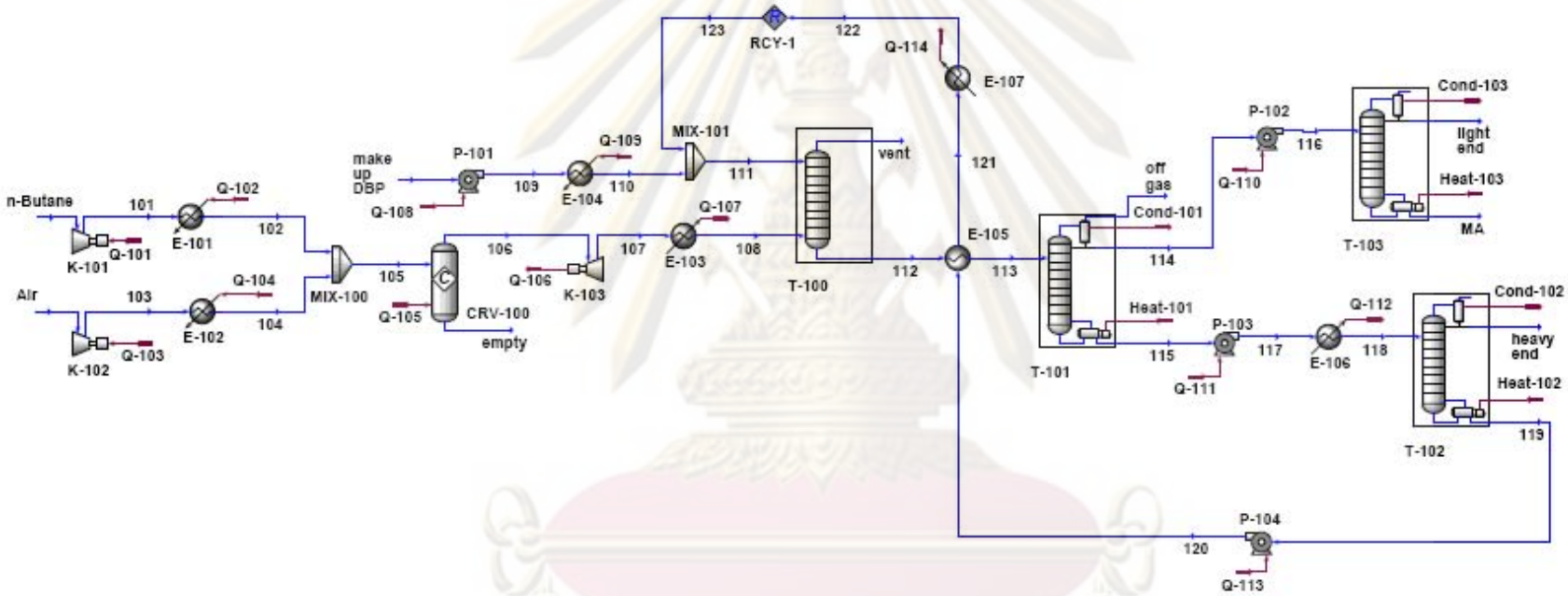
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

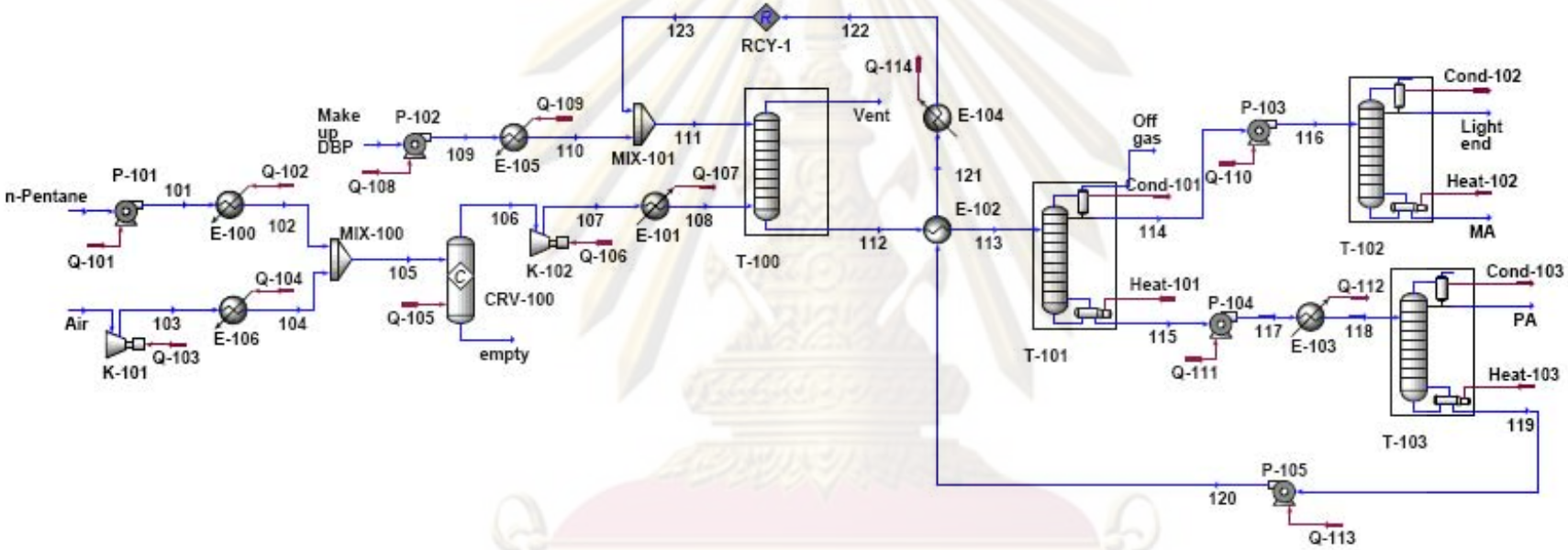
ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



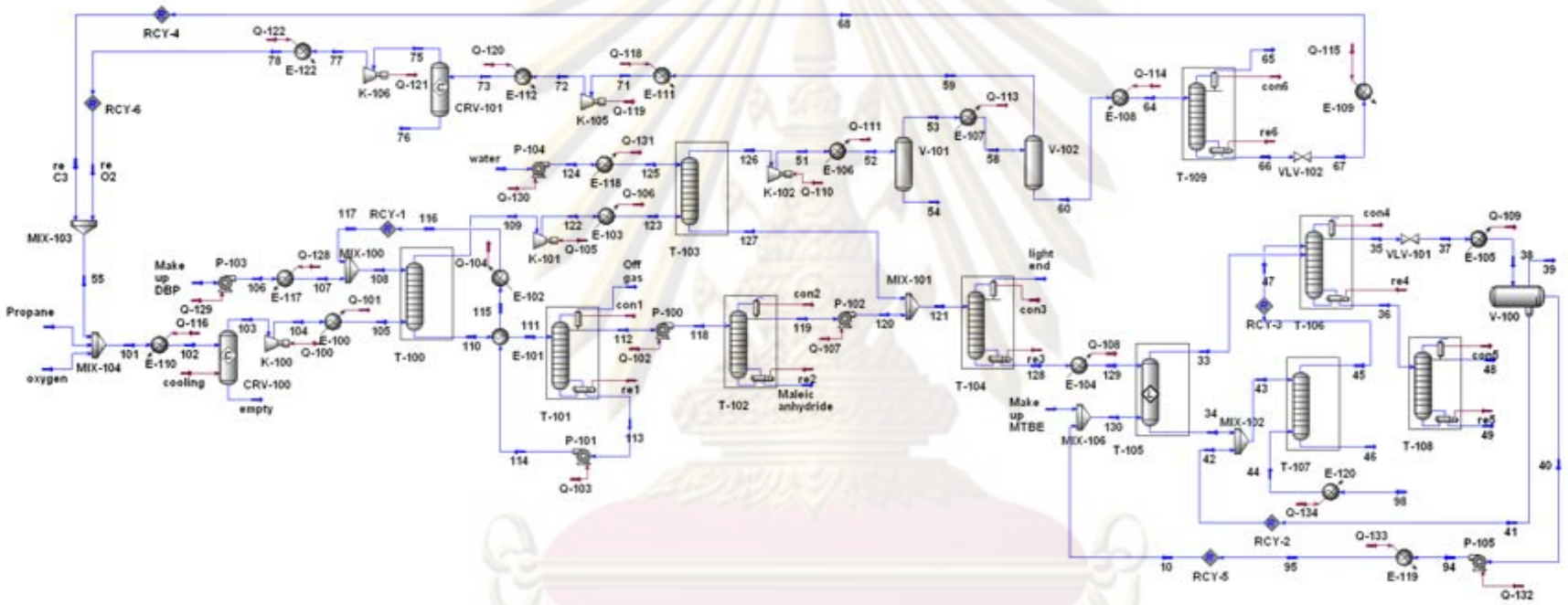
ภาพที่ ก1 การจำลองกระบวนการมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



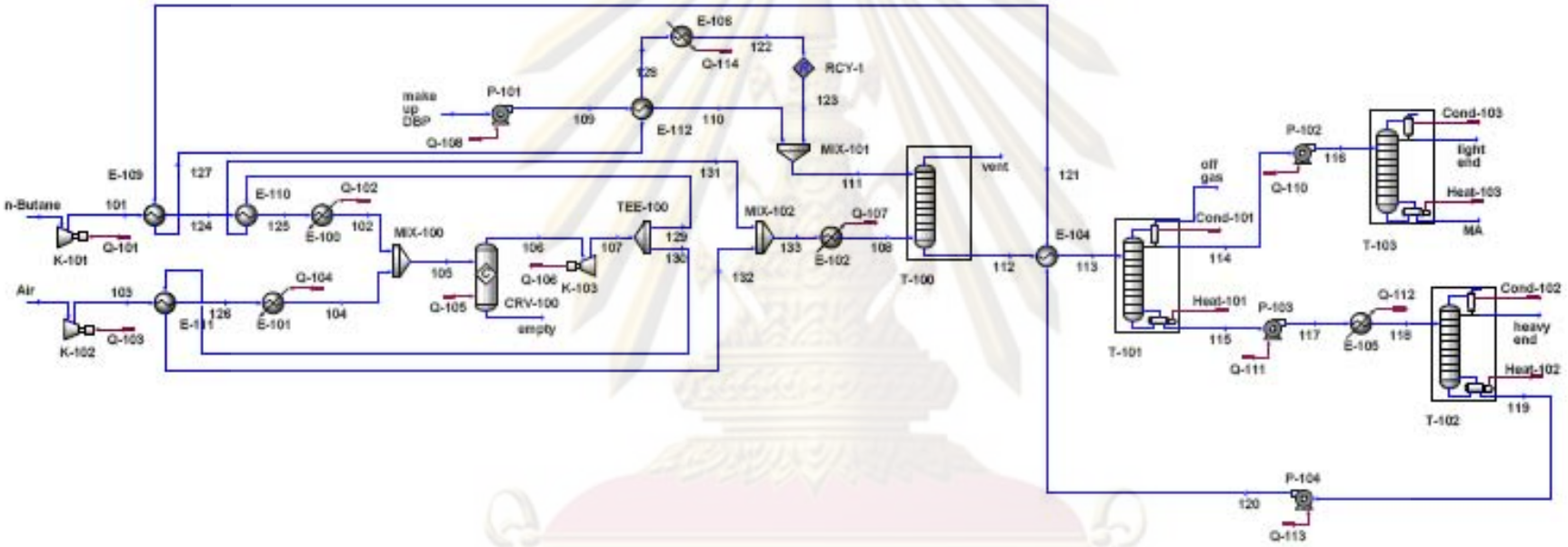
ภาพที่ ก2 การจำลองกระบวนการมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



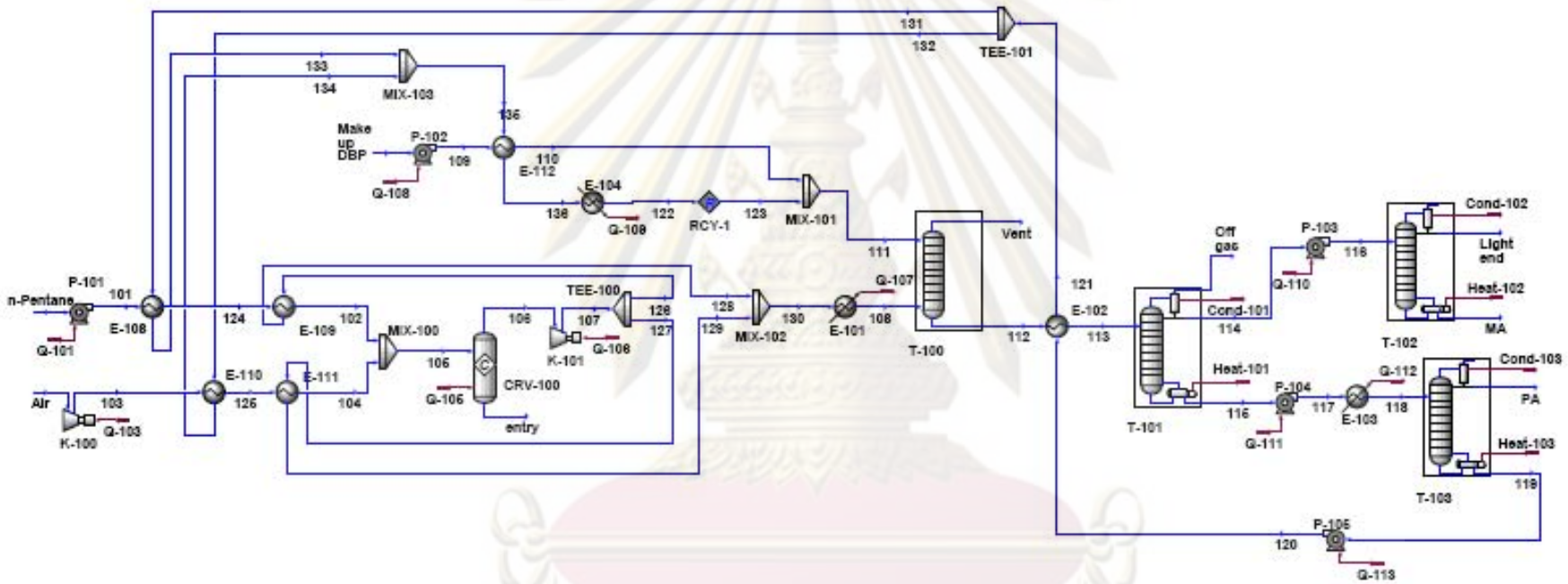
ภาพที่ ก3 การจำลองกระบวนการมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



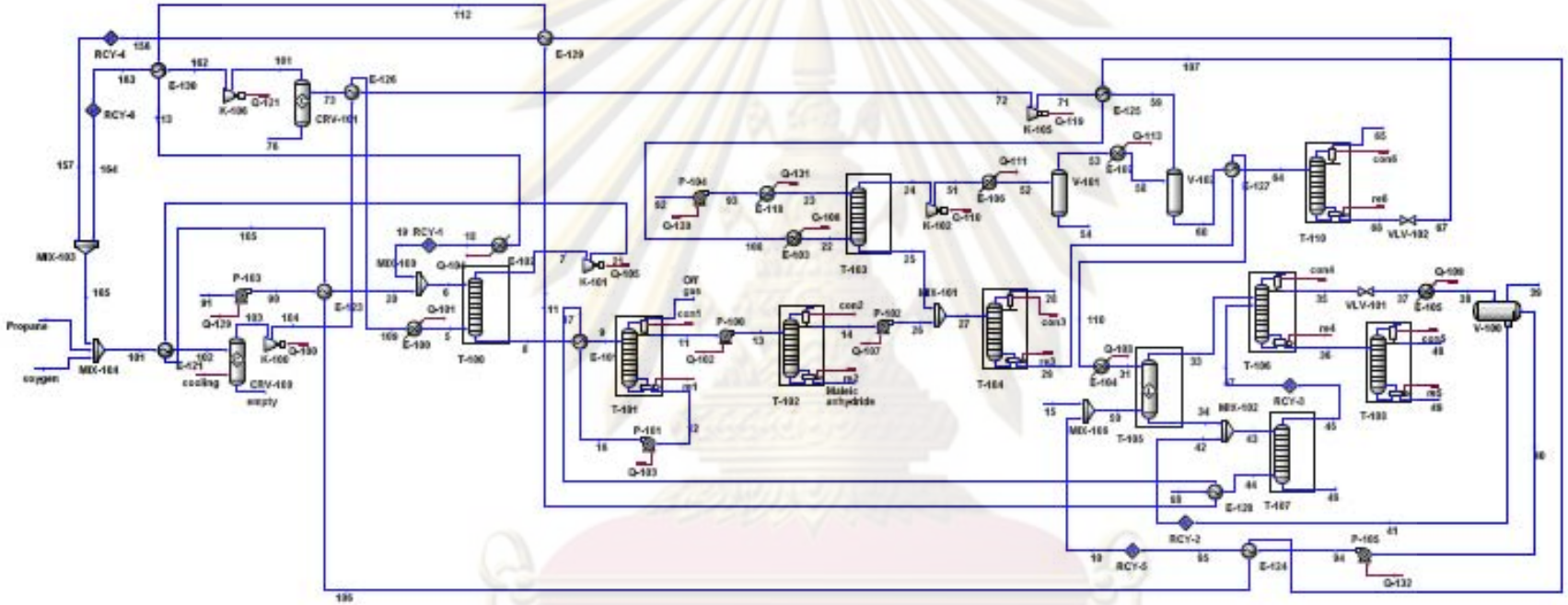
ภาพที่ ก4 การจำลองการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ก5 การจำลองการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

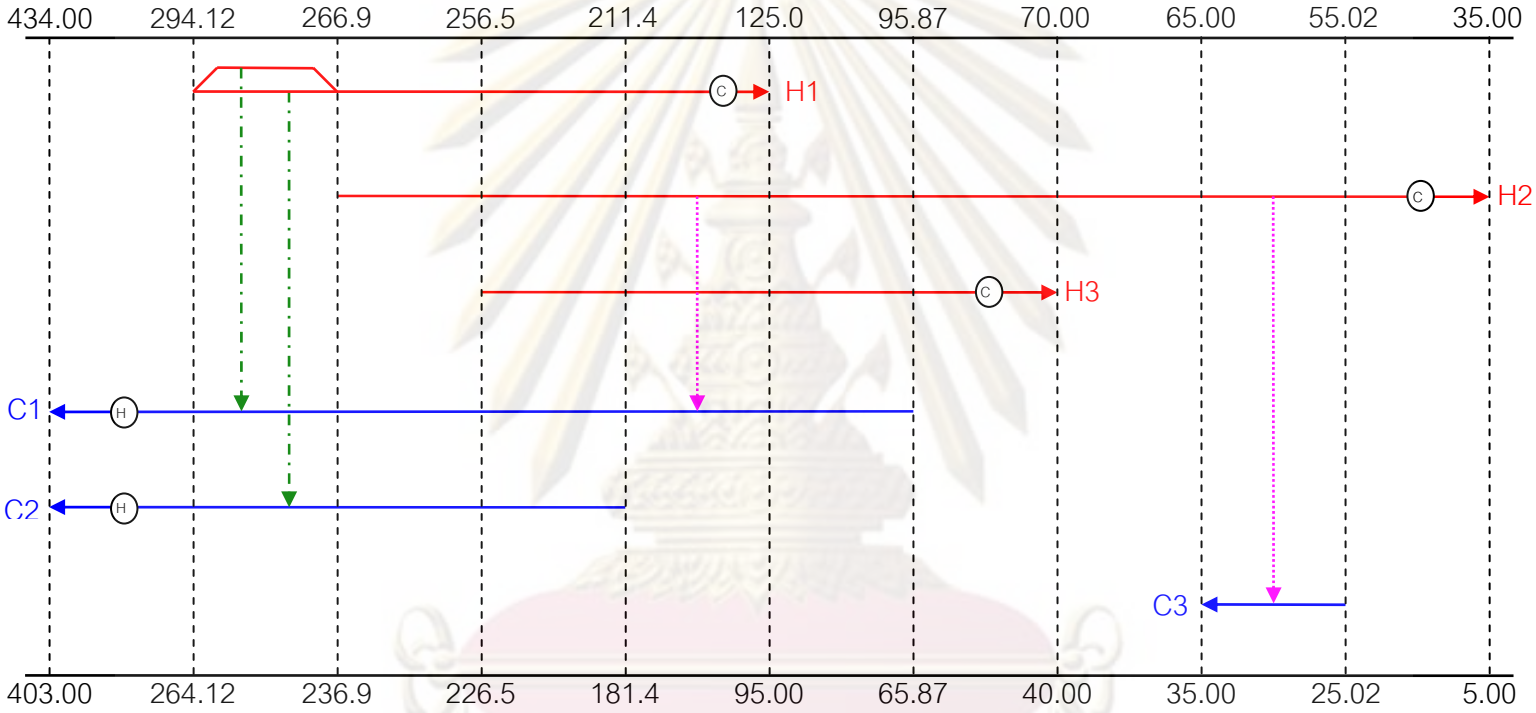


ภาพที่ ก6 การจำลองการทำข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

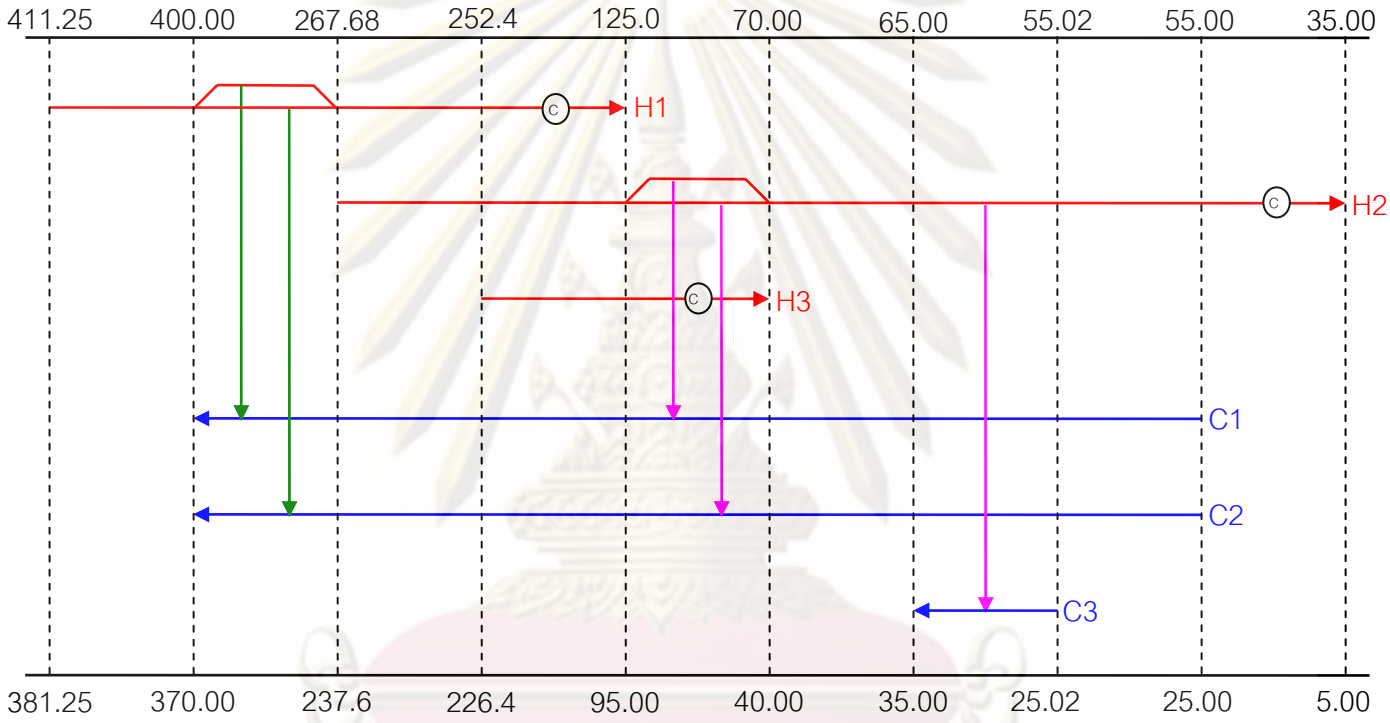
ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



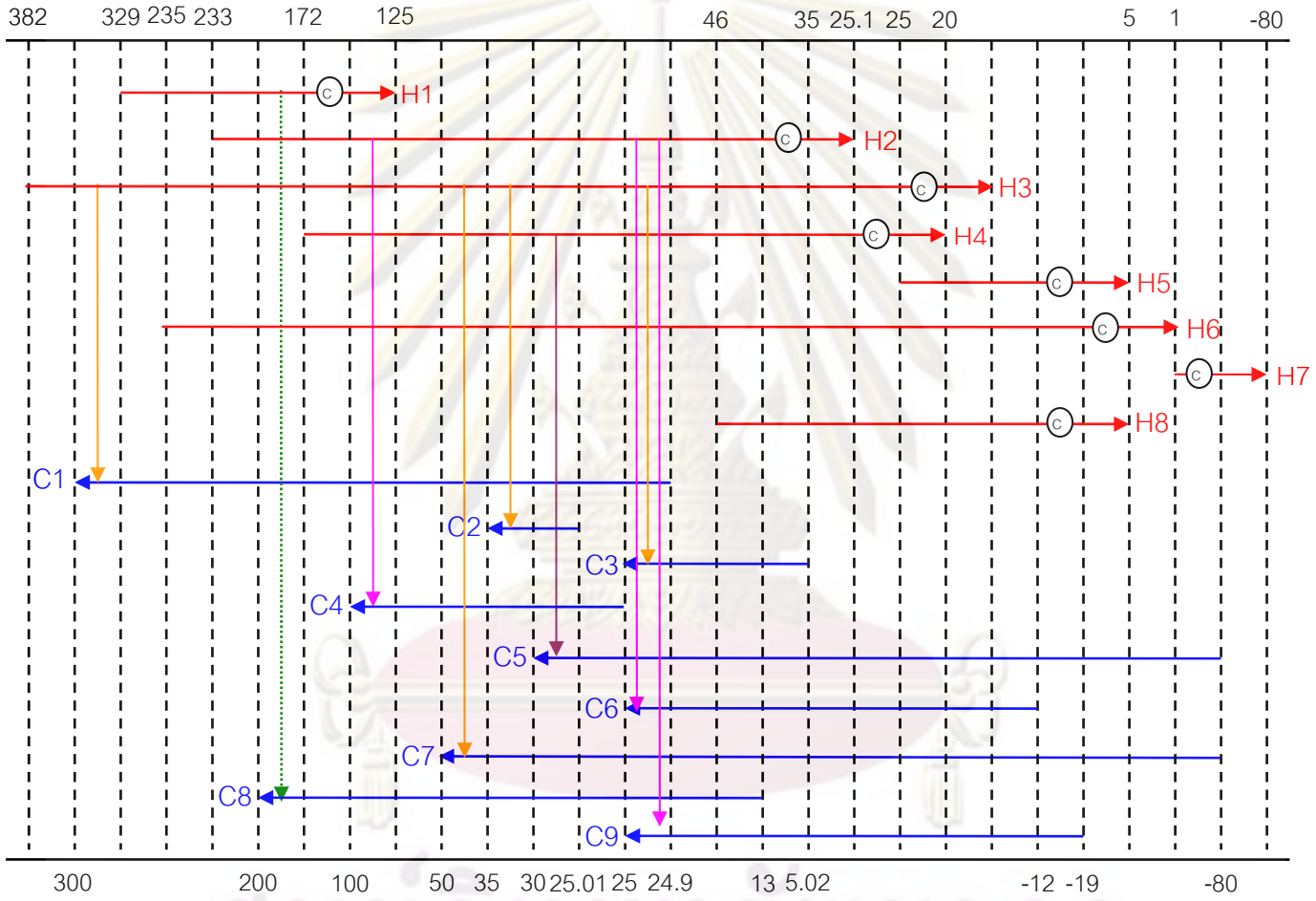
ภาพที่ ข1 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-บิวเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข2 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านนอร์มอล-เพนเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข3 ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตมาเลอิกแอนไฮไดรด์ผ่านโพรเพน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค1 ค่า Damage factor

Impact category	Factor	Unit
Human health		
Carcinogens	2.80E-06	DALY / kg C_2H_3Cl eq
Non-carcinogens	2.80E-06	DALY / kg C_2H_3Cl eq
Respiratory inorganics	7.00E-04	DALY / kg PM2.5 eq
Ionizing radiation	2.10E-10	DALY / Bq C-14 eq
Ozone layer depletion	1.05E-03	DALY / kg CFC-11 eq
Respiratory organics	2.13E-06	DALY / kg C_2H_4 eq
Ecosystem quality		
Aquatic ecotoxicity	5.02E-05	PDF*m^2*yr / kg TEG water
Terrestrial ecotoxicity	7.91E-03	PDF*m^2*yr / kg TEG soil
Terrestrial acid/nutri	1.04E+00	PDF*m^2*yr / kg SO_2 eq
Land occupation	1.09E+00	PDF*m^2*yr / m^2org.arable
Climate change		
Global warming	1.00E+00	kg CO_2 eq/ kg CO_2 eq
Resources		
Non-renewable energy	1.00E+00	MJ primary / MJ primary
Mineral extraction	1.00E+00	MJ primary / MJ surplus

ภาคผนวก ค2 ค่า Normalization และ Weighting

	Normalization	Weighting
Human health	7.09E-03	1
Ecosystem quality	13698.63014	1
Climate change	9900.990099	1
Resources	151975.6839	1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววีณา ชุติมานิตสกุล เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2548 หลังจากนั้นในปีการศึกษา 2549 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปี 2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย