การประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์

นายสิทธิกร ผลพอตน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SYNTHESIZING TINANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES

Mr.Sitthikorn Pholporthon

สถาบันวิทยบริการ
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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์
โดย	นายสิทธิกร ผลพอตน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วีรวัฒน์ ปัตทวีคงคา)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อมรชัย อาภรณ์วิชานพ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สิทธิกร ผลพอตน : การประเมินวัฏจักรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์. (LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SYNTHESIZING OF TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม; 78 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต พิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบ และขั้นตอนในการสังเคราะห์ เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดประมาณ 5-25 นาโนเมตรจำนวน 25 กรัม โดยศึกษาวิธีโซลเจล 3 วิธีประกอบด้วย วิธีโซลเจล1 (ใช้ไททาเนียมโพรพอกไซด์, ไอโซโพรพานอล และ กรดไนตริกเป็นสารตั้งต้น), วิธีโซลเจล2 (ใช้ไททาเนียมโพรพอกไซด์, ไอโซโพรพานอล, น้ำ และ กรดไนตริก), วิธีโซลเจล3 (ใช้ไททาเนียมโพรพอกไซด์, เอทานอล, น้ำ, กรดไฮโดรคลอริกและ เมทิลเซลลูโลส) และศึกษาวิธีโซลโวเทอร์มอล 3วิธีประกอบด้วย วิธีโซลโวเทอร์มอล1 (ใช้ไททาเนียมบิวทอกไซด์และโทลูอีน), วิธีโซลโวเทอร์มอล2 (ใช้ไททาเนียมโพรพอกไซด์และโทลูอีน), วิธีโซลโวเทอร์มอล3 (ใช้ไททาเนียมโพรพอกไซด์และเอทานอล) ในการประเมินนี้ใช้วิธี Eco-Indicator 95 และ Eco-Indicator 99 และประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0 จากผลการวิจัยพบว่าจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลนั้น วิธีโซลเจล3 จะส่งผลกระทบกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองมาเป็นวิธีโซลเจล1 และวิธีโซลเจล2 โดยที่ผลกระทบของไททาเนียมไดออกไซด์จะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากที่สุด รองลงมาเป็นปัญหาด้านการทำเกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจจากสารอนินทรีย์ ซึ่งขั้นตอนของการสังเคราะห์จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และเมื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอลทั้ง 3 วิธีพบว่าวิธีโซลโวเทอร์มอล3 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงที่สุด รองมาเป็นวิธีโซลโวเทอร์มอล2 วิธีโซลโวเทอร์มอล1 และส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากที่สุด รองลงมาเป็นปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจที่มาจากสารอนินทรีย์ ซึ่งขั้นตอนของการสังเคราะห์จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์พบว่าการสังเคราะห์โดยใช้วิธีโซลเจลจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....สิทธิกร ผลพอตน.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....สุรเทพ เขียวหอม.....

4870512321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD : LIFE CYCLE ASSESSMENT / TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES / ENVIRONMENTAL IMPACTS

SITTHIKORN PHOLPORTON: LIFE CYCLE ASSESSMENT OF SYNTHESIZING TITANIUM DIOXIDE NANOPARTICLES. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAIRIT SATAYAPRASERT, Dr.Ing., THESIS CO-ADVISOR: SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 78 pp.

The objective of this research is to estimate the environmental impacts of the synthesis of titanium dioxide nanoparticles. In this study, Life Cycle Assessment (LCA) is used as an environmental tool. The system boundary is defined to include materials acquisition, transportation and production. The functional unit of this study is 25 g. of TiO_2 nanoparticles produced. Their average size is 5 – 25 nm. Three types of solgel method and three types of solvothermal method of TiO_2 nanoparticles production are investigated. The first solgel method(SG1) uses TTIP, i-propanol and nitric acid as raw materials. The second solgel method(SG2) uses TTIP, i-propanol, water and nitric acid as raw materials. The third solgel method(SG3) use TTIP, ethanol, water, hydrochloric acid and methylcellulose as raw materials. The first solvothermal method(SV1) uses TNB and toluene as raw materials. The second solvothermal method(SV2) uses TTIP and toluene as raw materials. The third solvothermal method(SV3) uses TTIP and ethanol as raw materials. SimaPro®6.0, LCA software tool, with Eco-Indicator 95 and Eco-Indicator 99 methods is used to estimate the environmental impacts. From the results obtained, SG3method has higher environmental impacts than SG1 and SG2 methods. The environmental impacts come mainly from manufacturing phase contributing to climate change and respiration of inorganic substance. Moreover, TiO_2 nanoparticles synthesized by SV3method create environmental problems more than that of SV2 and SV1 methods. The manufacturing phase of TiO_2 production also contributes to climate change and respiration of inorganic substance. Moreover, solgel method creates the environmental impacts lower than that of solvothermal method.

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....Sitthikorn Pholporton.....
Field of study...Chemical Engineering.....Advisor's signature.....Chairit Satayaprasert.....
Academic year .....2006.....Co-advisor's signature...Soorathep Kheawhom.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาระดับปริญญามหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น ผู้เขียนได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และอาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม ที่ได้ให้ความรู้และประสบการณ์ต่างๆ และยังให้เกียรติมาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูงที่กรุณาให้แนวทางในการทำวิจัย และยังให้คำแนะนำปรึกษาอันมีคุณค่าอย่างยิ่ง ตลอดจนช่วยกระตุ้นและให้ความช่วยเหลือตลอดงานวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีและสามารถสำเร็จการศึกษาได้ภายในสองปีการศึกษา

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์, อาจารย์ ดร.อมรชัย อาภรณ์วิชานพ และอาจารย์ ดร.วีรวัฒน์ ปัตทวีคงคา ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำที่มีคุณค่าสำหรับการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณอภิชาติ ไชยชเนตรตี, คุณภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ และสมาชิกห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมวัฏจักรชีวิต (LCE) ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนตลอดการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จไม่ได้ถ้าไม่มี บิดา มารดา คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ ขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความรู้และอบรมสั่งสอน

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในโอกาสต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับความผิดไว้และขออภัยมา ณ โอกาสนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญรูป ..... ญ

สารบัญตาราง ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย 3

1.6 เนื้อหาในแต่ละบท 3

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินวงจรชีวิต 5

2.1.1 ขั้นตอนการประเมินวงจรชีวิต 9

2.1.1.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา 9

2.1.1.2 การจัดทำบัญชีรายการ 11

2.1.1.3 การประเมินผลกระทบ 13

2.1.1.4 การแปรผลและการ 14

2.2 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวงจรชีวิต 15

2.2.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 15

2.2.2 วิธีการประเมินค่าผลกระทบโดยวิธี Eco-Indicator 18

2.3 ไททาเนียมไดออกไซด์ 21

2.3.1 ไททาเนียม 21

2.3.2 ไททาเนียมไดออกไซด์ 21

2.3.3 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร 23

บทที่ หน้า

2.3.4 ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์ 27
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
3.วิธีการดำเนินงานวิจัย 31
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย..... 31
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา..... 31
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 32
4.ผลการวิจัยและวิจารณ์..... 35
4.1 การทำบัญชีรายการ 35
4.1.1 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล 1 35
4.1.2 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล 2 36
4.1.3 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล 3 37
4.1.4 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 1..... 39
4.1.5 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 2..... 39
4.1.6 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 3..... 40
4.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร 42
4.2.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 95..... 42
4.2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 99..... 45
4.2.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยข้อมูลพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 48

บทที่ หน้า

4.2.4 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 95 กับวิธีต่างๆ..... 52

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร.. 55

5.บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 58

รายการอ้างอิง 60

ภาคผนวก 63

ภาคผนวก ก ค่าแฟกเตอร์ของ Eco-Indicator 95 64

ภาคผนวก ข ค่าแฟกเตอร์ของ Eco-Indicator 99 70

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 แสดง Life Cycle Assessment Framework ตามหลักการ ISO 14040, 1997 …….	9
2.2 แสดงโครงสร้างของรูปผลึกอนาเทสและรูปผลึกรูไทล์ ……..……..	22
2.3 แสดงขั้นตอนการเกิด Aerogel…..……	24
2.4 แสดงอุปกรณ์การเตรียมไททาเนียมไดอออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล ……..	25
2.5 แสดงอุปกรณ์การเตรียมไททาเนียมไดอออกไซด์โดยวิธี chemical vapor deposition ……...	26
4.1 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธี SG1……	36
4.2 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธี SG2……	37
4.3 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธี SG3……	38
4.4 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธี SV1……	39
4.5 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธี SV2……	40
4.6 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธี SV3……	41
4.7 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 ……..……	43
4.8 แสดงสัดส่วนของกลุ่มผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 ……....…….……..	44
4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 ..	45
4.10แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99 ……..……	47
4.11แสดงสัดส่วนของกลุ่มผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99……	47
4.12แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้วิธี Eco-Indicator 99 ..	48
4.13แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99……	49
4.14แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 ……..	49

รูป หน้า

4.15แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99 50
4.16แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป กับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99..... 51
4.17แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกของการ สังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธีEco-Indicator 95 .. 53
4.18แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกของการ สังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 กับวิธี IPCC 53
4.19แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดฝนกรดของการสังเคราะห์ ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 54
4.20แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดฝนกรดของการสังเคราะห์ ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้วิธีEco-Indicator 95กับวิธีEDIP.. 55

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงคำจำกัดความย่อของ LCA ในระบบมาตรฐาน ISO 14000 6

2.2 แสดงเครื่องมือสำหรับจัดการและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม 7

2.3 แสดงการเปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต..... 16

2.4 แสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มเป้าหมายที่ถูกทำลาย ประเภทของผลกระทบและสสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ 19

2.5 แสดงค่า Normalization และค่า Weighting สำหรับกลุ่มเป้าหมายหรือลักษณะการทำลาย..... 20

2.6 แสดงคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ 21

2.7 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกต่างๆ 22

4.1 แสดงข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล..... 38

4.2 แสดงข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 41

4.3 แสดงปริมาณของกลุ่มผลกระทบต่างๆของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลและวิธีโซลโวเทอร์มอลโดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 43

4.4 แสดงปริมาณของกลุ่มผลกระทบต่างๆของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลและวิธีโซลโวเทอร์มอลโดยใช้วิธี Eco-Indicator 99..... 46

4.5 แสดงข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยโดยใช้ลิกไนต์ในการผลิต 52

4.6 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีและไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร จำนวน 25กรัม โดยวิธีโซลเจล 56

4.7 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีและไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร จำนวน 25กรัม โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล..... 56

4.8 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีและไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร..... 57

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่สำคัญ และกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นประเทศที่พัฒนาแล้ว หรือกำลังพัฒนา ความเสื่อมโทรม และมลพิษของสิ่งแวดล้อมได้กลายเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับความเป็นความตายหรือเกี่ยวกับความอยู่รอดของมนุษยชาติ เพราะปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมนั้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก ปัญหาดังกล่าวได้แก่ ภาวะโลกร้อน (Global Warming) ซึ่งมีสาเหตุจากปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวการสำคัญ ก็กำลังได้รับความสนใจยิ่ง, การเกิดรูรั่วโอโซน ซึ่งเกิดจากการปล่อยสารพวกไฮโดรคาร์บอน ทำให้จำนวนชั้นโอโซนลดลง ส่งผลให้ความร้อนส่องถึงพื้นโลกได้ง่ายขึ้น ฯลฯ ซึ่งสาเหตุสำคัญที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือ ความเจริญก้าวหน้าและการขยายตัวทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม จากประเด็นดังกล่าวทำให้องค์กรต่างๆ หาแนวทางแก้ไขโดยใช้เครื่องมือที่ช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การใช้เทคโนโลยีสะอาด (Cleaner Technology) เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต รวมถึงลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรม, การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment: EIA), การใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) สำหรับวิเคราะห์หาค่าของประเภทผลกระทบในด้านต่างๆ ที่เกิดจารการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งการประเมินวัฏจักรชีวิตนั้นเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่พิจารณาปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์และสามารถประเมินค่าผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นออกมาเป็นค่าน้ำหนักของผลกระทบนั้นได้อีกด้วย

ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร (Titanium Dioxide Nanoparticles : TiO_2) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ และนิยมนำมาใช้งานมากในหลายอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เครื่องสำอาง, การบำบัดน้ำเสีย ฯลฯ เป็นต้น เนื่องจากมีสมบัติเด่นคือ มีคุณสมบัติสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงที่ดี มีค่าดัชนีหักเหสูง ทึบแสง และไม่เป็นพิษ โดยที่การนำไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรไปใช้ในงานต่างๆ จะขึ้นอยู่กับชนิดของรูปผลึกของไททาเนียม ซึ่งรูปผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์มี 3 แบบ คือ rutile, anatase และ brookite ซึ่งรูปผลึก rutile นั้นมีสมบัติในการหักเหและสะท้อนแสงสูง ทึบแสง และให้สีขาว จึงนิยมนำไปใช้งานหลายอย่างเช่น

นำไปผลิตในอุตสาหกรรมสี การผลิตภัณฑ์ครีมกันแดด และผลิตภัณฑ์กระดาษ เป็นต้น ส่วนรูปผลึก anatase เป็นรูปผลึกที่มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงที่ดี จึงนิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆที่อยู่ในน้ำ อากาศ และดิน แต่รูปผลึก brookite จะสังเคราะห์ได้ยาก และพบได้น้อยในธรรมชาติ จึงไม่นิยมนำมาใช้ในใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรมีหลายวิธี ได้แก่ sol-gel method, solvothermal method, glycothermal method, hydrothermal method, chemical vapor deposition, spray pyrolysis ซึ่งแต่ละวิธีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี sol-gel method และวิธี solvothermal method เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เพราะสามารถเตรียมได้ง่าย มีต้นทุนในการผลิตต่ำ

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่มีรูปผลึกเป็น anatase ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี sol-gel method และวิธี solvothermal method โดยใช้หลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เพื่อพิจารณาถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์แต่ละวิธี ตั้งแต่การนำสารตั้งต้นมาใช้ ทำให้สามารถเลือกใช้วิธีในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรได้อย่างเหมาะสม โดยใช้ Eco-Indicator 99 เป็นดัชนีวัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และประมวลผลโดยโปรแกรม SimaPro® 6.0

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ใช้หลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
2. เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด
3. เพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงการสังเคราะห์ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี sol-gel method และวิธี solvothermal method เพื่อเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์

ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่เหมาะสม โดยมีขอบเขตตั้งแต่การนำสารตั้งต้นมาใช้จนถึงกระบวนการสังเคราะห์ได้ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ได้ทราบถึงผลกระทบสำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่มีต่อสิ่งแวดล้อม
2. ได้ทราบแนวทางในการปรับปรุงการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
2. ศึกษาประโยชน์และการนำไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรไปใช้
3. ศึกษาวิธีที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
4. หาข้อมูลเชิงปริมาณในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
5. ศึกษาการใช้โปรแกรม SimaPro 6.0 เพื่อประเมินวัฏจักรชีวิตในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
6. ศึกษาผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
7. สรุปผลและจัดทำผลการวิจัย

1.6 เนื้อหาในแต่ละบท

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาสำหรับงานวิจัยนี้ และกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ขอบเขตของงานวิจัยที่ได้ศึกษา วิธีการดำเนินงานวิจัยอย่างคร่าวๆ และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ ต่อมาในบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยอธิบายถึงหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA), ความหมายและคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร, วิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโมตรด้วยวิธีการต่างๆ, การนำไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ, โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต และอธิบายถึงการ

ประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0 สำหรับใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต นอกจากนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆจากวารสารทางวิชาการ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีต่างๆ และการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ และบทที่ 3 อธิบายถึงงานวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา, ขั้นตอนการวิจัย และวิธีที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต หลังจากนั้นในบทที่ 4 เป็นส่วนของผลการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0 ผลจากการคำนวณที่ได้จะแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบผลกระทบด้านต่างๆ ที่เกิดจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร รวมถึงอธิบายและสรุปผลที่เกิดจากการสังเคราะห์ และสุดท้ายเป็นบทที่ 5 จะกล่าวสรุปถึงวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ใดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และเหมาะสมสำหรับขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม รวมถึงข้อเสนอแนะของการทำวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีเครื่องมือสำหรับช่วยในการจัดการและประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมอยู่มากมาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แต่เนื่องจากการประเมินวงจรชีวิตเป็นหลักการที่ได้รับความนิยมและนำไปใช้อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เพราะสามารถนำไปใช้พิจารณาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นผลมาจากการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าเครื่องมือชนิดอื่น และยังสามารถประเมินหาโอกาสที่จะปรับปรุงเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการประเมินวงจรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร (Titanium Dioxide Nanoparticles :TiO2) ที่ผลิตขึ้นเพื่อพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร ทำให้สามารถเลือกวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.1 การประเมินวงจรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA)

การประเมินวงจรชีวิต (LCA) เป็นเทคนิคในการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตลอดอายุ (cradle to grave) ของผลิตภัณฑ์ นั้นๆ เริ่มตั้งแต่วัตถุดิบ พลังงาน การขนส่ง การผลิตผลิตภัณฑ์ การใช้งาน และการจัดการกับผลิตภัณฑ์ที่หมดอายุ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการพิจารณาทุกกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นว่ามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามลักษณะกลุ่มเป้าหมายคือ การใช้ทรัพยากร สุขภาพของมนุษย์ และผลกระทบต่อระบบนิเวศหรือไม่ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปพิจารณาเพื่อประเมินโอกาสที่จะปรับปรุงการผลิตผลิตภัณฑ์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยลง

หลักการ LCA ได้รับความนิยมจากหลากหลายประเทศในยุโรปตั้งแต่ปี 1980 ทำให้องค์กรอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นำหลักการของ LCA มาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะหาหนทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

LCA เป็นหลักการทำงานส่วนหนึ่งที่ถูกบรรจุอยู่ใน International Standard for Organization (ISO) 14000 ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม (Environmental Management Standard) อนุกรมของ ISO14000 ที่เกี่ยวข้องกับ LCA เป็นดังนี้คือ

- International Standard ISO 14040 (1997) on principles and framework.
- International Standard ISO 14041 (1998) on goal and scope definition and inventory analysis.

- International Standard ISO 14042 (2000) on life cycle impact assessment.
- International Standard ISO 14043 (2000) on life cycle interpretation.

ตารางที่ 2.1 แสดงคำจำกัดความย่อของ LCA ในระบบมาตรฐาน ISO 14000

Standard	Focus
ISO 14040 **Environmental management** - Life cycle assessment - Principles and framework	การแนะนำสู่โครงร่าง หลักการและข้อกำหนดสำหรับการศึกษา LCA โดยเฉพาะการแนะนำในเรื่องการพิจารณาถึงความสำคัญในการศึกษา LCA
ISO 14041 **Environmental management** - Life cycle assessment - Goal and scope definition and life-cycle inventory analysis	คำแนะนำในการทำ Life cycle Inventory ให้คำจัดกัดความของเป้าหมาย กำหนดขอบเขต ระบบผลิตภัณฑ์ การเก็บข้อมูลและการส่งผลของรายงาน
ISO 14042 **Environmental management** - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment	คำแนะนำเรื่องโครงสร้างของผลของการเก็บข้อมูลเพื่อความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์กับระบบผลิตภัณฑ์ที่กำลังศึกษาอยู่
ISO 14043 **Environmental management** - Life cycle assessment - Life cycle interpretation	คำแนะนำถึงการแปลผลจากการเก็บข้อมูล LCA และการศึกษา LCA
ISO TR 14049 (technical report, not a standard)	แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการขอทำ ISO 14041

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงเครื่องมือสำหรับจัดการและประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

เครื่องมือ	LCA (Life Cycle Assessment)	RA (Risk Assessment)	EIA (environmental Impact Assessment)	EPE (Environmental Performance Evaluation)
วัตถุประสงค์รวม	- เพื่อทำความเข้าใจในโครงสร้างทางสิ่งแวดล้อมของระบบ - เพื่อระบุลำดับในการปรับปรุง	เพื่อประเมินผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับสถานการณ์ที่เป็นอันตราย	เพื่อประเมินผลกระทบด้านบวกและด้านลบ ต่อสิ่งแวดล้อมของโครงการในอนาคต	เพื่อจัดหาข้อมูลที่เชื่อถือและพิสูจน์ได้เกี่ยวกับสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมขององค์กร
ข้อดี	- พิจารณาผลกระทบทั้งระดับโลกและระดับภูมิภาค - สะดวกในการพิจารณาผลกระทบสู่สังคม	ประเมินผลกระทบระดับพื้นที่และภูมิภาคต่อเป้าหมายเฉพาะ	- ประเมินผลกระทบทั้งด้านบวกและด้านลบ - พิจารณาผลกระทบของโครงการในระดับพื้นที่	มีการวัดสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์โดยตรงกับนโยบายและเป้าหมาย
ข้อเสีย	ไม่ได้พิจารณาถึงเรื่องเวลา	- ไม่ได้พิจารณาตลอดวงจรชีวิต - ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณการใช้ทรัพยากร	ยากต่อการวิเคราะห์ผลกระทบระดับโลก ภูมิภาคและตลอดวงจรชีวิต	ให้ความสัมพันธ์ที่ไม่สมบูรณ์ในการวัดสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อม
ผู้ใช้, อุตสาหกรรม	- มุ่งเน้นในการปรับปรุง - กลยุทธ์ในการวางแผนระยะยาว	เพื่อตรวจสอบการยอมรับของความเสี่ยง	- เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการทางกฎหมาย - ชี้วัดความต้องการในการ	- เพื่อวัดสมรรถนะทางสิ่งแวดล้อมและการปรับปรุง - เพื่อชี้วัดกลยุทธ์โอกาสทาง

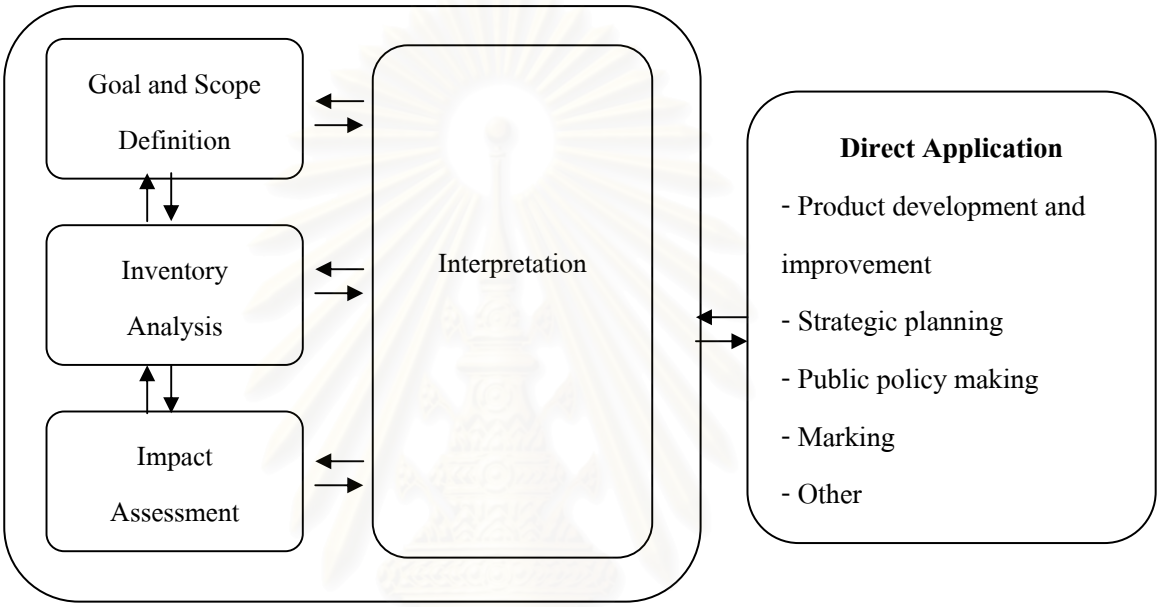
	- ติดต่อสื่อสาร		เปลี่ยน	ธุรกิจ
หน่วยงานรัฐ	ใช้สนับสนุนการคิดแบบครบวงจร	เพื่ออธิบายสถานการณ์ที่ยอมรับได้ในการจัดสรรลำดับทรัพยากรให้เป็นไปตามข้อกำหนดกฎหมาย	เป็นเหมือนข้อมูลเข้าเพื่อช่วยในการตัดสินใจในการยอมรับแผนโครงการ	เพื่อติดตามความก้าวหน้า
หน่วยงานเอกชน	ใช้สนับสนุนการคิดแบบครบวงจร แต่ยังมีข้อสงสัยในการประยุกต์ใช้	เพื่อคัดค้านการยอมรับสถานการณ์ที่เป็นอันตราย	เพื่อคัดค้านการยอมรับต่อแผนโครงการ	ไม่ได้นำไปใช้
เป้าหมายของการวิเคราะห์	ผลิตภัณฑ์หรือการบริการ	สถานการณ์ความเป็นพิษ	แผนสร้างโครงการ โดยทั่วไปเป็นโครงการก่อสร้าง	กิจกรรมต่างๆขององค์กร
การจำกัดพื้นที่	ไม่จำกัด	จำกัดเขตหรือพื้นที่	จำกัดเขตหรือพื้นที่	จำกัดกิจกรรมในองค์กร
พิจารณาผลกระทบทางด้านใด	ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมจากการใช้ทรัพยากรและของเสียที่เกิดขึ้น	ผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และเป้าหมายทางสิ่งแวดล้อม	ผลกระทบทั้งหมดของโครงการต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่	ผลกระทบที่สัมพันธ์กับกิจกรรมขององค์กร
การแปลผล	การประเมินผลกระทบ	เปรียบเทียบกับมาตรฐานที่ยอมรับได้	ต้นทุนและกำไรทางสิ่งแวดล้อม	ระบุการชี้วัดที่ตรงกับปัญหาของสมรรถนะ
การเปรียบเทียบ	หน่วยหน้าที่	สถานการณ์ที่ต้องการ การเปรียบเทียบ	โครงการ	หน่วยการทำงาน

ที่มา : SETAC – Europe Working Group, 2003

2.1.1 ขั้นตอนการประเมินวงจรชีวิต

การประเมินวงจรชีวิตประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and Scope Definition)
2. การจัดทำบัญชีรายการ (Inventory Analysis)
3. การประเมินผลกระทบ (Impact Assessment)
4. การแปลผลและการตีความ (Interpretation)



รูปที่ 2.1 Life Cycle Assessment Framework ตามหลักการ ISO 14040, 1997

2.1.1.1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and Scope Definition)

ขั้นตอนแรกของการประเมินวงจรชีวิตคือการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะในส่วนของวิธีทำ LCA ขึ้นอยู่กับการกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนนี้จะประกอบไปด้วยประเด็นที่สำคัญดังนี้คือ

- **การกำหนดเป้าหมายของการศึกษา (Goal)**

ขั้นตอนแรกของการศึกษาคือการตั้งเป้าหมาย ซึ่งแสดงถึงเหตุผลของการศึกษา และการนำผลการศึกษาไปใช้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดเป้าหมายของการศึกษาอย่างชัดเจน นอกจากนี้ควรประเมินว่าวิธีการวิเคราะห์วิธีใดสามารถใช้ในการศึกษาได้บ้าง เนื่องจากการนำผลการวิเคราะห์ไปใช้อย่างผิดไม่ถูกต้องจะนำไปสู่การสรุปที่ไม่ถูกต้อง

- **การกำหนดขอบเขตของการศึกษา (Scope)**

การกำหนดขอบเขตเป็นกำหนดความกว้างของการศึกษา กล่าวคือเป็นการบ่งชี้และกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินและจำกัดรวบรวมสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อเป้าหมายของการศึกษา การกำหนดขอบเขตของการศึกษาควรจะมีการอธิบายหรือกำหนดอย่างเพียงพอ เพื่อให้แน่ใจว่ารายละเอียดในการศึกษามีความเกี่ยวข้องและเพียงพอต่อเป้าหมายที่กำหนดไว้

วัตถุประสงค์ของการกำหนดขอบเขตคือ การบ่งชี้และกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินและจำกัดรวบรวมสิ่งที่ประโยชน์ต่อเป้าหมายของ LCA ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- การกำหนดสิ่งที่จะศึกษารวมทั้งกำหนดหน่วยหน้าที่
- การเลือกระบบอ้างอิง หรือผลิตภัณฑ์อ้างอิงเพื่อแสดงให้เห็นถึงวัตถุประสงค์ของการศึกษา
- การออกแบบตัวแปร (Parameter) ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายของ LCA
- บ่งชี้กระบวนการผลิตที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อมในระบบผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับเป้าหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต
- การกำหนดขอบเขตของเวลา สำหรับการตัดสินใจที่จะใช้ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของ LCA รวมทั้งกำหนดเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในระบบผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการประเมินทางสิ่งแวดล้อมมาแล้ว
- การจัดสรรการแลกเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์

- **การกำหนดหน่วยหน้าที่ (Functional Unit)**

หน่วยหน้าที่เป็นพื้นฐานหรือตัวอ้างอิงสำหรับจัดเก็บข้อมูลขาเข้าและขาออกของระบบ หน่วยหน้าที่ของระบบควรมีการระบุอย่างชัดเจน, สามารถวัดค่าได้ และตั้งให้อยู่บนพื้นฐานของหน้าที่เดียวกัน ซึ่งการกำหนดหน่วยหน้าที่สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบวงจรชีวิตของหลายผลิตภัณฑ์ได้

เกณฑ์มาตรฐานที่ใช้กำหนดหน่วยหน้าที่ประกอบด้วยประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ความคงทน และคุณสมบัติพื้นฐาน นอกจากนี้เมื่อหน่วยหน้าที่ยังสามารถนำมาเปรียบเทียบระบบที่ต่างกันระหว่างผลิตภัณฑ์หรือหลายผลิตภัณฑ์ที่รวมเป็นผลิตภัณฑ์เดียว ทำให้ข้อมูลปริมาณสารที่เข้าและออกจากระบบตั้งอยู่บนพื้นฐานเดียวกัน ซึ่งหน่วยการทำงานมีได้หลายรูปแบบ เช่น หน้าที่ของรองเท้าหนึ่งคู่ ฯลฯ

- **ขอบเขตของระบบ (System Boundary)**

ขอบเขตของระบบในที่นี้จะแสดงถึงขอบเขตระหว่างผลิตภัณฑ์ (product system) กับสิ่งแวดล้อมหรือกับผลิตภัณฑ์อื่น โดยที่ระบบผลิตภัณฑ์คือ ระบบที่ถูกจำลองขึ้นจากกระบวนการย่อย โดยระบบกระบวนการย่อย (unit process) หลายกระบวนการมาเชื่อมต่อกันโดยอาศัยการไหลของผลิตภัณฑ์หรือของเสียที่ต้องนำไปบำบัดของแต่ละกระบวนการย่อยซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยง ดังนั้นในระบบผลิตภัณฑ์ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการย่อย ผังการไหลของทรัพยากร วัตถุดิบหรือพลังงานจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ และผังการไหลของผลิตภัณฑ์หรือของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่างๆออกสู่สิ่งแวดล้อม

- **คุณภาพของข้อมูล (Data Quality)**

คุณภาพของข้อมูลที่ใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการย่อมมีผลต่อคุณภาพของบทสรุปของการประเมินวงจรชีวิตของสิ่งที่สนใจ การระบุคุณภาพของข้อมูลควรครอบคลุมถึงตัวแปรที่สำคัญ เช่น

- ช่วงเวลาของข้อมูล เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลดังกล่าวอยู่ในช่วงเวลาใด และระยะเวลาในการเก็บขอมูลเท่าใด
- ลักษณะที่มาข้อมูล ว่าเป็นข้อมูลจากกระบวนการใด เป็นข้อมูลการผลิตจริงหรือเป็นข้อมูลสถิติ ข้อมูลเป็นตัวแทนของโรงงานเดียวหรือเป็นตัวแทนของภาพรวมอุตสาหกรรม
- ด้านเทคโนโลยีเกี่ยวกับข้อมูล ว่าข้อมูลที่นำมาศึกษาเป็นข้อมูลจากสภาวะการผลิตปกติ ผิดปกติ หรือจากช่วงที่กำลังการผลิตสูงสุด เนื่องจากสิ่งเหล่านี้มีผลต่อการวิเคราะห์ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน

และหากข้อมูลใดต้องใช้สมมติฐานในการวิเคราะห์ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอธิบายสมมติฐานต่างๆที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด เพื่อให้ผู้อ่านผลการศึกษาได้ทราบถึงที่มาของข้อมูล และผลการวิเคราะห์อย่างแท้จริง

2.1.1.2 การจัดทำบัญชีรายการ (Inventory Analysis)

จุดมุ่งหมายของการทำบัญชีรายการก็คือ การเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการที่ได้มีการกำหนดไว้แล้วในขั้นตอนการกำหนดขอบเขต (Scope Definition) รวมทั้งสร้างแบบจำลองของระบบผลิตภัณฑ์ (product system) การคำนวณหาปริมาณของสารขาเข้าและสารขาออกจากระบบผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึง ทรัพยากรและพลังงานที่ใช้ในการหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมนั้นควรจะพิจารณาในประเด็นต่างๆได้แก่ การเก็บรวบรวมข้อมูล การคำนวณ ความถูกต้องของข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลกับระบบย่อย การกำหนดขอบเขตของระบบให้เหมาะสมขึ้น (Refining system boundaries) และการปันส่วน (Allocation) ขั้นตอนต่างๆในการวิเคราะห์บัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น มีดังนี้

- **การคัดเลือกข้อมูล (Data Selection)**

การวิเคราะห์บัญชีรายการจะรวมถึงการคัดเลือกข้อมูลและการจัดการข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การใช้วัตถุดิบ ของเสีย มลพิษที่เกิดขึ้น เป็นต้น ซึ่งเกิดขึ้นจากตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้นๆ

- **การกลั่นกรองขอบเขตของระบบ (Refining System Boundaries)**

หลังจากการเก็บข้อมูลชุดแรกจะต้องมีการกลั่นกรองขอบเขตของระบบ เช่น การตัดสินใจในการเลือกหรือตัดกระบวนการใดออกไป, การตัดสินใจตัดวัตถุดิบบางส่วนออกไปด้วย, การเพิ่มหน่วยการผลิตที่มีส่วนสำคัญในการวิเคราะห์ผล

- **วิธีการคำนวณ (Calculation Procedures)**

การคำนวณผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปหลายโปรแกรมที่สามารถนำมาคำนวณได้ การเลือกโปรแกรมที่นำมาคำนวณผลขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของข้อมูล

- **ความถูกต้องของข้อมูล (Validation of Data)**

การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลต้องดำเนินการในระหว่างการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลหรือคัดเลือกข้อมูลเพื่อปรับปรุงคุณภาพของข้อมูล การตรวจสอบข้อมูลอย่างมีหลักเกณฑ์จะแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงข้อมูลหรือข้อมูลนั้นมีความใกล้เคียงกับกระบวนการอื่นๆ

- **การจัดสรรข้อมูล (Allocation)**

การประเมินวงจรชีวิตของระบบที่มีความซับซ้อน อาจจะต้องมีการเพิ่มขอบเขตของระบบหรือจัดสรรผลกระทบของสิ่งแวดล้อมที่ตรงกับปัญหาที่ศึกษา เพื่อให้ครอบคลุมผลกระทบและผลที่ได้จากขอบเขตของระบบทั้งหมด

2.1.1.3 การประเมินผลกระทบ (Impact Assessment)

ISO (International Standard for Organization) ได้นิยามสำหรับการแปลผลไว้ 2 ความหมายคือ เพื่อวิเคราะห์ผล เพื่อให้ได้ข้อสรุป อธิบายข้อจำกัดและข้อแนะนำโดยใช้ผลการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต LCA หรือการวิเคราะห์บัญชีรายการ เพื่อรายงานผลของการแปลผลวัฏจักรชีวิตในลักษณะที่ชัดเจน และเพื่อนำเสนอผลของการประเมินวัฏจักรชีวิตและการวิเคราห์บัญชีรายการที่สามารถเข้าใจได้ สมบูรณ์ถูกต้อง และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เป้าหมายของการศึกษาประเด็นหลักๆ ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการแปลผลนี้ จะเกี่ยวข้องกับประเด็นดังต่อไปนี้

- การระบุประเด็นสำคัญเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม
- การประเมินผลที่สมบูรณ์ ละเอียด และเที่ยงตรง
- การตรวจสอบบทสรุปว่าตรงกับวัตถุประสงค์ ขอบเจตการศึกษา ข้อจำกัดและสมมติฐานอื่นๆหรือไม่

การประเมินผลกระทบเป็นขั้นตอนที่สามของการประเมินวงจรชีวิตเพื่อจัดจำแนกและประเมินผลทางด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งประกอบด้วยประเด็นที่สำคัญดังนี้

- **การจำแนกประเภท (Classification)**

การจำแนกประเภทเป็นการจัดกลุ่มข้อมูลขาเข้าและขาออกว่ามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทใด เช่น มีเทนอยู่ในกลุ่มที่ส่งผลกระทบประเภททำให้โลกร้อนขึ้น(climate change) สารเคมีบางชนิดสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้หลายด้านเช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบทั้งทางด้านสุขภาพมนุษย์และด้านความเป็นกรด เป็นต้น

โดยประเภทของผลกระทบและชนิดของสสารอันเป็นผลให้เกิดผลกระทบประเภทต่างๆ แสดงในภาคผนวก

- **การกำหนดบทบาท (Characterization)**

เป็นการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในรูปของตัวบ่งชี้(Indicator) โดยใช้ค่าแฟกเตอร์(Characterization Factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ และทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบ ดังสมการ

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

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

Q_i (Quality of Substance) คือ ปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา

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

- **การหาขนาดของผลกระทบ (Normalization)**

เป็นการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือบริการ โดยเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์หรือบริการอื่นที่ต้องการอ้างอิง แสดงดังสมการ

$$NP_{j(product)} = EP_j/(T \times ER_j)$$

เมื่อ $NP_{j(product)}$ (Normalized Environmental Impact Potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผล กระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ของผลิตภัณฑ์ใดๆ

T (Life Time of Product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

ER_j (Normalization Reference) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี (kg substance equivalent/person/year)

- **การให้ค่าน้ำหนัก (Weighting)**

เป็นขั้นตอนในการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของดัชนีตัววัดทั้ง 3 ประเภทให้เป็นคะแนนเดียว

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

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

WF_j (Weighting Factor) คือ ค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

2.1.1.4 การแปลผลและการตีความ (Interpretation)

การแปลผลและการตีความเป็นขั้นตอนในการนำผลจากการทำบัญชีรายการ และการประเมินผลกระทบมารวมกันเพื่อให้ได้ข้อสรุป และข้อเสนอแนะตามเป้าหมาย วัตถุประสงค์ และขอบเขตของการศึกษา การแปลผลอาจเป็นการทำซ้ำไปซ้ำมาเพื่อพิจารณาทบทวนจากข้อมูล และอาจต้องเปลี่ยนแปลงขอบเขตการศึกษา เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงและคุณภาพของข้อมูลที่รวบรวมมาได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

หลังจากทำการประเมินวงจรชีวิตจะทำให้ทราบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใดเป็นอันตรายที่สุดและเกิดจากกระบวนการใด เพื่อจะวิเคราะห์หาวิธีที่เหมาะสมในการแก้ไขและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านต่างๆ คือ ปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์, เทคโนโลยี และความต้องการของผู้บริโภค

2.2 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับประเมินวงจรชีวิต

การประมวลผลการประเมินวงจรชีวิตต้องใช้ข้อมูลและตัวเลขมากมาย จึงต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเข้าช่วยในการทำงานเพราะสามารถจัดการกับข้อมูลได้รวดเร็ว สะดวกสบาย และมีคุณภาพมากขึ้น ทำให้มีองค์กรและบริษัทต่างๆ พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ในการประเมินวงจรชีวิตที่มีข้อมูลครบถ้วนสมบูรณ์ ซึ่งประกอบไปด้วยการวิเคราะห์บัญชีรายการ การประเมินค่าผลกระทบ และการแปลผลข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตที่มีจำนวนขั้นตอนมาก ๆ ได้ ประเด็นที่สำคัญในการเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคือ

- ฐานข้อมูล
- การคำนวณบัญชีรายการ
- การประเมินผลกระทบ
- การแปลผลข้อมูล

ซึ่งคุณสมบัติของโปรแกรมสำเร็จรูป ที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิตแต่ละโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 2.3

2.2.1 โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro

โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro เป็นโปรแกรมที่ผลิต โดย Mr. Mark Goedkoop ของบริษัท Pré Consultants สร้างขึ้นในปี 1990 ภารใต้โครงการของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ Pré Consultants ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมอย่างต่อเนื่องโดยมีรัฐบาลเนเธอร์แลนด์สนับสนุน ซึ่งมีผู้ใช้กว่าร้อยรายใน 47 ประเทศทั่วโลก โปรแกรม SimaPro เป็นโปรแกรมที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม เพราะมีการวิเคราะห์ผลตามระบบ ISO, มีการเปรียบเทียบผลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเปรียบเทียบ, มีฐานข้อมูล, มีการแสดงผลในรูปของตาราง และรูปภาพ, มีความยืดหยุ่นในการเพิ่มข้อมูลใหม่ และสามารถปรับปรุงฐานข้อมูลได้ แต่พบว่ามีโปรแกรมสำเร็จรูปหลายโปรแกรมมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับโปรแกรม SimaPro ดังนั้นการเลือกใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปก็ขึ้นอยู่กับราคาลิขสิทธิ์ของโปรแกรมและการยอมรับของผู้ใช้โปรแกรม เมื่อพิจารณาการยอมรับของผู้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปโดยเปรียบเทียบจากการขายลิขสิทธิ์โปรแกรมพบว่า โปรแกรม SimaPro มีราคาเหมาะสม และได้รับการยอมรับจากผู้ใช้มาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงโปรแกรม SimaPro ในการประเมินวงจรชีวิต

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิต

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามารถดึงผลการประเมินออกจากโปรแกรมได้	+	+	+	+	+	+
ตรงตามเป้าหมาย สำหรับวิศวกรออกแบบ	+	+	+	+	+	+
ตรงตามเป้าหมาย สำหรับวิศวกรสิ่งแวดล้อม	+	+	+	+	+	+
ตรงตามเป้าหมาย สำหรับผู้เชี่ยวชาญ LCA	-	+	+	+	+	+
มีฐานข้อมูล	+	+	+	+	+	+
สามารถเพิ่มข้อมูลเข้าไปใหม่ได้	+	+	+	+	+	+

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 วิธีประเมินค่าผลกระทบโดย Ecoindicator Method

วิธีในการประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น Ecoscarcity Method, Environmental Theme Method, Environmental Design of Industrial Products (EDPI), Ecoindicator Method etc. แต่วิธี Ecoindicator เป็นวิธีที่ใช้อย่างแพร่หลายเพราะมีระบบการให้น้ำหนักที่สนับสนุนข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของ Ecoindicator Method มีดังนี้

- วัตถุดิบ พลังงาน และของเสียจะถูกแจกแจงเป็นประเภทของผลกระทบทั้ง 11 ประเภท
- ผลกระทบทั้ง 11 ประเภทจะถูกจัดกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะของกลุ่มเป้าหมาย
- การให้น้ำหนักหรือความสำคัญและรวมคะแนนเป็นคะแนนเดียว

กลุ่มเป้าหมายและประเภทของผลกระทบมีดังนี้

สุขภาพมนุษย์(Human Health) ประกอบด้วย

ผลกระทบจากสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic)

ผลกระทบต่อทางเดินหายใจจากสารอินทรีย์ (Respiration of organic substance)

ผลกระทบต่อทางเดินหายใจจากสารอนินทรีย์(Respiration of inorganic substance)

ผลกระทบต่อโลกร้อน (Climate change)

ผลกระทบต่อการลดลงของชั้นโอโซน (Ozone depletion)

ระบบนิเวศ(Ecosystem) ประกอบด้วย

ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (Ecotoxicity)

ผลกระทบต่อการเกิดฝนกรดและการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำ (Acidification/Eutrophication)

ผลกระทบต่อการใช้พื้นดิน (Land use)

การลดลงของทรัพยากร(Resource depletion)

ผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรแร่ (Mineral)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มเป้าหมายที่ถูกทำลาย ประเภทของผลกระทบ และสสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ

กลุ่มเป้าหมายของการทำลาย (หน่วย)	ประเภทของผลกระทบ	สสารที่เป็นปัจจัยของผลกระทบ
Human Health (Disability Adjusted Life Years :DALYs)	สารก่อมะเร็ง ผลกระทบด้านการหายใจจากอินทรีย์สาร ผลกระทบด้านการหายใจจากอนินทรีย์สาร สารแผ่รังสี ภาวะโลก การลดลงของชั้นโอโซน	arsenic, cadmium, nickel methane, benzene CO, SO_x, NH_3 Nuclear energy production CO2, methane, CFCs CFCs, HFCs
Ecosystem Quality (Potentially Disappeared Fraction : PDF)	ภาวะความเป็นกรด ภาวะอูโทรฟิเคชัน ความเป็นพิษ การใช้พื้นที่	NO_x, SO_x, NH_3 Heavy metal, benzene Grassland, wood
Resource Depletion (MJ surplus Energy)	การใช้สินแร่ การใช้เชื้อเพลิง	cupper, nickel, zinc crude oil, coal

ที่มา : Phylipsen (2000)

ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์จะแสดงในหน่วยของ DALYs ซึ่งเป็นดัชนีที่กำหนดโดย WHO และ World Bank

1. Fate Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของสารที่ปล่อยออกจากระบบผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาและพื้นที่กับความเข้มข้น

2. Effect Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารกับประเภทของผลกระทบต่อน้ำหนักของสารที่ปล่อยออกจากระบบของผลิตภัณฑ์

3. Damage Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของขนาดของผลกระทบต่อน้ำหนักของกับจำนวนปีที่เจ็บป่วยซึ่งไม่สามารถทำอะไรได้ (DALY/kg)

ผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยาแสดงในหน่วยสัดส่วนการสูญหายของความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตต่อพื้นที่เนื่องจากผลกระทบหรือภาระทางสิ่งแวดล้อม แสดงในหน่วยของ PDF*m^2*year (PDF: Potentially Disappeared Fraction)

1. Fate Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของสารที่ปล่อยออกจากระบบผลิตภัณฑ์ต่อระยะเวลาและพื้นที่กับความเข้มข้น

2. Effect Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารกับหน่วยความเสี่ยง

3. Damage Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของความเสี่ยงกับการสูญหาย (PDF*m^2*year)

ผลของการลดลงของทรัพยากรแสดงเป็นหน่วยปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการสกัดแร่หรือเชื้อเพลิง (MJ surplus energy)

1. Resource Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของการสกัดทรัพยากรอันนำไปสู่การลดลงของทรัพยากร

2. Damage Analysis คือ การสร้างความสัมพันธ์ของการลดลงของทรัพยากรกับความพยายามที่เพิ่มขึ้นในการสกัดทรัพยากรในอนาคต

ผลจากการทำ Fate Analysis, Effect Analysis และ Damage Analysis เหมือนกับผลจากการทำ Classification และ Characterization คือการแจกแจงสารเข้าสู่ประเภทของผลกระทบและทำการคำนวณหาค่าของผลกระทบแต่ละประเภท จากนั้นจะทำการหาขนาดของผลกระทบแต่ละกลุ่มเป้าหมายโดยใช้ค่า Normalization โดยการให้ความสำคัญของแต่ละกลุ่มเป้าหมายจะใช้ค่า Weighting ของบริษัท Pré Consultants

หลังจากการจัดกลุ่มผลกระทบทั้ง 3 ประเภท จะทำการเปรียบเทียบกับปีฐาน โดยใช้ค่า Normalization และให้ค่าความสำคัญหรือน้ำหนักโดยใช้ค่า Weighting และรวมเป็นคะแนนเดียว (Single Score) ค่า Normalization และค่า Weighting สำหรับคำนวณผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมตามวิธี Eco-Indicator Method แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงค่า Normalization และค่า Weighting สำหรับกลุ่มเป้าหมายหรือลักษณะการทำลาย

Damage categories	Pré Consultants Normalization factor	Pré Consultants Weighting factor
Human Health	1.21×10^{2}	400
Ecosystem Quality	2.22×10^{-4}	400
Resource Depletion	6.77×10^{-3}	200

ที่มา : Phylipsen (2001)

2.3 ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titatium Dioxide: TiO_2)

2.3.1 ไททาเนียม

ไททาเนียมถูกค้นพบขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1791 ในเหมืองแร่แห่งหนึ่งที่เมืองคอร์นวอลล์ (Cornwall) ที่ประเทศอังกฤษ โดย นักธรณีวิทยาที่ชื่อ William Gregor ไททาเนียม เป็นธาตุชนิดหนึ่งที่อยู่ในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์คือ Ti ไททาเนียมเป็นโลหะทรานซิชันที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 22 มีความแข็งแรง สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของคลอรีนและน้ำทะเลได้ดี

2.3.2 ไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือ ไททาเนีย (titania) เป็นโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ และมีคุณสมบัติ ทึบแสง ช่วยสะท้อนรังสียูวีในแสงแดด หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,850 องศาเซลเซียส ไททาเนียมไดออกไซด์ขาว มีประโยชน์มากมายทั้งในด้าน เครื่องสำอาง อาหารและในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากคุณสมบัติเด่น เช่น การปกปิดหรือปิดยัง การทนทานต่อการกัดกร่อนและสารเคมี ความทนต่อความร้อน เป็นต้น

ในทางอุตสาหกรรมมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย เช่นอุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมหมึกพิมพ์ อุตสาหกรรมสารเคลือบผิว อุตสาหกรรมพลาสติก เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของไททาเนียมไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์

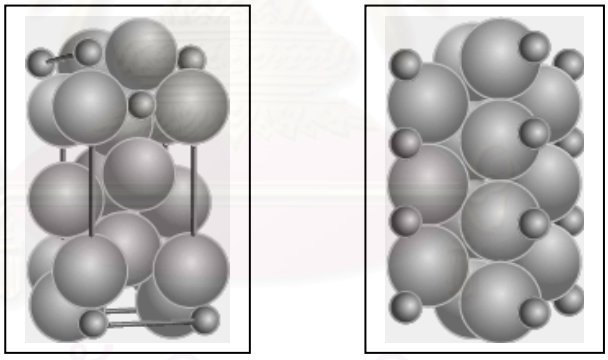
น้ำหนักโมเลกุล	79.87 g/mol
ความหนาแน่น	3.84-4.26 g/cm^3
จุดเดือด	2500 C
จุดหลอมเหลว	1850 C
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ

ไททาเนียมไดออกไซด์หรือไททาเนียมีรูปผลึก 3 รูปแบบคือ อนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูไคท์ (brookite) ซึ่งรูปผลึกอนาเทสมีความเสถียรภาพที่อุณหภูมิไม่สูงนัก รูปผลึกรูไทล์จะมีความเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ส่วนรูปผลึกบรูไคท์พบได้น้อยในธรรมชาติและสังเคราะห์ได้ยาก ในตารางที่ 2.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของไททาเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 รูปผลึก

ตารางที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกต่างๆ

คุณสมบัติ	อนาเทส	รูไทล์	บรูไคท์
Crystal structure	Tetragonal	Tetragonal	Orthorhombic
Optical	Uniaxial (-)	Uniaxial (+)	Biaxial (+)
Density, g/cm^3	3.84	4.26	4.0
Refractive index	2.490	2.903	-
Melting point	เปลี่ยนเป็นรูปผลึกรูไทล์	1858	-

จากตารางจะเห็นว่าบรูไคท์มีโครงสร้างผลึกเป็นออโธรอมบิค (Orthorhombic) ส่วนอนาเทสและรูไทล์มีโครงสร้างผลึกแบบทรงสี่หน้า (Tetragonal) เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณารูปผลึกอนาเทสจากรูปพบว่าจะมีลักษณะคล้ายรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) มากกว่า นอกจานี้เมื่อเปรียบเทียบรูปผลึกทั้งสองพบว่ารูปผลึกรูไทล์มีโครงสร้างผลึกคล้ายปริซึมโปร่งบางกว่าอนาเทส แต่อนาเทสจะมีลักษณะสวยงามกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของรูปผลึกอนาเทสและรูปผลึกรูไทล์

ในปัจจุบันมีวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ได้ทั้ง 3 รูปผลึก ซึ่งรูปผลึกรูไทล์เป็นผลึกไททาเนียมไดออกไซเพียงรูปเดียวที่มีความเสถียรมากที่สุดและไม่จะไม่เปลี่ยนเป็นรูปผลึกอื่น แต่รูปผลึกอนาเทสสามารถเปลี่ยนเป็นรูปผลึกรูไทล์ที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียส และเมื่อเปลี่ยนรูปผลึกแล้วจะไม่สามารถเปลี่ยนกลับคืนได้ ส่วนรูปผลึกบรูไคท์ผลิตโดยการให้ความร้อนกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous titanium dioxide) เตรียมโดยใช้ alkyl titanate หรือ sodium titanate กับ sodium hydroxide หรือ potassium hydroxide ทำปฏิกิริยาในเครื่อง Autoclave โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 200 – 600 C^o แต่รูปผลึกของไททาเนียมได

ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกเป็นอนาเทสและรูปผลึกรูไทล์

2.3.3 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น sol-gel method, solvothermal method และ chemical vapor deposition (CVD) ฯลฯ ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน และได้ลักษณะ คุณภาพ ขนาดของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ต่างกันอีกด้วย

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล (Sol-Gel Method)

กระบวนการเตรียมโซล-เจล (sol-gel) เป็นกระบวนการเตรียมทางเคมีแบบเปียก (Wet process) ชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ความสนใจในเทคนิคโซล-เจลเริ่มศึกษาตั้งแต่กลางคริสตศตวรรษที่ 19 เมื่อมีการเตรียมซิลิกาเจล (silica gel) จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ภายใต้สภาวะกรด ของสารเตตระเอธิล ออโธซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate, TEOS, $Si(OC_2H_5)_4$)) เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น กลายเป็นโซลจากนั้นโซลจะยึดเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล จากนั้นทำเจลให้แห้งจะได้วัสดุตามต้องการ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มาก เนื่องจากเตรียมได้ง่าย และได้ปริมาณสูง แต่มีข้อเสียคือเมื่อสังเคราะห์ได้จะมีรูปร่างอสัณฐาน จึงต้องทำการอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้ผงไททาเนียมไดออกไซด์ตามที่ต้องการ

โดยที่โซล (Sol) คือ สารแขวนลอยในสถานะของเหลวคล้ายสารละลายส่วน เจล เป็นสารละลายแขวนลอยชนิดหนึ่งซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้นมีความหนืดสูง จนสารละลายมีความยืดหยุ่นอย่างของแข็ง ที่เป็น เช่นนี้เนื่องจากโครงข่าย (Net work) ของเฟสที่กระจาย (dispersed phase) หรือคอลลอยด์ (Colloid) และสารตัวกลางทำกระจาย (Dispersion medium) วนเวียนอยู่ทั่วโครงข่ายนั้น ซึ่งขั้นตอนในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลเจลประกอบด้วย

- **การเตรียม**

โครงสร้างโครงข่ายของอัลคอกไซด์ หรือ โซล ซึ่งเกิดจากการผสมสารตั้งต้นอัลคอกไซด์ชนิดต่างๆ ในปริมาณที่เหมาะสมในสารละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแอลกอฮอล์ โดยอนุภาคเหล่านี้จะเกิดการกระจายตัวอยู่ในสารละลายมีสภาพเป็นคอลลอยด์อย่างเสถียร หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโดยการระเหยของเหลวบางส่วนออกไปเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างโครงข่ายของอัลคอกไซด์ต่อเนื่องในสามมิติ ซึ่งจากกระบวนการนี้จะส่งผลให้ โซลมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนเกิดเป็นลักษณะมวลกึ่งแข็ง หรือ เมื่อพิจารณาการ

เกิดเจล (gelation) พบว่า การเกิดเจลอาศัยกลไกที่สำคัญอยู่ 2 กลไก คือ การแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) และ กลไกการควบแน่น (Condensation) โดยมีปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$$M(OR)_x + H_2O \dashrightarrow M(OR)_{x-1}(OH) + R\text{-}OH \quad (1.1)$$

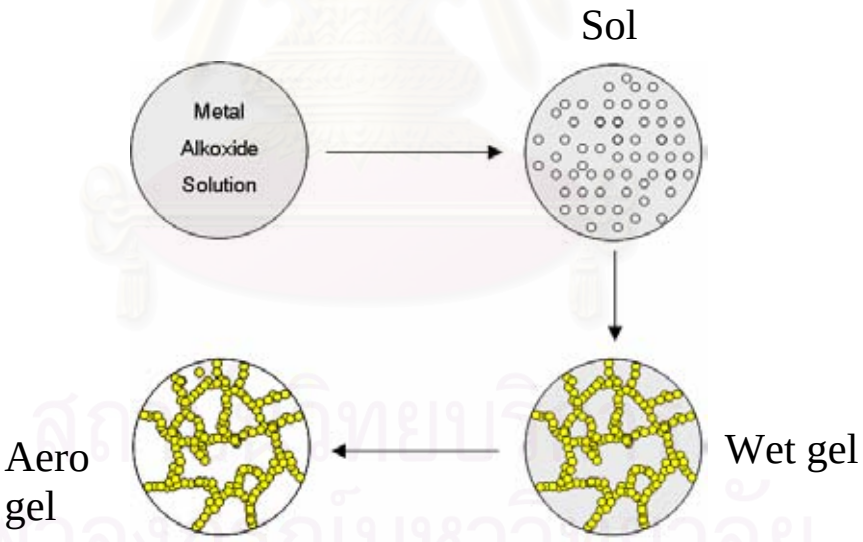
$$M(OR)_x + M(OR)_{x-1}(OH) \dashrightarrow M_2O(OR)_{2x-2} + R\text{-}OH \quad (1.2)$$

$$2M(OR)_{1-x}(OH) \dashrightarrow M_2O(OR)_{2x-2} + H_2O \quad (1.3)$$

ปฏิกิริยารวม

$$M(OR)_r + \frac{r}{2}H_2O \rightarrow MO_{\frac{r}{2}} + rR - OH$$

โดย M คือ โลหะที่มีวาเลนซีเท่ากับ x และ R คือ หมู่ แอริล (Aryl group) หรือ อัลคิล (Alkyl group) ต่อกับออกซิเจน เช่น $-CH_3$ (เมธิล) $-C_2H_5$ (เอทิล) เป็นต้น โดย ปฏิกิริยา 1.1 เป็นปฏิกิริยาที่โลหะอัลคอกไซด์สายสั้นๆถูกแยกสลายด้วยน้ำ ซึ่งการแยกสลายด้ายน้ำนี้จะอาศัยการกวนเข้าด้วยกันอย่างสม่ำเสมอภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม โลหะอัลคอกไซด์ส่วนใหญ่จะไวต่อน้ำ ดังนั้น ปฏิกิริยาอาจเกิดรุนแรงมาก เนื่องจากการคายความร้อนออกมามากเกินไป ซึ่งในบางกรณีจำเป็นต้องควบคุมการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำโดยต้องควบคุมให้ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาและค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายให้เหมาะสม จึงจะเกิดปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำ(Hydrolysis) ได้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิด Aerogel

- **การต่อสายลูกโซ่**

การควบแน่น ซึ่งอธิบายด้วยปฏิกิริยาที่ 1.2 และ 1.3 โดยปฏิกิริยารวมตัวนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น เช่น โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ออกโซโพลิเมอร์ (Oxopolymers) ซึ่งจะกลายเป็นโซล โดยที่ความไวในการทำปฏิกิริยาจะขึ้นกับ เลขโคออดิ

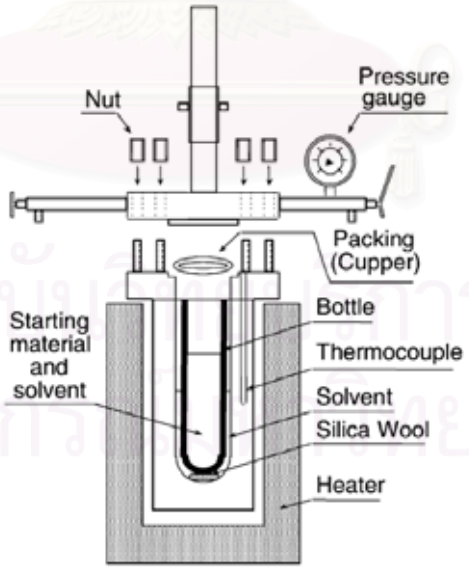
เนชั่น (Coordination number) และประจุการเกิดการพันกันเป็นโครงข่ายสามมิติ จะทำให้สารผสมมีความหนืดสูงมากขึ้นเรื่อยๆจนเข้าสู่สภาพที่เรียกว่า เจล

- **การระเหยของเหลวออก**

กระบวนการต่อมาคือทำการระเหยของเหลวที่อยู่ในตัวเจลออกไป (Dehydration) ความแข็งแรงของเจลจะช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมย้ายตำแหน่งหรือหลุดออกไปจากกันในระหว่างที่มีการทำให้เจลแห้งช่วยให้สามารถความสม่ำเสมอและความเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุลให้คงอยู่ได้ นอกจากนี้การกำจัดของเหลวออกไปจากตัวเจลภายใต้สภาวะวิกฤตยิ่งยวด (supercritical) หรือ สภาวะวิกฤตมิติเกิน (Hypercritical) ซึ่งแทบจะทำให้ไม่มีการหดตัวเกิดขึ้นเลย เจลที่แห้งแล้วจะไม่มีการควบแน่นเกิดขึ้นอีก ทำให้มีความเปราะ จึงสามารถบดย่อยเจลที่แห้งให้เป็นผงละเอียดได้ง่ายขั้นตอนสุดท้ายคือการเผาเจลที่ปราศจากน้ำให้กลายเป็นสารประกอบตามต้องการ

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี solvothermal method

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอลเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมวิธีหนึ่งเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิไม่สูงนัก ประมาณ 250 องศาเซลเซียส ได้ผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง ใช้เวลาในการเตรียมไม่นานซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับจุดเดือดของตัวทำละลายด้วยโดยที่วิธีนี้จะสามารถควบคุมขนาด ชนิดของรูปผลึก พื้นที่ผิว อุณหภูมิที่ใช้ และความดันได้



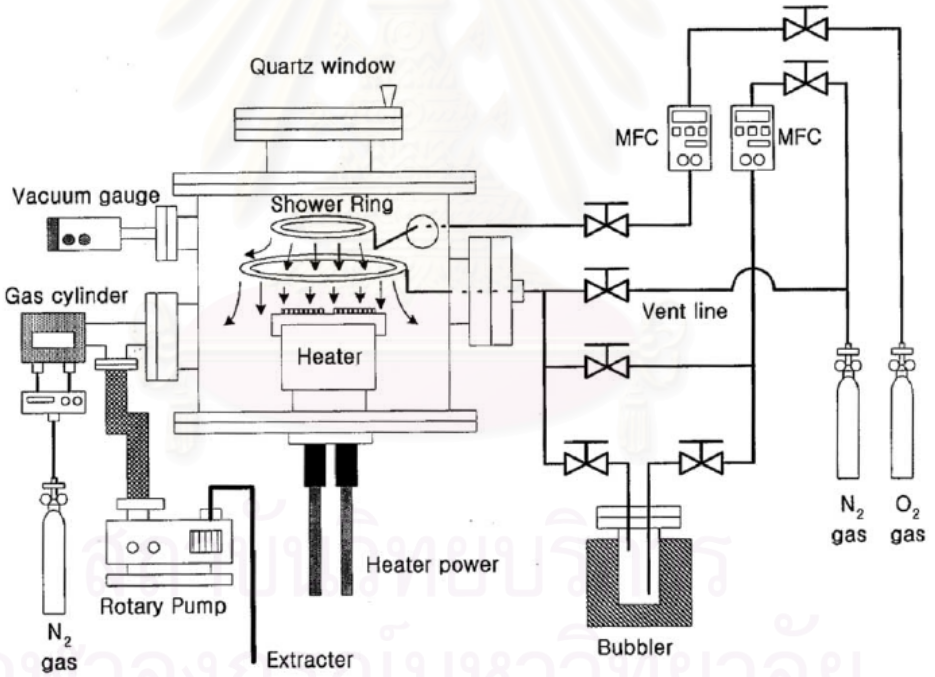
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์การเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี chemical vapor deposition (CVD)

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี chemical vapor deposition หรือ CVD เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการเตรียมไททาเนียมไดออกไซด์วิธีหนึ่ง เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะมีความบริสุทธิ์สูง โดยที่หลักของวิธีนี้คือ การทำให้ Precursor อยู่ในสภาวะแก๊สและมีก๊าซเฉื่อยเป็นตัวพาให้เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ และสารจะเกิดปฏิกิริยาบนแผ่นรองรับ แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้พลังงานสูงในการเปลี่ยนสารตั้งต้นให้อยู่ในสภาวะก๊าซ

วิธี Chemical Vapor Deposition มีหลายชนิดเช่น

- Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition (APCVD)
- Low Pressure Chemical Vapour Deposition (LPCVD)
- Metal-Organic Chemical Vapour Deposition (MOCVD)
- Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)
- Laser Chemical Vapour Deposition (LCVD)
- Photochemical Vapour Deposition (PCVD)



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์การเตรียมไททาเนียมไดอออกไซด์โดยวิธี chemical vapor deposition

2.3.4 ประโยชน์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ในปัจจุบันมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีประโยชน์มากมายทั้งที่ใช้เป็นสารให้สีและเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เคมีอินทรีย์และเป็นสารเคลือบผิว(Coating) ซึ่งประโยชน์ของการประยุกต์ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีดังนี้

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ด้านการใช้เป็นสารให้สี**

การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารสีขึ้นอยู่กับการผลิตเพื่อให้สีนั้นมีคุณสมบัติการดูดกลืนช่วงแสงที่มองเห็น(Visible Light) ได้สูง มีค่าดัชนีหักเหและความสามารถในการปกปิดที่สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างและขนาดของผลึกที่เหมาะสมและถูกต้องในกระบวนการผลิตรวมทั้งทิศทางและรูปร่างของผลึก

ด้วยคุณสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวแล้ว คือมีความคงทนต่อความร้อน แสง ความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นจึงนิยมนำไปใช้เป็นสารให้สีขาวในหมึกพิมพ์ สีทาบ้าน สีเคลือบ ผลิตภัณฑ์เซรามิค ถุงกระดาษ กระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น นอกจากการใช้ประโยชน์ในการเป็นสารให้สีของไททาเนียมไดออกไซด์แล้ว คุณสมบัติข้อดีด้านอื่นๆ เช่น คุณสมบัติด้านความทึบแสง การกระจายตัว คุณสมบัติด้านไฟฟ้าและด้านความร้อน ดังนั้นไททาเนียมไดออกไซด์จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นอีกนอกจากการเป็นสารให้สี

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ด้านการเคลือบผิวโลหะ**

ในปัจจุบันนิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารเคลือบผิวผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเหล็ก โดยที่ไททาเนียมไดออกไซด์จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เคลือบติดผิวของผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและชั้นเคลือบผิวบาง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ทำให้ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรด การที่สารเคลือบผิวติดได้ง่ายและสามารถเคลือบเป็นชั้นบางๆจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและไม่เพิ่มน้ำหนักให้กับผลิตภัณฑ์

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ด้านอิเล็กทรอนิกส์**

ในปัจจุบันนิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพราะไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือมีค่าคงที่ทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าสูง(High Dielectric Constant and High Resistance) จึงนิยมนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปทำตัวเก็บประจุไฟฟ้า

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในเครื่องสำอาง**

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบในเครื่องสำอาง ที่ช่วยปกป้องผิวจากแสงแดดหรือรังสีแสงที่ทำอันตรายผิวเนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความทึบแสง(Opacity) และค่าดัชนีหักเหแสงที่สูง (High Refractive index) ทำให้แสงทะลุไปสู่ผิวหนังได้ยาก จึงนิยมนำไททาเนียมไดออกไซด์มาเป็นส่วนผสมประเภทครีมกันแดด ครีมทาผิว แป้งรองพื้น เป็นต้น

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมกระดาษ**

ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้ไททาเนียมไดออกไซด์กระจายตัวในน้ำเพื่อให้เกิดความทึบแสง ลดการมองทะลุผ่านไปยังอีกด้านหนึ่ง

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมพลาสติก**

ไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง และสะท้อนรังสีอัลตราไวโอเลตได้ จึงนิยมนำมาใช้ในการป้องกันไม่ให้พลาสติกเสื่อมสลายจากรังสีอัลตราไวโอเลตรวมทั้งการทำลายของเคมีภัณฑ์และตัวตำละลายอื่นๆ เพื่อป้องกันวัตถุที่อยู่ภายในพลาสติก จึงใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดความทึบ เช่นตลับพลาสติกบรรจุเครื่องสำอาง ภาชนะพลาสติก เป็นต้น

- **การใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมเซรามิค**

จากคุณสมบัติด้านความแข็งแรงจึงนิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ ในการเคลือบแก้ว กระจก และพวกเครื่องกระเบื้องเพื่อป้องกันวัตถุที่อยู่ภายใน

2.3งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A.J. Maira (2000) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดประมาณ 6-20 นาโนเมตร ที่มีรูปผลึกเป็นอนาเทส โดยใช้วิธีโซลเจล เตรียมโดยใช้ titanium isopropoxide เป็นสารตั้งต้น ใส่ลงในสารละลายที่มีไอโซโพรพานอลและน้ำผสมอยู่ กวนทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการแคลไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้หรือระยะเวลาในการแคลไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น โดยที่ถ้าทำการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะผลึกได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร

C. Su (2004) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร ที่มีรูปผลึกเป็นอนาเทส และรูไทล์ โดยใช้วิธีโซลเจลใช้ titanium n-butoxide เป็นสารตั้งต้น จะได้ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 4-35 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัส 11.5-122 ตารางเมตรต่อกรัม และพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการแคลไซด์มีผลต่อ รูปผลึก ขนาด และพื้นที่ผิวสัมผัสของไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไททาเนียมไดออกไซด์จะเริ่มเปลี่ยนรูปผลึกจากอนาเทส เป็นรูไทล์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง

Misook Kang (2003) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร ที่มีรูปผลึกเป็นอนาเทส โดยใช้วิธีโซลโวเทอร์มอล ใช้ titanium isopropoxide เป็นสารตั้งต้น ใช้1,4-batanediol เป็นสารละลาย ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกเป็นอนาเทสที่มีขนาด 30-50 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสประมาณ 120 ตารางเมตรต่อกรัม

Arnold Tukker (2000) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม 2 วิธี คือ การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment: EIA) การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) พบว่าการทำ EIA นั้นเป็นการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเฉพาะในส่วนของโรงงานว่ามีผลกระทบทางตรงและทางอ้อมต่อสิ่งแวดล้อมอย่างไร ส่วนการทำ LCA นั้นเป็นการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงอายุของผลิตภัณฑ์ โดยแบ่งเป็น 3 ด้านคือ ด้านผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ด้านผลกระทบต่อระบบนิเวศวิทยา และด้านการนำทรัพยากรธรรมชาติไปใช้ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่สามารถนำไปเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการได้

Paoluglam Jirunya (2005)ได้ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโพลีสไตรีนและโพลียูรีเธนโฟม มีขอบเขตการประเมินครอบคลุมตั้งแต่การผลิต การขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ การใช้งาน และการกำจัด ผลการศึกษาพบว่า ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของโพลีสไตรีนและโพลียูรีเธนมาจากช่วงการผลิตและการใช้งานเป็นส่วนใหญ่ สำหรับโพลีสไตรีน ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่วนมากมาจากสไตรีนโมโนเมอร์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิต และการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงการใช้งาน ส่วนโพลียูรีเธนโฟม ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาจากวัตถุดิบที่สำคัญคือ ไอโซไซยาเนต และโพลีอีเธอร์โพลีออล นอกจากนี้ยังพบว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตโพลีสไตรีนนั้นมีมากกว่าโพลียูรีเธนโฟมประมาณ 1.5 เท่า

M. Asif (2007) ได้ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มาจากวัสดุต่างๆที่ใช้ในการสร้างห้องนอนของบ้านในประเทศสก๊อตแลนด์ โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อดูผลกระทบที่มาจากวัสดุต่างๆเช่น คอนกรีต ไม้ กระจก กระเบื้อง อะลูมิเนียม ฯลฯ ผลการศึกษาพบว่า คอนกรีต กระเบื้อง และ ไม้ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านพลังงานมากที่สุด โดยที่คอนกรีตส่งผลกระทบมากถึง 65% รองลงมาเป็น กระเบื้อง 14% และไม้ 13% เนื่องมาจากบ้านในประเทศสก๊อตแลนด์ส่วนใหญ่ใช้คอนกรีตในการก่อสร้าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร (Titanium Dioxide Nanoparticles :TiO2) และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร เพื่อเลือกวิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรอย่างเหมาะสม มีเครื่องมือ อุปกรณ์ ตัวแปรที่จะศึกษา และวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ

Hardware AMD(Athlon) 2200+

1.8 GHz, 256 GB of RAM

3.12. โปรแกรม Window XP®

3.1.3. โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro® 6.0

3.1.4. โปรแกรม Microsoft Office XP®

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีการต่างๆ ด้วยวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยทำการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การสังเคราะห์ และการขนส่งวัตถุดิบต่างๆ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้

3.2.1 ตัวแปรต้น

- รูปผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้
- ขนาดของไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้
- วิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร
- ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

- ต้นทุนการผลิตไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

3.2.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ การเลือกใช้วิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรได้อย่างเหมาะสม โดยพิจารณาได้จากผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม และต้นทุนการสังเคราะห์

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์

3.3.1 เป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย (Goal and Scope Definition)

3.3.1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย (Objective and purpose)

- เพื่อสร้างฐานข้อมูลการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีการต่างๆ
- เพื่อประเมินและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธีการต่างๆ
- ขอบเขตของงานวิจัยครอบคลุมตั้งแต่ การสรรหาวัตถุดิบ/สารเคมี กระบวนการสังเคราะห์ และการขนส่งวัตถุ/สารเคมีที่ใช้ในการผลิต

3.3.1.2 หน่วยหน้าที่ (functional unit)

หน่วยหน้าที่ (functional unit) ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้คือ ปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ 25 กรัม ที่มีขนาด 5-20 นาโนเมตร

3.3.1.3 ข้อสมมุติฐานและข้อจำกัด (Limitation and Assumption)

เนื่องจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรยังไม่อยู่ในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมในงานวิจัยนี้ ได้เก็บรวบรวมมาจากบทความจากเอกสารทางวิชาการระดับนานาชาติ และวิทยานิพนธ์/ดุษฎีนิพนธ์ในประเทศไทย และใช้ฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์จากโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0

3.3.2 การทำบัญชีรายการ (Life Cycle Inventory: LCI)

ในขั้นตอนนี้เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลด้านการใช้วัตถุดิบ พลังงาน รวมถึงของเสียที่ปล่อยออกจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น การสังเคราะห์ด้วยวิธี Sol- gel, การสังเคราะห์ด้วยวิธี Solvothermal เป็นต้น โดยมีขอบเขตการศึกษาดังที่ได้อธิบายในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษาไว้แล้ว โดยทำสมดุลมวลสารและพลังงาน ซึ่งงานวิจัยนี้เก็บรวมรวมข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ และใช้ฐานข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0

3.3.3 การประเมินผลกระทบ(Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

ในการประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรของงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro®6.0 และใช้วิธี Eco-indicator 95 and Eco-indicator 99 เป็นวิธีในแยกประเภทและหาค่าผลกระทบ ซึ่งทั้ง2วิธีนี้เป็นการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนกัน ซึ่งวิธี Eco-indicator 99 ได้พัฒนามาจากวิธี Eco-indicator 95 และกลุ่มผลกระทบที่ใช้ก็มีความสัมพันธ์คล้ายกัน ซึ่งทั้ง2วิธีต่างกันดังนี้

- วิธี Eco-indicator 95 จะแสดงเป็นค่าของผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ เช่น การทำให้เกิดชั้นรูรั่วโอโซน การทำให้เกิดฝนกรด แต่วิธี Eco-indicator 99 จะทำการวิเคราะห์ต่อจากวิธี Eco-Indicator 95 เพื่อที่จะแสดงให้ทราบว่าผลกระทบในด้านนั้นๆ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และทรัพยากรอย่างไร
- หน่วยของผลกระทบที่วิเคราะห์ได้จากวิธี Eco-indicator 95 จะเป็นปริมาณสารเทียบเท่าของสารที่ทำให้เกิดผลกระทบนั้นๆ เช่น ผลกระทบด้านการทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกคือ kg CO_2- equivalent แต่วิธี Eco-indicator 99 จะแสดงหน่วยเป็น DALYs, PDF/m^2 และ MJ surplus ซึ่งแสดงถึงผลกระทบด้านสุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และทรัพยากร
- วิธี Eco-indicator 99 จะพิจารณาเรื่องการใช้ทรัพยากรพลังงาน แต่วิธี Eco-indicator 95 ไม่ได้พิจารณา

วิธีการประเมินผลกระทบในงานวิจัยนี้มีขั้นตอน คือ การทำ characterization เพื่อทราบถึงปริมาณหรือค่าน้ำหนักผลกระทบที่เกิดขึ้นในด้านต่างๆ การเทียบหน่วย (normalization) และการทำ

ให้น้ำหนักผลกระทบมีคะแนนเดี่ยว (single score) ซึ่งค่าแฟกเตอร์ (factor) สำหรับนำมาคูณกับข้อมูลที่ได้เก็บรวมรวมข้อมูลเพื่อประเมินผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี Eco-Indicator 95 และวิธี Eco-Indicator 95 ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

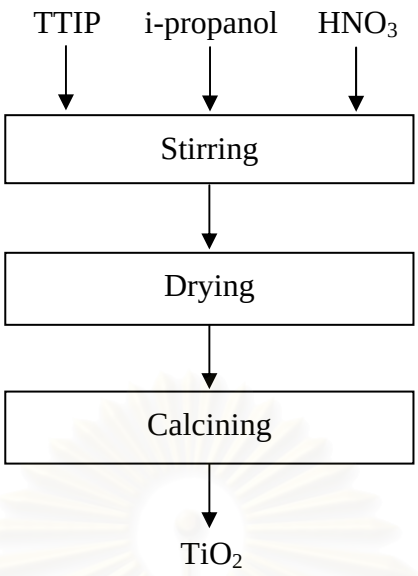
ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิจัยและวิจารณ์จากการประเมินค่าผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-Gel method) และวิธีโซโวเทอร์มอล (Solvothermal method) โดยใช้ Eco-Indicator 95 และ 99 เป็นวิธีในการประเมินค่าผลกระทบ ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

4.1 การทำบัญชีรายการ (Life Cycle Inventory)

ในการประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับมวลสาร พลังงาน และของเสียที่ปลดปล่อยออกจากกระบวนการต่างๆ ตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลในช่วงการเตรียมวัตถุดิบ การสังเคราะห์ และการขนส่ง ซึ่งได้แสดงขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล และข้อมูลจากการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้

4.1.1 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล 1 (SG1) [Pokasem, 2005]

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SG1 นั้นทำโดยผสมไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (TTIP) ปริมาตร 100มิลลิลิตร ลงในไอโซโพรพานอล ปริมาตร 500 มิลลิลิตร และนำไปเทลงในน้ำกลั่นที่มีปริมาตร900 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 70% ปริมาตร 2 มิลลิลิตรลงไปในสารละลายผสม จากนั้นทำการกวนผสมด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer ด้วยความเร็วรอบประมาณ 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา3วัน จากนั้นนำมาแพร่ผ่านเมมเบรนในน้ำเพื่อปรับค่า pH ของสารละลายผสมจนได้ค่า pH เท่ากับ 3.5 หลังจากนั้นระเหยเอาของเหลวออกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และทำการแคลไซด์ (Calcine) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SG1 นี้จะได้ผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตร ปริมาณ 25 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.1



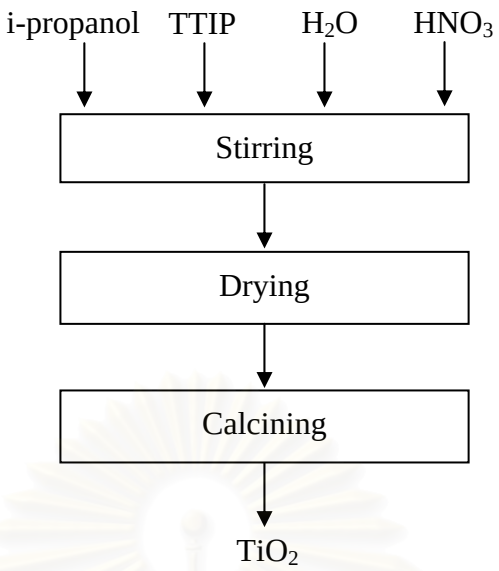
รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้วิธีโซลเจล 1

4.1.2 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล 2 (SG2)

[Shipeng Qiu, 2006]

ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SG2 ทำได้โดยเทสารไอโซโพรพานอล ปริมาณ 9 กรัม ลงในน้ำกลั่นปริมาณ 108 กรัม จากนั้นเทสารละลายผสมลงไปใส่ในไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ที่เตรียมไว้ปริมาณ 18 กรัม ทำการกวนผสมด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer ด้วยความเร็วสูง และเติมกรดไนติกเข้มข้นเพื่อปรับ pHให้ได้ค่า pH ประมาณ 2 กวนทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นออกจากนั้นแล้วกรองเอาเจลออกมา แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำมาบดให้เป็นผงและทำการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SG2 นี้ได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผงขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร จำนวน 5 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



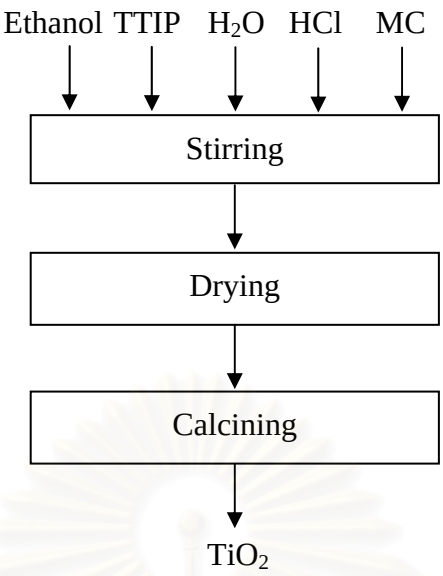
รูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลเจล 2

4.1.3 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล 3 (SG3)

[Mohammad, 2007]

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SG3 ทำได้โดยผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 35.5%โดยน้ำหนัก จำนวน 1.8 มิลลิลิตร กับเอทานอล 8.2 มิลลิลิตร จากนั้นเทไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ 2 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายผสมที่เตรียมไว้ กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายเมทิลเซลลูโลส เข้มข้น2%โดยน้ำหนัก ในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 20 กรัม และกวนทิ้งไว้อีก 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 วัน นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอีก 1 ชั่วโมง และทำการแคลไซด์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SG3 นี้ได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผงขนาดประมาณ 15 นาโนเมตรประมาณ 0.5 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.3

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลทั้ง 3 วิธี โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ วัตถุดิบ พลังงานที่ใช้ และของเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการ ซึ่งครอบคลุม 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิต และขั้นตอนการขนส่ง ซึ่งข้อมูลที่ได้ทำการเก็บรวบรวมมาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1



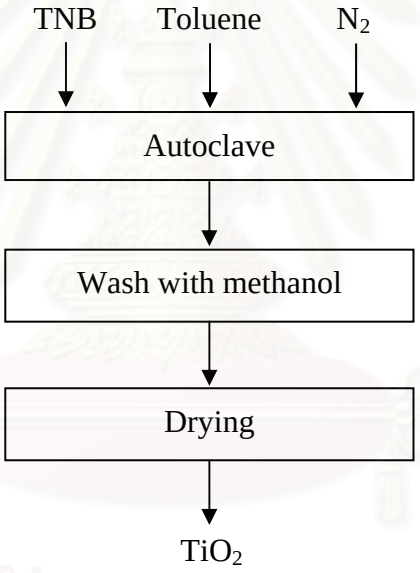
รูปที่ 4.3 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลเจล 3

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล

	Type	Unit	SG1	SG2	SG3
Input	TTIP	g	97	88.94	88.94
	i-propanol		390	44.56	
	Ethanol				362.18
	HNO_3		2.8	0.85	
	HCl				97.37
	H_2O		5900	533.63	871.61
	Methylcellulose				17.79
	Transportation	kgkm	19.924	19.924	19.836
	Electricity	kWh	24	22.3	27.8
Emission to air	i-propanol	g	472.036	119.67	75.23
	H_2O		889.964	522.34	860.33
	HNO_3		2.8	0.85	
	HCl				97.37
	Ethanol				362.18
	Methylcellulose				17.79
Emission to water	H_2O	g	5000		
Product	**TiO_2**	**g**	**25**	**25**	**25**

4.1.4 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 1 (SV1) [Wachiraphan, 2005]

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SV1 ทำได้โดยเทสารละลายไททาเนียมบิวทอกไซด์ (TNB) 25 กรัม และสารละลายโทลูอีนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง หลังจากนั้นนำเข้าเครื่อง Autoclave แล้วเติมโทลูอีนปริมาตร 30 มิลลิลิตรลงในช่องว่างระหว่างหลอดทดลองกับเครื่อง Autoclave จากนั้นทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเครื่อง โดยป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในเครื่อง ทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นลงจนได้อุณหภูมิห้อง และหลังจากนั้นนำมาล้างด้วยเมทานอลด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง นำมาอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SV1 นี้ได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผงขนาดประมาณ 10 นาโนเมตรประมาณ 5 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.4

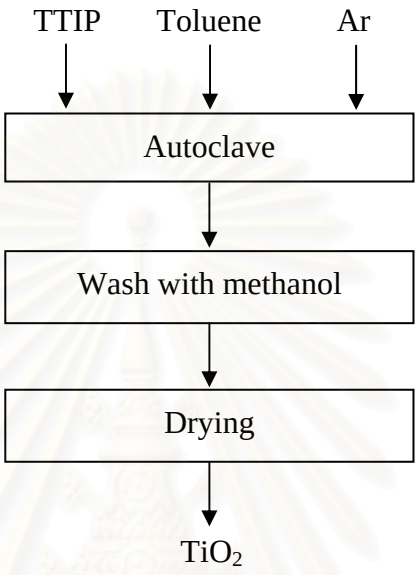


รูปที่ 4.4 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล 1

4.1.5 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 2 (SV2) [Chung S. K., 2005]

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SV2 ทำโดยเทสารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ปริมาณ 20 กรัม และสารละลายโทลูอีนปริมาณ 100กรัม ลงในหลอดทดลอง แล้วทำการกวนด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 3 ชั่วโม หลังจากนั้นนำเข้าเครื่อง Autoclave ทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเครื่องโดยป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าไปในเครื่อง จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 250 องศาเซลเซียส และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้

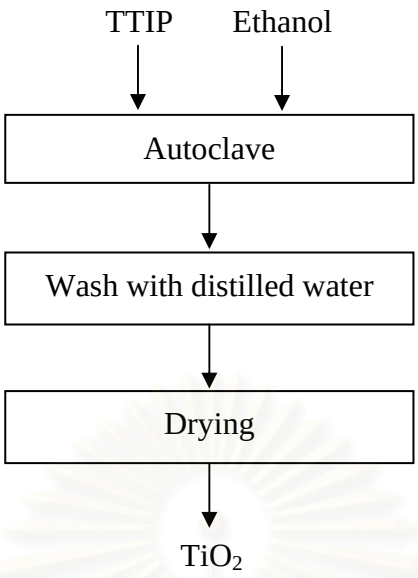
ให้เย็นลงจนได้อุณหภูมิห้อง และนำมาล้างด้วยเมทานอลด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง นำมาอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SV2 นี้จะได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผงขนาดประมาณ 10 นาโนเมตรประมาณ 5-6 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล 2

4.1.6 การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล 3 (SV3) [Min K.Y., 2006]

การสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SV3 นี้ทำโดยเทสารละลายไททาเนียมไอโซโพรพอกไซด์ ปริมาณ 28.4 กรัม และเอทานอลปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 2 ชั่วโมงหลัง นำเข้าเครื่อง Autoclave จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง และหลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น นำมาทำให้แห้งและอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SV3 นี้ได้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นผงขนาดประมาณ 15-25 นาโนเมตร ประมาณ 8 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล 3

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอลทั้ง 3 วิธี โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ วัตถุดิบ พลังงานที่ใช้ และของเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการ ซึ่งครอบคลุม 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการผลิต และขั้นตอนการขนส่ง ซึ่งข้อมูลที่ได้ทำการเก็บรวบรวมมาได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล

	Type	Unit	SV1	SV2	SV3
Input	TNB	g	125		
	TTIP			88.97	88.94
	Toluene		565.5	889.68	
	Ethanol				247.4
	N_2		1365.85		
	Ar			1948.75	
	Methanol		1580	1580	
	H_2O				1200
	Transportation	kgkm	273.550	286.582	20.011
	Electricity	kWh	75.3	91.24	126.28

	Type	Unit	SV1	SV2	SV3
Emission to air	N2	g	1365.85		
	Ar			1948.75	
Emission to water	TNB	g	100		
	TTIP			63.97	63.94
	Toluene		565.5	889.68	
	Ethanol				247.4
	Methanol		1580	1580	
	H_2O				1200
Product	**TiO_2**	**g**	**25**	**25**	**25**

4.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

วิธีการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้หลักการโซลเจลและโซลโวเทอร์มอลนั้น มีสารตั้งต้น ตัวทำละลาย หลากหลายชนิด รวมถึงใช้เวลาในการสังเคราะห์แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้ จะให้ผลผลิตที่มีคุณภาพใกล้เคียงกัน แต่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลและโซลโวเทอร์มอลทั้ง 3 แบบ และใช้วิธีในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกัน ได้ผลการวิจัยดังนี้

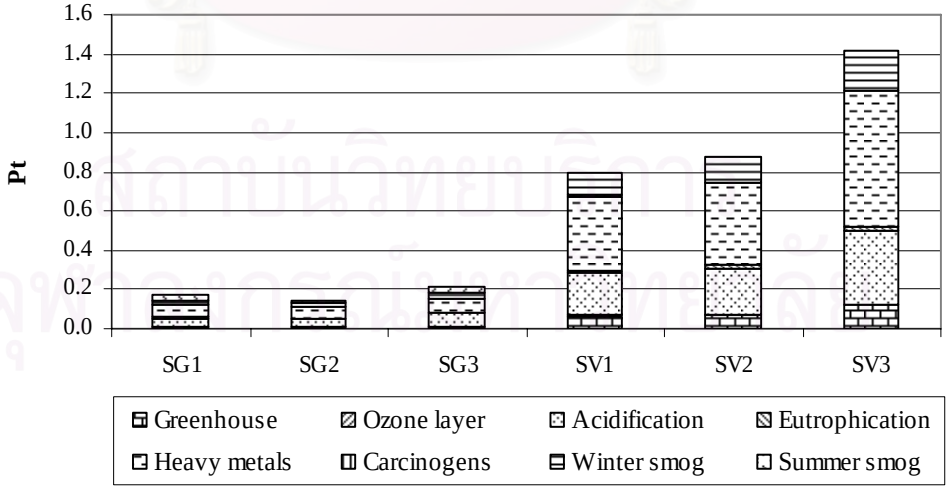
4.2.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 95

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้โปรแกรม SimaPro® 6.0 วิธี Eco-Indicator 95 วิธีนี้จะรายงานผลให้อยู่ในรูปของปริมาณสารอ้างอิงของแต่ละกลุ่มเช่น กลุ่มการทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกรายงานในรูปของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลุ่มการลดลงของชั้นโอโซนรายงานในรูปของสาร CFC11 กลุ่มการก่อให้เกิดฝนกรดรายงานในรูปของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสารแต่ละตัวในกลุ่มจะมีค่าความรุนแรงต่างกันจึงต้องมีการเทียบให้อยู่ในพื้นฐานเดียวกันจึงต้องนำค่าแฟกเตอร์ของสารนั้นๆ มาคูณเข้าไปด้วย ซึ่งค่าแฟกเตอร์ของสารในแต่ละกลุ่มผลกระทบแสดงในภาคผนวก และผลการประเมินแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณของกลุ่มผลกระทบต่างๆของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลและวิธีโซลโวเทอร์มอลโดยใช้วิธี Eco-Indicator 95

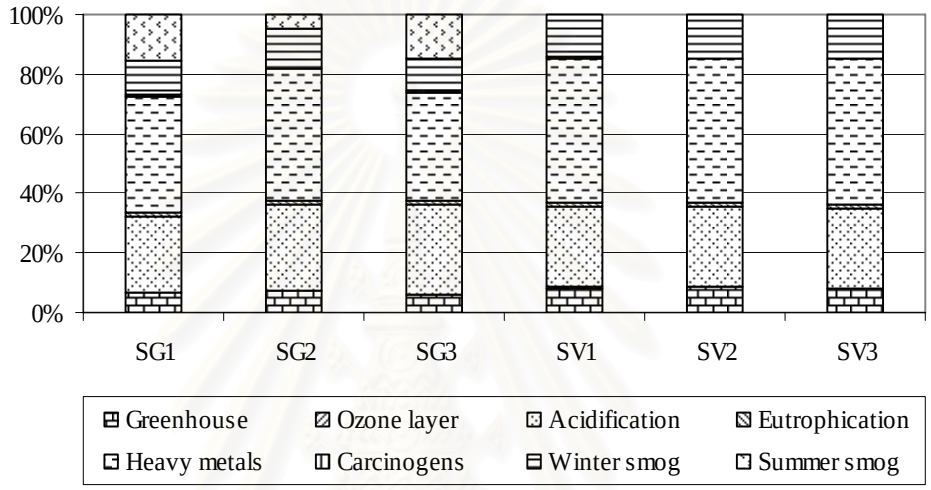
Impact Category	Unit	SG1	SG2	SG3	SV1	SV2	SV3
Greenhouse	kg CO_2	6.05E+01	5.50E+01	6.95E+01	3.46E+02	3.84E+02	6.20E+02
Ozone layer	kg CFC11	4.83E-07	4.08E-07	7.30E-07	5.29E-06	4.98E-06	1.75E-06
Acidification	kg SO_2	4.94E-01	4.50E-01	7.15E-01	2.45E+00	2.67E+00	4.29E+00
Eutrophication	kg PO_4	1.59E-02	1.20E-02	1.45E-02	7.08E-02	7.93E-02	1.24E-01
Heavy metals	kg Pb	7.30E-04	6.70E-04	8.45E-04	4.15E-03	4.61E-03	7.53E-03
Carcinogens	kg B(a)P	6.05E-07	5.20E-07	7.20E-07	3.50E-06	3.81E-06	5.77E-06
Winter smog	kg SPM	3.75E-01	3.44E-01	4.33E-01	2.13E+00	2.36E+00	3.87E+00
Summer smog	kg C_2H_4	1.88E-01	4.84E-02	2.26E-01	1.27E-02	1.33E-02	9.37E-03
Energy resource	MJ	7.35E+02	6.45E+02	8.20E+02	4.32E+03	4.76E+03	7.12E+03

จากการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้โปรแกรม SimaPro® 6.0 วิธี Eco-Indicator 95 จะเห็นว่าในแต่ละกลุ่มผลกระทบก็จะมีสารอ้างอิงของกลุ่มผลกระทบนั้นๆอยู่ โดยที่สามารถรวมกลุ่มผลกระทบทั้งหมดให้อยู่ในรูปหน่วยเดียวกันได้จากการเทียบหน่วย(Normalization) และการให้ค่าน้ำหนัก (Weighting) เมื่อทำการเทียบหน่วยและให้ค่าน้ำหนักแล้ว จะได้ค่าต่างๆที่อยู่ในรูปกราฟเชิงเดี่ยว (single score) ที่มีหน่วยเป็น Pt (Point) ดังแสดงในรูปที่ 4.7



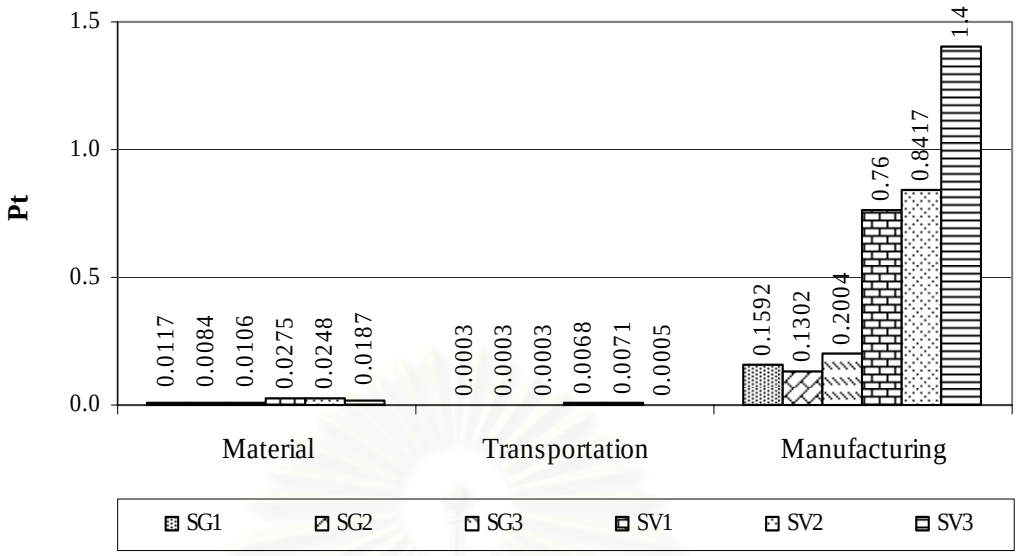
รูปที่ 4.7 ผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95

จากรูปที่ 4.7 พบว่าการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SV3 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงมากที่สุด รองลงมาคือการสังเคราะห์ด้วยวิธี SV2 และ SV1 ตามลำดับ และการสังเคราะห์ด้วยวิธี SG2 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบด้านต่างๆที่เกิดจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร พบว่าผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่คือปัญหาด้านการก่อให้เกิดโลหะหนัก รองมาเป็นปัญหาด้านการก่อให้เกิดฝนกรด และปัญหาการเกิดฝุ่นละอองต่างๆ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัดส่วนของกลุ่มผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95

และเมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนต่างๆของการสังเคราะห์ คือการเตรียมวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบ และการสังเคราะห์ จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลและวิธีโซลโวเทอร์มอล พบว่าในขั้นตอนการสังเคราะห์นั้น จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงมากที่สุดเนื่องมาจากพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ รองลงมาเป็นขั้นตอนในการเตรียม และขั้นตอนในการขนส่งวัตถุดิบส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดเนื่องจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรจำนวน25 กรัมใช้วัตถุดิบปริมาณน้อยในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95

4.2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 99

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้โปรแกรม SimaPro® 6.0 วิธี Eco-Indicator 99 ซึ่งวิธีนี้รายงานผลโดยการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแบบรวม ซึ่งประกอบด้วยผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม 3 ประเภทหลัก คือ

1. ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human Health) ประกอบด้วย ผลกระทบจากสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic), ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจจากสารอินทรีย์ (Respiration of organic substance), ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจจากสารอนินทรีย์ (Respiration of inorganic substance), ผลกระทบต่อโลกร้อน (Climate change), ผลกระทบต่อการลดลงของชั้นโอโซน (Ozone depletion) มีหน่วยผลกระทบเป็น DALY (จำนวนปีที่สูญเสียไปเนื่องจากเจ็บป่วยหรือตาย)

2. ผลกระทบต่อระบบนิเวศ (Ecosystem) ประกอบด้วย ผลกระทบต่อความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (Ecotoxicity), ผลกระทบต่อการเกิดฝนกรดและการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำ (Acidification/Eutrophication), ผลกระทบต่อการใช้พื้นดิน (Land use) มีหน่วยผลกระทบเป็น PDF*m^2*year (การหายไปของพืชและสิ่งมีชีวิตต่างๆในระบบนิเวศ)

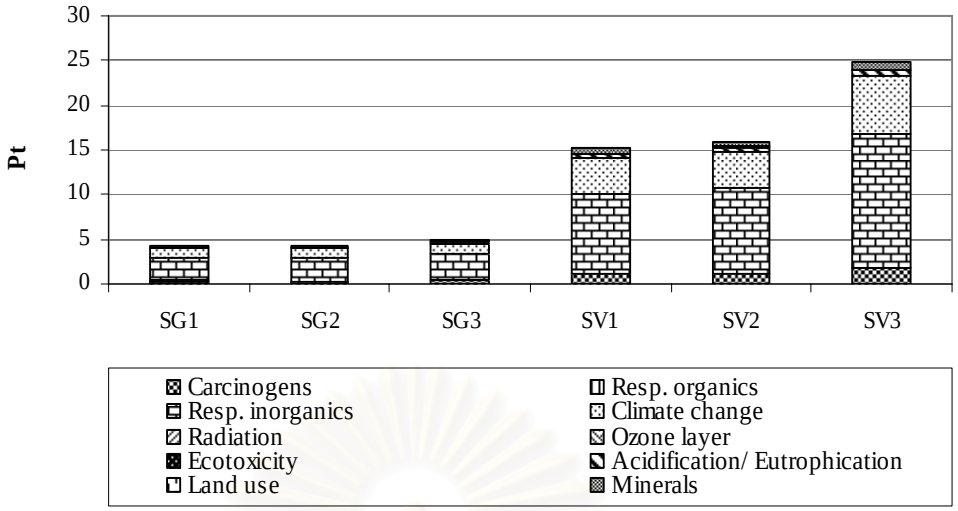
3. ผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร (Resource depletion) มีกลุ่มผลกระทบเดียวคือ ผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรแร่ (Mineral) มีหน่วยผลกระทบเป็น MJ surplus (พลังงานที่สูญเสียไปในการสกัดแร่ธาตุ)

จากผลการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมโดยวิธี Eco-Indicator 99 พบว่าในกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ เกิดผลกระทบด้านระบบทางเดินหายใจจากสารอนินทรีย์ มากที่สุด รองลงมาเป็นผลกระทบต่อโลกร้อน ส่วนกลุ่มผลกระทบต่อระบบนิเวศ เกิดผลกระทบด้านการเกิดฝนกรดและการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำมากที่สุด รองลงมาเป็นผลกระทบด้านการใช้พื้นดิน ซึ่งผลกระทบในด้านต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของกลุ่มผลกระทบต่างๆของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจลและวิธีโซลโวเทอร์มอลโดยใช้วิธี Eco-Indicator 99

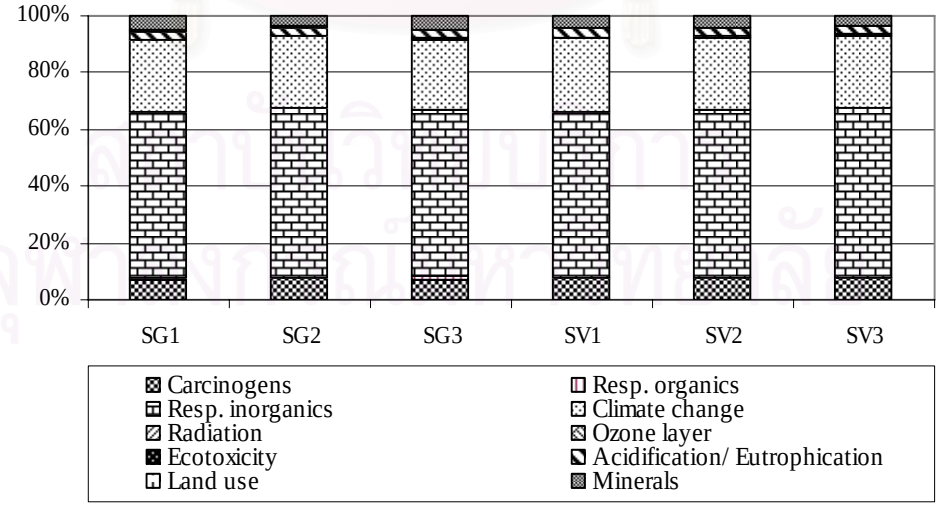
Impact Category	Unit	SG1	SG2	SG3	SV1	SV2	SV3
Carcinogens	DALY	6.45E-06	6.57E-06	7.52E-06	2.35E-05	2.45E-05	3.92E-05
Resp. organics	DALY	4.90E-07	1.41E-07	1.11E-06	4.46E-08	4.50E-08	3.46E-08
Resp. inorganics	DALY	5.18E-05	5.22E-05	5.97E-05	1.86E-04	1.95E-04	3.09E-04
Climate change	DALY	2.22E-05	2.22E-05	2.55E-05	8.07E-05	8.43E-05	1.32E-04
Radiation	DALY	1.88E-09	1.76E-09	3.88E-09	9.26E-09	8.31E-09	8.22E-09
Ozone layer	DALY	6.87E-10	6.25E-10	1.05E-09	4.46E-09	3.94E-09	1.39E-09
Ecotoxicity	PDF*m^2yr	4.25E-02	4.07E-02	4.93E-02	5.84E-01	7.33E-01	2.24E-01
Acidification/ Eutrophication	PDF*m^2yr	1.46E+00	1.44E+00	1.65E+00	5.26E+00	5.50E+00	8.46E+00
Land use	PDF*m^2yr	1.84E-01	1.79E-01	2.59E-01	7.42E-01	7.40E-01	9.98E-01
Minerals	MJ surplus	1.58E-01	1.15E-01	1.69E-01	4.63E-01	4.58E-01	5.99E-01

จากการประเมินผลกระทบโดยวิธี Eco-Indicator 99 จะเห็นว่าในแต่ละกลุ่มผลกระทบรวมก็จะมีหน่วยของแต่ละกลุ่มอยู่ สามารถรวมกลุ่มผลกระทบทั้ง 3 กลุ่มรวม คือกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์, ผลกระทบต่อระบบนิเวศ และผลกระทบต่อการลดลงของทรัพยากร ให้อยู่ในรูปหน่วยเดียวกันได้จากการเทียบหน่วยและการให้ค่าน้ำหนัก เมื่อทำการเทียบหน่วยและให้ค่าน้ำหนักแล้ว จะได้ค่าต่างๆที่อยู่ในรูปกราฟเชิงเดี่ยวที่มีหน่วยเป็น Pt ดังแสดงในรูปที่ 4.10



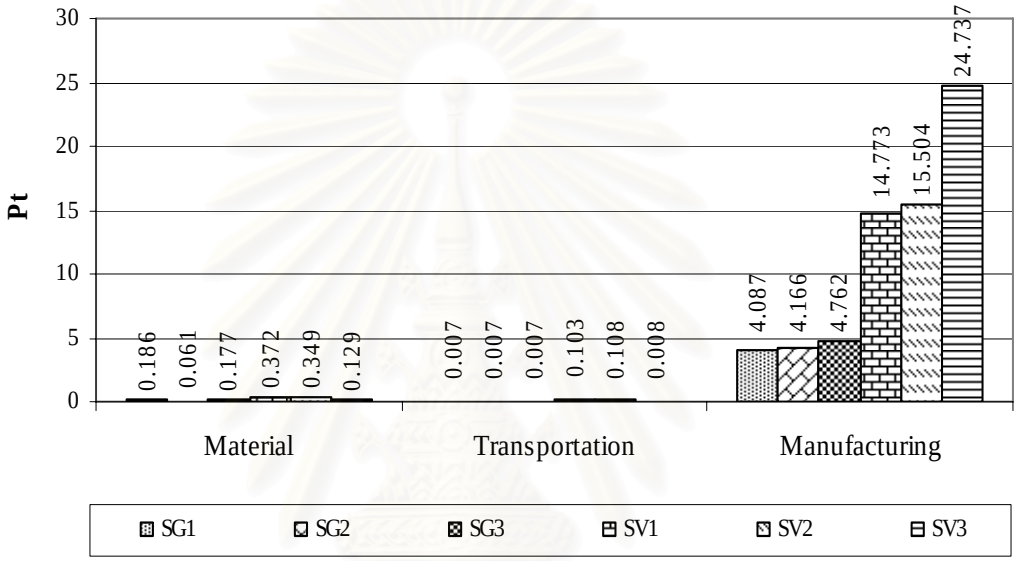
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99

จากรูปที่ 4.10 พบว่าการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SV3 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงมากที่สุด และการสังเคราะห์ด้วยวิธี SG2 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบด้านต่างๆที่เกิดจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร พบว่า ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่คือปัญหาด้านระบบทางเดินหายใจจากสารอนินทรีย์ มากที่สุด รองลงมาเป็นปัญหาด้านอุณหภูมิโลกร้อนขึ้น และปัญหาด้านการก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัดส่วนของกลุ่มผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99

และเมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนต่างๆของการสังเคราะห์ คือการเตรียมวัตถุดิบ การขนส่งวัตถุดิบ และการสังเคราะห์ จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจลและวิธีโซลโวเทอร์มอล พบว่าในขั้นตอนการสังเคราะห์นั้น จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงมากที่สุดเนื่องมาจากพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ รองลงมาเป็นขั้นตอนในการเตรียม และขั้นตอนในการขนส่งวัตถุดิบส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดเนื่องจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรจำนวน25 กรัมใช้วัตถุดิบปริมาณน้อยในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12

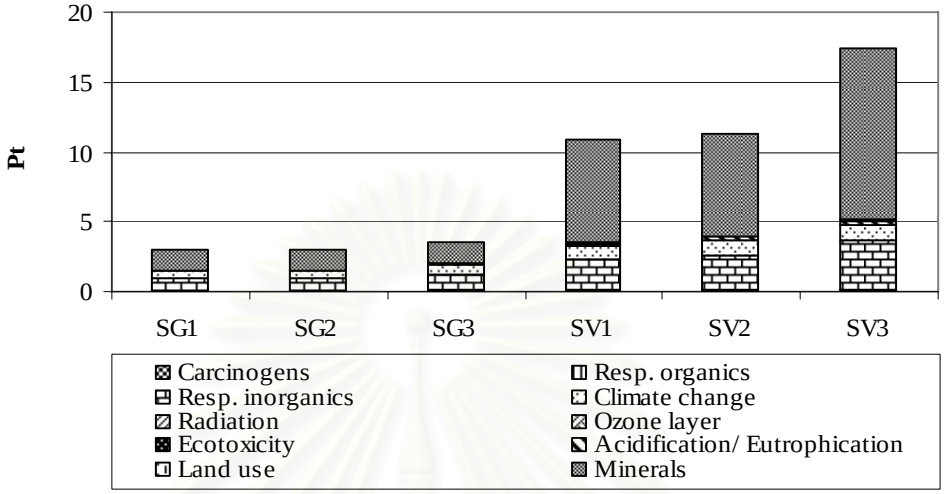


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99

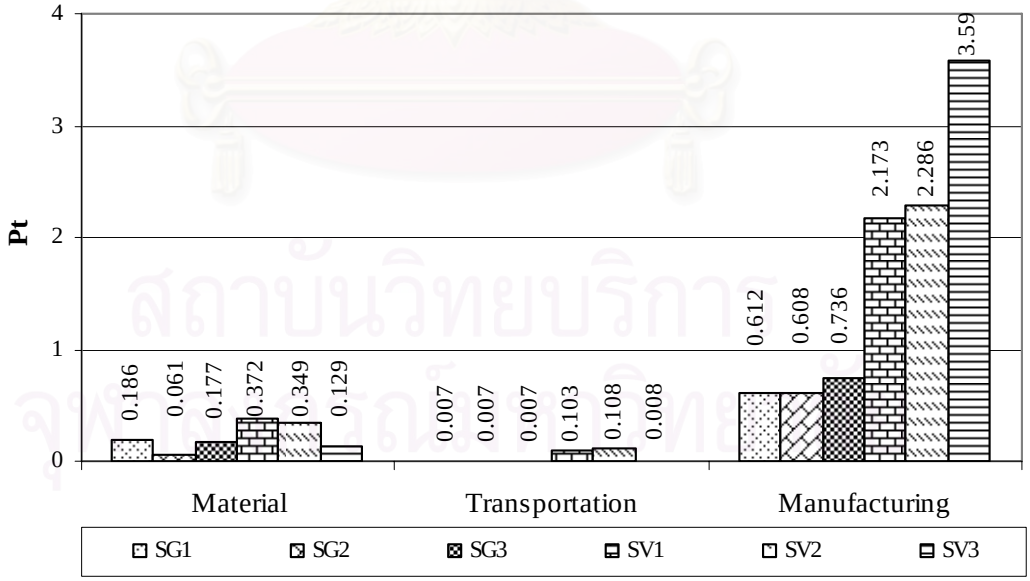
4.2.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยข้อมูลพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99

จากผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรนั้นได้ใช้ฐานข้อมูลจากสหภาพยุโรป(EU) ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนเมื่อนำมาใช้ในประเทศไทย เมื่อประเมินผลกระทบจากการเปลี่ยนข้อมูลด้านไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปมาเป็นข้อมูลที่เก็บได้จากประเทศไทย พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มเหมือนกันคือการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยวิธีโซลโวเทอร์มอล สูงกว่าผลกระทบจากการสังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล และวิธีSV3 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ส่วนวิธีSG2 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ในขั้นตอน

ต่างๆ พบว่าขั้นตอนการสังเคราะห์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงที่สุดมีสาเหตุหลักมาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

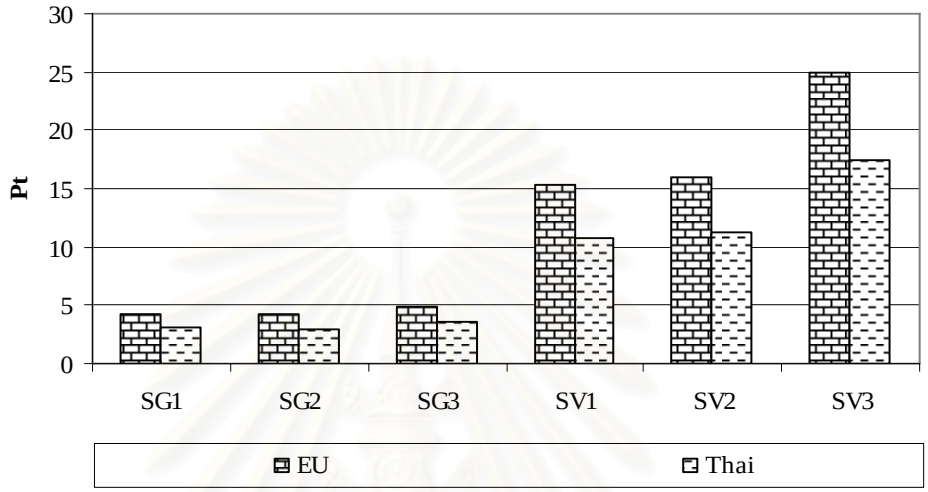


รูปที่ 4.13 ผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยใช้ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่างๆ ของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทยด้วยวิธี Eco-Indicator 99

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ซึ่งไฟฟ้าที่ใช้ผลิตมาจากถ่านหินลิกไนต์เหมือนกัน ใช้วิธี Eco-Indicator 99ในการประเมินวัฏจักรชีวิต เนื่องจากทั้งวิธี Eco-Indicator 95 และ Eco-Indicator 99 ต่างก็ให้ผลกระทบในกราฟเชิงเดี่ยวไปในทิศทางเดียวกัน

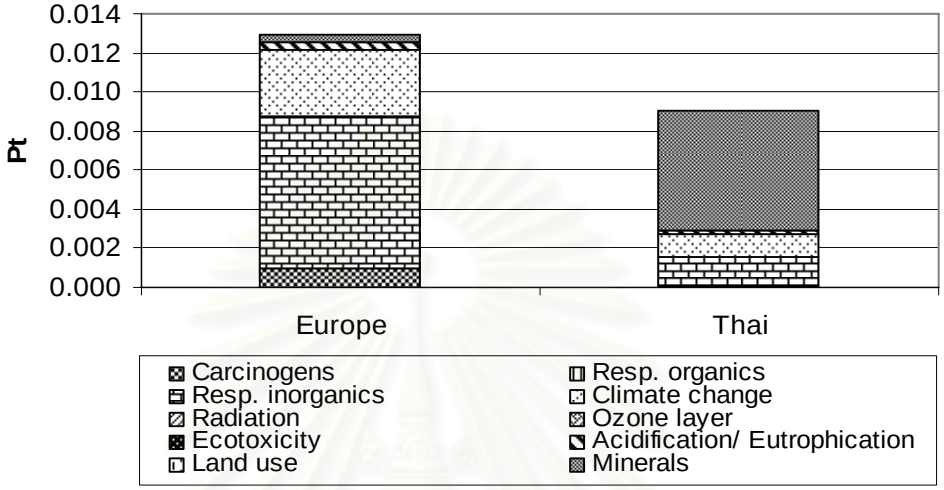


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบผลกระทบของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ด้วยวิธี Eco-Indicator 99

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าเมื่อใช้ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย ส่งผลทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการประเมินวัฏจักรชีวิตลดลง แต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับใช้ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป คือการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยวิธีโซลโวเทอร์มอลสูงกว่าผลกระทบจากการสังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล และวิธี SV3 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ส่วนวิธี SG2 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนต่างๆของการสังเคราะห์ 3 ขั้นตอนแล้วดังรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าเมื่อเปลี่ยนฐานข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปมาเป็นฐานข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทยนั้น ในขั้นตอนของการสังเคราะห์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดแต่จะลดลงมาเมื่อเทียบกับการใช้ฐานข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป แต่ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบและขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบมีค่าเท่าเดิม เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของพลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทยโดยผลิตมาจากถ่านหินลิกไนต์เหมือนกัน จะเห็นว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของพลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบด้านต่างๆจะเห็นว่าปัญหาด้านการ

ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจจากสารอนินทรีย์ และปัญหาด้านอุณหภูมิโลกร้อนขึ้น เป็นผลกระทบหลักจากการใช้ฐานข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป ส่วนการใช้ฐานข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทยก่อให้เกิดปัญหาด้านทรัพยากรสูงกว่า ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบผลกระทบของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย โดยใช้วิธี Eco-Indicator 99

จากการเปรียบเทียบผลกระทบของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย จะเห็นว่าข้อมูลไฟฟ้าจากประเทศไทยส่งผลกระทบน้อยกว่าเนื่องมาจากข้อมูลที่เก็บได้จากการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย (ในรูปของมลภาวะที่ปล่อยสู่บรรยากาศ ทั้งทางอากาศ ทางน้ำ และทางดิน) มีเพียงมลภาวะทางอากาศเท่านั้น ไม่ได้รวมถึงการขนส่งทั้งหมดที่เกิดขึ้น การใช้พลังงานในการผลิต จึงส่งผลให้เมื่อประเมินผลกระทบแบบรวมในรูปแบบกราฟเชิงเดี่ยวของข้อมูลไฟฟ้าจากประเทศไทยมีค่าน้อยกว่าข้อมูลไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป ดังตารางที่ 4.5 ดังนั้นจะเห็นว่าการเลือกใช้ฐานมูลมีความสำคัญมากและควรจะเลือกใช้ฐานข้อมูลที่มีความพร้อมและเป็นที่ยอมรับ การที่จะใช้ข้อมูลจากประเทศไทยนั้นควรจะมีการเก็บข้อมูลที่สมบูรณ์กว่านี้ ซึ่งตารางด้านล่างเป็นเพียงส่วนหนึ่งจากการเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินของประเทศไทย จะเห็นว่าเป็นเพียงข้อมูลที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเท่านั้น จึงส่งผลให้การประเมินผลกระทบการผลิตไฟฟ้าจากเมืองไทยต่ำกว่าการผลิตไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป แต่เมื่อประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรมีแนวโน้มเดียวกันกับใช้ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยโดยใช้ลิกไนต์ในการผลิต

	Type	Amount	Unit
Input	Lignite	0.898	kg
	Diesel	0.001	kg
	Lime stone	0.060	kg
	Electricity	0.071	kWh
Emission to Air	CO	1.34E-5	kg
	CO_2	8.67 E-2	kg
	N_2O	2.69 E-6	kg
	NO_X	3.97 E-4	kg
	NMVOC	1.35 E-6	kg
	CH_4	1.03 E-6	kg
	SO_2	2.11 E-4	kg
	Dust	3.44 E-6	kg
Product	**Electrical**	**1**	**kWh**

ที่มา : JEMAI- Thailand Final Report Electricity (2001)

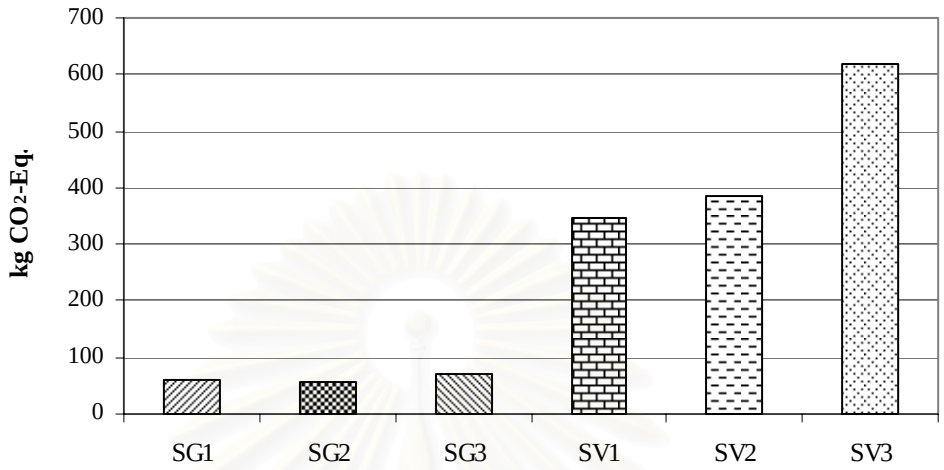
4.2.4 การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 95 กับวิธีต่างๆ

ในส่วนนี้พิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 ซึ่งรายงานผลในรูปปริมาณสารอ้างอิงเฉพาะกลุ่มของผลกระทบ เปรียบเทียบกับผลกระทบจากการประเมินด้วยวิธีอื่น เช่นวิธี IPCC และ วิธี EDIP เป็นต้น ซึ่งวิธีทั้งสองต่างก็รายงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปของปริมาณสารอ้างอิงเฉพาะกลุ่มเช่นกัน

- **การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไอออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 95 กับวิธี IPCC**

วิธี IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) เป็นวิธีที่รายงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านการก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกเพียงกลุ่มผลกระทบเดียวเนื่องจากเป็นวิธีที่ศึกษา

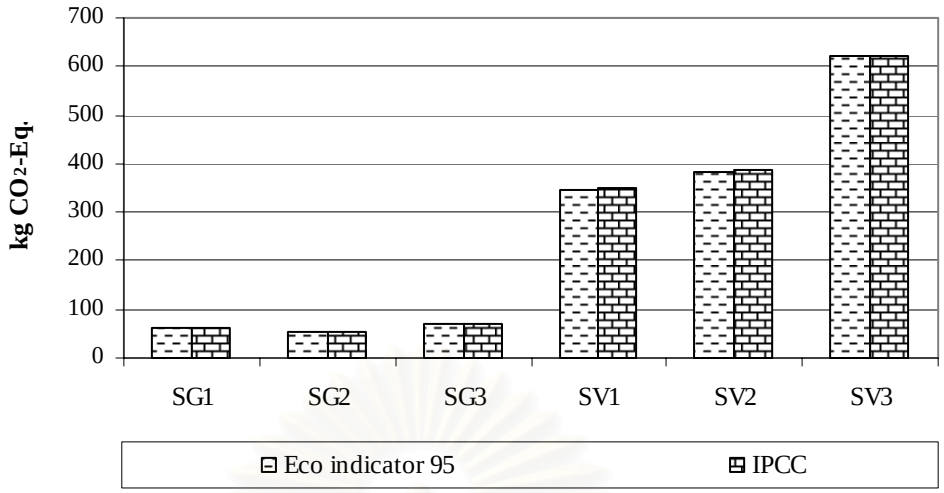
เกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก โดยรายงานในปริมาณอ้างอิงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นเดียวกันกับวิธี Eco-Indicator 95



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล โดยที่วิธีSV3 มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคิดเป็น 620 กิโลกรัมอ้างอิงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนวิธีSG2 มีปริมาณก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุดคิดเป็น 55 กิโลกรัมอ้างอิงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร กับวิธี IPCC จะเห็นว่า ทั้งวิธี Eco-Indicator 95 และ วิธี IPCC มีปริมาณอ้างอิงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกัน โดยที่วิธี IPCC มีปริมาณอ้างอิงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องมาจากมีวิธีการคิดคำนวณที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

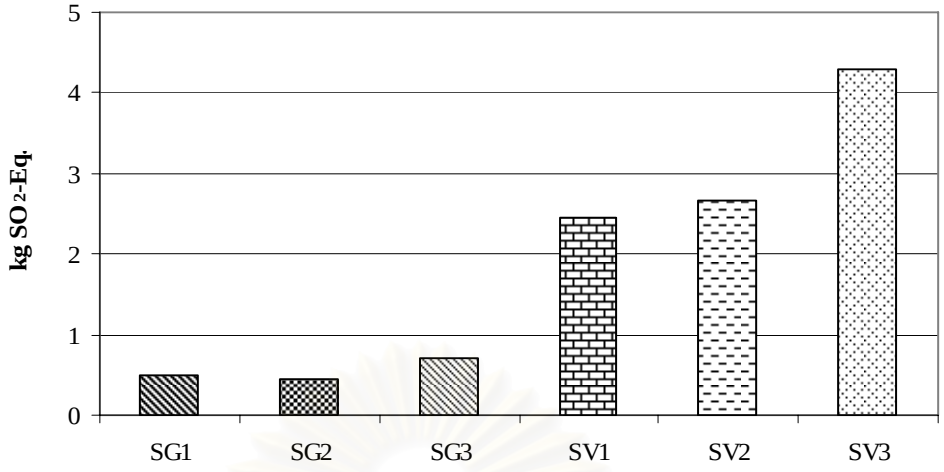


รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 กับวิธี IPCC

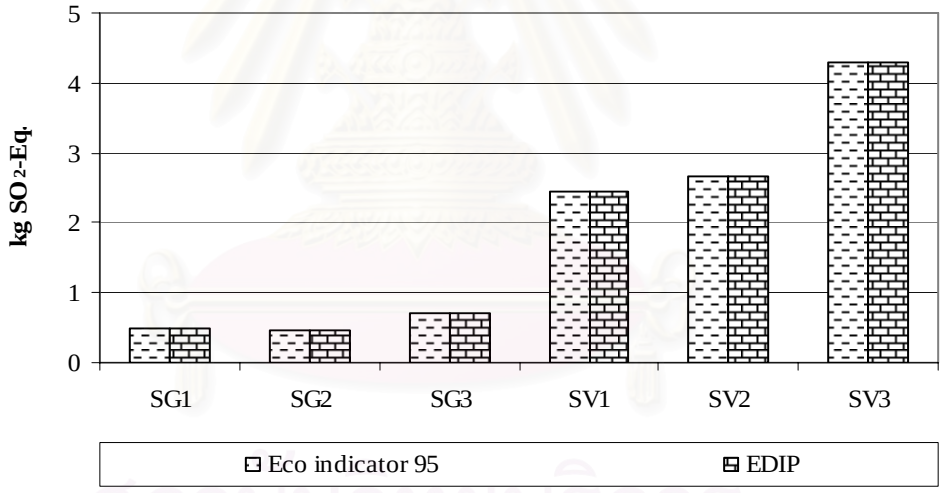
- **การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี Eco-Indicator 95 กับวิธี EDIP**

วิธี EDIP (Environmental Design of Industrial Products) เป็นวิธีที่รายงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านโดยมี 3 ด้านหลักคือ ด้านสุขภาพมนุษย์ ด้านระบบนิเวศ และด้านทรัพยากร เช่นเดียวกันกับวิธี Eco-Indicator แต่วิธี EDIP จะมีกลุ่มผลกระทบที่แตกต่างไปจากวิธี Eco-Indicator เช่น ดูผลกระทบในด้านของเสียที่เกิดขึ้น จากการประเมินผลกระทบด้วยวิธี Eco-Indicator 95 ปัญหาด้านการก่อให้เกิดฝนกรดซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ปัญหาหนึ่ง โดยที่ปัญหาในด้านนี้จะรายงานในปริมาณอ้างอิงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

เมื่อประเมินผลกระทบจะได้ว่าการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านการก่อให้เกิดฝนกรดสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลเจล โดยที่วิธี SV3 เกิดปัญหาด้านการก่อให้เกิดฝนกรดมากที่สุดคิดเป็น 4.29 กิโลกรัมอ้างอิงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ส่วนวิธี SG2 เกิดปัญหาด้านการก่อให้เกิดฝนกรดมากที่สุดคิดเป็น 4.5 กิโลกรัมอ้างอิงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดฝนกรดจากการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร กับวิธี EDIP ซึ่งทั้งวิธี Eco-Indicator 95 และ วิธี EDIP ต่างก็ใช้ปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นปริมาณสารอ้างอิงเช่นเดียวกัน ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่างก็มีปริมาณอ้างอิงของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เท่ากัน เนื่องมาจากมีวิธีการคิดคำนวณเหมือนกันกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดฝนกรดของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบผลกระทบด้านการก่อให้เกิดฝนกรดของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 กับวิธี EDIP

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

งานวิจัยนี้แสดงการหาต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล และวิธีโซลโวเทอร์มอล ซึ่งงานวิจัยนี้แสดงต้นทุนเฉพาะค่าสารเคมีต่างๆ และค่าไฟฟ้าในการผลิตเท่านั้น ไม่รวมถึงค่าใช้จ่ายในการบริหารการขาย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่างๆ ในตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี

โซลเจล และวิธีโซลโวเทอร์มอล ตามลำดับ โดยต้นทุนค่าสารเคมีคิดจากปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร และต้นทุนค่าไฟฟ้าจะคิดจากอัตราในการคิดค่าไฟฟ้าคิดแบบอัตราปกติ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเภทกิจการขนาดเล็ก แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธี SG 3 จะมีต้นทุนการสังเคราะห์สูงที่สุด โดยมีต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ประมาณ 985 บาท ต่อการสังเคราะห์ 25 กรัม วิธี SG1 และ SG2 มีต้นทุนการสังเคราะห์ประมาณ 910 และ 750 บาท ตามลำดับ

เมื่อวิเคราะห์หาต้นทุนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอลพบว่า ต้นทุนการสังเคราะห์ด้วยวิธี SV3 จะมีต้นทุนการสังเคราะห์ที่ต่ำที่สุดคิดเป็นประมาณ 1030 บาทต่อการสังเคราะห์ 25 กรัม และวิธี SV1 และ SV2 มีต้นทุนการสังเคราะห์ประมาณ 1750 และ 1400 บาทต่อการสังเคราะห์ 25 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่4.6 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีและไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร จำนวน 25กรัม โดยวิธีโซลเจล

สารเคมี	ต้นทุน(บาท)		
	SG1	SG2	SG3
TTIP	756	693.182	693.176
i-Propanol	110	12.542	
Ethanol			155.873
HNO_3	0.294	0.125	
HCl			12.543
H_2O	0.065	0.006	0.01
Methylcellulose			73.642
Electrical	43.313	40.244	50.171
Total	**909.67**	**746.10**	**985.42**

ตารางที่4.7 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีและไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร จำนวน 25กรัม โดยวิธีโซลโวเทอร์มอล

สารเคมี	ต้นทุน(บาท)		
	SV1	SV2	SV3
TNB	1160		
TTIP		693.42	693.18
Toluene	162.5	255.66	
Methanol	288	288	
Ethanol			106.48
N_2	1.44		
Ar		4.65	
H_2O			0.01
Electrical	135.89	164.66	227.9
Total	**1747.83**	**1406.38**	**1027.57**

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SG2 มีต้นทุนในการสังเคราะห์ต่ำที่สุด เนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีต้นทุนต่ำและค่าไฟฟ้าที่ต่ำ ส่วนการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยวิธี SV1 มีต้นทุนในการสังเคราะห์สูงที่สุด มาจากสารตั้งต้นที่ใช้มีราคาแพงและค่าไฟฟ้าที่สูง

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีและไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

วิธีการสังเคราะห์	ต้นทุนการสังเคราะห์(บาท)
SG1	909.67
SG2	746.10
SG3	985.42
SV1	1747.83
SV2	1406.38
SV3	1207.57

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) เป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมสำหรับการประเมินผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นวิธีที่มุ่งเน้นการประเมินผลิตภัณฑ์โดยพิจารณารวมตลอดทั้งชีวิตของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังสามารถระบุสิ่งที่ควรปรับปรุง อันเป็นเป้าหมายของอุตสาหกรรมในการลดการใช้ทรัพยากรต่างๆ รวมถึงของเสียที่ถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจในวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งมีนักวิจัยทำการศึกษาการสังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรด้วยวิธีโซลเจล (Sol-Gel) 3 วิธี และการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) 3 วิธี โดยใช้โปรแกรม SimaPro® 6.0 ในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ทำการวิเคราะห์ผลตามมาตรฐาน ISO และสามารถรายงานผลเป็นรูปภาพ และตาราง ทำให้ง่ายต่อความเข้าใจ และใช้วิธี Eco-Indicator 95 และวิธี Eco-Indicator 99 เป็นวิธีในการวิเคราะห์ผลกระทบ

จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรโดยวิธีโซลเจลและโซลโวเทอร์มอล พบว่าผลกระทบจากการสังเคราะห์โดยวิธีโซลโวเทอร์มอลสูงกว่าผลกระทบจากการสังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนต่างๆของการสังเคราะห์คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบ และขั้นตอนการสังเคราะห์ พบว่าขั้นตอนการสังเคราะห์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด โดยที่ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ และขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับขั้นตอนการสังเคราะห์ ซึ่งผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมาจากขั้นตอนในการสังเคราะห์เป็นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ ส่วนขั้นตอนในการขนส่งวัตถุดิบนั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เนื่องจากปริมาณในการขนส่งน้อยรวมถึงระยะทางที่ไม่ไกลมาก

เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสหภาพยุโรปกับพลังงานไฟฟ้าจากประเทศไทย จะเห็นว่าข้อมูลไฟฟ้าจากประเทศไทยส่งผลกระทบน้อย เนื่องมาจากการเก็บข้อมูลไฟฟ้าจากประเทศไทย จะเห็นว่าเป็นเพียงข้อมูลที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเท่านั้น จึงส่งผลให้การประเมินผลกระทบการผลิตไฟฟ้าจากเมืองไทยต่ำกว่าการผลิตไฟฟ้าจากสหภาพยุโรป การที่จะใช้

ข้อมูลจากประเทศไทยนั้นควรจะมีการเก็บข้อมูลที่สมบูรณ์กว่านี้ ดังนั้นถ้าจะมีการสร้างข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย ต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลให้สมบูรณ์กว่านี้ ทั้งในด้านการขนส่ง การใช้งาน รวมถึงการทำลายเศษซากวัตถุดิบด้วย

จากการพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้วิธี Eco-Indicator 95 ซึ่งรายงานผลในรูปปริมาณสารอ้างอิงเฉพาะกลุ่มของผลกระทบ เปรียบเทียบกับผลกระทบจากการประเมินด้วยวิธีอื่น เช่นวิธี IPCC และ วิธี EDIP เป็นต้น ซึ่งวิธีทั้งสองต่างก็รายงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปของปริมาณสารอ้างอิงเฉพาะกลุ่มเช่นกัน พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าใกล้เคียงกันจากการใช้วิธีที่ต่างกันเล็กน้อยในการประเมินและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

เนื่องการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการประเมินผลการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรทั้งหมดในงานวิจัยนี้เก็บข้อมูลจากการทดลองของห้องปฏิบัติการ ซึ่งในการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ในแต่ละครั้งจะได้ผลผลิตในปริมาณน้อย แต่ในทางกลับกันในการสังเคราะห์นั้นใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมากซึ่งไม่สอดคล้องกับการสังเคราะห์สารในขนาดอุตสาหกรรม จึงทำให้ผลกระทบส่วนใหญ่เกิดในขั้นตอนการสังเคราะห์ซึ่งเป็นผลจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังนั้นถ้าการสังเคราะห์ไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรได้ขยายไปสู่ระดับอุตสาหกรรม ควรทำการประเมินวัฏจักรชีวิตอีกครั้งเพื่อความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งคาดว่าผลกระทบจากขั้นตอนต่างๆในการสังเคราะห์ นั้นในส่วนของขั้นตอนการใช้วัตถุดิบและขั้นตอนการขนส่งวัตถุดิบจะมีค่าคงที่ แต่ขั้นตอนการสังเคราะห์คาดว่าจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากผลิตสารได้จำนวนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การประเมินผลกระทบในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฐานข้อมูลจากโปรแกรมSimaPro®6.0 ซึ่งเป็นฐานข้อมูลจากต่างประเทศมาประมวลผล เพื่อความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่เหมาะสมกับประเทศไทย จึงควรทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสารพื้นฐานของประเทศไทยที่สมบูรณ์เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการประมวลผลที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

A.J. Maira, K.L. Yeung, J. Soria, J.M. Coronado,C. Belver, C.Y. Lee, V. Augugliaro. Gas-phase photo-oxidation of toluene using nanometer-size TiO_2 catalysts, Applied Catalysis B: Environmental 29 (2001): 327–336.

Akira Fujishima, Tata N. Rao, Donald A. Tryk. Titanium dioxide photocatalysis, Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews (2000) : 1–21.

Arnold Tukker, Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment, Environmental Impact Assessment Review 20 (2000): 435–456.

C. Su, B.-Y. Hong, C.-M. Tseng. Sol–gel preparation and photocatalysis of titanium dioxide, Catalysis Today 96 (2004): 119–126.

Chatpaisalsakul Waraporn. Effect of surface defect of titanium dioxide on photocatalytic activity for water decomposition to hydrogen, M.S. Thesis in Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2006.

Chomkumsri Kirana. Life Cycle Assessment of electricity generating (thermal and hydro power plant) of Thailand using Simapro5.0, M.S. Thesis in Chemical Engineering, Kasetsart University, 2003.

Chung-Sik Kim, Byung Kee Moon, Jong-Ho Park, Su Tae Chung, Se-Mo Son. Synthesis of nanocrystalline TiO_2 in toluene by a solvothermal route, Journalof Crystal Growth 254 (2003): 405–410.

D.W. Pennington, J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg, G. Rebitzer. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice, Environment International 30 (2004): 721– 739.

G. Rebitzer, T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W.-P. Schmidt, S. Suh, B.P. Weidema, D.W. Pennington. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis,and applications, Environment International 30 (2004): 701– 720.

Hiroshi Kominami, Jun-ichi Kato, Shin-ya Murakami, Yoshinori Ishii, Masaaki Kohno, Kei-ichi Yabutani, Takuhei Yamamoto, Yoshiya Kera, Masashi Inoue,Tomoyuki Inui, Bunsho Ohtani. Solvothermal syntheses of semiconductor photocatalysts of ultra-high activities, Catalysis Today 84 (2003): 181–189.

M. Asif, T. Muneer, R. Kelley. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland, Building and Environment 42 (2007): 1391–1394.

Min-Kyeong Yeo, Misook Kang. Photodecomposition of bisphenol A on nanometer sized TiO2 thin film and the associated biological toxicity to zebrafish (Daniorerio) during and after photocatalysis, WAT E R RE S EA R C H 40 (2006):1906 – 1914.

Misook Kang. Synthesis of Fe/TiO_2 photocatalyst with nanometer size by solvothermal method and the effect of H_2O addition on structural stability and photodecomposition of methanol, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 197 (2003): 173–183.

Misook Kang, Jong Ho Lee, Sang-Hyeun Lee, Chan-Hwa Chung, Ki June Yoon, Kenji Ogino, Seizo Miyata, Suk-Jin Choung. Preparation of TiO2 film by the MOCVD method and analysis for decomposition of trichloroethylene using in situ FT-IR spectroscopy, Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 193(2003): 273–283.

Mohammad Hossein Habibi, Mojtaba Nasr Esfahani and Terry A. Egerton. Photochemical Characterization and Photocatalytic Properties of a Nanostructure Composite TiO_2 Film, International Journal of Photoenergy Volume 2007.

Ninpetch Ratchadaporn. Effect of calcination conditions on properties and photocatalytic activities of titanium dioxide and mixtures of titanium dioxide and oxide of group IVA and IVB elements, M.S. Thesis in Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2004.

Paoluglam Jirunya. Life cycle assessment of petrochemical products: polystyrene and polyurethane foam, M.S. Thesis in The Petroleum and Petrochemical College,Chulalongkorn University, 2005.

Pokasem Seubsakul. Effect of cerium dioxide addition on the properties and photocatalytic activities of CeO_2/TiO_2 catalysts for photocatalytic oxidation of ethylene, M.S. Thesis in Chemical Engineering, Chulalongkorn University,2005.

Shipeng Qiu, Samar J. Kalita. Synthesis processing and characterization of nanocrystalline titanium dioxide, Materials Science and Engineering A 435-436 (2006): 327–332.

Wachiraphan Payakgul, Okorn Mekasuwandumrong, Varong Pavarajarn, Piyasan Praserthdam. Effects of reaction medium on the synthesis of TiO_2 nanocrystals by thermal decomposition of titanium (IV) n-butoxide, CeramicsInternational 31 (2005): 391–397.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก ค่าแฟกเตอร์ของ Eco-Indicator 95

ตาราง ก1 ค่าแฟกเตอร์ของก๊าซเรือนกระจกของ Eco-Indicator 95 (กิโลกรัม CO_2)

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	1,1,1-trichloroethane	100	kg
Airborne emission	CFC-11	3400	kg
Airborne emission	CFC-113	4500	kg
Airborne emission	CFC-114	7000	kg
Airborne emission	CFC-115	7000	kg
Airborne emission	CFC-116	6200	kg
Airborne emission	CFC-12	7100	kg
Airborne emission	CFC-13	13000	kg
Airborne emission	CFC-14	4500	kg
Airborne emission	CFC (hard)	7100	kg
Airborne emission	CFC (soft)	1600	kg
Airborne emission	CO_2	1	kg
Airborne emission	CO_2 (soft)	1	kg
Airborne emission	Dichloriomethane	15	kg
Airborne emission	HALON-1211	4900	kg
Airborne emission	HALON-1301	4900	kg
Airborne emission	HCFC-123	90	kg
Airborne emission	HCFC-141b	440	kg
Airborne emission	HCFC-141b	580	kg
Airborne emission	HCFC-142b	1800	kg
Airborne emission	HCFC-22	1600	kg
Airborne emission	HFC-125	3400	kg
Airborne emission	HFC-134a	1200	kg
Airborne emission	HFC-143a	3800	kg
Airborne emission	HFC-152a	150	kg
Airborne emission	Methane	11	kg

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	N_2O	270	kg
Airborne emission	Tetrachloromethane	1300	kg
Airborne emission	Trichloromethane	25	kg

ตาราง ก2 ค่าแฟกเตอร์ของการลดลงของชั้นโอโซนของ Eco-Indicator 95 (กิโลกรัม CFC)

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	1,1,1-trichloroethane	0.12	kg
Airborne emission	CFC-11	1	kg
Airborne emission	CFC-113	1.07	kg
Airborne emission	CFC-114	0.8	kg
Airborne emission	CFC-115	0.5	kg
Airborne emission	CFC-12	1	kg
Airborne emission	CFC-13	1	kg
Airborne emission	CFC (hard)	1	kg
Airborne emission	CFC (soft)	0.055	kg
Airborne emission	HALON-1201	1.4	kg
Airborne emission	HALON-1202	1.25	kg
Airborne emission	HALON-1211	4	kg
Airborne emission	HALON-1301	16	kg
Airborne emission	HALON-2311	0.14	kg
Airborne emission	HALON-2401	0.25	kg
Airborne emission	HALON-2402	7	kg
Airborne emission	HCFC-123	0.02	kg
Airborne emission	HCFC-124	0.022	kg
Airborne emission	HCFC-141b	0.11	kg
Airborne emission	HCFC-142b	0.065	kg
Airborne emission	HCFC-22	0.055	kg
Airborne emission	HCFC-225ca	0.025	kg

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	HCFC-225cb	0.033	kg
Airborne emission	Methyl bormide	0.6	kg
Airborne emission	Tetrachloromethane	1.08	kg

ตาราง ก3 ค่าแฟกเตอร์ของการก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งของ Eco-Indicator 95 (กิโลกรัม B(a))

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	Benzene	0.000044	kg
Airborne emission	CxHy aromatic	0.000044	kg
Airborne emission	Metals	0.0001786	kg
Airborne emission	Ni	0.0044	kg
Airborne emission	PAH’s	0.4792	kg
Airborne emission	Acrylonitrile	0.00022	kg
Airborne emission	As	0.044	kg
Airborne emission	Bebzo(a)pyrene	1	kg
Airborne emission	Cr(VI)	0.44	kg
Airborne emission	Ethylbenzene	0.000044	kg
Airborne emission	Floranthene	1	kg
Airborne emission	Tar	0.000044	kg
Airborne emission	Vinyl chloride	0.000011	kg

ตาราง ก4 ค่าแฟกเตอร์ของการก่อให้เกิดฝนกรดของ Eco-Indicator 95 (กิโลกรัม SO_2)

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	Ammonia	1.88	kg
Airborne emission	HCk	0.88	kg
Airborne emission	HF	1.6	kg
Airborne emission	NO_x	0.7	kg
Airborne emission	No_x (as NO_2)	0.7	kg

Component	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	SO_2	1	kg
Airborne emission	SO_x	1	kg
Airborne emission	NO	1.07	kg
Airborne emission	NO_2	0.7	kg

ตาราง ก5 ค่าแฟกเตอร์ของการลดลงของพลังงานของ Eco-Indicator 95 (เมกกะจูล LHV)

Component	Substance	Factor	Unit
Raw Material	Coal ETH	18	kg
Raw Material	Crude oil ETH	42.6	kg
Raw Material	Lignite ETH	8	kg
Raw Material	Natural gas (vol)	36.6	m^3
Raw Material	Natural gas ETH	35	m^3
Raw Material	Pot.energy hydropower	1	MJ
Raw Material	Unspecfied energy	1	MJ
Raw Material	Uranium (in ore)	45100	kg
Raw Material	Wood	15.3	kg
Raw Material	Wood (feed stock)	15.3	kg
Raw Material	Crude oil (feed stock)	41	kg
Raw Material	Energy (undef.)	1	MJ
Raw Material	Energy from hydro power	1	MJ
Raw Material	Natural gas (feed stock)	35	kg
Raw Material	Steam from waste incineration	1	MJ
Raw Material	Barrange water	0.01	kg
Raw Material	Biomass (feed stock)	1	MJ
Raw Material	Energy from coal	1	MJ
Raw Material	Energy from lignite	1	MJ
Raw Material	Energy from natural gas	1	MJ
Raw Material	Energy from oil	1	MJ

Component	Substance	Factor	Unit
Raw Material	Energy from uranium	1	MJ
Raw Material	Energy from wood	1	MJ
Raw Material	Energy recovery	1	MJ
Raw Material	Gas from oil production	1	m^3
Raw Material	Lignite	10	kg
Raw Material	Methane	35.9	kg
Raw Material	Natural gas	30.3	kg
Raw Material	Natural gas FAL	46.8	kg
Raw Material	Uranium (ore)	1110	kg
Raw Material	Uranium FAL	2291	g
Raw Material	Wood and wood waste FAL	9.5	kg
Raw Material	Petroleum gas ETH	35	m^3

ตาราง ก6 ค่าแฟกเตอร์ของขนาดของผลกระทบ (Normalization) และ ค่าน้ำหนัก (Weighting) ของ Eco-Indicator 95

Impact category	Normailization	Weighting
Greenhouse	0.0000765	2.5
Ozone layer	1.08	100
Acidification	0.00888	10
Eutrophication	0.0262	5
Heavy metal	18.4	5
Carcinogens	92	10
Winter smog	0.0106	5
Summer smog	0.0558	2.5
Pesticides	1.04	25
Energy resource	0.00000629	0
Solid waste	0	0

ภาคผนวก ข ค่าแฟกเตอร์ของ Eco-Indicator 99

ตาราง ข1 ค่าแฟกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของ Eco-Indicator 99 (DALYs)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	CO_2	2.1E-7	kg
Airborne emission	CO_2 (non-fossil)	2.1E-7	kg
Airborne emission	HOLON-1301	-0.0071	kg
Airborne emission	Methane	4.4E-6	kg
Airborne emission	N_2O	6.9E-5	kg
Airborne emission	CFC-14	1.4E-3	kg
Airborne emission	1,1,1-trichloroethane	-0.000043	kg
Airborne emission	CF31	2.1E-7	kg
Airborne emission	CFC-11	2.2E-4	kg
Airborne emission	CFC-113	6.3E-4	kg
Airborne emission	CFC-116	2.0E-3	kg
Airborne emission	CFC-12	1.4E-3	kg
Airborne emission	CO2 (fossil)	2.1E-7	kg
Airborne emission	dichloromethane	1.9E-6	kg
Airborne emission	HCFC-123	6.6E-6	kg
Airborne emission	HCFC-124	8.5E-5	kg
Airborne emission	HCFC-141a	5.2E-5	kg
Airborne emission	HCFC-142b	3.4E-4	kg
Airborne emission	HCFC-22	2.8E-4	kg
Airborne emission	HFC-125	5.7E-4	kg
Airborne emission	HFC-134	2.1E-4	kg
Airborne emission	HFC-134a	2.7E-4	kg
Airborne emission	HFC-143	6.3E-5	kg
Airborne emission	HFC-143a	7.5E-4	kg
Airborne emission	HFC-152a	2.9E-5	kg
Airborne emission	HFC-227ea	5.9E-4	kg

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	HFC-23	2.6E-3	kg
Airborne emission	HFC-236fa	1.4E-3	kg
Airborne emission	HFC-245ca	1.2E-4	kg
Airborne emission	HFC-32	1.4E-4	kg
Airborne emission	HFC-41	3.1E-5	kg
Airborne emission	HFC-4310 mee	2.7E-4	kg
Airborne emission	Perfluorbutane	1.5E-3	kg
Airborne emission	Perfluorcyclobutane	1.9E-3	kg
Airborne emission	Perfluorhexane	1.6E-3	kg
Airborne emission	Perfluorpropane	1.7E-3	kg
Airborne emission	Perfluorpentane	1.5E-3	kg
Airborne emission	SF_6	5.3E-3	kg
Airborne emission	Tetrachloromethane	-0.00026	kg
Airborne emission	trichloromethane	8.3E-7	kg

ตาราง ข2 ค่าแฟกเตอร์ของการลดลงของโอโซนของ Eco-Indicator 99 (DALYs)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	CO_2	2.1E-7	kg
Airborne emission	CO_2 (non-fossil)	2.1E-7	kg
Airborne emission	HOLON-1301	-0.0071	kg
Airborne emission	Methane	4.4E-6	kg
Airborne emission	N_2O	6.9E-5	kg
Airborne emission	CFC-14	1.4E-3	kg
Airborne emission	1,1,1-trichloroethane	-0.000043	kg
Airborne emission	CFC-11	2.2E-4	kg
Airborne emission	CFC-113	6.3E-4	kg
Airborne emission	CFC-116	2.0E-3	kg
Airborne emission	CFC-12	1.4E-3	kg

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	CO_2 (fossil)	2.1E-7	kg
Airborne emission	dichloromethane	1.9E-6	kg
Airborne emission	HCFC-123	6.6E-6	kg
Airborne emission	HCFC-124	8.5E-5	kg
Airborne emission	HCFC-141a	5.2E-5	kg
Airborne emission	HCFC-142b	3.4E-4	kg
Airborne emission	HCFC-22	2.8E-4	kg
Airborne emission	HFC-125	5.7E-4	kg
Airborne emission	HFC-134	2.1E-4	kg
Airborne emission	HFC-134a	2.7E-4	kg
Airborne emission	HFC-143	6.3E-5	kg
Airborne emission	HFC-143a	7.5E-4	kg
Airborne emission	HFC-152a	2.9E-5	kg

ตาราง ข3 ค่าแฟกเตอร์ของการก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งของ Eco-Indicator 99 (DALYs)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	1,2-dibromoethane	2.6E-4	kg
Airborne emission	1,2-dichloroethane	2.9E-5	kg
Airborne emission	1,3-butadiene	1.58E-5	kg
Airborne emission	1,4-dioxane	1.39E-7	kg
Airborne emission	2,4,6-trichlorophenol	2.05E-6	kg
Airborne emission	Acetaldehyde	2.16E-7	kg
Airborne emission	Acrylonitrile	1.69E-5	kg
Airborne emission	Alpha-HCH	3.00E-4	kg
Airborne emission	BCME	7.48E-3	kg
Airborne emission	Benzene	2.50E-6	kg
Airborne emission	Benzo(a)anthracene	5.86E-2	kg
Airborne emission	Benzo(a)pyrene	3.98E-3	kg

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	Benzotrichloride	6.6E-3	kg
Airborne emission	Benzylechloride	1.04E-5	kg
Airborne emission	Beta-HCH	9.99E-5	kg
Airborne emission	Bromodichloromethane	8.76E-6	kg
Airborne emission	Cd	1.35E-1	kg
Airborne emission	Cr(VI)	1.75	kg
Airborne emission	di(2-ethylehexyl)phthalate	3.38E-5	kg
Airborne emission	dibenz(a)anthracene	3.1E1	kg
Airborne emission	Dichlrvos	4.36E-7	kg
Airborne emission	Dioxin(TEQ)	3.15E-5	kg
Airborne emission	Epichlorohydrin	1.79E2	kg
Airborne emission	Ethylene oxide	3.02E-7	kg
Airborne emission	Formadehyde	1.83E-4	kg
Airborne emission	Gamma-HCH(Lindane)	9.91E-7	kg
Airborne emission	Heavy metals	0.0006969	kg
Airborne emission	Hexachlorobenzene	8.25E-2	kg
Airborne emission	Metals	0.0006969	kg
Airborne emission	Ni	2.35E-2	kg
Airborne emission	Ni-subsulfide	9.48E-2	kg
Airborne emission	PAH’s	1.7E-4	kg
Airborne emission	Particle diesel soot	9.78E-6	kg
Airborne emission	PCB’s	1.97E-3	kg
Airborne emission	Pentachlorophenol	7.21E-3	kg
Airborne emission	Propyleneoxide	1.17E-5	kg
Airborne emission	Styrene	2.44E-8	kg
Airborne emission	Tetrachloroethane	4.82E-7	kg
Airborne emission	Tetrachloromethane	8.38E-4	kg
Airborne emission	Trichloromethane	2.63E-5	kg
Airborne emission	Vinyl chloride	2.09E-7	kg

Compartment	Substance	Factor	Unit
Emission to soil	1,2-dibromoethane	3.81E-3	kg
Emission to soil	1,2-dichloroethane	4.58E-	kg
Emission to soil	1,3-butadiene	41.2E-5	kg
Emission to soil	1,4-dioxane	3.1E-7	kg
Emission to soil	2,4,6-trichlorophenol	2.71E-6	kg
Emission to soil	Acetaldehyde	4.77E-7	kg
Emission to soil	Acrylonitrile	7.01E-5	kg
Emission to soil	Alpha-HCH	2.32E-2	kg
Emission to soil	As	1.32E-2	kg
Emission to soil	BCME	1.68E-2	kg
Emission to soil	Benzene	1.33E-5	kg
Emission to soil	Benzo(a)anthracene	1.6E-1	kg
Emission to soil	Benzo(a)pyrene	2.06E-3	kg
Emission to soil	Benzotrichloride	1.32E-1	kg
Emission to soil	Benzylechloride	4.16E-5	kg
Emission to soil	Beta-HCH	7.36E-3	kg
Emission to soil	Bromodichloromethane	7.82E-5	kg
Emission to soil	Cd	3.98E-3	kg
Emission to soil	Cr(VI)	2.71E-1	kg
Emission to soil	di(2-ethylehexyl)phthalate	3.18E-7	kg
Emission to soil	dibenz(a)anthracene	2.44E1	kg
Emission to soil	Dichlrvos	2.25E-5	kg
Emission to soil	Dioxin(TEQ)	7.06	kg
Emission to soil	Epichlorohydrin	1.3E-6	kg
Emission to soil	Ethylene oxide	2.38E-3	kg
Emission to soil	Formadehyde	1.83E-6	kg
Emission to soil	Gamma-HCH(Lindane)	8.64E-3	kg
Emission to soil	PCB’s	2.04E-2	kg
Emission to soil	Pentachlorophenol	1.26E-5	kg

Compartment	Substance	Factor	Unit
Emission to soil	Propyleneoxide	1.4E-4	kg
Emission to soil	Styrene	2.09E-8	kg
Emission to soil	Tetrachloroethane	6E-6	kg
Emission to soil	Tetrachloromethane	3.99E-2	kg
Emission to soil	Trichloromethane	4.12E-6	kg
Emission to soil	Vinyl chloride	7.67E-7	kg
Waterborne emission	1,2-dibromoethane	1.24E-3	kg
Waterborne emission	1,2-dichloroethane	2.98E-5	kg
Waterborne emission	1,3-butadiene	3.37E-4	kg
Waterborne emission	1,4-dioxane	9.21E-7	kg
Waterborne emission	2,4,6-trichlorophenol	1.05E-5	kg
Waterborne emission	Acetaldehyde	9.23E-7	kg
Waterborne emission	Acrylonitrile	4.16E-5	kg
Waterborne emission	Alpha-HCH	6.85E-3	kg
Waterborne emission	As	6.57E-2	kg
Waterborne emission	BCME	1.54E-2	kg
Waterborne emission	Benzene	4.12E-6	kg
Waterborne emission	Benzo(a)anthracene	6.58E-1	kg
Waterborne emission	Benzo(a)pyrene	2.99	kg
Waterborne emission	Benzotrichloride	9.46E-3	kg
Waterborne emission	Benzylechloride	1.98E-5	kg
Waterborne emission	Beta-HCH	5.75E-3	kg
Waterborne emission	Bromodichloromethane	9.36E-6	kg
Waterborne emission	Cd	7.12E-2	kg
Waterborne emission	Cr(VI)	3.43E-1	kg
Waterborne emission	di(2-ethylehexyl)phthalate	6.64E-4	kg
Waterborne emission	dibenz(a)anthracene	4.07E1	kg
Waterborne emission	Dichlrvos	1.17E-5	kg
Waterborne emission	Dioxin(TEQ)	2.02E3	kg

Compartment	Substance	Factor	Unit
Waterborne emission	Epichlorohydrin	9.9E-7	kg
Waterborne emission	Ethylene oxide	1.39E-4	kg
Waterborne emission	Formadehyde	4.97E-6	kg
Waterborne emission	Gamma-HCH(Lindane)	4.16E-3	kg
Waterborne emission	Ni	3.11E-2	kg
Waterborne emission	Ni-subsulfide	5.02E-3	kg
Waterborne emission	PAH's	1.00E-2	kg
Waterborne emission	PCB's	3.91E-2	kg
Waterborne emission	Pentachlorophenol	2.99E-2	kg
Waterborne emission	Propyleneoxide	1.74E-5	kg
Waterborne emission	Styrene	1.22E-6	kg
Waterborne emission	Tetrachloroethane	4.27E-7	kg
Waterborne emission	Tetrachloromethane	8.29E-4	kg
Waterborne emission	Trichloromethane	2.6E-5	kg
Waterborne emission	Vinyl chloride	2.84E-7	kg

ตาราง ข4 ค่าแฟกเตอร์ของการก่อให้เกิดภาวะความเป็นกรดของ Eco-Indicator 99 ($PDF*m^2$)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Airborne emission	Ammonia	15.57	kg
Airborne emission	NO_x	5.713	kg
Airborne emission	NO_x (as NO_2)	5.713	kg
Airborne emission	SO_2	1.041	kg
Airborne emission	SO_x (as SO_2)	1.041	kg
Airborne emission	NO	8.789	kg
Airborne emission	NO_2	5.713	kg
Airborne emission	SO_3	0.8323	kg

ตาราง ข5 ค่าแฟกเตอร์ของการลดลงพลังงานของ Eco-Indicator 99 (MJ surplus)

Compartment	Substance	Factor	Unit
Raw material	Coal ETH	0.155	kg
Raw material	Crude oil ETH	6.13	kg
Raw material	Natural gas (vol)	5.49	m^3
Raw material	Naturl gas ETH	5.25	m^3
Raw material	Crude oil (feed stock)	5.90	kg
Raw material	Natural gas (feed stock)	5.25	m^3
Raw material	Coal	0.252	kg
Raw material	Crude oil	5.90	kg
Raw material	Crude oil FAL	6.04	kg
Raw material	Crude oil IDEMAT	6.15	kg
Raw material	Energy from coal	8.59E-3	MJ
Raw material	Energy from natural gas	1.50E-1	MJ
Raw material	Energy from coal	0.144	MJ
Raw material	Natural gas	4.55	kg
Raw material	Natural gas FAL	7.02	kg
Raw material	Natural gas (feed stock)	7.02	kg
Raw material	Crude oil (feed stock)	6.04	kg
Raw material	Coal FAL	0.227	kg

ตาราง ข6 ค่าแฟกเตอร์ของผลกระทบต่อกลุ่มสุขภาพมนุษย์ ของ Eco-Indicator 99

Impact Category	Unit	Factor
Carcinogens	DALY	1
Resp.organics	DALY	1
Resp.inorganics	DALY	1
Climate change	DALY	1
Radiation	DALY	1
Ozone layer	DALY	1

ตาราง ข7 ค่าแฟกเตอร์ของผลกระทบต่อกลุ่มระบบนิเวศ ของ Eco-Indicator 99

Impact Category	Unit	Factor
Ecotoxicity	PAF x m^2 x yr	0.1
Acidification/Eutrophication	PAF x m^2 x yr	1
Land use	PAF x m^2 x yr	1

ตาราง ข8 ค่าแฟกเตอร์ของผลกระทบต่อกลุ่มการลดลงของทรัพยากร ของ Eco-Indicator 99

Impact Category	Unit	Factor
Minerals	MJ surplus	1

ตาราง ข9 ค่าแฟกเตอร์ของขนาดของผลกระทบ (Normalization) และ ค่าน้ำหนัก (Weighting) ของ Eco-Indicator 99

Damage Category	Normalization	Weighting
Human Health	121	400
Ecosystem quality	2.22E-4	400
Resources	6.77E-3	200

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสิทธิกร ผลพอตน เกิดวันพุธที่ 13 เมษายน พ.ศ.2526 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2547 หลังจากนั้นในปีการศึกษา 2548 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย