

การประมาณค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและการประยุกต์ใช้นุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน



นางสาวจันทนภา สหุนิต

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-5532-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ESTIMATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS AND APPLICATION OF SILICON DIOXIDE
NANO PARTICLES

Miss Chantanapha Sahunin

สถาบันวิทยบริการ
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

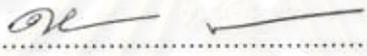
Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-5532-5

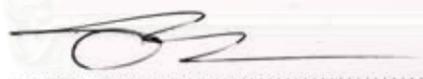
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และการประยุกต์ ใช้อุณหภูมิซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน
โดย	นางสาวจันทนภา สุนิล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

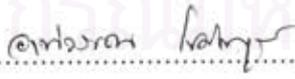

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

สุรเทพ เขียวหอม
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์)


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

จันทนภา สหุนิต : การประมาณค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและการประยุกต์ใช้อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน. (ESTIMATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS AND APPLICATION OF SILICON DIOXIDE NANO PARTICLES) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร.สุรเทพ เขียวหอม 114 หน้า. ISBN 974-17 -5532-5.

ซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโนเป็นผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่สำคัญยิ่งในทางอุตสาหกรรม ซึ่งพบว่ามีให้นำซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโนไปประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นการใช้ในด้านเป็นสารตัวเติมในวัสดุยาง เป็นตัวประสานในซีเมนต์และคอนกรีต เป็นสารตัวเติมในด้านทันตกรรม รวมไปถึงยังมีการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนอีกด้วย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการประมาณค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนรวมถึงพิจารณาวิธีการผลิตและการประยุกต์ใช้ที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาขั้นตอนการสังเคราะห์และเตรียมวัตถุดิบในการผลิตซิลิกอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการทางโซล-เจล กระบวนการ Flame aerosol และสเปรย์ไฟโรไลซิส ในส่วนของการประเมินบัญชีข้อมูลนั้นจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และแสดงผล นอกจากนี้ในงานวิจัยยังทำการศึกษาการประเมินความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นด้วย โดยผลจากการศึกษาพบว่า กระบวนการ Flame aerosol จะส่งผลในด้านลบต่อสุขภาพของมนุษย์และคุณภาพของระบบนิเวศน์รวมไปถึงการใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด รองลงมาจะเป็นกระบวนการโซล-เจลและสเปรย์ไฟโรไลซิสตามลำดับ ในส่วนของการประเมินความเสี่ยงนั้นพบว่ากระบวนการสเปรย์ไฟโรไลซิสจะมีความเสี่ยงในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบสูง ส่วนในขั้นตอนกระบวนการผลิตนั้นพบว่ากระบวนการ Flame aerosol จะมีความเสี่ยงสูง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิติศ.....จันทนภา สหุนิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....สุรเทพ เขียวหอม.....

#4770239021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: SiO₂ NANOPARTICLE / ENVIRONMENTAL IMPACT / APPLICATION OF SiO₂ NANOPARTICLE

CHANTANAPHA SAHUNIN : ESTIMATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPLICATION AND APPLICATION OF SILICONDIOXIDE NANO PARTICLES. THESIS ADVISOR: CHAIRIT SATAYAPRASERT, THESIS COADVISOR: SOORATHEP KHEAWHOM,114 pp. ISBN 974-17-5532-5.

Nano silicon dioxide is a chemical product of major industrial importance. Its wide field of applications extends from a filler and reinforcement material for rubbers, a binder for concrete and cement, an additive in dental composite and insulator products.

The objectives of this research are to estimate the environmental impacts of production of SiO₂ nano-particle and to identify the suitable application and production method. In this work, we consider the synthesis and raw material preparation stage of SiO₂ nano-particle production. We investigate three types of SiO₂ nano-particle production methods including sol-gel process, flame aerosol process and spray pyrolysis. The evaluation of the inventory data was performed using commercial software tool. In addition, environmental risk is studied and evaluated. Based on the results of our study flame aerosol process has impacts to the human health, ecosystem quality and resources less than sol-gel process and spray pyrolysis, respectively. Spray pyrolysis has high risk in raw material preparation stage while the flame aerosol process has high risk in synthesis stage.

Department.....Chemical Engineering.....	Student's signature..... <i>Chantanapha Sahunin</i>
Field of study..... Chemical Engineering.....	Advisor's signature..... <i>[Signature]</i>
Academic year.....2005	Co-advisor's signature..... <i>Soorathep Kheawhom</i>

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และ ดร.สุรเทพ เขียวหอมอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาใช้เวลาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องตลอดจนให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ตลอดการวิจัย ขอบกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพิฤกษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด จงสมจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์และถูกต้องเที่ยงตรงยิ่งขึ้น ขอบกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในการวิจัยด้วยดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การประเมินวัฏจักรชีวิต.....	5
2.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน.....	14
2.3 SimaPro.....	31
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 การพัฒนาและการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี.....	42
3.1 นาโนเทคโนโลยี.....	42
3.2 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี.....	45
บทที่ 4 การพัฒนาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน.....	47
4.1 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง.....	47
4.2 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง.....	53
4.3 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุฟัน.....	56
4.4 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นฉนวนกันความร้อน.....	57
4.5 สรุป.....	58

บทที่ 5 การประเมินวัฏจักรชีวิตและการประเมินความเสี่ยง.....	59
5.1 การประเมินวัฏจักรชีวิต.....	60
5.2 วิธีการประเมินความเสี่ยง.....	68
5.3 การประเมินความเสี่ยงวิธีการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน.....	70
5.4 ผลการประเมินความเสี่ยงของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน.....	80
5.5 สรุปผลการประเมินความเสี่ยง.....	86
บทที่ 6 การพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อนำไปพัฒนาใช้กับผลิตภัณฑ์ ชนิดต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม.....	89
6.1 ผลการพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	90
6.2 สรุป.....	90
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงคำจำกัดความย่อของ LCA ในระบบมาตรฐาน ISO 14000.....	8
ตารางที่ 2.2	โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการศึกษา LCA ที่นิยมในปัจจุบัน.....	10
ตารางที่ 2.3	แสดงการศึกษากระบวนการโซล-เจล ในงานด้านต่าง ๆ.....	14
ตารางที่ 2.4	แสดงการศึกษากระบวนการ Flame aerosol ในงานด้านต่าง ๆ.....	15
ตารางที่ 2.5	แสดงการศึกษากระบวนการ สเปรย์ไฟโรไลซิส ในงานด้านต่าง ๆ.....	15
ตารางที่ 2.6	แสดงสมบัติของแอโรเจล.....	25
ตารางที่ 2.7	แสดงการสังเคราะห์แอโรโซลจากวิธีต่าง ๆ	29
ตารางที่ 2.8	แสดงการเปรียบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	33
ตารางที่ 2.9	สารเคมีที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธี flame aerosol pocess.....	38
ตารางที่ 2.10	แสดงขนาดอนุภาคของที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจน....	39
ตารางที่ 4.1	แสดงขนาดอนุภาคของซิลิกาในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	59
ตารางที่ 5.1	แสดงข้อมูลวิธีการสังเคราะห์ต่าง ๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน.....	61
ตารางที่ 5.2	แสดงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจล.....	70
ตารางที่ 5.3	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจาก TEOs.....	69
ตารางที่ 5.4	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากแอมโมเนีย.....	71
ตารางที่ 5.5	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากเมทานอล.....	72
ตารางที่ 5.6	แสดงค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารเคมีในกระบวนการ โซล-เจล.....	73
ตารางที่ 5.7	แสดงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Flame aerosol process.....	73
ตารางที่ 5.8	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากไนโตรเจน.....	74
ตารางที่ 5.9	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากออกซิเจน.....	75
ตารางที่ 5.10	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากมีเทน.....	76
ตารางที่ 5.11	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจาก HMDSO.....	76
ตารางที่ 5.12	แสดงค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารเคมีในกระบวนการ Flame aerosol process	77
ตารางที่ 5.13	แสดงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสเปรย์ไฟโรไลซิส.....	78
ตารางที่ 5.14	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพจากกรดไนตริก.....	78
ตารางที่ 5.15	แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพจากเอทานอล.....	79

ตารางที่ 5.16	แสดงค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารเคมีในกระบวนการ สเปรย์ไฟโรไลซิส.....	80
ตารางที่ 5.17	แสดงประเมินความเสี่ยงที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน.....	82
ตารางที่ 5.18	แสดงผลจากการประเมินความเสี่ยง.....	87
ตารางที่ ก.1	แสดงสัดส่วนน้ำหนักที่ใช้ในการประเมินผลใน Eco-indicator 99 (SimaPro).....	98
ตารางที่ ก.2	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านสารก่อมะเร็ง.....	99
ตารางที่ ก.3	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านการลดลงของชั้นโอโซน.....	100
ตารางที่ ก.4	แสดงประเภทของสินแร่.....	100
ตารางที่ ก.5	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์.....	101
ตารางที่ ก.6	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์.....	103
ตารางที่ ก.7	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านการทำให้ฤดูกาลเปลี่ยนแปลง.....	104
ตารางที่ ก.8	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านความเป็นกรด.....	104
ตารางที่ ก.9	แสดงสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านความเป็นพิษ.....	105

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 มุมมองทางสิ่งแวดล้อมของโลกอุตสาหกรรมที่ควรจะเป็น.....	6
รูปที่ 2.2 กรอบการดำเนินงาน LCA ของ UNEP.....	11
รูปที่ 2.3 แสดงการหดตัวของเจลจากการทำให้แห้ง.....	17
รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างซลิกาแอรโรเจล.....	18
รูปที่ 2.5 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ TEOs-ethanol-water ที่อุณหภูมิ 25°C.....	21
รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการเกิดซลิกาเจล.....	22
รูปที่ 2.7 แสดงอิทธิพลของค่า pH ต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัวในกระบวนการ.....	23
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างรูพรุนของแอรโรเจล.....	24
รูปที่ 2.9 แสดงการทำให้แห้งโดยใช้จุดเหนือวิกฤต (supercritical drying).....	25
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างซลิกาแอรโรเจลจากภาพถ่าย SEM.....	26
รูปที่ 2.11 แสดงการประยุกต์ใช้ซลิกาแอรโรเจลในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	27
รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบ flame aerosol process.....	30
รูปที่ 2.13 แสดงกระบวนการผลิตโดยวิธี sol-gel process.....	35
รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนการเตรียมแอรโรเจล.....	36
รูปที่ 2.15 แสดงการทำให้แห้งโดยการใช้ Supercritical drying	36
รูปที่ 2.16 แสดงซลิกาแอรโรเจลที่เตรียมได้จากซีเมนต์เปลือกข้าว.....	37
รูปที่ 2.17 แสดงกระบวนการผลิตนาโนซลิกาโดยวิธี Flame aerosol process.....	38
รูปที่ 2.18 แสดงชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ซลิกาโดยใช้วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส.....	40
รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM ของยางที่ได้จากการเติม SiO ₂	41
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรควอนตัมคอมพิวเตอร์.....	46
รูปที่ 4.1 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยทั่วไป.....	48
รูปที่ 4.2 ค่า tensile stress of a composite โดยการเติมซลิกา.....	51
รูปที่ 4.3 แสดงกลไกการเสริมแรงของซลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนในยาง.....	52
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นที่ผิว.....	52
รูปที่ 4.5 แสดงอนุภาคของซลิกา.....	54
รูปที่ 4.6 แสดงการอนุภาคของซลิกาที่ปิดล้อมโมเลกุลของน้ำ.....	54
รูปที่ 4.7 แสดงการหุ้มสารตัวกรอง UV.....	55

รูปที่ 4.8	แสดงการหุ้มสารตัวกรอง UV	56
รูปที่ 4.9	แสดงตัวอย่างซิลิกาที่นำไปใช้เป็นสารตัวเติมในสารประกอบพีน.....	56
รูปที่ 4.10	แสดงการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติมในวัสดุพีน.....	57
รูปที่ 4.11	แสดงฉนวนกันความร้อนจากซิลิกาแอโรเจล.....	58
รูปที่ 5.1	แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยกระบวนการทางโซล – เจล.....	63
รูปที่ 5.2	แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยวิธี Flame aerosol process	64
รูปที่ 5.3	แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยวิธี Spray pyrolysis.....	66
รูปที่ 6.1	แสดงแนวทางการวิจัย.....	89
รูปที่ ข.1	แสดงแสดงขั้นตอนการเข้าโปรแกรม SimaPro 6.....	107
รูปที่ ข.2	แสดงการสร้าง project ใหม่.....	108
รูปที่ ข.3	แสดงการป้อนข้อมูลในส่วน of รายละเอียด.....	109
รูปที่ ข.4	แสดงการป้อนข้อมูลใน DQI Requirement.....	110
รูปที่ ข.5	แสดงการเลือก Method ที่ใช้ใน Project.....	111
รูปที่ ข.6	แสดงการเลือก Method ที่ใช้ใน Project.....	112
รูปที่ ข.7	แสดงการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม SimaPro 6.....	113

คำอธิบายสัญลักษณ์

AIT	สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
BHT	2,6-Di-tert.Butyl (-p-cresol)
CU	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CBS	n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide
CH ₄	มีเทน
C ₂ H ₅ OH	เอทานอล
CMU	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์
H ₂	ไฮโดรเจน
HCl	กรดไฮโดรคลอริก
HMDSO	Hexamethyldisiloxane
HNO ₃	กรดไนตริก
H ₂ O	น้ำ
H ₂ SO ₄	กรดซัลฟิวริกคลอริก
IPP	Integrated Product Policy
IPPD	n-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine
ISO	International Standards Organization
JGSEE	บัณฑิตวิทยาลัยร่วม ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม
KU	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
LCA	Life Cycle Assessment หรือการประเมินวัฏจักรชีวิต
LCC	Life Cycle Cost
LCI	Life Cycle Inventory
MBT	2-mercaptopbenzothiazole
MgO	แมกนีเซียมออกไซด์
NaCl	โซเดียมคลอไรด์
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์
Na ₂ SiO ₃	โซเดียมซิลิเกต (Tetraalkylorthosilicate)
Nm	นาโนเมตร
NO ₂	ไนตริกออกไซด์

OLED	organic light emitting-diode
PA	polyamide (nylon-6)
PASW	polyamide with silica
PE	Polyethylene
REPAs	Resource and Environmental Profile Analyses
sC-CO ₂	จุดเหนือวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ (Supercritical CO ₂)
SEM	Scanning Electron Microscope
SiCl ₄	เตตระคลอโรไซเลน (Tetrachlorosilane)
SiO ₂	ซิลิกอนไดออกไซด์
SPOLD	Society for the Promotion of Life Cycle Development
TBCSD	Thailand Business Council for Sustainable Development
TEOs	เตตระเอทิลอโรซิลิเคต
TMTD	Tetramethyl thiuram disulphide
TMQ	2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized
UV	Ultra violet
UNEP	United Nations Environment Programme
ZnO	ซิงค์ออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะเขตชุมชนเมืองเป็นหลัก แต่ได้กลายเป็นผลกระทบต่อชุมชนโลก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม ปัญหาเหล่านี้เป็นผลมาจากการพัฒนาในด้านต่าง ๆ อาทิ เช่น การขยายตัวของกิจกรรมของมนุษย์ การใช้สารเคมีซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้พื้นที่ส่วนต่าง ๆ ของผืนโลกมากขึ้น ซึ่งผลกระทบที่ตามมาก็คือ

อากาศเปลี่ยนแปลงเนื่องจากโลกร้อนขึ้น (Global Warming)

มนุษย์เป็นตัวการที่ทำให้โลกร้อนขึ้นโดยการปล่อยก๊าซ ซึ่งทำให้เกิดการกักขังรังสีความร้อนในชั้นบรรยากาศของโลกเรียกว่า ภาวะเรือนกระจก ก๊าซที่เป็นตัวการก่อมลภาวะนี้ได้แก่ ก๊าซพวก Greenhouse Gases โดยส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้พวก Fossil Fuel น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ

การลดลงของปริมาณ โอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone Depletions)

เกิดจากการปล่อยสารพวกไฮโดรคาร์บอน (CFCs, Tretachloromethane, 1,1,1-Trichloroethane, HCFCs, Halons and Methyl Bromide) ซึ่งเป็นสารเคมีที่เราใช้กันในเครื่องปรับอากาศและพวกแอโรซอล ทำให้ปริมาณโอโซนลดลง ซึ่งปริมาณความเข้มของรังสี UV ในแสงอาทิตย์สามารถส่องถึงผืนโลกได้โดยตรงเป็นอันตรายต่อสรรพสิ่งในโลก

สารพิษ (Toxic)

ยังมีสารพิษอีกมากมายที่มนุษย์ผลิตขึ้นทั้งโดยตั้งใจและไม่ตั้งใจ เพื่อใช้ในการทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การใช้ DDT และยาฆ่าแมลงอื่น ๆ ซึ่งสารพิษเหล่านี้อาจสลายตัวหรือใช้เวลาในการสลายตัวนานมาก ๆ เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยาได้

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีได้รับการพัฒนาและเป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากการค้าขายในปัจจุบันมีเงื่อนไขและปัจจัยต่างๆ ที่ต้องคำนึงถึงมากมาย ข้อตกลงและการตัดสินใจทางธุรกิจหลายๆอย่างในเวทีการค้าระหว่างประเทศ ได้ถูกนำเอาไปเกี่ยวข้องกับโยงโยกับเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมอันเนื่องจากการผลิต การจำหน่าย ตลอดจนถึงการใช้งานของสินค้านั้น ๆ รวมไปถึงการจัดการหลังจากสินค้านั้นหมดอายุการใช้งาน โดยผลิตภัณฑ์ที่จะออกสู่ตลาดนั้นต้องมีคุณภาพและมาตรฐาน ดังนั้นการพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสินค้าตั้งแต่เกิดจนตาย (Life Cycle Assessment: LCA) นั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาสินค้าและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ให้มีคุณภาพดีขึ้นทั้งด้านประโยชน์การใช้งานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดย LCA จะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและสร้างปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด โดยมีการพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรอบด้านในทุกๆ ขั้นตอนการผลิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบเพื่อให้พร้อมเข้าสู่กระบวนการผลิต การผลิต การกระจายสินค้า การขนส่ง การใช้งานโดยผู้บริโภคขั้นสุดท้าย การทิ้งทำลายและการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง ๆ นั้นอาจมีส่วนประกอบเป็นอันมาก ทำให้ผลกระทบจากการใช้ทรัพยากรและมลพิษที่เกิดขึ้นของการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชิ้นมีความหลากหลายและซับซ้อน ดังนั้นจึงต้องอาศัยการศึกษาข้อมูลเป็นจำนวนมากและความร่วมมือจากหลายฝ่าย

ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกาที่มีอนุภาคนาโนนั้นก็ได้มีการนำมาพัฒนาใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย อาทิ ใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง ใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในด้านทันตกรรม ใช้เติมในสีเพื่อเพิ่มความเหนียวชั้น รวมไปถึงในอุตสาหกรรมด้านอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากซิลิกานาโนนั้นมีสมบัติที่แข็งแรง มีความเป็นรูพรุนสูง อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำ ด้วยคุณสมบัติต่าง ๆ นี้ ปัจจุบันจึงมีการนำเอาซิลิกานาโนมาใช้เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางด้านอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- ประเมินวัฏจักรชีวิตของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนในช่วงการสังเคราะห์ โดยการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงประเมินความเสี่ยงในขั้นตอนต่าง ๆ
- พิจารณาวិธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อนำไปพัฒนาใช้กับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในเชิงอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนในช่วงการสังเคราะห์ โดยพิจารณาถึงวัตถุดิบที่นำมาใช้ในแต่ละวิธี จากนั้นทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยใช้โปรแกรม SimaPro 6 ในการประเมินผล

1.4 ข้อยกจำกัดของการวิจัย

เนื่องจากการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนยังไม่แพร่หลายนัก ข้อมูลที่ได้จากแหล่งต่างๆ จึงไม่มากเท่าที่ควร โดยในการประเมินผล ผู้วิจัยได้ใช้ฐานข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro เวอร์ชัน 6 และคำนวณเฉพาะในช่วงการสังเคราะห์ นอกจากนี้ในการประเมินผลดังกล่าว ผู้วิจัยยังไม่สามารถหาข้อมูลพลังงานที่ใช้ในการผลิตอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนได้ ดังนั้นในการทำบัญชีรายการข้อมูลและการคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในขณะการผลิตซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน จึงขึ้นกับชนิดและปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์เท่านั้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- แบบจำลองวัฏจักรชีวิตของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน ในช่วงการสังเคราะห์ โดยวิธีการผลิตแบบต่างๆ
- สามารถชี้ถึงวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และชี้ให้เห็นถึงสาเหตุที่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นในอนาคต
- ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ประกอบในการพิจารณาการผลิตที่เหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆ ได้

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ค้นหาข้อมูล ทฤษฎี และรวบรวมผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องที่มีผู้ทำการศึกษาไว้ในด้านการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนและหลักการประเมินด้านสิ่งแวดล้อม (LCA) จากเอกสารทั้งในและต่างประเทศ เพื่อใช้เป็นข้อมูลและวางแผนการดำเนินงาน
2. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนด้วยวิธีการต่าง ๆ
3. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินด้านสิ่งแวดล้อม (LCA)
4. ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนโดยใช้โปรแกรม SimaPro 6 และทำการประเมินความเสี่ยง
5. ศึกษาและเปรียบเทียบการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนโดยการประเมินความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงการประยุกต์ใช้
6. วิเคราะห์ผล
7. สรุปผล
8. เขียนรายงานการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้แรกเริ่มจะกล่าวถึงทฤษฎีของการประเมินวัฏจักรชีวิต ประวัติและขั้นตอนการประเมิน จากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนซึ่งประกอบไปด้วยวิธีทางโซล-เจล กระบวนการ Flame aerosol และวิธี ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ต่อมาจะกล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำมาโปรแกรม SimaPro 6 มาใช้ในงานวิจัยเนื่องจากเป็นโปรแกรมที่นิยมนำมาใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต จากนั้นจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่รวบรวมได้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 การประเมินวัฏจักรชีวิต

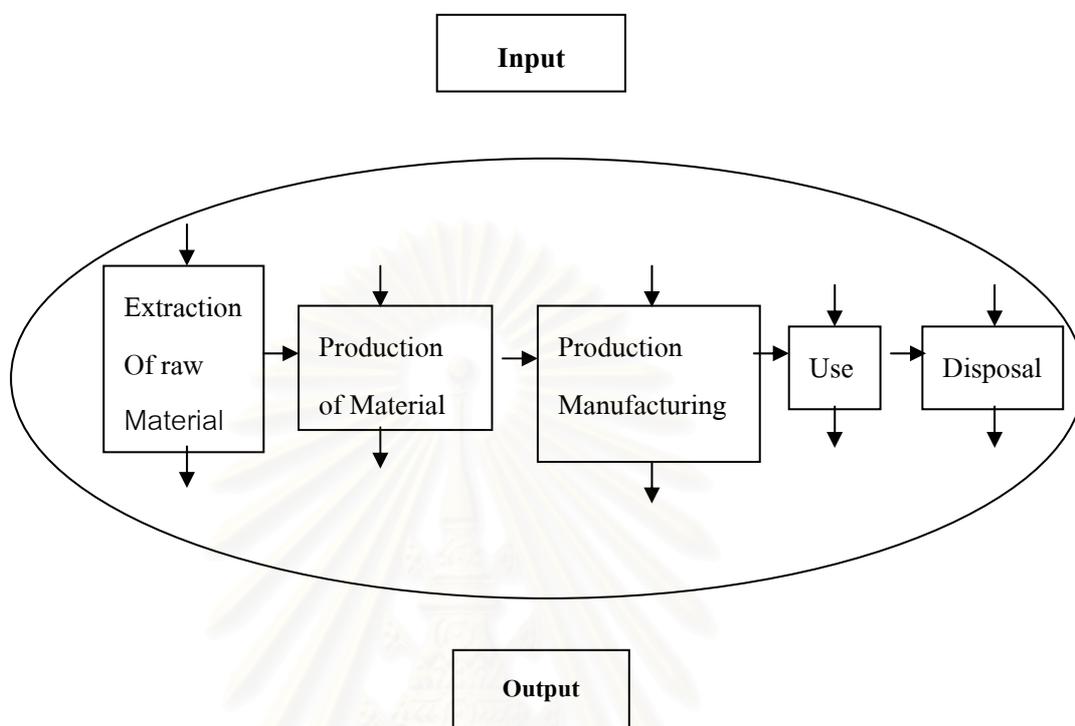
มุมมองทางสิ่งแวดล้อมของสังคม

ในปี 1970 มีการออกกฎหมายสิ่งแวดล้อมในยุคอุตสาหกรรม ซึ่งมุ่งเน้นไปที่การกำจัดมลภาวะจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเจาะจงให้ความสนใจในเรื่องการบำบัดน้ำเสีย การควบคุมมลพิษทางอากาศ และเทคโนโลยีในการรักษาความสะอาดต่าง ๆ ของโรงงาน หลายบริษัทตั้งแผนกเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมโดยตรง มีหน้าที่รับผิดชอบด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะ

องค์กรส่วนใหญ่จะเน้นที่การควบคุมการปล่อยมลพิษในขั้นกระบวนการของ การผลิตวัตถุดิบ การผลิตชิ้นงานและการกำจัดทำลาย โดยคาดหวังให้เกิดการลดลงของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ภายหลังได้มีการทำวิจัย ซึ่งพบว่าจริง ๆ แล้วไม่เป็นอย่างที่ที่ตั้งสมมติฐานเอาไว้ เพราะเมื่อความต้องการในการบริโภคของมนุษย์ยังคงมีอยู่และเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ถึงแม้ว่าการใหญ่อย่างอุตสาหกรรมพยายามที่จะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลง แต่ผลกระทบที่เกิดจากผู้บริโภคกลับเพิ่มขึ้น

ดังนั้นจึงควรมีการเปลี่ยนแปลงมุมมองทางสิ่งแวดล้อมเสียใหม่ไม่ให้มุ่งเน้นไปที่กระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แต่ให้มองทุกกระบวนการของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ขั้นตอนในเรื่อง

ของวัตถุดิบ การผลิต การใช้หรือบริโภคและการทำลายย่อยสลาย กล่าวคือครอบคลุมตลอดอายุของผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 มุมมองทางสิ่งแวดล้อมของโลกอุตสาหกรรมที่สมควรจะเป็น

ความหมายและความเป็นมาของการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment)

Life cycle assessment เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ซึ่งประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก ผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตหรือกิจกรรมอื่น ๆ ครอบคลุมตลอดวัฏจักรชีวิตของมัน LCA ถูกนำมาใช้ทั่วโลกโดยรัฐบาลและองค์กรอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้รู้ถึงความเป็นมา ผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่าง กิจกรรมและสิ่งแวดล้อม ได้มีการสนับสนุนให้มีการการเรียนรู้ การเข้าใจถึงผลิตภัณฑ์และกระบวนการต่าง ๆ ของ Life cycle เพื่อที่จะหาหนทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ตัวอย่างแรกในการทำ LCA ของผลิตภัณฑ์ที่ประสบความสำเร็จ คือการศึกษาเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์ของน้ำดื่มประเภทหนึ่งและได้มีการประชาสัมพันธ์ให้ทราบอย่างแพร่หลายตั้งแต่ปี 1960 วิธีการในตอนแรกถูกเรียกว่า Resource and Environmental Profile Analyses (REPAs) ได้เน้นที่การศึกษาในเรื่องการใช้พลังงาน การใช้ทรัพยากรธรรมชาติและการควบคุมของเสีย แต่สมัยนั้นความรู้เกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อมยังมีไม่เพียงพอ การศึกษาเรื่องนี้จึงลดลง แต่ในปี 1980 ความสนใจในเรื่อง

LCA ได้มูมขึ้นมาอีกครั้ง มีการนำมาใช้หลายประเทศในยุโรป มีวิธีการคิดและวิธีทำที่แตกต่างกันออกไปจนต้องมีการพัฒนาให้เป็นแบบแผนมาตรฐานและนี่เองเป็นจุดเริ่มต้นที่แข็งแกร่งของ LCA

ปัจจุบันความรู้เกี่ยวกับ LCA ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เป็นที่รู้จักและได้รับการยอมรับมากขึ้น โดยถูกนำมาใช้ในการกำหนดกลยุทธ์และการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม เช่น โครงการด้านสิ่งแวดล้อมของสหประชาชาติ (United Nations Environment Programme: UNEP) ได้ส่งเสริมการจัดทำ LCA ภายใต้โครงการ Life Cycle Initiative นอกจากนี้ ยังมีบริษัทผู้ประกอบในยุโรปกลุ่มหนึ่งได้ร่วมกันจัดตั้งองค์กรเอกชนในนามของ Society for the Promotion of Life Cycle Development (SPOLD) เพื่อส่งเสริมการนำแนวคิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยคำนึงถึงวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์และองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Standards Organization : ISO) ได้ออกอนุกรมมาตรฐานการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ชุด ISO 14040 เพื่อกำหนดรูปแบบวิธีการและขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิตเพื่อเป็นมาตรฐานให้นักวิจัยด้าน LCA ได้ใช้ในการศึกษาต่อไป

ประวัติของการศึกษา LCA ในประเทศไทย

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสถาบันสิ่งแวดล้อมไทยและกรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้ทำการเผยแพร่ความรู้ด้าน LCA เข้าสู่ภาคอุตสาหกรรมไทยตั้งแต่ปี 2540 เนื่องจาก LCA เป็นชุดมาตรฐานในอนุกรมมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14000 โดยเริ่มต้นจากการสัมมนาหรือการประชุมเชิงปฏิบัติการผ่านกลุ่มของคณะกรรมการนักธุรกิจเพื่อสิ่งแวดล้อม (Thailand Business Council for Sustainable Development: TBCSD) องค์กรเอกชน สถาบันการศึกษา หน่วยงานราชการและกลุ่มนักวิชาการที่สนใจ ต่อมา LCA ได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งต้นปี 2545 ได้มีการรวมกลุ่มของผู้ที่สนใจด้าน LCA ของประเทศไทย (Thai LCA Forum/Network) เพื่อเป็นศูนย์กลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูลความรู้รวมถึงเผยแพร่กิจกรรมต่างๆ ด้าน LCA อย่างไรก็ตามการศึกษาด้าน LCA ยังไม่มีความคืบหน้ามากนัก โดยพบว่าส่วนใหญ่ความสนใจและความรู้ด้าน LCA นั้นได้กระจายออกไปในวงจำกัดเฉพาะบางกลุ่ม ได้แก่ สถาบันการศึกษา องค์กรเอกชน และหน่วยงานราชการ สำหรับสถาบันการศึกษา เช่น สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KU) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (CU) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (CMU) บัณฑิตวิทยาลัยร่วม ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (JGSEE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้มีการนำ LCA เพิ่มเข้าไปในหลักสูตรการเรียน การสอน การวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ของนักศึกษา

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบมาตรฐาน ISO 14000 กับ LCA

LCA เป็นการทำงานส่วนหนึ่งซึ่งถูกรวมอยู่ในมาตรฐาน ISO14000 ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม (Environmental Management Standard) อนุกรมของ ISO14000 ที่เกี่ยวข้องกับ LCA เป็นดังนี้คือ

- ISO14040 – Environmental Management Life Cycle Assessment – Principle and Performance
- ISO14041 – Environmental Management Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory analysis
- ISO14042 - Environmental Management Life Cycle Assessment – Impact Assessment
- ISO14043 - Environmental Management Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation

ตารางที่ 2.1 แสดงคำจำกัดความย่อของ LCA ในระบบมาตรฐาน ISO 14000

Standard	Focus
<p>ISO 14040</p> <p>Environmental management</p> <p>* Life cycle assessment</p> <p>* Principles and framework</p>	<p>การแนะนำสู่โครงสร้าง หลักการและข้อกำหนดสำหรับการศึกษา LCA โดยเฉพาะการแนะนำในเรื่องการพิจารณาถึงความสำคัญในการศึกษา LCA</p>
<p>ISO 14041</p> <p>Environmental management</p> <p>* Life cycle assessment</p> <p>* Goal and scope definition and life-cycle inventory analysis</p>	<p>คำแนะนำในการทำ Life cycle Inventory ให้คำจำกัดความของเป้าหมาย กำหนดขอบเขต ระบบผลิตภัณฑ์ การเก็บข้อมูลและการส่งผลของรายงาน</p>
<p>ISO 14042</p> <p>Environmental management</p> <p>* Life cycle assessment</p> <p>* Life cycle impact assessment</p>	<p>คำแนะนำเรื่องโครงสร้างของผลของการเก็บข้อมูลเพื่อความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์กับระบบผลิตภัณฑ์ที่กำลังศึกษาอยู่</p>

<p style="text-align: center;">ISO 14043</p> <p style="text-align: center;">Environmental management</p> <p>* Life cycle assessment</p> <p>* Life cycle interpretation</p>	<p>คำแนะนำถึงการแปลผลจากการเก็บข้อมูล LCA และการศึกษา LCA</p>
<p style="text-align: center;">ISO TR 14049</p> <p>(technical report, not a standard)</p>	<p>แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างการขอทำ ISO 14041</p>

วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

สิ่งที่สำคัญในการทำ LCA ได้แก่ ระยะเวลา ทักษะและเงินทุน นอกจากนี้ยังต้องมีวิธีการในการศึกษา LCA การจัดการกับปริมาณข้อมูลจำนวนมากและโปรแกรมสำเร็จรูป (Software) ที่จะใช้รวบรวมและจัดการข้อมูล

วิธีการ

วิธีการทำ LCA แม้ว่าจะมีหลากหลาย แต่ในปัจจุบันวิธีการหลัก ๆ ในการทำ LCA เริ่มไปสู่แนวทางเดียวกันและเริ่มนิยมใช้วิธีการและขั้นตอนการศึกษาตามมาตรฐาน ISO 14040 มากขึ้น

ข้อมูลที่ต้องการ

การจัดทำ LCA จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก ในผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งอาจต้องมีการพิจารณากระบวนการต่าง ๆ เป็นร้อยกระบวนการก็ได้ และในแต่ละกระบวนการอาจมีข้อมูลที่ต้องเก็บมากมาย หรือเป็นร้อยรายการ เช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ปริมาณการใช้สารเคมี ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ถ้าการทำ LCA เป็นความต้องการของภาคธุรกิจ การที่จะได้มาซึ่งข้อมูลกระบวนการผลิตก็ไม่ใช่ว่าเรื่องยากนัก แต่ในกรณีที่การทำ LCA เป็นความต้องการขององค์กรอื่น ๆ ที่ไม่ได้อยู่ในภาคธุรกิจ หรือข้อมูลที่ต้องการนั้นสัมพันธ์กับบริษัทอื่น ๆ ก็จะเป็นการยากมากที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำ ข้อมูลที่ต้องการอย่างมากซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐาน (background data) สำหรับการทำให้ LCA ได้แก่ การผลิตกระแสไฟฟ้า รูปแบบของการขนส่งที่แตกต่างกัน ผลผลิตของวัตถุดิบแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามข้อมูลที่มีอยู่อาจเป็นข้อมูลของการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของบริษัทเท่านั้น ซึ่งอาจไม่สามารถเป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์ชนิดดังกล่าวในภาพรวมได้

โปรแกรมสำเร็จรูป

เนื่องจากการศึกษา LCA ต้องใช้ข้อมูลและตัวเลขมากมาย จึงอาจต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเข้าช่วยในการทำงาน ซึ่งสามารถใช้จัดการกับข้อมูลได้รวดเร็ว สะดวกสบาย และมีคุณภาพมากกว่า เดิมนิยมใช้โปรแกรม Microsoft Excel หรือ Spreadsheets ในการคำนวณ แต่ในปัจจุบันเริ่มที่จะหันมาใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเฉพาะสำหรับ LCA มากขึ้น เนื่องจากสามารถใช้งานได้ง่ายกว่าและเสียค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตที่มีจำนวนขั้นตอนมาก ๆ และเชื่อมโยงกับฐานข้อมูลด้าน LCA ที่ทำไว้ทั่วโลกได้ ตัวอย่างโปรแกรมสำเร็จรูปที่นิยมใช้สำหรับการศึกษา LCA แสดงในตารางที่ 1.2

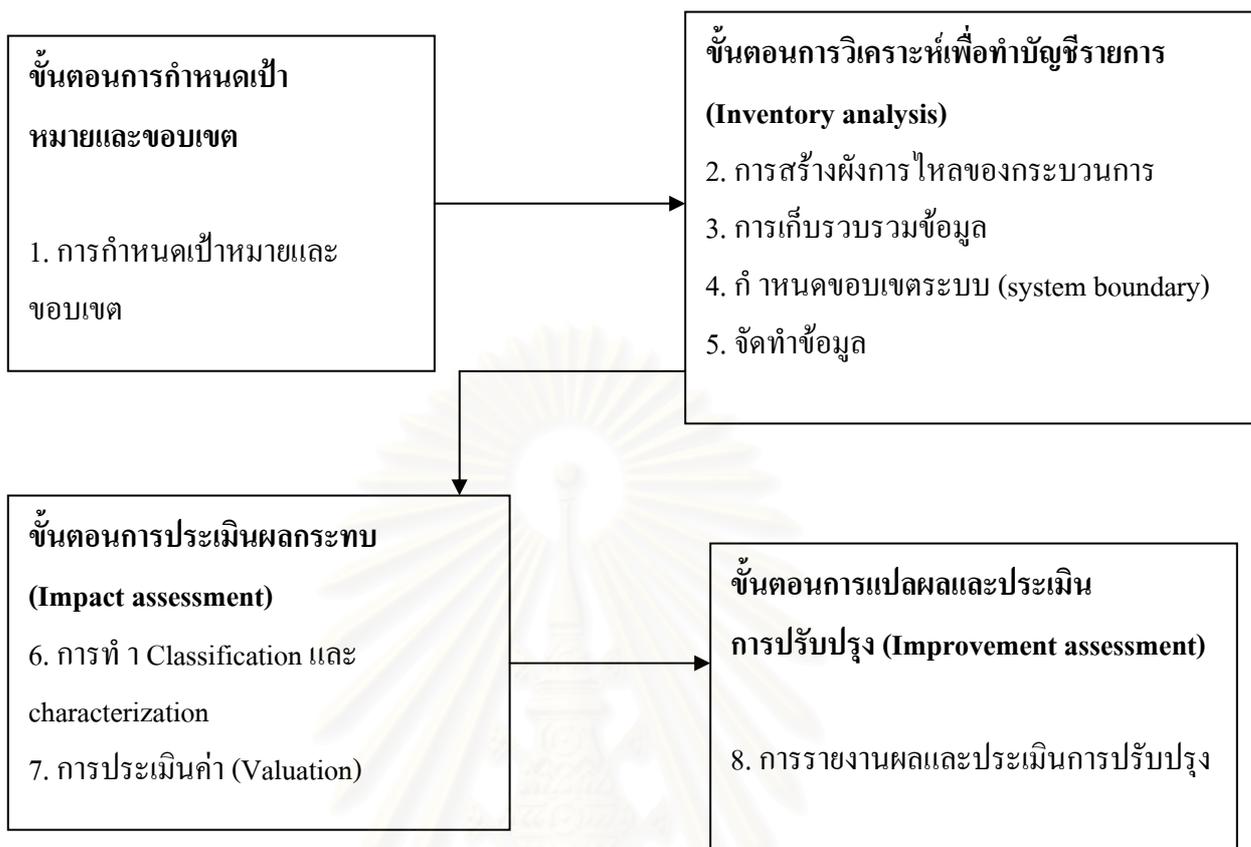
ตารางที่ 2.2 โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการศึกษา LCA ที่นิยมในปัจจุบัน

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

*มีเฉพาะภาษาญี่ปุ่นเท่านั้น

กรอบการดำเนินงานของ LCA

โครงการด้านสิ่งแวดล้อมของสหประชาชาติ (UNEP) ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานของ LCA ออกเป็น 8 ขั้นตอนย่อยดังแสดงในรูปที่ 2.2



ที่มา: Life Cycle Assessment: What it is and How to do it, UNEP 1996

รูปที่ 2.2 กรอบการดำเนินงาน LCA ของ UNEP

การกำหนดเป้าหมาย (GOAL DEFINITION)

ขั้นตอนแรกในการทำ LCA ก็คือการกำหนดเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ รวมทั้งพิจารณาว่าควรใช้การวิเคราะห์ทางสิ่งแวดล้อมแบบใดเข้ามาช่วยและในขั้นตอนเดียวกันนี้ เราต้องประเมินว่าการวิเคราะห์ใดสามารถหรือไม่สามารถนำมาใช้ได้ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะในส่วนของวิธีทำ LCA ขึ้นอยู่กับการกำหนดวัตถุประสงค์ ผลการวิเคราะห์แล้วนำไปใช้อย่างผิด ๆ นำไปสู่การสรุปผลที่ไม่ถูกต้อง กล่าวคือผลการวิเคราะห์อาจผิดพลาดถ้าการใช้งานไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างเหมาะสม

การกำหนดเป้าหมาย ควรครอบคลุมการตอบปัญหาเหล่านี้

- (1) เราจะนำผลการวิเคราะห์ของ LCA ไปใช้ทำอะไร
- (2) การตัดสินใจใดที่ควรทำซึ่งควรอยู่บนพื้นฐานของ LCA

- (3) การเปลี่ยนแปลงใดที่จะเกิดขึ้น เมื่อมีการตัดสินใจทำ LCA
- (4) ผลิตภัณฑ์ใหม่จะได้รับการปรับปรุงในเรื่องใดบ้าง ซึ่งทำให้เกิดผลอย่างไรต่อสิ่งแวดล้อม

การกำหนดขอบเขต (SCOPE DEFINITION)

วัตถุประสงค์ของการกำหนดขอบเขตก็คือ การบ่งชี้และกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินและจำกัดรวบรวมสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อเป้าหมายของ LCA ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- (1) การกำหนดสิ่งที่จะศึกษารวมทั้งการกำหนด Functional Unit
- (2) การเลือกระบบอ้างอิง หรือผลิตภัณฑ์อ้างอิงเพื่อแสดงให้เห็นวัตถุประสงค์ของการศึกษา
- (3) การออกแบบตัวแปร (Parameter) ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายของ LCA
- (4) บ่งชี้ขอบเขตการผลิตที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อมในระบบผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับเป้าหมายของ LCA
- (5) การกำหนดขอบเขตของเวลา สำหรับการตัดสินใจที่จะใช้ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของ LCA รวมทั้งกำหนดเทคโนโลยีที่จะนำมาใช้ในระบบผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการประเมินทางสิ่งแวดล้อมมาแล้ว
- (6) การจัดการการแลกเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์

การทำบัญชีรายการ (INVENTORY)

จุดมุ่งหมายของการทำบัญชีรายการก็คือ

- การเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมจากระบบการผลิตที่ได้มีการนิยามไว้แล้วในขั้นตอนการกำหนดขอบเขต (Scope Definition) รวมทั้งการสร้างแบบจำลองของระบบผลิตภัณฑ์ (Product System)
- การสร้างหน่วยของข้อมูล (Data Unit) และตั้งหน่วยของกระบวนการ (Process Unit)
- เก็บข้อมูลของการแลกเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตภัณฑ์
- การนำเสนอของข้อมูลในรูปแบบของแบบฟอร์มที่เข้าใจง่าย ซึ่งประกอบด้วย รายละเอียดของกระบวนการผลิต คุณลักษณะของข้อมูล เช่น คุณภาพของข้อมูล ข้อจำกัดและที่มาของข้อมูล

การประเมินผลกระทบ (IMPACT ASSESSMENT)

จากขั้นตอนในการทำบัญชีรายการ (Inventory) เราจะทราบข้อมูลของการแลกเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์ทั้งหมด การแลกเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมบางอย่างเป็นสิ่งสำคัญ แต่บางอย่างไม่ใช่ เพื่อให้ LCA สามารถช่วยในการตัดสินใจ ข้อมูลในขั้นตอนการทำบัญชีรายการต้องได้รับการตีความก่อน ซึ่งการตีความต้องอยู่บนพื้นฐานของความรู้เกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม แหล่งทรัพยากร และสิ่งแวดล้อมของสภาพการทำงานและต้องแสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนทางสิ่งแวดล้อมใดที่สำคัญ

การแปลผลวัฏจักรชีวิต (LIFE CYCLE INTERPRETATION)

ขั้นตอนการแปลผลของ LCA หมายถึง การนำผลจากการทำรายการบัญชีข้อมูลและการประเมินผลกระทบมารวมกันเข้าเพื่อให้ได้ข้อสรุปและข้อเสนอแนะตามเป้าหมาย และขอบเขตการศึกษาที่ระบุไว้ การแปลผลอาจเป็นการทำเข้าไปข้างหน้าเพื่อพิจารณาบทวนจากข้อมูลและอาจต้องเปลี่ยนแปลงขอบเขตการศึกษา เพื่อให้สอดคล้องกับความเป็นจริงและคุณภาพของข้อมูลที่รวบรวมมาได้ตามเป้าหมายที่กำหนด การแปลผลของการศึกษาคควรจะคำนึงถึงความอ่อนไหว และความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์ด้วย

หลังจากที่วิเคราะห์ Life Cycle Assessment เสร็จเรียบร้อยแล้ว ตอนนี้เราทราบแล้วว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใดเป็นอันตรายที่สุดและเกิดจากกระบวนการใด ขั้นตอนต่อไปก็คือ การวิเคราะห์หาวิธีที่เหมาะสมในการแก้ไขและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในโลกอุตสาหกรรมขั้นตอนการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงมักขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

1. ทางเศรษฐศาสตร์
 - บริษัทหรือองค์กรใด ๆ ก็ตามจะยังต้องการที่จะคงไว้ซึ่งผลของกำไร เมื่อมีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้น
2. ทางผู้บริโภค
 - นิสัยของผู้บริโภค – ปัจจุบันนิสัยในการบริโภคของคนเรามากยึดติดอยู่กับสมัสนิยมหรือแฟชั่น ซึ่งถูกควบคุมโดยผู้ผลิตเพราะฉะนั้นธรรมเนียมในการจับจ่ายใช้สอยจะ

เปลี่ยนแปลงเสมอ ๆ ผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ อาจขายได้เป็นอย่างดี ไม่ใช่เพราะว่าผลิตภัณฑ์เก่า ๆ ไม่ดี แต่เป็นเพราะของใหม่มีลักษณะที่แตกต่างออกไป อาจเป็นในเรื่องของสีหรือรูปทรง

- ความพึงพอใจของผู้บริโภค – จากมุมมองทั่วไปของผู้บริโภค ความต้องการพื้นฐานขึ้นอยู่กับความพึงพอใจ ประมาณ 80 % ของความต้องการที่ถูกสร้างขึ้นสามารถเปลี่ยนได้ โดยความรู้สึกรหรือการศึกษา ปัจจุบันการปลูกสำนึกในเรื่องสิ่งแวดล้อมได้มีมากขึ้น ถ้าผู้บริโภคเห็นด้วยกับผลิตภัณฑ์อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากกว่า ด้วยเหตุนี้บริษัทหรือองค์กรที่มีความสามารถในการจัดการเรื่องสิ่งแวดล้อมย่อมได้เปรียบ

2.1 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน (SiO₂ nanoparticle)

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกานันมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการ Flame aerosol กระบวนการ โซล-เจล (Sol-gel process) และวิธี Spray pyrolysis เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลาย ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ตารางที่ 2.4 และ 2.5

ตารางที่ 2.3 แสดงการศึกษากระบวนการ โซล-เจล ในงานด้านต่าง ๆ

Sharad D. et.al (2005)	ศึกษาเรื่องการสังเคราะห์ ซิลิกาแอโรเจล แบบ 2 ชั้นตอน โดยกระบวนการ โซลเจล
Kota Sreenivasa Rao et.al.(2005)	ศึกษาเรื่องการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาในระดับนาโน
Qi Tang และ Tao et.al. (2005)	ศึกษาถึงการเตรียม ซิลิกาแอโรเจลจากเปลือกข้าว ศึกษาลักษณะและโครงสร้างของซีโรเจล (xerogel) ในกระบวนการเตรียมเจลเปียก (wet gel)
Alexandra และ Laura (2005)	ศึกษาผลของเวลาและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการบ่มเจลต่อลักษณะรูพรุนของซิลิกาแอโรเจล
Smitha et.al (2006)	ศึกษาถึงการนำเอาซิลิกาแอโรเจลและซีโรเจลมาใช้ในวัสดุผสม (composite)
Maria et.al.(2001)	ศึกษาถึงการนำเอาไปใช้เคลือบวัสดุเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

ตารางที่ 2.4 แสดงการศึกษากระบวนการ Flame aerosol ในงานด้านต่าง ๆ

Karsten Wegner et.al. (2004)	ศึกษาเรื่องการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ Flame reactors และการขยายขนาดการผลิต
Roger Mueller et.al.(2004)	นาโน
Roger Mueller et.al.(2003)	ศึกษาถึงการทำให้ซิลิกานาโนให้แห้งโดยใช้ Flame reactor
Wendelin J. et.al.(2002)	ศึกษาถึงการสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่ให้อัตราการผลิตสูงโดยใช้ Flame reactor
Hendrik K et.al.(2001)	ศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ aerosol reactor สำหรับอุตสาหกรรมในการผลิต
Altman et.al.(2003)	ศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ Flame aerosol ในการสังเคราะห์ซิลิกาและคาร์บอนนาโนทิวส์
Sotiris E. et.al.(1998)	ศึกษาสมบัติทางแสงและการถ่ายเทความร้อนของซิลิกานาโนที่สังเคราะห์จาก Flame reactor
	ศึกษาถึงการสังเคราะห์เซรามิกจากกระบวนการ Flame aerosol

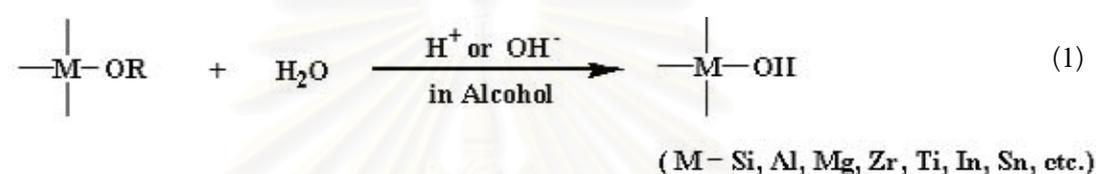
ตารางที่ 2.5 แสดงการศึกษากระบวนการ สเปรย์ไพโรไลซิส ในงานด้านต่าง ๆ

Hee Dong Janga et.al.(2006)	ศึกษาการสังเคราะห์ SiO_2 โดยกระบวนการ Flame spray pyrolysis
Stefan et.al.(2005)	
Mädler et.al.(2001)	ศึกษาสมบัติของอนุภาคนาโนที่เตรียมจาก Flame spray pyrolysis
Konstantinov et.al.(2000)	ศึกษาการควบคุมอนุภาคนาโนในการสังเคราะห์จากกระบวนการ Flame spray pyrolysis
Murugavel et.al.(1998)	ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส
Wen Wen Xu et.al.(2003)	ศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ Al_2O_3 และ SiO_2 ที่เตรียมจากกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส
Takeshi Kumazawa et.al.(2004)	ศึกษาการเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์ม TiO_2 ที่ได้จากกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส
	ทำการวิเคราะห์อนุภาค SiO_2 และ Al_2O_3 ในระดับนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ในกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส

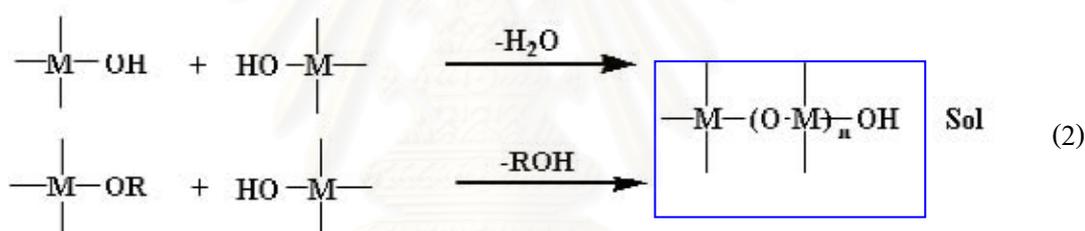
2.1.1 วิธีโซล - เจล (Sol - gel process)

โซล - เจล เป็นวิธีที่ค้นพบครั้งแรกโดย Ebelman และ Graham ในปี 1800 การเตรียม เริ่มจากการเตรียมสารละลายตั้งต้นของอัลคอกไซด์ในตัวทำละลายที่เหมาะสม ซึ่งส่วนใหญ่ มักเป็นแอลกอฮอล์ จากนั้นจะปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ตามด้วยปฏิกิริยาการรวมตัวซึ่งจะ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น เช่น โอลิโกเมอร์ ออกโซโพลิเมอร์ ซึ่ง กลายเป็นโซลจากนั้น โซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล จากเจลที่ ได้นำไปทำให้แห้งก็จะได้อนุภาคที่ต้องการ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้

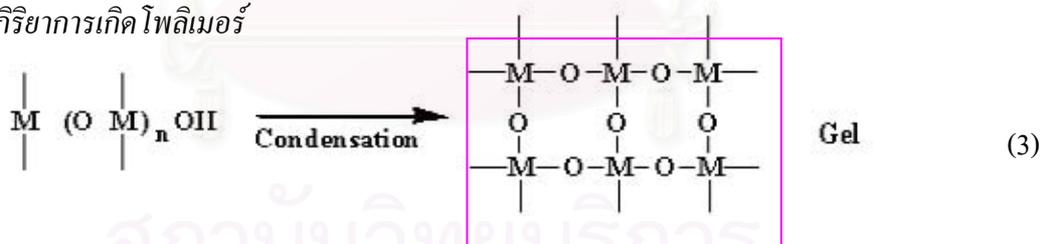
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)



ปฏิกิริยาการรวมตัว (Condensation)



ปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์



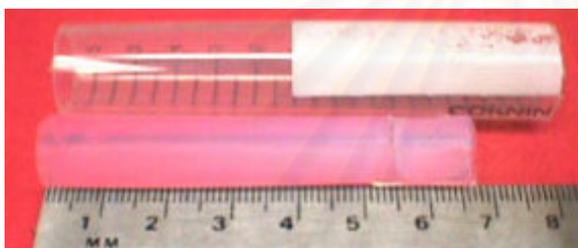
วิธีโซลเจลจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ

- การเตรียมเจล (Preparation of gel)
- การทำให้เกิดเจล (Aging of gel)
- การทำเจลให้แห้ง (Drying of gel)

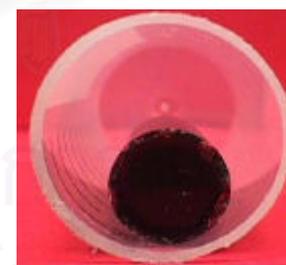
ซึ่งลักษณะเจลที่ได้จากการทำให้แห้งโดยวิธีการต่าง ๆ ประกอบไปด้วย

- ซีโรเจล (Xerogel) จะเป็นเจลที่ได้จากการทำให้แห้งภายใต้บรรยากาศโลก และใช้อุณหภูมิไม่สูงนักอาจทำโดยใช้เตาเผา
- แอโรเจล (Aerogel) เป็นลักษณะเจลที่ได้จากการทำให้แห้งภายใต้ภาวะจุดเหนือวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ (Supercritical CO₂) ซึ่งจุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ที่ อุณหภูมิ 31.1 C° ความดัน 1072 psi
- ไครโอเจล (Cryogel) ได้จากการทำเจลให้แห้งโดยใช้ความเย็น (freezing drying)

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการเตรียมเจลแบบแอโรเจลเนื่องจากลักษณะเจลที่ได้จะมีความเป็นรูพรุนสูงและไม่มีการหดตัวของเจลในขณะที่ทำให้แห้งดังรูป 2.3



(ก)

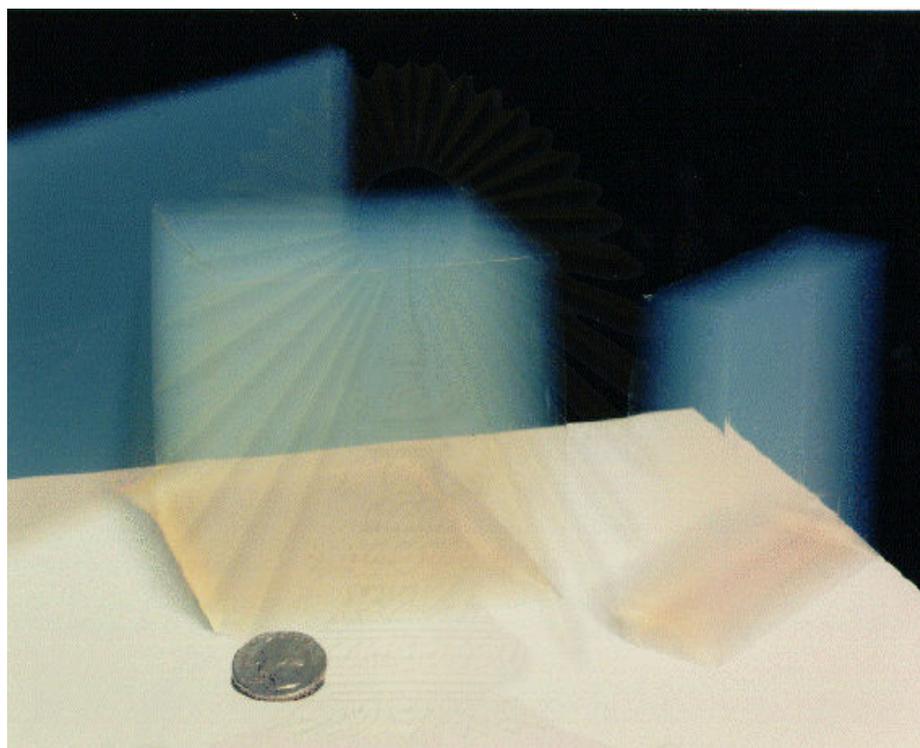


(ข)

รูปที่ 2.3 แสดงการหดตัวของเจลจากการทำให้แห้ง (ก) แอโรเจล (ข) ซีโรเจล

2.1.1.1 การสังเคราะห์ซิลิกาแอโรเจล (Synthesis of Silica aerogel)

การสังเคราะห์แอโรเจลส่วนใหญ่จะทำการเตรียมโดยวิธี โซล - เจล (Sol - gel process) ซึ่งแอโรเจลที่ได้จะมีลักษณะโปร่งแสง (ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.003 - 0.3 กรัมต่อตารางเซนติเมตร) และมีโครงสร้างรูพรุนแบบ mesopore อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวสูงถึง 600 - 1000 ตารางเมตรต่อกรัม



รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างซิลิกาแอโรเจล

การสังเคราะห์โดยใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น

การสังเคราะห์ซิลิกาแอโรเจลโดยการใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้น ได้เริ่มขึ้นครั้งแรกโดยการทำงานของ Kistler และคณะในปี 1931 โดยขั้นแรกจะทำการเตรียมเจลโดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก ดังสมการ



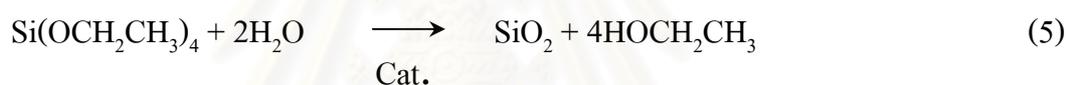
วิธีนี้จะทำให้เกิดเกลือเกิดขึ้นตั้งนั้นเมื่อได้แอโรเจลแล้วจะต้องนำไปล้างด้วยน้ำก่อนที่จะนำไปทำให้แห้งในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) ซึ่งจะให้อุณหภูมิและความดันจนถึงจุดวิกฤติของน้ำ (อุณหภูมิวิกฤติของน้ำ = 374 องศาเซลเซียส, ความดันวิกฤติของน้ำ = 221 บาร์) โดยความหนาแน่นของแอโรเจลที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 กรัมต่อตารางเซนติเมตร

การสังเคราะห์โดยใช้ TEOs (Tetraalkylorthosilicate) เป็นสารตั้งต้น

1. การเตรียมแอโรเจล

1.1 กระบวนการแบบ 1 ขั้นตอน (The one - step process)

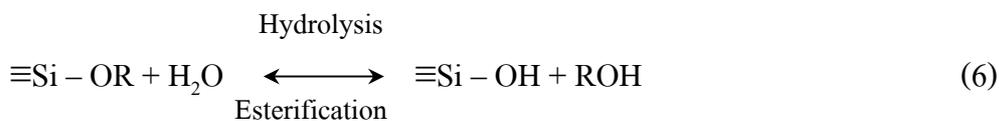
การเตรียมแอโรเจลในกระบวนการนี้ได้เริ่มมีการศึกษาคั้งแรกในปี 1966 โดยจะทำการไฮโดรไลซ์ สารละลาย TEOs ในเอทานอลและใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดโดยสรุปแสดงได้ดังนี้



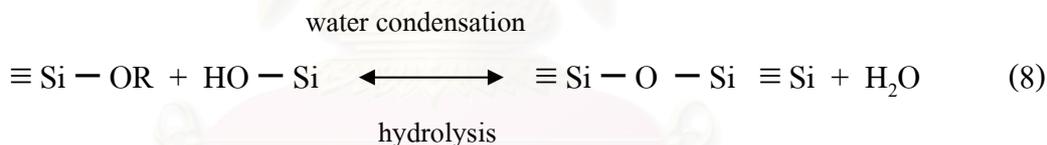
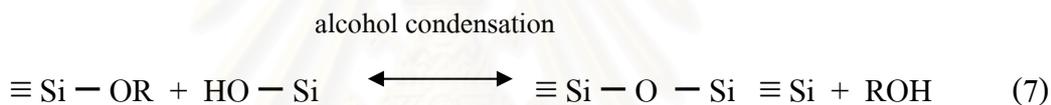
เจลที่ได้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจะทำการกำจัดน้ำโดยการสกัดด้วยเอทานอล สุดท้ายก็เป็นขั้นตอนการทำเจลให้แห้งซึ่งจะทำโดยอาศัยจุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อมาวิธีการนี้ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้สารตั้งต้นแตกต่างกันไป โดยทั่วไปจะใช้สารตั้งต้นที่เป็นพวกแอลคอกไซด์ (alkoxide) เช่น $\text{Si}(\text{OR})_4$ โดยที่ R จะเป็นหมู่แอลคิล (alkyl group) ($\text{R} = \text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ $n = 1,2,3,\dots$) โดยการสังเคราะห์แอโรเจลด้วยวิธีนี้สามารถจำแนกได้เป็นขั้นตอนดังนี้

- (1) การทำให้เกิดโมโนเมอร์ (monomers) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงการเกิดโซล โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส
- (2) การเกิดโพลิโกเมอร์โดยปฏิกิริยาการรวมตัว (Condensation) และปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization)
- (3) การเกิดเป็นอนุภาคโดยจะเกิดจากการรวมตัวกันของโมโนเมอร์
- (4) การทำให้เป็นเจล (gelation)
- (5) การบ่มเจล (aging)

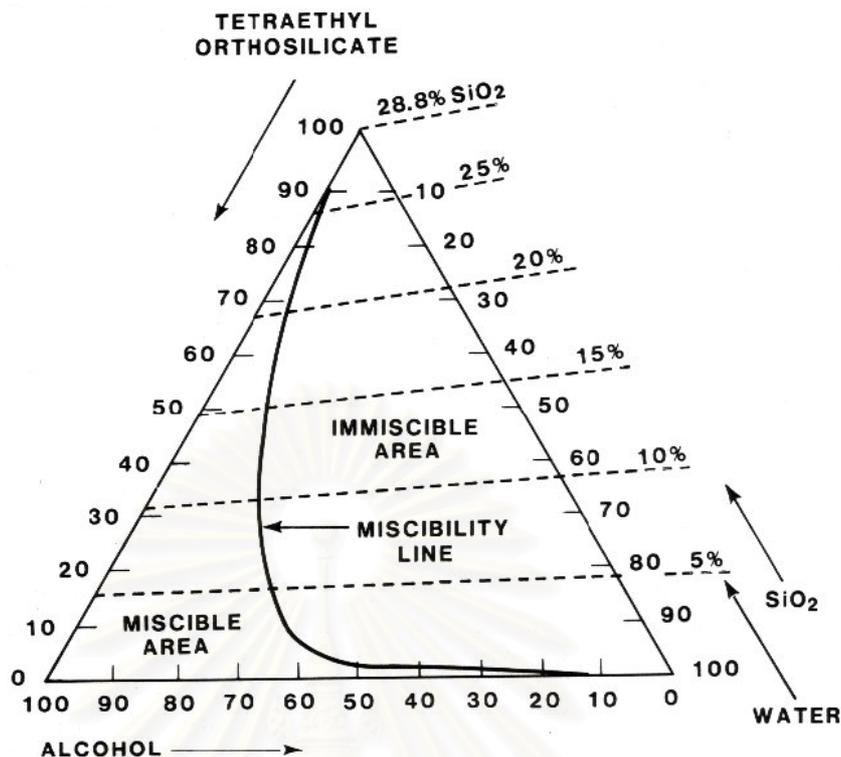
ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โลหะแอลคอกไซด์ (OR) จะถูกแทนที่โดยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ดังสมการ



ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้อย่างสมบูรณ์นั้นพิจารณาจากจำนวนหมู่ในปฏิกิริยาที่จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ ซึ่งน้ำและ alkoxy silane นั้นจะไม่รวมตัวหรือผสมกัน ดังนั้นจึงจะต้องเติมตัวประสานเพื่อให้ทั้งสองตัวผสมกัน สารละลายที่ใช้จะเป็นแอลกอฮอล์ อะซิโตนและเตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ในงานส่วนใหญ่นิยมใช้แอลกอฮอล์โดยแอลกอฮอล์นั้นก็จะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ซึ่งก็จะมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสลดลงตามสมการที่ 6 เฟสไดอะแกรมของระบบ alkoxy silane-water-solvent แสดงดังรูปที่ 2.5



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ที่มา : Brinker 1990

รูปที่ 2.5 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ TEOS-ethanol-water ที่อุณหภูมิ 25°C

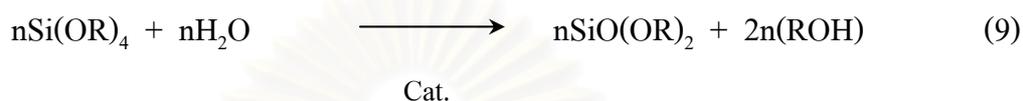
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (6) และปฏิกิริยาการรวมตัว (7), (8) จะเกิดขึ้นในทันที โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสคือกรด silicidic (ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้) ซึ่งจะถูก dehydrate และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ โดยการเชื่อมต่อกันของหมู่ siloxane (Si-O-Si) ซึ่งหมู่ siloxane จะเกิดขึ้นในปฏิกิริยาการรวมตัว (ปฏิกิริยาที่ 4 และ 5)

ข้อดีของวิธีการนี้คือจะไม่เกิดสิ่งเจือปน เช่น เกลือ เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา จึงไม่ต้องทำการล้างด้วยน้ำเหมือนวิธีของ Kistler

1.2. กระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน (The two - step process)

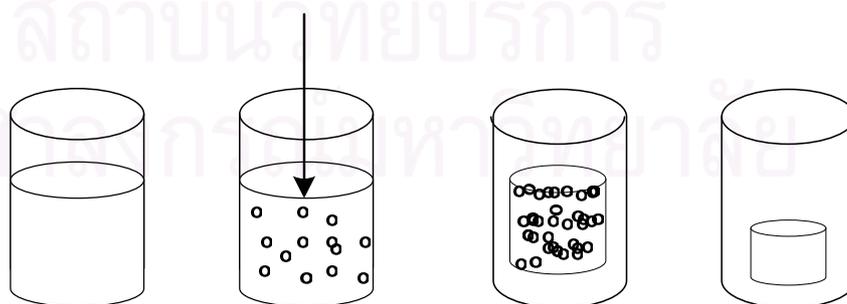
ในการสังเคราะห์ซิลิกาแอโรเจลนั้น ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน แต่ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของทั้งสองก็มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำและค่า pH ของสารละลาย ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน (The two - step process) ขึ้น

ในกระบวนการแบบ 1 ขั้นตอน (The one - step process) การเตรียมซิลิกาแอโรเจล จะทำโดยการผสมสารละลาย TEOs น้ำและกรด (ส่วนใหญ่จะใช้กรดไฮโดรคลอริก) เข้าด้วยกัน ในกระบวนการนี้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยน้ำที่เติมเข้าไบนั้นจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ซึ่งก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นพวกโมโนเมอร์ ลำดับต่อมาจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของ โมโนเมอร์เกิดเป็นพอลิเมอร์ขึ้น หลังจากนั้นน้ำจะถูกใช้ในปฏิกิริยาจนหมดทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ (Esterification)ย้อนกลับ ดังปฏิกิริยาที่ (6) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยรวมแสดงได้ดังนี้



ในกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอน (The two - step process) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์โดยการเติมน้ำลงไปในขณะที่เป็นกรดหรือเบส ซึ่งโอลิโกเมอร์และโมโนเมอร์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 1 จะถูกไฮโดรไลซ์และรวมตัวเกิดเป็นเจล ซึ่งโดยปกติแล้วปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นเร็วกว่าปฏิกิริยาการรวมตัว

สารละลาย	เกิดอนุภาค	อนุภาคของซิล	สารละลาย
$\text{Si(OC}_2\text{H}_5)_4$	ของซิลจาก	จับกันเป็น	แข็งตัวกลายเป็น
ในเอทานอล + น้ำ	ปฏิกิริยาพอลิเมอร์	โครงข่าย	เป็นเจล



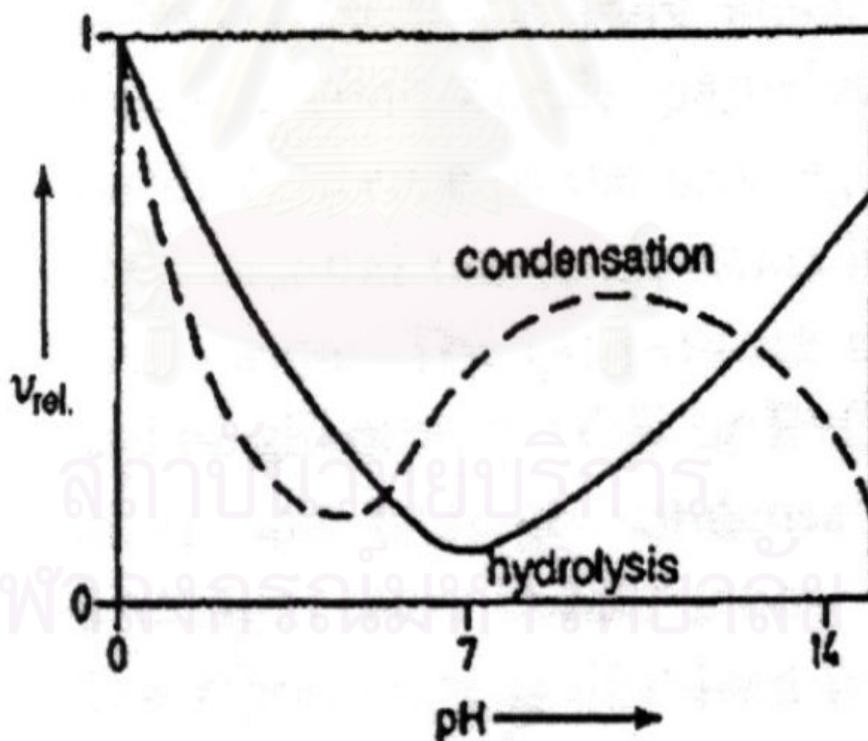
รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการเกิดซิลิกาเจล

2. คตะลิสต์ (Catalysts)

ในการเตรียมเจลโดยกระบวนการ โชล-เจล นั้น สามารถเลือกใช้กรดหรือเบสเป็น คตะลิสต์ก็ได้ขึ้นกับปฏิกิริยาและสารตั้งต้นที่ใช้ ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับค่า pH ของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ

กระบวนการแบบ 1 ขั้นตอน (The one - step process)

ในกระบวนการแบบ 1 ขั้นตอนนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัว จะเกิดขึ้นเองในทันทีซึ่งเป็นการยากที่จะแยกแยะปฏิกิริยาทั้งสองออกจากกัน โดยที่ระยะเวลาในการเกิดเจลในกระบวนการนี้จะเป็นผลมาจากทั้งสองปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ส่วนปฏิกิริยาการรวมตัวจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส กรณีที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวจะเริ่มเกิดขึ้นได้ช้ากว่าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส



รูปที่ 2.7 แสดงอิทธิพลของค่า pH ต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัวในกระบวนการ

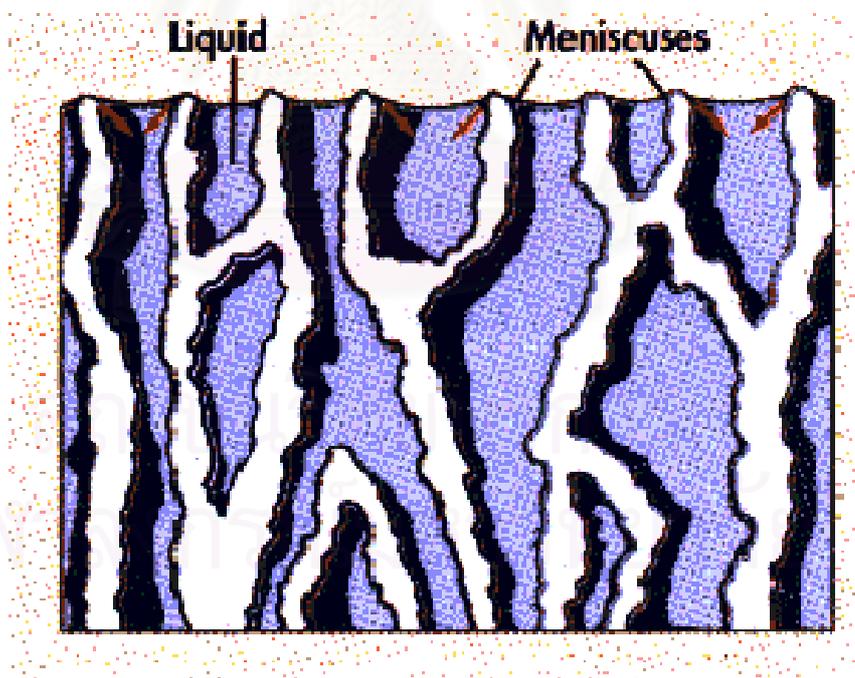
ข้อดีของกระบวนการแบบ 2 ขั้นตอนคือสามารถที่จะรวมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ด้วยกัน ซึ่งในขั้นแรกจะเกิดโพลิโเมอร์เป็นจำนวนมากจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบางส่วนของ TEOs ที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อมาในขั้นที่สองจะเกิดขึ้นอีกปานกลางในกรณีของตัวเร่งที่เป็นเบส

3. การบ่มเจล (Aging of gel)

การเกิดเจลจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายมีลักษณะสภาพเป็นของไหล (fluidity) น้อย โดยจะมีสภาพ elastic โดยที่จุดที่จะเป็นเจล (gel point) นั้นจะเกิดเมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาการรวมตัวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะเกิดจากการเชื่อมต่อกันเป็นลักษณะโครงข่ายของโมโนเมอร์ ปกติการเกิดเป็นเจลจะใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง

4. การทำให้แห้ง

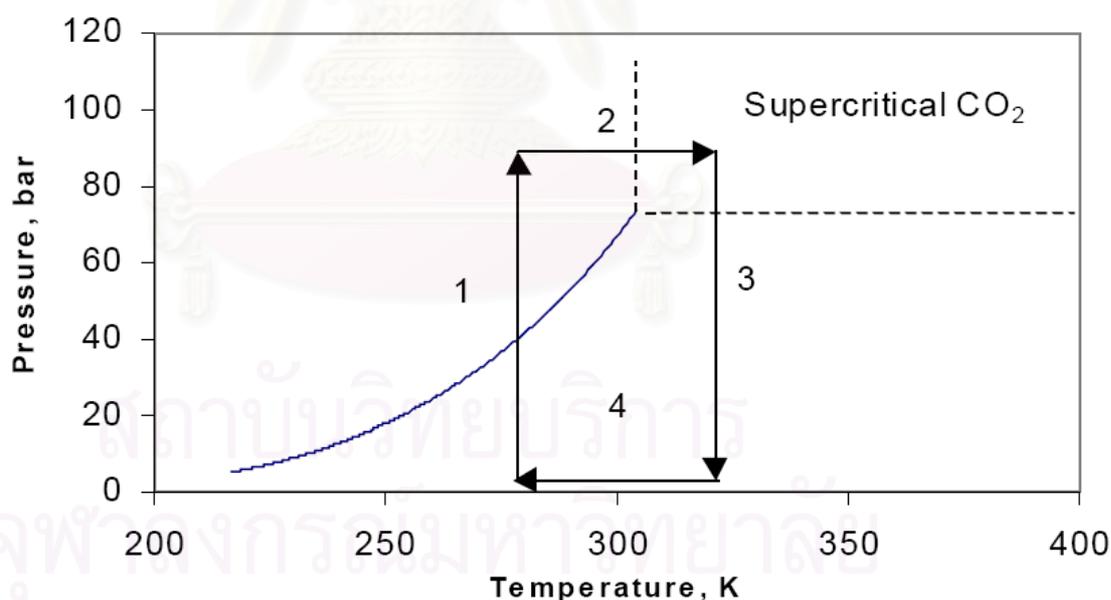
เจลเปียก (wet gel) จะมีลักษณะโครงสร้างรูพรุนแบบสามมิติ (tree dimensional porous) ที่เต็มไปด้วยของเหลวดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างรูพรุนของแอโรเจล

การทำให้แห้งโดยวิธี Supercritical drying เป็นการทำให้แห้งโดยจะหลีกเลี่ยงเฟสระหว่างของเหลวและไอ (liquid-vapor phase) เพื่อที่จะคงสภาพลักษณะรูพรุนแบบ mesopore ไว้ ขั้นตอนในการทำให้แห้งเป็นดังนี้

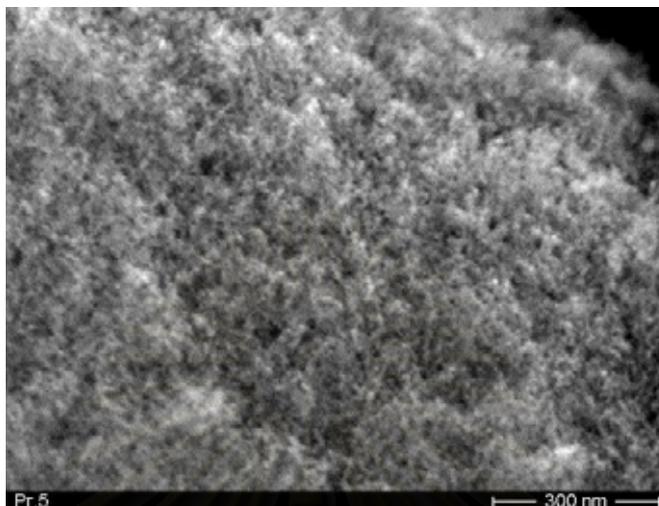
- (1) นำเจลเปือกที่เติมไปด้วยสารละลาย (ส่วนใหญ่สารละลายจะเป็นแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือเมทานอล) เข้าไปในหม้อนึ่งอัดไอน้ำ (autoclave) จากนั้นทำการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เหลวอุณหภูมิประมาณ 4 – 10 องศาเซลเซียสในเครื่องปฏิกรณ์ จนกระทั่งความดันเป็น 100 บาร์ (ขั้นที่ 1 ในรูปที่ 2.9) แล้วทำการเปิดวาล์วเพื่อสกัดสารละลายโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เมื่อทำการสกัดเสร็จแล้วก็ปิดวาล์วแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ถึง 40 องศาเซลเซียส (เหนืออุณหภูมิวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ : $T^c = 31$ องศาเซลเซียส) แต่ยังคงความดันไว้ที่ 100 บาร์ (ขั้นที่ 2 ในรูปที่ 2.9)
- (2) เมื่ออุณหภูมิอยู่เหนือจุดวิกฤตแล้วต้องมั่นใจว่าคาร์บอนไดออกไซด์ได้เปลี่ยนสถานะแล้ว จากนั้นจึงทำการลดความดันลง (ขั้นที่ 3 ในรูปที่ 2.9)
- (3) เมื่อทำการลดความดันแล้วสารละลายก็จะระเหยออกไป จากนั้นจะทำการลดอุณหภูมิไปจนถึงอุณหภูมิห้อง (ขั้นที่ 4 ในรูปที่ 2.9)



รูปที่ 2.9 แสดงการทำให้แห้งโดยใช้จุดเหนือวิกฤต (supercritical drying)

5. สมบัติของซิลิกาแอโรเจล

ซิลิกาแอโรเจลที่สังเคราะห์ได้จะมีสมบัติพิเศษแตกต่างกันออกไป ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างซิลิกาแอโรเจลจากภาพถ่าย SEM

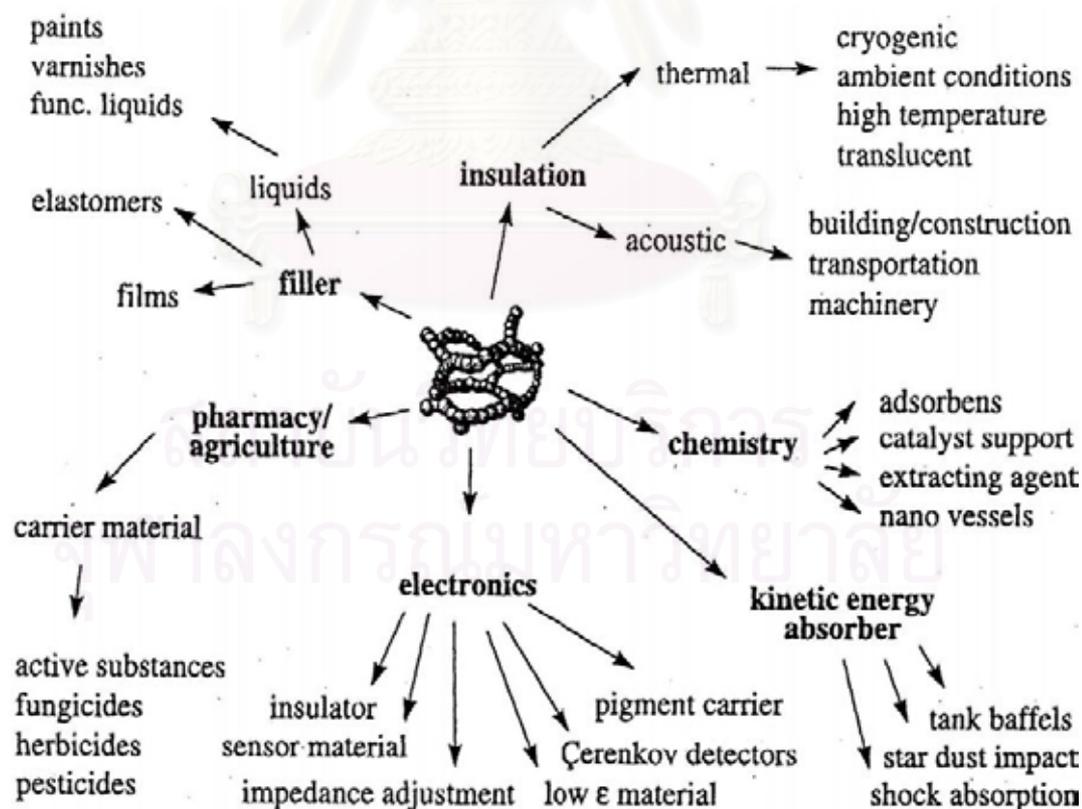
ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของแอโรเจล

สมบัติ	ค่า	หมายเหตุ
ความหนาแน่น	0.003-0.35 กรัม/ตารางเซนติเมตร	-
พื้นที่ผิวภายใน	600-1000 ตารางเมตร/กรัม	พิจารณาจากการดูดซับของก๊าซไนโตรเจน
เปอร์เซ็นต์ของแข็ง	0.13-15 เปอร์เซ็นต์	ปกติเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ (95% เป็นช่องว่าง)
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน	~ 20 นาโนเมตร	พิจารณาจากการดูดซับของก๊าซไนโตรเจน

ค่าดัชนีหักเหของแสง	1.0-1.05	มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับของแข็งชนิดอื่น
ค่าทนความร้อน	> 500 องศาเซลเซียส	เริ่มหดตัวที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่จุดหลอมเหลวจะอยู่ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส
ค่าไดอิเล็กทริก	~1.1	มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับของแข็งชนิดอื่น

6. การประยุกต์ใช้ซิลิกาแอโรเจล

เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ของซิลิกาแอโรเจล ปัจจุบันได้มีการนำซิลิกาแอโรเจลไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมายดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการประยุกต์ใช้ซิลิกาแอโรเจลในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

2.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนโดยวิธี Flame aerosol process

วิธีนี้จะเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น โดยจะทำที่อุณหภูมิสูงอนุภาคที่ได้จะอยู่ในลักษณะของแอโรโซลซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของคอลลอยด์

รูปแบบที่ธรรมดาที่สุดของคอลลอยด์มี 4 รูป ได้แก่

- (1) โซล (Sol) มีอนุภาคของคอลลอยด์ที่เป็นของแข็งกระจายอยู่ในของเหลว เช่น แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ $[Mg(OH)_2]$ ในน้ำ เป็นน้ำนมแห่งแมกนีเซีย (MILK OF MAGNESIA)
- (2) เจล (Gel) มีอนุภาคของคอลลอยด์ที่เป็นของเหลวกระจายอยู่ในของแข็งเช่น น้ำกระจายอยู่ในโปรตีน ตัวอย่างเช่น เจลาติน หรือวุ้น
- (3) อิมัลชัน (Emulsion) มีอนุภาคของคอลลอยด์ที่เป็นของเหลวกระจายอยู่ในของเหลว เช่น ไขมันอยู่ในน้ำ ตัวอย่างเช่น น้ำนม
- (4) แอโรโซล (Aerosol) มีอนุภาคของแข็งและของเหลว กระจายอยู่ในแก๊ส เช่น ควันในอากาศ ควันบุหรี่ น้ำในอากาศ หมอก สีของควันบุหรี่ เป็นต้น

Aerosol process เป็นวิธีที่สามารถผลิตซิลิกอนไดออกไซด์ในเชิงการค้า โดยอนุภาคที่ได้จะมีลักษณะเป็นผง (powder) มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ซึ่งอนุภาคที่ได้นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงจากก๊าซไปเป็นอนุภาค (gas-to-particle) โดยอนุภาคของ aerosol สามารถทำการสังเคราะห์ได้หลายวิธีดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงการสังเคราะห์แอโรโซลจากวิธีต่าง ๆ

	Flame	Evap/Con Reaction	Laser	Plasma	Hot Wall	Spray Pyrolysis
Max size, μm	1	0.1-10	1	1	10	0.1-100
Spread	broad	narrow	Narrow	broad	narrow	broad
Morphology	solid agglomerates	solid	solid	solid agglomerates	spherical solid	spherical solid, porous
Max Temp., K	2500	<2000	2,000	25,000	2,000	hollow
Material	oxides	material and oxides	oxides and non oxide	oxides and non-oxide	oxides and non-oxide	1,600 oxides and non-oxide
Complexity	low	low	medium	high	low	low

2.1.2 .1 เครื่องปฏิกรณ์แอโรโซล (Aerosol Reactor)

2.1.2.1.1 Flame Reactor

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรมในการผลิตอนุภาคออกไซด์ของอนินทรีย์ โดยใช้กระบวนการแอโรโซลซึ่งสารตั้งต้นจะมีลักษณะเป็นไอและจะถูกป้อนเข้าเตาเผาโดยการผสมกันกับออกซิเจน โดยมีก๊าซเฉื่อยเป็นก๊าซตัวพาและใช้ไฮโดรเจนหรือมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ



* SiCl_4 ในที่นี้อาจใช้สารตั้งต้นอื่นที่มี Si เป็นสารประกอบ

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดกับไอน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะเรียกว่าปฏิกิริยา flame hydrolysis โดยก๊าซที่ออกมาจะประกอบไปด้วยอนุภาคของซิลิกา ก๊าซของกรดไฮโดรคลอริก

ไฮโดรเจน และก๊าซคลอรีน ซึ่งจะแยกอนุภาคของซัลฟิดาออกมาโดยใช้เครื่องไซโคลน (cyclone separators) ในกระบวนการจะใช้อุณหภูมิของเปลวไฟในช่วง 1850-2000 องศาฟาเรนไฮต์



* ที่มา Vital A., Klotz U., Graulet T. and Mueller R

รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องปฏิกรณ์แบบ flame aerosol process

2.1.2.1.1 Pyrolysis Reactor

เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบแรกเริ่มที่มีการผลิตแอมโรโซล ซึ่งอนุภาคที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 20 ถึง 300 นาโนเมตร อุณหภูมิของเตาเผาคือ 1100 – 1700 องศาเซลเซียส โดยเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

- ส่วนการผสม (mixing zone) จะมีการผสมกันระหว่างแก๊สและอากาศ (gas/air mixture)
- ส่วนท่อปฏิกรณ์ (cylindrical reactor) จะเป็นบริเวณที่มีการเกิดปฏิกิริยา

- ส่วนการทำให้เย็น (water quench)

การเตรียมอนุภาคโดยวิธีน้ำทำได้โดยนำสารอัลคอกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ของโลหะไปเผาที่อุณหภูมิสูงพอภายใต้สภาวะที่เหมาะสม จากนั้นจะเกิดการสลายตัวและได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงเซรามิกออกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไพโรไลซิส (Pyrolysis โดยที่ Pyro หมายถึงความร้อนหรือไฟ) การเตรียมผงเซรามิกโดยวิธีนี้ ค่อนข้างง่ายและรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับวิธีโซล-เจล โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้น ไปละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น ไซลีน เป็นต้น สารตั้งต้นที่ใช้ส่วนใหญ่จะไม่ไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จึงไม่เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ เมื่อสัมผัสกับความชื้นในอากาศ ส่วนสารที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ เมื่อนำไปเผาก็จะได้ผงเซรามิกเช่นกัน ตัวอย่างเซรามิกที่ได้จากวิธีนี้ เช่น การเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์และซิลิกา เป็นต้น

2.3 SimaPro

SimaPro เป็นโปรแกรมที่ผลิตโดยบริษัท PR'e Consultants โดย Mr. Mark Goedkoop ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การจัดการวัฏจักรชีวิตและการออกแบบสิ่งแวดล้อมโดยการปรับปรุงผลิตภัณฑ์และบริการทางด้านสิ่งแวดล้อม ด้วยโปรแกรมที่เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของ SimaPro LCA software ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตของระบบ

โปรแกรม SimaPro สร้างขึ้นในปี 1990 สำหรับโครงการของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ โดยใช้ LCA software เป็นตัวแสดงผลซึ่งสามารถเข้าใจง่าย โดยมีผู้ใช้กว่าร้อยละ 47 ประเทศทั่วโลก PR'e Consultants ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมอย่างต่อเนื่องโดยมีรัฐบาลเนเธอร์แลนด์สนับสนุน โดยได้ทำการพัฒนา Eco-indicator 95 และ Eco-indicator 99 ซึ่งทั้งสองโปรแกรมมีประโยชน์อย่างมากในการจัดการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวัฏจักร

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตในโปรแกรม ได้ใช้หลักเกณฑ์ของมาตรฐานการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Impact Assessment) :ISO 14042 โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การจัดกลุ่มผลกระทบ (classification) การคำนวณผลกระทบจากสารต่างๆ เทียบกับสารฐาน (Characterization) และการเทียบความรุนแรงของผลกระทบและคำนวณเป็นคะแนนเดี่ยว (single score) ซึ่งในการศึกษานี้ จะแบ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Impact categories) ออกเป็น 7 กลุ่ม โดยใช้วิธี Eco-indicator 99 / Europe ซึ่งพัฒนาโดยสถาบันในประเทศเนเธอร์แลนด์ ดังนี้

- การทำให้ฤดูกาลเปลี่ยนแปลง (Climate change)
- การรั่วของโอโซน (Ozone layer depletion)
- สารก่อมะเร็ง (Carcinogens)
- โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ (Respiratory effects)
- การเกิดฝนกรด (Acidification)
- การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (Eutrophication)
- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ Ecotoxicity

นอกจากโปรแกรม SimaPro แล้วยังมีอีกหลายโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งแต่ละวิธีก็มีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินวัฏจักรชีวิต

	Ecoinvent Data base	SimaPro 6.0	Umberto 5	GaBi 4
Set-Up, Maintenance and Update of large transparent LCI/LCA-Data bases	+++	+	+	+
Online Access to Database	+++	-	-	-
Uncertainty-Analysis	+++	+++	+++	++
Easy to Use for LCA-Studies	-	+++	++	++
Material Flow Management and Cost Accounting, LCC	-	+	+++	++
Parameters for Models	-	-	+++	++
non-linear process specifications/dynamic models	-	-	+++	+
Scripts or Assistants for special Usergroups	-	+++	+++	-
Dominanzanalysis	-	+++	+++	+++
Process networks and Visualisation	-	++	+++	+++

2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของสินค้าตั้งแต่เกิดจนตายหรือที่เรียกกันว่า LCA นั้น เป็นหลักการที่มีการพูดถึงกันมานานแล้วและกำลังจะได้รับความสนใจอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีความตื่นตัวกันในประเทศที่พัฒนาแล้วหลายๆประเทศรวมถึงสหภาพยุโรป (EU) ซึ่งกำลังพิจารณาออกนโยบายสินค้าครบวงจร (Integrated Product Policy: IPP) ที่ใช้หลักแนวคิดเกี่ยวกับวงจรชีวิตสินค้าเป็นข้อพิจารณากำหนดระเบียบและมาตรการต่างๆ ปัจจุบันมีมีนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาไว้ Azapagic A. และคณะ ได้ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตและการนำ LCA ไปประยุกต์ใช้ในการเลือกและออกแบบกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้เสนอหลักของ LCA ที่ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขต ขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อทำบัญชีรายการ ขั้นตอนการประเมินผลกระทบและขั้นตอนการแปลผลและประเมิน อีกทั้งยังได้เสนอการประยุกต์ใช้ LCA ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาทิ การวางแผนหรือการพัฒนาการผลิตในด้านสิ่งแวดล้อม การออกแบบกระบวนการและผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โอกาสในการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการต่อสิ่งแวดล้อม ด้านการตลาดในการเสนอผลกระทบของผลิตภัณฑ์ต่อสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงการสร้างกรอบการทำงานเพื่อทดสอบความสามารถในด้านสิ่งแวดล้อม

ฉันทนา ยูะนิยม, ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา และคณะ ได้ทำการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกธรรมดา กับพลาสติกย่อยสลายได้ โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เก็บรวบรวมข้อมูลการใช้ทรัพยากรและของเสียที่ปล่อยออกมาจากการผลิตเม็ดพลาสติกและบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกธรรมดา กับบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกย่อยสลายได้ รวมถึงการศึกษาวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ดังกล่าว โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อให้เป็นแนวทางในการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยขอบเขตของงานวิจัยคือ การศึกษาบรรจุภัณฑ์พลาสติกธรรมดาและพลาสติกย่อยสลายได้ เช่น ถุงพลาสติกธรรมดา (Shopping bag) และถุงพลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic bag) ซึ่งผลิตจากพลาสติกประเภท PE เป็นต้น งานวิจัยนี้จะทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สํารวจสถานการณ์เบื้องต้นของอุตสาหกรรมพลาสติกและการใช้งาน บรรจุภัณฑ์พลาสติกในประเทศไทยและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ที่จะศึกษาและทำการศึกษา 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการผลิต ซึ่งประกอบด้วยการผลิตวัสดุและการผลิตผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนการขนส่ง ขั้นตอนการใช้ และขั้นตอนการกำจัด สำหรับประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ ทำให้เกิดฐานข้อมูลการผลิต บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกธรรมดาและ

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นข้อมูลในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ และส่งเสริมอุตสาหกรรมให้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มศักยภาพในด้านการใช้พลังงานและทรัพยากรภายในประเทศ

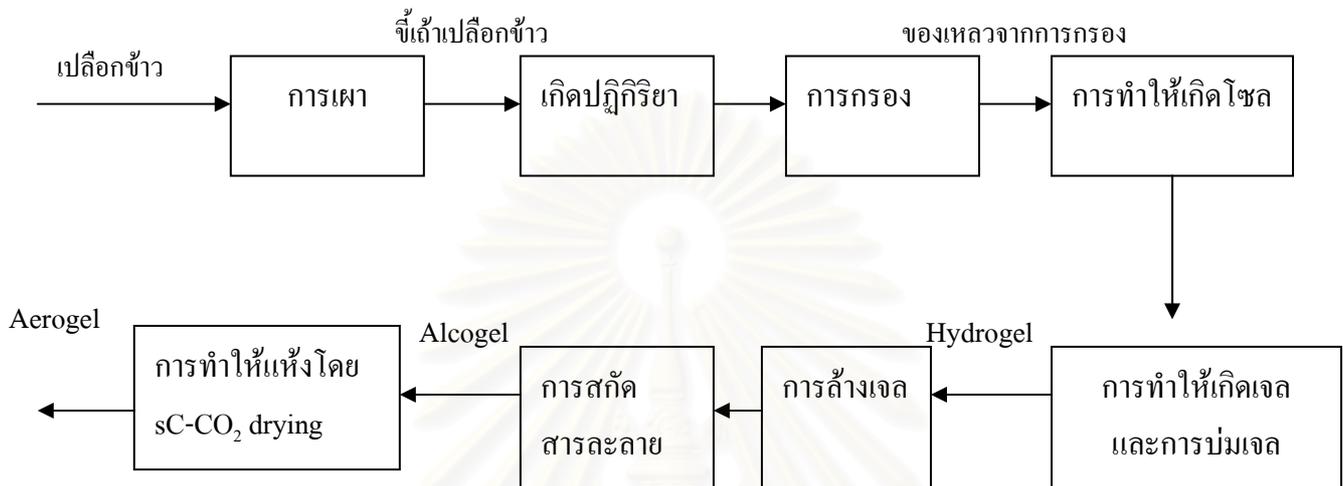
ในส่วนการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนหรือซิลิกานั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การสังเคราะห์โดยการโซล-เจล (Sol-gel process) Marek S, Jerzy W. และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์ซิลิกานาโนโดยใช้กระบวนการทางโซลเจล (sol-gel process) สำหรับการสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีนี้ จะทำการเตรียมแอโรเจลซึ่งจะใช้สารละลาย TEOs (Tetraethylortho - silicate) ในแอลกอฮอล์ ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กรดไนตริกลงไป 2 – 3 หยด ที่อุณหภูมิประมาณ 14-16 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดเป็นเจลจากนั้นก็นำไปทำให้แห้งภายใต้ภาวะสุญญากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีโซลเจล ขนาดอนุภาคที่ได้จะอยู่ในช่วง 5-50 นาโนเมตร คุณสมบัติของซิลิกาที่ได้จะมีพื้นที่ผิว 935-1150 ตารางเมตรต่อกรัม ความหนาแน่นที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.043-0.089 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และจะมีปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด 8.6-10.9 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์ซิลิกาจากเปลือกข้าวโดย Qi Tang, Tao Wang และคณะ ได้ทำการศึกษาการเตรียมซิลิกาแอโรเจลจากข้าวเปลือกข้าว ซึ่งทำการทดลองโดยการ



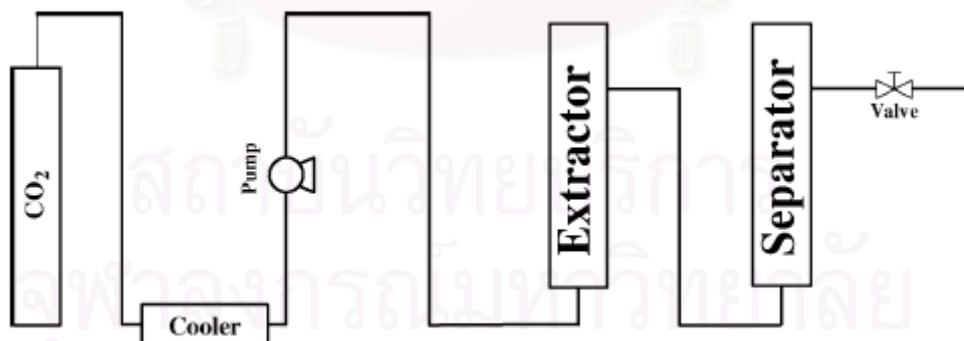
รูปที่ 2.13 แสดงกระบวนการผลิตโดยวิธี sol-gel process

นำเปลือกข้าวไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก็จะได้ข้าวเปลือกออกมา จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้ปริมาณ 1.5 กรัมผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วนำสารละลายที่ผสมกันดังกล่าวไปให้ความร้อนจนเดือดเป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำไปกรองเพื่อกรองสารที่ไม่ละลายออกไป แล้วทำการเติมกรดซัลฟูริก คลอริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จนกระทั่งค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 ก็จะได้ไฮโดรเจล (hydrogel) จากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการทำให้เกิดเจล โดยจะทำการบ่มเจลไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลามากกว่า 24 ชั่วโมง ขั้นสุดท้ายจึงนำเจลที่ได้ไปทำให้แห้งโดยการสกัดด้วย

วิธีการทำให้แห้ง โดยใช้จุดเหนือวิกฤตของคาร์บอนไดออกไซด์ (Supercritical CO₂ drying)
 ขั้นตอนการเตรียมแอโรเจลและการทำให้แห้งแสดงดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 แสดงขั้นตอนการเตรียมแอโรเจล



รูปที่ 2.15 แสดงการทำให้แห้งโดยใช้ Supercritical drying

ผลการทดลองสามารถสังเคราะห์ซิลิกาแอโรเจลที่มีความหนาแน่น 38 กิโลกรัมต่อตารางเมตร มีพื้นที่ผิว 597.7 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ที่ 8.65 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

และขนาดอนุภาคมีเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 60 นาโนเมตร ผลการสังเคราะห์แสดง
ได้รูปที่ 2.16

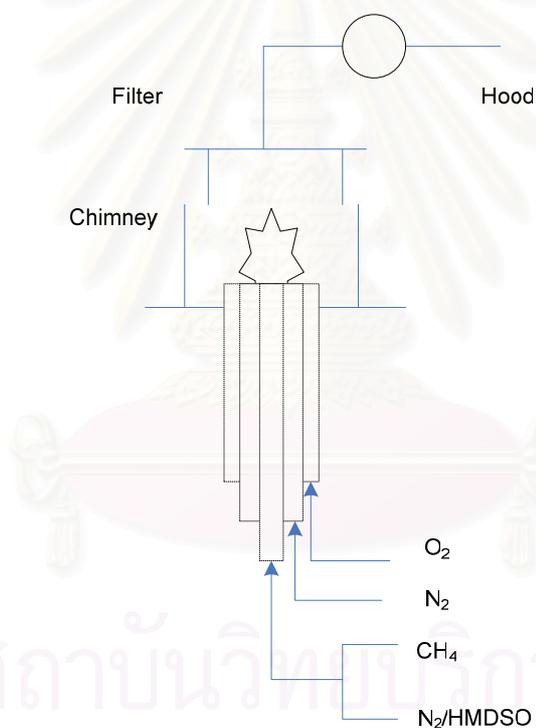


รูปที่ 2.16 แสดงซิลิกาแอโรเจลที่เตรียมได้จากขี้เถ้าเปลือกข้าว

นอกจากการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนโดยวิธีโซล-เจล
แล้วยังมีการสังเคราะห์ด้วยวิธี Flame aerosol process ซึ่งวิธีนี้ได้มีการพัฒนาการผลิตไปสู่
อุตสาหกรรมแล้ว Vital A., Klotz U. และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์สังเคราะห์ซิลิกาโดย
ใช้วิธี Flame aerosol process ซึ่งในการทดลอง HMDSO (Hexamethyldisiloxane) จะใช้เป็นสาร
ตั้งต้นในการผลิต ส่วนก๊าซในโตรเจนนั้นเป็นก๊าซตัวพาในกระบวนการ ใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง และ
ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวออกซิแดนซ์ ซึ่งสารต่าง ๆ เหล่านี้จะทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการ โดย
สารเคมีที่ป้อนและกระบวนการผลิตแสดง ดังตารางที่ 2.9 และ รูปที่ 2.17

ตารางที่ 2.9 สารเคมีที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการสังเคราะห์โดยวิธี flame aerosol process

สารเคมีที่ป้อน	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	ป้อนเข้าสู่ท่อ
HMDSO	1	แกนกลางท่อ
มีเทน	85	แกนกลางท่อ
ไนโตรเจน	176	ท่อตรงกลาง
ออกซิเจน	75	ท่อด้านนอก



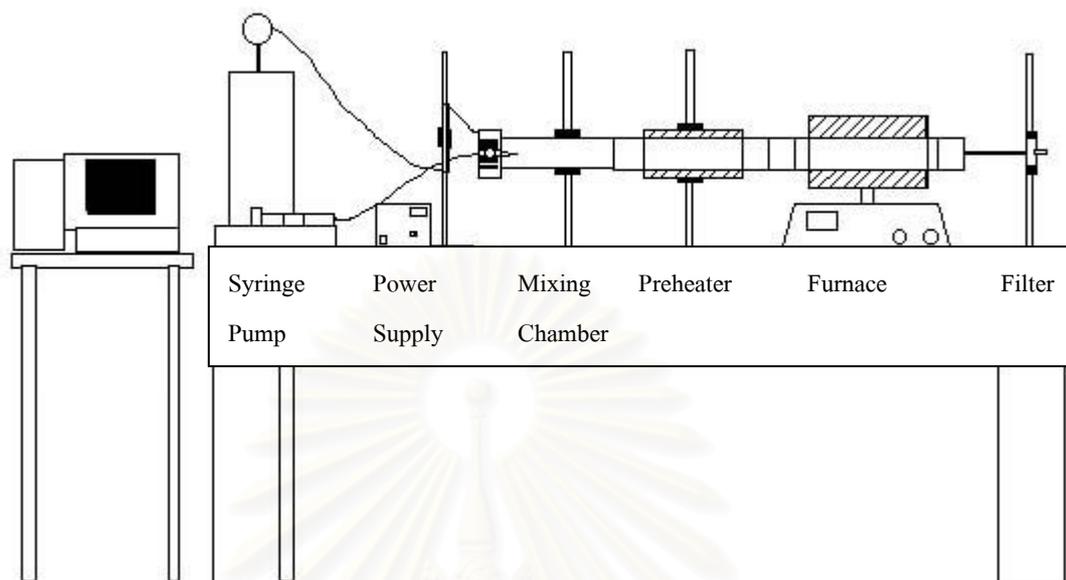
รูปที่ 2.17 แสดงกระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process

ผลการสังเคราะห์ด้วยวิธี Flame aerosol process สามารถสังเคราะห์อนุภาคซิลิกา โดยมีขนาดเส้นผ่านใน ช่วง 10 – 100 นาโนเมตร และมีอัตราการผลิตคือ 17 กรัมต่อชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจนดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงขนาดอนุภาคของซิลิกาที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของออกซิเจน

อัตราการใช้ของออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	ขนาดอนุภาค SiO ₂ (เส้นผ่านศูนย์กลาง)
2.5	44 nm
4.7	78 nm
8.5	55 nm
13.3	41 nm
24	23 nm

ส่วนการสังเคราะห์ซิลิกานาโนอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ วิธีที่เรียกว่าไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดยที่ George V. และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโนโดยใช้วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray Pyrolysis) ซึ่งทำการเตรียมสารละลายที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตในอัตราส่วนโดยโมล (mole ratio) ดังนี้คือ TEOS : C₂H₅OH : HNO₃ : H₂O เท่ากับ 1 : 3.8 : 0.085 : 6.5 จากนั้นทำการให้ความร้อนของสารละลายจนมีอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะผ่านเข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งชุดการทดลองแสดงดังรูป 2.18 โดยที่อนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 50 ถึง 100 นาโนเมตร

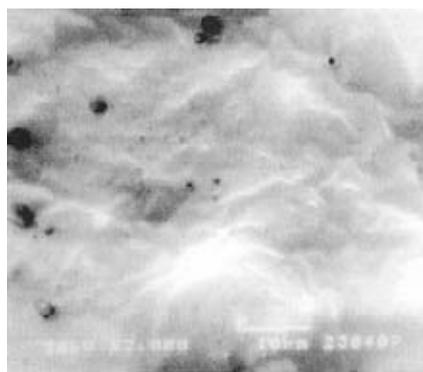


รูปที่ 2.18 แสดงชุดอุปกรณ์การสังเคราะห์ซิลิกาโดยใช้วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส

ปัจจุบันได้มีการนำซิลิกาไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณสมบัติดีขึ้น อาทิ การนำเอานาโนซิลิกามาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพินเทียมและใช้เป็นตัวนำส่งยา เป็นต้น Markovi G, Radovanovi B และคณะ ได้ศึกษาการการนำซิลิกามาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง โดยทำการศึกษาถึงการเติมอนุภาคที่เป็นนาโน (15 นาโนเมตร) และไมโคร (28 ไมโครเมตร) พบว่ายางที่มีการเติมอนุภาคนาโนจะมีการกระจายตัวของเนื้อยางได้ดีกว่าดังรูปที่ 2.19 และพบว่ายางที่ได้นั้นมีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยลดการสูญเสียพลังงานบริเวณหน้ายางได้ด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM ของยางที่ได้จากการเติม SiO_2 ; (ก) SiO_2 อนุภาคไมโคร
(ข) SiO_2 อนุภาคนาโน

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Norbert M. and Simone K และคณะ ที่ได้นำเอาซิลิกาอนุภาคนาโนมาเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพินเทียม จากสมบัติที่แข็งแรงของซิลิกา จึงได้มีการนำเอาซิลิกาอนุภาคนาโนมาเป็นสารประกอบในพินเทียม โดยอนุภาคที่เติมมีขนาด 18-85 นาโนเมตร ซึ่งพินเทียมที่ได้จะมีความแข็งแรงมากขึ้น และมีอายุการใช้งานนานขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถป้องกันการเกิดคราบเหลืองได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การพัฒนาและการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี

ในบทนี้เริ่มแรกจะกล่าวถึงความหมายของนาโนเทคโนโลยี ความรู้และความสำคัญของศึกษานาโนเทคโนโลยี จากนั้นจะกล่าวถึงการพัฒนาและการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี ซึ่งจะเน้นไปในด้านการศึกษาการพัฒนาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมอนุภาคในระดับนาโน

3.1 นาโนเทคโนโลยี

3.1.1 นิยามของนาโนเทคโนโลยี

คำว่า “นาโน” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกแปลว่า แคระ (dwarf) ในภาษาอังกฤษ นาโนใช้เป็นคำเติมหน้า (prefix) ซึ่งหมายถึง หนึ่งในพันล้านส่วน (10^{-9}) ดังนั้นนาโนเมตร (nm) จึงหมายถึงหนึ่งในพันล้านเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมของคนเราประมาณหนึ่งแสนเท่า

3.1.2 หลักการพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี

จากการศึกษาที่ผ่านมาเราทราบว่าสสารทั้งหลายต่างก็ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุต่าง ๆ ด้วยการจัดเรียงตัวของอะตอมในรูปแบบที่ต่างกัน ทำให้สามารถแยกแยะสิ่งต่าง ๆ ออกจากกันได้ การจัดเรียงอะตอมแบบหนึ่งอาจได้น้ำ อากาศ หรือดิน ขณะที่การจัดเรียงอะตอมอีกแบบหนึ่งอาจได้กล้วย ข้าวหรือ มะละกอ การจัดเรียงตัวแบบหนึ่งอาจทำให้เป็นต้นไม้และอากาศที่สดชื่น ในขณะที่การจัดเรียงตัวอีกแบบหนึ่งจะทำให้เกิดจี๊ดๆ และเขม่าควัน ความสามารถในการจัดเรียงอะตอมของมนุษย์เราเป็นสิ่งที่วางรากฐานของเทคโนโลยี จากอารยธรรมของมนุษย์พบว่าเทคโนโลยีที่มนุษย์ได้พัฒนามาอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. เทคโนโลยีแบบหยาบ (Bulk technology)

เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันมาตั้งแต่สมัยโบราณ เป็นการจัดการกับอะตอมและโมเลกุลในลักษณะที่เป็นก้อนด้วยวิธีทางกล เช่น การตัด กลึง คัด ตีขึ้นรูป และอื่น ๆ ตัวอย่างเช่นการทำมีดเราขึ้นรูปด้วยการเผาเหล็กให้ร้อนแล้วตีขึ้นรูป จากนั้นนำไปเจียรระโนหรือลับให้คม ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการจัดการอะตอมและโมเลกุลในระดับขนาดเล็กกลาง เช่น การอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก แต่อุปกรณ์เหล่านี้ยังคงประกอบด้วยอะตอมเป็นล้าน ๆ ตัว และยังคงมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ถึงแม้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะทำให้คอมพิวเตอร์มีขนาดเล็กกลางและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่การใช้เทคโนโลยีแบบหยาบมาสร้างสิ่งที่มีขนาดเล็กย่อมขาดความเที่ยงตรง และมีความบกพร่องสูง

2. นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology)

นาโนเทคโนโลยี หรือเทคโนโลยีระดับโมเลกุล (Molecular technology) นั้น เป็นเทคโนโลยีใหม่ ที่สามารถจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัวได้อย่างเที่ยงตรง เป็นเทคโนโลยีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การจัดการกับสิ่งต่าง ๆ หรือผลิต สิ่งต่าง ๆ สามารถทำได้โดยการนำอะตอมหรือโมเลกุลมาวางในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำสิ่งที่ผลิตขึ้นมาจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ นาโนเทคโนโลยีมีรากฐานอยู่บนการผลิตในระดับโมเลกุลที่ต้องการเป็นการรวมเอาหลักการทางเคมีและทางกลศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานที่แปลกใหม่ ในทางเคมีโดยทั่วไปโมเลกุลเคลื่อนที่โดยการแพร่ และชนกันของโมเลกุลในทุกตำแหน่งและในทุกทิศทางที่เป็นไปได้ ผลของปฏิกิริยาเคมีเป็นสิ่งที่ยากจะควบคุม ในทางตรงกันข้ามการสร้างโมเลกุลสามารถใช้ประโยชน์ของการสังเคราะห์ทางกล คือใช้อุปกรณ์ทางกลเพื่อนำการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่ทำปฏิกิริยา โดยประยุกต์ใช้หลักการทางกลศาสตร์ของการยึดและกำหนดตำแหน่งเข้ากับการทำปฏิกิริยาเคมี การสังเคราะห์ทางกลสามารถสร้างความพิเศษที่ทำให้โมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปเกิดในตำแหน่งที่เที่ยงตรงและในลำดับที่เที่ยงตรง ตำแหน่งที่เชื่อถือได้เป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับการสังเคราะห์ทางกลเพื่อสร้างวัตถุด้วยการจัดเรียงอะตอมจำนวนล้านถึงพันล้านอะตอมอย่างเที่ยงตรง

3.1.3 ความสำคัญของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีมีลักษณะเป็นสหวิชาการของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในหลายสาขา อาทิเช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา ชีวเคมี เทคโนโลยีชีวภาพ โลหะวิทยาและวัสดุศาสตร์ วิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมเคมี เป็นต้น ในประเทศที่พัฒนาแล้ว

และกำลังพัฒนา นาโนเทคโนโลยีนั้นถือว่ามีความสำคัญยิ่ง เพราะว่ามันทำให้เกิดการค้นพบวัสดุใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเกือบทุกอุตสาหกรรม ช่วยยกระดับหรือเพิ่มมูลค่าอุตสาหกรรมที่มีอยู่เดิม หรืออาจเกิดการริเริ่มอุตสาหกรรมใหม่ได้ในอนาคต เทคโนโลยีนี้ได้ชื่อว่าเป็นเทคโนโลยีแห่งการผลิตที่สำคัญอย่างยิ่งในอนาคต

ถึงแม้ว่าจะมีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้บ้างแล้วในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน นาโนเทคโนโลยีก็ยังถือว่ายังใหม่อยู่มาก ขณะนี้เป็นเพียงแค่จุดเริ่มต้นเท่านั้น รูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีสามารถจำแนกออกเป็น 3 สาขาหลักได้แก่

1. วัสดุนาโน

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์หรือบดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้ละเอียดและขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร สามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ตัวอย่างเช่น อนุภาคสารคาร์บอน (carbon nano-particles) หรือท่อคาร์บอน (carbon nanotubes) ซึ่งมีคุณสมบัติที่แข็งแรงกว่าเหล็กกล้า 100 เท่าและน้ำหนักเบากว่า 6 เท่า สามารถนำมาใช้เป็นสารประกอบแต่ง (composite) ในการสร้างตัวถังหรือกันชนรถยนต์ให้มีสมรรถนะที่แข็งแรงทนทานต่อการกระแทก ชูดิจิต มีน้ำหนักเบา และช่วยประหยัดเชื้อเพลิง เป็นต้น

2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์

เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีช่วยในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับทางอิเล็กทรอนิกส์หรือไฮเทค (hi-tech) อาทิเช่น การนำท่อคาร์บอน (carbon nanotubes) ซึ่งมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ดีเยี่ยม มาประยุกต์ใช้ในการสร้างไมโครชิพที่มีความเร็วสูงกว่าปัจจุบันหลายเท่าตัว หรือการใช้แผ่นฟิล์มบางสารอินทรีย์ในระดับนาโนมาใช้เป็นส่วนประกอบในเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า หรืออุปกรณ์แสดงผลฟิล์มบางเปล่งแสงสารอินทรีย์ (organic light emitting-diode: OLED) เพื่อใช้เป็นจอภาพกล้องถ่ายรูปดิจิทัล หรือโทรทัศน์จอพลาสมา เป็นต้น

3. เทคโนโลยีชีวภาพนาโน

เป็นการประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีช่วยในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับทางชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็นทางการแพทย์และอาหาร หรือ สุขภาพและการแพทย์ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น การพัฒนาหรือผลิตชุดตรวจวินิจฉัยโรคโดยใช้นาโนไบโอเซ็นเซอร์ การสกัดสารสมุนไพรในระดับนาโนเพื่อช่วยให้ซึมซับได้รวดเร็วในร่างกาย หรือการผลิตแคปซูลนำส่งยา

(drug delivery) ระดับนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อช่วยในการรักษาโรคเฉพาะจุด เช่น โรคมะเร็ง เป็นต้น

3.2 การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยี

ในการผลิตหรือสร้างวัตถุที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรมีวิธีการพื้นฐานอยู่ 2 วิธีคือ

1. เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง (Top down technology)
2. เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน (Bottom up technology)

1. เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง

เทคโนโลยีแบบบนลงล่าง หมายถึงการทำโครงสร้างขนาดนาโนเมตรโดยใช้เทคโนโลยีแบบหยาบ ตัวอย่างของเทคโนโลยีแบบบนลงล่าง เช่น

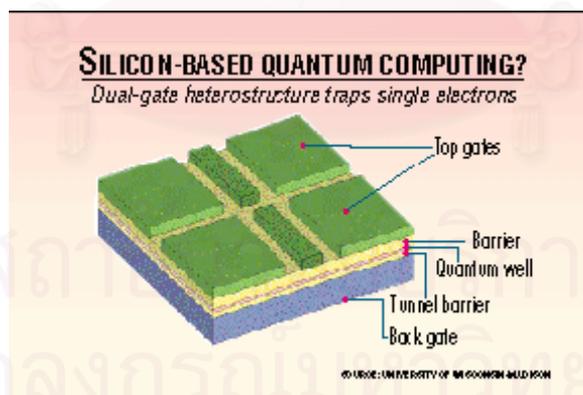
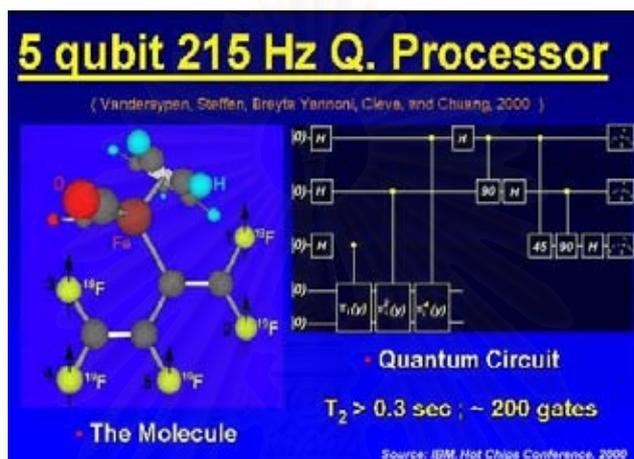
- โฟโตลิโทกราฟี (Photo lithography) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตชิปคอมพิวเตอร์ และระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ สามารถทำโครงสร้างที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร แต่ทำได้ยากมาก ราคาแพงและไม่สะดวก
- ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เหมือนกับเป็นแท่งโลหะ หรือสามารถทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไดโอด ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนคาร์บอน

2. เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน

เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน หมายถึงการทำโครงสร้างหรือผลิตสิ่งของโดยการนำอะตอม/โมเลกุล มาจัดเรียงหรือประกอบกันทีละอะตอม/โมเลกุล เทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบนก็คือเทคโนโลยีระดับโมเลกุลหรือนาโนเทคโนโลยีนั่นเอง ตัวอย่างของเทคโนโลยีแบบล่างขึ้นบน เช่น

- หุ่นยนต์นาโน (Nano robot) คือหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรกลในระดับนาโนเมตร ซึ่งอาจสามารถจัดการกับอะตอมหรือโมเลกุลแต่ละตัว รวมข้อมูล และทำวัสดุใหม่หรือสำเนาตัวเองโปรตีนเป็นเครื่องจักรกลนาโนหรือหุ่นยนต์นาโนที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรนาโนได้ให้ความสนใจเป็นพิเศษ

- ควอนตัมคอมพิวเตอร์ (Quantum Computer) เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางกลศาสตร์ควอนตัมในการเข้าประมวลผลข้อมูลในอะตอม ถึงแม้ในปัจจุบันนี้จะยังไม่มีความพร้อมของคอมพิวเตอร์แต่แบบจำลองของควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่เสนอไว้สามารถประมวลผลข้อมูลเร็วกว่าซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันเป็นพันล้านเท่า



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรควอนตัมคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

การพัฒนาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน

ด้วยสมบัติที่โดดเด่นของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนไม่ว่าจะเป็นการทนความร้อนได้ดี มีพื้นที่ผิวสูง มีความแข็งแรง รวมไปถึงเป็นสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันจึงได้มีการนำนาโนซิลิกาไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณสมบัติดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำเอาอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพินเทียม และนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

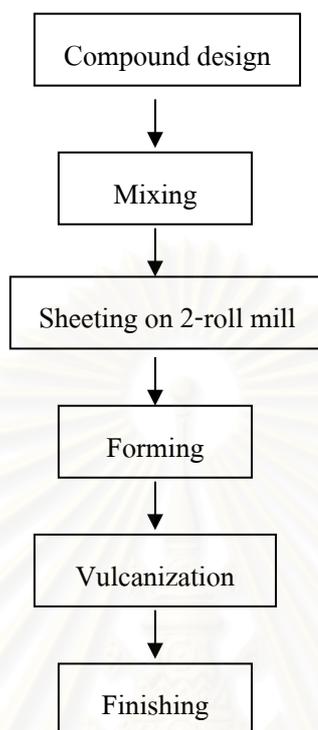
4.1 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง

การทำให้คุณสมบัติของโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นมีหลายวิธี แต่วิธีซึ่งเป็นที่นิยม โดยเฉพาะกับยางธรรมชาติ คือ การผสมยางกับวัสดุต่างเฟสกัน หรือที่เรียกว่า สารตัวเติม อาทิ คาร์บอนแบล็ค หรือซิลิกา เป็นต้น ที่ผ่านมาการผสมกันโดยที่สารตัวเติมกระจายในโพลีเมอร์ในระดับไมโครเมตรนั้น จะใช้สารในปริมาณมากเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของโพลีเมอร์ แต่หลังจากมีการค้นพบนาโนเทคโนโลยีสำหรับคอมโพสิต ซึ่งมีการปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นที่ผิวของสารตัวเติมด้วยสารเคมี เพื่อให้กระจายตัวได้ในระดับนาโนเมตรภายในโพลีเมอร์ ซึ่งทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของโพลีเมอร์ดีขึ้นอย่างมาก แม้ว่าจะใช้ปริมาณสารตัวเติมลดลงก็ตาม จึงเป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ที่มีข้อดีด้านความยืดหยุ่น

4.1.1 กระบวนการผลิตยาง

โดยทั่วไปแล้วยางดิบมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้ โดยตรงจำเป็นต้องมีการผสมยางดิบกับสารเคมีต่างๆ เพื่อปรับสมบัติของยางให้ได้ตามความเหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้นๆ และนำยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ไปผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3-D network)

หรือที่เรียกว่าการเกิด crosslink ระหว่างโมเลกุลของยางโดยทั่วไป กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางพอสรุปได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยทั่วไป

4.1.2 การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าที่และความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ดังนี้

1. ยาง (rubber)

การออกสูตรยางจะต้องรู้สมบัติของยางแต่ละชนิดเป็นอย่างดี กล่าวคือต้องรู้ข้อดีและข้อเสียของยางที่จะนำมาใช้ เช่น ยางธรรมชาติมีข้อดีคือ มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (pure

gum) ดีมาก นั่นคือไม่ต้องเติมสารเสริมแรงก็สามารถให้ความแข็งแรงได้ดี ในขณะที่ยาง EPDM มีความแข็งแรงของน้ำยางล้วนๆ สูงๆ ธรรมชาติไม่ได้ แต่มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากโอโซนและสภาพอากาศที่คิดว่า เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการผสมยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์มาใช้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดและยังมีผลต่อการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

2. สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent or curing agent)

สารกลุ่มนี้จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ยางอยู่ในสถานะที่ยืดหยุ่นได้สูง หรืออาจใช้คำว่า “ คงรูป ” แต่ตามโรงงานมักเรียกกันว่า “ ยางสุก ” สารทำให้ยางคงรูปแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulphur) นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (peroxide) ซึ่งนิยมใช้ในยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าว ยังมีการใช้สารคงรูปพวกโลหะออกไซด์ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์และสังกะสีออกไซด์ (MgO/ZnO) ในยางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางนีโอพรีน

ระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน (sulphur vulcanization system)

เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการทำให้ยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลสูงคงรูป เช่น ยางธรรมชาติหรือยาง SBR เพราะพันธะคู่คือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ระบบนี้ประกอบด้วย

- กำมะถัน ซึ่งเป็นสารคงรูป
- สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) เช่น TMTD (tetramethyl thiuram disulphide) MBT (2-mercaptobenzothiazole) และ CBS (n-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide) เป็นต้น
- สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ได้แก่ สารอินทรีย์พวกสังกะสีออกไซด์ (ZnO) สารอินทรีย์ พวกกรด สเตอริก (steric acid) และสารที่เป็นต่าง (นิยมใช้ในสูตรที่มีสารที่เป็นกรดหรือซิลิการ่วมอยู่ด้วย) ได้แก่ สาร DEG (diethylene glycol)

ระบบเปอร์ออกไซด์ (peroxide system)

ระบบนี้สามารถใช้ในการทำให้ยางเกือบทุกชนิดคงรูปโดยเฉพาะยางสังเคราะห์ที่ไม่มีหรือมีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำ ยางที่คงรูปด้วยระบบนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก ต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน และยางคงรูปที่ได้มักมีกลิ่นของ acetophenone ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by-product) จากการทำปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน แต่ว่ายางจะมีความทนทานต่อความร้อนสูง

3. สารป้องกันยางเสื่อม (antidegradants)

เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางทั่วไป โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นยางจึงมีสภาพที่อ่อนแอต่อการถูกปัจจัยต่างๆ เช่น โอโซน แสงแดด ออกซิเจนทำลายให้เสื่อมสภาพการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างของสารในกลุ่มป้องกันยางเสื่อมสภาพ ได้แก่ IPPD (N-Isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine) TMQ (2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline, polymerized) และ BHT (2,6-Di-tert-Butyl (-p-cresol)) เป็นต้น

4. สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติมเป็นสารที่ใช้ผสมกับยางเพื่อช่วยเสริมแรง (reinforcement) ให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนสารตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้ง แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

5. สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids)

สารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เฉพาะตัวต่างๆ กัน เช่น สารที่ช่วยให้ยางนึ่มในระหว่างการบดผสม ได้แก่ พวบน้ำมัน (oils) และสารเคมีย่อยยาง (peptizer) เช่น pepton22 สารบางตัวช่วยควบคุมไม่ให้ยางมีความหยุ่นตัว (nerve) สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้สารเคมีที่เป็นผงเข้าเนื้อยางได้ยากในระหว่างการบดผสม เพราะยางจะพันลูกกลิ้งยาก สารพวกนี้ ได้แก่ factice เป็นต้น

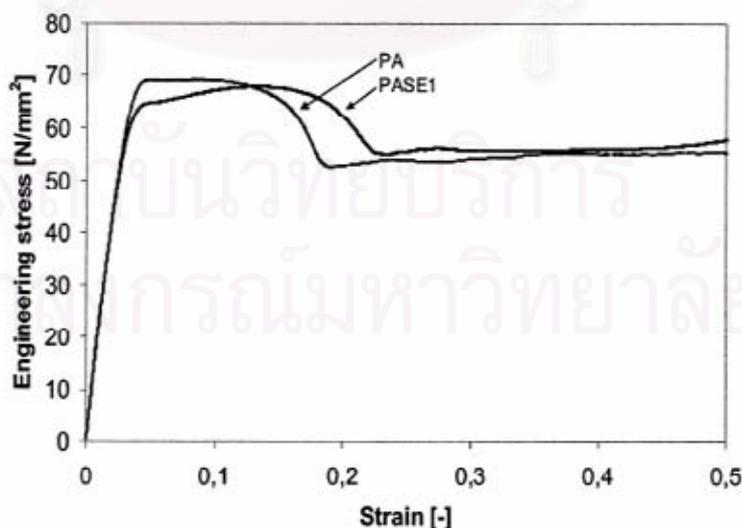
6. สารกลุ่มอื่นๆ (miscellaneous ingredients)

สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในบางกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วย

- สารหน่วง (retarder) จะใช้เมื่อต้องการชะลอไม่ให้อย่างที่กำลังบดผสมคงรูปเสียก่อน (scorch) หรือที่เรียกว่า ยางตาย ตัวอย่างของสารหน่วงได้แก่ benzoic acid หรือ salicylic acid เป็นต้น
- สารทำให้เกิดฟอง (blowing agent) ใช้สำหรับการทำให้ยางฟูในการทำยางพองน้ำ ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้ได้แก่ สาร sodium bicarbonate หรือ dinitrosopentamethylene tetramine เป็นต้น
- สารทำให้เกิดสี (pigments) อาจเป็นสีอินทรีย์ เช่น cadmium sulphide (ให้สีแดงเข้ม-ส้มและเหลือง) chromium oxide (ให้สีเขียวขุ่น) และ titanium dioxide (ให้ยางมีสีขาว มีความสว่าง หรือช่วยให้ยางสีต่างๆ มีสีที่สดขึ้น) ส่วนสีที่เป็นสีอินทรีย์ จะให้สีสด ทนต่อความร้อนได้ดีกว่าสีอินทรีย์

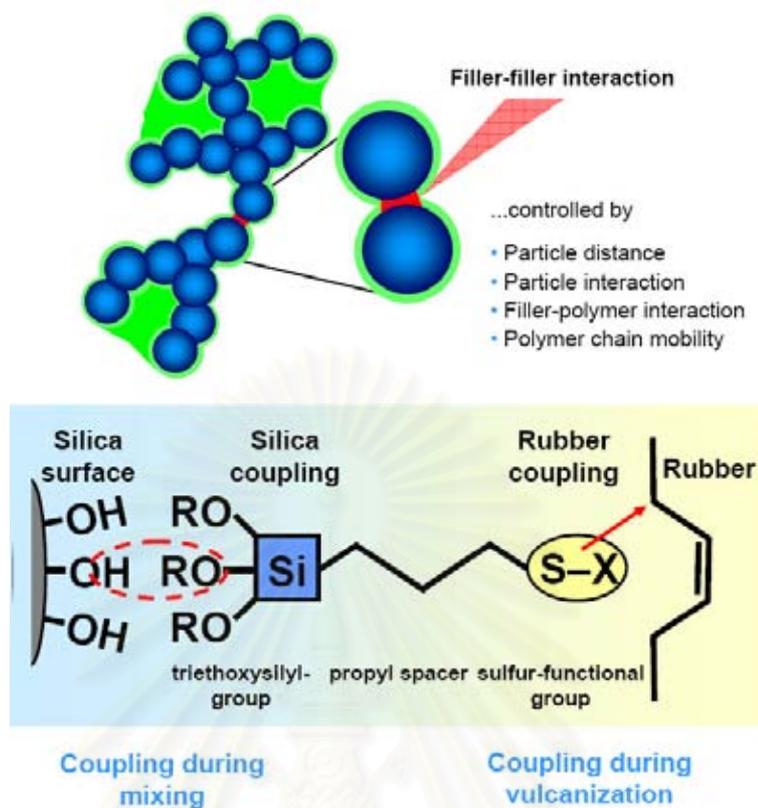
4.1.3 ผลจากการนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง

อนุภาคของซิลิกาในระดับนาโนที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 30-50 นาโนเมตร ซึ่งผลที่ได้พบว่าผลิตภัณฑ์ของยางที่ได้จะมีความแข็งแรงอีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นสูง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากค่า tensile strength มีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 4.2 และกลไกการเสริมแรงแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ค่า tensile stress of a composite โดยการเติมซิลิกา PASW = polyamide with silica (10±30 nm)

PA = polyamide (nylon-6)



รูปที่ 4.3 แสดงกลไกการเสริมแรงของซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนในยาง

4.1.3.1 ตัวแปรสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของยางจากสารตัวเติมอนุภาคนาโน

ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงอนุภาคที่นำมาเป็นสารตัวเติมควรจะมีพื้นที่ผิวสูงและมีความละเอียดเพื่อให้สารตัวเติมนั้นกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี ตัวอย่างดังรูปที่ 4.4



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะพื้นที่ผิว (ก) ลักษณะพื้นที่ผิวดำ (ข) ลักษณะพื้นที่ผิวสูง

ส่วนสาเหตุที่นำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาใช้เป็นสารตัวเติมเนื่องจาก

- (1) ลักษณะพื้นที่ผิวสูง
- (2) ขนาดของรูพรุนที่มีโครงสร้างแบบ mesopore และการกระจายตัวของรูพรุนที่สม่ำเสมอ
- (3) ความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง มีสิ่งเจือปนน้อย
- (4) เม็ดอนุภาคมีความละเอียด

นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตยางที่ได้ยังมีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยลดการสูญเสียพลังงานบริเวณหน้ายาง ซึ่งบริษัทมิชลินได้ทำการผลิตยางประหยัดน้ำมันขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีกรีนเอ็กซ์ (Green X (R) Technology) ซึ่งมีส่วนผสมของเนื้อยางสูตรพิเศษที่ประกอบไปด้วยซิลิกาที่มีอนุภาคนาโน ที่เรียกว่า "เนื้อยาง Energy" ขึ้นอีกด้วย

4.2 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง

ในด้านผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางมีการนำการนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนหรือซิลิกามาใช้เป็นสารตัวเติมซึ่งขนาดที่นำมาใช้อยู่ในช่วง 10-85 นาโนเมตร โดยจะทำให้เครื่องสำอางต่าง ๆ มีคุณสมบัติดีขึ้น ปัจจุบันผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่นำซิลิกามาใช้ในการผลิตมากมาย อาทิ

4.2.1 ครีมบำรุงผิว

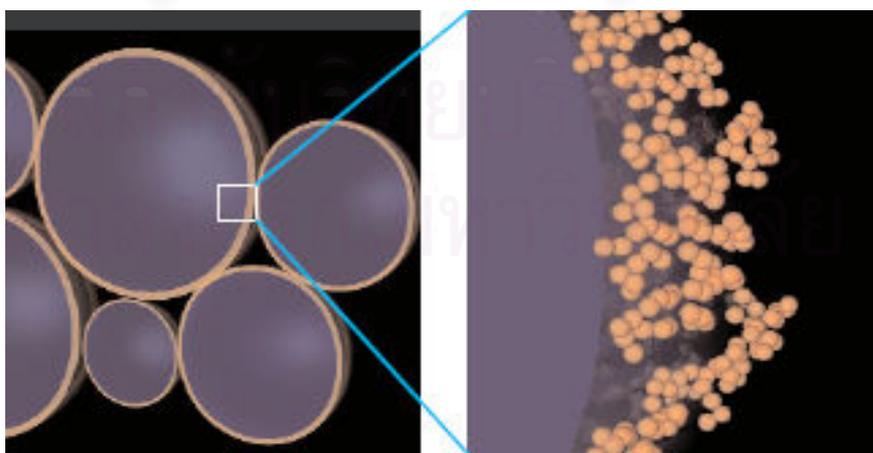
ในผลิตภัณฑ์ครีมบำรุงผิว สถาบัน Degussa ได้ศึกษาการนำเอาซิลิกามาใช้เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง เนื่องจากพบว่า ซิลิกานี้มีลักษณะเป็น Dry water นั่นคืออนุภาคของซิลิกาจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบถึง 95 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 4.5 ด้วยคุณสมบัตินี้ Dr. Thomas Hennig จากสถาบัน Degussa Aerosil & Silanes Business Unit จึงได้นำมาใช้ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง



รูปที่ 4.5 แสดงอนุภาคของซิลิกา

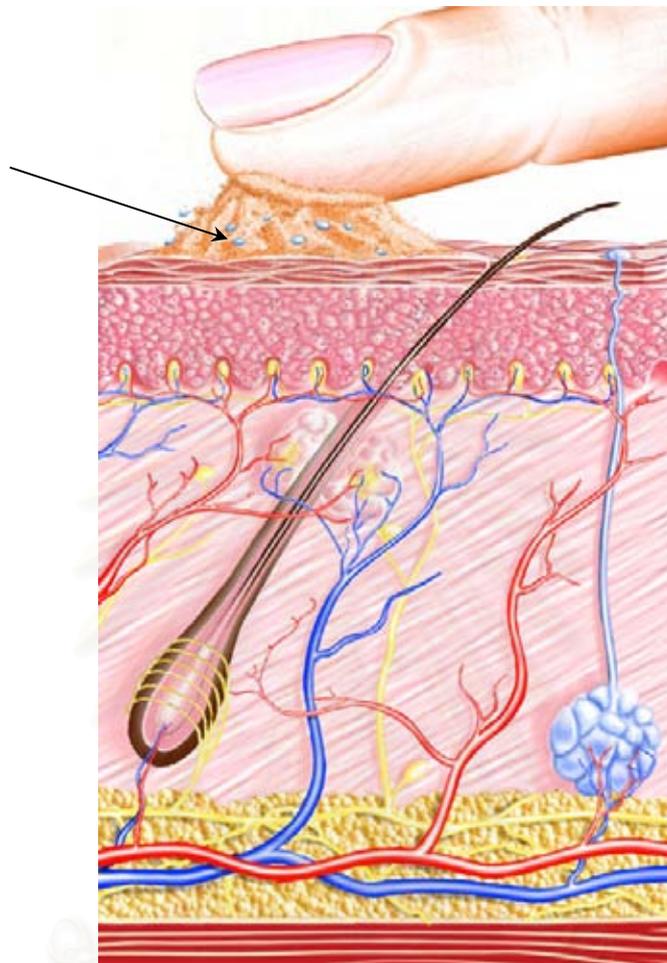
4.2.1.1 ผลจากเติมซิลิกาในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง

ผลที่ได้พบว่าผลิตภัณฑ์ครีมบำรุงผิวจะช่วยลดความหยาบลงได้ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำจะถูกปิดล้อมด้วยอนุภาคของซิลิกา ดังรูปที่ 4.6 จากนั้นก็จะแทรกซึมเข้าไปในผิว ทำให้ผิวมีความชุ่มชื้นมากกว่าปกติ ดังรูป 4.7



รูปที่ 4.6 แสดงการอนุภาคของซิลิกาที่ปิดล้อมโมเลกุลของน้ำ

โมเลกุล
ของน้ำ
ในซีกา
ที่แทรก
ซึมลงไป
ในผิว

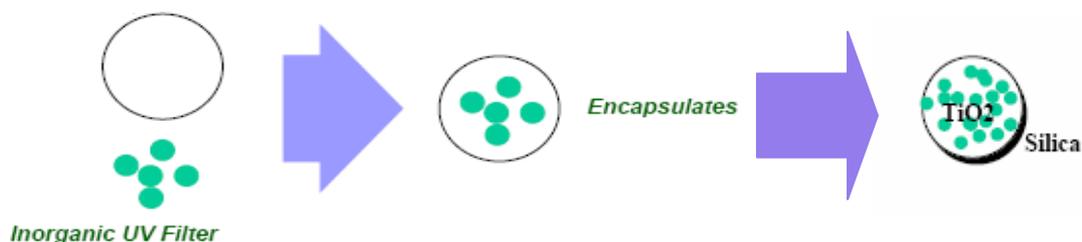


รูปที่ 4.7 แสดงการแทรกซึมโมเลกุลของน้ำในผิวหนัง

4.2.2 ครีมกันแดด

นอกจากครีมบำรุงผิวแล้วซีกานาโนยังมีการพัฒนานำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ครีมกันแดดอีกด้วย โดยจะนำไปห่อหุ้มสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวกรองแสง UV ดังรูปที่ 4.8 ทำให้ครีมกันแดดที่ได้มีสมบัติดีขึ้น ดังนี้คือ

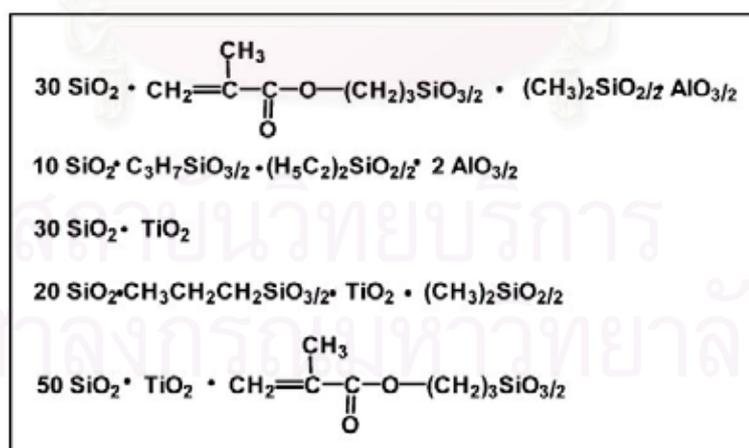
- สารกรองแสงกระจายตัวได้ดี
- สารกรองแสงไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน
- ลดการเกิดไอออนทำให้ไม่มีสารตกค้าง



รูปที่ 4.8 แสดงการหุ้มสารตัวกรอง UV

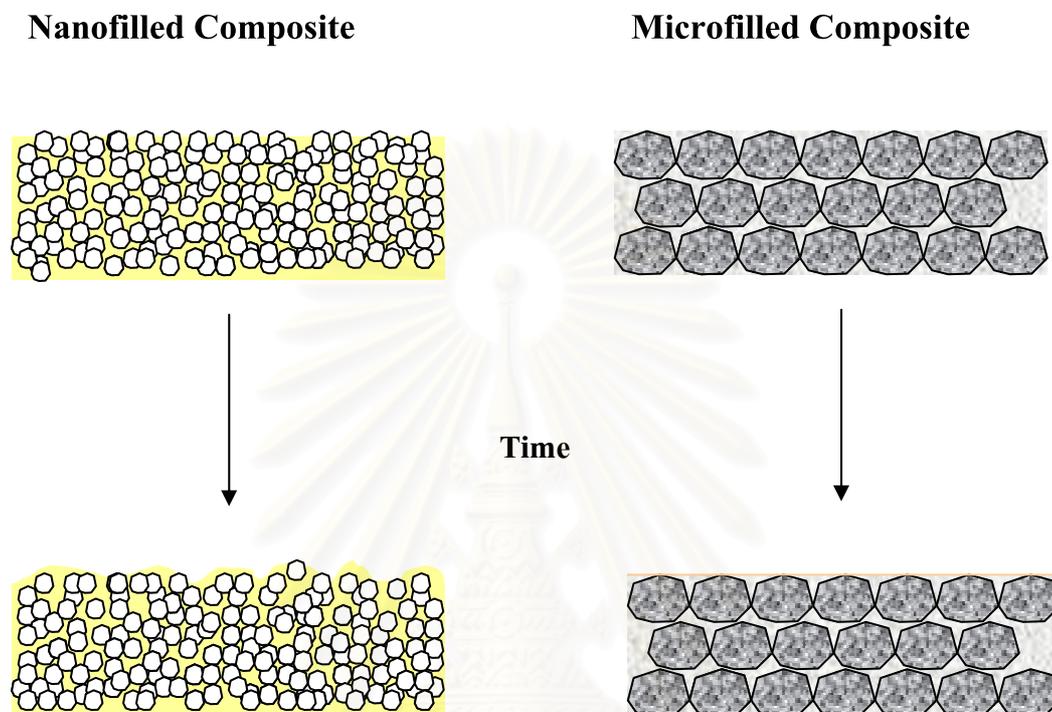
4.3 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุพิน

ปัจจุบันมีวัสดุมากมายที่นิยมนำมาทำเป็นสารประกอบในพิน ไม่ว่าจะเป็นสารพวกโพลีเมอร์ สารจำพวกโลหะ รวมไปถึงสารเซรามิก เนื่องด้วยสมบัติของซิลิกาที่สามารถใช้เป็นสารเสริมแรง ปัจจุบันจึงได้มีการนำเอาซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกามาใช้ในสารประกอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้พิน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคของซิลิกาที่นำมาใช้จะอยู่ในช่วง 20 ถึง 120 นาโนเมตร ตัวอย่างซิลิกาที่นำไปเป็นสารตัวเติมในวัสดุพินแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงตัวอย่างซิลิกาที่นำไปใช้เป็นสารตัวเติมในสารประกอบพิน

ผลจากการนำการนำซิลิกามาสารประกอบในวัสดุฟันพบว่า วัสดุฟันที่ได้จะมีความแข็งแรงมากและมีอายุการใช้งานนานขึ้นเนื่องจากกันจัดเรียงตัวของอนุภาคดังรูปที่ 4.10 นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการเกิดคราบเหลืองได้



รูปที่ 4.10 แสดงการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติมในวัสดุฟัน

4.4 การนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นฉนวนกันความร้อน

เนื่องด้วยสมบัติของซิลิกานาโนที่มีความหนาแน่นต่ำและมีค่าการนำความร้อนต่ำ ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนานำเอาซิลิกาไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งซิลิกาที่นำมาใช้ในจะเป็นพวกแอโรเจลและขนาดอนุภาคจะอยู่ในช่วง 15 ถึง 100 นาโนเมตร โดยสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นผนัง หรือหน้าต่าง เป็นต้น



รูปที่ 4.11 แสดงฉนวนกันความร้อนจากซิลิกาแอโรเจล

สรุป

ในปัจจุบันได้มีการนำนาโนซิลิกาไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณสมบัติดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำเอานาโนซิลิกามาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุพินและนำมาเป็นฉนวนกันความร้อน โดยพบว่าในการนำมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง อนุภาคที่นำมาใช้จะอยู่ในช่วง 30-50 นาโนเมตร โดยยางที่ได้นั้นมีคุณสมบัติพิเศษในการช่วยลดการสูญเสียพลังงานบริเวณหน้ายาง ซึ่งบริษัทมิซลินได้ทำการผลิตยางประหยัดน้ำมันขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีกรีนเอ็กซ์ (Green X Technology) ซึ่งมีส่วนผสมของเนื้อยางสูตรพิเศษที่ประกอบไปด้วยซิลิกาที่มีอนุภาคนาโน ที่เรียกว่า "เนื้อยาง Energy "ขึ้น

ด้านผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางมีการนำนาโนซิลิกามาเป็นสารตัวเติม ซึ่งขนาดที่นำมาใช้อยู่ในช่วง 10-85 นาโนเมตร ซึ่งผลที่ได้จะทำให้เครื่องสำอางมีคุณสมบัติดีขึ้น เช่น ในผลิตภัณฑ์บำรุงผิวสามารถลดรอยเหี่ยวย่นลงได้ นอกจากนี้นาโนซิลิกายังนำไปใช้ในครีมกันแดด ซึ่งจะทำให้สามารถป้องกันรังสี UVA และ UVB เนื่องจาก นาโนซิลิกามีผลทำให้ UV filters มีการกระจายตัวได้ดี และสามารถป้องกันได้ยาวนานขึ้นอีกทั้งยังทำให้ผิวมีความเรียบเนียน

ด้านผลิตทางทันตกรรมมีการนำซิลิกามาเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้วัสดุพิน เนื่องจากซิลิกามีคุณสมบัติที่แข็งแรง จึงได้มีการนำซิลิกานาโนมาเป็นสารประกอบในวัสดุพิน โดย

อนุภาคที่เดิมมีขนาด 20-120 นาโนเมตร ซึ่งพื้นที่ยึดที่ได้จะมีความแข็งแรงและมีอายุการใช้งานนานขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการเกิดคราบเหลืองได้

ในส่วนของการนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนนั้น ด้วยสมบัติของซิลิกานาโนที่มีความหนาแน่นต่ำ เบา และมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำจึงได้มีการพัฒนานำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน อาทิ ใช้ในผนังบ้าน และหน้าต่าง เป็นต้น ซึ่งอนุภาคที่นำมาใช้จะอยู่ในช่วง 15 ถึง 100 นาโนเมตร

สรุปขนาดอนุภาคของซิลิกาที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคของซิลิกาในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

ผลิตภัณฑ์	ขนาดอนุภาค SiO ₂ (เส้นผ่านศูนย์กลาง)
ยาง	30-50 นาโนเมตร
เครื่องสำอาง	10-85 นาโนเมตร
วัสดุพ่น	20-120 นาโนเมตร
ฉนวนกันความร้อน	15-100 นาโนเมตร

บทที่ 5

การประเมินวัฏจักรชีวิตและการประเมินความเสี่ยง

การประเมินวัฏจักรชีวิตหรือ LCA นั้นเป็นเครื่องมือที่จะประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งในกระบวนการผลิต รวมทั้งผลิตภัณฑ์และบริการ ซึ่งจะพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการเพื่อให้ได้สินค้าหรือบริการ ตลอดจนเมื่อมีการนำไปใช้ และการกำจัด ซึ่งจะพิจารณาถึงการใช้วัตถุดิบ พลังงาน การขนส่ง การก่อให้เกิดมลพิษ การบำรุงรักษาในระหว่างอายุการใช้งาน เป็นจำนวนเท่าใด ซึ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จะพิจารณาทั้งในระดับ Local และระดับโลก สำหรับประโยชน์ของ LCA คือ ทำให้ทราบว่าแต่ละจุดใน Life Cycle มีการใช้วัตถุดิบและพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ และจุดใดที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะเข้าไปพัฒนาและแก้ไขได้ถูกจุด สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยการประเมินความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะใช้โปรแกรม SimaPro 6 เป็นเครื่องมือในการประเมินผล

นอกจากนั้นยังทำการประเมินความเสี่ยงในกระบวนการสังเคราะห์ต่าง ๆ ซึ่งการประเมินความเสี่ยงนับเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับการประเมินความปลอดภัยของกระบวนการต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่ทำประเมินผลกระทบต่อสุขภาพจากการได้รับสารอันตราย ลักษณะของการประเมินความเสี่ยง

5.1 การประเมินวัฏจักรชีวิต

5.1.1 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินผล

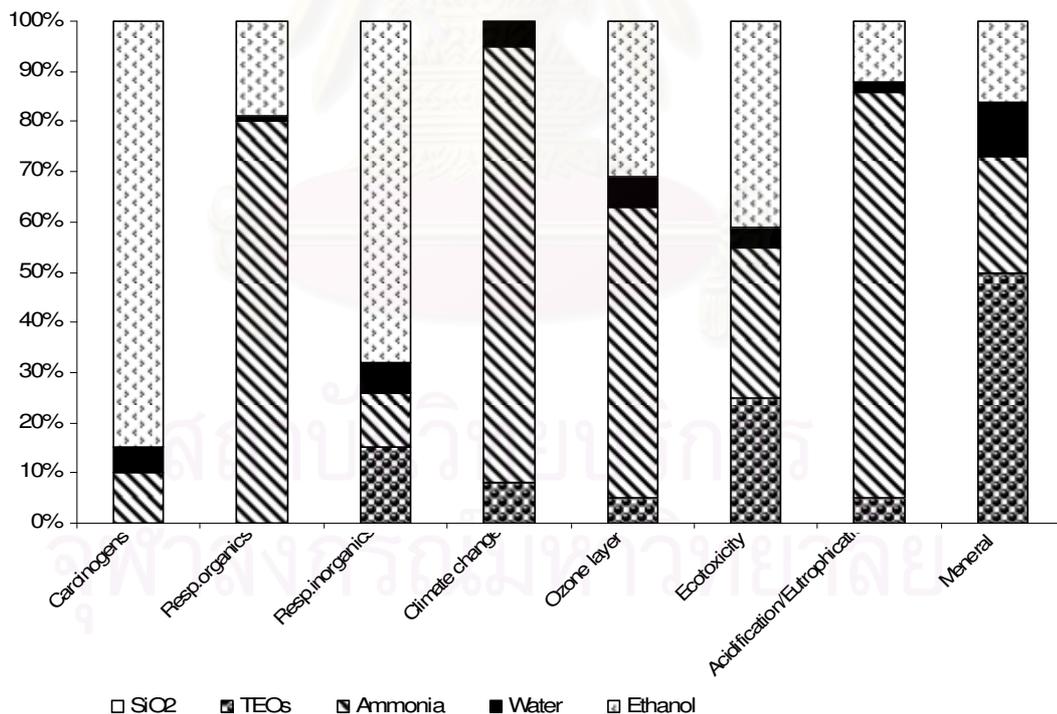
งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินผลความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยการพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ 3 แบบ คือ กระบวนการทางโซล-เจล วิธี Flame aerosol process และวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส spray pyrolysis ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินแสดงดังตารางที่ 5.1

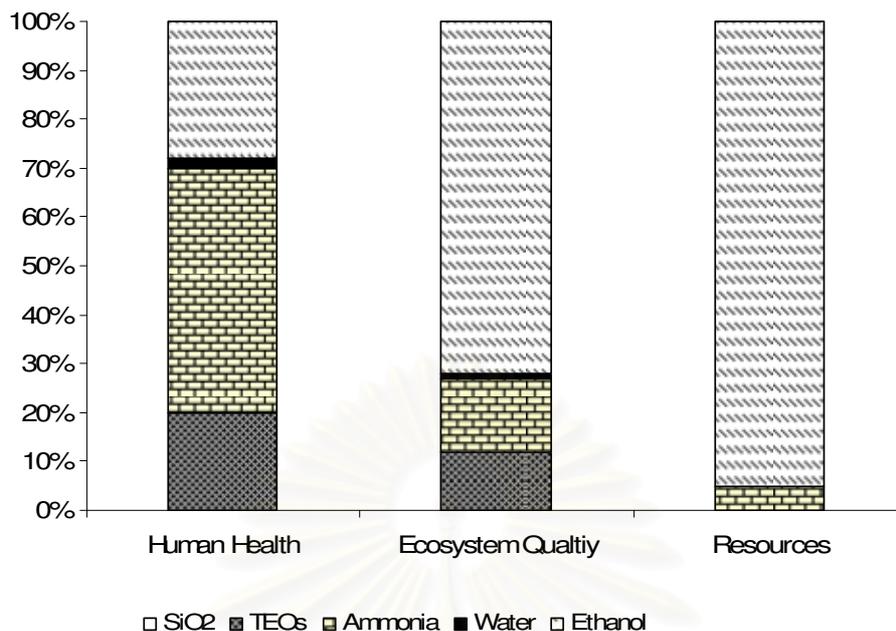
ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลวิธีการสังเคราะห์ต่าง ๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน

ขาเข้า (in put)	Sol-gel process	Flame aerosol process	Spray pyrolysis
	TEOs = 52.14 กรัม NH ₄ = 106.24 กรัม น้ำ = 120.6 กรัม CH ₃ OH = 83.4 กรัม	N ₂ = 220 กรัม O ₂ = 107 กรัม CH ₄ = 0.09 ตารางเมตร HMDSO = 25 กรัม	TEOs = 194 กรัม HNO ₃ = 199.95 กรัม น้ำ = 250 กรัม C ₂ H ₅ OH = 175.25 กรัม
ขาออก (out put)	SiO ₂ = 1.33 กรัม CO ₂ = 150 กรัม NO ₂ = 120.15 กรัม	SiO ₂ = 17 กรัม CO ₂ = 15.5 กรัม H ₂ = 10 กรัม NO ₂ = 8.7 กรัม	SiO ₂ = 2.5 กรัม CO ₂ = 77.81 กรัม NO ₂ = 53.11 กรัม

5.1.2 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยวิธีโซล-เจล

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน แสดงดังรูปที่ 5.1 จากรูป พิจารณาวัฏุดิบที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ตลอดทั้งวงจรเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่า เอทานอลมีผลกระทบในด้านการเป็นสารก่อมะเร็ง และสารอนินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจมากที่สุด ขณะที่แอมโมเนียจะมีผลกระทบต่อฝนกรดและการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในแหล่งน้ำ รวมไปถึงส่งผลกระทบต่อเกิดการรั่วของไอโซน การและการทำให้ฤดูกาลเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่า แอมโมเนียจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์มากที่สุด รองลงมาเป็นเอทานอลและแอมโมเนียตามลำดับ ในส่วนของคุณภาพของระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากรพบว่าเอทานอลจะส่งผลกระทบมากที่สุด



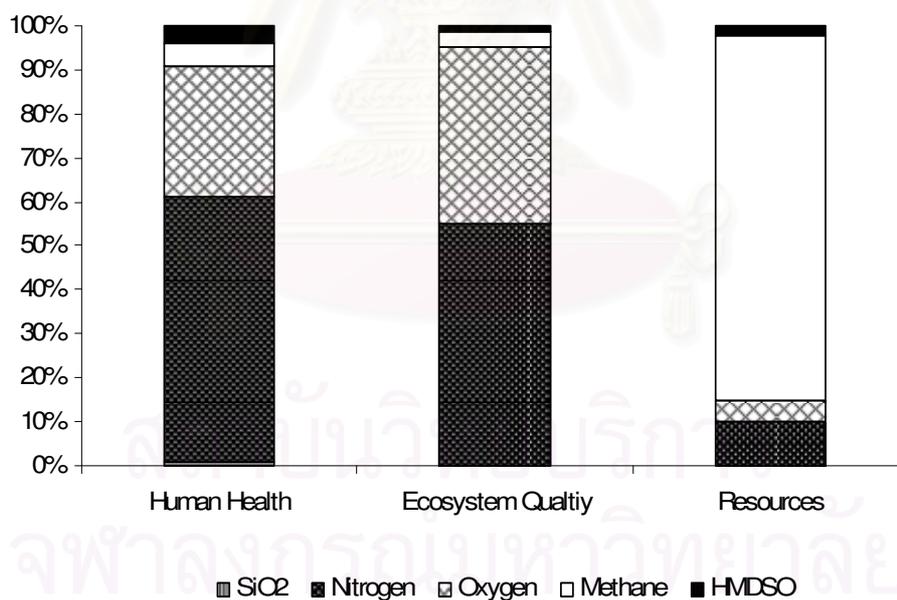
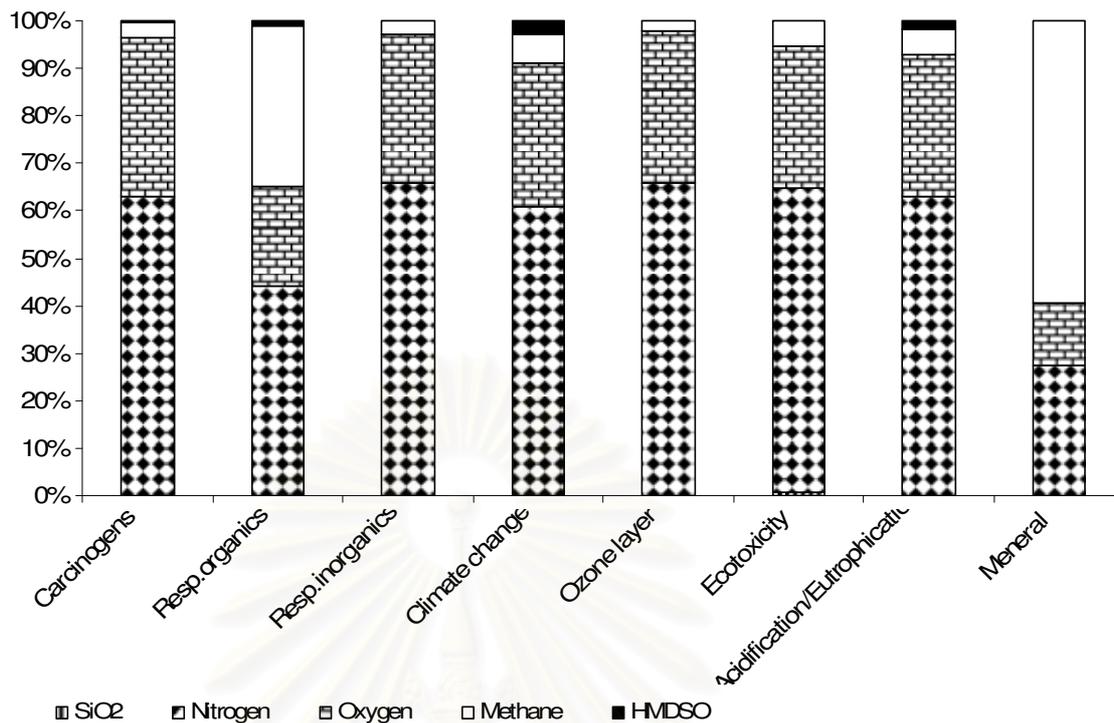


รูปที่ 5.1 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่างๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยกระบวนการทางโซล-เจล

5.1.3 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน

โดยวิธี Flame aerosol process

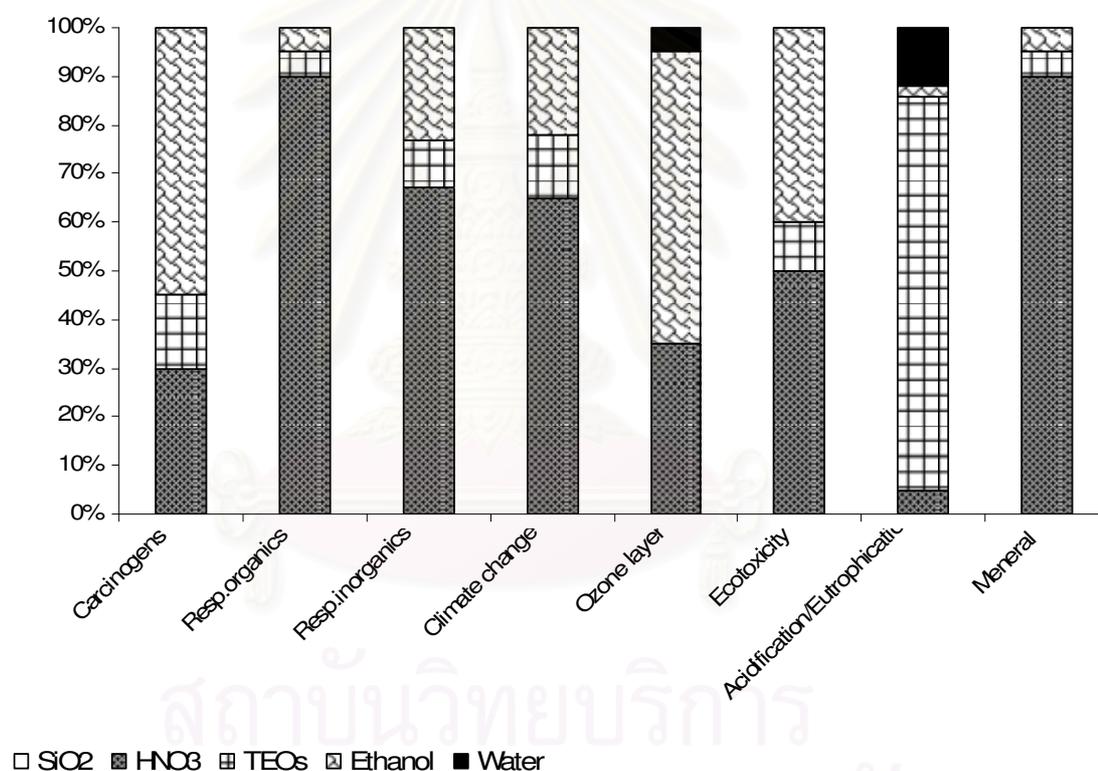
การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่างๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน แสดงดังรูปที่ 5.2 จากรูป พิจารณาวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์ตลอดทั้งวงจรเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าส่วนใหญ่แล้วไนโตรเจนจะส่งผลกระทบมากที่สุด รองลงมาจะเป็นออกซิเจน แต่ในส่วนการใช้ทรัพยากรพบว่ามีเทนจะส่งผลกระทบมากที่สุด

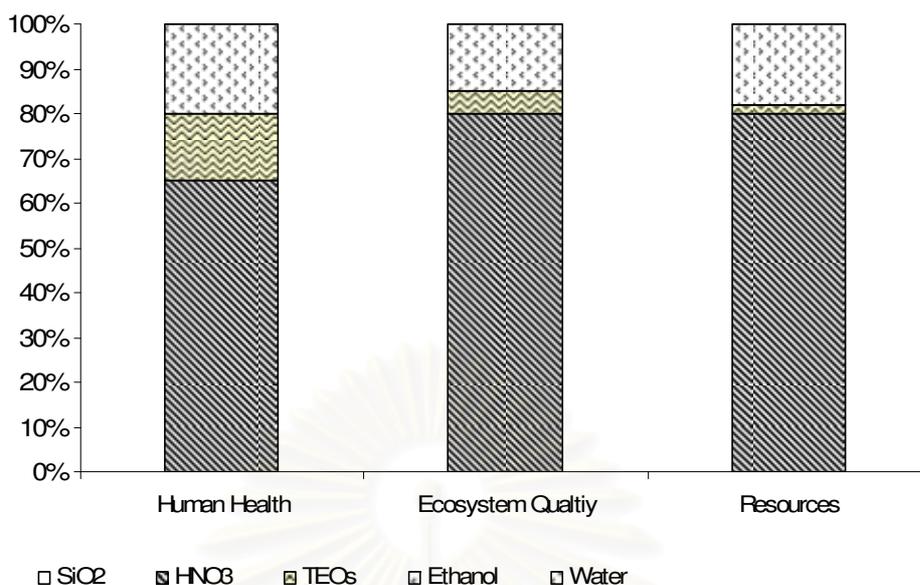


รูปที่ 5.2 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยวิธี Flame aerosol process

5.1.4 การประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยวิธี Spray pyrolysis

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนโดยวิธี spray pyrolysis แสดงดังรูปที่ 5.3 จากรูป พบว่าส่วนใหญ่แล้วไม่ว่าจะเป็นผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ หรือในส่วนของคุณภาพของระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากรพบว่ากรดไนตริกจะส่งผลกระทบมากที่สุด รองลงมาจะเป็นเอทานอลและ TEOs ตามลำดับ

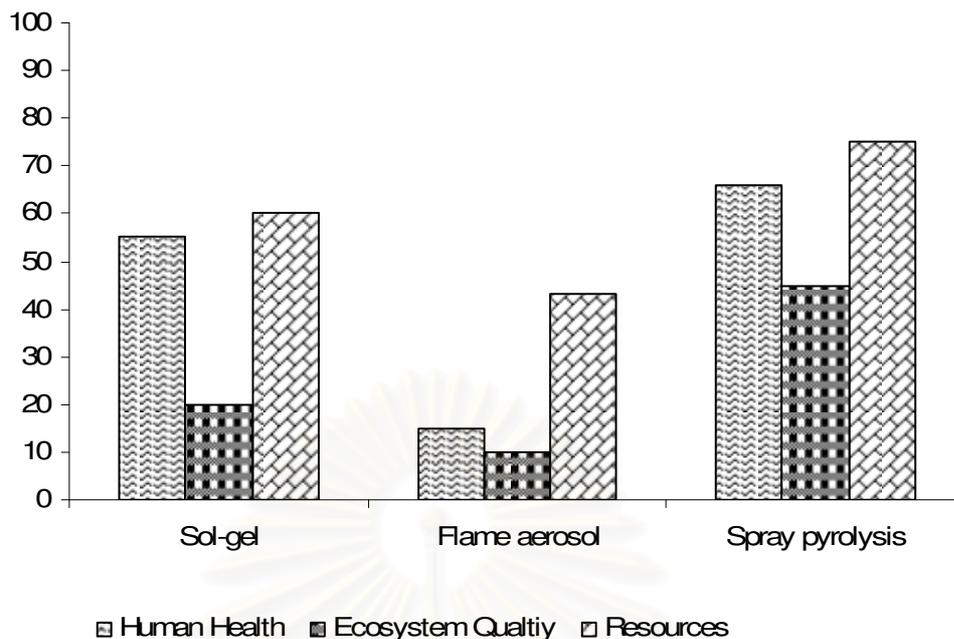




รูปที่ 5.3 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยวิธี Spray pyrolysis

5.1.5 ผลการเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน

จากการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ พบว่าการสังเคราะห์ในแต่ละวิธีก็จะส่งผลแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบและปริมาณการใช้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของแต่ละวิธี ดังรูปที่ 5.4 พบว่าวิธีการ spray pyrolysis จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดไม่ว่าจะเป็นด้านสุขภาพของมนุษย์ รวมไปถึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากร รองลงมาจะเป็นวิธี sol-gel และ flame aerosol process ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงชีวิตต่าง ๆ ของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์

5.1.6 สรุปผลการประเมิน

จากผลการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน ทำให้ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ในแต่ละวิธี ซึ่งในการประเมินผลจะมีการจัดหมวดหมู่ของผลกระทบตามปัญหาสิ่งแวดล้อมโลก ซึ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะมากหรือน้อยก็ขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการ

ผลการศึกษา LCA ดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตหรือนำผลที่ได้รับไปปรับกระบวนการผลิต เพิ่มทางเลือกในการผลิตและการออกแบบวิธีการ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรให้น้อยลงได้

5.2 วิธีการประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยง หมายถึง กระบวนการที่ใช้ในการระบุและการวิเคราะห์ ความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อการบรรลุวัตถุประสงค์ของหน่วยรับตรวจ รวมทั้งการกำหนดแนวทาง ที่จำเป็นต้องใช้ในการควบคุมความเสี่ยง หรือการบริหารความเสี่ยง

5.2.1 หลักการประเมินความเสี่ยง

การประเมินความเสี่ยง เป็นขั้นตอนที่ระบุลำดับความเสี่ยงของอันตรายทั้งหมดที่ เกี่ยวข้องกับกิจกรรมของงานที่ครอบคลุมสถานที่ เครื่องจักร อุปกรณ์ บุคลากร และขั้นตอนการ ทำงาน ที่อาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บหรือเจ็บป่วยความเสียหายต่อทรัพย์สิน ความเสียหายต่อ สิ่งแวดล้อม หรือสิ่งต่าง ๆ รวมกัน ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการ และวิธีการประเมินความเสี่ยง ด้านอาชีวอนามัย และความปลอดภัย รวมทั้งอธิบายถึงความจำเป็นที่ต้องประเมินความเสี่ยงการ ประมาณระดับความเสี่ยงโดยคำนึงถึง ความรุนแรงและโอกาสที่จะเกิดอันตราย เพื่อนำมาพิจารณา ว่าเป็นความเสี่ยงที่ยอมรับได้ หรือยอมรับไม่ได้ และการวางแผนควบคุมความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้

การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การชี้ให้เห็นอันตราย (Hazard Identification) เป็นการรวบรวมและวิเคราะห์ ข้อมูลด้านกายภาพ เคมี เภสัชวิทยาและพิษวิทยาของสาร เพื่อแยกแยะความ เป็นพิษของสารและอนุพันธ์ของสารที่อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของ มนุษย์ โดยใช้ข้อมูลทางห้องปฏิบัติการ สัตว์ทดลองและรายงานทางระบาด วิทยาในมนุษย์
2. การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณ (Dose . Response Assessment) เป็น การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารเคมีที่ได้รับและความรุนแรง ของความเป็นพิษที่เกิดขึ้นทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ข้อมูลจากสัตว์ทดลองแล้ว extrapolation มาสู่มนุษย์หรือในกรณีที่มีรายงานทางระบาดวิทยาในมนุษย์ก็จะใช้ค่านั้นมา ประเมินการตอบสนองต่อปริมาณ
3. การประเมินการได้รับสาร (Exposure Assessment) เป็นการประเมินปริมาณ สารเคมีที่มนุษย์หนึ่งคนหรือประชากรหนึ่งกลุ่มได้รับในช่วงที่ดำเนินชีวิต ภายใต้วงแวดล้อมนั้น ซึ่งจะศึกษาปริมาณของสารเคมีที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม

วิถีทางที่สารเคมีเข้าสู่ร่างกายและปริมาณสารเคมีที่ร่างกายได้รับจากสิ่งแวดล้อม

4. การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (Risk Characterization) เป็นการรวบรวมข้อมูลและผลการวิเคราะห์ข้อมูล ในขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 มาใช้คำนวณโอกาสที่จะเกิดพิษในมนุษย์ ซึ่งแบ่งเป็นการอธิบายลักษณะความเสี่ยงของสารที่ไม่ก่อมะเร็งและการอธิบายลักษณะความเสี่ยงของสารที่ก่อมะเร็งได้ในมนุษย์

5.2.2 คำจำกัดความ

<u>การประเมินความเสี่ยง</u> (Risk Assessment)	หมายถึง	กระบวนการ การประมาณระดับความเสี่ยง และการตัดสินใจ ว่าความเสี่ยงนั้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่
<u>ความเสี่ยง</u> (Risk)	หมายถึง	ผลลัพธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดอันตราย และผลจากอันตรายนั้น (อุบัติเหตุหรืออุบัติการณ์)
<u>การชี้บ่งอันตราย</u> (Hazard Identification)	หมายถึง	กระบวนการ ในการรับรู้ถึงอันตรายที่มีอยู่ และการกำหนดลักษณะของอันตราย
<u>อันตราย</u> (Hazard)	หมายถึง	แหล่งหรือสถานการณ์ที่อาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บ หรือความเจ็บป่วย ความเสียหายของทรัพย์สิน ความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมหรือสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้รวมกัน
<u>อุบัติเหตุ</u> (Accident)	หมายถึง	เหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดคิดไว้ล่วงหน้า ซึ่งมีผลให้เกิดการเสียชีวิต ความเจ็บป่วย การบาดเจ็บ ความเสียหาย หรือความสูญเสียอื่น ๆ

5.3 การประเมินความเสี่ยงวิธีการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน

5.3.1 วิธีโซล – เจล (Sol - gel process)

วิธีโซล-เจล มีการใช้สารเคมีได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ โซล-เจล

สารเคมีที่ใช้	สารเคมีที่ปล่อยออก
TEOs	CO ₂
แอมโมเนีย (NH ₄)	NO ₂
น้ำ	
เมทานอล (CH ₃ OH)	

พิจารณาการชี้ให้เห็นอันตราย Hazard Identification

- **TEOs** คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นของเหลวไม่มีสีมีกลิ่นคล้ายแอลกอฮอล์ จุดเดือดอยู่ที่ 168.8 เซลเซียสและมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -82.7 เซลเซียส สามารถละลายได้ในเอทานอล ไดเอทิลเอเธอร์ ในด้านความคงตัวทางเคมีนั้นสารนี้มีความเสถียร และไม่เกิดอันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยงคือบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 52 องศาเซลเซียสและที่มีความชื้นสูง ในด้านอันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจาก TEOs

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูก ไอ เวียนศีรษะ ปวดศีรษะ เจ็บคอ หายใจติดขัด และหายใจถี่เร็ว
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง ทำให้ผิวหนังแห้ง เป็นผื่น

	แดง และเป็นอันตรายต่อตับ ไต
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง อาเจียน ท้องร่วง และปวดท้อง
สัมผัสสูดดม	- การสัมผัสสูดดมจะก่อให้เกิดการระคายเคือง ตาแดง เจ็บตา และสายตาวัว
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ,อื่น ๆ	- อวัยวะเป้าหมาย ตา ระบบทางเดินหายใจ ตับ ผิวหนัง

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion) สารนี้มีจุดวาบไฟอยู่ที่ 52 องศาเซลเซียส และเป็นสารของเหลวติดไฟ โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 52 องศาเซลเซียส ส่วนผสมของไอระเหยกับอากาศสามารถทำให้เกิดการระเบิดและอาจเกิดการติดไฟได้

- แอมโมเนีย คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นก๊าซ ไม่มีสีและมีกลิ่นฉุน จุดเดือดอยู่ที่ – 33.35 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ – 77.7 องศาเซลเซียส ในด้านความคงตัวของเคมีนั้นสารนี้มีความเสถียร นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 840 องศาเซลเซียสจะมีการสลายตัวเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ในด้านอันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากแอมโมเนีย

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปในปริมาณมากกว่า 25 ppm ทำให้ระคายเคืองจมูกและคอ ถ้าได้รับปริมาณมากจะหายใจติดขัด เจ็บหน้าอก หอบเหนื่อย มีเสมหะและปอดบวม
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นผื่นแดง บวม เป็นแผล อาจทำให้ผิวหนังแสบไหม้ถ้าได้รับสารปริมาณมาก
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนกินเข้าไปจะทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ หลอดอาหารและท้อง
สัมผัสสูดดม	- การสัมผัสสูดดม จะทำให้เจ็บตา เป็นผื่นแดง ตาบวม ทำให้น้ำตาไหล ทำลายตา
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ,อื่น ๆ	- เป็นสารก่อมะเร็งและทำลายไต ตับ ปอด ระบบประสาทส่วนกลาง - เป็นสารมีฤทธิ์กัดกร่อน

เมื่อพิจารณาการเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion) พบว่า สารนี้ไม่มีจุดวาบไฟแต่มีจุดลุกติดไฟได้เองอยู่ที่ 651 องศาเซลเซียส โดยพบว่าเมื่อมีการการลุกติดไฟจะทำให้เกิดก๊าซพิษที่ไวไฟและมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถระเบิดได้ถ้าผสมกับอากาศและสารออกซิไดซ์ ไม่ควรเก็บภาชนะบรรจุไว้เกินอุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส

- เมทานอล คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว จุดเดือดอยู่ที่ 64.6 องศาเซลเซียสและจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -97 องศาเซลเซียส เป็นสารเคมีที่มีความเสถียร สารที่เข้ากันไม่ได้เป็นพวกสารออกซิไดซ์อย่างแรง โลหะอัลคาไลท์ กรดซัลฟูริกและกรดไนตริกเข้มข้น แอลดีไฮด์และเอซัลคลอไรด์ ส่วนสภาวะที่ควรหลีกเลี่ยงคือ ความร้อน ประกายไฟ และแหล่งจุดติดไฟอื่นๆ ในด้านอันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากเมทานอล

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง ตา จมูก ลำคอ และทางเดินหายใจ กระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ ง่วงนอน ถ้าสัมผัสปริมาณมากจะทำให้อาการโคม่าและตายได้ เนื่องจากระบบหายใจล้มเหลว
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนัง ไอระเหย ของเหลวของสารนี้ จะทำให้เกิดการสูญเสียชั้นไขมันของผิวหนัง ทำให้ผิวหนังแห้ง แตก และเกิดผื่นแดง
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง เยื่อเมือกของปากและลำคอ ทำให้เกิดอาการไอ ท้องร่วง ปวดท้อง ปวดศีรษะ และง่วงซึม
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำให้เยื่อเมือกตาอักเสบ เกิดตาแดง และสายตาวัว
การก่อกวนเร่ง ความผิดปกติ,อื่น ๆ	- ถ้าสัมผัสสารนี้บ่อยๆ และเป็นเวลานาน จะทำให้ผิวหนังอักเสบ และสารนี้สามารถดูดซึมผ่านผิวหนังมีผลทำให้ระบบประสาทส่วนกลางถูกกดทำให้ปวดศีรษะ ง่วงนอน เวียนศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง และการสัมผัสปริมาณมาก อาจทำให้อาการโคม่าและตายได้ มีผลกระทบต่อการมองเห็น โดยปกติอาการจะรุนแรงขึ้นหลังจากการสัมผัส 12-18 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาการเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion) พบว่าสารนี้มีจุดวาบไฟอยู่ที่ 12.2 องศาเซลเซียส และมีจุดลุกติดไฟได้เองอยู่ที่ 464 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้นจะทำให้เกิดสารอันตรายได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณ (Dose . Response Assessment)

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity) แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 แสดงค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารเคมีในกระบวนการโซล-เจล

สารเคมี	LD ₅₀ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	LC ₅₀ (มิลลิกรัมต่อตารางเมตร)
TEOs	5600 (หนู)	83840 ต่อ 4 ชั่วโมง (หนู)
แอมโมเนีย	-	2000 ต่อ 4 ชั่วโมง (หนู)
เมทานอล	6270	-

* ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ www.pcd.go.th

5.3.2 วิธี Flame aerosol process

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้แสดงดังตารางที่ 5.7
ตารางที่ 5.7 แสดงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Flame aerosol process

สารเคมีที่ใช้	สารเคมีที่ปล่อยออก
N ₂	CO ₂
O ₂	H ₂
CH ₄	NO ₂
HMDSO	

พิจารณาการชี้ให้เห็นอันตราย Hazard Identification

- **ไนโตรเจน** คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เป็นสารที่มีความเสถียร จุดเดือดอยู่ที่ - 195.8 องศาเซลเซียสและมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ - 209 องศาเซลเซียสในด้านอันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากไนโตรเจน

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไป สารนี้จะทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน ทำให้มีอาการหายใจติดขัด, หายใจถี่เร็ว, อารมณ์แปรปรวน, กล้ามเนื้อทำงานไม่ประสานกัน, สับสน, ความรู้สึกรู้สี้, เหนื่อย, ทำให้สลบ, คลื่นไส้, อาเจียน, อ่อนเพลีย, หมดสติ และเสียชีวิตได้
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนัง ไม่มีผลกระทบ
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไป ไม่มีผลกระทบ
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตา ไม่มีผลกระทบ
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	- การขาดออกซิเจนในระหว่างที่ตั้งครรภ์ จะทำให้ทารกในครรภ์มีความผิดปกติ

ในส่วนการเกิดอ็อกซิเจนและการระเบิดนั้น พบว่าสารนี้เป็นสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้

- **ออกซิเจน** คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นแก๊สมีสีฟ้าอ่อน ไม่มีกลิ่น จุดเดือดอยู่ที่ -182.96 องศาเซลเซียสและจุดหลอมเหลวมีค่าอยู่ที่ -218.78 องศาเซลเซียส เป็นสารที่เสถียรและไม่มีก๊าซที่เป็นอันตรายจากการสลายตัว อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากออกซิเจน

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเอาออกซิเจนเข้าไป 80% หรือมากกว่าที่ความดันบรรยากาศเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จะทำให้หายใจติดขัด ไอ เจ็บคอ เจ็บหน้าอก มีผลทำให้ปอดและระบบประสาทส่วนกลาง ทำให้มีเนื้องอก การมองเห็นและการได้ยิน อาจหมดสติ ตัวสั่น
สัมผัสทางผิวหนัง	- ไม่มีอันตรายจากไอออกซิเจน ก๊าซที่เย็นหรือที่เป็นของเหลวจะมีอาการเหมือนน้ำแข็งกัด
กินหรือกลืนเข้าไป	- มีอาการเหมือนน้ำแข็งกัดบริเวณริมฝีปากและปาก เมื่อกลืนของเหลวเข้าไป
สัมผัสถูกตา	- ไม่มีอันตรายจากไอของออกซิเจน แต่ถ้าเป็นก๊าซที่เย็นหรือของเหลวจะมีอาการเหมือนน้ำแข็งกัด
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	- ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง

ในด้านการเกิดอ็อกซิเจนและการระเบิด สารนี้เป็นสารที่ไม่มีจุดวาบไฟและจุดลุกติดไฟได้เอง อันตรายที่เกิดจากไฟและการระเบิดผิดปกติจะมาจากเมื่อใช้สารออกซิไดซ์ เป็นตัวเร่งการเผาไหม้, การสัมผัสสารไวไฟจะทำให้เกิดเพลิงไหม้หรือการระเบิดได้ การจุดบุหรี่ เปลวไฟ และประจุไฟฟ้าทำให้เกิดการระเบิดได้

- มีเทน คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี เป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น จุดเดือดอยู่ที่ -161.5 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -182 องศาเซลเซียส เป็นสารที่เสถียร อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect) แสดงดังตารางที่ 5.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.10 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากมีเทน

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไป จะก่อให้เกิดอาการหายใจติดขัดอย่างรุนแรง, ปวดศีรษะ, วิงเวียน และอาจหมดสติได้
สัมผัสทางผิวหนัง	- ไม่ปรากฏว่าเป็นอันตรายเมื่อสัมผัสถูกผิวหนัง
กินหรือกลืนเข้าไป	- ไม่ปรากฏว่าเป็นอันตรายเมื่อกลืนกินเข้าไป และยากที่จะกลืนกินเข้าไป เนื่องจากเป็นก๊าซ
สัมผัสถูกตา	- อาจเกิดการระคายเคืองได้ เมื่อสัมผัสถูกตา
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	-

ในด้านการเกิดอ็อกซีภัยและการระเบิด สารนี้เป็นสารไวไฟ มีจุดลุกติดไฟได้เองอยู่ที่ 537 องศาเซลเซียส เมื่อมีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารนี้กับอากาศจะก่อให้เกิดการระเบิดได้ สารนี้ยังสามารถเกิดปฏิกิริยารุนแรงกับสารออกซิไดซ์ ฮาโลเจนและสารประกอบฮาโลเจนบางตัวได้

- **HMDSO** คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นของเหลว ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว เป็นสารที่เสถียรและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา จุดเดือดอยู่ที่ 101 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ - 59 อันตรายต่อสุขภาพอนามัยแสดงดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจาก HMDSO

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปถ้าสูดในปริมาณมาก จะทำให้เวียนศีรษะ หัวใจเต้นเร็ว หายใจถี่เร็ว หายใจติดขัด เหนื่อย ปวดศีรษะ หายใจขัด ตัวสั่น คลื่นไส้ ถ้าหายใจเข้าไปในปริมาณมาก จะทำให้เกิดอาการมีนชาและหมดสติได้
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสทางผิวหนัง ถ้าสัมผัสเป็นเวลานาน ๆ และต่อเนื่อง จะทำให้ผิวหนังลอกได้ เป็นเหตุให้เกิดผื่นแดง บวมหนา และเจ็บปวด
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไป จะก่อให้เกิดการระคายเคืองระบบย่อยอาหาร, เมื่อยล้า, คลื่นไส้, ง่วงนอน, อาจจะทำให้ระบบหายใจอักเสบและอาจจะมีของเหลวสะสมในปอด
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตา ถ้าสัมผัสกับของเหลวหรือไอของเหลว ที่เข้มข้นจะทำให้ระคายเคืองตา และเกิดผื่นแดงกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อบวมโดยเร็ว
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	-

ในด้านการเกิดอัคคีภัยและการระเบิด สารนี้เป็นสารไวไฟ มีความไวอยู่ที่ 1 องศาเซลเซียส จุดลุกติดไฟได้เองไม่มีข้อมูล แต่พบที่สามารถถูกไฟไหม้ติดไฟได้ ไอรระเหยหนักกว่าอากาศ เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ ก่อให้เกิดของผสมที่ระเบิดได้ เมื่อเกิดเพลิงไหม้ จะก่อให้เกิดแก๊สหรือไอรระเหยที่เป็นอันตราย

การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณ (Dose . Response Assessment)

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity) แสดงดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 แสดงค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารเคมีในกระบวนการ Flame aerosol process

สารเคมี	LD ₅₀ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	LC ₅₀ (มิลลิกรัมต่อตารางเมตร)
N ₂	-	-
O ₂	-	-
CH ₄	-	-
HMDSO	4500 (หนู)	-

* ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ www.pcd.go.th

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.3 วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis)

วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส มีการใช้สารเคมีได้ดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 แสดงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสเปรย์ไพโรไลซิส

สารเคมีที่ใช้	สารเคมีที่ปล่อยออก
TEOs	CO ₂
HNO ₃	NO ₂
น้ำ	
C ₂ H ₅ OH	

พิจารณาการชี้ให้เห็นอันตราย Hazard Identification

- TEOs เช่น เดียวกันกับที่แสดงในหน้า 68 ถึง 71

- กรดไนตริก (HNO₃) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นสารละลาย ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน จุดเดือดอยู่ที่ 83 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ - 42 องศาเซลเซียส เป็นสารที่ไม่เสถียร การสลายตัวจะเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสความร้อน หรือแสง เมื่อมีการสลายตัวจะให้สารเคมีที่อันตรายได้แก่พวกไอระเหยของไนตรัส อันตรายต่อสุขภาพอนามัยแสดงดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากกรดไนตริก

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการเจ็บคอ ไอ หายใจติดขัดอย่างรุนแรง ในบางกรณีอาจเสียชีวิตได้
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดผื่นแดง ปวด และเกิดแผลไหม้ ทำให้เกิดการระคายเคือง
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือการกินเข้าไป จะก่อให้เกิดอาการเจ็บคอ และปวดท้อง
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา ทำให้ตาแดง ปวดตา และทำให้มองเห็นไม่ชัดเจน
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	-

ในด้านการเกิดอค์คีภัยและการระเบิด สารนี้ไม่ใช่สารไวไฟ แต่สามารถทำให้เกิดสารที่ไวไฟได้ จุดควบไฟ และจุดลุกติดไฟได้เองยังไม่มีข้อมูล

- เอานอล (C_2H_5OH) คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเป็นของเหลว ใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว จุดเดือดอยู่ที่ 78 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ที่ -144 องศาเซลเซียส เป็นสารเคมีที่เสถียร อันตรายต่อสุขภาพอนามัยแสดงดังตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.15 แสดงอันตรายที่เกิดต่อสุขภาพอนามัยจากเอทานอล

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการ ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ ไอ เชื้องซึม และเกิดโรคน้ำท่วมปอด
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนัง ทำให้เกิดการระคายเคือง แสบไหม้ ผื่นแดง สารนี้ดูดซึมผ่านผิวหนัง
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไป ทำให้เกิดการระคายเคือง ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ วิงเวียนศีรษะ และมีอาการเชื่องซึม
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตาทำให้เกิดการระคายเคืองทำให้ตาแดง และปวดตาได้
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติ,อื่น ๆ	-

ในด้านการเกิดอค์คีภัยและการระเบิด สารนี้จะมีจุดควบไฟอยู่ที่ 13 องศาเซลเซียส และมีจุดลุกติดไฟได้เองอยู่ที่ 363 องศาเซลเซียส สารนี้เป็นสารไวไฟ สามารถเกิดเป็นไอระเหยรวมตัวกับอากาศกลายเป็นส่วนผสมที่ระเบิดได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 13 องศาเซลเซียส อีกทั้งไอระเหยหนักกว่าอากาศเล็กน้อย จะไหลแพร่กระจาย ไปสู่จุดติดไฟและเกิดไฟย้อนกลับมาสู่จุดรั่วไหลหรือภาชนะที่ปิดอยู่

การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณ (Dose . Response Assessment)

ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity) แสดงดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 แสดงค่ามาตรฐานและความเป็นพิษของสารเคมีในกระบวนการสเปรย์ไฟโรไลซิส

สารเคมี	LD ₅₀ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	LC ₅₀ (มิลลิกรัมต่อตารางเมตร)
TEOs	5600 (หนู)	83840 ต่อ 4 ชั่วโมง (หนู)-
HNO ₃	430 (คน)	-
C ₂ H ₅ OH	7076 (หนู)	10000 (ปลา)

* ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ www.pcd.go.th

5.4 ผลการประเมินความเสี่ยงของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน

ในการประเมินความเสี่ยง (Risk evaluation) ของกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์จะทำการพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ โดยผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 5.17

- * โอกาสที่จะเกิดขึ้น (Likelihood of occurrence) - โอกาสเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ความเสี่ยงสูง
- * โอกาสในการควบคุม/ตรวจสอบ(Likelihood of detection) - ถ้าตรวจสอบยาก ทำให้ยากแก่การควบคุมเนื่องจากไม่ทราบว่าเกิดขึ้นหรือมีมลพิษอยู่ ยิ่งถ้าเป็นกรณีภาวะผิดปกติด้วย ยิ่งจะมีความเสี่ยงสูง
- * ความรุนแรงของผลกระทบ(Severity of consequence) - ยิ่งผลกระทบมีความรุนแรงมาก ความเสี่ยงยิ่งสูง

หลักในการพิจารณาการประเมินความเสี่ยงมีดังนี้

การเกิดเหตุการณ์ (Occurrence)

- สิ่งที่เกิดขึ้นเป็นส่วนที่เกิดขึ้นเป็นปกติในกระบวนการผลิตหรือไม่
- จะเกิดขึ้น โดยอัตโนมัติเมื่อกระบวนการบกพร่อง หรืออยู่ในช่วงเริ่มผลิตหรือไม่
- มีบันทึกการเกิดอุบัติเหตุที่เกิดก่อนหน้านี้หรือไม่

การตรวจสอบ (Detection)

- มีการตรวจสอบสม่ำเสมอใช่หรือไม่
- มีระบบการตรวจสอบอัตโนมัติหรือไม่
- มลพิษที่เกิดปรากฏชัดเจนหรือไม่
- ทางผ่าน (Pathway) ของมลพิษได้รับการควบคุม (Controlled) หรือไม่

ความรุนแรง (Severity)

- มลพิษมีลักษณะอย่างไร
- มีปริมาณมากเพียงไร
- เป้าหมาย (Target) คืออะไร มีความไวต่อการสัมผัสเพียงไร
- ผลกระทบต่อเป้าหมายเป็นอย่างไร (Possible impacts)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.17 แสดงการประเมินความเสี่ยงที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ในการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน

กระบวนการ สังเคราะห์	ขั้นตอน		โอกาสที่จะเกิด	โอกาสในการควบคุม/การ ตรวจพบ	ความรุนแรงของ ผลกระทบ
โซล-เจล	การเตรียมสาร	ไอร่ะเหยจากการเตรียมสาร	น้อยมาก	ปานกลาง	มาก
		อันตรายจากการสัมผัส	มาก	มาก	มาก
		กลิ่นสารเคมี	มาก	มาก	มาก
	การผลิต	การหลุดรอดของสารเคมี	ปานกลาง	น้อย	ปานกลาง
		การใช้พลังงานในกระบวนการ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
		เสียงที่เกิด	ปานกลาง	น้อย	ปานกลาง
		น้ำทิ้งจากกระบวนการ	ปานกลาง	ปานกลาง	น้อย
		อัคคีภัย	น้อยมาก	ปานกลาง	น้อย

* ที่มา รองศาสตราจารย์ ดร.เลิศชัย เจริญธัญรักษ์ ภาควิชาาระบาดวิทยา คณะสาธารณสุขศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กระบวนการ สังเคราะห์	ขั้นตอน		โอกาสที่จะเกิด	โอกาสในการควบคุม/การ ตรวจพบ	ความรุนแรงของ ผลกระทบ
Flame aerosol	การเตรียมสาร	ไอรระเหยจากการเตรียมสาร	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
		อันตรายจากการสัมผัส	น้อย	ปานกลาง	น้อย
		กลิ่นสารเคมี	น้อย	ปานกลาง	ปานกลาง
	การผลิต	การหลุดรอดของสารเคมี	บ่อย	ปานกลาง	ปานกลาง
		การใช้พลังงานในกระบวนการ	บ่อย	ปานกลาง	ปานกลาง
		เสียงที่เกิด	บ่อย	มาก	ปานกลาง
		น้ำทิ้งจากกระบวนการ	น้อย	ปานกลาง	น้อย
		อค์คีภย	น้อย	ปานกลาง	น้อย

กระบวนการ สังเคราะห์	ขั้นตอน		โอกาสที่จะเกิด	โอกาสในการควบคุม/การ ตรวจพบ	ความรุนแรงของ ผลกระทบ
สเปรย์ไฟโรไลซิส	การเตรียมสาร	ไอร่ะเหยจากการเตรียมสาร	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก
		อันตรายจากการสัมผัส	มาก	มาก	มาก
		กลิ่นสารเคมี	มาก	มาก	มาก
	การผลิต	การหลุดรอดของสารเคมี	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
		การใช้พลังงานในกระบวนการ	มาก	ปานกลาง	มาก
		เสียงที่เกิด	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
		น้ำทิ้งจากกระบวนการ	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
		อค์คีภย	น้อยมาก	ปานกลาง	น้อย

5.4.1 การให้ความสำคัญ (Determination of significance)

จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาแปลผล โดยการให้ความสำคัญดังตารางที่ 5.18 เพื่อจัดลำดับความสำคัญของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม (Assessment of Significance) ซึ่งมีแนวทางในการประเมินดังต่อไปนี้

สูตรในการคำนวณ

$$\text{ค่าในการประเมิน} = (\text{โอกาสที่เกิด} + \text{โอกาสในการควบคุม/การตรวจพบ}) \times \text{ความรุนแรงของผลกระทบ}$$

เกณฑ์การให้ความสำคัญ

เกณฑ์สำหรับโอกาสที่จะเกิด	คะแนน
1. โอกาสในการเกิดบ่อยมาก อาจเกิดขึ้นทุกวัน	5
2. โอกาสในการเกิดมาก อาจเป็นอาทิตย์หรือเดือนละครั้ง	4
3. โอกาสในการเกิดปานกลาง	3
4. โอกาสในการเกิดน้อย อาจเป็นปีละครั้ง	2
5. โอกาสในการเกิดน้อยมากแทบไม่มีเลย	1
เกณฑ์สำหรับการควบคุม	
1. องค์กรสามารถควบคุมมลพิษหรืออันตรายดังกล่าวได้อย่างสมบูรณ์	5
2. สามารถควบคุมได้ประมาณร้อยละ 80	4
3. สามารถควบคุมมลพิษหรืออันตรายดังกล่าวได้ประมาณร้อยละ 50	3
4. สามารถควบคุมมลพิษดังกล่าวได้ไม่มากนัก ยังไม่มีระบบควบคุม	2
5. ยังไม่สามารถควบคุมมลพิษดังกล่าวด้วยวิธีการใดๆ	1
เกณฑ์สำหรับการตรวจหาความรุนแรง	
1. เป็นสภาพที่ไม่มี ความรุนแรงของมลพิษหรืออันตราย	0
2. เป็นมลพิษหรือเป็นอันตรายที่มีความรุนแรงน้อยมาก	2
3. มลพิษมีความรุนแรงหรือมีอันตรายน้อย	4
4. มลพิษหรืออันตรายที่มีความรุนแรงปานกลาง	6
5. มลพิษมีความรุนแรงหรืออันตรายมาก	8
6. มลพิษมีความรุนแรงหรืออันตรายมาก เกิดบ่อย มีผลกระทบเห็นได้เด่นชัด	10

ระดับคะแนนในการพิจารณาความมีนัยสำคัญ

คะแนน	ระดับความสำคัญ
0-20	ต่ำ
21-40	ปานกลาง
41-70	สูง
71-100	สูงมาก

จากข้อมูลการประเมินความเสี่ยง (ตารางที่ 5.17) และเกณฑ์การให้ความสำคัญ สามารถแสดงผลการประเมินได้ดังตารางที่ 5.18

5.5 สรุปผลการประเมินความเสี่ยง

จากการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโนพบว่า ในขั้นตอนการเตรียมสารนั้นวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสจะมีความเสี่ยงมากที่สุด รองลงมาจะเป็นกระบวนการโซล-เจล และ Flame aerosol process ตามลำดับ แต่ในขั้นตอนการผลิตพบว่าการประเมินที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งกระบวนการ Flame aerosol นั้นจะมีความเสี่ยงสูงเนื่องจากเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่มีหลายขั้นตอนและซับซ้อนกว่าวิธีอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.18 แสดงผลจากการประเมินความเสี่ยงจากเกณฑ์การให้คะแนนความสำคัญ

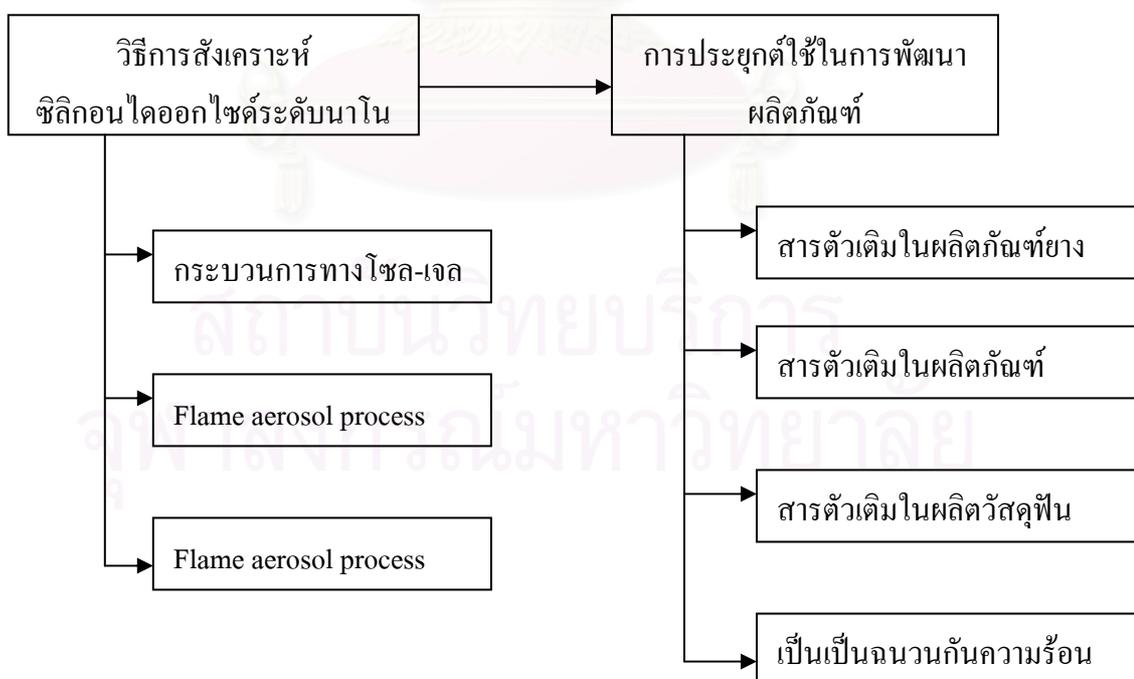
กระบวนการ สังเคราะห์	ขั้นตอน		โอกาสที่จะเกิด	การควบคุม/ การตรวจพบ	ความรุนแรง ของผลกระทบ	ค่าในการ ประเมิน	ระดับ ความสำคัญ
Flame aerosol	การเตรียมสาร	ไอระเหยจากการ เตรียมสาร	3	3	6	36	ปานกลาง
		อันตรายจากการ สัมผัส	2	3	4	20	ต่ำ
		กลิ่นสารเคมี	2	3	6	30	ปานกลาง
	การผลิต	การหลุดรอดของ สารเคมี	4	3	6	42	สูง
		การใช้พลังงานใน กระบวนการ	3	3	6	36	ปานกลาง
		เสียงที่เกิด	4	4	6	36	ปานกลาง
		น้ำทิ้งจาก กระบวนการ	2	3	4	20	ต่ำ
		อัคคีภัย	2	3	4	20	ต่ำ

กระบวนการ สังเคราะห์	ขั้นตอน		โอกาสที่จะเกิด	การควบคุม/ การตรวจพบ	ความรุนแรง ของผลกระทบ	ค่าในการ ประเมิน	ระดับ ความสำคัญ
สเปร์ย์ไฟโรไล ซิส	การเตรียมสาร	ไอระเหยจากการ เตรียมสาร	3	3	8	48	สูง
		อันตรายจากการ สัมผัส	4	4	8	64	สูง
		กลิ่นสารเคมี	4	3	8	56	สูง
	การผลิต	การหลุดรอดของ สารเคมี	3	3	6	36	ปานกลาง
		การใช้พลังงานใน กระบวนการ	4	3	8	56	สูง
		เสียงที่เกิด	3	3	6	36	ปานกลาง
		น้ำทิ้งจาก กระบวนการ	3	3	8	48	สูง
		อัคคีภัย	2	3	4	20	ต่ำ

บทที่ 6

การพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อนำไปพัฒนาใช้กับ ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในเชิงอุตสาหกรรม

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยการประเมินความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ 3 วิธี ได้แก่ กระบวนการทางโซล-เจล วิธี flame aerosol process และสเปรย์ไฟโรไลซิส จากนั้นจะเลือกวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โดยการเติมอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน อันได้แก่ การนำไปเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพินเทียม และนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน โดยแนวทางการวิจัยแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงแนวทางในการวิจัย

6.1 ผลการพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

การสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยกระบวนการทางโซล-เจล อนุภาคที่ได้จะอยู่ในช่วง 10-30 นาโนเมตร ส่วนวิธี Flame aerosol process อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-100 นาโนเมตร และวิธี ทางสเปรย์ไพโรไลซิส ขนาดอนุภาคที่ได้จะอยู่ในช่วง 20-300 นาโนเมตร เมื่อทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของทั้งสามวิธีพบว่าวิธีการ spray pyrolysis จะส่งผลกระทบต่อมากที่สุดไม่ว่าจะเป็นด้านสุขภาพของมนุษย์ รวมไปถึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากร รองลงมาจะเป็นวิธี sol-gel และ flame aerosol process ตามลำดับ ในด้านการประเมินความเสี่ยงพบว่าการ สเปรย์ไพโรไลซิส จะมีความเสี่ยงสูงในขั้นตอนการเตรียมสาร แต่ในขั้นตอนการผลิตกลับพบว่าวิธี flame aerosol จะมีความเสี่ยงสูงเนื่องจากกระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอนที่และซับซ้อน

ในส่วนของการนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติดีขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคและข้อมูลจากการประเมินความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าผลิตภัณฑ์ยางและส่วนประกอบวัสดุฟันควรเลือกใช้วิธีการสังเคราะห์แบบ Flame aerosol process ส่วนผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและฉนวนกันความร้อนควรใช้วิธีการสังเคราะห์แบบโซล-เจล เนื่องจากอนุภาคที่ได้จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบสูงอีกทั้งยังมีลักษณะเบาและมีรูปทรงสูง

6.2 สรุป

ผลการศึกษาวัฏจักรชีวิตดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ตลอดจนนำผลที่ได้รับไปปรับกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มทางเลือกในการผลิตและการออกแบบ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรที่ลดลง

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินวัฏจักรชีวิตของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนในช่วงการสังเคราะห์ โดยการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและพิจารณาวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อนำไปพัฒนาใช้กับผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ได้แบบจำลองวัฏจักรชีวิตของอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน ในช่วงการสังเคราะห์ โดยวิธีการผลิตแบบต่างๆ อีกทั้งยังสามารถชี้ถึงวิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน โดยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และชี้ให้เห็นถึงสาเหตุที่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นในอนาคต รวมไปถึงผลการศึกษาที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ประกอบในการพิจารณาการผลิตที่เหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆ ได้

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้ จะทำการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ของการประเมินวัฏจักรชีวิตนาโนเทคโนโลยี การสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนและการประยุกต์ใช้ ซึ่งพบว่าวิธีการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนนั้นส่วนใหญ่จะทำการสังเคราะห์โดยกระบวนการทางโซล-เจล กระบวนการ Flame aerosol และสเปรย์ไฟโรไลซิส ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสามวิธีจะทำการเตรียมและหาวัตถุดิบได้ง่าย ในส่วนของการประยุกต์ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนนั้นเนื่องด้วยสมบัติที่โดดเด่นไม่ว่าจะเป็นการทนความร้อนได้ดี มีพื้นที่ผิวสูง มีความแข็งแรง รวมไปถึงเป็นสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันจึงได้มีการนำนาโนซิลิกาไปใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีคุณสมบัติดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนมาเป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง เป็นสารตัวเติมในเครื่องสำอาง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพินเทียม และนำมาใช้เป็นฉนวนกันความร้อน

จากผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโน พบว่าการสังเคราะห์ในแต่ละวิธีก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแตกต่างกันไปตามวัตถุดิบและปริมาณการใช้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของแต่ละวิธีพบว่าวิธี spray pyrolysis จะส่งผลกระทบมากที่สุดไม่ว่าจะเป็นด้านสุขภาพของมนุษย์ รวมไปถึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของระบบ

นิเวศน์และการใช้ทรัพยากร รองลงมาจะเป็นวิธี sol-gel และ flame aerosol process ตามลำดับ ใน ส่วนของการประเมินความเสี่ยงพบว่ากระบวนการ สเปรย์ไฟโรไลซิส จะมีความเสี่ยงสูงใน ขั้นตอนการเตรียมสาร แต่ในขั้นตอนการผลิตกลับพบว่ากระบวนการ flame aerosol จะมีความเสี่ยงสูง เนื่องจากกระบวนการผลิตมีหลายขั้นตอนที่และซับซ้อน

ในส่วนของการนำซิลิกอนไดออกไซด์ระดับนาโนไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติดีขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคและข้อมูลจากการประเมินความเป็นพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าผลิตภัณฑ์ยางและส่วนประกอบวัสดุ ฟันควรเลือกใช้วิธีการสังเคราะห์แบบ Flame aerosol process ส่วนผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและ จนวนกันความร้อนควรใช้วิธีการสังเคราะห์แบบโซล-เจล เนื่องจากอนุภาคที่ได้จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบสูงอีกทั้งยังมีลักษณะเบาและมีรูพรุนสูง

ผลการศึกษาวงจรชีวิตดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการสังเคราะห์ซิลิกอนไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น ตลอดจนนำผลที่ได้รับไปปรับกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มทางเลือกในการผลิตและการออกแบบ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรที่ลดลง

7.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการประเมินวงจรชีวิตส่วนใหญ่จะอาศัยการเก็บข้อมูล เพื่อนำมาวิเคราะห์ ดังนั้นข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการประเมินต้องเป็นข้อมูลที่นำชื่อถือหรือได้รับการยอมรับจากนักวิชาการต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. กัญจนา บุญเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 5. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
2. นันทนา ยูะนิยม และ ปมทอง มาลากุล ณ อยุธยา. การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกธรรมดา กับพลาสติกย่อยสลายได้โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต.
3. Azapagic A. and Clift R. The application of life cycle assessment to process optimization. Computer and Chemical Engineering. 1999 : 1509-1526.
4. Azapagic A. Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimization. Chemical Engineering Journal. 1999 : 1-21.
5. Alexandra F. and Laura M. The influence of the wet gels processing on the structure and properties of silica xerogels. Microporous and Mesoporous Materials. 2005 : 229–235.
6. Bautista J. R. and Atins R. M. The formation and deposition of SiO₂ aerosols in optical fiber manufacturing torches. Aerosol Sci. 1991 : 667-675.
7. Chang H. and Won Y.S. Morphological control in manufacturing of TiO₂ and SiO₂ particulates in a flame aerosol reactor. Aerosol Sci. Supply. 2000 : 883-884.
8. George V. Synthesis of SiO₂ and Y₂O₃ powders using the spray pyrolysis method. Geo Sci. 1997 : 456-458.
9. Hendrik K. and Kammler. Electrically-assisted flame aerosol synthesis of fumed silica at high production rates. Chemical Engineering and Processing. 2000 : 219-227.
10. Karsten W. and Sotiris E. Scale-up of nanoparticle synthesis in diffusion flame reactors. Chemical Engineering Science. 2003 : 4581-4589.
11. Ki Do Kim and Kwan Young . Formation of spherical hollow silica particles from sodium Silicate solution by ultrasonic spray pyrolysis method. Colloids and Surfaces Physicochem. Eng. Aspects .2005 :193–198.
12. Kikuo Okuyama and Wuled L. Preparation of nanoparticles via spray route. Chemical Engineering Science .2003 : 537 – 547.

13. Konstantinov K., Stambolova I. and Peshev P. Preparation of ceria films by spray pyrolysis method . International Journal of Inorganic Materials .2000 : 277–280.
14. Kota S.R. and Khalil El H. A novel method for synthesis of silica nanoparticles.Journal of Colloid and Interface Science. 2005 : 125-131.
15. Madler L., Mueller R. and Pratsinis S.E. Controlled synthesis of nanostructured particles by flame spray pyrolysis. Aerosol Science. 2002 : 369–389.
16. Marek S., Jerzy W. and Mieczyslaw. Synthesis and characteristic of silica aerogels. Applied Catalysis A .1999 : 139-148.
17. Markovi G and Radovanovi B. Thermal stability and surface morphology of nano and micro-filled NBR/CSM and CR/CSM rubbers blend.J.Serb.Chem.Soc. 2004 : 167-173.
18. Maria F. and Anna C. Effect of aging time and concentration of aging solution on the porosity characteristics of subcritically dried silica aerogels. Microporous and Mesoporous Materials.2006 : 286–292.
19. Murugavel P. and Kalaiselvam M. Controlled synthesis of nanostructured particles by flame spray pyrolysis. Aerosol Science 33 (2002) 369–389.
20. Norbert M. and Simone K. Nanotechnology for dental composites. Int. J.(Article inpress).
21. Qi Tang and Tao Wang. Preparation of silica aerogel from rice hull ash by supercritical carbon dioxide drying.J. of Supercritical Fluids. 2005 : 91-94.
22. Rebitzer G., Ekvall T. and Frischknecht R. Framework, goal and scope definition, inventory analysis and application.Environmental international. 2004:721-739.
23. Roger M., Hendrik K., Sotiris E. and Pratsinisa. Non- agglomerated dry silica nanoparticles.Powder Technology.2004 :40– 48.
24. Roger M., Hendrik K., Sotiris E. and Pratsinisa. Nanoparticles synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis.Chemical Engineering Science. 2003 : 1969-1976.
25. Roger M. and Lutz M-adler. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis. Chemical Engineering Science .2003:1969 – 1976
26. Roger M. and Vitla A. Non-agglomerated dry silica nanoparticles. Powder Technology . 2004 :40– 48.

27. Smitha S. and Shajesh P. Effect of aging time and concentration of aging solution on the porosity characteristics of subcritically dried silica aerogels. Microporous and Mesoporous Materials .2006 : 286–292.
28. Sharad D., Bhagat and Venkateswara R., Surface chemical modification of TEOS based silica aerogels synthesized by two step (acid–base) sol–gel process. Applied Surface Science.2005 (Article inpress).
26. Vital A., Klotz U., Graulet T. and Mueller R. Synthesis of spherical, non-aggregated silica nanoparticle. Powder Technology .2004 :40– 48.
29. Wendelin J. S. and Sotiris. Aerosol flame reactors for manufacture of nanoparticles. Powder Technology.2002 :103-108.
30. Wendelin J. Stark and Sotiris E. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis. Chemical Engineering Science .2003 :1969 – 1976.
31. Yi-He Zhang, Yan Lia and Shao-Yun Fu. Synthesis and cryogenic properties of polyimide–silica hybrid films by sol–gel process. Polymer .2005 : 8373–8378.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Eco-indicator 99

ในงานวิจัยนี้จะทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตโดยใช้โปรแกรม SimaPro 6 ซึ่งใช้หลักเกณฑ์ของมาตรฐานการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ISO 14042 โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ การจัดกลุ่มผลกระทบ (classification) การคำนวณผลกระทบจากสารต่างๆ เทียบกับสารฐาน (Characterization) และการเทียบความรุนแรงของผลกระทบและคำนวณเป็นคะแนนเดียว (single score) ซึ่งในการศึกษานี้ จะแบ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Impact categories) โดยใช้วิธี Eco-indicator 99 / Europe ซึ่งพัฒนาโดยสถาบันในประเทศเนเธอร์แลนด์ ดังนี้

1. ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์

- การทำให้ฤดูกาลเปลี่ยนแปลง (Climate change)
- การรั่วของโอโซน (Ozone layer depletion)
- สารก่อมะเร็ง (Carcinogens)
- โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ (Respiratory effects)

2. คุณภาพของระบบนิเวศน์

- การเกิดฝนกรด (Acidification)
- การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (Eutrophication)
- ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ Ecotoxicity

3. การใช้ทรัพยากร

โดยที่ Eco-indicator 99 จะประกอบไปด้วย

การกำหนดบทบาท (Charaterisation)

เป็นขั้นตอนในการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในเทอมของตัวบ่งชี้ (Indicator) โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ (Characterization factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบและทำการรวมค่าทั้งหมดของแต่ละผลกระทบตามสมการ

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

EP_j (Environmental impact potential) คือศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)

Q (Quantity of substance) คือปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา (kg substance j)

EF_{ij} (Equivalency factor) คือค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j (kg substance equivalent / kg substance j)

การหาขนาดของผลกระทบ (Normalisation)

เป็นขั้นตอนในการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือการบริการโดยเปรียบเทียบกับผลผลิตหรือบริการที่ต้องการอ้างอิง

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

$NP_{j(\text{product})}$ (Normalized environment impact potential) ค่าปกติทางศักยภาพผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆของผลิตภัณฑ์ (person)

T (Lifetime of product) คืออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (year)

ER_j (Normalization Reference) คือค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ j ใดๆที่เกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี (kg substance equivalent / person / year)

การให้น้ำหนัก (Weighting)

เป็นขั้นตอนการให้ความสำคัญของลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภทคือ สุขภาพ มนุษย์ ระบบนิเวศ การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของตัวชี้วัดทั้ง 3 ประเภทให้เป็นคะแนนเดียว

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

WP_j (Weighted environmental impact potential) คือค่าศักยภาพผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ หลังการให้น้ำหนักความสำคัญแล้ว (person for target year; Pt.)

WF_j (Weighting factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใดๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

ค่าสัดส่วนน้ำหนักที่ใช้ในการประเมินผลแสดงดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 แสดงสัดส่วนน้ำหนักที่ใช้ในการประเมินผลใน Eco-indicator 99 (SimaPro)

Impact category	Weighting Factor	Unit
Human health Carcinogen	300	DALY
Human health Resp. org.	300	DALY
Human health Resp. inorg.	300	DALY
Human health Climate change	300	DALY
Human health Radiation	300	DALY
Human health Ozone Layer	300	DALY
Ecosystem Quality Ecotox	400	PDF*m2yr
Ecosystem Quality Acid/Eutrophication	400	PDF*m2yr
Ecosystem Quality Land use	400	PDF*m2yr
Resources Minerals	300	MJ surplus energy
Resources Fossil fuels	300	MJ surplus energy

การแปลผลวัฏจักรชีวิต (Interpretation)

การแปลผลหรือการตีความเป็นขั้นตอนในการนำผลจากการทำบัญชีรายการ และการประเมินผลกระทบมารวมกันเพื่อให้ได้ข้อสรุป และข้อเสนอแนะตามเป้าหมาย วัตถุประสงค์ และขอบเขตของการศึกษา

สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบบประเภทต่าง ๆ

ตารางที่ ก.2 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบบด้านสารก่อมะเร็ง

Carcinogens	
1,2-dibromoethane	Dichlorvos
1,2-dichloroethane	2,3,7,8-TCDD Dioxin
1,3-butadiene	epichlorohydrin
1,4-dioxane	epichlorohydrin
2,4,6-trichlorophenol	formaldehyde
acetaldehyde	gamma- HCH(Lindane)
acrylonitrile	Hexachlorobezene
alpha-hexachlorocyclohexan	metals
Arsenic	Nickel
Bis(chloromethyl)ether	Nickel-refinery-dust
benzene	Nickel-subsulfide
benzo(a)anthracene	PAH's
benzo(a)pyrene	particles diesel soot
benzotrichloride	Polychlorobiphenyls
benzylchloride	pentachlorophenol
beta-chlorocyclohexane	propyleneoxide
bromodichloromethane	styrene
Cadmium	perchloroethylene
Chromium	carbontetrachloride
di(2-ethylhexyl)phthalate	chloroform
dibenz(a)anthracene	vinyl chloride
sichloromethane	

ตารางที่ ก.3 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อด้านการลดลงของชั้น โอโซน

Ozone layer depletion	
1,1,1-trichloroethane	HALON-2402
CFC-11	HFCF-123
CFC-113	HFCF-124
CFC-114	HFCF-141b
CFC-115	HFCF-142b
HALON-1201	HFCF-22
HALON-1202	HFCF-225ca
HALON-1211	HFCF-225cb
HALON-1301	Methyl bromide
HALON-2311	Methyl chloride
HALON-2401	carbontetrachloride

ตารางที่ ก.4 ประเภทของสินแร่

Resource	
aluminium(in ore)	molybdene(in ore)
bauxite	molybdenum(ore)
chromium(in ore)	nickel(in ore)
copper(ore)	nickel(ore)
iron(ore)	tin(in ore)
lead(in ore)	tin(ore)
lead(ore)	tungsten(ore)
manganese(in ore)	zinc(in ore)
manganese(ore)	zinc(ore)
mercury(in ore)	

ตารางที่ ก.5 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์

Respiration by organic substances	
1,1,1-trichloroethane	3,5-dimethyl ethyl benzene
1,2,3-trimethyl benzene	3-hexanone
1,2,4-trimethyl benzene	3-methyl 1 butanol
1,3,5-trimethyl benzene	3-methyl 1 butene
1,3-butadiene	3-methyl 2-butanol
1-butene	3-methyl hexane
1-butoxy propanol	3-methyl pentane
1-hexene	3-pentanol
1-methoxy 2-propanol	3-pentanone
1-pentene	acetaldehyde
2,2-dimethyl butane	acetic acid
2,3- dimethyl butane	acetone
2-butoxy ethanol	propionaldehyde
2-ethoxy ethanol	alcohols
2-hexanone	aldehydes
2-methoxy ethanol	alkanes
2-methyl 1-butanol	alkenes
2-methyl 1-butene	benzene
2-methyl 2-butanol	butane
2-methyl hexane	butanol
2-methyl pentane	butene
2-pentanone	cis 1,2-dichloroethane
hepane	s-butanol
hexane	s-butyl acetate
i-butane	t-butanol
i-butanol	t-butyl acetate
i-butyraldehyde	perchloroethylene
i-pentane	toluene
3,5 dithyl toluene	

ตาราง ก.5 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์ (ต่อ)

Respiration by organic substances	
cis 2-butene	methyl chloride
cis 2-hexene	methyl ethyl ketone
cis 2-pentene	methyl formate
CxHy aromatic	methyl i-butyl ketone
CxHy chloro	methyl i-propyl ketone
CxHy halogenated	methyl propene
cyclohexane	methyl t-butyl ether
cyclohexanol	Methyl t-butyl ketone
cyclohexanone	n-butanol
decane	n-butyl acetate
di-I-propyl ether	n-butylaldehyde
diacetone alcohol	n-propanol
dichloromethane	n-propyl acetate
dethyl ether	n-propyl benzene
dimethyl ether	neopentane
dodecane	NMVOC
esters	nonane
ethane	o-ethyl toluene
ethane diol	o-xylene
ethanol	octane
ethene	p-ethyl toluene
ethers	p-xylene
ethyl t-butyl ether	pentanal
ethylacetate	pentane
ethylbenzene	propane
acetylene	propane diol
formaldehyde	propene
formic acid	propanic acide

ตาราง ก. 5 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์ (ต่อ)

Respiration by organic substances	
i-propyl acetate	trans 1,2-dichloroethane
i-propyl benzene	trans 2-butene
isoprene	trans 2-hexene
ketones	trans 2-pentene
m-ethyl toluene	trichloroethylene
m-xylene	chloroform
methane	undecane
methanol	VOC
methyl acetate	xylene

ตารางที่ ก.6 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์

Respiration by inorganic substances	
ammonia	NO _x
dust(PM 10)	NO _x (as NO ₂)
dust(PM 2.5)	SO ₂
TSP	SO ₃
NO	SO _x
NO ₂	Sox (as SO ₂)

ตารางที่ ก.7 สสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านการทำให้ฤดูกาลเปลี่ยนแปลง

Climate change	
methyl chloroform	HCFC-143
perfluoroethane	HCFC-143a
trifluoriodomethane	HCFC-152a
perfluomethane	HCFC-227ea
CFC-11	HCFC-23
CFC-113	HCFC-236fa
CFC-13	HCFC-245ca
carbon dioxide	HCFC-32
methylene chloride	HCFC-41
HCFC-123	methane
HCFC-124	nitrous oxide
HCFC-141b	perfluorhexane
HCFC-142b	perfluorpentane
HCFC-22	perfluorpropane
HCFC-125	sulphur hexafluoride
HCFC-134	carbontetrachloride
HCFC-134a	chloroform

ตารางที่ ก.8 สสารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบด้านความเป็นกรด

Respiration by inorganic substances	
ammonia	SO ₂
NO	SO ₃
NO ₂	Sox
NO _x	Sox(as SO ₂)
NO _x (as NO ₂)	

ตารางที่ ก.9 สารที่เป็นปัจจัยให้เกิดผลกระทบต่อด้านความเป็นพิษ

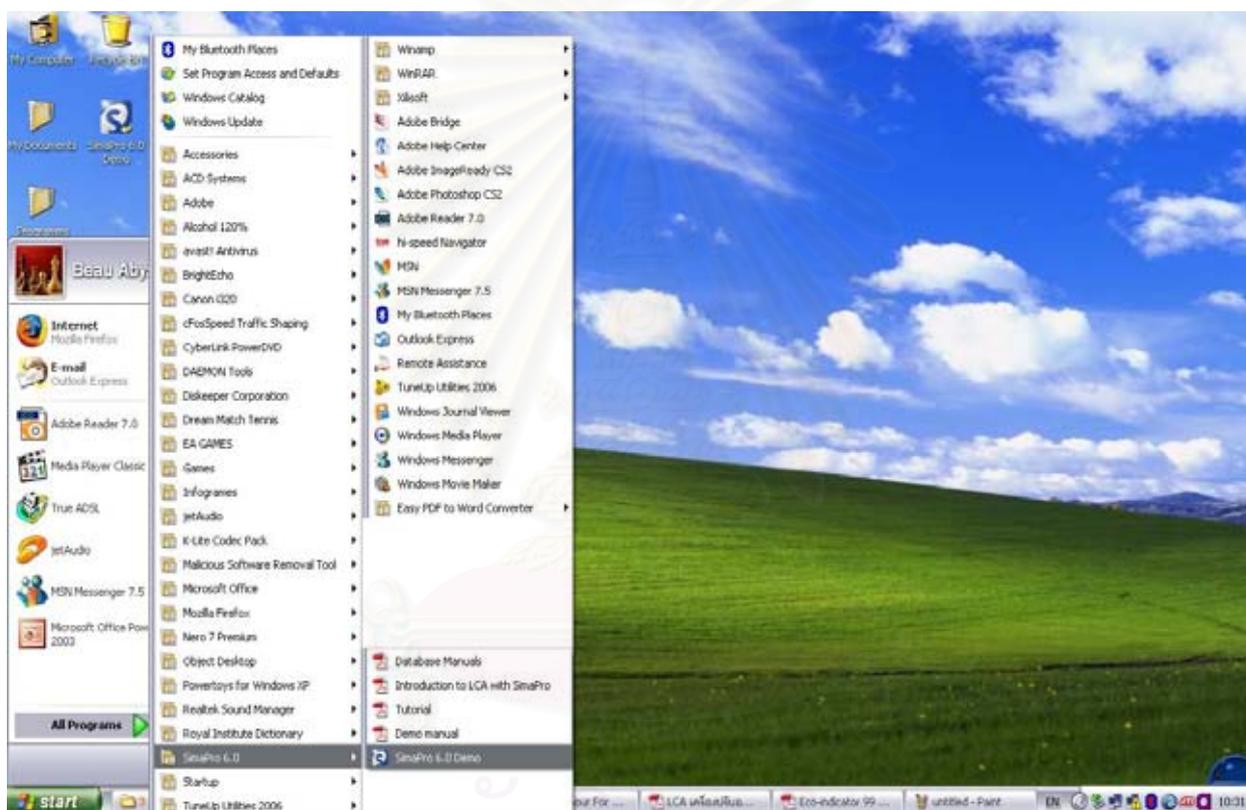
Ecotoxic emission	
1,2,3-trichlorobenzene	Hexachlorobenzene
1,2,4-trichlorobenzene	Mercury
1,3,5-trichlorobenzene	Malathion
2,4-D	Maneb
Arsenic	Mecoprop
Atrazine	Metabenzthiazuron
Azinphos-methyl	Metals
Bentazon	Metamitron
benzene	Metribuzin
benzo(a)pyrene	Mevinphos
Carbendazim	Monolinuron
Cadmium	Nickel
Copper	PAH's
di(3-ethylhexyl)phthalate	Prathion
dibutylphthalate	Lead
Dichlorvos	Polychlorobiphenyls
2,3,7,8-TCDD Dioxin	pentachlorophenol
Diquat-dibromide	Simazine
Diuron	Thiram
DNOC	toluene
fentin acetate	Trifluralin
fluoranthene	Zinc
gamma-HCH(Lindane)	

ภาคผนวก ข

วิธีการใช้โปรแกรม SimaPro 6

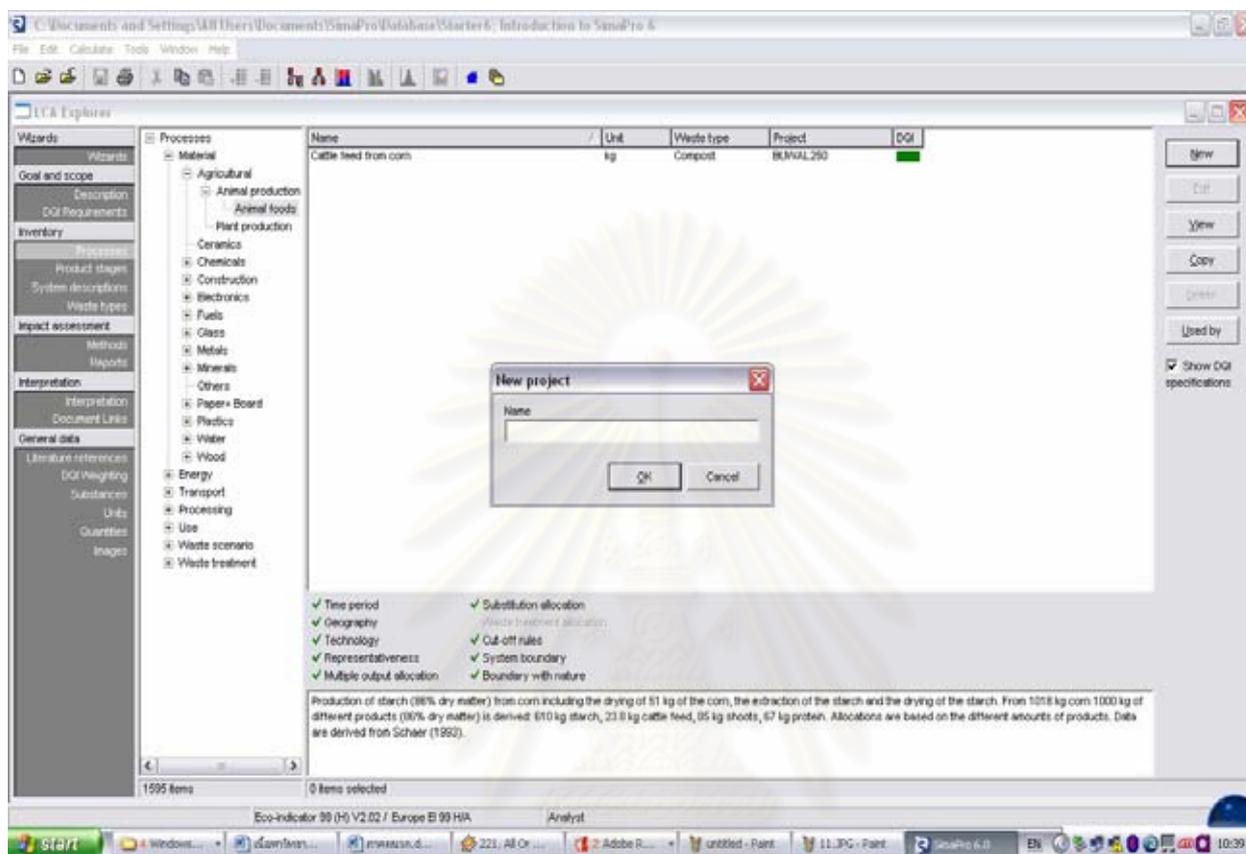
วิธีการเข้าโปรแกรม SimaPro 6 มีดังต่อไปนี้

1. เข้าสู่หน้าจอ Window เลือกปุ่ม START เลือก Programs → SimaPro 6 ดังรูป ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงขั้นตอนการเข้าโปรแกรม SimaPro 6

2. คลิก New เพื่อสร้าง Project ใหม่ ดังรูป ข.2



รูป ข.2 แสดงการสร้าง project ใหม่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่ Work Sheet แล้วจึงใส่ข้อมูลเกี่ยวกับ Project ดังรูปที่ ข.3

The screenshot shows the SimaPro 6 LCA Explorer software interface. The window title is "C:\Documents and Settings\All Users\Documents\Simapro\Database\Starter6; Introduction to Simapro 6". The interface is divided into a sidebar on the left and a main content area on the right. The sidebar contains several sections: "Wizards", "Goal and scope", "Inventory", "Impact assessment", and "General data". The main content area displays a form with the following fields and values:

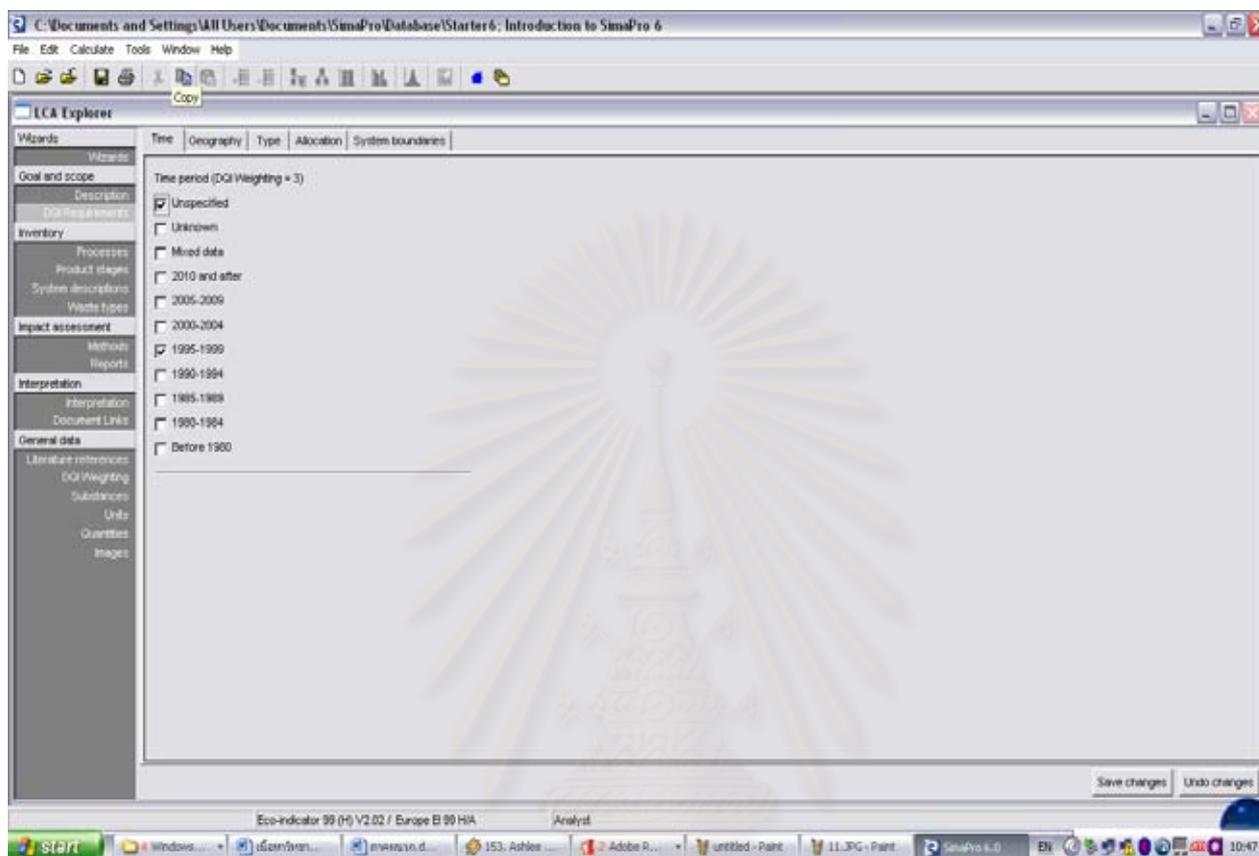
- Date: 2011/0002
- Author: Mark Goodhope, PRiE Consultants
- Comment: This is a fictional comparison between two types of coffee machines for household use. It is a simplified example intended to show the features of Simapro 6. The same example is also used in the Guided Tour script. A description can be found in the demo and user manuals.
- Impact assessment: Two different coffee machines (filter type) are analysed. The housing of coffee machine "model Sima" is made of plastic and uses a glass jug. It has a heating element to keep to coffee hot. Coffee machine "model Pro" is made of extruded aluminium parts and uses a thermos jug to keep the coffee warm. Filter and coffee consumption is not included, as we assume these parameters cannot be influenced by the designer.
- LCA type: Unspecified
- Goal: [Empty field]
- Reason: [Empty field]
- Commissioner: [Empty field]
- Interested party: [Empty field]
- Practitioner: [Empty field]
- Functional unit: The main function of a coffee machine is to produce coffee and keep it hot for a period of time. It is however under

At the bottom of the window, there are buttons for "Save changes" and "Undo changes". The taskbar at the bottom shows the Windows Start button, several open applications, and the system clock showing 10:41.

รูปที่ ข.3 แสดงการป้อนข้อมูลในส่วนของรายละเอียด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

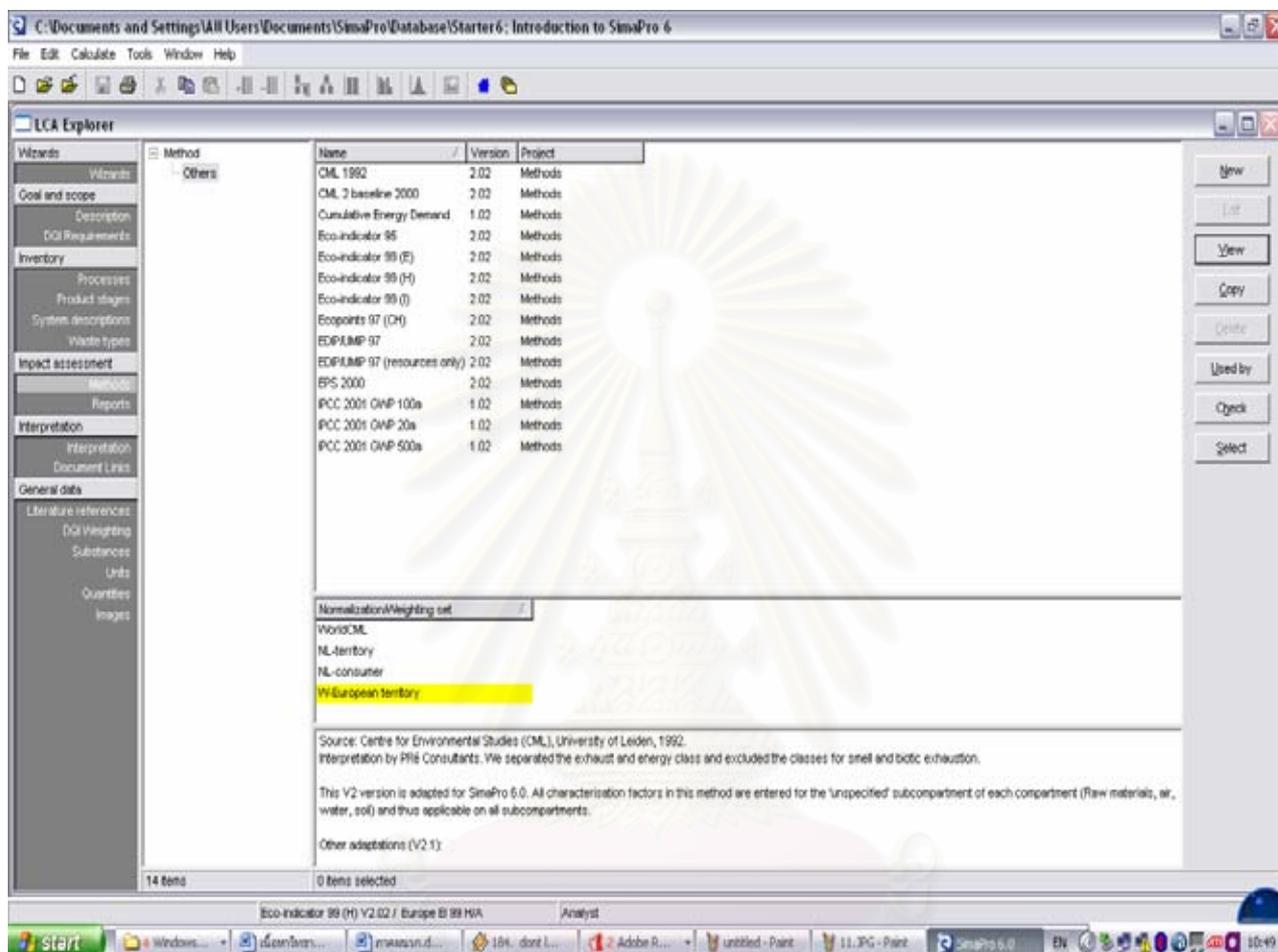
4. ป้อนข้อมูลในส่วนของ DQI Requirement ดังรูปที่ ข.4



รูป ข.4 แสดงการป้อนข้อมูลใน DQI Requirement

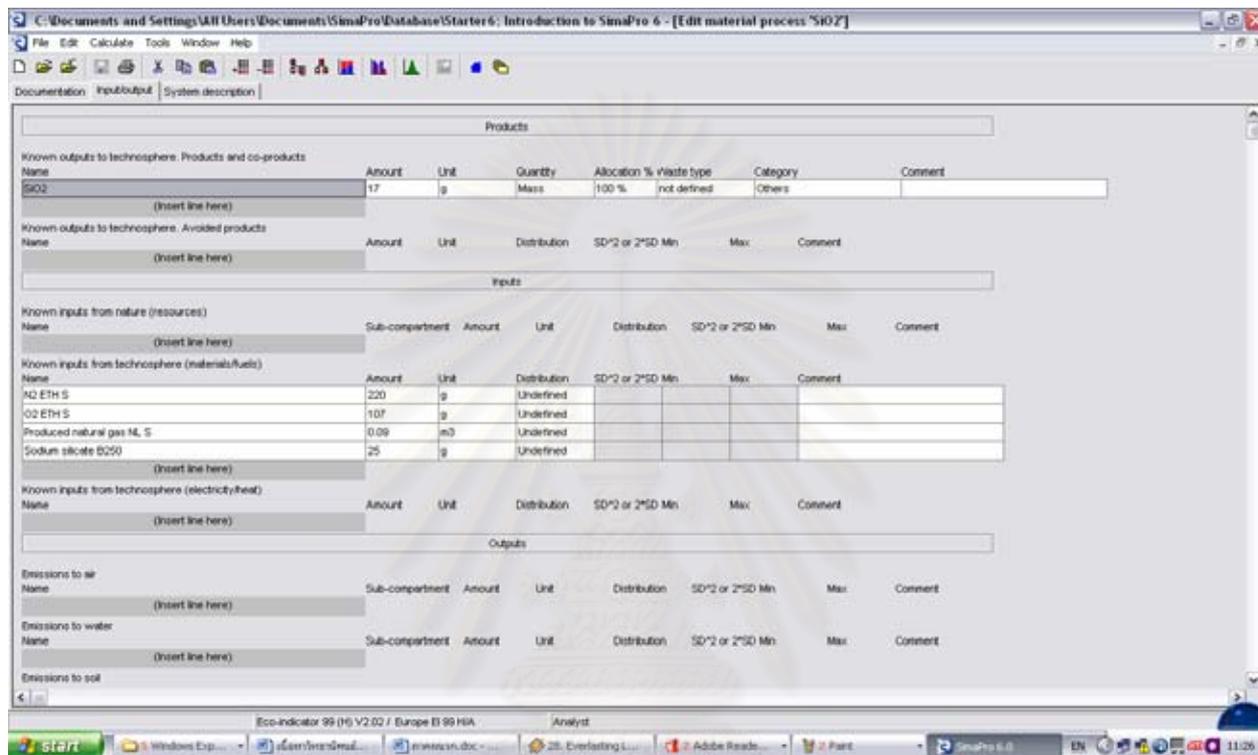
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. จากนั้นเลือกวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ Project โดยการเลือก Method ซึ่งคำอธิบายของแต่ละวิธีจะอยู่ที่ส่วนล่างของ Work Sheet ดังรูป ข.5



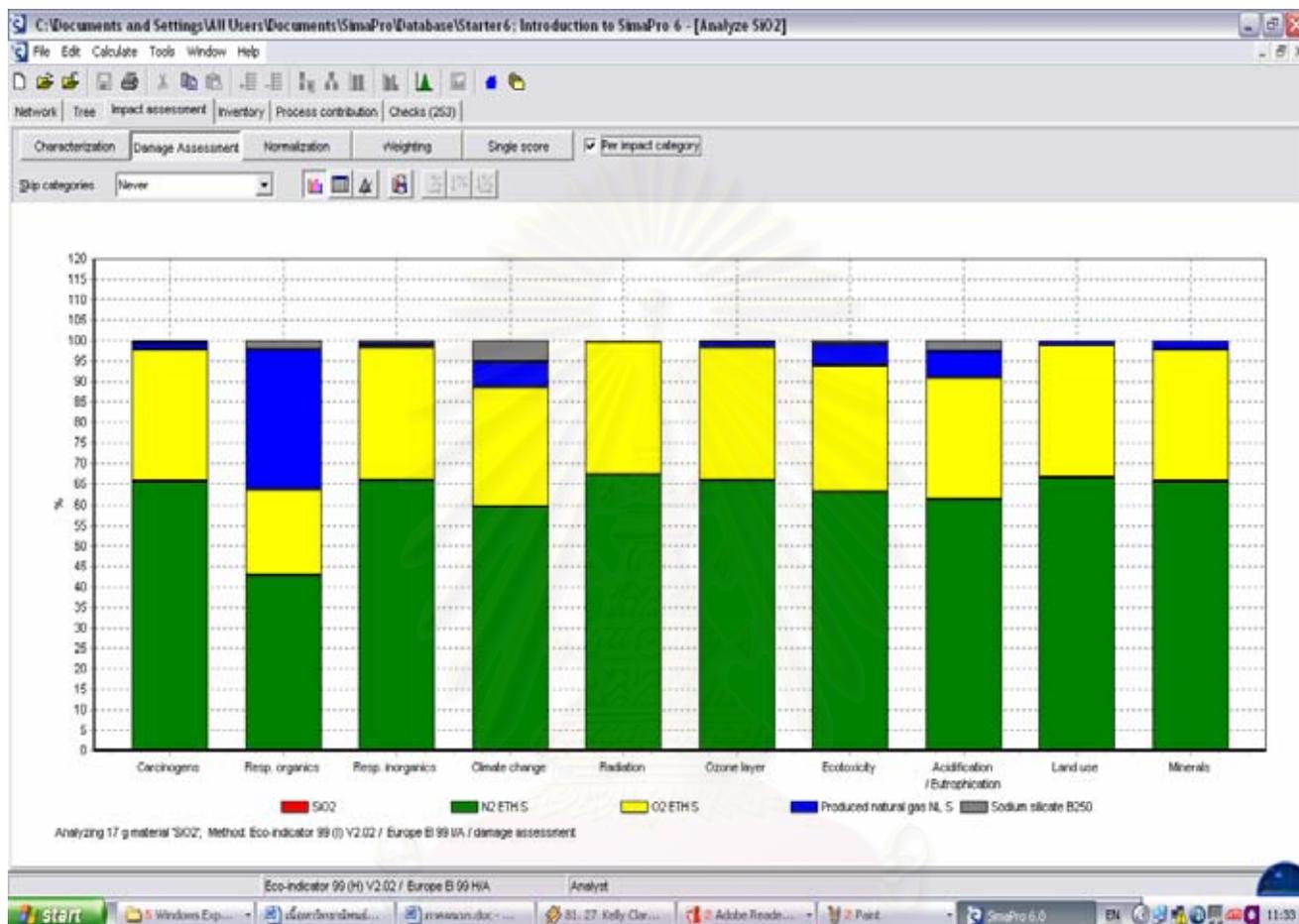
รูปที่ ข.5 แสดงการเลือก Method ที่ใช้ใน Project

6. จากนั้นเลือก Inventory → Process แล้วเลือก Category ที่เหมาะสมกับ Project จากนั้นคลิก New เพื่อสร้าง Process แล้วทำการป้อนข้อมูลในส่วนของ Process ที่นำมาใช้ใน Project ดังรูปที่ ข.6



รูปที่ ข.6 แสดงการเลือก Method ที่ใช้ใน Project

7. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้แสดงผล LCA โดยคลิกที่ปุ่ม Analyze ซึ่งโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ข้อมูล Project ภายใต้อิทธิพลที่เลือกใช้ในทีนี้คือ Eco-indicator 99 ดังรูป ข.7



รูปที่ ข.7 แสดงการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม SimaPro 6

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจันทนภา สหุนิต เกิดวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดบุรีรัมย์
สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมีที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย