การศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับกระบวนการผลิตฟีนอลที่แตกต่างกัน 2 กระบวนการ

นางสาววิไลวรรณ โพนคำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIFE CYCLE ASSESSMENT STUDY FOR TWO DIFFERENT PHENOL PRODUCTION PROCESSES

Miss Wilaiwan Ponkham

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับกระบวนการผลิตฟีนอลที่แตกต่างกัน 2 กระบวนการ
โดย	นางสาววิไลวรรณ โพนคำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. วชิรา ดาวสุด)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิไลวรรณ โพนคำ : การศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับกระบวนการผลิตฟีนอลที่แตกต่างกัน 2 กระบวนการ. (LIFE CYCLE ASSESSMENT STUDY FOR TWO DIFFERENT PHENOL PRODUCTION PROCESSES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร, 115 หน้า.

ฟีนอลนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในภาคอุตสาหกรรมหลายๆ สาขา เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเภสัชกรรม และอุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น ไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตมนุษย์เท่านั้นยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตในการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ คือ การผลิตฟีนอลจากคิวมีน (the Hock process) และการผลิตฟีนอลจากโทลูอีน (the Dow process) เนื่องจากข้อมูลที่ทราบ คือ ผลิตภัณฑ์ฟีนอล และสภาวะต่างๆ ที่ได้จากงานวิจัยนานาชาติ จึงจำลองกระบวนการผลิตฟีนอลด้วยโปรแกรม HYSYS เพื่อให้ทราบถึงปริมาณสารที่เข้าสู่กระบวนการผลิต ปริมาณสารที่ออกจากกระบวนการผลิต และพลังงานที่ใช้ หลังจากนั้นศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยการใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอล ซึ่งจะพิจารณาตั้งแต่วัตถุดิบจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ (Cradle-to-Gate) ด้วยดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดที่ครอบคลุมในส่วนต่างๆ เช่น ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ และการลดลงของวัตถุดิบ เป็นต้น งานวิจัยนี้ศึกษา ผลิตภัณฑ์ฟีนอลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ผลการศึกษาสิ่งแวดล้อมเชิงคะแนนเดียว (Single score) ซึ่งจะอยู่ในหน่วย Pt พบว่าวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน มีค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม เท่ากับ 216.08 Pt และ วิธีโทลูอีน ออกซิเดชันมีค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม เท่ากับ 15.58 Pt หลังจากนั้นประเมินวัฏจักรชีวิตโดยวิธีคาร์บอน ฟุตพริ้นท์ เพื่อประเมินผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พบว่าวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน มีค่าเท่ากับ 15.598 $kgCO_2e$ และวิธีโทลูอีน ออกซิเดชันมีค่าเท่ากับ 12.158 $kgCO_2e$ ดังนั้น จาก 2 กรณีศึกษา กระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน จะส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตฟีนอลจากวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต วิไลวรรณ โพนคำ

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก Prasert Kittisupakorn

ปีการศึกษา 2553

5070676121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LIFE CYCLE ASSESSMENT(LCA) / PHENOL PRODUCTION

WILAIWAN PONKHAM : LIFE CYCLE ASSESSMENT STUDY FOR TWO DIFFERENT PHENOL PRODUCTION PROCESSES. ADVISOR : ASSOC. PROF. PAISAN KITTISUPAKORN, Ph.D., 115 pp.

Phenol is an important raw material in many industrial fields such as the petrochemical industry, pharmaceutical industry and plastics industry. It not only benefits human life, but is also have an environmental impact. The objective is to study and compare the two different phenol production processes, of cumene oxidation (the Hock process) and toluene oxidation (the Dow process). Life cycle assessment (LCA) has been used to evaluate the environmental impact of the phenol production processes. We know the amount of phenol product and the condition of reactions based on international technical papers, so Hysys has been used to simulate phenol production processes to obtain data on amount of raw material, material streams leaving the production process and energy consumed. Then an environmental impact by Eco-indicator 99 is evaluated. This indicator is able to cover the evaluation of all environmental impacts which are human health, ecosystem and resources. In this study the research shows the phenol rate was 1 kg/hr, environmental impact was based on a single score of cumene oxidation was 216.08 Pt and toluene oxidation was 15.58 Pt . Then we can evaluate climate change impact by Carbon footprint which cumene oxidation was 15.598 $kgCO_2e$ and toluene oxidation was 12.158 $kgCO_2e$. Therefore it is determined that phenol production from the cumene oxidation process has a higher environmental impact than phenol production from toluene oxidation process.

Department : Chemical Engineering Student's Signature Wilaiwan Ponkham

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature Paisan Kittisupakorn

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่รักยิ่งที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวในการทำงานวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างยิ่ง โดยประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. ธราธร มงคลศรี (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. สุรเทพ เขียวหอม (กรรมการ) และ ดร.วชิรา ดาวสุด (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์และตรวจสอบเนื้อหาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณพี่และเพื่อนทุกคนที่เป็นสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมวัฏจักรชีวิต (LCE) ที่คอยให้ข้อเสนอแนะและกำลังใจในช่วงการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง และเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำงานวิจัยมาจนสำเร็จได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย……	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ……..	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา……..	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย……..	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย……..	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย……	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย……	3
1.6 เนื้อหาแต่ละบท……..	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง……..	5
2.1 หลักการและทฤษฎีการประเมินวัฏจักรชีวิต……..	5
2.1.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต……	5
2.1.2 ประวัติความเป็นมาของการประเมินวัฏจักรชีวิต……...	6
2.1.3 วัตถุประสงค์ของการประเมินวัฏจักรชีวิต……...	6
2.1.4 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต……	8
2.1.4.1 กำหนดเป้าหมายและขอบเขตของผลิตภัณฑ์การศึกษา……..…	8
2.1.4.2 การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์……...	10
2.1.4.3 การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์…….….	10
2.1.4.4 การแปลผล……	10

เนื้อหา หน้า

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตร่วมกับการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิต
ด้วยโปรแกรม HYSYS..... 11
2.3 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับประเมินวัฏจักรชีวิต..... 11
2.4.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro..... 12
2.4.2 การเลือกดัชนีวัดผลกระทบ..... 14
2.4.3 การประเมินผลกระทบโดยวิธี Eco-indicator 99..... 16
2.4 ข้อมูลทั่วไปของฟีนอล..... 21
2.4.1 ความเป็นอันตรายของฟีนอล..... 22
2.5 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ 24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 34
3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... 34
3.2 โปรแกรมสำหรับการทำวิจัย..... 36
3.3 กระบวนการผลิตฟีนอล..... 36
3.4 การทำบัญชีรายการ..... 45
3.5 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอล..... 48
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์..... 52
4.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอลแต่ละ
วิธีการผลิต..... 52
4.2 ผลเปรียบเทียบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอล..... 71

บทที่ 5 .บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 74
5.1 บทสรุป..... 74
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 75
รายการอ้างอิง..... 76

ภาคผนวก..... 79
ภาคผนวก ก. แผนผังการจำลองกระบวนการฟีนอลด้วยโปรแกรม HYSYS..... 80
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม..... 87
ภาคผนวก ค การคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม..... 90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	กลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ศึกษาแต่ละดัชนีชี้วัด…..……..	16
2.2	แสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มเป้าหมายที่ถูกทำลาย ประเภทของผลกระทบและสสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ……	18
2.3	อธิบายลักษณะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นของแต่ละประเภทของผลกระทบทั้ง 11 ผลกระทบ……..	19
2.4	สมบัติทางกายภาพของฟีนอล……...	22
2.5	แสดงค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้น ที่ระยะเวลา 100 ปี…….	26
3.1	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอล…….....	46
3.2	ปริมาณผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์พลอยได้ของกระบวนการผลิตฟีนอล…..	47
3.3	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิต……...	47
3.4	ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้น ที่ระยะเวลา 100 ปี……..	49
4.1	แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้ง 11 ผลกระทบ…….....	51
4.2	ประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปรของ คิวมีน 11 ผลกระทบ……..	54
4.3	ประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปรของ โทลูอีน 11 ผลกระทบ……..	57
4.4	แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน กับ วิธีโทลูอีนออกซิเดชัน กลุ่มสุขภาพมนุษย์.....…….……	61
4.5	แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน กับ วิธีโทลูอีนออกซิเดชัน กลุ่มระบบนิเวศน์……..……	64
4.6	แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน กับ วิธีโทลูอีนออกซิเดชัน กลุ่มทรัพยากรธรรมชาติ…….……	67
4.7	แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบทั้ง 11 ผลกระทบของการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ…….	72
4.8	แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบคะแนนเดียว…….	73
4.9	แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อน……..	73

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต……	8
2.2	ขั้นตอนและขอบเขตของ LCA……	9
2.3	แสดงแนวคิดในการจัดทำ LCA โดยใช้ Eco-indicator 99……..	20
2.4	โครงสร้างทางเคมีของฟีนอล……	22
3.1	ขอบเขตของงานวิจัยที่ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล……	34
3.2	แผนผังการผลิตฟีนอลด้วยวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน……..	36
3.3	แผนผังการผลิตฟีนอลด้วยวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน……..	37
3.4	หลักการทำงาน 4 ส่วนของกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน……	37
3.5	แผนผังการจำลองกระบวนการผลิตวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน……	40
3.6	แผนผังจำลองกระบวนการผลิตโพรพิลีน (Propylene)……	40
3.7	การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทลูอีน (Toluene) เป็นฟีนอล (Phenol)……..	41
3.8	หลักการทำงาน 3 ส่วนของกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน…….	41
3.9	แผนผังการจำลองกระบวนการผลิตวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน……	43
3.10	แผนผังจำลองกระบวนการผลิตอะซิโตน (Acetone)……..	43
4.1	ผลกระทบของการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน ……	53
4.2	ผลกระทบของการผลิตฟีนอลด้วยวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน……..	56
4.3	ผลิตฟีนอลทั้งสองวิธีการผลิต:กลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์……	61
4.4	ผลิตฟีนอลทั้งสองวิธีการผลิต:กลุ่มผลกระทบต่อระบบนิเวศน์……..	64
4.5	ผลิตฟีนอลทั้งสองวิธีการผลิต:กลุ่มผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ…….	67
4.6	เปรียบเทียบผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ:ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หน่วย Pt (กราฟคะแนนเดียว)……	70
4.7	แสดงการเปรียบเทียบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์รวมของผลิตภัณฑ์ฟีนอลของทั้งสองกระบวนการ……	71
4.8	แสดงการเปรียบเทียบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์สารแต่ละชนิดของกระบวนการผลิตภัณฑ์ฟีนอลของทั้งสองกระบวนการ……	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BEES	Building for Environmental and Economic Sustainability
CFC	Chlorofluorocarbon
CML	Centre of Environmental Science at Leiden University
CSTR	Continuous Stirred-Tank Reactor
DALY	Disability-adjusted life year
DCU	Distrillation Column Unit
EDIP	Environmental Design of Industrial Products
EF	Equivalency factor
EP	Environmental impact potential
EPD	Environmental Product Descriptions
ER	Normalization factor
ESP	Environmental Sample Processor
GHG	greenhouse gas
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernemental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MIX	Mixer
MSW	Municipal Solid Waste
NP	Normalized Environment Impact Potential
PDF	Potentially Disappeared Fraction
PFR	Plug Flow Reactor
Pt	1 Point is representative for one thousandth of the yearly environment load of one average European inhabitant

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Q	Heat flow (kJ/hr)
SETAC	Society of environment toxicology and chemical
SimaPro	System for Integrated Environmental Assessment of Products
T	Life Time of Product
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts
WF	Weighting Factor
WHO	World Health Organization
WP	Weighted Environmental impact Potential

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยกำลังอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงระบบเศรษฐกิจ จากเกษตรกรรม มาเป็นระบบที่พึ่งพาผลผลิตจากอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกมากขึ้นและทดแทนการนำเข้าให้น้อยลง ซึ่งส่งผลให้ประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว และจากการเพิ่มจำนวนอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วนี้ ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามไปด้วยเช่นกัน

อุตสาหกรรมการผลิตฟีนอล (Phenol) ซึ่งฟีนอลถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A, (BPA)) ซึ่งเป็นจุดเด่นในภาคอุตสาหกรรมนี้และสามารถนำไปใช้ในการผลิตอีพอกซี่เรซิน (Epoxy resin) และโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate)ได้ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอีพอกซี่เรซินนี้จะมี BPA เป็นส่วนประกอบมากกว่า 50 % ซึ่งสารอีพอกซี่เรซินนี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบผิว การยึดติด และสารประกอบ รวมทั้งใช้สำหรับการขึ้นรูป และทำแม่แบบ ส่วนโพลีคาร์บอเนตซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) โดยมี BPA เป็นสารตั้งต้น โพลีคาร์บอเนตเป็นพลาสติกที่มีลักษณะใส แข็ง และทนความร้อนได้ดี จึงนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ได้แก่ เม็ดพลาสติกที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ แผ่นซีดี เลนส์แว่นตาน้ำหนักเบาและขวดน้ำพลาสติก เป็นต้น [1]

ฟีนอลถูกค้นพบครั้งแรกใน ค.ศ. 1834 โดย F.Runge ซึ่งฟีนอลเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ในลิกนิน (Lignin) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของพืชในไม้เนื้อแข็ง นอกจากนี้แล้วฟีนอลยังมีอยู่ในปัสสาวะมนุษย์ถึง 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่เพียงเท่านี้ ฟีนอลยังสามารถผลิตได้จาก คิวมีน ออกซิเดชัน (the Hock process) และ โทลูอีน ออกซิเดชัน (The Dow process) [2] ซึ่งสารพิษที่ปล่อยจากกระบวนการผลิตฟีนอลมีผลต่อสุขภาพมนุษย์ ต่อระบบนิเวศน์และต่อทรัพยากร จากฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี พบว่า ฟีนอลมีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น มีความเป็นพิษเฉียบพลัน กัดกร่อนและระคายเคืองต่อผิวหนัง ทำลายดวงตาอย่างรุนแรงและระคายเคืองต่อตา และทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของเซลล์สืบพันธุ์ เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า ฟีนอล นอกจากจะให้ประโยชน์ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์แล้วยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาและ

เปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ คือ คิวมีน ออกซิเดชัน (the Hock process) และ โทลูอีน ออกซิเดชัน (the Dow process) ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่สามารถที่จะไปตรวจวัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้โดยตรงจึงจำลองกระบวนการผลิตฟีนอล โดยใช้โปรแกรม HYSYS จำลองกระบวนการผลิตฟีนอลแทน ซึ่งจะได้ข้อมูลสารที่เข้าสู่กระบวนการผลิต สารที่ออกจากกระบวนการผลิต และพลังงานที่ใช้ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ใส่ในโปรแกรม SimaPro โดยใช้ดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อมนุษย์ ต่อระบบนิเวศน์ และสารที่ถูกใช้ไปในกระบวนการผลิตฟีนอล

1.2 **วัตถุประสงค์ของงานวิจัย**

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลโดยสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตจากโปรแกรม HYSYS โดยใช้วิธีการผลิตต่างกัน เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ โดยการใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรม SimaPro และเทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์

1.3 **ขอบเขตของงานวิจัย**

1) งานวิจัยนี้ได้ประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล ที่มีการใช้ผลิตที่แตกต่างกัน คือ คิวมีน และโทลูอีน
2) พิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตฟีนอลจากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตโดยใช้ โปรแกรม HYSYS
3) ประเมินวัฏจักรชีวิตและประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอลโดยใช้ โปรแกรม SimaPro ด้วยดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ซึ่งจะมีขอบเขตตั้งแต่ผลกระทบจากการใช้วัตถุดิบและผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิต และประเมินวัฏจักรชีวิตแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์
4) การออกแบบและจำลองกระบวนการผลิต ได้เก็บรวบรวมมาจากบทความเอกสารทางวิชาการระดับนานาชาติ และสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1) ทราบผลกระทบต่อมนุษย์ ต่อสิ่งแวดล้อม และต่อทรัพยากร ที่เกิดจากกระบวนการผลิตฟีนอล
2) ทราบแนวทางและวิธีที่เหมาะสมในการพิจารณากระบวนการผลิตฟีนอล เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาและค้นหาข้อมูลและทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการผลิตฟีนอล
2) พัฒนาแบบจำลองของกระบวนการผลิตฟีนอลโดยใช้โปรแกรม HYSYS
3) ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล โดยใช้โปรแกรม SimaPro และทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอลโดยวิธีคาร์บอนฟุตพริ้นท์
4) ประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตฟีนอล
5) วิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย และจัดทำผลการวิจัย

1.6 เนื้อหาแต่ละบท

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาสำหรับงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยที่ได้ศึกษา วิธีการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง อธิบายถึงหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA และกล่าวถึงคุณสมบัติของฟีนอล การใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม อธิบายกระบวนการผลิตฟีนอลโดยได้อธิบายแต่ละหน่วยของกระบวนการผลิตทั้ง 2 กระบวนการ และยังกล่าวถึงวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตวิธีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ นอกจากนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ จากวารสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 อธิบายถึงงานวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยกล่าวถึงตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ขั้นตอนการวิจัย และวิธีที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต

บทที่ 4 เป็นส่วนของผลการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตโดยใช้โปรแกรม Hysys ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตของแต่ละแบบการผลิต ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro และการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยวิธีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ผลที่ได้จะแสดงผลเป็นกราฟที่เป็นผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิตฟีนอลของแต่ละแบบในการผลิต และผลการเปรียบเทียบผลกระทบด้านต่างๆ ที่เกิดจากการผลิตฟีนอลที่มีการผลิตที่ต่างกัน และวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 5 กล่าวสรุปถึงวิธีที่ใช้ในการผลิตแบบใดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และรวมถึงข้อเสนอแนะของการทำวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) วิธีและขั้นตอนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิต ประโยชน์จากการนำการประเมินวัฏจักรชีวิตไปประยุกต์ใช้ พร้อมทั้งโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตและอธิบายถึงการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro สำหรับใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต นอกจากนี้ยังกล่าวถึงรายละเอียดและสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับฟีนอล

2.1 หลักการและทฤษฎีการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

2.1.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากขั้นตอนต่างๆที่เกี่ยวเนื่องกับผลิตภัณฑ์ทั้งวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่การออกแบบ การใช้พลังงานและวัตถุดิบการขนส่งและการแจกจ่าย กระบวนการผลิต การใช้งานผลิตภัณฑ์ การใช้ใหม่หรือแปรรูป รวมทั้งการจัดการกับซากผลิตภัณฑ์หลังจากการใช้งาน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพิจารณาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle-to-Grave) หรืออาจประเมินผลกระทบโดยครอบคลุมในขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบหรือพลังงานจนถึงกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ (Cradle-to-Gate) [3-5] โดยพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมไปถึงผลต่อระบบนิเวศน์ สุขภาพของมนุษย์ การใช้ทรัพยากรและปัญหาสิ่งแวดล้อมโลกเป็นหลัก โดยอาศัยข้อมูลการใช้ทรัพยากรทั้งวัตถุดิบและปริมาณพลังงาน รวมถึงการปล่อยของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต

คำนิยามเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิต [3] มีดังนี้

- สมาคมพิษวิทยาด้านสิ่งแวดล้อมและสารเคมี (Society of environment toxicology and chemical: SETAC) นิยาม LCA ว่า “เป็นกระบวนการที่ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาครอบคลุมถึงกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวเนื่องกันในรูปของวัตถุดิบและพลังงาน ซึ่งการประเมินนี้จะทำตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด เช่น กระบวนการผลิต การบรรจุ การคัดแยก การบำรุงรักษา และการแปรรูปใช้ใหม่ และการนำทรัพยากรมาใช้เป็นหลัก

- องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) นิยาม LCA ในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 ว่า "เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่าสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต"

2.1.2 ประวัติความเป็นมาของการประเมินวัฏจักรชีวิต

พ.ศ. 2513 เกิดวิฤตทางด้านพลังงานทำให้ประเทศต่างๆ มีนโยบายการประหยัดพลังงาน การศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตจึงถูกพัฒนาขนานไปกับแนวความคิดที่ต้องการวิเคราะห์ความต้องการใช้พลังงานสำหรับแต่ละภาคอุตสาหกรรมอย่างละเอียด ต่อมา พ.ศ. 2523 ภาครัฐของประเทศต่างๆ ได้ให้ความสนใจในการศึกษานี้มากขึ้น ทำให้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์สำหรับเปรียบเทียบความรุนแรงของปัญหาที่ต่างประเภทกัน ปัจจุบันความรู้เกี่ยวกับ LCA ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ได้รับการยอมรับมากขึ้น โดยถูกนำมาใช้ในการกำหนดกลยุทธ์และการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินวัฏจักรชีวิตได้นำมาใช้ในประเทศไทย พ.ศ.2540 โดยรวบรวมผู้ที่สนใจทางด้าน LCA ของประเทศไทย (Thai LCA Network) [3]

2.1.3 วัตถุประสงค์ของการประเมินวัฏจักรชีวิต

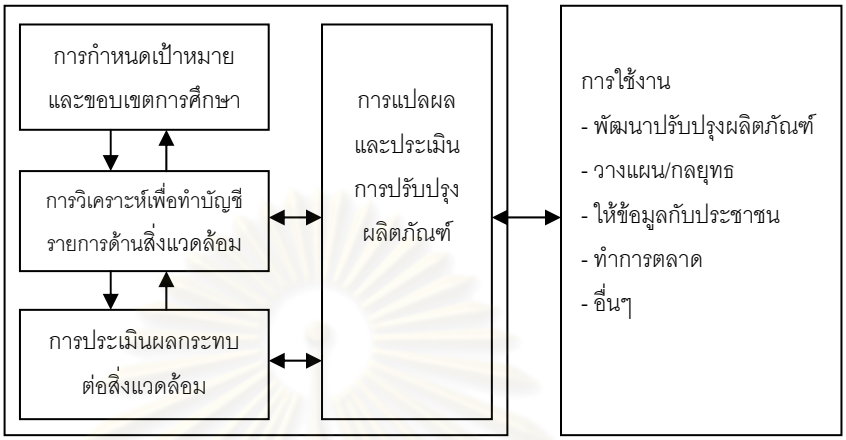
การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงาน การใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม หรือวิเคราะห์ข้อมูลสารเข้าและสารออกของผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ [3]

ผลที่ได้สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกกระบวนการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด หรือเพื่อให้รู้ว่ากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ขั้นตอนการผลิตแต่ละขั้นตอนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร ดังนั้นการประเมินวัฏจักรชีวิตจึงเป็นเครื่องมือที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก LCA ได้กำหนดไว้ในอนุกรมมาตรฐาน ISO 14000 ขององค์การระหว่างประเทศเพื่อการมาตรฐาน (International Organization for Standardization) กล่าวว่าการประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเทคนิคในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมซึ่งเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ตลอดวงจรชีวิต เริ่มจากการได้มาซึ่งวัตถุดิบและพลังงาน

การขนส่ง การผลิต การบรรจุ การบำรุงรักษา และการจัดการกับผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุ การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับ LCA มีทั้งหมด 7 ฉบับ [3] ดังนี้

1. ISO 14040 Life Cycle Assessment - Principle and framework มาตรฐานที่กล่าวถึง หลักการ นิยามศัพท์ และกรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์
2. ISO 14041 Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and Life Cycle Inventory analysis มาตรฐานที่กล่าวถึงการกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิเคราะห์และจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI)
3. ISO 14042 Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment (LCIA) มาตรฐานที่กล่าวถึงการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
4. ISO 14043 Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation มาตรฐานที่กล่าวถึงการแปลผลข้อมูลที่ได้จากการทำ LCI และ LCIA
5. ISO/TR 14047 Life Cycle Assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14042 Life Cycle Assessment เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14042 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
6. ISO/TR 14048 Life Cycle Assessment – LCA Data Document Format เป็นรายงานวิชาการการแสดงตัวอย่างรูปแบบเอกสารของข้อมูลด้าน LCA
7. ISO/TR 14043 Life Cycle Assessment – Examples of Application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14041 สำหรับจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

2.1.4 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต

การศึกษาขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.4.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal and Scope definition)

- การกำหนดเป้าหมาย (Goal)

ส่วนที่สำคัญในการกำหนดเป้าหมายคือ ควรกำหนดเป้าหมายให้ชัดเจน กำหนดตามเหตุผล และจุดมุ่งหมายในการศึกษาเพื่อประโยชน์ในการนำผลการศึกษาไปเผยแพร่หรือนำไปใช้งานต่อ

- การกำหนดขอบเขตการศึกษา (Scope)

ขอบเขตการศึกษา เป็นตัวกำหนดสิ่งต่างๆ ทั้งระบบ ขอบเขต ความต้องการข้อมูล สมมติฐาน และข้อจำกัดของข้อมูลเพื่อให้แน่ใจว่าในการวิเคราะห์นั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้จึงควรกำหนดรายละเอียดของขอบเขตให้เพียงพอโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบ่งชี้ และกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมิน และกำหนดรวบรวมสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อเป้าหมาย ของการศึกษา LCA

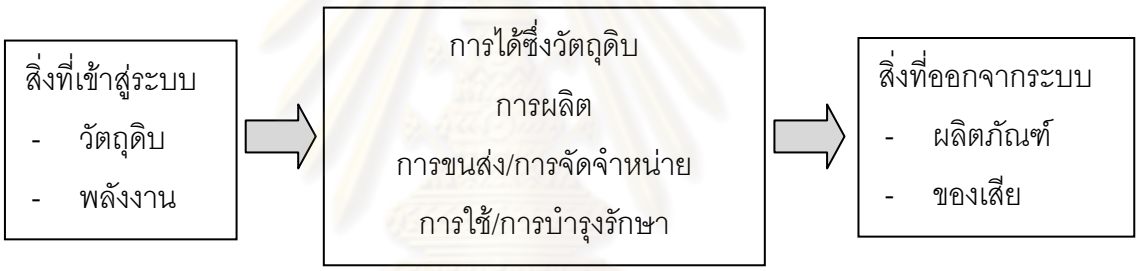
- การกำหนดหน่วยหน้าที่(Functional)

หน่วยหน้าที่ถูกใช้เป็นตัวอ้างอิงหรือพื้นฐานสำหรับการจัดเก็บข้อมูลเข้าและข้อมูลออกของระบบ หน่วยหน้าที่ของระบบควรจะมีการระบุอย่างชัดเจนและสามารถวัดค่าได้ ซึ่ง

ประโยชน์ของการกำหนดหน่วยหน้าที่ คือ การเปรียบเทียบวัฏจักรชีวิตของหลายผลิตภัณฑ์เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดหน่วยหน้าที่ประกอบด้วย ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ความคงทนของผลิตภัณฑ์ และคุณสมบัติพื้นฐาน

- ขอบเขตของระบบ (System boundaries)

เป็นการกำหนดกระบวนการ ข้อมูลเข้าข้อมูลออกที่รวมอยู่ในการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ดังนั้น ขอบเขตของระบบ คือ ขอบเขตระหว่างผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม โดยระบบผลิตภัณฑ์ คือหน่วยที่รวบรวมวัสดุ และพลังงาน ที่มีการเชื่อมโยงกันเป็นหน่วยงานต่างๆ ที่ทำหน้าที่อย่างหนึ่งหรือหลายอย่าง สามารถแบ่งกระแสขั้นตอนของทรัพยากร วัตถุดิบหรือพลังงาน จากสิ่งแวดล้อมที่เข้าสู่ระบบก่อนถูกเปลี่ยนแปลงในกระบวนการต่างๆ



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนและขอบเขตของ LCA

- คุณภาพของข้อมูล (Data Quality)

คุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการ ย่อมมีผลต่อคุณภาพของบทสรุปของการประเมินวัฏจักรชีวิตของสิ่งที่สนใจ คุณภาพของข้อมูลสามารถอธิบายและประเมินได้ภายใต้ประเด็นดังต่อไปนี้

- คุณภาพของข้อมูลในบัญชีรายการ
- ช่วงเวลาในการศึกษา
- ระดับพื้นที่ในการศึกษา เช่น ระดับโลก ระดับภูมิภาค
- เทคโนโลยีในการศึกษา
- แหล่งที่มาของข้อมูล

- วิธีการได้มาของข้อมูล
- ความถูกต้องและสมบูรณ์ของข้อมูล รวมถึงการเป็นตัวแทนของข้อมูล

2.1.4.2 การวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (Life Cycle Inventory Analysis)

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมคือขั้นที่รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิต เพื่อที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปคำนวณหาปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของระบบที่ได้ศึกษา เพื่อที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้คำนวณค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นต่อไป

ผลที่ได้จากการทำการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อม สามารถที่จะนำไปแปลผลได้ แต่ว่าต้องแปลด้วยความระมัดระวังเพราะว่าผลที่ได้จากการทำการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมไม่ใช่ข้อมูลด้านปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมแต่เป็นเพียงปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกเท่านั้น ซึ่งข้อมูลนี้ยังไม่สามารถที่จะนำไปเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นได้ นอกจากนี้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมยังขึ้นกับความแน่นอนและความหลากหลายของข้อมูล ดังนั้นในการแปลผลควรรวมการประเมินคุณภาพด้วย

2.1.4.3 การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

โดยผลที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 คือการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม (LCI) ที่อยู่ในเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา โดยขั้นนี้จะนำข้อมูลปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของระบบที่ศึกษามาแปลงค่าเป็นหน่วยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยขั้นนี้จะทำให้สามารถทราบว่าการที่มีการใช้ทรัพยากรและการปล่อยของเสียนั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร โดยขั้นตอนการแปลงค่าปริมาณสารเข้าและสารออกให้เป็นค่าผลกระทบเรียกว่าการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment: LCIA) เพื่อนำไปแปลผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมต่อไป

2.1.4.4 แปลผล (Interpretation)

วัตถุประสงค์ของการแปลผลการศึกษา คือ การวิเคราะห์ผลลัพธ์ สรุปผลอธิบายข้อจำกัด การจัดเตรียมข้อเสนอแนะที่มาจากผลลัพธ์ของการทำการประเมินวัฏจักรชีวิตหรือการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมและทำรายงานสรุปการแปลผลการศึกษาให้สามารถเข้าใจได้ง่าย สมบูรณ์ครบถ้วน และมีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตกับการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตด้วยโปรแกรม HYSYS

ในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้นจะมีความถูกต้องหรือไม่ขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งการได้มาซึ่งข้อมูลที่มีคุณภาพนั้นเป็นเรื่องที่ไม่ง่ายนัก โดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการประเมินวัฏจักรชีวิต และการแก้ไขข้อจำกัดนี้ คือการประเมินวัฏจักรชีวิตร่วมกับการสร้างแบบจำลองของกระบวนการผลิต ซึ่งให้ได้ข้อมูลเพื่อใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต [6] ซึ่งโปรแกรม Hysys เป็นโปรแกรมสำหรับจำลองกระบวนการผลิต ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้นโดยผู้ใช้ โดยข้อมูลที่จำเป็นที่ใส่ในโปรแกรม Hysys ประกอบด้วย สารตั้งต้น ปริมาณสัดส่วนสาร อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลของสาร ซึ่งข้อจำกัดของ Hysys คือ จะต้องใส่ Fluid Package ให้ตรงกับสารตั้งต้นที่ใส่ และเลือกอุปกรณ์ให้เหมาะสม นอกจากนี้แล้ว โปรแกรม Hysys สามารถดำเนินการภายใต้สภาวะเสถียรภาพและสภาวะที่ขึ้นกับเวลาได้ [7]

2.3 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับประเมินวัฏจักรชีวิต

ปัจจุบันองค์กรได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อแก้ปัญหาในการจัดการเก็บข้อมูลในเชิงปริมาณและการประเมินผลของ LCA การประมวลผลการประเมินวัฏจักรชีวิตต้องใช้ข้อมูลและตัวเลขมาก จึงต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเข้าช่วยในการทำงานเพราะสามารถจัดการกับข้อมูลได้รวดเร็ว สะดวกสบาย และมีคุณภาพมากขึ้น ซึ่งจะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์บัญชีรายการ การประเมินค่าผลกระทบ และการแปลผลข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตที่มีจำนวนขั้นตอนมาก ๆ ได้ ประเด็นที่สำคัญในการเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคือ

- ฐานข้อมูล

- การคำนวณบัญชีรายการ
- การประเมินผลกระทบ
- การแปลผลข้อมูล

2.3.1 **โปรแกรมสำเร็จรูป** System for Integrated Environmental Assessment of Products (SimaPro)

จะเห็นได้ว่าโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ในปี ค.ศ. 1990 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro ได้ถูกสร้างขึ้นและเป็นโปรแกรมที่ผลิต โดย Mr. Mark Goedkoop ของบริษัท Pré Consultants ภายใต้โครงการของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ Pré Consultants ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมอย่างต่อเนื่องโดยมีรัฐบาลเนเธอร์แลนด์สนับสนุน

ภายในโปรแกรม SimaPro จะมีวิธีหลายวิธีที่ใช้คำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเพื่อให้ได้ค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมออกมา

2.3.2 **โครงสร้างของวิธีการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่บรรจุในโปรแกรม SimaPro**

โดยโครงสร้างพื้นฐานของวิธีที่ใช้คำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ในโปรแกรม SimaPro ประกอบด้วย [8] ;

1. การกำหนดบทบาท (Characterization)
2. การประเมินของเสีย (Damage assessment)
3. การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)
4. การถ่วงน้ำหนัก (Weighting)

โดยสามขั้นหลังเป็นขั้นตอนทางเลือกขององค์การระหว่างประเทศเพื่อการมาตรฐาน (ISO) ซึ่งหมายความว่าไม่จำเป็นเสมอไปที่ทุกวิธีคำนวณผลกระทบจะต้องมีสามขั้นหลังนี้

การกำหนดบทบาท (Characterization)

ปริมาณสารที่ได้จากขั้นที่ 2 ของการประเมินวัฏจักรชีวิตนั้นจะเอามาคูณตัวกำหนดบทบาท (characterization factor) จะทำให้ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสารที่ทำการศึกษาเทียบเท่ากับสารที่เป็นตัวอ้างอิงกับผลกระทบประเภทนั้นๆ ตัวอย่างเช่น ค่า ตัวคูณ

กำหนดบทบาทของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าผลกระทบในกลุ่มผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน เท่ากับ 1 และ มีเทน มีค่าตัวคูณกำหนดบทบาท เท่ากับ 21 จะหมายความว่า ในการปล่อย มีเทน 1 กิโลกรัม จะมีค่าผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน เทียบเท่ากับการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 25 กิโลกรัม โดยทุกๆ ค่าในกลุ่มผลกระทบประเภทนี้จะทำให้ได้ผลของการกำหนดบทบาทในผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน

การแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum(Q_i x EF_{ij})$$

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)
Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา
EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

การประเมินของเสีย (Damage assessment)

เป็นขั้นตอนใหม่ของการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยวิธีที่มีขั้นการประเมินของเสีย ได้แก่ วิธีการใช้ดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99) ตัวอย่างเช่น วิธีคำนวณค่าผลกระทบของดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์นั้นทุก ๆ ประเภทของผลกระทบจะถูกนำมาคำนวณในขั้นการประเมินของเสีย เพื่อที่จะทำให้ทราบว่าผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ต่อระบบนิเวศน์ และต่อทรัพยากรเป็นอย่างไร

การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)

หลายๆ วิธีในการคำนวณค่าผลกระทบ ผลที่ได้จากการคำนวณผลกระทบมักจะนำมาเทียบกับค่าผลกระทบอ้างอิงคือนำค่าผลกระทบอ้างอิงมาหารค่าผลกระทบที่เราทำการศึกษา ซึ่งเป็นการจัดกลุ่มและเทียบหน่วย จะทำให้ได้ค่าผลกระทบแบบไร้หน่วย ค่าที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง มักจะเป็นค่าผลกระทบเฉลี่ยต่อคนในระยะเวลา 1 ปีของประเทศนั้นๆ โดยถ้าทราบว่าใน

ระยะเวลา 1 ปี ในประเทศยุโรปมีปริมาณสารพิษที่ปล่อยออกมาเท่าไหร่จากนั้นนำมาคำนวณผลกระทบแล้วหารด้วยปริมาณประชากรก็จะได้ค่าตัวคูณการจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (normalization factor) เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิง โดยหลังจากการทำการจัดกลุ่มและเทียบหน่วย แล้วจะทำให้ค่าผลกระทบทุกประเภทผลกระทบมีหน่วยของผลกระทบที่เหมือนกัน ซึ่งจะทำให้ง่ายในการเปรียบเทียบกันได้ โดยการทำการจัดกลุ่มและเทียบหน่วย สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในขั้น การกำหนดบทบาทและการประเมินของเสีย

การแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นๆที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = EP_j/(TxER_j)$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด

T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท

การถ่วงน้ำหนัก (Weighting)

บางวิธีการคำนวณผลกระทบจะมีการถ่วงน้ำหนักของประเภทผลกระทบแต่ละประเภทไม่เท่ากัน นั้นหมายความว่าผลกระทบแต่ละผลกระทบจะต้องนำมาให้น้ำหนักโดยนำค่าตัวคูณการถ่วงน้ำหนักมาคูณ แล้วนำค่าผลกระทบมารวมเป็นคะแนนเดียว (single score) ซึ่งจะแสดงในหน่วย Pt (Person for target year) ซึ่งหน่วย Pt เกิดจากกระบวนการหาขนาดของผลกระทบที่ต้องการจะรวมค่าในกลุ่มผลกระทบต่างๆ ที่มีหน่วยต่างกัน โดยการหาด้วยค่ากลาง ดังนั้นหน่วย Pt จะหมายถึงการแสดงจำนวนเท่าของค่ากลาง โดยที่จะสามารถรู้ว่าค่านั้นมีค่ามากหรือน้อยจะต้องทำการเปรียบเทียบกับค่ากลางหรือใช้ในการเปรียบเทียบกับค่า Pt ด้วยกัน หากต้องการทราบว่ากลุ่มใด ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดหรือกลุ่มใดมีความสำคัญที่สุด การให้น้ำหนักสามารถนำมาประยุกต์ใช้ เมื่อมีการจัดกลุ่มและเทียบหน่วย หรือไม่มีการจัดกลุ่มและเทียบหน่วยก็ได้

การให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน แสดงดังสมการ

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

โปรแกรม SimaPro เป็นโปรแกรมที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม เพราะมีการวิเคราะห์ผลตามระบบ ISO มีการเปรียบเทียบผลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเปรียบเทียบ มีฐานข้อมูล มีการแสดงผลในรูปของตารางและรูปภาพ มีความยืดหยุ่นในการเพิ่มข้อมูลใหม่และสามารถปรับปรุงฐานข้อมูลได้ แต่พบว่ามีโปรแกรมสำเร็จรูปหลายโปรแกรมมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโปรแกรม SimaPro ดังนั้นการเลือกใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปก็ขึ้นอยู่กับราคาลิขสิทธิ์ของโปรแกรมและการยอมรับของผู้ใช้โปรแกรม เมื่อพิจารณาการยอมรับของผู้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปโดยเปรียบเทียบจากการขายลิขสิทธิ์โปรแกรมพบว่า โปรแกรม SimaPro มีราคาเหมาะสมและได้รับการยอมรับจากผู้ใช้มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรม SimaPro ในการประเมินวัฏจักรชีวิต

2.3.3 การเลือกดัชนีวัดผลกระทบ

ในโปรแกรม SimaPro มีดัชนีตัวชี้วัดหลายดัชนี ดังตาราง 2.3 ซึ่งแต่ละวิธีนั้นจะพิจารณากลุ่มผลกระทบที่ต่างกัน ดังนั้นการเลือกผลกระทบจะต้องเลือกที่ครอบคลุมงานวิจัยมากที่สุดโดยพิจารณาจาก

1. การคัดเลือกกลุ่มผลกระทบที่สนใจในการศึกษา
2. เลือกวิธีคำนวณผลกระทบที่ตรงกับผลกระทบที่จะศึกษา
3. ตรวจสอบว่าสารทุกตัวที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมถูกอธิบายเชิงข้อมูลไว้ในวิธีที่เลือกหรือไม่

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตฟีนอลโดยการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นจะศึกษาผลกระทบเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้นเพราะว่าการผลิตฟีนอล สารเคมีที่ปล่อย

ออกมานั้นไม่ได้ส่งผลกระทบเพียงด้านใดด้านหนึ่ง จึงได้เลือกผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสามด้าน คือ ต่อสุขภาพมนุษย์ ต่อระบบนิเวศน์ และต่อการลดลงของทรัพยากร ซึ่งดัชนีวัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ศึกษาผลกระทบทั้งสามด้านได้แก่ ดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99)

ตารางที่ 2.1 กลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ศึกษาแต่ละดัชนีชี้วัด

ชนิด method	ผลกระทบที่ศึกษา
Centre of Environmental Science at Leiden University (CML)	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์
Eco-indicator-99	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ ละการใช้ทรัพยากร
Ecological Scarcity 2006	ระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากร
Environmental Design of Industrial Products (EDIP 2003)	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากร
Environmental Sample Processor (ESP 2000)	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากร
Impact Assessment Methodology (IMPACT 2002+)	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากร
Environmental Product Descriptions (EPD 2007)	ระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากร
Building for Economic and Environmental Sustainability (BEES)	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากร
Cumulative Energy Demand	การใช้ทรัพยากรพลังงาน
Ecological footprint	ระบบนิเวศน์
Intergovernemental Panel on Climate Change (IPCC 2007)	สภาวะโลกร้อน
Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts (TRACI 2)	ด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากร

2.3.4 ประเมินผลกระทบโดยวิธีดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99)

2.3.4.1 วิธีการประเมินค่าผลกระทบโดยดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99)

ดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99) เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายเพราะมีระบบการให้น้ำหนักที่สนับสนุนข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ มีดังนี้ [9]

- วัตถุดิบ พลังงานและของเสียจะถูกแจกแจงเป็นประเภทของผลกระทบทั้ง 11 ประเภท
- ผลกระทบทั้ง 11 ประเภทจะถูกจัดกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของกลุ่มเป้าหมาย
- การถ่วงน้ำหนักหรือความสำคัญและรวมเป็นคะแนนเดียว (single score)

กลุ่มเป้าหมายและประเภทของผลกระทบมีดังนี้

สุขภาพมนุษย์(Human Health) ประกอบด้วย

1. สารก่อมะเร็ง (Carcinogenic)
2. ผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์ (Respiration of organic substance)
3. ผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ (Respiration of inorganic substance)
4. สารแผ่รังสี (Radiation)
5. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change)
6. การลดลงของโอโซน (Ozone depletion)

ระบบนิเวศน์ (Ecosystem) ประกอบด้วย

7. ภาวะความเป็นกรด(Acidification)/ภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)
8. ความเป็นพิษ (Ecotoxicity)
9. การใช้พื้นที่ (Land use)

การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion) ประกอบด้วย

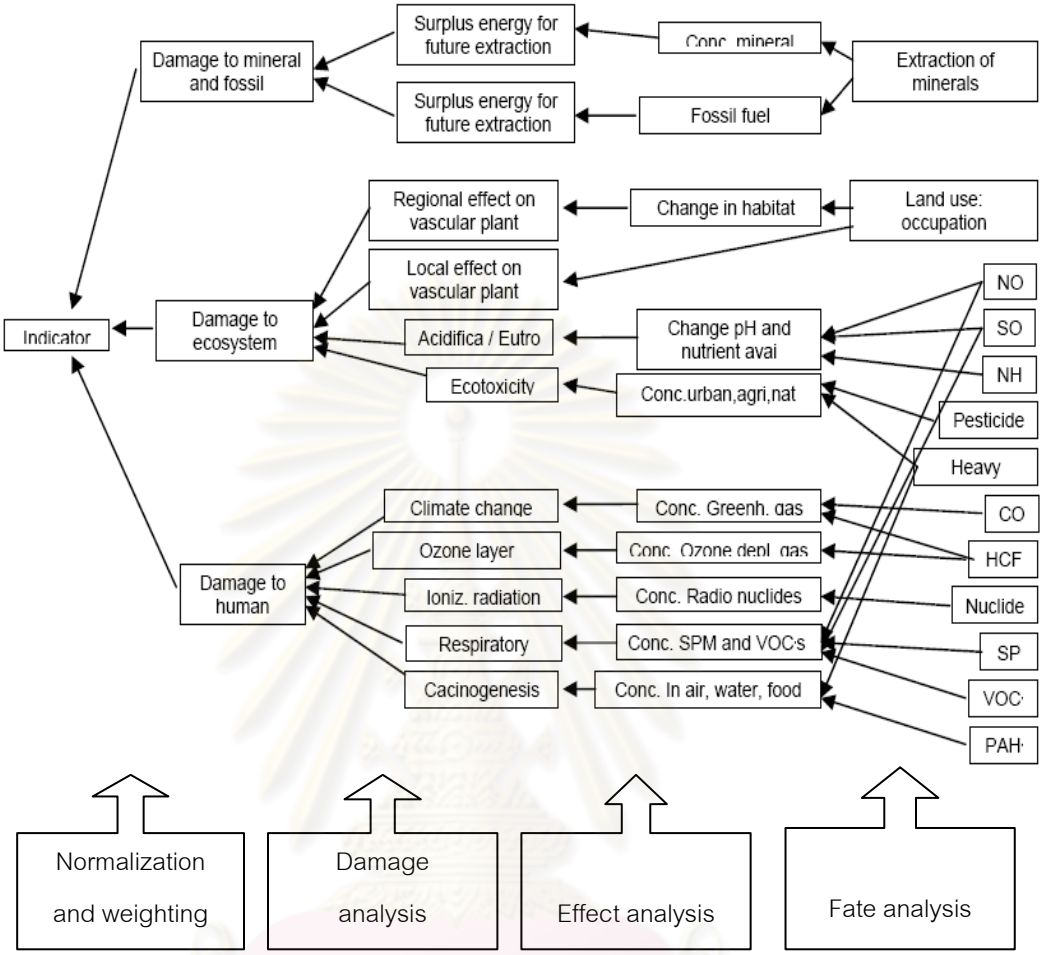
10. การใช้สินแร่ (Mineral)
11. การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel)

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มเป้าหมายที่ถูกทำลาย ประเภทของผลกระทบและสสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ

กลุ่มเป้าหมายของการทำลาย (หน่วย)	ประเภทของผลกระทบ	สสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ
สุขภาพมนุษย์ (Disability Adjusted Life Years :DALYs)	สารก่อมะเร็ง ผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์ ผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ สารแผ่รังสี ภาวะโลก การลดลงของชั้นโอโซน	arsenic, cadmium, nickel methane, benzene CO, SO_x, NH_3 Nuclear energy production CO_2, methane, CFCs CFCs, HFCs
ระบบนิเวศน์ (Potentially Disappeared Fraction : PDF)	ภาวะความเป็นกรด/ภาวะยูโทรฟิเคชัน ความเป็นพิษ การใช้พื้นที่	NO_x, SO_x, NH_3 Heavy metal, benzene Grassland, wood
การลดลงของทรัพยากร Depletion (MJ surplus Energy)	การใช้สินแร่ การใช้เชื้อเพลิง	copper, nickel, zinc crude oil, coal

ตารางที่ 2.3 อธิบายลักษณะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นของแต่ละประเภทของผลกระทบทั้ง 11 ผลกระทบ

ประเภทของกลุ่มของผลกระทบ	ลักษณะของผลกระทบ
ภาวะความเป็นกรด	ป่าและทะเลสาบ ถูกทำลายโดยฝนกรด เนื่องจากการปล่อยสารที่มีความเป็นกรดสู่บรรยากาศ
ภาวะยูโทรฟิเคชัน	สภาวะที่น้ำขาดออกซิเจนเนื่องจากพืชน้ำเจริญเติบโตมากเกินไป เนื่องจากแหล่งน้ำ และดินมีปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมากเกินไป
การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลกหรืออุณหภูมิของโลกสูงขึ้น เนื่องจากมีการปล่อยแก๊สพวกคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนเป็นต้น สู่บรรยากาศ
การลดลงของทรัพยากร	การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดเนื่องจากการสกัดหรือการใช้แร่ธาตุหรือพวกเชื้อเพลิง
ความเป็นพิษ	สารพิษที่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ เนื่องจากการปล่อยเบนซีน ตะกั่ว เป็นต้น สู่ดิน น้ำและอากาศ
การใช้พื้นที่	การลดลงของพื้นที่ รวมถึงพื้นที่ป่า ด้วยสาเหตุเนื่องจากการใช้พื้นที่
การลดลงของโอโซน	การลดลงของโอโซนโดยสาเหตุ เนื่องจากการปล่อยสาร CFC
สารแผ่รังสี	ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์เนื่องจากสารที่มีการแผ่รังสี เช่น โคบอลต์ ยูเรเนียม เป็นต้น
สารก่อมะเร็ง	ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์เนื่องจากการปล่อยสารที่ก่อมะเร็ง เช่น อะคริโลไนไทรล์ คลอโรฟอร์มเป็นต้น
ผลกระทบด้านการหายใจจากสารอินทรีย์	ผลกระทบต่อมนุษย์เนื่องจากการปล่อยสารที่ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากการปล่อยสารอินทรีย์ ได้แก่ บิวเทน อีเทน เดกเทน เป็นต้น
ผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์	ผลกระทบต่อมนุษย์เนื่องจากการปล่อยสารที่ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจเนื่องจากการปล่อยอนินทรีย์สารสู่บรรยากาศได้แก่ แอมโมเนียม ซัลเฟต เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงแนวคิดในการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยใช้ดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ [8]

2.3.4.2 **การเปลี่ยนค่าที่ได้จากขั้นการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้กลายเป็นค่าของผลกระทบของแต่ละกลุ่มผลกระทบโดยดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์** (Eco-indicator 99)

ขั้นตอนการเปลี่ยนจากค่าที่ได้จากขั้นการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้กลายเป็นค่าศักยภาพผลกระทบของแต่ละกลุ่มผลกระทบของกลุ่มผลกระทบหลักสามกลุ่มผลกระทบ คือ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ต่อการลดลงของระบบนิเวศน์ และต่อการลดลงของทรัพยากร

- **ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์** จะแสดงในรูปแบบ จำนวนปีที่ต้องเจ็บป่วยและตายก่อนวัยอันควร (Disability-adjusted life years; DALYs) ซึ่งเป็นดัชนีที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization; WHO)

1. Fate Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของสารที่ปล่อยออกจากระบบผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาและพื้นที่กับความเข้มข้น
2. Effect Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารกับประเภทของผลกระทบต่อน้ำหนักของสารที่ปล่อยออกจากระบบของผลิตภัณฑ์
3. Damage Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของขนาดของผลกระทบต่อน้ำหนักของกับจำนวนปีที่เจ็บป่วย (DALY/kg)

- **ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยา** แสดงในหน่วยสัดส่วนการสูญหายของความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตต่อพื้นที่เนื่องจากผลกระทบหรือภาระทางสิ่งแวดล้อม แสดงในหน่วยของ Potentially Disappeared Fraction (PDF*m^2 year)

1. Fate Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของสารที่ปล่อยออกจากระบบผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาและพื้นที่กับความเข้มข้น
2. Effect Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารกับหน่วยความ เสี่ยง
3. Damage Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของความเสี่ยงกับการสูญหาย (PDF*m^2 year)

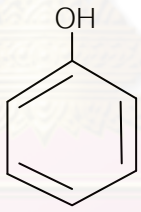
- **ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร** แสดงเป็นหน่วยปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการสกัดแร่หรือเชื้อเพลิง (MJ surplus energy)

1. Resource Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของการสกัดทรัพยากรอันนำไปสู่การลดลงของทรัพยากร
2. Damage Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของการลดลงของทรัพยากรกับความพยายามที่เพิ่มขึ้นในการสกัดทรัพยากรในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 ข้อมูลทั่วไปของฟีนอล

ฟีนอล (Phenol) มีชื่ออื่นๆ ได้แก่ กรดคาร์บอลิก (Carbolic acid), เบนซีนอล (Benzenol), กรดฟีนิลลิก (Phenylic Acid) และ ไฮดรอกซีเบนซีน (Hydroxybenzene) เป็นต้น ฟีนอลเป็นสารที่ได้มาจากน้ำมันถ่านหิน ซึ่งฟีนอลเป็นสารประกอบอินทรีย์ มีสูตรโมเลกุลคือ C_6H_5OH เป็นผลึกแข็ง ถ้าบริสุทธิ์จะมีสีขาวขุ่น ซึ่งจะอยู่ในหมู่ฟังก์ชันที่เรียกว่า ฟีนิล (phenyl) เป็นส่วนโครงสร้างย่อยของโมเลกุลที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างเฉพาะตัว หมู่ฟังก์ชันมักเป็นตัวกำหนดการทำปฏิกิริยาและสมบัติทางเคมีอื่นๆ ของโมเลกุลที่พวกมันเป็นส่วนประกอบ โดยฟีนอลอยู่ในกลุ่ม แอลกอฮอล์ (Alcohol) และมีพันธะเคมีแบบไฮดรอกซิล (Hydroxyl) กับ วงแหวนอโรมาติก (aromatic ring) ฟีนอลมีส่วนประกอบเป็นกรดอ่อน ดังนั้นจึงควรระวังในการใช้ประโยชน์จากฟีนอล ซึ่งฟีนอลถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในภาคอุตสาหกรรมหลายสาขา เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเภสัชกรรม อุตสาหกรรมพลาสติก และอุตสาหกรรมสีย้อม เป็นต้น



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลฟีนอล

ตาราง 2.4 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของฟีนอล

คุณสมบัติ	ฟีนอล
สูตรโครงสร้าง	C_6H_5OH
มวลโมเลกุล	94.11 g/mol
ความหนาแน่น	1.07 g/cm^3
จุดหลอมเหลว	40.5 °C (314 K)
จุดเดือด	181.7 °C (455 K)
ความสามารถในการละลายน้ำ	8.3 g/100 ml at 20 °C

2.4.1 ความเป็นอันตรายของฟีนอล จำแนกได้ดังนี้

2.4.1.1 แบบเฉียบพลัน [10]

ฟีนอลเข้มข้นเมื่อถูกผิวหนังจะกัดผิวหนังและซึมเข้าสู่กระแสโลหิต แผลที่ผิวหนังจะมีลักษณะพอง ขาว และเกิดอาการปวดแสบปวดร้อนจากนั้นจะรู้สึกชา ถ้าโดนเป็นบริเวณกว้างหรือกลืนกินเข้าไปอาจถึงตายได้ เนื่องจากเป็นพิษต่อตับ ไต และไปกดระบบประสาทส่วนกลาง

2.4.1.2 แบบเรื้อรัง [11]

การได้รับฟีนอลอย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดความเป็นพิษผิดปกติดังนี้

- อาการพิษทางระบบประสาท จะมีอาการอ่อนเพลีย มึนงง ขาหนัก ครึ่งหลับครึ่งตื่น ซึ่งอาการเหล่านี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และถ้ายังได้รับสารต่อไปอีก จะทำให้เกิดความผิดปกติทางระบบประสาท โดยระบบประสาทจะเริ่มอ่อนล้า การรับรู้ต่างๆ น้อยลง แต่ก็จะไม่ปรากฏให้เห็นชัดเจน

- การเกร็ง หดตัว และแข็งตัวของหลอดเลือด และการเปลี่ยนแปลงของผิวหนังโดยในระยะแรก จะมีอาการนิ้วมือซีด แข็ง มีตุ่มเล็กๆขึ้น บางครั้งอาจมีอาการหายใจไม่ออกเกิดขึ้นอย่างกะทันหัน และมีอาการเจ็บขณะหายใจ

- การเปลี่ยนแปลงที่ตับ เริ่มจากการย่อยอาหารลำบากขึ้น อึดอัด มีก๊าซในช่องท้องและลำไส้ ตับจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อได้รับสารนี้เป็นเวลานาน จะมีเนื้อเยื่อผิดปกติเกิดขึ้นที่ตับและม้าม โรคแทรกซ้อนที่เกิดขึ้นในระยะนี้คือ ความดันโลหิตสูง เลือดออกตามบริเวณทางเดินอาหาร เป็นต้น

- การเกิดโรคมะเร็งของระบบอวัยวะต่างๆ ถือเป็นอันตรายร้ายแรงที่สำคัญของการได้รับฟีนอลเป็นระยะเวลานาน ส่วนใหญ่อาการจะไม่แสดงออกจนกว่าจะอยู่ในระยะสุดท้าย ซึ่งเมื่อนั้นก็ไม่อาจรักษาได้

2.5 **การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์** [28]

การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) จากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์อย่างต่อเนื่อง ทั้งการใช้พลังงาน การเกษตรกรรมการพัฒนาและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม การขนส่ง การตัดไม้ทำลายป่า รวมทั้งการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในรูปแบบอื่นๆ ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะโลกร้อน ซึ่งส่งผลกระทบต่อวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์ สิ่งมีชีวิต และนับวันปัญหาดังกล่าวก็ยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น การดำเนินงานเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงเป็นหน้าที่ของผู้เกี่ยวข้องทุกภาคส่วน ทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคเกษตรกรรมในฐานะผู้ผลิต ภาคบริการในฐานะผู้ขับเคลื่อนกิจกรรม รวมถึงภาคประชาชนในฐานะผู้บริโภคที่จะร่วมกันลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศและของโลกการเลือกซื้อสินค้าหรือบริการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยเป็นหนทางหนึ่งที่ทำให้ผู้บริโภคได้มีส่วนร่วมในการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากรูปแบบและวิถีการบริโภคของตน และยังเป็นกลไกทางการตลาดในการกระตุ้นให้ผู้ผลิตพัฒนาสินค้าที่ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย ดังนั้น การทำการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งหมายถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งานและการจัดการซากหลังใช้งาน พร้อมทั้งมีการแสดงข้อมูลปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์บนสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลให้ผู้บริโภคได้ทราบว่าตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาปริมาณเท่าใด ซึ่งจะช่วยให้ผู้บริโภคมีข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกซื้อสินค้า และกระตุ้นให้ผู้ผลิตสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นด้วย

2.5.1 **ชนิดของก๊าซเรือนกระจก**

ก๊าซเรือนกระจกที่ประเมินประกอบด้วยก๊าซ 6 ชนิดตามที่ควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโต ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน(CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

2.5.2 **ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดโลกร้อน** (Global Warming Potential: GWP)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือศักยภาพในการทำให้โลกร้อนประเมินได้จากการวัดหรือคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นจริง และแปลงค่าให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยใช้ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนในรอบ 100 ปี ของ IPCC (GWP100) ที่เป็นค่าล่าสุดเป็นเกณฑ์ ตัวอย่างเช่น ก๊าซมีเทนมีค่า GWP100 เท่ากับ 21

หมายความว่าก๊าซมีเทน 1 กิโลกรัมมีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 21 กิโลกรัม ดังนั้นการปล่อยก๊าซมีเทน 1 กิโลกรัม คิดเป็นศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 21 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เป็นต้น

2.5.3 **ระยะเวลาที่ใช้ทำการประเมิน**

ในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ให้คำนวณเป็นค่าผลกระทบของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ถูกปล่อยออกในช่วง 100 ปี หลังจากมีการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ

2.5.4 **แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก**

พิจารณาก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่างๆ ดังนี้

- การผลิตวัตถุดิบที่ใช้ทุกประเภท
- การผลิตพลังงานที่ใช้ทุกประเภท
- กระบวนการเผาไหม้
- ปฏิกิริยาเคมี
- การสูญเสียน้ำยาทำความเย็นและการรั่วไหลของก๊าซ
- การปฏิบัติงาน
- การขนส่งทุกประเภทที่เกี่ยวข้อง
- การปศุสัตว์และกระบวนการผลิตทางการเกษตรอื่นๆ
- ของเสียและการจัดการของเสีย

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ ควรดำเนินการ 4 ขั้นตอนตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ได้แก่ การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม การประเมินผลกระทบ และการแปลผลโดยต้องวิเคราะห์ตามขั้นตอนวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ คือการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การใช้งาน และการจัดการซากหลังจากการใช้งาน

2.5.5 **การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์**

ข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการคูณเข้ากับ สัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) ของประเภท

วัสดุ พลังงานหรือกระบวนการนั้นๆ และบันทึกในรูปของปริมาณก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ แปลงค่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยการนำไปคูณกับค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด

ตาราง 2.5 แสดงค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้น ที่ระยะเวลา 100 ปี

สาร	สูตรโครงสร้าง	ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน
คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)	CO_2	1
มีเทน (Methane)	CH_4	21
ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide)	N_2O	310
ไฮโดรฟลูโอคาร์บอน (Hydrofluorocarbon)	HFCs	140 – 11,700
ซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (Sulphur hexafluoride)	SF_6	23,900
เพอร์ฟลูโอโรคาร์บอน (Perfluorocarbon)	PFCs	6,500 – 9,200

สมการที่ใช้ในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

คาร์บอนฟุตพริ้นท์($kgCO_2e$) = ปริมาณสารที่ปล่อยออกมา(kg) xค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Renou และคณะ[12] ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เพื่อประเมินผลกระทบของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้โปรแกรม SimaPro และวิธีที่ใช้คำนวณผลกระทบทั้งหมด 5 วิธี คือ CML 2000, Eco-Indicator 99, EDIP 96, EPS และ Eco-points 97 โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการประเมินค่าผลกระทบเมื่อมีการใช้วิธีที่ต่างกันในการหาค่าผลกระทบ โดยหน่วยหน้าที่ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ปริมาณน้ำเสียที่เก็บตัวอย่างน้ำในระยะเวลา 1 ปี และประเภทผลกระทบที่พิจารณาคือ ด้านสภาวะความเป็นกรด ด้านการเจริญเติบโตของพืชน้ำที่มากเกินไป ผลกระทบด้านสภาวะโลกร้อน, การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติและความเป็นพิษต่อมนุษย์ จากการประเมินผลกระทบของการบำบัดน้ำเสีย พบว่าการใช้วิธีที่ต่างกันประเมินค่าผลกระทบนั้นไม่มีความต่างในผลกระทบที่ระดับโลก เช่น ผลกระทบด้านสภาวะโลกร้อน การลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน และผลกระทบด้านสภาวะความเป็นกรด แต่ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อมนุษย์ พบว่าการประเมินผลกระทบแต่ละวิธีนั้นให้ค่าการประเมินที่ต่างกันมาก แต่ว่าสามารถยอมรับได้เพราะว่ากระบวนการที่ศึกษาคือการบำบัดน้ำเสียซึ่งผลกระทบนี้ไม่มีความสำคัญต่อระบบนี้มากเท่าไหร่นัก

Hubert Halleux [13] ศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งเปรียบเทียบการใช้ดัชนีชี้วัดแต่ละแบบ ประยุกต์ใช้ดัชนีชี้วัดแบบ Eco-Indicator 99 , CML และ Impact 2002+ จากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเปรียบเทียบผลกระทบระหว่างมีการบำบัดน้ำเสียกับไม่มีการบำบัดน้ำเสีย โดยงานวิจัยนี้ได้เน้นการประเมินผลกระทบที่มีการใช้ดัชนีที่ต่างกันในการประเมิน ซึ่งผลจากการประเมินพบว่ากรณีที่ไม่มีการบำบัดน้ำเสียในวิธีการประเมินของ Eco-Indicator 99 ,CML และ Impact 2002+ ให้ผลการประเมินที่เหมือนกันทั้งสามวิธี และทางเลือกที่มีการบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการที่มีผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมดีกว่าทางเลือกที่ไม่มีการบำบัดน้ำเสีย

C. Kiwjaroun และคณะ [14] ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มเปรียบเทียบกันระหว่างกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากับการใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤต โดยการจำลองกระบวนการผลิตผ่านโปรแกรม HYSYS 3.2 เพื่อเก็บข้อมูลวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมและทำกระ

ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี Eco-indicator 99 ในโปรแกรม SimaPro 7.0 พบว่า การผลิตโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 38 โดยการผลิตด้วยกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสและการผลิตโดยใช้เมทานอลที่สภาวะเหนือวิกฤตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประมาณ 74 และ 102 Point (Pt) ตามลำดับ เนื่องจากมีการใช้พลังงานมากในขั้นตอนการเปลี่ยนสภาวะเมทานอล ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาและการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่

A. Azapagic และคณะ [15] ศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิต ถึงวิธีการเลือกกระบวนการผลิตที่มีความเหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตของเหลวคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน ซึ่งในกระบวนการผลิตนั้นมีการปล่อย NO_x, SO_2 และ VOCs ออกมา ทำให้ต้องใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเข้ามาเป็นเครื่องมือในการเลือกกระบวนการผลิตที่มีความเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้แล้วได้จำแนกวิธีที่ใช้ในการกำจัด NO_x, SO_2 และ VOCs ซึ่งในการกำจัดสารแต่ละตัวจะมีวิธีและกระบวนการกำจัดที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสม จากนั้นจึงใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเข้ามาช่วยในการตัดสินใจ

Wei Zhao [16] ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของระบบกำจัดของเสียหลายองค์ประกอบ (MSW) ในประเทศจีน ซึ่งในประเทศจีนนั้นมีปริมาณ MSW มากขึ้นเรื่อยๆ แต่ว่ามีโรงงานกำจัดของเสียนี้ไม่มากนัก โดยในงานวิจัยนี้ได้สนใจผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gas; GHG) ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาทางเลือกที่จะเป็นไปได้ในการลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของระบบกำจัด MSW โดยใช้เครื่องมือการประเมินวัฏจักรชีวิต(Life cycle assessment; LCA)ในการตัดสินทางเลือก ซึ่งแบ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบกำจัดของเสียนี้เป็น 7 ทางเลือกคือ

SO ทางเลือกนี้จะแบ่งโดย ร้อยละ 48.9 จะบำบัดโดยการนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า และ ร้อยละ 49.5 จะนำไปทำฝังกลบโดยไม่มีเครื่องกำจัดแก๊สที่เกิดจากการฝังกลบ

S1 จะคล้ายกับทางเลือก SO แต่จะต่างกันที่มีเครื่องมือกำจัดแก๊สที่เกิดจากการฝังกลบ

S2 กำจัดขยะโดยเตาเผาขยะโดยจะตั้งข้อสมมติฐานว่าของเสียทั้งหมดจะเข้าสู่เตาเผาแล้วได้กระแสไฟฟ้า

S3 มีการนำขยะบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ (recycle)

S4 จะแยกขยะประเภท kitchen waste มาหมักเป็นปุ๋ยหมัก โดยนำขยะประเภทนี้มาร้อยละ50 เพื่อนำมาหมักแล้วใช้เป็นปุ๋ยและขยะประเภทอื่นนำมากำจัดตามแบบทางเลือกที่ SO

S5 จะคล้ายกับทางเลือก S4 แต่จะต่างกันที่การนำมาย่อยนั้นจะย่อยโดย anaerobic

S6 ทางเลือกนี้จะนำหลายๆทางเลือกมาร่วมกันเพื่อบำบัดของเสียเพื่อให้มีการปล่อยแก๊สเรือนกระจกน้อยที่สุด โดยจะแยกพวกโลหะ แก้ว กระดาษ และพลาสติกนำกลับมาใช้ใหม่ที่เปอร์เซ็นการ recycle ร้อยละ 30 และร้อยละ 50 ของขยะประเภท kitchen waste จะนำมาหมักโดยวิธี anaerobic และขยะบางส่วนจะนำไปที่โรงาน MSW-to-energy plant และที่เหลือจะนำไปฝังกลบโดยมีเครื่องกำจัดแก๊สที่เกิดจากการฝังกลบ

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการศึกษาเพิ่มเติมคือ การวิเคราะห์ sensitivity analysis ด้วยคือศึกษาอัตราการ recycle MSW นำกลับมาใช้ใหม่ เช่น แก้ว กระดาษ ว่าอัตราการ recycle MSW นั้นมีผลต่อการปล่อยแก๊สเรือนกระจกอย่างไร และยังศึกษา sensitivity ของการใช้การ allocation ที่ต่างกันด้วย และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดแก๊สที่เกิดจากการฝังกลบ ผลลัพธ์ในการประเมินวัฏจักรชีวิตก็คือ ในการปล่อยแก๊สเรือนกระจกของระบบการกำจัดของเสียในไต้หวันนั้นทำให้มีค่าผลกระทบเท่ากับ 467.34 Mg CO_2 eq.per year และผลของการศึกษาด้าน sensitivity analysis ของอัตราการ recycle MSW พบว่าถ้าอัตราการ recycle MSW มากจะทำให้ลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กันเป็นส่วนกลับกันแบบเส้นตรง และศึกษาผลของประสิทธิภาพของเครื่องกำจัดแก๊ส พบว่าถ้าประสิทธิภาพของเครื่องมากขึ้นก็จะทำให้มีผลกระทบเนื่องจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกลดลง และผลของการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธีที่ต่างกันในการบำบัดของเสีย พบว่าทางเลือกที่ S6 นั้นมีผลกระทบด้านการปล่อยแก๊สเรือนกระจกน้อยที่สุดหรือกล่าวได้ว่าเป็นวิธีที่มีศักยภาพที่ดีในการลดผลกระทบจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจก

W.R. Johns , A. Kokossis b, F. Thompson [17] วัตถุประสงค์ของการประเมินวัฏจักรชีวิตคือเพื่อที่จะตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์ปัญหาของการผลิตที่มีหลายสาขารวมถึงกระบวนการผลิตที่มีหลายผลิตภัณฑ์และการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือ การแปรรูปของ

ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ในอุตสาหกรรมทั่วไป การจะมีความแตกต่างการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือ การแปรรูปของใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยการแปรรูปของใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จะหมายถึงการนำมาใช้ใน ในกระบวนการเดียวกัน ส่วนการนำกลับมาใช้ใหม่ คือการใช้ของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแห่งหนึ่งมาใช้อีกกระบวนการหนึ่งที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้สนใจทำการศึกษาว่าในการพัฒนากระบวนการผลิตระหว่างการนำกลับมาใช้ใหม่ และการแปรรูปของใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่นั้นทางเลือกไหนที่จะให้ผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด โดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือในการศึกษา

HOU Weifeng และคณะ [18] ศึกษาการประเมินและออกของอุตสาหกรรมผลิตแนฟทา โดยใช้กระบวนการการเปลี่ยนรูปร่างมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reforming) โดยผลิตภัณฑ์ที่ต้องการก็คืออะโรมาติก โดยออกแบบสมการปฏิกิริยาทั้งหมด 20 สมการ จากการออกแบบ วัตถุประสงค์ที่ต้องการก็คือ สารที่ใส่เข้ากระบวนการผลิตคือน้ำมันดิบ ต้องการใส่ในปริมาณที่น้อย แต่ว่าต้องการปริมาณผลิตภัณฑ์ที่มาก ซึ่งได้ผลการทดลองที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

S.Reza seif Mohaddecy และคณะ[19] ศึกษาและประเมินการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตแนฟทา ซึ่งแนฟทานำไปผลิตเป็นเบนซีนต่อไป ใช้กระบวนการการเปลี่ยนรูปร่างมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reforming) เพื่อแยกให้ได้ก๊าซโซลีน ที่มีค่าออกเทนสูงๆ นอกจากนี้ยังแยกสารอะโรมาติกเป็นผลิตภัณฑ์ การจำลองได้ใช้การประเมินและการคาดเดาค่าตัวแปรต่างๆ โดยใช้โปรแกรม Hysys ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจากการทดลอง ผลการทดลองได้ค่าออกเทนสูงเมื่อให้การกระจายของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 56% นอกจากนี้ยังทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในหอกลั่น โดยมีการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง จึงพบว่าการผลิตออกเทนที่ให้ได้ค่าออกเทนสูงๆ ต้องอยู่ที่อุณหภูมิ 497.8 องศาเซลเซียส ถึง 515 องศาเซลเซียส และทดลองทำให้พบว่า จากการตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้ได้มากกว่า 3 เดือน เพราะการทดลองแต่ละครั้งจะเลื่อนๆ ระยะเวลาไปทุกๆ 2 เดือน

Robert J. และคณะ [20] ศึกษาอุตสาหกรรมการผลิตฟีนอลจากคิวมีนด้วยวิธีการ Hock Process โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาหลายๆ ชนิด ดังนี้ SPA catalyst, $AlCl_3$ และ hydrogen chloride catalyst และ Zeolite catalyst ซึ่งมีการสร้างแบบจำลอง Q-Max TM

สารตั้งต้นคือ เบนซีนทำปฏิกิริยากับโพรพิลีน แล้วใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาในการะบวนการผลิตที่มีเงื่อนไขเดียวกันซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการคิวมีนมากที่สุดคือ Zeolite catalyst และการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดด้วยเวลาที่เร็วมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ

Raja Kumar More และคณะ [21] ศึกษาและประเมินการจำลองหอกลั่นของน้ำมันดิบโดยสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Aspen การสร้างแบบจำลองประกอบด้วย Pre-flash tower (PF), Atmospheric distillation unit (ADU) และ Vacuum distillation unit (VDU) ตามลำดับ ซึ่งผลของการใส่สารด้วยวิธี grass-root design ซึ่งสุดท้ายแล้วจะทราบค่าตัวแปรต่างๆ ของสารเข้า และสารออกตามวิธี grass-root design นอกจากนี้แล้วยังศึกษาหอกลั่นในแต่ละที่ ด้วยวิธีการเดียวกันนี้ grass-root design และสามารถสรุปว่าในแต่ละสถานที่ใดที่ศึกษามีการใช้สารเข้าหรือสารออกแตกต่างกัน และอัตราการใส่น้ำมันดิบกับแฟคชันของน้ำมันดิบก็แตกต่าง และผลิตภัณฑ์ที่ได้ของแต่ละสถานที่แตกต่างกันนั้นขึ้นกับตัวแปรของวิธี grass-root design

กฤษกร เจียมจำรัสศิลปะ และคณะ [22] ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของสีผงชนิดโพลีเอสเตอร์-อีพอกซี โดยจะได้ฐานข้อมูลของผลิตภัณฑ์อย่างครบวงจรคลอบคลุมตั้งแต่ข้อมูลการใช้ทรัพยากร พลังงาน และข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิต การใช้งานและการกำจัด เป็นต้น ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบถึงแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแบบครบวงจร งานวิจัยนี้ทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของสีผงชนิด โพลีเอสเตอร์-อีพอกซี ซึ่งเป็นสีผงชนิดที่มีการใช้งานมากในประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นเคมีภัณฑ์พื้นฐานที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เทคนิคของการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งจะทำให้ได้ทราบค่าเชิงปริมาณและแสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ ตลอดวัฏจักรชีวิตของสีผง เช่น การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก การลดลงของชั้นโอโซน และภาวะความเป็นกรด เป็นต้น ขอบเขตการศึกษาของวัฏจักรชีวิตของสีผงครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการผลิต การขนส่ง การใช้งาน และการกำจัด ผลจากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้โปรแกรม SimaPro 5.1 วิธี Eco-Indicator 95 พบว่า ตลอดวัฏจักรชีวิตของสีผง ขั้นตอนการเคลือบสีผงกับชิ้นงานก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด (86.1 %) เนื่องจากกระบวนการนี้มีการใช้น้ำเป็นจำนวนมากถึง 58.1 ลิตรต่อการเคลือบสีผง 1 กิโลกรัม รองลงมาคือขั้นตอนการขนส่ง (6.4 %) และขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ (6.3 %) ตามลำดับ

K. LIEBMANN และคณะ [23] ศึกษาการออกแบบหอกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบเพื่อให้ใช้ระบบพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งพิจารณาทางเลือกในการสร้างแบบจำลอง และระบบเครือข่ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อันดับแรก หอกลั่นน้ำมันดิบแยกออกเป็นลำดับของคอลัมน์ง่ายๆ ส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอน้ำและหม้อต้ม ส่งผลกระทบต่อความร้อนของส่วนอื่นและปั๊มบริเวณรอบๆ การออกแบบหอกลั่นจึงถูกจำลองขึ้นใหม่เพื่อปรับปรุงโดยประเมินการจำลองบนพื้นฐานเป้าหมายการวิเคราะห์แบบ Pinch Analytic.

L. K. Barker และคณะ [24] ศึกษาการเปลี่ยนรูปร่างโดยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming) ซึ่งเป็นกระบวนการสำหรับการเปลี่ยนแนฟทาหรือก๊าซโซลีนที่มีออกเทนต่ำไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีออกเทนสูงขึ้น ส่วนใหญ่การเปลี่ยนรูปร่างโดยตัวเร่งปฏิกิริยาต้องการ Feedstock ที่สะอาดเพื่อหลีกเลี่ยงการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาตัวอื่น การเตรียมแนฟทา โดยขั้นแรกแยกน้ำและสิ่งสกปรกออกจากน้ำมัน หลังจากนั้นเติมไฮโดรเจน และผ่านขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับ cobalt-molybdenum-carrier ที่อุณหภูมิ 790 องศาฟาเรนไฮน์ ความดันที่ 1,000 psig ปริมาตร 0.1 ปริมาณน้ำมันต่อปริมาณตัวเร่งต่อชั่วโมง และอัตราของไฮโดรเจน 6,000 scf/bbl ซึ่งผลการทดลองการเปลี่ยนรูปร่างเพื่อให้ได้คุณภาพดีผลิตจากแนฟทาถูกเตรียมโดยการเติมไฮโดรเจนในน้ำมันดิบ ที่อุณหภูมิ 900 องศาฟาเรนไฮน์ ความดันที่ 200 psig ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิสูง ความดันต่ำ เลขออกเทนเท่ากับ 89

อรัญ หันพงศ์กิตติกูล และคณะ [25] ก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยจากอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม ประกอบด้วยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซมีเทนและ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดจากการจัดการสวนปาล์ม การขนส่งปาล์มทะลายสด (FFB) และการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) เกษตรกร 1 ครอบครัวมีพื้นที่ปลูกปาล์ม 25 ไร่ จะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ปุ๋ย 9.394 ตัน CO2e/ปี และ จากการขนส่งปาล์มทะลายสด 0.154 ตัน CO2e/ปี ในการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงานสองโรงงาน พบว่าโรงงานที่ 1 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 33,109 ตัน CO2e/ปี คิดเป็น 0.276 ตัน CO2e/ตัน FFB (1.533 ตัน CO2e/ตัน CPO) โรงงานที่ 2 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 28,134 ตัน CO2e/ปี คิดเป็น 0.174 ตัน CO2e/ตัน FFB (1.085 ตัน CO2e/ตัน CPO) โดยแหล่งหลักที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่า 95% มาจากน้ำเสีย เมื่อพิจารณาในภาพรวมตั้งแต่ปลูกปาล์มจนสกัดเป็นน้ำมันปาล์มดิบพบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2.000 - 2.289 ตัน CO_2e/ตัน CPO

Rosilda Selvin และคณะ [26] ศึกษาการแยกตัวของคิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นฟีนอลและโทลูอีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน การทำปฏิกิริยาเกิดในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด สถานะของแข็ง ในการศึกษานี้ใช้กรดในการกระตุ้น คือ Montmorillonite (Mont. K10) และ Metal-ion-exchanged (Mont. K10) ที่อุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ฟีนอลและโทลูอีน ตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ Dodecatungstophosphoric acid (DTPA) การเปลี่ยนแปลง (conversion) 100 % เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 นาที ที่ 30 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมากที่สุดภายใต้เงื่อนไขด้านบน ในการแยกคิวมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นฟีนอลกับโทลูอีน คือ กรดซันฟูลิค (Sulfuric acid) เป็นกรดที่มีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

A. Laurent และคณะ [27] ศึกษาผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยมักใช้เป็นเครื่องชี้วัดสภาพสิ่งแวดล้อมในการผลิตทางอุตสาหกรรม ซึ่งความสามารถของคาร์บอนฟุตพริ้นท์อยู่บนพื้นฐานการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของสารในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้ อุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์โลหะ อุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์เคมี อุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์พลาสติก และอุตสาหกรรมการผลิตภัณฑ์กระดาษ โดยศึกษาผลกระทบต่อมนุษย์กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ ทั้งนี้ผลกระทบต่อมนุษย์และคาร์บอนฟุตพริ้นท์จะถูกคำนวณด้วยโปรแกรมซิมาโปร โดยใช้บัญชีข้อมูลจากกระบวนการผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นเปรียบเทียบค่าที่ทำให้อยู่บนพื้นฐานเดียวกัน ตัวอย่างอุตสาหกรรมการผลิตโลหะจะได้สารต่างๆ ดังนี้ อลูมินัม ทองแดง และ คาร์บอนมอนนอคไซด์ โดยสารทั้งหมดนำมาเปรียบเทียบความเป็นพิษต่อมนุษย์และ คาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งสรุปผลของงานวิจัยนี้แสดงถึงค่าผลกระทบต่อมนุษย์ และการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกสู่บรรยากาศ และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ไม่ได้เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการชี้วัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งหมด ดังนั้นจึงพิจารณาเป็นกรณีไป

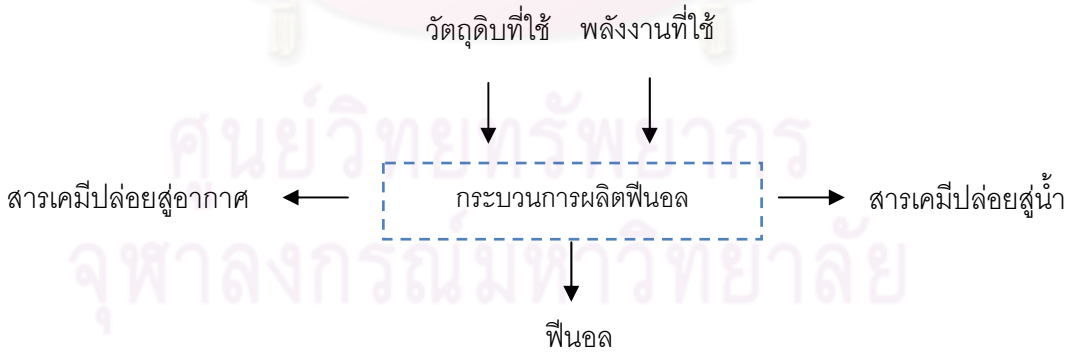
บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินงานวิจัยและวิธีวิเคราะห์

3.1.1 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย (Goal and scope definition)

3.1.1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย (Objective and purpose)

ศึกษาและเปรียบเทียบการออกแบบจำลองกระบวนการผลิตฟีนอล เพื่อนำไปประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตและเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตที่มีการผลิตที่สภาวะแตกต่างกัน ซึ่งขอบเขตที่ใช้ศึกษากระบวนการผลิตฟีนอลในงานวิจัยนี้คือ ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตฟีนอล แต่การศึกษาจะไม่ได้รวมถึงการศึกษาที่เกิดจากขั้นตอนของการขนส่งวัตถุดิบและการนำไปใช้ การนำกลับมาใช้ใหม่ และการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น โดยขอบเขตที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 ขอบเขตของงานวิจัยที่ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล

3.1.1.2 **หน่วยหน้าที่** (Functional unit)

หน่วยหน้าที่ (Functional unit) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตฟีนอลที่ต่างกัน หน่วยหน้าที่ที่ใช้ คือ 1 กิโลกรัมของปริมาณฟีนอล เพื่อให้ข้อมูลปริมาณสารที่เข้าและออกจากระบบอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน

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

ขั้นต่อมาของการประเมินวัฏจักรชีวิตคือ การทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมโดยขั้นตอนนี้เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณสารขาเข้า ปริมาณสารขาออกและพลังงานที่ใช้ของขอบเขตที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งขอบเขตของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลกระทบของกระบวนการผลิตฟีนอล ดังนั้นการประเมินวัฏจักรชีวิตในขั้นนี้จะต้องได้ข้อมูลปริมาณสารขาเข้า ปริมาณสารขาออกและพลังงานที่ใช้ของระบบ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบจำลองกระบวนการผลิตฟีนอล โดยใช้โปรแกรม Hysys เพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลพลังงานที่ใช้

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

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยขั้นนี้จะเปลี่ยนหน่วยของปริมาณที่ได้จากการทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในหน่วยของผลกระทบ ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกระบวนการผลิตฟีนอลของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro และใช้วิธีดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ เป็นดัชนีที่ใช้คำนวณผลกระทบ

โดยวิธีที่ใช้คำนวณผลกระทบของดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99) นั้น มีขั้นตอน คือ การกำหนดบทบาท เพื่อเปลี่ยนปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกที่เป็นหน่วยกิโลกรัมให้เป็นหน่วยของผลกระทบ ที่เกิดขึ้นในด้านต่างๆ ทั้ง 11 ผลกระทบ และการถ่วงน้ำหนัก (Weighting) หลังจากนั้นรวมเป็นคะแนนเดียว (Single score) ซึ่งค่าตัวคูณ (Factor) สำหรับนำมาคูณกับข้อมูลที่ได้เก็บรวมรวมเพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

3.1.4 **การแปลผล** (Life Cycle Interpretation)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการประเมินวัฏจักรชีวิต คือ นำผลที่ได้จากการประเมินผลกระทบคือขั้นการประเมินผลกระทบมาแปลผล เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ของกระบวนการผลิตฟีนอล จะสามารถชี้ชัดลงไปได้ว่ากระบวนการใดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และควรมีการปรับปรุง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

3.2 โปรแกรมสำหรับการทำวิจัย

3.2.1 โปรแกรม Microsoft Office XP สำหรับการจัดทำรายงาน

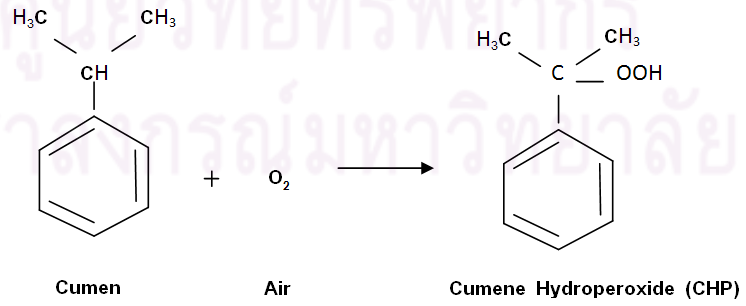
3.2.2 โปรแกรม HYSYS Plant Version 3.1 สำหรับการจำลองกระบวนการผลิต

3.2.3 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.1 สำหรับการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

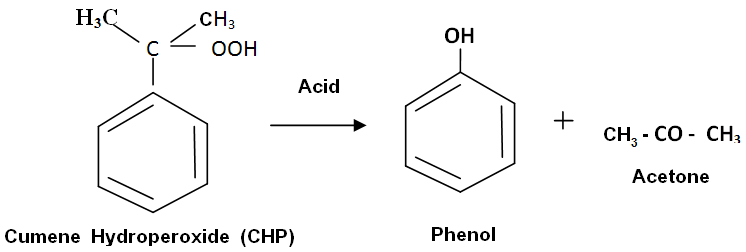
3.3 กระบวนการผลิตฟีนอล

การบวนการผลิตฟีนอลในภาคอุตสาหกรรมสามารถผลิตได้ 2 กระบวนการ โดยที่ทำการศึกษาและเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลทั้ง 2 ชนิด ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบกันได้ก็ต่อเมื่อสารตั้งต้นเป็นชนิดเดียวกัน ตัวแปร และเงื่อนไข เหมือนกัน ซึ่งในที่นี้จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบตั้งแต่การเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ นั่นก็คือเริ่มจากกระบวนการการเปลี่ยนรูปร่างโดยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reforming) ของแนฟทา โดยที่ให้เงื่อนไขของทั้งสองกระบวนการเหมือนกัน หลังจากนั้นก็เริ่มเข้าสู่กระบวนการผลิตฟีนอลต่อไป กระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ มีดังนี้

3.3.1 คิวมีน ออกซิเดชัน (Cumene Oxidation)

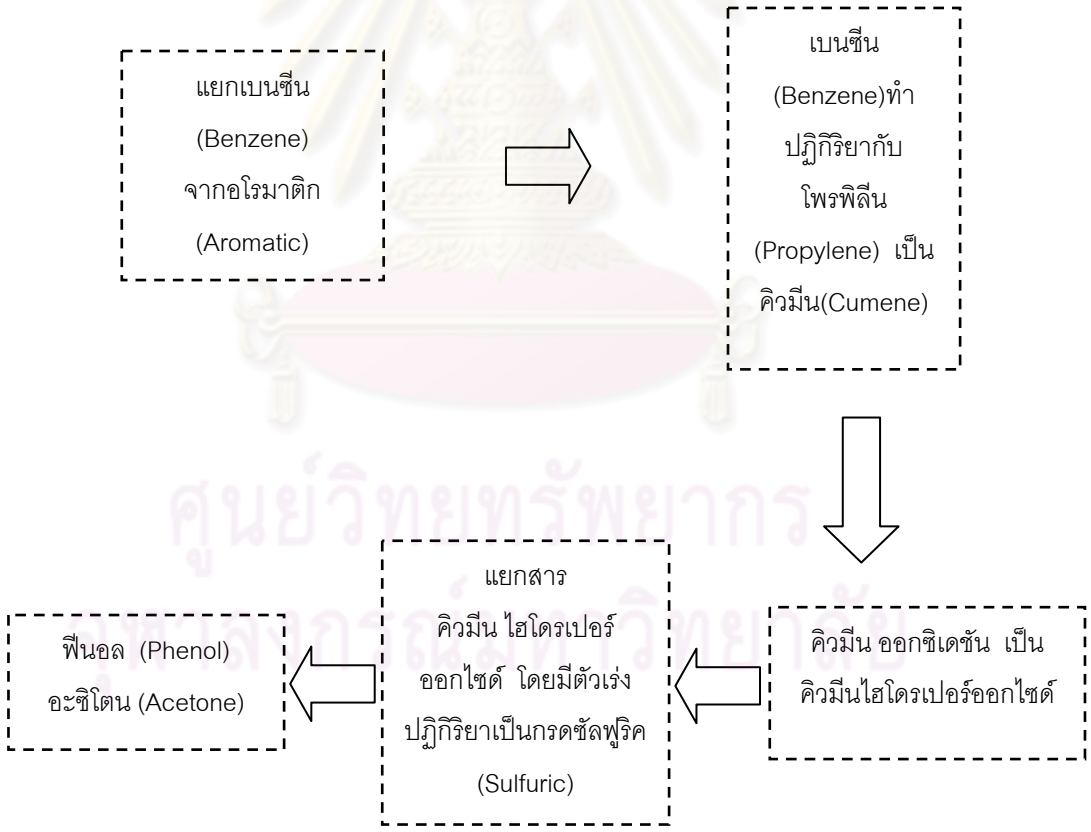


รูปที่ 3.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของคิวมีน (Cumene)เป็นคิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene Hydroperoxide)



รูปที่ 3.3 การแยกคิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene Hydroperoxide) เป็นฟีนอล (Phenol) และอะซิโตน (Acetone)

กระบวนการผลิตฟีนอล จะประกอบด้วยหลักการ 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงหลักการทำงาน 4 ส่วน ของกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน

ส่วนที่ 1 การเปลี่ยนรูปร่างโดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้อะโรมาติกเชิงซ้อน ซึ่งประกอบไปด้วย เบนซีน (benzene) โทลูอีน (touene)และ ไซลีน (xylene) จากนั่นกลั่นแยกเบนซีนออกจากอะโรมาติก ซึ่งจุดเดือดของเบนซีน 80.1 องศาเซลเซียส แยกเบนซีนด้วยเครื่องแยก (Seperator) ที่อุณหภูมิ 107.8 องศาเซลเซียส ความดันที่ 2.8 บาร์ ด้วยปริมาตรของเครื่องแยกเท่ากับ 1,500 ลูกบาศก์เมตร

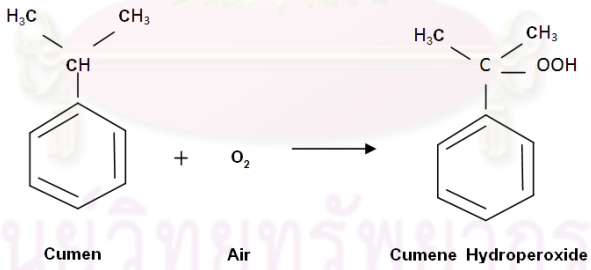
ส่วนที่ 2 เบนซีน (Benzene) ทำปฏิกิริยากับโพรพิลีน (Propylene) ได้ คิวมีน (Cumene) [15]

$$C_3H_6 + C_6H_6 \longrightarrow C_9H_{12} \qquad r_1 = k_1 c_p c_b \quad \text{mole/g cat sec}$$

$$k_1 = 3.5\times10^{4} \exp^{(-24.90/RT)}$$

ในขั้นนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ ในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส ความดัน 2 บาร์ หลังจากนั้นทำให้เย็นลง 40 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 25 ความดันบรรยากาศ ปริมาตรเครื่องปฏิกรณ์ 2,000 ลูกบาศก์เมตร พื้นที่หน้าตัด 111.725 ตารางเมตร และสูง 17.89 เมตร

ส่วนที่ 3 คิวมีน ออกซิเดชัน เป็น คิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์



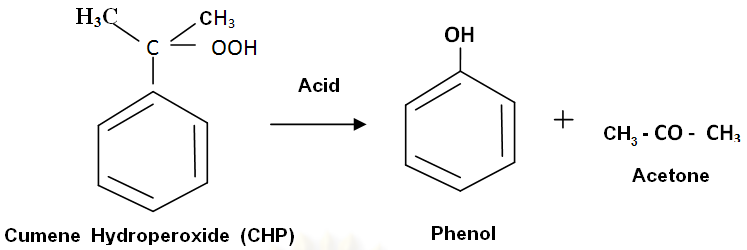
Cumen Air Cumene Hydroperoxide (CHP)

คิวมีนจะถูกออกซิไดซ์กับอากาศ ปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส

$\triangle H = -116$ KJ / mol

เครื่องปฏิกรณ์ปริมาตร 3,000 ลูกบาศก์เมตร และความหนาท่อ 0.005 เมตร

ส่วนที่ 4 แยกสารคิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดซัลฟูริค (Sulfuric)



ในขั้นตอนนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยาของคิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ กับกรดซัลฟูริค ที่อุณหภูมิขาเข้า 60 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ จะได้ผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ อะซีโตน (Acetone) เครื่องปฏิกรณ์มีปริมาตร 3,000 ลูกบาศก์เมตร พื้นที่หน้าตัด 146.477 ตารางเมตร และสูง 20.48 เมตร

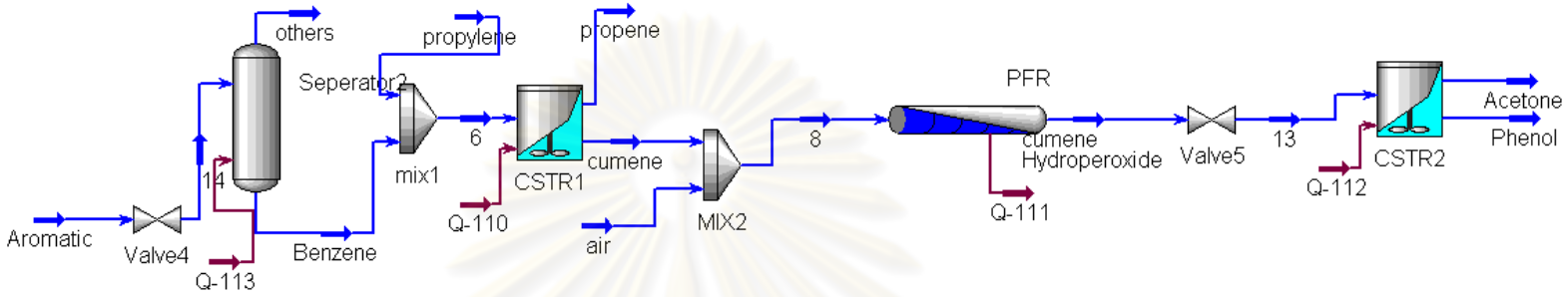
ซึ่งกระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน ทั้ง 4 ส่วนหลัก จะแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยใช้โปรแกรม HYSYS จำลองกระบวนการผลิตฟีนอล และข้อมูลต่างๆ อ้างอิงจากบทความเอกสารทางวิชาการระดับนานาชาติ และสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากกระบวนการผลิตฟีนอลจากกระบวนการคิวมีนออกซิเดชันได้จากการทำปฏิกิริยาของเบนซิน กับโพรพิลีน (Propylene) ดังนั้นเพื่อให้การทำการประเมินวัฏจักรชีวิตครอบคลุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการผลิตฟีนอล จึงทำการจำลองกระบวนการผลิตของโพรพิลีน ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งโพรพิลีนเกิดจากการแตกตัวโมเลกุลของโพรเพน (Propane) ด้วยความร้อนหรือไอน้ำ (Thermal Steam Cracking) และยังเกิดกระบวนการดึงไฮโดรเจน (Dehydrogenation) ออกจากโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เพื่อเปลี่ยนเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ดังสมการ

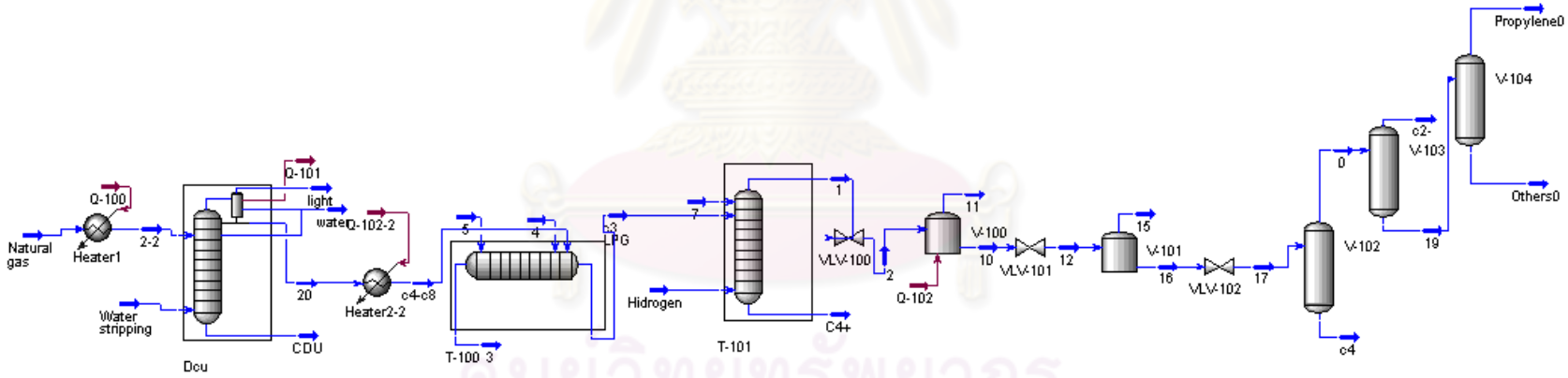
$$C_3H_8 \rightarrow C_3H_6 + H_2$$

ปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิสูงที่ 580-650 องศาเซลเซียส [30] และเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน โดยการจำลองจะเริ่มต้นจากก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีโพรเพนเป็นส่วนประกอบ โดยแยกด้วยวิธีการกลั่น จำนวนชั้น เท่ากับ 25 ชั้น ที่อุณหภูมิ 107.5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้น ได้ปิโตรเลี่ยมเหลว (LPG) เข้าสู่กระบวนการดึงไฮโดรเจน และเข้าสู้หอกลั่นเพื่อแยกสารไฮโดรคาร์บอนอื่นออกจากหอกลั่น เพื่อให้ได้โพรพิลีนต่อไปโดยใช้เครื่องแยกในการแยกสารไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดออกมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



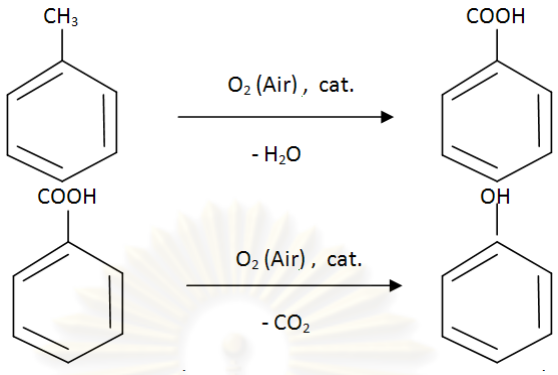
รูปที่ 3. 5 แผนผังจำลองกระบวนการผลิตแบบวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน (Cumene Oxidetion)



รูปที่ 3. 6 แผนผังจำลองกระบวนการผลิตโพรพิลีน (Propylene)

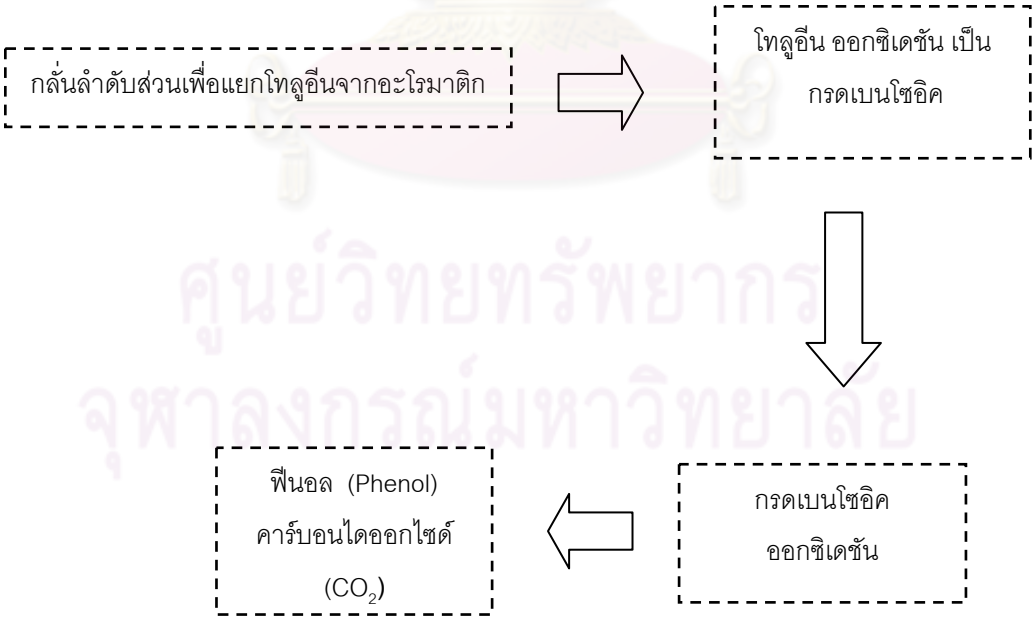
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 **โทลูอีน ออกซิเดชัน** (Toluene Oxidation)



รูปที่ 3.7 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทลูอีน (Toluene) เป็นฟีนอล (Phenol)

ซึ่งการได้มาของโทลูอีนเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตฟีนอลนั้น จะประกอบด้วยหลักการ 3 ส่วน ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 แสดงหลักการทำงาน 3 ส่วนหลัก ของกระบวนการผลิตฟีนอล วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน

ส่วนที่ 1 กลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกโทลูอีนจากอะโรมาติก

ใช้หอกลั่นลำดับส่วน โดยที่อุณหภูมิของโทลูอีนที่ออกมาจะเท่ากับ 143 องศาเซลเซียส ความดันภายในหอ 4 บาร์ โดยที่โทลูอีนที่ได้จะอยู่ในสถานะของเหลว โดยหอกลั่นลำดับส่วนนี้มีทั้งหมด 35 ชั้น (Stages) สารเข้าที่ด้านบนหอกลั่น ชั้นที่ 1 และ น้ำเข้าที่ ชั้น 31 ปริมาตรของหอกลั่น 2 ลูกบาศก์เมตร สูง 1.789 เมตร และพื้นที่หน้าตัด 1.117 ตารางเมตร

โทลูอีนเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เป็นสารตั้งต้นและเป็นตัวทำละลาย เช่นเดียวกับตัวทำละลายอื่นๆ

ส่วนที่ 2 โทลูอีน ออกซิเดชัน (Toluene oxidation) เป็น กรดเบนโซอิค (Benzoic acid)

ในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ จากในส่วนที่ 3 อุณหภูมิจะมีค่าน้อยมาก จึงทำการเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะทำให้เกิดออกซิเดชันได้มากขึ้น โดยเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เมตร พื้นที่หน้าตัด 70.369 ตารางเมตร และสูง 14.2 เมตร

ส่วนที่ 3 กรดเบนโซอิค ออกซิเดชัน (Benzoic acid Oxidetion)

ในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 465 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ซึ่งจะทำให้ได้ฟีนอล และเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบ โดยเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เมตร พื้นที่หน้าตัด 70.369 ตารางเมตร และ 14.2 เมตร

ซึ่งกระบวนการผลิตฟีนอลจากโทลูอีน ออกซิเดชัน ทั้ง 3 ส่วนหลัก จะแสดงดังรูปที่ 3.9 โดยใช้โปรแกรม HYSYS จำลองกระบวนการผลิตฟีนอล และข้อมูลต่างๆ อ้างอิงจากบทความเอกสารทางวิชาการระดับนานาชาติ และสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการผลิตด้วยวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นฟีนอล (Phenol) และอะซิโตน (Acetone) จากการจำลองกระบวนการผลิต ดังนั้น เพื่อให้การเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล ด้วยวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ที่ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นฟีนอลอย่างเดียว มีความเท่าเทียมกันกับวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน จึงได้ทำการจำลองกระบวนผลิตอะซิโตน (Acetone)

โดยกำหนดให้ อะซิโตนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl Alcohol-IPA) ดังสมการ

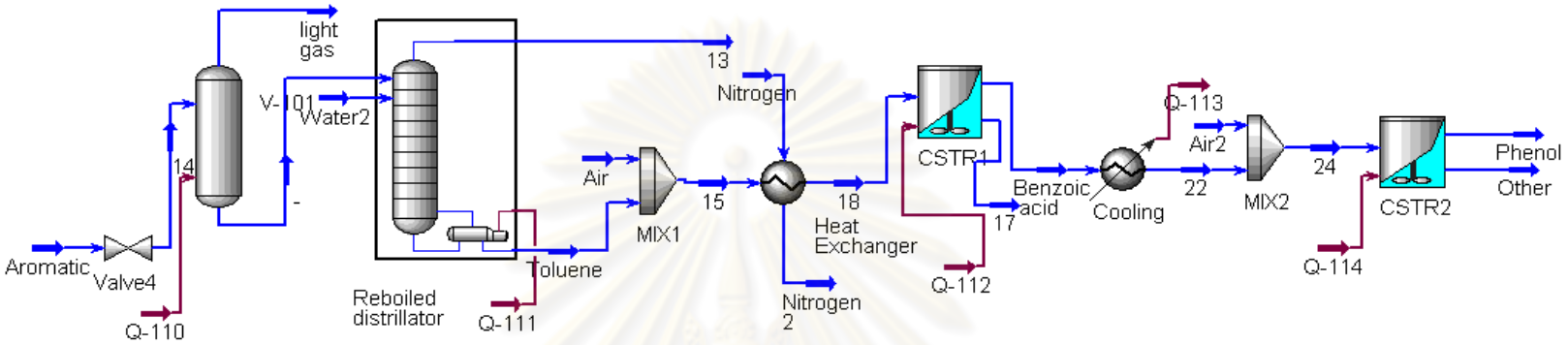
$$CH_3\text{-}CHOH\text{-}CH_3 \longrightarrow CH_3\text{-}CO\text{-}CH_3 + H_2$$

isopropyl alcohol (IP) acetone (AC) hydrogen (HY)

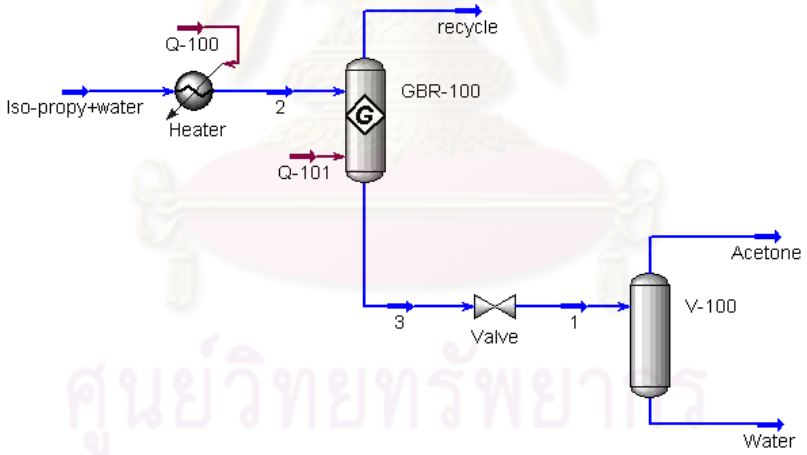
ซึ่งจากการจำลองจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของการทำปฏิกิริยา ซึ่งไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์จะผสมกับน้ำที่เครื่องปฏิกรณ์ ที่อุณหภูมิ 294 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ที่ปริมาตร 450 ลูกบาศก์เมตร ความกว้างของท่อ เท่ากับ 7.3 เมตร ความสูงของหอ 10 เมตร และส่วนของการแยกสารให้อะซิโตนบริสุทธิ์โดยเครื่องแยก ซึ่งจะได้อะซิโตนออกมาด้านบนหอ ที่อุณหภูมิ 68.31 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ โดยปริมาตรของเครื่องแยกเท่ากับ 1,000 ลูกบาศก์เมตร ความกว้างของท่อเท่ากับ 9.4 เมตร หอมีความสูง 14 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.10

-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แผนผังจำลองกระบวนการผลิตฟีนอลวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน (Toluene Oxidetion)



รูปที่ 3.10 แผนผังจำลองกระบวนการผลิตอะซิโตน (Acetone)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 **การทำบัญชีรายการ** (Life Cycle Inventory)

การจัดทำบัญชีรายการจะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ พลังงานและของเสียที่ปลดปล่อยออกจากกระบวนการต่างๆ ตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้ใช้การสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตฟีนอลทั้งสองแบบกระบวนการผลิต โดยใช้โปรแกรม HYSYS ซึ่งมีขอบเขตของระบบเฉพาะขั้นตอนการผลิตฟีนอล แต่เนื่องจากเราไม่สามารถที่จะวิจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตั้งแต่แรกจนถึงผลิตภัณฑ์ฟีนอลได้ เพราะกระบวนการผลิตแตกต่างกัน

กระบวนการผลิตที่ 1 คิวมีน ออกซิเดชัน เป็นฟีนอล โดยการทำบัญชีรายการจะรวมค่าการประเมินผลกระทบของการจำลองกระบวนการผลิตโพรพิลีน

กระบวนการผลิตที่ 2 โทลูอีน ออกซิเดชัน เป็นฟีนอล โดยการทำบัญชีรายการจะรวมค่าการประเมินผลกระทบของการจำลองกระบวนการผลิตอะซิโตน

ผลิตภัณฑ์ฟีนอล ที่ได้จะเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 3.5 และ 3.8 นั่นก็คือดังนั้นปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอลในส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.3-3.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่3.1 แสดงปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอล

วัตถุดิบที่ใช้ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
มีเทน (Methane)	4.003	0.020
อีเทน (Ethane)	4.003	0.020
โพรเพน (Propane)	20.035	0.300
ไอโซ - บิวเทน (i-Butane)	26.042	0.240
นอร์มอล - บิวเทน (n-Butane)	52.075	0.420
ไอโซ - เพนเทน (i-Pentane)	24.042	2.500
นอร์มอล - เพนเทน (n-Pentane)	41.073	5.310
เฮกเซน (Hexane)	53.094	0.943
เฮปเทน (Heptane)	130.200	11.220
ออคเทน (Octane)	130.200	11.220
โนเนน (Nonane)	130.200	11.220
เดเคน (Decane)	130.200	11.220
เฮนเดคเคน (Hendecane)	130.200	11.220
โดเดคเคน (Dodecane)	130.200	11.220
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	100.178	9.178
ไนโตรเจน (Nitrogen)	10.538	0.017
ออกซิเจน (Oxygen)	10.869	2.797
เบนซีน (Benzene)	3.727	0.347
โพรพิลีน (Propylene)	4.050	-
คิวมีน (Cumene)	3.764	-
คิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene Hydroperoxide)	3.727	-
โทลูอีน (Toluene)	-	0.002
กรดเบนโซอิค (Benzoic acid)	-	0.009
ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์	-	0.880
น้ำ	572.104	304.66
พลังงานความร้อน (kJ/hr)	49,581.470	21,253.912

ตารางที่ 3.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์พลอยได้ของกระบวนการผลิตฟีนอล

สาร	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
	ผลิตภัณฑ์หลัก (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ผลิตภัณฑ์หลัก (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
ฟีนอล (Phenol)	1.000	1.000
อะซีโตน (Acetone)	0.710	0.710
สาร	ผลิตภัณฑ์พลอยได้ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ผลิตภัณฑ์พลอยได้ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	0.544	0.211

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ปล่อยออกในการผลิตฟีนอล

สารที่ปล่อยออกสู่อากาศ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
มีเทน (Methane)	0.710	0.566
อีเทน (Ethane)	0.312	0.110
โพรเพน (Propane)	8.564	0.087
ไอโซ - บิวเทน (i-Butane)	0.568	0.098
นอร์มอล - บิวเทน (n-Butane)	0.818	0.175
ไอโซ - เพนเทน (i-Pentane)	0.692	0.096
นอร์มอล - เพนเทน (n-Pentane)	1.001	0.161
เฮกเซน (Hexane)	1.090	0.196
เฮปเทน (Heptane)	2.500	0.399
ออคเทน (Octane)	2.544	0.388
โนเนน (Nonane)	2.627	0.435
เดเคน (Decane)	2.613	0.001
เฮนเดคเคน (Hendecane)	2.392	0.798

โดเดคเคน (Dodecane)	4.395	7.38E-10
ไฮโดรเจน (Hydrogen)	0.431	0.510
ไนโตรเจน (Nitrogen)	0.046	3.536
ออกซิเจน (Oxygen)	0.505	6.891
เบนซีน (Benzene)	2.09E-11	-
โพรพิลีน (Propylene)	1.878	-
คิวมีน (Cumene)	1.23E-18	-
คิวมีน ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene Hydroperoxide)	1.58E-11	-
โทลูอีน (Toluene)	2.076	0.190
กรดเบนโซอิค (Benzoic acid)	-	0.047
ไซลีน	0.673	0.578
ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์	-	8.27E-07
สารที่ปล่อยออกสู่น้ำ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
น้ำ (Water)	114.352	9.086
ไนโตรเจน (Nitrogen)	0.0008	-
โพรเพน (Propene)	0.261	-
โทลูอีน (Toluene)	-	0.001
ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์	-	2.13E-07
พลังงานความร้อนที่ปล่อยออกสู่อากาศ (กิโลจูลต่อชั่วโมง)	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
พลังงานความร้อน	435.946	310.852

3.5 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอล

3.5.1 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอลที่ได้จากกระบวนการคิวมีน ออกซิเดชัน

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ของผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วยก๊าซ 6 ชนิดที่นำมาประเมิน ตามที่ควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโต ได้แก่

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) จากกระบวนการผลิตฟีนอลจาก คิวมีน ออกซิเดชันจะปล่อยก๊าซมีเทน เท่านั้น จึงทำการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ก๊าซนี้เท่านั้น และค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้นแสดงดังตารางที่ 3.6 และวิธีการคำนวณแสดงดังรายละเอียด

ตาราง 3.4 แสดงค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้น ที่ระยะเวลา 100 ปี

สาร	สูตรโครงสร้าง	ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน
คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)	CO_2	1
มีเทน (Methane)	CH_4	21
ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide)	N_2O	310
ไฮโดรฟลูโอคาร์บอน (Hydrofluorocarbon)	HFCs	140 – 11,700
ซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (Sulphur hexafluoride)	SF_6	23,900
เพอร์ฟลูโอโรคาร์บอน (Perfluorocarbon)	PFCs	6,500 – 9,200

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คาร์บอนฟุตพริ้นท์($kgCO_2e$) เท่ากับปริมาณสารที่ปล่อยออกมา(kg) (ตารางที่ 3.5) คูณกับค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (ตารางที่ 3.6)

สารคาร์บอนไดออกไซด์

$$\text{คาร์บอนฟุตพริ้นท์} = 0.544 \times 1 = 0.544 \text{ kg } CO_2e$$

ก๊าซมีเทน

$$\text{คาร์บอนฟุตพริ้นท์} = 0.710 \times 21 = 14.91 \text{ kg } CO_2e$$

นั่นคือกระบวนการผลิตฟีนอลด้วยวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน จะทำให้ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 15.454 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตฟีนอลในกระบวนการ คิวมีน ออกซิเดชัน พลังงานรวมจากกระบวนการผลิตฟีนอลจากโปรแกรมไฮซิส (Hysys) เท่ากับ 49,581.470 (ตารางที่ 3.3) กิโลจูลต่อชั่วโมง ซึ่งเทียบได้เท่ากับ 0.570 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง โดยกำหนดช่วงเวลาทำงาน 24 ชั่วโมง การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของพลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) [29] มาคูณกับพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอล ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของน้ำมันเบนซิน (Gasoline) เท่ากับ 0.252 kg CO_2/kWh เนื่องจากกำหนดให้ใช้พลังงานจากการใช้น้ำมันเบนซินมาเป็นแหล่งผลิตพลังงาน

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ = 0.252 kg CO_2/kWh x 0.570 kW/h

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ = 0.144 kg CO_2e

นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอลจะทำให้ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 0.144 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

3.5.2 การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอลที่ได้จากกระบวนการโทลูอีน ออกซิเดชัน

การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ของผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วยก๊าซ 6 ชนิดที่นำมาประเมิน ตามที่ควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโต ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) จากกระบวนการผลิตฟีนอลจาก โทลูอีน ออกซิเดชันจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน เท่านั้น จึงทำการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์สองก๊าซนี้เท่านั้น และค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้นแสดงดังตารางที่ 3.6 และวิธีการคำนวณแสดงดังรายละเอียด

คาร์บอนฟุตพริ้นท์(kgCO_2e) เท่ากับปริมาณสารที่ปล่อยออกมา(kg) (ตารางที่ 3.5) คูณกับค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (ตารางที่ 3.6)

สารคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ = 0.211 x 1 = 0.211 kg CO_2e

สารมีเทน

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ = 0.566 x 21 = 11.886 kg CO_2e

คาร์บอนฟุตพริ้นท์รวม = 0.211 + 11.886 = 12.097kg CO_2e

นั่นคือกระบวนการผลิตฟีนอลด้วยวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน จะทำให้ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 0.421 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตฟีนอลในกระบวนการ คิวมีน ออกซิเดชัน

พลังงานรวม 21,253.912 กิโลจูลต่อชั่วโมง(ตารางที่ 3.3) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.246 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงโดยกำหนดช่วงเวลาทำงาน 24 ชั่วโมง การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของพลังงาน โดยนำค่าสัมประสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) [29] มาคูณกับพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอล ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของน้ำมันเบนซิน (Gasoline) เท่ากับ 0.252 kg CO_2/kWh เนื่องจากกำหนดให้ใช้พลังงานจากการใช้น้ำมันเบนซินมาเป็นแหล่งผลิตพลังงาน

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ = 0.252 kg CO_2/kWh x 0.246 kW/h

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ = 0.061 kg CO_2e

นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตฟีนอลจะทำให้ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 0.061 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

ดังนั้นเมื่อรวมคาร์บอนฟุตพริ้นทั้งหมด ของวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน จะทำให้ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 15.598 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งมากกว่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์รวมของวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ซึ่งจะให้ศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 12.158 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิจัยและวิจารณ์จากการประเมินวัฏจักรชีวิตต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธีที่ต่างกัน คือ กระบวนการผลิตฟีนอลจากคิวมีน ออกซิเดชันและกระบวนการผลิตฟีนอลจากโทลูอีน ออกซิเดชัน โดยการประเมินวัฏจักรชีวิตของแต่ละกระบวนการผลิตนั้นจะต้องมีการกำหนดหน่วยการทำงาน (Function unit) ซึ่งในงานวิจัยนี้คือหน่วยหน้าที่ที่ใช้คือ การผลิตฟีนอล 1 กิโลกรัม โดยใช้ดัชนีชี้วัดเชิงนิเวศน์ (Eco-indicator 99) ในการประเมินค่าผลกระทบซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

4.1.1 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอล

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอลจากกระบวนการผลิตทั้งสองวิธี โดยผลที่ได้จะแสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตและผลกระทบที่เกิดจากการปล่อยสารออกจากกระบวนการผลิตฟีนอล โดยใช้วิธีการผลิตต่างกัน ซึ่งสภาวะการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ต่างกันโดยการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอล ทำให้ทราบว่าในการผลิตฟีนอล 1 กิโลกรัมนั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านใดบ้างใน 11 ประเภทผลกระทบ

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอลนั้นกลุ่มผลกระทบที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 11 กลุ่มผลกระทบ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.1 กลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการผลิตฟีนอล

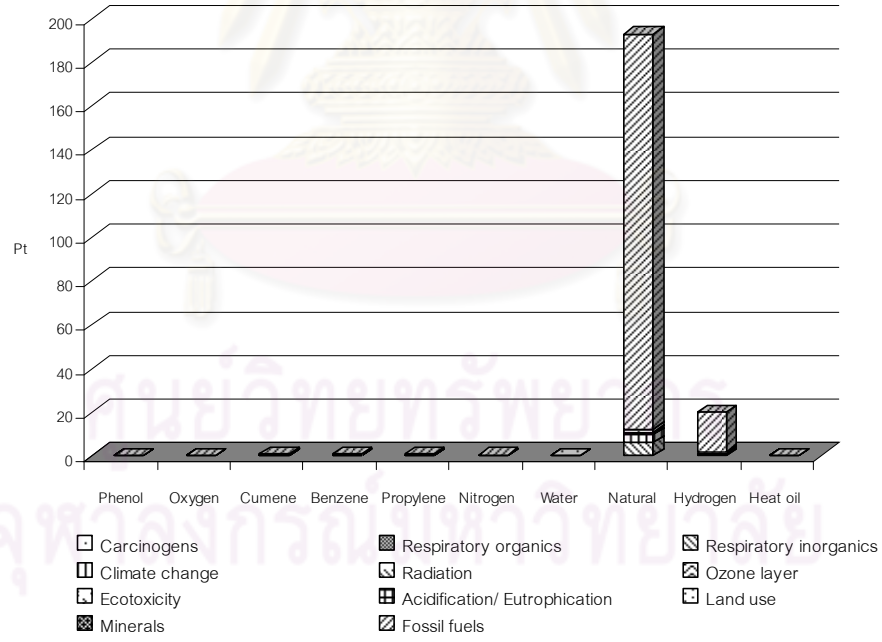
ลำดับ	ผลกระทบ
1	สารก่อมะเร็ง (Carcinogenic)
2	ผลกระทบด้านการหายใจจากอินทรีย์สาร (Respiration of organic substance)
3	ผลกระทบด้านการหายใจจากอนินทรีย์สาร (Respiration of inorganic substance)
4	สารแผ่รังสี (Radiation)
5	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change)

6	การลดลงของโอโซน (Ozone depletion)
7	ภาวะความเป็นกรด (Acidification)/ภาวะยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication)
8	ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ (Ecotoxicity)
9	การใช้พื้นที่ (Land use)
10	การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels)
11	การใช้สินแร่ (Mineral)

เนื่องจากการผลิตฟีนอล ของกระบวนการผลิตได้จากทั้ง คิวมัน ออกซิเดชัน และ โทลูอีน ออกซิเดชัน โดยในส่วนต่อมาจะศึกษาการประเมินผลกระทบโดยโปรแกรมซิมาโปร ทั้ง 11 ผลกระทบ

ผลิตภัณฑ์ฟีนอล เท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน



รูปที่ 4.1 ผลกระทบของการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน

การผลิตฟีนอล พบว่า สารเคมีที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ ส่วนประกอบในก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีค่าผลกระทบเท่ากับ 192.878 Pt และผลกระทบรองลงมาคือ ไฮโดรเจน ซึ่งมีผลกระทบเท่ากับ 19.917 Pt

ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดของกระบวนการผลิตฟีนอล คือ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล มีค่าผลกระทบ เท่ากับ 201.256 Pt รองลงมาคือผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ มีค่าผลกระทบเท่ากับ 6.853 Pt

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปร (SimaPro) ของ 11 ผลกระทบ

ผลกระทบ	การกำหนดบทบาท (Characterization)	การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)	การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt
สุขภาพมนุษย์ (Human health) : DALY			
- สารก่อมะเร็ง	1.02E-05	6.60 E-04	1.98 E-01
- การหายใจจากสารอินทรีย์	1.10E-05	7.11 E-04	1.97 E-01
- การหายใจจากสารอนินทรีย์	3.53E-04	2.28 E-02	2.13 E-01
- สารแผ่รังสี	2.30E-04	1.48 E-02	6.85 E+00
- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	8.35E-07	5.40E-05	4.46 E+00
- การลดลงของโอโซน	5.03E-07	3.26E-05	1.62 E-02
ระบบนิเวศน์ (Ecosystem) : PDF*m^2yr			
- ความเป็นพิษ	4.052E+00	7.90 E-04	3.95 E-01
- ความเป็นกรด/ภาวะยูโทรฟิเคชัน	1.279E+01	2.49 E-03	1.24 E+00
- การใช้พื้นที่	1.236E+01	2.41 E-03	1.20 E+00
การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion): MJ surplus			
- การใช้สินแร่	6.670E+00	1.12 E-03	2.24 E-01
- การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล	5.989E+03	1.00 E+00	2.01 E+02
รวม	6.02E+03	1.05 E+00	4.32E+2

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าการถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt ของผลกระทบประเภทด้านสารก่อมะเร็ง มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การกำหนดบทบาท** (Characterization)

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum_i (Q_i x EF_{ij})^*$$

EP_j = 1.02E-05DALY ผลกระทบประเภทสารก่อมะเร็ง

* เนื่องจากผลรวมการคูณกันของปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา กับ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j มีหลายค่าจึงแสดงเฉพาะผลรวม โดยค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ได้จากโปรแกรมซิมาโปร (Simapro)

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent) Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

2. การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = \frac{EPj}{(TxERj)}$$

$$= \frac{1.02E - 05DALY}{(1yr \times 0.01545DALY/pers/yr)}$$

$$= 6.60\ E\text{-}04\ pers$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด

T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1 yr

ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ ค 4

3. การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

$$= 300 \times 6.60\ E\text{-}04\ pers$$

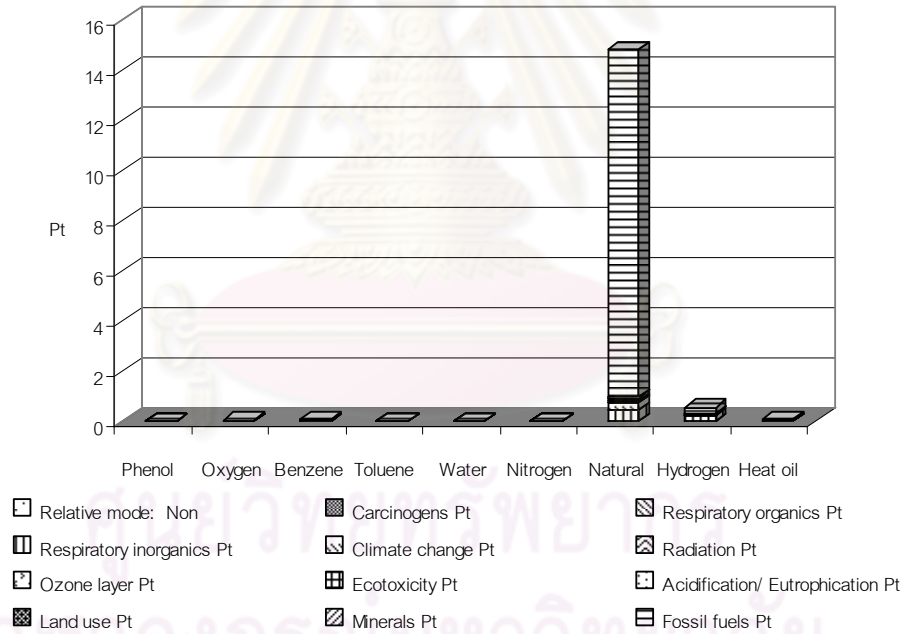
$$= 1.98\ E\text{-}01\ pers$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential): person of target (Pt) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ แสดงดังตาราง ค 4

ซึ่งค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคะแนนเดียว (Pt) ของทั้ง 11 ผลกระทบแสดงดังตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณดังตัวอย่างการคำนวณของผลกระทบด้านสารก่อมะเร็งเช่นเดียวกัน

การผลิตฟีนอลของกระบวนการผลิตฟีนอลด้วยวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน



รูปที่ 4.2 ผลกระทบของการผลิตฟีนอลด้วยวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน

การผลิตฟีนอล ซึ่งได้จากกระบวนการผลิต วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน จากรูปที่ 4.2 จะพบว่า :

สารเคมีที่มีผลกระทบมากที่สุดคือ ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีค่าผลกระทบเท่ากับ 14.783 Pt และผลกระทบรองลงมา ไฮโดรเจน ซึ่งมีผลกระทบเท่ากับ 0.556 Pt

ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดของกระบวนการผลิตฟีนอล วิธีคิวมีน ออกซิเดชัน คือ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล มีค่าผลกระทบเท่ากับ 14.237 Pt รองลงมาคือผลกระทบด้านการหายใจจากสารอนินทรีย์ มีค่าผลกระทบเท่ากับ 0.703 Pt

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปร (SimaPro) ของ 11 ผลกระทบ

ผลกระทบ	การกำหนดบทบาท (Characterization)	การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)	การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt
สุขภาพมนุษย์ (Human health) : DALY			
- สารก่อมะเร็ง	7.36E-07	4.78E-05	1.43 E-02
- การหายใจจากสารอินทรีย์	1.70E-06	1.10 E-04	1.42 E-02
- การหายใจจากสารอนินทรีย์	3.62E-05	2.34 E-03	3.30 E-02
- สารแผ่รังสี	1.70E-05	1.10 E-03	7.03 E-01
- การเปลี่ยนสภาพภูมิอากาศ	6.45E-08	4.18E-06	3.30 E-01
- การลดลงของโอโซน	3.98E-08	2.58E-06	1.25 E-03
ระบบนิเวศน์ (Ecosystem) : PDF*m^2yr			
- ความเป็นพิษ	3.32 E-01	6.48E-05	3.24 E-02
- ความเป็นกรด/ภาวะยูโทรฟิเคชัน	1.25 E+00	2.44 E-04	1.21 E-01
- การใช้พื้นที่	9.44 E-01	1.84 E-04	9.20 E-02
การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion): MJ surplus			
- การใช้สินแร่	4.75 E-01	7.98E-05	1.59 E-02
- การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล	4.23 E+02	7.11 E-02	1.42 E+01
รวม	4.27E+02	7.54E-02	3.11 E+01

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าการถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt ผลกระทบประเภทสารก่อมะเร็ง มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การกำหนดบทบาท (Characterization)**

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum_i (Q_i x EF_{ij})^*$$

EP_j = 7.36E-07 DALY ผลกระทบประเภทสารก่อมะเร็ง

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)

Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา

EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

2. **การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)**

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นๆที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = \frac{EPj}{(TxERj)}$$

$$= \frac{7.36E-07\ DALY}{(1yr\ x\ 0.01545DALY/pers/yr)}$$

$$= 4.78E-05\ pers$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด

T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1 yr

ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ ค 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. **การถ่วงค่าน้ำหนัก** (Weighting) : Pt

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$
$$= 300 \times 4.76E\text{-}05 \text{ pers}$$
$$= 1.43\ E\text{-}02 \text{ pers}$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential): person of target (Pt) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ แสดงดังตาราง ค 4

ซึ่งค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคะแนนเดียว Pt ของทั้ง 11 ผลกระทบแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยคำนวณดังตัวอย่างการคำนวณของสารก่อมะเร็งเช่นเดียวกัน

4.2 ผลการประเมินเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตฟีนอล

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลของการเปรียบเทียบในแต่ละแบบของกระบวนการผลิตเพื่อที่จะสามารถตัดสินใจได้ว่าทางเลือกใดที่จะมีผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของแต่ละแบบของการผลิต ซึ่งจะพบว่าในแต่ละแบบของกระบวนการผลิตนั้นมีผลกระทบหลักมาจากขั้นตอนใดและผลกระทบมาจากวัตถุดิบตัวใดของการผลิตฟีนอล

การประเมินผลเพื่อเปรียบเทียบนั้นในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขอบเขตของผลกระทบที่ศึกษาเป็น สองกรณี โดยที่แต่ละกรณีแบ่งย่อยเป็นสามขอบเขตของการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตฟีนอลดังนี้

ผลิตภัณฑ์ฟีนอล เท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แบ่งเป็นขอบเขต ดังนี้

4.2.1.ผลกระทบตั้งแต่การผลิตฟีนอล (cradle-to-gate)

กราฟที่จะนำมาเสนอเพื่อเปรียบเทียบค่าผลกระทบของทั้งสองวิธีการผลิตจะเป็นกราฟที่อธิบายแต่ละกลุ่มผลกระทบหลัก ประกอบด้วย

ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์(Human health) อธิบายในหน่วย DALY

ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ (Ecosystem quality) อธิบายในหน่วย PDF* m^2 yr

ผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ (Resource) อธิบายในหน่วยผลกระทบเป็น MJ surplus ซึ่งเป็นหน่วยของผลกระทบของสามกลุ่มผลกระทบดังนี้

ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human health) อธิบายในหน่วย DALY ย่อมาจาก Disability Adjusted Life Years หมายถึงจำนวนปีที่ต้องเจ็บป่วยและตายก่อนวัยอันควร โดยมีสาเหตุมาจากประเภทผลกระทบดังนี้ สารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) ผลกระทบด้านการหายใจจากอินทรีย์สาร (Respiration of organic substance) ผลกระทบด้านการหายใจจากอนินทรีย์สาร (Respiration of inorganic substance) สารแผ่รังสี (Radiation) ภาวะโลกร้อน (Climate change) การลดลงของโอโซน (Ozone depletion)

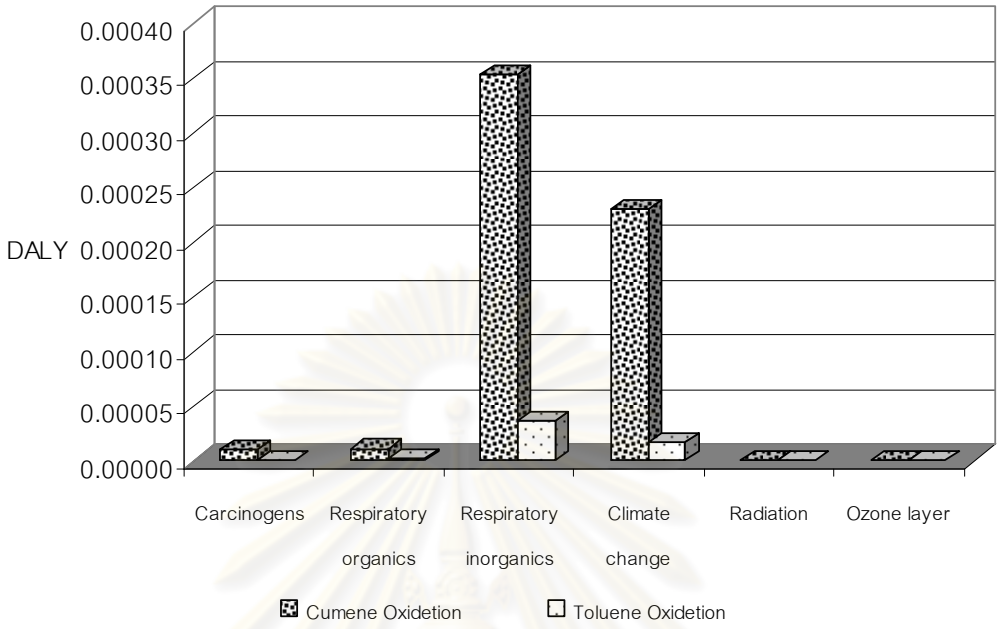
ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ (Ecosystem quality) อธิบายในหน่วย PDF m^2 yr ย่อมาจาก Potentially Disappeared Fraction ซึ่งหมายถึงสัดส่วนของสิ่งมีชีวิตที่หายไปบนพื้นที่ 1 ตารางเมตรในระยะเวลา 1 ปี โดยมีสาเหตุมาจากประเภทผลกระทบต่างๆ ดังนี้คือ ภาวะความเป็นกรด/ภาวะยูโทรฟิเคชัน (Acidification/Eutrophication) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ (Ecotoxicity) และการใช้พื้นที่ (Land use)

ผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ (Resource) อธิบายในหน่วย MJ surplus ซึ่งเป็นหน่วยของพลังงานที่ใช้ในการสกัดแร่ในอนาคต โดยมีสาเหตุมาจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuels) และการใช้สินแร่ (Mineral)

ผลิตภัณฑ์ฟีนอล เท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

4.2.1 เปรียบเทียบผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตฟีนอล

ผลการเปรียบเทียบของขอบเขตของผลกระทบที่มาจากขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตฟีนอลของทั้งสามกลุ่มผลกระทบหลัก คือ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human health) ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ (Ecosystem quality) และผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ (Resource) ซึ่งในการผลิตฟีนอลวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ คิวมีนและโทลูอีน ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 - 4.6



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากขั้นตอนการผลิตฟีนอลทั้งสองวิธีการผลิต : กลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน กับ วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปร(SimaPro)

ผลกระทบ	การกำหนดบทบาท (Characterization)		การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)		การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt	
	คิวมีน	โทลูอีน	คิวมีน	โทลูอีน	คิวมีน	โทลูอีน
สุขภาพมนุษย์ (Human health) : DALY						
- สารก่อมะเร็ง	1.02E-5	7.36E-7	8.85E-6	4.76E-5	2.16 E+2	3.96 E-1
- การหายใจจากสารอินทรีย์	1.10E-5	1.70E-6	1.63E-6	1.10 E-4	1.97 E-1	1.42 E-2
- การหายใจจากสารอนินทรีย์	3.53E-4	3.62E-5	3.00E-4	2.34 E-3	2.13 E-1	3.30 E-2
- สารแผ่รังสี	2.30E-4	1.70E-5	2.00E-4	1.10 E-3	6.85 E+0	7.03 E-1
- การเปลี่ยนสภาพภูมิอากาศ	8.35E-7	6.45E-8	7.38E-7	4.18E-6	4.46 E+0	3.30 E-1
- การลดลงของโอโซน	5.03E-7	3.98E-8	4.39E-7	2.58E-6	1.62 E-2	1.25 E-3
รวม	6.06E-04	5.12E-04	5.50E-05	5.12E-04	8.66E-05	3.36E-02

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าการถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt ผลกระทบสุขภาพมนุษย์ ด้านสารก่อมะเร็ง ของวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การกำหนดบทบาท** (Characterization)

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum_i (Q_i x EF_{ij})^*$$

EP_j = 1.02E-5 DALY ผลกระทบประเภทสารก่อมะเร็ง

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)
Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา
EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

2. **การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย** (Normalization)

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นๆที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = \frac{EPj}{(TxERj)}$$

$$= \frac{1.02E-5 \quad DALY}{(1yr \times 0.01545DALY/pers/yr)}$$

$$= 6.60\ E\text{-}4\ pers$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด
T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1 yr

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ ค 4

3. **การถ่วงค่าน้ำหนัก** (Weighting) : Pt

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน

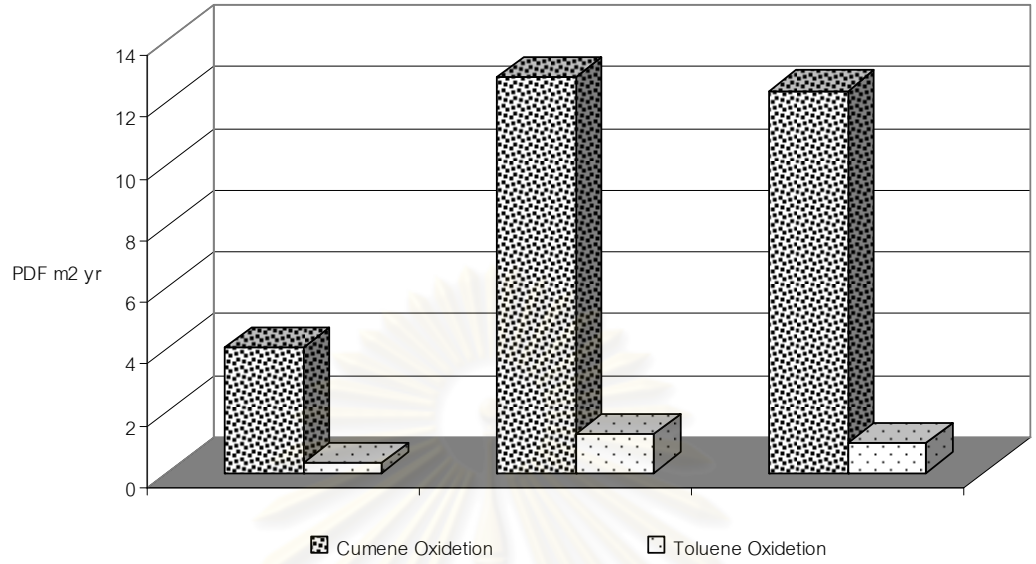
$$WP_j = WF_j \times NP_j$$
$$= 300 \times 6.60 \text{ E-4 pers}$$
$$= 3.96.16 \text{ E-1 pers}$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential): person of target (Pt) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ แสดงดังตาราง ค 4

ซึ่งค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคะแนนเดียว Pt ของทั้ง 6 ผลกระทบสุขภาพมนุษย์แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยคำนวณดังตัวอย่างการคำนวณของสารก่อมะเร็งเช่นเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากขั้นตอนการผลิตฟีนอลทั้งสองวิธีการผลิต : กลุ่มผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน กับ วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปร(SimaPro)

ผลกระทบ	การกำหนดบทบาท (Characterization)		การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)		การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt	
	คิวมีน	โทลูอีน	คิวมีน	โทลูอีน	คิวมีน	โทลูอีน
ระบบนิเวศน์ (Ecosystem) : PDF*m^2yr						
- ความเป็นพิษ	4.052E+0	3.32 E-1	7.89 E-4	6.48E-5	3.95 E-1	3.24 E-2
- ความเป็นกรด/ยูโทรฟิเคชัน	1.279E+1	1.25 E+0	2.49 E-3	2.44 E-4	1.24 E+0	1.21 E-1
- การใช้พื้นที่	1.236E+1	9.44 E-1	2.41 E-3	1.84 E-4	1.20 E+0	9.20 E-2
รวม	2.92E+1	0.00E+0	0.00E+0	6.48E-5	0.00E+0	0.00E+0

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าการถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt ผลกระทบระบบนิเวศน์ ด้านความเป็นพิษ ของวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การกำหนดบทบาท** (Characterization)

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum_i (Q_i x EF_{ij})^*$$

$$EP_j = 4.05\ E+0\ PDF * m^2 yr$$

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)
Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา
EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

2. **การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย** (Normalization)

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นๆที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = \frac{EPj}{(TxERj)}$$

$$= \frac{4.05E + 0\ PDF * m^2 yr}{(1yr\ x\ 5130\,PDF\,x\,m^2 yr/pres/yr)}$$

$$= 7.89\ E\text{-}4\ pers$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด
T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1 yr
ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ ค 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

$$= 500 \times 7.89 \text{ E-4 pers}$$

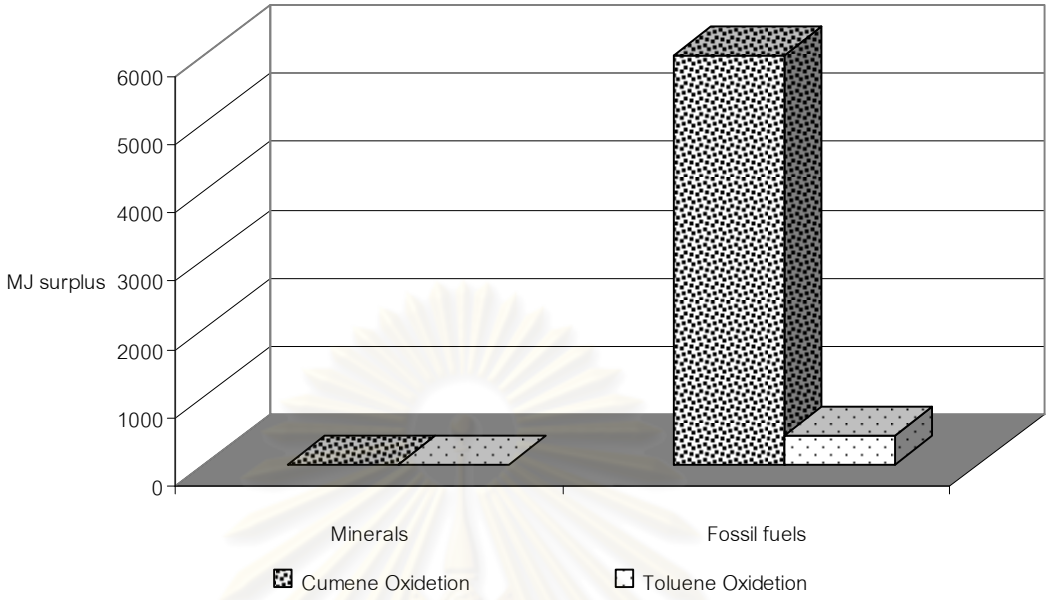
$$= 3.95 \text{ E-1 pers}$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential): person of target (Pt) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ แสดงดังตาราง ค 4

ซึ่งค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคะแนนเดียว Pt ของทั้ง 3 ผลกระทบระบบนิเวศน์แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยคำนวณดังตัวอย่างการคำนวณของความเป็นพิษเช่นเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ของการผลิตฟีนอลทั้งสองแบบ : กลุ่มผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอลวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน กับ วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ค่าการประเมินวัฏจักรชีวิตจากโปรแกรมซิมาโปร(SimaPro)

ผลกระทบ	การกำหนดบทบาท (Characterization)		การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)		การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt	
	คิวมีน	โทลูอีน	คิวมีน	โทลูอีน	คิวมีน	โทลูอีน
การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion): MJ surplus						
- การใช้สินแร่	6.670E0	4.75 E-1	1.12 E-3	7.98E-5	2.24 E-1	1.59 E-2
- การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล	5.989E3	4.23 E+2	1.00 E+0	7.11 E-2	2.01 E+2	1.42 E+1
รวม	6.00E+3	0.00E+0	0.00E+0	7.98E-5	0.00E+0	0.00E+0

แสดงตัวอย่างการคำนวณค่าการถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt ผลกระทบการลดลงของทรัพยากร ด้านการใช้สินแร่ ของวิธีคิวมีนออกซิเดชัน มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. **การกำหนดบทบาท (Characterization)**

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum_i (Q_i x EF_{ij})^*$$

$$EP_j = 6.67E+0 \text{ MJ surplus}$$

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)
Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา
EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

2. **การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย (Normalization)**

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นๆที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = \frac{EPj}{(TxERj)}$$

$$= \frac{6.670E+0 \quad \text{MJ surplus}}{(1\text{yr} \times 5951\text{MJ surplus/pres/yr})}$$

$$= 1.12 \text{ E-3 pers}$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด

T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 1 yr

ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท แสดงดังตารางที่ ค 4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การถ่วงค่าน้ำหนัก (Weighting) : Pt

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

$$= 200 \times 1.12 \text{ E-3 pers}$$

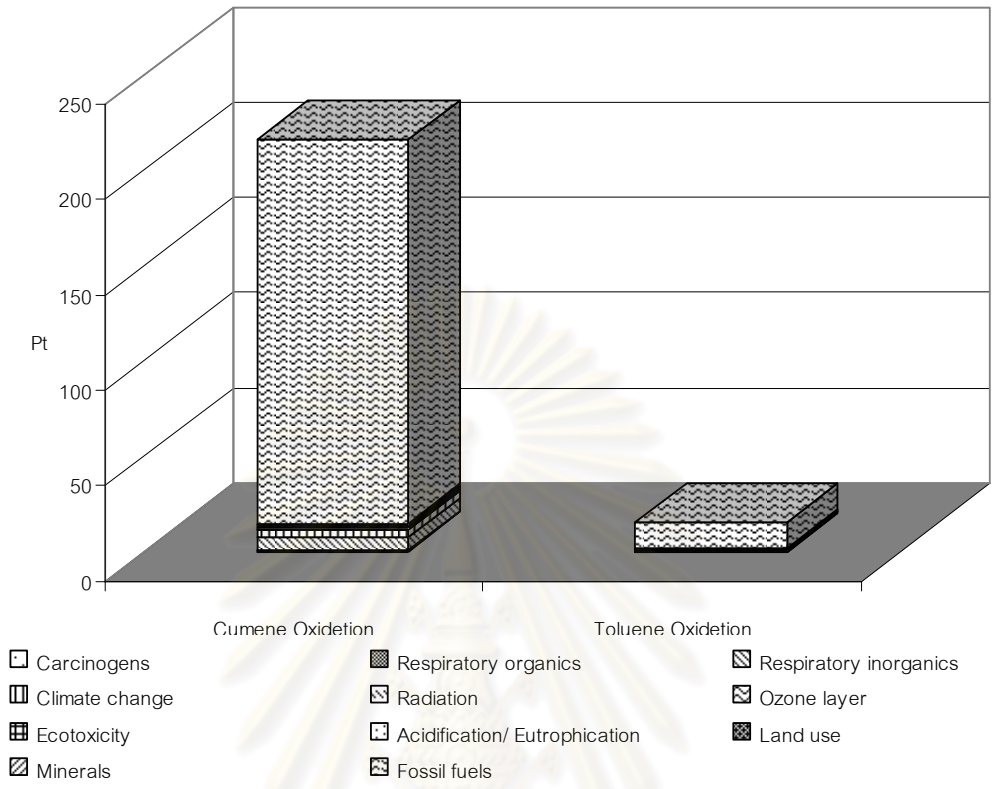
$$= 2.24 \text{ E-1 pers}$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential): person of target (Pt) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ แสดงดังตาราง ค 4

ซึ่งค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคะแนนเดียว Pt ของทั้ง 2 ผลกระทบการลดลงของทรัพยากรแสดงดังตารางที่ 4.6 โดยคำนวณดังตัวอย่างการคำนวณของการใช้สินแร่เช่นเดียวกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตฟีนอล: ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหน่วย Pt (กราฟคะแนนเดียว)

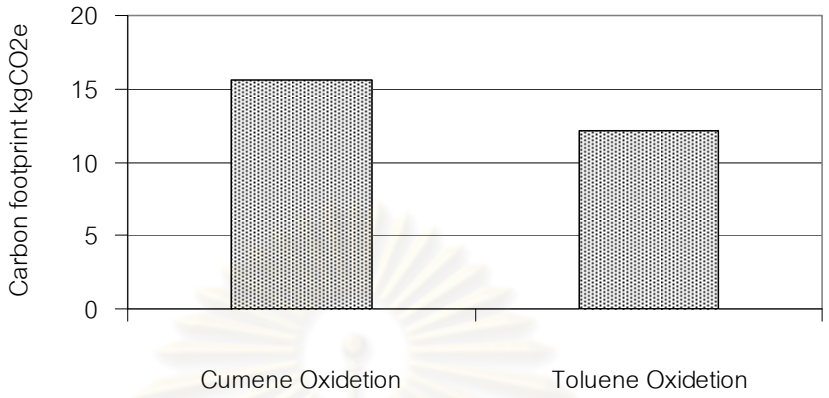
รูปที่ 4.6 คือ การรวมกลุ่มผลกระทบทั้ง 3 ประเภทที่ถูกทำให้เป็นหน่วยเดียวกัน คือ หน่วย Pt ซึ่งพบว่าผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตฟีนอล มีค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเท่ากันทั้งด้านโดยผลกระทบเรียงจากมากไปน้อย ดังนี้

วิธีคิวมีน ออกซิเดชัน ผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ (Resources) เท่ากับ 201.480 Pt
วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ(Resources) เท่ากับ 14.250 Pt

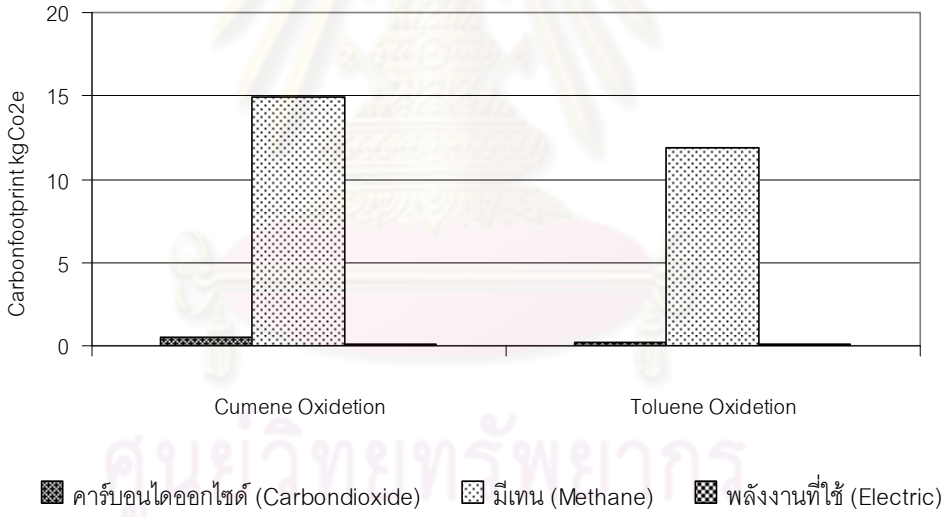
วิธีคิวมีน ออกซิเดชัน ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human health) เท่ากับ 11.755 Pt
วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human health) เท่ากับ 1.083 Pt

วิธีคิวมีน ออกซิเดชัน ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ (Ecosystem Quality) เท่ากับ 2.848 Pt
วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ (Ecosystem Quality) เท่ากับ 0.246 Pt

4.2 เปรียบเทียบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอล



รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์รวมของผลิตภัณฑ์ฟีนอลของทั้งสองกระบวนการ



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์สารแต่ละชนิดของกระบวนการผลิตภัณฑ์ฟีนอลของทั้งสองกระบวนการ

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตฟีนอลจากคิวมีน ออกซิเดชัน มีค่าเท่ากับ 15.598 kg CO_2 และสารที่มีปริมาณมากคือ ก๊าซมีเทน เท่ากับ 14.910 kg CO_2 และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตฟีนอล เท่ากับ 0.144 kg CO_2 ส่วนการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตฟีนอลจากโทลูอีน ออกซิเดชัน มีค่าเท่ากับ 12.158 kg CO_2 และ

สารที่มีปริมาณมากคือ ก๊าซมีเทน เท่ากับ 11.886 kg CO_2 และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตฟีนอล เท่ากับ 0.061 kg CO_2

จากผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ ด้วยวิธีการประเมินแบบโปรแกรมซิมาโปร (SimaPro) แสดงดังตาราง 4.7-4.8 และ วิธีการประเมินแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon footprint) แสดงดังตาราง 4.9

ตาราง 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้ง 11 ผลกระทบของการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ

ผลกระทบ	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
สุขภาพมนุษย์ (Human health) : DALY		
- สารก่อมะเร็ง	1.97E-1	1.42E-2
- การหายใจจากสารอินทรีย์	2.13E-1	3.30E-2
- การหายใจจากสารอนินทรีย์	6.85E+0	7.03E-1
- สารแผ่รังสี	4.46E+0	3.30E-1
- การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	1.62E-2	1.25E-3
- การลดลงของโอโซน	9.77E-3	7.73E-4
ระบบนิเวศน์ (Ecosystem) : PDF*m^2yr		
- ภาวะความเป็นกรด/ภาวะยูโทรฟิเคชัน	3.95E-1	3.24E-2
- ความเป็นพิษ	1.24E+0	1.21E-1
- การใช้พื้นที่	1.20E+0	9.20E-2
การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion) : MJ surplus		
- การใช้สินแร่	2.24E-1	1.59E-2
- การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล	2.01E+2	1.42E+1

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบคะแนนเดียวของการประเมิน วัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการ

ผลกระทบ (Pt)	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
สุขภาพมนุษย์ (Human health)	1.17E+1	1.08E+1
ระบบนิเวศน์ (Ecosystem)	2.84E+0	2.46E-1
การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion)	2.01E+2	1.42E+1

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านภาวะโลกร้อน โดยวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์

สารเคมี ($kgCO_2e$)	คิวมีน ออกซิเดชัน	โทลูอีน ออกซิเดชัน
คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide)	0.544	0.211
มีเทน (Methane)	14.910	11.886
พลังงานที่ใช้ (Electric)	0.144	0.061
คาร์บอนฟุตพริ้นท์รวม	15.598	12.158

จากตาราง 4.7-4.9 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตฟีนอล 2 กระบวนการคือ คิวมีน ออกซิเดชัน และ โทลูอีน ออกซิเดชัน ซึ่งการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบใช้โปรแกรมซิมาโปร (SimaPro) พบว่า กระบวนการจากคิวมีน ออกซิเดชัน มีการใช้สารเคมีและพลังงานในกระบวนการผลิตฟีนอลมากกว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากโทลูอีน ออกซิเดชัน จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าทั้ง 11 ผลกระทบ ส่วนการประเมินวัฏจักรชีวิตแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ สารที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากสำหรับกระบวนการผลิตฟีนอลทั้ง 2 กระบวนการคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการผลิตฟีนอลจากกระบวนการคิวมีนออกซิเดชัน จะมีค่ามากกว่ากระบวนการผลิตจากโทลูอีน ออกซิเดชันดังตาราง 4.9

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตฟีนอลโดยโปรแกรม SimaPro 7.1 ด้วยดัชนีชี้วัด Eco-indicator 99 และเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตฟีนอลที่มีการใช้วิธีการผลิตที่แตกต่างกัน คือ คิวมีน ออกซิเดชันและโทลูอีน ออกซิเดชัน เพื่อที่จะศึกษาว่ากระบวนการผลิตแบบใดที่มีผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และในการวิเคราะห์ผลกระทบ เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์มีผลตามมาตรฐาน ISO และสามารถรายงานผลเป็นรูปภาพและตาราง ทำให้ง่ายต่อความเข้าใจ ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสามารถสรุปได้ ดังนี้

ผลกระทบตั้งแต่การผลิตฟีนอล ขั้นตอนการผลิตฟีนอลแบบ cradle-to-gate

ผลกระทบตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตฟีนอลจนถึงขั้นตอนการผลิตฟีนอล (cradle-to-gate) จากการพิจารณาแต่ละประเภทผลกระทบ เมื่อผลิตภัณฑ์ฟีนอล เท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่า กระบวนการผลิตวิธีคิวมีน ออกซิเดชันจะส่งผลกระทบ เท่ากับ 216.08 Pt และ วิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน เท่ากับ 15.58 Pt พบว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน จะให้ผลกระทบสูงกว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน

จากการทดลองชี้ชัดให้เห็นว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน จะส่งผลกระบวนต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน ซึ่งเป็นไปตามผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ฟีนอลที่ส่งผลกระทบต่อโลกร้อนเช่นกันที่ประเมินว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน จะส่งผลกระบวนต่อโลกร้อนมากกว่ากระบวนการผลิตฟีนอลจากวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน และเมื่อจัดกลุ่มผลกระทบ 11 ประเภท ออกเป็น 3 กลุ่มผลกระทบ พบว่ากลุ่มผลกระทบที่มีปริมาณสูงที่สุด คือผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ รองลงมาคือผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และน้อยที่สุดคือผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เมื่อพิจารณาด้านผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแล้ว ทางเลือกที่ควรจะเลือกเพื่อผลิตฟีนอลนั้นควรจะใช้วิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน เพราะค่าการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในทุกๆ กลุ่มจะน้อยกว่าการผลิตฟีนอลด้วยวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน แต่เนื่องจากการผลิตในประเทศไทยมีการผลิตด้วยวิธีคิวมีน ออกซิเดชัน เป็นหลักซึ่งส่งผลกระทบอย่างรุนแรงในด้านสิ่งแวดล้อม แต่การผลิตคิวมีนก็มีผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นควรจะมีการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อวางแผน และพัฒนากระบวนเพื่อให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

2. เพื่อให้การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นควรมีการขยายขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยทำการพิจารณาเพิ่มในด้านการขนส่ง การใช้งานของผลิตภัณฑ์ การใช้ใหม่และการจัดการกับเศษซากหรือเรียกว่าการพิจารณาแบบ Cradle-to-Grave ของทั้งกระบวนการผลิต

3. ในส่วนของการพัฒนากระบวนการผลิต สามารถทำได้หลายวิธีเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่นพิจารณาถึงความเหมาะสมในการนำสารตั้งต้นกลับมาใช้ใหม่ หรือการปรับเปลี่ยนวิธีหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

4. เนื่องจากการผลิตฟีนอลในภาคอุตสาหกรรมมีการผลิตจากวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน เป็นส่วนใหญ่ เพราะเนื่องจากมีสารพลอยได้ในการผลิตวิธีนี้จะได้คือ อะซิโตน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญและยังใช้ประโยชน์อุตสาหกรรม พลาสติก ไฟเบอร์ ยา และ สารเคมีอื่นๆ แต่ข้อเสียจากการผลิตวิธีนี้จะส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตฟีนอลจากวิธีโทลูอีน ออกซิเดชัน ซึ่งจะเห็นได้จากงานวิจัยนี้ แต่เมื่อเทียบกับความคุ้มทุนทางเศรษฐกิจแล้วการผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีนออกซิเดชันจะให้ผลกำไรและนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่า ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นมากเมื่อผลิตฟีนอลจากวิธี คิวมีนออกซิเดชัน คือ ต้องควบคุมมลภาวะให้อยู่ในเกณฑ์กำหนดของพระราชบัญญัติกฎหมายและมาตรฐานการควบคุมมลพิษ เพื่อปล่อยของเสียสู่สิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] วลัยพร มุขสุวรรณ. พลาสติกในชีวิตประจำวัน โพลีคาร์บอเนต. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย, 2550.

[2] Encyclopedia of industrial chemistry vol. 25, pp.589-602.

[3] ฝ่ายธุรกิจและสิ่งแวดล้อม. คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์, สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย นนทบุรี, 2547.

[4] Rebizer, G.,et al. Life cycle assessment part 1 : Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environment international 30 (2004) : 701-720.

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

[6] Aaro´n David Bojarski., et al. Life Cycle Assessment Coupled with Process Simulation under Uncertainty for Reduced Environmental Impact : Application to Phosphoric Acid Production. Ind. Eng. Chem. Res. 47, (2008) : 8286-8300.

[7] Operations Guide for Hysys. Aspen Technology, Inc. All rights reserved, 2004

[8] Rolf Frischknecht., et al. Implementation of life cycle impact assessment methods 3. Centre for Life Cycle Inventories : Dubendorf, 2007.

[9] Mark Goedkoop., and Renilde Spriensma. The Eco-indicator 99 A damage oriented

[10] ปณัตดา ยอดแสง. ข้อมูลความปลอดภัยของฟีนอล. ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[11] Surinder Parkash. Refining Processes Handbook, 2003.

[12] Renou S., et al. Influence of impact assessment methods in waste water treatment LCA. Journal of Cleaner Production 16, (2008) : 1098-1105.

[13] Hubert Halleux., Stephane Lassaux., and Albert Germain. Comparison of life cycle assessment methods application to a wastewater treatment plant. CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 2006.

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

[15] Adisa Azapagic. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization. Chemical engineering journal 73, (1990) : 1-21.

[16] Wei Zhao.,et al. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions : Case study of Tianjin, China. science of the total environment 407, (2009) : 1517– 1526.

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

[18] HOU Weifeng, SU Hongye, MU Shengjing and CHU Jian. Multiobjective Optimization of the Industrial Naphtha Catalytic Reforming Process, (2007): 75-80

[19] Reza, S. Seif Mohaddecy, Sepehr Sadighi, Majid Bahmani. Optimization of catalyst distribution in the catalytic Naphtha reformer of Tehran refinery, (2008): 60-68.

[20] Robert, J. Schmidt. Industrial catalytic processes-phenol production, (2005): 89-103.

[21] Raja Kumar More, Vijaya Kumar Bulasara, Ramgopal Uppaluri, Vikas R. Banjara. Optimization of crude distillation system using aspen plus:Effect of binary feed selection on grass-root design, (2010): 121-134.

[22] กฤษกร เจียมจำรัสศิลป,และคนอื่นๆ. Life Cycle Assessment of Powder Coating Paints.

[23] LIEBMANN, K. AND DHOLE, V. R. INTEGRATED CRUDE DISTILLATION DESIGN. Department of Process Integration, UMIST, P.O. Box 88, Manchester, (1995): S 119-S124.

[24] Barker, L.K. and Cottingham, P. L. CATALYTIC REFORMING OF HYDROGENATED SHALE OIL NAPHTHA, Laramie Energy Research Center, U.S. Department of the Interior.

[25] อรัญ หันพงศ์กิตติกูล., มูฮัมหมัด เจ๊ะอามู และ ฉวีวรรณ มลิวัลย์. การประเมินขั้นต้นของการเกิดก๊าซเรือนกระจกจากสวนปาล์มและการสกัดน้ำมันปาล์มดิบในประเทศไทย. วารสารหาดใหญ่วิชาการ 7(2). ก.ค. – ธ.ค. 2552.

[26] Rosilda Selvin,G.R. Rajarajeswari,L. Selva Roselin, V. Sadasivam,B. Sivasankar, K. Rengaraj. Catalytic decomposition of cumene hydroperoxide into phenol and acetone, Anna University, Chennai, India, (2001), 125-129.

[27] Laurent, A. Olsen, S.I. Hauschild, M.Z. Carbon footprint as environmental performance indicator for the manufacturing industry, Department of Management Engineering, Technical University of Denmark, (2010), 37-40.

[28] พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์, รุ้งนภา ทองพูล, กิตตินันท์ อันนานนท์ และอธิวัตร จิรจริยาเวช. แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, ภายใต้โครงการส่งเสริมการใช้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์, (2009).

[29] Change CMT Calculator Emission Factor Sources on Climate change, Guidelines to Defra's GHG Conversion Factors: Methodology Paper for Transport Emission Factors, July 2008.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

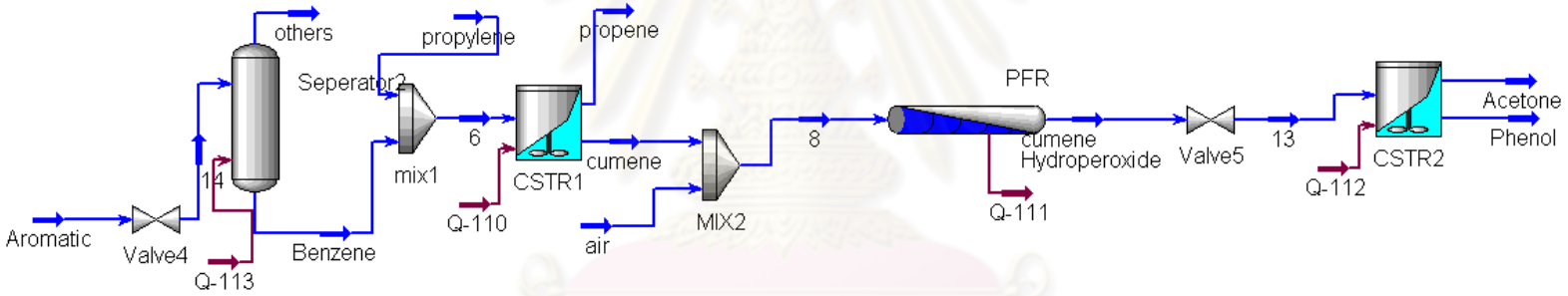
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตฟีนอล



รูปที่ ก 1 แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตฟีนอลวิธีที่ 1 คิวมีน ออกซิเดชัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 1 แสดงสภาวะของแต่ละสายของกระบวนการผลิตวิธีที่ 1

สาย	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความดัน (bar)	อัตราการไหลโดยมวล (kg/hr)
Aromatic	108.99	2.89	8101.20
others	110.80	2.89	8101.20
Propylene	112.41	2.89	8101.20
Propene	107.47	2.89	8101.20
reformate	107.75	2.89	8101.20
benzene	109.24	2.89	8101.20
cumene	109.70	2.89	8106.20
air	70.00	1.00	5000.00
8	104.21	1.00	8156.20
cumene Hdp.	104.41	1.00	8156.20
Phenol	104.61	1.00	7768.20
Acetone	104.61	1.00	388.64

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

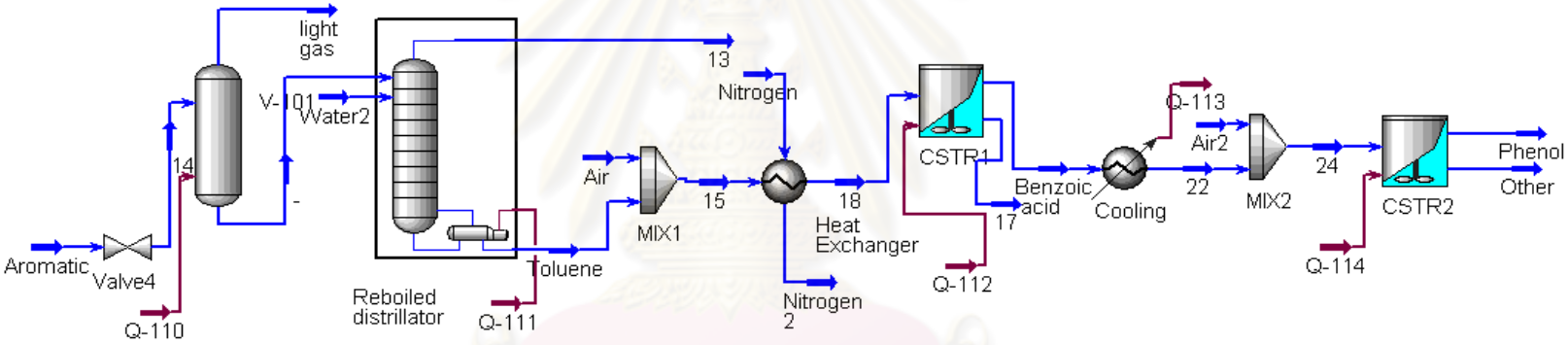
ตารางที่ ก 2 แสดงพลังงานของแต่ละสายของกระบวนการผลิตวิธีที่ 1

สาย	พลังงานที่เข้า (kJ/hr)	พลังงานที่ออก (kJ/hr)
Q-110	4.56×10^3	-
Q-111	3.00×10^3	-
Q-112	5.59×10^3	-
Q-113	3.00×10^4	-

ตารางที่ ก 3 แสดงค่าของอุปกรณ์ทำความร้อนอุปกรณ์ทำความเย็นในแต่ละสายของกระบวนการผลิตวิธีที่ 1

อุปกรณ์ทำความร้อน	อุณหภูมิเข้า (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)
อุปกรณ์ทำความร้อน 1	232.00	3.45
อุปกรณ์ทำความร้อน 2	107.70	2.90
อุปกรณ์ทำความร้อน 3	109.00	2.89
อุปกรณ์ทำความร้อน 4	110.70	2.89
อุปกรณ์ทำความเย็น	112.40	2.89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก2 แผนผังแบบจำลองกระบวนการผลิตฟีนอล วิธีที่ 2 โทลูอีน ออกซิเดชัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 4 แสดงสภาวะของแต่ละสายของกระบวนการผลิตวิธีที่ 2

สาย	อุณหภูมิ (^{o}C)	ความดัน (bar)	อัตราการไหลโดยมวล (kg/hr)
aromatic	107.75	2.89	8101.20
benzene	109.24	2.89	8101.20
light gas	89.08	2.88	7.88×10^{-3}
toluene	209.62	3.90	209.36
13	67.46	5.00×10^{-3}	6832.80
Air1	200.00	2.00	1500.00
15	175.09	2.00	1709.40
18	448.51	1.00	1709.40
Benzoic acid	448.95	1.00	1709.40
Air2	465.71	1.00	3000.00
24	457.39	1.00	4709.40
Phenol	457.76	1.00	4709.40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 5 แสดงพลังงานของแต่ละสายของกระบวนการผลิตวิธีที่ 2

สาย	พลังงานที่เข้า (kJ/hr)	พลังงานที่ออก (kJ/hr)
Q-110	$4.56x10^3$	-
Q-111	$5.43x10^6$	-
Q-112	$1x10^3$	-
Q-113	-	$4.00x10^4$
Q-114	$3.44x10^3$	-

ตารางที่ ก 6 แสดงค่าของอุปกรณ์ทำความร้อนและอุปกรณ์ทำความเย็นในแต่ละสายของกระบวนการผลิตวิธีที่ 1

อุปกรณ์ทำความร้อน	อุณหภูมิเข้า (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)
อุปกรณ์ทำความร้อน 1	232.00	3.45
อุปกรณ์ทำความร้อน 2	107.70	2.90
อุปกรณ์ทำความร้อน 3	109.00	2.89
อุปกรณ์ทำความร้อน 4	110.70	2.89
อุปกรณ์ทำความเย็น 1	112.40	2.89
อุปกรณ์ทำความเย็น 2	449.00	1.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข 1 ตารางแสดงค่าต่างๆ

ภาคผนวก ข 1.1 ตารางแสดงการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของฟีนอลวิธี คิวมีน ออกซิเดชัน

สาร (Pt) / ผลกระทบ	Phenol	Natural gas	Hydrogen	Nitrogen	Oxygen	Water	Heating	Total
Carcinogens	0.00 E-0	4.34E-4	9.73E-5	2.06E-5	1.94E-5	2.24E-7	8.10E-6	5.80E-4
Resp. organics	0.00 E-0	8.67E-5	1.82E-5	6.55E-8	6.18E-8	5.76E-10	1.73E-6	1.07E-4
Resp. inorganics	0.00 E-0	1.66E-2	2.95E-3	1.43E-4	1.34E-4	7.01E-7	1.15E-4	2.00E-2
Climate change	0.00 E-0	1.07E-2	2.17E-3	5.86E-5	5.53E-5	2.02E-7	1.14E-4	1.31E-2
Radiation	0.00 E-0	3.36E-5	5.05E-6	4.65E-6	4.39E-6	4.17E-9	0.00 E-0	4.77E-5
Ozone layer	0.00 E-0	2.83E-5	2.29E-8	1.30E-8	1.23E-8	1.18E-10	4.86E-7	2.88E-5
Ecotoxicity	0.00 E-0	5.48E-4	4.40E-5	7.89E-6	7.44E-6	2.65E-7	4.97E-5	6.58E-4
Acidification/ Eutrophication	0.00 E-0	1.87E-3	2.79E-4	1.10E-5	1.04E-5	3.74E-8	1.55E-5	2.19E-3
Land use	0.00 E-0	2.09E-3	1.16E-5	4.75E-6	4.48E-6	5.09E-8	0.00 E-0	2.11E-3
Minerals	0.00 E-0	8.91E-4	5.95E-5	5.77E-6	5.44E-6	6.41E-7	0.00 E-0	9.63E-4
Fossil fuels	0.00 E-0	7.91E-1	9.02E-2	6.11E-4	5.76E-4	1.60E-6	1.55E-3	8.84E-2
Total	0.00 E-0	8.24E-1	9.59E-2	8.67E-4	8.18E-4	3.73E-6	1.86E-3	9.24E-1

ภาคผนวก ข 1.2 ตารางแสดงการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของฟีนอลวิธี โทลูอีน ออกซิเดชัน

ผลกระทบ \ สาร (Pt)	Phenol	Oxygen	Cumene	Benzene	Propylene	Nitrogen	Water	Heating	Total
Carcinogens	0.00 E-0	1.65E-6	1.54E-5	2.86E-6	2.29E-7	1.07E-6	2.70E-8	2.73E-6	2.4E-5
Resp. organics	1.82E-5	5.26E-9	1.41E-6	7.60E-7	7.31E-7	3.41E-9	6.95E-11	5.84E-7	2.17E-5
Resp. inorganics	0.00 E-0	1.14E-5	2.08E-4	1.57E-4	1.28E-4	7.41E-6	8.45E-8	3.89E-5	5.5oE-4
Climate change	2.04E-5	4.70E-6	1.16E-4	8.87E-5	7.64E-5	3.05E-6	2.44E-8	3.85E-5	3.48E-4
Radiation	0.00 E-0	3.73E-7	9.18E-7	1.04E-9	0.00 E-0	2.42E-7	5.03E-10	0.00 E-0	1.53E-6
Ozone layer	0.00 E-0	1.05E-9	8.52E-9	2.52E-11	0.00 E-0	6.78E-10	1.42E-11	1.64E-7	1.74E-7
Ecotoxicity	0.00 E-0	6.33E-7	4.00E-5	4.04E-5	1.79E-7	4.10E-7	3.20E-8	1.68E-5	9.85E-5
Acidification/ Eutrophication	0.00 E-0	8.82E-7	1.84E-5	1.50E-5	1.17E-5	5.71E-7	4.52E-9	5.22E-6	5.18E-5
Land use	0.00 E-0	3.81E-7	4.66E-6	4.77E-8	0.00 E-0	2.47E-7	6.14E-9	0.00 E-0	5.34E-6
Minerals	0.00 E-0	4.63E-7	3.15E-5	1.57E-7	8.38E-9	3.00E-7	7.74E-8	0.00 E-0	3.25E-5
Fossil fuels	0.00 E-0	4.90E-5	3.74E-3	3.26E-3	3.91E-3	3.18E-5	1.94E-7	5.25E-4	1.15E-2
Total	3.86E-5	6.96E-5	4.17E-3	3.57E-3	4.13E-3	4.51E-5	4.5E-7	6.28E-4	1.26E-2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1. **การกำหนดบทบาท** (Characterization)

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวดัชนีบ่งชี้ (indicator) โดยใช้แฟกเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

$$EP_j = \sum(Q_i x EF_{ij})$$

เมื่อ EP_j (Environmental impact potential) คือค่าศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)

Q_i (Quality of Substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา

EF_{ij} (Equivalency factor) คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j

2. **การจัดกลุ่มและเทียบหน่วย** (Normalization)

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นๆที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = EP_j/(TxER_j)$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environment Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใด

T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

ER_j (Normalization factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี(kg substance equivalent/person/year) ทั้ง 3 ประเภท

3. **การถ่วงค่าน้ำหนัก** (Weighting)

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดให้เป็นคะแนนเดียวกัน

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

เมื่อ WP_j (Weighted Environmental impact Potential) คือ ค่าศักยภาพทางผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญแล้ว

WF_j (Weighting Factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

* หมายเหตุ โดยค่าตัวคูณของค่า ตัวคูณกำหนดบทบาท ค่าตัวคูณการจัดกลุ่มและเทียบหน่วย และค่าตัวคูณถ่วงค่าน้ำหนัก ได้แสดงไว้ดังตาราง ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข ค่า Damage factor ของวิธี Eco-indicator 99

ตาราง ค 1 Damage category Human Health

ตาราง ค 1.1 ประเภทผลกระทบด้านสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogen)

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	1,2-dibromoethane	2.60E-4	DALY/kg
Air	1.2-dichloroethane	2.98E-5	DALY/kg
Air	1.3-butadiene	1.58E-5	DALY/kg
Air	1.4-dioxane	1.39E-7	DALY/kg
Air	2.4.6-trichlorophenol	2.05E-6	DALY/kg
Air	acetaldehyde	2.16E-7	DALY/kg
Air	acrylonitrile	1.69E-5	DALY/kg
Air	alpha-hexachlorocyclohexan	3.00E-4	DALY/kg
Air	Arsenic	2.46E-2	DALY/kg
Air	Bis(chloromethyl)ether	7.48E-3	DALY/kg
Air	benzene	2.50E-6	DALY/kg
Air	benzo(a)anthracene	5.86E-2	DALY/kg
Air	benzo(a)pyrene	3.98E-3	DALY/kg
Air	benzotrichloride	6.60E-3	DALY/kg
Air	benzylchloride	1.04E-5	DALY/kg
Air	beta-chlorocyclohexan	9.99E-5	DALY/kg
Air	bromodichloromethane	8.76E-6	DALY/kg
Air	Cadmium	1.35E-1	DALY/kg
Air	Chromium (VI)	1.75E+0	DALY/kg
Air	di(2-ethylhexyl)phthalate	3.38E-5	DALY/kg
Air	dibenz(a)anthracene	3.10E+1	DALY/kg
Air	dichloromethane	4.36E-7	DALY/kg
Air	Dichlorvos	3.15E-5	DALY/kg
Air	2.3.7.8-TCDD Dioxin	1.79E+2	DALY/kg
Air	epichlorohydrin	3.02E-7	DALY/kg

Air	ethylene oxide	1.83E-4	DALY/kg
Air	formaldehyde	9.91E-7	DALY/kg
Air	gamma-HCH (Lindane)	3.49E-4	DALY/kg
Air	Hexachlorobenzene	8.25E-2	DALY/kg
Air	metals	5.20E-3	DALY/kg
Air	Nickel	2.35E-2	DALY/kg
Air	Nickel-refinery-dust	4.74E-2	DALY/kg
Air	Nickel-subsulfide	9.48E-2	DALY/kg
Air	PAH's	1.70E-4	DALY/kg
Air	particles diesel soot	9.78E-6	DALY/kg
Air	Polychlorobiphenyls	1.97E-3	DALY/kg
Air	pentachlorophenol	7.21E-3	DALY/kg
Air	propyleneoxide	1.17E-5	DALY/kg
Air	styrene	2.44E-8	DALY/kg
Air	perchloroethylene	4.82E-7	DALY/kg
Air	carbontetrachloride	8.38E-4	DALY/kg
Air	chloroform	2.63E-5	DALY/kg
Air	vinyl chloride	2.09E-7	DALY/kg
Water	1.2-dibromoethane	1.24E-3	DALY/kg
Water	1.2-dichloroethane	2.98E-5	DALY/kg
Water	1.3-butadiene	3.37E-4	DALY/kg
Water	1.4-dioxane	9.21E-7	DALY/kg
Water	2.4.6-trichlorophenol	1.05E-5	DALY/kg
Water	acetaldehyde	9.23E-7	DALY/kg
Water	acrylonitrile	4.16E-5	DALY/kg
Water	alpha-hexachlorocyclohexan	6.85E-3	DALY/kg
Water	Arsenic	6.57E-2	DALY/kg
Water	Bis(chloromethyl)ether	1.54E-2	DALY/kg
Water	benzene	4.12E-6	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Water	benzo(a)anthracene	6.58E-1	DALY/kg
Water	benzo(a)pyrene	2.99E+0	DALY/kg
Water	benzotrichloride	9.46E-3	DALY/kg
Water	benzylchloride	1.98E-5	DALY/kg
Water	beta-chlorocyclohexan	5.75E-3	DALY/kg
Water	bromodichloromethane	9.36E-6	DALY/kg
Water	Cadmium	7.12E-2	DALY/kg
Water	Chromium (VI)	3.43E-1	DALY/kg
Water	di(2-ethylhexyl)phthalate	6.64E-4	DALY/kg
Water	dibenz(a)anthracene	4.07E+1	DALY/kg
Water	dichloromethane	4.97E-7	DALY/kg
Water	Dichlorvos	1.17E-5	DALY/kg
Water	dioxins (TEQ)	2.02E+3	DALY/kg
Water	epichloorhydrin	9.90E-7	DALY/kg
Water	ethylene oxide	1.39E-4	DALY/kg
Water	formaldehyde	4.97E-6	DALY/kg
Water	gamma-HCH (Lindane)	4.16E-3	DALY/kg
Water	hexachlorobenzene	1.25E-1	DALY/kg
Water	Nickel	3.11E-2	DALY/kg
Water	Nickel--subsulfide	5.02E-3	DALY/kg
Water	Nickel-refinery-dust	1.00E-2	DALY/kg
Water	PAH's	2.60E-3	DALY/kg
Water	Polychlorobiphenyls	3.91E-2	DALY/kg
Water	pentachlorophenol	2.29E-2	DALY/kg
Water	propylene oxide	1.74E-5	DALY/kg
Water	styrene	1.22E-6	DALY/kg
Water	perchloroethylene	4,72E-7	DALY/kg
Water	carbontetrachloride	8.29E-4	DALY/kg
Water	chloroform	2.60E-5	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Water	vinyl chloride	2.84E-7	DALY/kg
Soil	1,2-dibromoethane (ind.)	3.81E-3	DALY/kg
Soil	1,2-dichloroethane (ind.)	4.58E-4	DALY/kg
Soil	1,3-butadiene (ind.)	1.20E-5	DALY/kg
Soil	1,4-dioxane (ind.)	3.10E-7	DALY/kg
Soil	2,4,6-trichlorophenol (ind.)	2.76E-6	DALY/kg
Soil	acetaldehyde (ind.)	4.77E-7	DALY/kg
Soil	acrylonitrile (ind.)	7.01E-5	DALY/kg
Soil	alpha-hexachlorocyclohexan (agr.)	2.32E-2	DALY/kg
Soil	Arsenic (ind.)	1.32E-2	DALY/kg
Soil	Bis(chloromethyl)ether (ind.)	1.68E-2	DALY/kg
Soil	benzene (ind.)	1.33E-5	DALY/kg
Soil	benzo(a)anthracene (ind.)	1.60E-1	DALY/kg
Soil	benzo(a)pyrene (ind.)	2.06E-3	DALY/kg
Soil	benzotrichloride (ind.)	1.32E-1	DALY/kg
Soil	benzylchloride (ind.)	4.16E-5	DALY/kg
Soil	beta-chlorocyclohexan (agr.)	7.36E-3	DALY/kg
Soil	Bromo dichloromethane (ind.)	7.82E-5	DALY/kg
Soil	Cadmium (ind.)	3.98E-3	DALY/kg
Soil	Chromium (ind.)	2.71E-1	DALY/kg
Soil	di(2-ethylhexyl)phthalate(ind)	3.18E-7	DALY/kg
Soil	dibenz(a)anthracene (ind.)	2.44E+1	DALY/kg
Soil	dichloromethane (ind.)	5.99E-6	DALY/kg
Soil	Dichlorvos (agr.)	2.25E-5	DALY/kg
Soil	2,3,7,8-TCDD Dioxin (ind.)	7.06E+0	DALY/kg
Soil	Epichloorhydrin (ind.)	1.30E-6	DALY/kg
Soil	Ethyleenoxide (ind.)	2.38E-3	DALY/kg
Soil	formaldehyde (ind.)	1.83E-6	DALY/kg
Soil	gamma-HCH (Lindane) (agr.)	8.64E-3	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Soil	Hexa chlorobenzene (ind.)	1.47E-1	DALY/kg
Soil	Nickel (ind.)	3.94E-3	DALY/kg
Soil	Nickel-refinery-dust (ind.)	6.37E-3	DALY/kg
Soil	Nickel-subsulfide (ind.)	1.27E-2	DALY/kg
Soil	PCBs (ind.)	2.04E-2	DALY/kg
Soil	Penta chloorfenol (ind.)	1.26E-5	DALY/kg
Soil	Propylene oxide (ind.)	1.40E-4	DALY/kg
Soil	styrene (ind.)	2.09E-8	DALY/kg
Soil	perchloroethylene (ind.)	6.00E-6	DALY/kg
Soil	carbon tetrachloride (ind.)	3.99E-2	DALY/kg
Soil	chloroform (ind.)	4.12E-6	DALY/kg
Soil	vinyl chloride (ind.)	7.67E-7	DALY/kg

ตาราง ค 1.2 Respiratory effects on humans caused by organic substances

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	1,1,1-trichloroethane	1.96E-8	DALY/kg
Air	1,2,3-trimethyl benzene	2.72E-6	DALY/kg
Air	1,2,4-trimethyl benzene	2.72E-6	DALY/kg
Air	1,3,5-trimethyl benzene	2.98E-6	DALY/kg
Air	1,3-butadiene	1.87E-6	DALY/kg
Air	1-butene	2.30E-6	DALY/kg
Air	1-butoxy propanol	9.36E-7	DALY/kg
Air	1-hexene	1.87E-6	DALY/kg
Air	1-methoxy 2-propanol	7.91E-7	DALY/kg
Air	1-pentene	2.13E-6	DALY/kg
Air	2,2-dimethyl butane	5.19E-7	DALY/kg
Air	2,3-dimethyl butane	1.19E-6	DALY/kg
Air	2-butoxy ethanol	9.36E-7	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	2-ethoxy ethanol	8.34E-7	DALY/kg
Air	2-hexanone	1.19E-6	DALY/kg
Air	2-methoxy ethanol	6.47E-7	DALY/kg
Air	2-methyl 1-butanol	8.51E-7	DALY/kg
Air	2-methyl 1-butene	1.70E-6	DALY/kg
Air	2-methyl 2-butanol	3.06E-7	DALY/kg
Air	2-methyl 2-butene	1.79E-6	DALY/kg
Air	2-methyl hexane	8.51E-7	DALY/kg
Air	2-methyl pentane	9.36E-7	DALY/kg
Air	2-pentanone	1.19E-6	DALY/kg
Air	3,5-diethyl toluene	2.81E-6	DALY/kg
Air	3,5-dimethyl ethyl benzene	2.81E-6	DALY/kg
Air	3-hexanone	1.28E-6	DALY/kg
Air	3-methyl 1-butanol	8.51E-7	DALY/kg
Air	3-methyl 1-butene	1.45E-6	DALY/kg
Air	3-methyl 2-butanol	7.91E-7	DALY/kg
Air	3-methyl hexane	7.83E-7	DALY/kg
Air	3-methyl pentane	1.02E-6	DALY/kg
Air	3-pentanol	9.36E-7	DALY/kg
Air	3-pentanone	8.51E-7	DALY/kg
Air	acetaldehyde	1.36E-6	DALY/kg
Air	acetic acid	2.13E-7	DALY/kg
Air	acetone	2.04E-7	DALY/kg
Air	propionaldehyde	1.70E-6	DALY/kg
Air	alcohols	7.60E-7	DALY/kg
Air	aldehydes	1.40E-6	DALY/kg
Air	alkanes	7.50E-7	DALY/kg
Air	alkenes	2.10E-6	DALY/kg
Air	benzene	4.68E-7	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	butane	7.57E-7	DALY/kg
Air	butanol	1.36E-6	DALY/kg
Air	butene	2.47E-6	DALY/kg
Air	cis 1,2-dichloroethene	9.36E-7	DALY/kg
Air	cis 2-butene	2.47E-6	DALY/kg
Air	cis 2-hexene	2.30E-6	DALY/kg
Air	cis 2-pentene	2.38E-6	DALY/kg
Air	CxHy aromatic	2.10E-6	DALY/kg
Air	CxHy chloro	3.50E-7	DALY/kg
Air	CxHy halogenated	3.50E-7	DALY/kg
Air	cyclohexane	6.21E-7	DALY/kg
Air	cyclohexanol	9.36E-7	DALY/kg
Air	cyclohexanone	6.47E-7	DALY/kg
Air	decane	8.26E-7	DALY/kg
Air	di-i-propyl ether	1.02E-6	DALY/kg
Air	diacetone alcohol	5.62E-7	DALY/kg
Air	dichloromethane	1.45E-7	DALY/kg
Air	diethyl ether	1.02E-6	DALY/kg
Air	dimethyl ether	3.74E-7	DALY/kg
Air	dodecane	7.66E-7	DALY/kg
Air	esters	3.70E-7	DALY/kg
Air	ethane	2.64E-7	DALY/kg
Air	ethane diol	8.26E-7	DALY/kg
Air	ethanol	8.34E-7	DALY/kg
Air	ethene	2.13E-6	DALY/kg
Air	ethers	7.40E-7	DALY/kg
Air	ethyl t-butyl ether	4.60E-7	DALY/kg
Air	ethylacetate	4.60E-7	DALY/kg
Air	ethylacetate	4.60E-7	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	ethylbenzene	1.53E-6	DALY/kg
Air	acetylene	1.87E-7	DALY/kg
Air	formaldehyde	1.11E-6	DALY/kg
Air	formic acid	6.89E-8	DALY/kg
Air	heptane	1.11E-6	DALY/kg
Air	hexane	1.02E-6	DALY/kg
Air	i-butane	6.64E-7	DALY/kg
Air	i-butanol	8.09E-7	DALY/kg
Air	i-butyraldehyde	1.11E-6	DALY/kg
Air	i-pentane	8.51E-7	DALY/kg
Air	i-propanol	2.98E-7	DALY/kg
Air	i-propyl acetate	4.60E-7	DALY/kg
Air	i-propyl benzene	1.11E-6	DALY/kg
Air	isoprene	2.38E-6	DALY/kg
Air	ketones	8.70E-7	DALY/kg
Air	m-ethyl toluene	2.21E-6	DALY/kg
Air	m-xylene	2.38E-6	DALY/kg
Air	methane	1.28E-8	DALY/kg
Air	methanol	2.81E-7	DALY/kg
Air	methyl acetate	1.02E-7	DALY/kg
Air	methyl chloride	1.11E-8	DALY/kg
Air	methyl ethyl ketone	8.09E-7	DALY/kg
Air	methyl formate	7.15E-8	DALY/kg
Air	methyl i-butyl ketone	1.02E-6	DALY/kg
Air	methyl i-propyl ketone	7.83E-7	DALY/kg
Air	methyl propene	1.36E-6	DALY/kg
Air	methyl t-butyl ether	3.32E-7	DALY/kg
Air	methyl t-butyl ketone	6.98E-7	DALY/kg
Air	n-butanol	1.36E-6	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	n-butyl acetate	5.19E-7	DALY/kg
Air	n-butyraldehyde	1.70E-6	DALY/kg
Air	n-propanol	1.19E-6	DALY/kg
Air	n-propyl acetate	6.21E-7	DALY/kg
Air	n-propyl benzene	1.36E-6	DALY/kg
Air	neopentane	3.74E-7	DALY/kg
Air	NMVOC	1.28E-6	DALY/kg
Air	nonane	8.51E-7	DALY/kg
Air	o-ethyl toluene	1.96E-6	DALY/kg
Air	o-xylene	2.30E-6	DALY/kg
Air	octane	9.36E-7	DALY/kg
Air	p-ethyl toluene	1.96E-6	DALY/kg
Air	p-xylene	2.21E-6	DALY/kg
Air	pentanal	1.62E-6	DALY/kg
Air	pentane	8.51E-7	DALY/kg
Air	propane	3.83E-7	DALY/kg
Air	propane diol	1.02E-6	DALY/kg
Air	propene	2.38E-6	DALY/kg
Air	propanoic acide	3.23E-7	DALY/kg
Air	s-butanol	8.51E-7	DALY/kg
Air	s-butyl acetate	5.79E-7	DALY/kg
Air	t-butanol	2.64E-7	DALY/kg
Air	t-butyl acetate	1.36E-7	DALY/kg
Air	perchloroethylene	6.21E-8	DALY/kg
Air	toluene	1.36E-6	DALY/kg
Air	trans 1,2-dichloroethene	8.43E-7	DALY/kg
Air	trans 2-butene	2.47E-6	DALY/kg
Air	trans 2-hexene	2.30E-6	DALY/kg
Air	trans 2-pentene	2.38E-6	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	trichloroethylene	6.98E-7	DALY/kg
Air	chloroform	4.94E-8	DALY/kg
Air	undecane	8.26E-7	DALY/kg
Air	VOC	6.46E-7	DALY/kg
Air	xylene	2.21E-6	DALY/kg

ตาราง ค 1.3 Respiratory effects on humans caused by inorganic substances

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	ammonia	8.50E-5	DALY/kg
Air	dust (PM10)	3.75E-4	DALY/kg
Air	dust (PM2.5)	7.00E-4	DALY/kg
Air	TSP	1.10E-4	DALY/kg
Air	NO	1.37E-4	DALY/kg
Air	NO2	8.87E-5	DALY/kg
Air	NOx	8.87E-5	DALY/kg
Air	NOx (as NO2)	8.87E-5	DALY/kg
Air	SO2	5.46E-5	DALY/kg
Air	SO3	4.37E-5	DALY/kg
Air	SOx	5.46E-5	DALY/kg
Air	SOx (as SO2)	5.46E-5	DALY/kg

ตาราง ค 1.4 Damages to human health caused by climate change

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	methyl chloroform	-4.30E-5	DALY/kg
Air	perfluorethane	2.00E-3	DALY/kg
Air	trifluoroiodomethane	2.10E-7	DALY/kg
Air	perfluormethane	1.40E-3	DALY/kg
Air	CFC-11	2.20E-4	DALY/kg
Air	CFC-113	6.30E-4	DALY/kg

Air	CFC-12	1.40E-3	DALY/kg
Air	carbon dioxide	2.10E-7	DALY/kg
Air	methylene chloride	1.90E-6	DALY/kg
Air	HALON-1301	-7.10E-3	DALY/kg
Air	HCFC-123	6.60E-6	DALY/kg
Air	HCFC-124	8.50E-5	DALY/kg
Air	HCFC-141b	5.20E-5	DALY/kg
Air	HCFC-142b	3.40E-4	DALY/kg
Air	HCFC-22	2.80E-4	DALY/kg
Air	HFC-125	5.70E-4	DALY/kg
Air	HFC-134	2.10E-4	DALY/kg
Air	HFC-134a	2.70E-4	DALY/kg
Air	HFC-143	6.30E-5	DALY/kg
Air	HFC-143a	7.80E-4	DALY/kg
Air	HFC-152a	2.90E-5	DALY/kg
Air	HFC-227ea	5.90E-4	DALY/kg
Air	HFC-23	2.60E-3	DALY/kg
Air	HFC-236fa	1.40E-3	DALY/kg
Air	HFC-245ca	1.20E-4	DALY/kg
Air	HFC-32	1.40E-4	DALY/kg
Air	HFC-41	3.10E-5	DALY/kg
Air	HFC-4310mee	2.70E-4	DALY/kg
Air	methane	4.40E-6	DALY/kg
Air	nitrous oxide	6.90E-5	DALY/kg
Air	perfluorbutane	1.50E-3	DALY/kg
Air	perfluorcyclobutane	1.90E-3	DALY/kg
Air	perfluorhexane	1.60E-3	DALY/kg
Air	perfluorpentane	1.70E-3	DALY/kg
Air	perfluorpropane	1.50E-3	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	sulphur hexafluoride	5.30E-03	DALY/kg
Air	carbontetrachloride	-2.60E-04	DALY/kg
Air	chloroform	8.30E-07	DALY/kg

ตาราง ค 1.5 Human health effects caused by ionising radiation

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	C-14	2.10E-10	DALY/kg
Air	Co-58	4.30E-13	DALY/kg
Air	Co-60	1.60E-11	DALY/kg
Air	Cs-134	1.20E-11	DALY/kg
Air	Cs-137	1.30E-11	DALY/kg
Air	H-3	1.40E-14	DALY/kg
Air	I-129	9.40E-10	DALY/kg
Air	I-131	1.60E-13	DALY/kg
Air	I-133	9.40E-15	DALY/kg
Air	Kr-85	1.40E-16	DALY/kg
Air	Pb-210	1.50E-12	DALY/kg
Air	Po-210	1.50E-12	DALY/kg
Air	Pu alpha	8.30E-11	DALY/kg
Air	Pu-238	6.70E-11	DALY/kg
Air	Ra-226	9.10E-13	DALY/kg
Air	Rn-222	2.40E-14	DALY/kg
Air	Th-230	4.50E-11	DALY/kg
Air	U-234	9.70E-11	DALY/kg
Air	U-235	2.10E-11	DALY/kg
Air	U-238	8.20E-12	DALY/kg
Air	Xe-133	1.40E-16	DALY/kg
Water	Ag-110m	5.10E-13	DALY/kg
Water	Co-58	4.10E-14	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Water	Co-60	4.40E-11	DALY/kg
Water	Cs-134	1.40E-10	DALY/kg
Water	Cs-137	1.70E-10	DALY/kg
Water	H-3	4.50E-16	DALY/kg
Water	I-131	5.00E-13	DALY/kg
Water	Mn-54	3.10E-13	DALY/kg
Water	Ra-226	1.30E-13	DALY/kg
Water	Sb-124	8.20E-13	DALY/kg
Water	U-234	2.40E-12	DALY/kg
Water	U-235	2.30E-12	DALY/kg
Water	U-238	2.30E-12	DALY/kg

ตาราง ค 1.6 Human health effects caused by ozone layer depletion

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	1,1,1-trichloroethane	1.26E-04	DALY/kg
Air	CFC-11	1.05E-03	DALY/kg
Air	CFC-113	9.48E-04	DALY/kg
Air	CFC-114	8.95E-04	DALY/kg
Air	CFC-115	4.21E-04	DALY/kg
Air	CFC-12	8.63E-04	DALY/kg
Air	HALON-1201	1.47E-03	DALY/kg
Air	HALON-1202	1.32E-03	DALY/kg
Air	HALON-1211	5.37E-03	DALY/kg
Air	HALON-1301	1.26E-02	DALY/kg
Air	HALON-2311	1.47E-04	DALY/kg
Air	HALON-2401	2.63E-04	DALY/kg
Air	HALON-2402	7.37E-03	DALY/kg
Air	HCFC-123	1.47E-05	DALY/kg
Air	HCFC-124	3.16E-05	DALY/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	HCFC-141b	1.05E-04	DALY/kg
Air	HCFC-142b	5.26E-05	DALY/kg
Air	HCFC-22	4.21E-05	DALY/kg
Air	HCFC-225ca	2.11E-05	DALY/kg
Air	HCFC-225cb	2.11E-05	DALY/kg
Air	methyl bromide	6.74E-04	DALY/kg
Air	methyl chloride	2.11E-05	DALY/kg
Air	carbontetrachloride	1.26E-03	DALY/kg

ตาราง ค 2 Damage category Ecosystem Quality

ตาราง ค 2.1 Damage to Ecosystem Quality caused by ecotoxic emissions

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	1,2,3-trichlorobenzene	3.51E-02	PDF/kg
Air	1,2,4-trichlorobenzene	2.54E-02	PDF/kg
Air	1,3,5-trichlorobenzene	1.29E-01	PDF/kg
Air	2,4-D	1.46E+00	PDF/kg
Air	Arsenic	5.92E+02	PDF/kg
Air	Atrazine	2.09E+02	PDF/kg
Air	Azinphos-methyl	1.10E+04	PDF/kg
Air	Bentazon	7.33E+00	PDF/kg
Air	benzene	2.75E-03	PDF/kg
Air	benzo(a)pyrene	1.42E+02	PDF/kg
Air	Carbendazim	2.40E+03	PDF/kg
Air	Cadmium	9.65E+03	PDF/kg
Air	Chromium	4.13E+03	PDF/kg
Air	Copper	1.46E+03	PDF/kg
Air	di(2-ethylhexyl)phthalate	1.94E-03	PDF/kg
Air	dibutylphthalate	1.13E-01	PDF/kg
Air	Dichlorvos	1.61E+00	PDF/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Air	2,3,7,8-TCDD Dioxin	1.32E+05	PDF/kg
Air	Diquat-dibromide	2.39E+03	PDF/kg
Air	Diuron	4.43E+03	PDF/kg
Air	DNOC	8.19E+00	PDF/kg
Air	fentin acetate	6.77E+02	PDF/kg
Air	fluoranthene	4.37E-02	PDF/kg
Air	gamma-HCH (Lindane)	2.16E+00	PDF/kg
Air	Hexachlorobenzene	3.88E+01	PDF/kg
Air	Mercury	8.29E+02	PDF/kg
Air	Malathion	1.17E+02	PDF/kg
Air	Maneb	3.84E+01	PDF/kg
Air	Mecoprop	7.79E-02	PDF/kg
Air	Metabenzthiazuron	3.07E+02	PDF/kg
Air	metals	2.60E+02	PDF/kg
Air	Metamitron	3.78E+01	PDF/kg
Air	Metribuzin	4.92E+02	PDF/kg
Air	Mevinphos	2.13E+03	PDF/kg
Air	Monolinuron	1.06E+02	PDF/kg
Air	Nickel	7.10E+03	PDF/kg
Air	PAH's	7.80E-04	PDF/kg
Air	Parathion	6.05E+01	PDF/kg
Air	Lead	2.54E+03	PDF/kg
Air	Polychlorobiphenyls	8.07E+01	PDF/kg
Air	pentachlorophenol	1.33E+01	PDF/kg
Air	Simazine	1.44E+03	PDF/kg
Air	Thiram	2.26E+02	PDF/kg
Air	toluene	2.40E-04	PDF/kg
Air	Trifluralin	1.09E+00	PDF/kg
Air	Zinc	2.89E+03	PDF/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Water	1,2,3-trichlorobenzene	1.56E-01	PDF/kg
Water	1,2,4-trichlorobenzene	1.39E-01	PDF/kg
Water	1,3,5-trichlorobenzene	2.73E-01	PDF/kg
Water	2,4-D	7.56E-02	PDF/kg
Water	Arsenic	1.14E+01	PDF/kg
Water	Atrazine	5.06E+01	PDF/kg
Water	Azinphos-methyl	8.87E+02	PDF/kg
Water	Bentazon	5.81E-02	PDF/kg
Water	benzene	4.80E-02	PDF/kg
Water	benzo(a)pyrene	3.68E+01	PDF/kg
Water	Carbendazim	1.63E+02	PDF/kg
Water	Cadmium	4.80E+02	PDF/kg
Water	Chromium	6.87E+01	PDF/kg
Water	Copper	1.47E+02	PDF/kg
Water	di(2-ethylhexyl)phthalate	6.37E-01	PDF/kg
Water	dibutylphthalate	1.62E+00	PDF/kg
Water	Dichlorvos	1.81E-01	PDF/kg
Water	dioxins (TEQ)	1.87E+05	PDF/kg
Water	Diquat-dibromide	1.18E+02	PDF/kg
Water	Diuron	2.31E+02	PDF/kg
Water	DNOC	6.73E-01	PDF/kg
Water	fentin acetate	7.85E+02	PDF/kg
Water	fluoranthene	3.96E+00	PDF/kg
Water	gamma-HCH (Lindane)	1.04E+01	PDF/kg
Water	hexachlorobenzene	4.55E+01	PDF/kg
Water	Mercury	1.97E+02	PDF/kg
Water	Malathion	1.64E+02	PDF/kg
Water	Maneb	6.23E-01	PDF/kg
Water	Mecoprop	1.35E-02	PDF/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Water	Metabenzthiazuron	1.43E+01	PDF/kg
Water	Metamitron	3.77E-01	PDF/kg
Water	Metribuzin	3.18E+00	PDF/kg
Water	Mevinphos	6.73E+01	PDF/kg
Water	Monolinuron	1.04E+01	PDF/kg
Water	Nickel	1.43E+02	PDF/kg
Water	PAH's	2.10E-03	PDF/kg
Water	Parathion	2.48E+02	PDF/kg
Water	Lead	7.39E+00	PDF/kg
Water	Polychlorobiphenyls	2.58E+02	PDF/kg
Water	pentachlorophenol	2.51E+01	PDF/kg
Water	Simazine	6.03E+01	PDF/kg
Water	Thiram	8.74E+02	PDF/kg
Water	toluene	1.73E-01	PDF/kg
Water	Trifluralin	7.80E+01	PDF/kg
Water	Zinc	1.63E+01	PDF/kg
Soil	1,2,3-trichlorobenzene (ind.)	2.41E+00	PDF/kg
Soil	1,2,4-trichlorobenzene (ind.)	2.26E+00	PDF/kg
Soil	1,3,5-trichlorobenzene (ind.)	1.19E+00	PDF/kg
Soil	2,4-D (agr.)	1.27E-04	PDF/kg
Soil	Arsenic (ind.)	6.10E+02	PDF/kg
Soil	Atrazine (agr.)	1.49E-01	PDF/kg
Soil	Azinphos-methyl (agr.)	3.55E-01	PDF/kg
Soil	Bentazon (agr.)	1.66E-02	PDF/kg
Soil	benzene (ind.)	4.97E-01	PDF/kg
Soil	benzo(a)pyrene (ind.)	7.25E+03	PDF/kg
Soil	Carbendazim (agr.)	2.34E+00	PDF/kg
Soil	Cadmium (agr.)	3.01E+01	PDF/kg
Soil	Cadmium (ind.)	9.94E+03	PDF/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Soil	Chromium (ind.)	4.24E+03	PDF/kg
Soil	Copper (ind.)	1.50E+03	PDF/kg
Soil	di(2-ethylhexyl)phthalate(ind)	2.67E-02	PDF/kg
Soil	dibutylphthalate (ind.)	1.14E+00	PDF/kg
Soil	Dichlorvos (agr.)	7.52E-04	PDF/kg
Soil	2,3,7,8-TCDD Dioxin (ind.)	2.09E+05	PDF/kg
Soil	Diquat-dibromide (agr.)	6.84E-02	PDF/kg
Soil	Diuron (agr.)	4.07E-02	PDF/kg
Soil	DNOC (agr.)	6.17E-03	PDF/kg
Soil	fentin acetate (agr.)	3.84E-01	PDF/kg
Soil	fluoranthene (ind.)	8.00E+00	PDF/kg
Soil	gamma-HCH (Lindane) (agr.)	1.38E+00	PDF/kg
Soil	hexachlorobenzene (ind.)	9.96E+01	PDF/kg
Soil	Mercury (ind.)	1.68E+03	PDF/kg
Soil	Malathion (agr.)	2.79E-02	PDF/kg
Soil	Maneb (agr.)	2.61E-01	PDF/kg
Soil	Mecoprop (agr.)	2.79E-06	PDF/kg
Soil	Metabenzthiazuron (agr.)	3.15E-01	PDF/kg
Soil	Metamitron (agr.)	2.03E-04	PDF/kg
Soil	Metribuzin (agr.)	4.91E-02	PDF/kg
Soil	Mevinphos (agr.)	2.09E-01	PDF/kg
Soil	Monolinuron (agr.)	4.38E-01	PDF/kg
Soil	Nickel (ind.)	7.32E+03	PDF/kg
Soil	Parathion (agr.)	3.24E-02	PDF/kg
Soil	Lead (ind.)	1.29E+01	PDF/kg
Soil	PCBs (ind.)	8.35E+02	PDF/kg
Soil	pentachloorfenol (ind.)	2.51E+01	PDF/kg
Soil	Simazine (agr.)	3.87E-01	PDF/kg
Soil	Thiram (agr.)	9.96E-01	PDF/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Soil	toluene (ind.)	6.79E-02	PDF/kg
Soil	Trifluralin (agr.)	2.07E-02	PDF/kg
Soil	Zinc (ind.)	2.98E+03	PDF/kg

ตาราง ค 2.2 Damage to Ecosystem Quality caused by the combined effect of acidification and eutrophication

Com-part-ment	Substances	Damage factor	unit
Air	ammonia	15.57	PDF/kg
Air	NO	8.789	PDF/kg
Air	NO2	5.713	PDF/kg
Air	NOx	5.713	PDF/kg
Air	NOx (as NO2)	5.713	PDF/kg
Air	SO2	1.041	PDF/kg
Air	SO3	0.8323	PDF/kg
Air	SOx	1.041	PDF/kg
Air	SOx (as SO2)	1.041	PDF/kg
water	NH4+	18.9	PDF/kg
water	sulfate	0.694	PDF/kg

ตาราง ค 2.3 Damage to Ecosystem Quality caused by land occupation and land conversion

Land-occupation	Damage factor	unit
land use II-III	0.51	PDF/m^2a
land use II-IV	0.96	PDF/m^2a
land use III-IV	0.96	PDF/m^2a
land use IV-IV	1.15	PDF/m^2a
Occup. as Contin. urban land	1.15	PDF/m^2a
Occup. as Convent. arable land	1.15	PDF/m^2a

Occup. as Discont. urban land	0.96	PDF/m^2a
Occup. as Forest land	0.11	PDF/m^2a
Occup. as Green urban land	0.84	PDF/m^2a
Occup. as Industrial area	0.84	PDF/m^2a
Occup. as Intens. meadow land	1.13	PDF/m^2a
Occup. as Organic arable land	1.09	PDF/m^2a
Occup. as organic meadow land	1.02	PDF/m^2a
Occup. as rail/ road area	0.84	PDF/m^2a
Occup. as Integrated arable land	1.15	PDF/m^2a
Occup. as less intens.meadow land	1.02	PDF/m^2a

Land conversion	Damage factor	unit
Conv. to Continuous urban land	34.53	PDF/m^2a
Conv. to Convent. arable land	34.38	PDF/m^2a
Conv. to Discontinuous urban	28.73	PDF/m^2a
Conv. to Green urban	25.16	PDF/m^2a
Conv. to Industrial area	25.16	PDF/m^2a
Conv. to Integr. arable land	34.38	PDF/m^2a
Conv. to Intensive meadow	34.02	PDF/m^2a
Conv. to Less intensive meadow	30.62	PDF/m^2a
Conv. to Organic arable land	32.73	PDF/m^2a
Conv. to Organic meadow	30.62	PDF/m^2a
Conv. to rail/ road area	25.16	PDF/m^2a

ตาราง ค 3 Damage category Resources

ตาราง ค 3.1 Damage to Resources caused by extraction of minerals (H,A) The unit of damage is MJ surplus energy per kg extracted material.

Minerals	Damage factor	unit
aluminium (in ore)	2.38	MJ surplus/kg
bauxite	0.5	MJ surplus/kg
chromium (in ore)	0.9165	MJ surplus/kg
chromium (ore)	0.275	MJ surplus/kg
copper (in ore)	36.7	MJ surplus/kg
copper (ore)	0.415	MJ surplus/kg
iron (in ore)	0.051	MJ surplus/kg
iron (ore)	0.029	MJ surplus/kg
lead (in ore)	7.35	MJ surplus/kg
lead (ore)	0.368	MJ surplus/kg
manganese (in ore)	0.313	MJ surplus/kg
manganese (ore)	0.141	MJ surplus/kg
mercury (in ore)	165.5	MJ surplus/kg
molybdene (in ore)	41	MJ surplus/kg
molybdenum (ore)	0.041	MJ surplus/kg
nickel (in ore)	16.32	MJ surplus/kg
nickel (ore)	0.245	MJ surplus/kg
tin (in ore)	600	MJ surplus/kg
tin (ore)	0.06	MJ surplus/kg
tungsten (ore)	0.323	MJ surplus/kg
zinc (in ore)	1.885	MJ surplus/kg
zinc (ore)	0.075	MJ surplus/kg

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค 3.2 Damage to Resources caused by extraction of fossil fuels

Fossil fuels	Damage factor	Unit
coal	0.252	MJ surplus/kg
coal ETH	0.155	MJ surplus/kg
crude gas	4.2	MJ surplus/kg
crude oil	5.9	MJ surplus/kg
crude oil (feedstock)	5.9	MJ surplus/kg
crude oil (resource)	1.44E-01	MJ surplus/MJ
crude oil ETH	6.13	MJ surplus/kg
crude oil IDEMAT	6.15	MJ surplus/kg
energy from coal	8.59E-03	MJ surplus/MJ
energy from natural gas	1.50E-01	MJ surplus/MJ
energy from oil	0.144	MJ surplus/MJ
hard coal (resource)	8.59E-03	MJ surplus/MJ
natural gas	4.55	MJ surplus/kg
natural gas (feedstock)	5.25	MJ surplus/m3
natural gas (resource)	1.50E-01	MJ surplus/MJ
natural gas (vol)	5.49	MJ surplus/m3
natural gas ETH	5.25	MJ surplus/m3
oil	6.05	MJ surplus/kg

ตาราง ค 4 Normalization factor และ weighting factor

Damage Category	Normalization	Weighting
Human Health	0.01545 DALY s/pres/yr	300
Ecosystem quality	5130 PDF x m^2 x yr/pres/yr	500
Resources	5951 MJ /pres/yr	200

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิไลวรรณ โพนคำ เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน 2527 สถานที่เกิด จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2549 และในปีการศึกษา 2550 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำเร็จการศึกษาในปี 2553

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย