การประเมินรวมความเสี่ยงและการประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับการประเมินการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์

นางสาววารุณี มุสิกชาติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2953-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INCORPORATION OF RISK ASSESSMENT AND LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR EVALUATION OF CARBON NANOTUBE PRODUCTION

Miss Warunee Musikchat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2005

ISBN 974-53-2953-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินรวมความเสี่ยงและการประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับการประเมินการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์
โดย	นางสาววารุณี มุสิกชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.จุงใจ ปั้นประณต)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารุณี มุสิกชาติ: การประเมินรวมความเสี่ยงและการประเมินวัฏจักรชีวิตสำหรับการประเมินการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์. (INCORPORATE OF RISK ASSESSMENT AND LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR EVALUATION OF CARBON NANOTUBE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร.สุรเทพ เขียวหอม 66 หน้า. ISBN 974-53-2953-3.

งานวิจัยนี้ทำการประเมินหากระบวนการที่เหมาะสม ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น (MWNTs) ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี Chemical Vapor Deposition(CVD) โดยการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, การประเมินความเสี่ยงและการพิจารณาต้นทุนการผลิต การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนการสกัดวัตถุดิบ, ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิต MWNTs กระบวนการ CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNTs เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณมาก งานวิจัยนี้ได้ประเมินกระบวนการ CVD 3 แบบ ที่มีการใช้สารตั้งต้นและคะตะลิสต์ที่ต่างกัน คือ การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนและเหล็กบนอะลูมินา, อะเซทิลีนและเหล็กกับโคบอลต์บนแคลเซียมคาร์บอเนต และอะเซทิลีนและโคบอลต์กับโมลิบดีนัมบนแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่า การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนเป็นสารตั้งต้นและใช้เหล็กบนอะลูมินาเป็นคะตะลิสต์ มีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการผลิตอีเทนและอลูมินา และเป็นกระบวนการที่มีความเสี่ยงน้อยที่สุด เนื่องจากเกิด $FeCl_3$ และ $KAL(OH)_4$ ที่เป็นอันตรายน้อยกว่าอีก 2 กระบวนการ สำหรับขั้นตอนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด คือ การเตรียมคะตะลิสต์ที่มีโอกาสปล่อยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมา อีกทั้งกระบวนการนี้ยังมีค่าใช้จ่ายจากต้นทุนของสารเคมีต่ำที่สุดอีกด้วยดังนั้น กระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนเป็นสารตั้งต้นและใช้เหล็กบนอะลูมินาเป็นคะตะลิสต์ จึงเป็นกระบวนการที่มีความเหมาะสมในการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรมมากที่สุด เมื่อประเมินจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, ความเสี่ยงและต้นทุนการผลิต กระบวนการนี้สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ 20 กรัมต่อกรัมของคะตะลิสต์ต่อชั่วโมง MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 นาโนเมตร ความบริสุทธิ์ 95-98%

ภาควิชา..วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....วารุณี มุสิกชาติ.....

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

ปีการศึกษา...2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....สุรเทพ เขียวหอม.....

#4770450021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: CARBON NANOTUBE/ CHEMICAL VAPOR DEPOSITION/ ENVIRONMENTAL IMPACT/ RISK ASSESSMENT/ EMERGING TECHNOLOGY

WARUNEE MUSIKCHAT: INCORPORATE OF LIFE CYCLE ASSESSMENT AND RISK ASSESSMENT FOR EVALUATION OF CARBON NANOTUBE PRODUCTION. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.CHAIRIT SATAYAPRASERT, Ph.D., THESIS COADVISOR: SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D. 66 pp. ISBN 974-53-2953-3.

Objective of this work is to assess for environmental impacts, risk and economic factor in order to select a suitable process of multiwalled-carbon nanotube (MWNTs) production by chemical vapor deposition (CVD) process. The environmental impacts are quantified using life cycle assessment technique starting from raw material extraction stage, raw material production stage and production of MWNTs stage. CVD is preferable for synthesizing MWNTs because the CVD process is not complicated and has high yield. In this work, we consider three CVD process with different raw material and catalyst; synthesize by using ethane and iron on alumina, acetylene and iron-cobalt on calcium carbonate and acetylene and cobalt-molybdenum on magnesium oxide. Production of MWNTs by ethane as carbon source and iron on alumina as catalyst has minimum effect on human health, ecosystem quality and depletion of resources. Most of the effect is due to the production of ethane and alumina. The emission from this process are mainly comprised of $FeCl_3$ and $KAl(OH)_4$, which have less toxicity compared to emission from other processes. Preparation of catalyst has the most risk because it emits nitrogen dioxide gas. Moreover, this process is economic attractive. Thus, production of MWNTs by ethane as carbon source and iron on alumina as catalyst is the most suitable process for large scale commercialization in environmental impacts, human health risk and economic view points. This process can produce MWNTs 20 gram per gram of catalyst per hour. Diameter of MWNTs is 40 nm and purity of 95-98%.

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....วารุณี มสิกชาติ.....

Field of study.....Chemical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year..2005..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และอาจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิไลวรรณ ถิรวณิชย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิวรรณ โชติพฤกษ์ และอาจารย์ ดร.จูงใจ ปั้นประณต ในฐานะคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ช่วยเป็นกำลังใจในระหว่างการศึกษาจนสำเร็จได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…….…….. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..…….. จ

กิตติกรรมประกาศ…… ฉ

สารบัญ…… ช

สารบัญภาพ…….. ฌ

สารบัญตาราง…… ฎ

บทที่ 1 บทนำ…… 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา…… 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย……... 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย…….. 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ……... 2

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย…….. 3

1.6 เนื้อหาในแต่ละบท…… 3

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง…… 5

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง…… 5

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต……. 10

2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์……... 16

บทที่ 3 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น…..……. 22

3.1 การสังเคราะห์ MWNTs โดย CVD1……. 25

3.2 การสังเคราะห์ MWNTs โดย CVD2……. 27

3.3 การสังเคราะห์ MWNTs โดย CVD3……. 28

3.4 การประมาณข้อมูลให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกัน……... 30

บทที่ 4 การประเมินวัฏจักรชีวิต…… 32

4.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ MWNTs…… 34

4.2 สรุปผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ MWNTs…… 38

บทที่ 5 ความเสี่ยง…….…….. 41

5.1 การประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตราย……. 41

5.2 ผลตอบแทนที่คาดหวังและความเสี่ยง……..……. 49

หน้า

บทที่ 6 สรุป…….. 58
6.1 การสังเคราะห์ MWNTs……... 58
6.2 ข้อเสนอแนะ.....…… 59
รายการอ้างอิง…… 60
ภาคผนวก…… 62
โปรแกรม SimaPro6.0…….. 63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์…… 66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า
1 แสดงจำนวนงานวิจัยที่มีหัวข้อเกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์..... 6
2 ผลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณการสังเคราะห์ MWNTs..... 7
3 ผลของตำแหน่งของถ้วยเซรามิกในเครื่องปฏิกรณ์..... 7
4 แสดงวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์..... 11
5 แสดงโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของคาร์บอน..... 17
6 แสดงวงแหวนของคาร์บอนที่จับกันเป็นวงแหวนห้าเหลี่ยมและเจ็ดเหลี่ยม..... 18
7 แสดงภาพ TEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่โค้งงอ..... 18
8 โครงสร้างขดสปริงของคาร์บอนนาโนทิวบ์..... 19
9 โครงสร้างโดนัทของคาร์บอนนาโนทิวบ์..... 19
10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่าง ๆ..... 20
11 แสดงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีอาร์กดิสชาร์จ..... 22
12 แสดงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์..... 23
13 แสดงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีอิเล็กโตรไลซิส..... 24
14 แสดงการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยวิธี CVD..... 24
15 แผนภาพการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD..... 25
16 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนและเหล็กบนอะลูมินา (CVD1)..... 26
17 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและเหล็กกับโคบอลต์บนแคลเซียมคาร์บอเนต (CVD2)..... 28
18 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและโคบอลต์กับโมลิบดีนัมบนแมกนีเซียมออกไซด์ (CVD3)..... 29
19 แสดงขอบเขตในการประเมินวัฏจักรชีวิต..... 32
20 แสดงผลกระทบในด้านต่าง ๆ ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 สำหรับการผลิต MWNTs 1 กรัม ใน 1 ชั่วโมง..... 34
21 แสดงผลกระทบใน 3 ด้านหลัก ๆ ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 สำหรับการผลิต MWNTs 1 กรัมใน 1 ชั่วโมง..... 35
22 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD1..... 35
23 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD2..... 36
24 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD3..... 36
25 แสดงผลระทบของการสังเคราะห์ MWNTs 1..... 37

ภาพประกอบ หน้า

26 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs2……..…..…… 37
27 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs3……..…… 38
28 แสดงการป้อนสารเคมีแก่หนูทดลอง(Oral rat)…..…… 44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1 แสดงผลของคะตะลิสต์ต่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้..…….…….. 8

2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท…..…….. 12

3 แสดงข้อมูลของการสังเคราะห์ทั้ง 3 วิธี ใน 1 การทดลอง…….. 30

4 แสดงข้อมูลที่ได้ทำการประมาณให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกันที่การสังเคราะห์ MWNTs ปริมาณ 1 กรัม…….…….. 31

5 แสดงข้อมูลสำหรับป้อนลงในโปรแกรม SimaPro6.0…….…….. 32

6 แสดงค่ามาตรฐานด้านความปลอดภัยของสารเคมีต่าง ๆ ที่ปล่อยออกจากกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs …….…….. 47

7 แสดงต้นทุนคงที่ในการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการCVD …….. 52

8 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ CVD ทั้ง 3 ต่อการสังเคราะห์ MWNTs 1 กรัม…….. 53

9 แสดงค่าไฟฟ้าของการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD ทั้ง 3 กระบวนการ….. 54

10 แสดงค่าใช้จ่ายต่อการสังเคราะห์ MWNTs 1 กรัม…….…….. 54

11 แสดงราคาและคุณสมบัติของ MWNTs จากบริษัทต่าง ๆ……. 55

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมกำลังเผชิญหน้ากับภาวะการแข่งขันสูง และกฎหมายหรือกฎระเบียบต่าง ๆ ซึ่งเข้มงวดมากขึ้น เทคโนโลยีสมัยใหม่เป็นกุญแจสำคัญในการเอาชนะความท้าท้ายเหล่านี้ การพัฒนากระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือการนำเทคโนโลยีใหม่ไปใช้งานนั้นจำเป็นต้องพิจารณาในหลาย ๆ มิติด้วยกัน ความต้องการของตลาดเป็นสิ่งสำคัญที่ชี้ถึงโอกาสในการผลิตและปริมาณการผลิต ในการผลิตต้องเลือกกระบวนการที่มีต้นทุนที่เหมาะสมและมีความเสี่ยงต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการผลิต, ผลิตภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์พลอยได้ควรจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยอีกด้วย

การขยายการสังเคราะห์หรือการผลิตผลิตภัณฑ์ จากห้องปฏิบัติการสู่ระดับอุตสาหกรรมนั้น มีปัจจัยที่จะต้องวิเคราะห์และพิจารณามากมาย เช่น การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์, การขยายกำลังการผลิต, ความต้องการของตลาด, ต้นทุนการผลิต, การประเมินความเสี่ยงและการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนากรอบการทำงาน ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์และประเมินความเป็นไปได้ของการนำเทคโนโลยีใหม่ไปใช้งาน รวมทั้งประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดขึ้นตามมาในอนาคต

การพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จะใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) มาใช้ในการประมาณค่าของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม และพิจารณาความเสี่ยง (Risk assessment) ในการผลิตและความเป็นพิษของสารเคมีต่างๆ (Toxicity) ที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมทั้งพิจารณาต้นทุนในการผลิตร่วมด้วย โดยจะทำการประเมินกระบวนการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น (MWNTs)

เหตุผลสำคัญในการเลือกคาร์บอนนาโนทิวบ์มาทำการประเมินในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ และศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ อันเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวที่มีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงที่สุด, มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง, มีพื้นที่ผิวมาก เป็นต้น จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย อาทิเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิก, หลอดทดลองขนาดนาโน, ตัวจ่ายอิเล็กตรอน,

ส่วนประกอบในวัสดุผสม, ตัวเก็บไฮโดรเจน, ตัวเก็บประจุ, ขั้วแบตเตอรี่และจอภาพ เป็นต้น ซึ่งในอนาคตอันใกล้นี้ คาดว่าจะมีการขยายกำลังการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรมจำนวนมาก นักวิจัยพบว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) สามารถสังเคราะห์และควบคุมการผลิต MWNTs ให้ได้ตามต้องการในระดับหนึ่ง วิธี CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNTs เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก มีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยวิธี CVD ซึ่งในที่นี้จะยกผลงานวิจัยที่สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณมาก มาทำการพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์, ความเป็นสารพิษของสารเคมี และทำการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการที่อาจมีการหลุดลอดของสารเคมี เพื่อกำหนดมาตรการความปลอดภัย รวมทั้งพิจารณาถึงต้นทุนการผลิต เพื่อเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ MWNTs สำหรับความเป็นพิษนั้นจะใช้ค่า LD_{50}, LC_{50}, TLV-TWA และ TLV-STEL เป็นดัชนีชี้วัดอันตรายของสารเคมี และใช้ Eco-indicator99 เป็นดัชนีชี้วัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ โดยใช้โปรแกรม SimaPro 6.0 ทำการวิเคราะห์และแสดงผล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ประเมินความเป็นไปได้ของการขยายการผลิต MWNTs สู่ระดับอุตสาหกรรม โดยการประเมินวัฏจักรชีวิต, การประเมินความเสี่ยงและการพิจารณาต้นทุนการผลิต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิต, การประเมินความเสี่ยงและการพิจารณาต้นทุนการผลิตของการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการCVD 3 แบบ คือ การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนและเหล็กบนอะลูมินา, การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและเหล็กกับโคบอลต์บนแคลเซียมคาร์บอเนต และการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและโคบอลต์กับโมลิบดีนัมบนแมกนีเซียมออกไซด์ เพื่อหากระบวนการที่มีความเหมาะสมที่สุดในการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้กระบวนการที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ MWNTs ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย, มีความเสี่ยงน้อยและมีต้นทุนต่ำ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์
2. ศึกษาข้อดีของการสังเคราะห์แต่ละวิธี
3. ศึกษาข้อมูลของการสังเคราะห์ MWNTs โดยวิธี Chemical vapor deposition
4. ศึกษาการใช้โปรแกรม SimaPro 6.0 และทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ MWNTs
5. หาราคาสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์
6. ทำการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการ
7. วิเคราะห์หาวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ MWNTs
8. สรุปผลและจัดทำรายงานผลการวิจัย

1.6 เนื้อหาในแต่ละบท

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ในส่วนแรกกล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวถึงเทคโนโลยีใหม่โดยเฉพาะนาโนเทคโนโลยี, การสังเคราะห์ MWNTs, การประเมินวัฏจักรชีวิต, การประเมินความเสี่ยง, พิษของคาร์บอนนาโนทิวบ์ และส่วนที่สองกล่าวถึงความหมายและหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต, โปรแกรม SimaPro สุดท้ายกล่าวถึง โครงสร้าง, คุณสมบัติและประโยชน์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

บทที่ 3 การสังเคราะห์ MWNTs ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการต่าง ๆ และกระบวนการ CVD ที่เลือกมาทำการประเมิน รวมทั้งการประมาณข้อมูลให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกัน

บทที่ 4 การประเมินวัฏจักรชีวิต ในช่วงแรกเป็นข้อมูลที่ใช้ในการป้อนสู่โปรแกรม SimaPro ส่วนที่สอง คือ ผลจากโปรแกรม โดยแสดงผลเป็นกราฟเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 และผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ พร้อมทั้งสรุปผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs

บทที่ 5 ความเสี่ยง ในบทนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตรายว่าสารที่ปล่อยออกมามีความเป็นพิษมากน้อยขนาดใดและปล่อยออกมา ณ จุดใดของกระบวนการ เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันอันตราย ส่วนที่สอง คือ การวิเคราะห์

ผลตอบแทนที่คาดหวังและความเสี่ยงในเชิงธุรกิจอธิบายถึงต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน เพื่อนำใช้ในการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนของโครงการ จากนั้นได้แสดงถึงต้นทุนคงที่ของกระบวนการ CVD และต้นทุนแปรผันของสารตั้งต้นและค่าไฟฟ้าของการสังเคราะห์ MWNTs ต่อกรัม ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 พร้อมทั้งแสดงการคำนวณหาจุดคุ้มทุนของกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำที่สุด สุดท้ายจึงสรุปกระบวนการที่มีความน่าสนใจในการลงทุน

บทที่ 6 สรุป บทนี้ได้สรุปว่ากระบวนการใดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด, มีความเสี่ยงน้อยที่สุดและมีต้นทุนต่ำ เหมาะสมในการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม และข้อเสนอแนะของการทำวิจัยครั้งนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

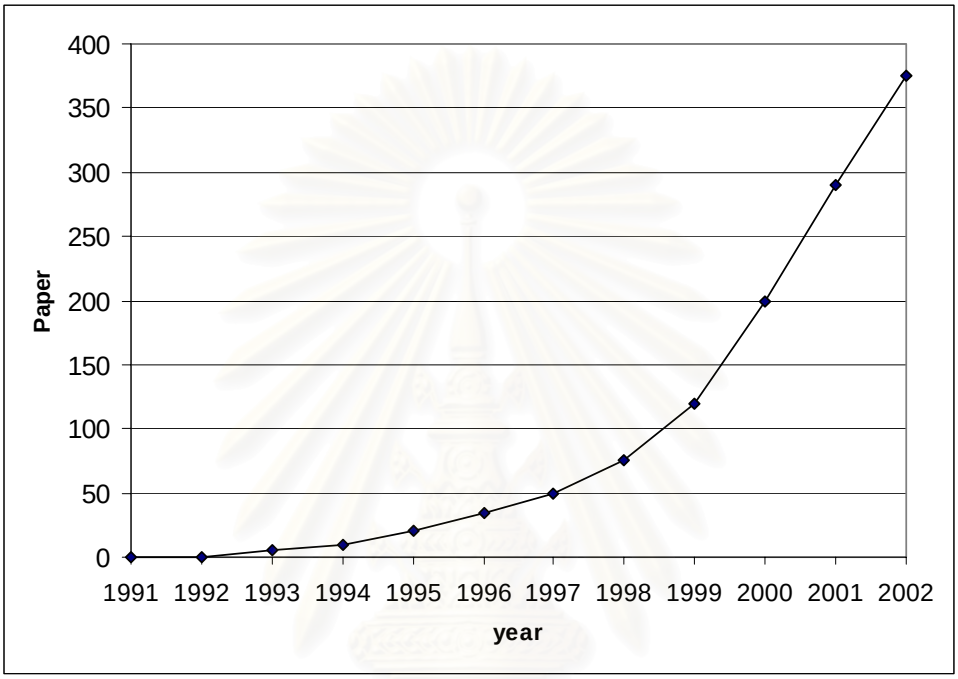
บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก คือ นาโนเทคโนโลยี มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีออกมามากมาย ภาคอุตสาหกรรมเองเริ่มมีการลงทุนในด้านนี้เพิ่มขึ้นอย่างมาก นวัตกรรมใหม่หรือเทคโนโลยีใหม่เป็นตัวแปรสำคัญในการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจของแต่ละชาติ ในปี ค.ศ. 2005 Bhat ได้อธิบายถึงปัจจัยต่างๆ ที่จะต้องคำนึงในการเริ่มลงทุนกับเทคโนโลยีใหม่ (Bhat, ค.ศ. 2005) นาโนเทคโนโลยีกำลังเป็นที่สนใจของรัฐบาล, อุตสาหกรรมต่าง ๆ ในหลายประเทศ วัสดุนาโนใหม่ ๆ ได้ถูกคิดค้นขึ้นและถูกใช้งานในลักษณะที่มีความจำเพาะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญทางการตลาด Bhat กล่าวว่าสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงในการเริ่มลงทุนคือ การวิเคราะห์ถึงโอกาส (Opportunity Identification) ซึ่งจะเป็นตัวนำในการคิดค้นวิธีการหรือกระบวนการที่จะได้มา (Resource identification) ก่อนที่จะเริ่มต้นโครงการ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงในอีกหลายด้าน เช่น ประสบการณ์ที่ผ่านมาก่อนเริ่มโครงการ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะมองเห็นถึงโอกาสทางธุรกิจ โดยส่วนใหญ่บริษัททั่วไปจะมีผู้เชี่ยวชาญที่ได้ศึกษาในเรื่องนั้น ๆ เป็นผู้ร่วมเริ่มโครงการด้วย, ความสำเร็จทางการค้า เช่น งานทางด้านไบโอเทคโนโลยีและการเติบโตของอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ เป็นตัวชี้ว่ามีผลตอบรับที่ดีจากนาโนเทคโนโลยี จึงทำให้ทั้งภาครัฐและเอกชนสนใจที่จะลงทุน, ความคิดสร้างสรรค์หรือการคิดที่ต่างออกไป จะให้ข้อมูลในการนำนาโนเทคโนโลยีไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสร้างความน่าสนใจให้อย่างมาก นอกจากนี้ยังมีเรื่องของการลงทุน ควรมีต้นทุนที่ต่ำ, ความร่วมมือกันของบริษัทกับสถาบันทางการศึกษา เพื่อให้คำแนะนำในช่วงแรกและการให้คำแนะนำแก่ลูกค้าในการนำเทคโนโลยีใหม่ไปใช้

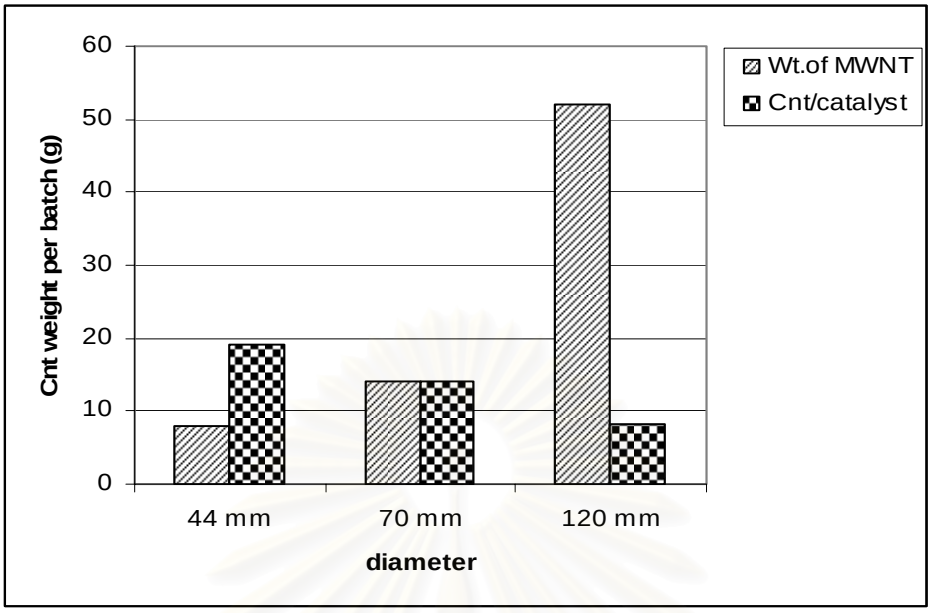
พลวัตของการเกิดเทคโนโลยีใหม่(Rutger and Harro, ค.ศ. 2005) หรือการติดตามสิ่งที่เกิดขึ้นในเทคโนโลยีใหม่ ในปี ค.ศ. 2005 Rutger and Harro ได้เสนอกรอบการทำงาน 3 ขั้นที่มีความสัมพันธ์กัน คือ ระดับของการวิจัย, ภาคเทคโนโลยีและสังคม เทคโนโลยีเป็นส่วนหนึ่งของเศรษฐกิจและสังคม การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีจึงมีผลกระทบต่อสังคม นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังเป็นที่สนใจ และจะกลายเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในอนาคต มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ออกมามากมายดังรูปที่ 1 Rutger and Harro ได้กล่าวถึงประโยชน์และการใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวบ์ว่า ในระดับสังคมมีการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เพิ่มความแข็งแรงในชิ้นส่วน

รถยนต์และไม้เทนนิส และใช้เป็นส่วนประกอบของหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ ส่วนในภาคเทคโนโลยีจะใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอนในจอภาพ สำหรับระดับการวิจัยมีหลายห้องปฏิบัติการที่พยายามสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มีคุณภาพที่ดีเหมาะที่จะใช้เป็นส่วนประกอบในหน่วยความจำ

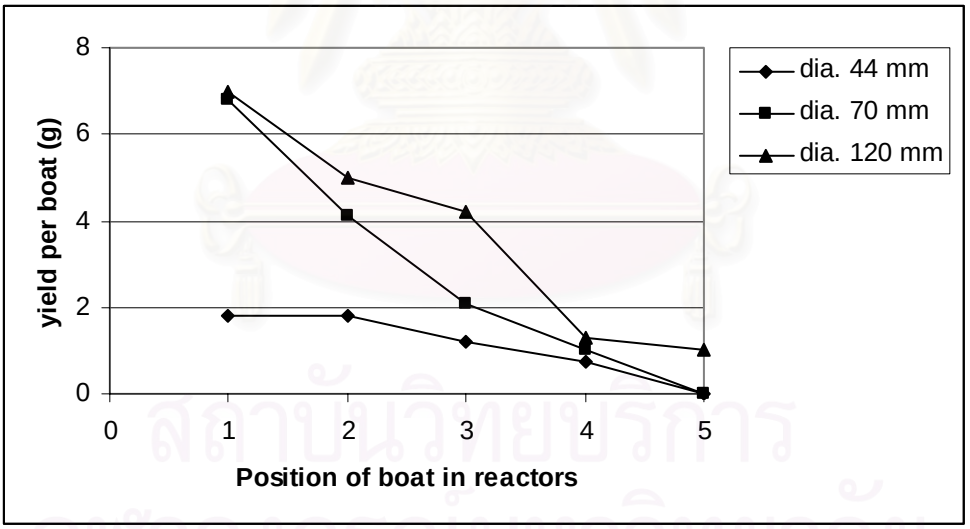


รูปที่ 1 แสดงจำนวนงานวิจัยที่มีหัวข้อเกี่ยวข้องกับคาร์บอนนาโนทิวบ์

วิธีการสังเคราะห์ MWNTs ที่เหมาะสมที่สุดคือ Chemical Vapor Deposition (CVD) (Zeng และคณะ, ค.ศ. 2002) โดย Zeng ได้ทำการทดลองวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ MWNTs เมื่อสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาด 44 มม. สามารถสังเคราะห์ได้ 7-8 กรัม แต่เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาด 120 มม. สามารถสังเคราะห์ได้ 20 กรัม ภายใต้สภาวะเดียวกัน ดังนั้นการสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเล็กจึงมีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2 สำหรับตำแหน่งของคะตะลิสต์ ถ้าวางถ้วยเซรามิก(ซึ่งบรรจุคะตะลิสต์ไว้ภายใน) ไว้ใกล้ ๆ กับตำแหน่งป้อนสารเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะให้ปริมาณการสังเคราะห์มากกว่าที่วางไว้ไกล ๆ ดังรูปที่ 3 สุดท้ายพิจารณาชนิดของคะตะลิสต์และสารตั้งต้น พบว่า ชนิดของคะตะลิสต์และสารตั้งต้นนั้นมีความจำเพาะในการสังเคราะห์ เช่น เมื่อใช้อะเซทิลีนเป็นสารตั้งต้น ร่วมกับการใช้เหล็กเป็นคะตะลิสต์จะให้ผลดีกว่าการใช้นิเกิล ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ผลของขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อปริมาณการสังเคราะห์ MWNTs



รูปที่ 3 ผลของตำแหน่งของถ้วยเซรามิกในเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 1 แสดงผลของคะตะลิสต์ต่อปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้

Sorts of catalyst	Diam. of reactor (mm)	Catalyst quantity per batch (g)	Yield of MWNTs acetylene (g)	Yield of MWNTs ethane (g)
Ni-based	44	0.4	2.6	8.4
Fe-based	44	0.4	5.8	4.3
Fe-and Ni-based	44	0.4	7.5	5.2

ในปี ค.ศ. 2002 Nagaraju ได้ทำการศึกษาถึงผลของตัวรองรับโลหะคะตะลิสต์(เหล็กและโคบอลต์) 2 ชนิด คือ อะลูมินาและซิลิกอนไดออกไซด์ (Nagaraju และคณะ, ค.ศ. 2002) ซึ่งเตรียมขึ้นด้วยวิธีการต่าง ๆ แหล่งให้คาร์บอนคือ ก๊าซอะเซทิลีนและใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซตัวพา พบว่าการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีคุณภาพดีและได้ปริมาณมากนั้น ได้จากการใช้ตัวรองรับอะลูมินาซึ่งเตรียมจาก Aluminum Isopropoxide (Al_2O_3(P)) โดยมีคะตะลิสต์ 2 ชนิดผสมกัน คือเหล็กและโคบอลต์ โดยมีอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ 700 องศาเซลเซียส

ในปี ค.ศ. 2002 Chen ได้ทำการศึกษาถึงการทำคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้บริสุทธิ์(Chen และคณะ, ค.ศ.2002) MWNTs ที่ใช้ในการทดลองนี้สังเคราะห์ด้วยวิธี CVD โดยใช้นิเกิลบนแมกนีเซียมออกไซด์เป็นคะตะลิสต์ การทำให้บริสุทธิ์ประกอบด้วยกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ การล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร, กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร เพื่อกำจัดโลหะและโลหะออกไซด์ออกไป ขั้นตอนสุดท้าย คือการ Calcine ในอากาศที่อุณหภูมิ 510 องศาเซลเซียส การทำให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทั้ง 3 ขั้นนี้ ทำให้ได้ MWNTs ทีมีความบริสุทธิ์มากกว่า 96%โดยน้ำหนัก โดยที่ไม่เป็นการทำลายโครงสร้างของ MWNTs

ในปี ค.ศ. 2005 Mullerได้ทำการศึกษาถึงความเป็นพิษในหนูทดลอง เมื่อหายใจเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์เข้าไป(Muller และคณะ, ค.ศ. 2005) โดยให้หนูได้รับ MWNTs ในปริมาณต่าง ๆ (0.5, 2 หรือ 5 มิลลิกรัม) ซึ่งพบว่า ในระยะเวลา 60 วัน หนูเกิดอาการปอดอักเสบและเกิดเป็นแผลเป็นภายในเนื้อปอด และมีการสร้างสารต่อต้าน (TNF-α ซึ่งเป็นสารที่ร่างกายจะสร้างขึ้นเมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่ร่างกาย) ขึ้นที่ปอดของสัตว์ทดลอง และจากการทดลองในหลอดทดลอง พบว่ามีการสร้างสารต่อต้านในปริมาณมากโดย Macrophages จากผลการทดลองนี้ เขาได้สรุปว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์ จึงควรมีระบบการจัดการที่ดีในระหว่างการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

มีนักวิจัยหลายท่านกล่าวว่าการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment, EIA) แตกต่างจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (LCA) แต่ในปี ค.ศ.2000

Tukker ได้อธิบายในทางกลับกัน โดย LCA เป็นกรอบการทำงานของการประเมินค่าด้านสิ่งแวดล้อม ส่วน EIA เป็นแนวทางการปฏิบัติมากกว่าเป็นเครื่องมือ (Tukker, ค.ศ. 2000) EIA เป็นส่วนสำคัญสำหรับการเปรียบเทียบความเหมาะสมของการเปลี่ยนแปลง, ความต้องการการจัดการระบบที่รวมเป็นผลกระทบทั้งหมด จากการรวบรวมกรณีศึกษาทั้ง 5 แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้บางส่วนของ LCA ใน EIA

ในปี ค.ศ. 2001 Olsen กล่าวว่าการประเมินวัฏจักรชีวิตและการประเมินความเสี่ยง (RA) เป็นเครื่องมือที่ต่างกันในการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม(Olsen และคณะ, ค.ศ. 2001) Olsen ชี้ถึงความคล้ายคลึงกัน, ความขัดแย้ง และความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือทั้ง 2 โดยยกตัวอย่างจากหลัก RA ของ European Commission (EC) และ วิธี LCA ของ Environmental Design of Industrial Products (EDIP) ซึ่งพัฒนาขึ้นในเดนมาร์ค ลักษณะเฉพาะของ LCA คือการประเมินความสัมพันธ์ของการใช้ในแต่ละหน่วย ในทางตรงกันข้าม, RA เป็นการประเมินอย่างสมบูรณ์ ซึ่งต้องการค่าเฉพาะและรายละเอียด เช่น สภาพการปล่อย เขาสรุปว่าหลักการและจุดประสงค์ของทั้ง 2 วิธีแตกต่างกัน แต่ก็มีที่เหมือนกันคือการได้รับผลดีจากอีกวิธีและสนับสนุนอีกวิธีในการหาผลกระทบทั้งหมดที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

มีงานวิจัยที่นำเอาการประเมินวัฏจักรชีวิต และการประเมินความเสี่ยงมาใช้ประเมินร่วมกัน ในปี ค.ศ. 2002 โดย Nishioka ได้ทำการประเมินการเพิ่มฉนวนกันความร้อนในที่พักอาศัยโดยรวมการประเมินวัฏจักรชีวิตและการประเมินความเสี่ยง (Nishioka และคณะ, ค.ศ. 2002) การเพิ่มฉนวนกันความร้อนสามารถลดการใช้พลังงานและมีผลดีต่อสุขภาพ, มีการปล่อยมลพิษจากการเผาเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป, แต่ก็มีการใช้ต้นทุนเพิ่มขึ้น การประเมินความเสี่ยงและการประเมินวัฏจักรชีวิตสามารถใช้คำนวณผลกระทบสุทธิและมีผลต่อทั้ง กฎระเบียบด้านพลังงานที่เข้มงวดมากขึ้น หรือการรับรองนโยบายการอนุรักษ์พลังงาน Nishioka นำเสนอการวิเคราะห์แบบรวมการประเมินวัฏจักรชีวิตและการประเมินความเสี่ยง โดยมีจุดประสงค์ในการประมาณผลกระทบต่อสุขภาพสุทธิของการเพิ่มฉนวนกันความร้อนในที่พักอาศัย สำหรับการสร้างที่พักใหม่จากหลักเกณฑ์การอนุรักษ์พลังงานระดับนานาชาติล่าสุด เขาทำการอภิปรายวิธีการคำนวณแบบวัฏจักรชีวิตที่สามารถให้ผลโดยประมาณ ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับต้นทุนและผลประโยชน์ที่ได้รับ

ในปัจจุบันนี้ต้องการวิธีการและเครื่องมือที่ใช้วัด และเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ในการผลิตสินค้าและบริการ (ทั้ง 2 รวมกัน เรียกว่าผลิตภัณฑ์) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยการปล่อยสิ่งต่าง ๆ สู่สิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรหรือแม้แต่การแทรกแซง(เช่นการใช้พื้นที่) ที่เกี่ยวเนื่องกับการจัดหาผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้แก่ การ

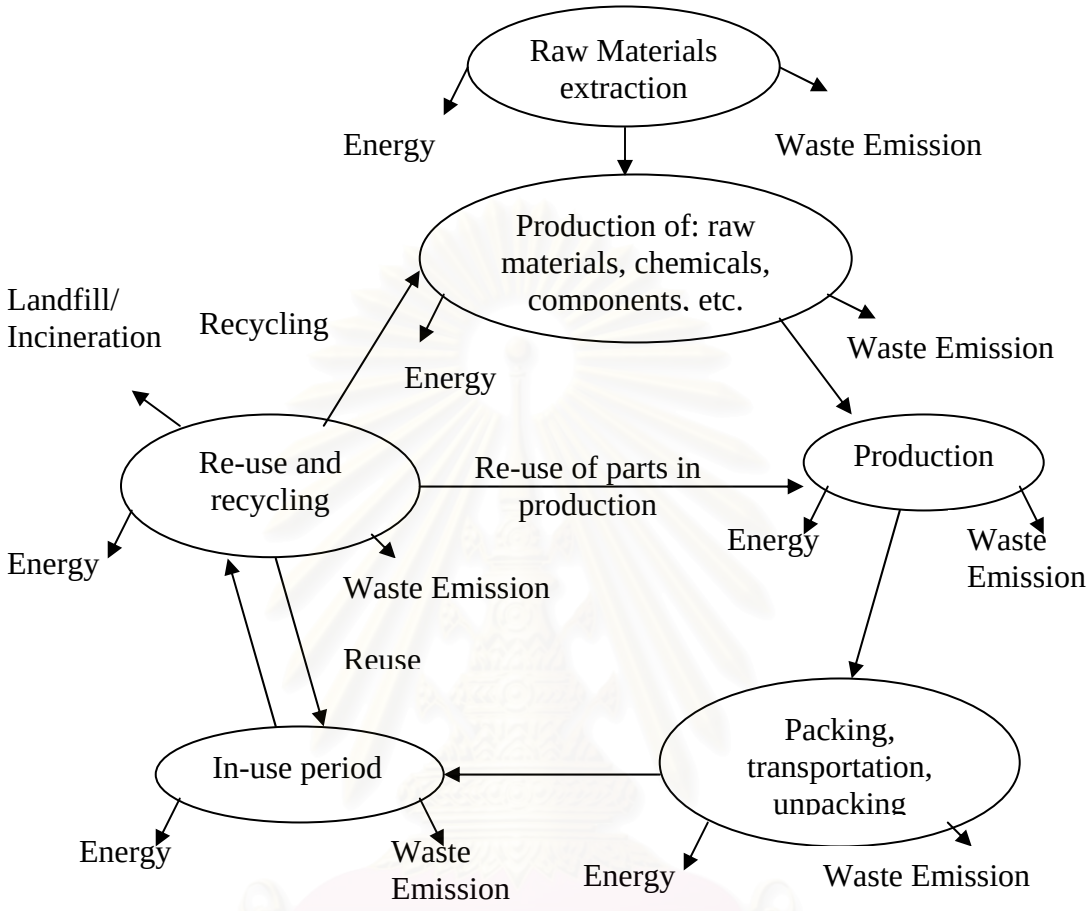
สกัดวัตถุดิบจากทรัพยากร, การผลิตวัตถุดิบ, การผลิตผลิตภัณฑ์, การบริโภค/ใช้งาน, และเมื่อหมดอายุการใช้งาน(การเก็บ, การนำมาใช้ใหม่, การนำมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการ, การทิ้งเป็นขยะ) การผลิตและการใช้บริโภคก่อให้เกิดผลกระทบในช่วงกว้าง เช่น ภาวะโลกร้อน, การลดลงของชั้นโอโซน, การเกิดหมอกควัน, การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน, การเกิดฝนกรด, ความเป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศน์, การลดลงของทรัพยากร, การใช้น้ำ, การใช้ที่ดินและการเกิดเสียงรบกวน และอีกมากมาย นักวิจัยจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อช่วยสร้างการป้องกันการเกิดมลพิษและลดการใช้ทรัพยากร ระหว่างที่ทำการพิจารณาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ในปี ค.ศ. 2004 Rebitzer ได้จัดทำกรอบการทำงานของ LCA และขั้นตอนการดำเนินงาน, การระบุและการสร้างแบบจำลองของวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Rebitzer และคณะ, ค.ศ. 2004) นอกจากนี้ยังทำการอภิปรายถึงประโยชน์ของ LCA ในโรงงานอุตสาหกรรมและการจัดทำนโยบายอีกด้วย การผลิตสินค้าและบริการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงกว้างและ Pennington ได้บอกถึงวิธีการให้ผู้ปฏิบัติการและนักวิจัยทำการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ของผลิตภัณฑ์ (Pennington และคณะ, ค.ศ. 2004)

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต

ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2547) คือ กระบวนการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การสกัดหรือการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่งและการแจกจ่าย การใช้งานผลิตภัณฑ์ การใช้ใหม่/แปรรูป และการจัดการเศษซากของผลิตภัณฑ์หลังจากการใช้งาน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า พิจารณาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle to Grave) โดยมีการระบุถึงปริมาณพลังงานและวัตถุดิบที่ใช้ รวมถึงของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะหาวิธีการในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด สมาคมพิษวิทยาและด้านสิ่งแวดล้อมและสารเคมี (Society of environment toxicology and chemical: SETAC) ได้ให้นิยามของ LCA ว่า “เป็นกระบวนการที่ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาครอบคลุมถึงกระบวนการผลิตและกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องกันในรูปของวัตถุดิบและพลังงาน ซึ่งการประเมินนี้จะทำตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์อย่างละเอียด เช่น กระบวนการผลิต การบรรจุ การคัดแยก การบำรุงรักษา และการแปรรูปใช้ใหม่ รวมถึงกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด โดยยึดหลักของระบบนิเวศน์ สุขอนามัย และการนำทรัพยากรมาใช้เป็นหลัก” ส่วนองค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (International Organization for Standardization: ISO) ได้นิยามความหมายของ LCA ไว้ในอนุกรมมาตรฐาน

ISO14040 ว่า “เป็นการเก็บรวบรวมและการประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออก รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต”



รูปที่ 4 แสดงวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

หลักการและการประยุกต์ใช้ LCA

เทคนิคของการประเมินวัฏจักรชีวิตนั้น จะแตกต่างจากเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่มีอยู่ คือ LCA เป็นกระบวนการประเมินค่าผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (Product) หรือหน้าที่ของผลิตภัณฑ์(function) ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น โดยเน้นผลเชิงปริมาณชัดเจน จึงทำให้การศึกษา LCA มีความซับซ้อนมากกว่าเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เพราะต้องทำการวิเคราะห์ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของทรัพยากรที่นำมาใช้ไปจนถึงขั้นตอนการทำลายซากผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในทุกประเด็นที่เกิดขึ้น และให้ความสำคัญทั้งในเรื่องของทรัพยากรที่สิ้นเปลืองไป และสารอันตรายที่ถูกปล่อยออกมาแต่ LCA เป็นการมองผลกระทบในภาพรวมที่จะก่อให้เกิดปัญหาต่อโลก เช่น การทำให้โลกร้อนขึ้นมากกว่าที่จะมองเฉพาะสารพิษที่ปล่อยออกมา

หลักการสำคัญของ LCA

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1) การบงชี้และระบุปริมาณของภาระทางสิ่งแวดล้อม (Environmental loads) ในทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง/ที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เช่น พลังงานและวัตถุดิบที่ถูกใช้ การปล่อยของเสียและการแพร่กระจายของมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม
2) การประเมินและการหาค่าของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts) ที่มีโอกาสเกิดขึ้น โดยพิจารณาจากปริมาณภาระทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่ถูกบ่งชี้มาในขั้นตอนแรก
3) การประเมินหาโอกาสในการปรับปรุงทางสิ่งแวดล้อม และการใช้ข้อมูลที่มีการแสดงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกิจกรรมเหล่านี้เป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจ

วัตถุประสงค์ของ LCA คือ การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตภัณฑ์หรือหน้าที่การใช้งานของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น LCA จึงเป็นเพียงเครื่องมือหนึ่งซึ่งช่วยสนับสนุนการตัดสินใจทางด้านสิ่งแวดล้อม ไม่ได้แทนที่เครื่องมือวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชนิดอื่น ๆ ซึ่งถูกกำหนดขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะอย่าง เช่น การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental impact assessment) ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การสร้างหรือต่อเติมโรงงานหรือสาธารณูปโภคชนิดใหม่ การประเมินความเสี่ยง (Risk assessment) ซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบของสารมลพิษต่าง ๆ จากการดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์เฉพาะแห่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และคุณลักษณะของเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2 พบว่าการทำ LCA เป็นการพิจารณาตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตและไม่มีข้อจำกัดด้านภูมิศาสตร์และระยะเวลาอีกด้วย

ตารางที่ 2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท

เครื่องมือ	ขอบเขตการใช้งาน	กระบวนการทางเศรษฐศาสตร์	ข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์	ข้อจำกัดด้านเวลา
การประเมินวัฏจักรชีวิต	ผลิตภัณฑ์/หน้าที่ของผลิตภัณฑ์	Full process chain	ไม่มีข้อจำกัด	ไม่มีข้อจำกัด
การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม	โรงงาน/ระบบสาธารณูปโภค	Non process chain	เฉพาะตำแหน่งที่ตั้ง	ระบุแน่นอน
การประเมินความเสี่ยง	โรงงาน	Non process chain	เฉพาะตำแหน่งที่ตั้ง	ระบุแน่นอน

ตารางที่ 2 แสดงลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องมือทางสิ่งแวดล้อมแต่ละประเภท (ต่อ)

เครื่องมือ	ขอบเขตการใช้งาน	กระบวนการทางเศรษฐศาสตร์	ข้อจำกัดทางภูมิศาสตร์	ข้อจำกัดด้านเวลา
การวิเคราะห์การไหลของสาร	สาร	All process in region	เฉพาะพื้นที่	ขึ้นกับผู้ใช้กำหนด
การประเมินเทคโนโลยี	เทคโนโลยี	Partial chain/ Full chain	ไม่มีข้อจำกัด	ไม่มีข้อจำกัด
การตรวจประเมินด้านสิ่งแวดล้อม	บริษัท	Non process/ partial chain	เฉพาะสถานที่ตั้ง/ บางครั้งไม่มีข้อจำกัด	ขึ้นกับผู้ใช้กำหนด

การประยุกต์ใช้ LCA

LCA ทำให้ทราบถึงข้อมูลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำมาพิจารณาประกอบกับข้อมูลในประเด็นอื่น ๆ เช่น ต้นทุน ความสะดวกสบายและความปลอดภัยของผู้บริโภค เพื่อนำไปสู่การตัดสินใจหรือการกำหนดแนวทางดำเนินการด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต เช่น การพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ การปรับปรุงนโยบายของภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบทั้งต่อผู้ผลิตและผู้บริโภคและการกระตุ้นให้เกิดจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อมเป็นต้น

การประเมินวัฏจักรชีวิตนั้น กล่าวถึง ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีต่อระบบผลิตภัณฑ์ภายใต้การศึกษาในสาขาที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพ นิเวศน์วิทยา และการหมดไปของทรัพยากร แต่จะไม่ได้กล่าวถึงผลทางเศรษฐกิจและสังคม

LCA สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกิจกรรมหรืองานวิจัยได้อย่างหลากหลาย โดยกลุ่มของผู้นำไปใช้งานอาจจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรม/บริษัทเอกชน ภาครัฐ องค์กรเอกชน (NGOs) และผู้บริโภค

เหตุผลในการใช้ LCA

การที่ต้องนำ LCA มาใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการสิ่งแวดล้อมแบบหนึ่ง เนื่องจาก LCA เป็นวิธีประเมินและวิเคราะห์แบบวิทยาศาสตร์และเชิงปริมาณที่ใช้ผลิตภัณฑ์เป็นศูนย์กลางและมองในภาพรวม ดังนี้

LCA ตั้งโจทย์จากผลิตภัณฑ์

กิจกรรมด้านเศรษฐกิจทั้งหมดขึ้นอยู่กับการใช้และการบริโภคผลิตภัณฑ์ และบริการในภาคอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์จึงเป็นสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงกิจกรรมทางภาคอุตสาหกรรม ยิ่งไปกว่านั้น คนส่วนใหญ่จะกำหนดนโยบายต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการผลิต ซึ่งจะมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจมากกว่าการพัฒนาทางด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน LCA จะเป็นเครื่องมือที่มุ่งเน้นไปที่ผลิตภัณฑ์และครอบคลุมไปยังส่วนที่เครื่องมืออื่น ๆ (เช่น การประเมินความเสี่ยง การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม) ไม่สามารถทำได้ จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของผลิตภัณฑ์ต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนของประเทศได้

LCA เป็นการมองภาพโดยรวม

LCA เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งรวบรวมปัญหาทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์หรือการใช้งาน ซึ่งการมองภาพรวมนี้จะหลีกปัญหาที่เกิดจากเราแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมในที่หนึ่ง แต่กลับไปสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมในอีกที่หนึ่งแทน (อาทิเช่น การพยายามที่จะลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น โดยการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ง่ายต่อการแยกส่วนเพื่อนำไปรีไซเคิล แต่อาจมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต/เตรียมวัตถุดิบ) ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะต้องนำมาคิดรวมด้วย เนื่องจากจะเป็นพื้นฐานในการวางแผนระยะยาว

ปัจจุบันมีการแก้ไขและการหลีกเลี่ยงการย้ายที่ของปัญหาที่เกิดขึ้น โดยใช้เทคนิคการผลิตที่สะอาด (Cleaner production) ซึ่งจะพิจารณาถึงความเหมาะสมในการรีไซเคิล การเลือกวัตถุดิบอย่างระมัดระวัง รวมทั้งจำกัดปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีเครื่องมืออื่น ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์อีก รวมทั้ง LCA ที่สามารถป้องกันการย้ายที่ของปัญหาใน 3 รูปแบบดังนี้

1) ปัญหาที่ย้ายจากขั้นหนึ่งไปสู่อีกขั้นหนึ่งของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้รถที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า แทนรถที่ใช้น้ำมันดีเซล และเบนซินเพื่อช่วยลดการแพร่กระจายมลพิษในตัวเมืองแต่ทำให้โรงไฟฟ้าต้องผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และอาจทำให้การใช้พลังงานในภาพรวมเพิ่มขึ้น LCA สามารถนำมาใช้เพื่อพิสูจน์ว่า การเปลี่ยนมาใช้รถที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าหรือไม่
2) การเปลี่ยนจากปัญหาประเภทหนึ่งไปเป็นปัญหาอีกประเภทหนึ่ง เช่น การใช้เทคโนโลยีที่ต่างกัน โดยทั่วไปจะใช้วัตถุดิบที่แตกต่างและก่อให้เกิดมลพิษที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น การเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกรอบหน้าต่างอลูมิเนียม กับกรอบหน้าต่างพีวีซี

พบว่า ในการผลิตอลูมิเนียมจะทำให้เกิดมลพิษจากกรดของซัลเฟอร์และไนโตรเจนออกไซด์ ส่วนการผลิตพีวีซีนั้นก่อให้เกิดไอพิษของไดคลอโรอีเทน(Dichloroethane) LCA สามารถนำมาใช้เพื่อจะตัดสินว่าทางเลือกใดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากัน

3) การย้ายปัญหาจากสถานที่หนึ่งไปเกิดปัญหากับอีกสถานที่หนึ่ง เช่น การขนย้ายของเสียที่เป็นสารเคมีจากประเทศหนึ่งไปยังประเทศอื่น ๆ ซึ่งการศึกษา LCA จะสามารถพิสูจน์ได้ว่าภายใต้เงื่อนไขเรื่องการเก็บของเสียที่เป็นสารเคมีนั้น แบบใดจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

อย่างไรก็ตาม LCA ไม่สามารถแสดงให้เห็นการย้ายที่ของปัญหาจากผลิตภัณฑ์หนึ่งไปสู่อีกผลิตภัณฑ์หนึ่งได้ เช่นในกรณีที่วัตถุดิบที่ปนเปื้อนถูกนำไปรีไซเคิล เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ตัวอย่างเช่น ขี้เถ้าที่เกิดจากกระบวนการทำความสะอาดก๊าซเสียจากเตาเผาที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง หรือเตาเผาขยะอุณหภูมิสูง จะประกอบด้วยโลหะหนักที่มีความเป็นพิษในปริมาณสูง การนำขี้เถ้านี้มาเป็นสารเติมแต่งในการผลิตซีเมนต์ จัดเป็นวิธีการหนึ่งที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่โลหะหนักต่าง ๆ จะไม่ถูกผสมอยู่ในเนื้อซีเมนต์ กรณีดังกล่าวเป็นอุปสรรคต่อการศึกษา LCA บางเรื่องในปัจจุบัน เช่น ไม่สามารถศึกษา LCA ของแบตเตอรีแบบนิเกิลแคดเมียม ได้ครอบคลุมถึงการสกัดแยกของโลหะหนัก หรือการศึกษาเรื่องของการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุก่อสร้างอาคารกับการสร้างถนน จึงควรใช้การวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อมประเภทอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์ผังการไหลของสารขาเข้าและขาออกมากกว่าการวิเคราะห์ด้วย LCA

LCA เป็นศาสตร์และให้ข้อมูลเชิงปริมาณ

การศึกษา LCA ตั้งอยู่บนพื้นฐานของวิทยาศาสตร์และให้ข้อมูลเชิงปริมาณ ซึ่งจะเป็นเครื่องมือที่ดีที่สุดในการตัดสินใจทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือในผลการวิเคราะห์มากกว่าการใช้ความรู้สึกตัดสินใจในเรื่องที่ซับซ้อน และการมีผลวินิจฉัยที่ไม่ชัดเจน จึงมักเป็นประเด็นสำคัญที่นำมาเป็นหัวข้อในการโต้เถียงกันบ่อย ๆ และทำให้เกิดปัญหาระหว่างภาคภาคีต่าง ๆ LCA จึงเป็นเครื่องมือที่มีความเป็นกลางในการป้อนข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจระหว่างผู้ที่มีส่วนได้ส่วนเสียเหล่านั้น

โปรแกรม SimaPro6.0 (System for Integrated Environmental Assessment of Products)

บริษัท PRe Consultants ก่อตั้งเมื่อปี 1990 โดย Mr.Mark Goedkoop โดยมุ่งเน้นไปที่การจัดการวัฏจักรชีวิตและการออกแบบผลิตภัณฑ์ โดยการพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์และการ

บริการ ด้วยโปรแกรมที่เป็นที่รู้จักกันดี ในชื่อของ SimaPro LCA software ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรชีวิตของระบบ

โปรแกรม SimaPro ถูกสร้างในปี ค.ศ.1990 สำหรับโครงการของรัฐบาลเนเธอร์แลนด์ โดยใช้ LCA software เป็นตัวแสดงผลซึ่งสามารถเข้าใจได้ง่าย โปรแกรม SimaPro 4 ถูกสร้างในปี ค.ศ. 1997 โดยทำงานบนระบบปฏิบัติการ Window และประสบความสำเร็จอย่างมาก Pre Consultants ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมอย่างต่อเนื่องโดยมีรัฐบาลเนเธอร์แลนด์สนับสนุน โดยได้ทำการพัฒนา Eco-indicator 95 และ 99 โดยทั้ง 2 โปรแกรมมีประโยชน์อย่างมากในการจัดการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของวัฏจักร

ในปัจจุบัน SimaPro ไม่เพียงแต่ใช้ทำการประเมินผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ได้ขยายการใช้งานไปถึงกระบวนการผลิตและการบริการอีกด้วย และล่าสุด SimaPro 6.0 เป็นโปรแกรมที่ทำการเก็บข้อมูล, วิเคราะห์ผลและแสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากผลิตภัณฑ์และการบริการ ซึ่งเราสามารถสร้างแบบจำลองขึ้นได้อย่างง่ายดาย และทำการวิเคราะห์ผลที่ซับซ้อนของวัฏจักรชีวิต พร้อมทั้งแสดงผลออกมาได้อย่างชัดเจนและเข้าใจได้ง่าย

2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์(Harris, 1999)

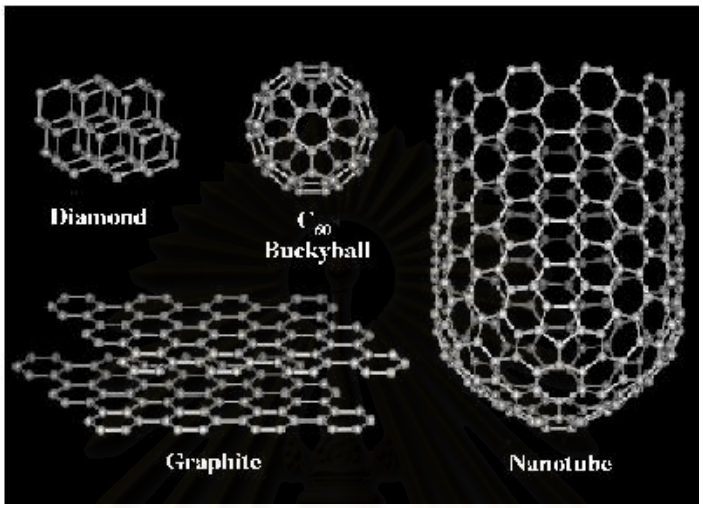
คาร์บอนเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษสามารถพบได้ในหลาย ๆ โครงสร้าง (Allotropic forms) ซึ่งแบ่งออกได้ เป็น 4 ชนิดหลักๆ ดังนี้

1.แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้งสามมิติ โดยที่อะตอมของคาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) ที่พบได้ในรูปของอัญมณีราคาแพง คือเพชร ซึ่งมีความสวยงามและมีความแข็งที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย

2.แบบมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ หรือเป็นแผ่นสองมิติที่วางซ้อนทับและยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกัน ด้วยแรงที่ต่ำกว่า คือแรง แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) พบว่าเป็นโครงสร้างของแกรไฟต์

3.แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนขนาดเล็กจนอาจถือว่ามันเป็นจุดที่ไม่มีมิติ หรือศูนย์มิติ เรียกว่าฟูลเลอรีนส์ (fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) ที่แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้งหมด 60 อะตอมมาจับตัวกันด้วยพันธะโควาเลนท์ แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมกลวงคล้าย ๆ ลูกตะกร้อหรือลูกบอลขนาดจิ๋ว

4.แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก เลยทำให้มันดูเหมือนเป็น เส้นยาวๆ ในแนวหนึ่งมิติ เรียกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างของคาร์บอนแบบใหม่ที่เพิ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1991

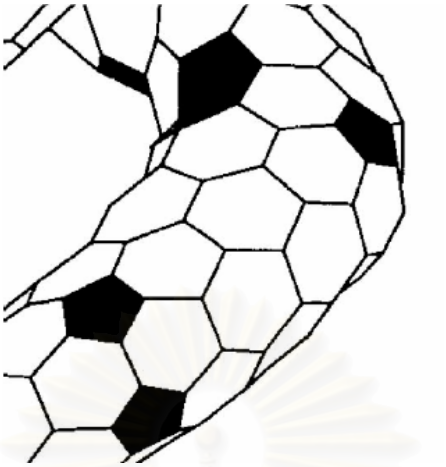


รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของคาร์บอน(Harris, 1999)

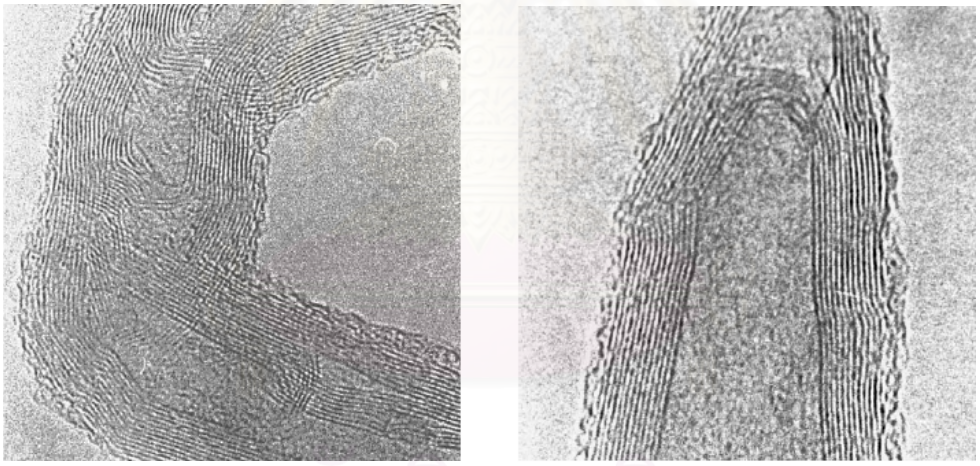
โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์ แบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ ตามจำนวนชั้นของผนังท่อคือ ถ้าท่อมีผนังชั้นเดียวจะเรียกว่า "คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว" (single-walled nanotubes, SWNTs) ส่วนท่อที่มีผนังหลายชั้นจะเรียกว่า "คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น" (multiple-walled nanotues, MWNTs) ส่วนใหญ่ขนาดของท่อที่สังเคราะห์ได้พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณตั้งแต่ สองนาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตร และมีความยาวไปจนถึงหลายร้อยไมโครเมตร และเป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณี คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นนั้น ระยะห่างระหว่างแต่ละชั้นจะเท่ากับ 0.33-0.34 นาโนเมตร ซึ่งระยะนี้มีค่าประมาณระยะห่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์

โครงสร้างของแต่ละหน่วยย่อยของผนังคาร์บอนนาโนทิวบ์นี้ ประกอบขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยม คือจะมีอะตอมของคาร์บอนในแต่ละวงแหวนจำนวนหกอะตอม บางครั้งอาจเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า โครงสร้างรังผึ้ง และบางทีมันก็สามารถจับกันเป็นรูปวงแหวนห้าเหลี่ยมหรือเจ็ดเหลี่ยมได้ ซึ่งในกรณีอย่างนี้อาจถือว่าเป็นตำแหน่งที่มีตำหนิ (Defects) ของผนังท่อ ทำให้รูปทรงของท่อบิดโค้งงอ เช่น ม้วนเป็นขดคล้ายลวดสปริง (รูปที่ 8), ม้วนเป็นขดแบบขนมโดนัท (รูปที่ 9) ม้วนปิดปลายคาร์บอนนาโนทิวบ์ และม้วนเป็นก้อนกลมแบบคาร์บอนหกสิบ



รูปที่ 6 แสดงวงแหวนของคาร์บอนที่จับกันเป็นวงแหวนห้าเหลี่ยมแลเจ็ดเหลี่ยม (Gulino และคณะ, ค.ศ. 2005)



รูปที่ 7 แสดงภาพ TEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่โค้งงอ (Gulino และคณะ, ค.ศ. 2005)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 8 โครงสร้างขดสปริงของคาร์บอนนาโนทิวบ์(Harris, 1999)

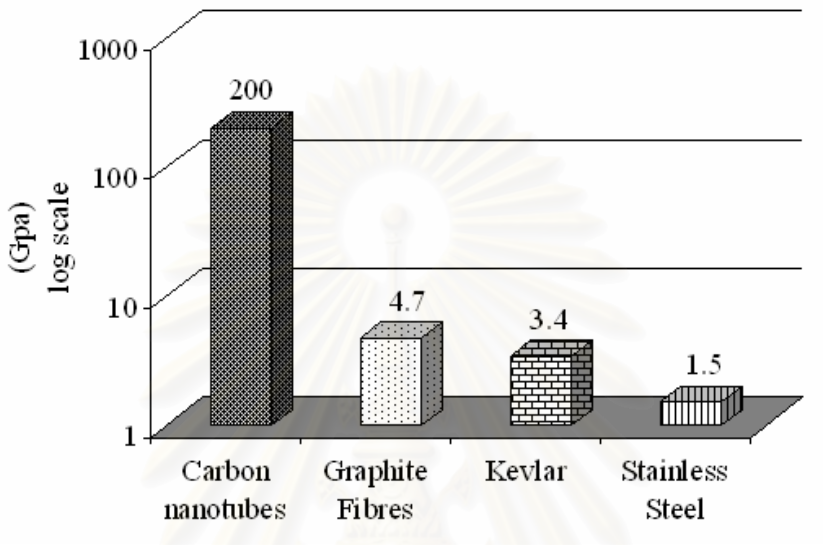
รูปที่ 9 โครงสร้างโดนัทของคาร์บอนนาโนทิวบ์(Harris, 1999)

คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

1.คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่นำไฟฟ้าได้ดี สามารถขยับเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันโดยมีความฝืดน้อยมาก สามารถทำเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งนำไฟฟ้าได้

2. ไวต่อแสงไฟ เช่น แสงไฟแฟลชจากกล้องถ่ายรูป ถึงขั้นลุกเป็นไฟได้ คุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้นาโนทิวบ์มีศักยภาพจะใช้ประโยชน์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์และอื่นๆ มากมายที่กำลังศึกษากันอยู่

3. ความแข็งแรง พบว่า นาโนทิวบ์มีความแข็งแรงกว่าเคฟลาร์ (Kevlar) ซึ่งเป็นวัสดุแข็งแรงที่สุดในโลก (ก่อนที่จะมีคาร์บอนนาโนทิวบ์) ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีศักยภาพจะใช้งานเป็นสายเคเบิลสำหรับลิฟต์อวกาศ (Space Elevator หรือ Space Lift) ได้



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ประโยชน์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

มีการวิจัยเพื่อนำเอาคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้ทำโพรบวัด (probing tip) ให้กับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ทั้งนี้เพราะคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิกอนหรือซิลิกอนไนไตรด์ในแง่ของความมีเสถียรภาพ และความคงทน ที่สำคัญคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงไปได้ ถึง 1.2 นาโนเมตร จึงเป็นการลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโคนและรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด ซึ่งเป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อน (artifact) เมื่อวัดผิววัตถุที่มีความลาดชันสูงและมีขนาดใกล้เคียงกับปลายของโพรบวัด เช่น การวัดภาพดีเอ็นเอ เป็นต้น ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์จึงเหมาะสำหรับทำโพรบวัดเพื่อเพิ่มความสามารถแยกแยะ (resolution) ให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้

การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต เพราะด้วยคุณสมบัติที่มันมีน้ำหนักเบา และมีค่าความยืดหยุ่นสูงซึ่งจะไม่แตกหักง่าย อีกทั้งยังสามารถหดโค้งงอได้เหมือนสปริง เมื่อออกแรงกดแล้วเด้งคืนสู่สภาพเดิมได้ ทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ จะ

แข็งแรงกว่าพวกไฟเบอร์ทั้งหลายเท่าที่เคยมีมา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น เป็นส่วนประกอบในรถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้างต่างๆ หรือแม้กระทั่งใช้ทำเสื้อเกราะกันกระสุน เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถเอาไปใช้ทำเป็นหลอดทดลองขนาดนาโนเพื่อเก็บของเหลวบางอย่าง หรือทำเป็นเบ้าหล่อวัสดุเซรามิค (nanoceramic fibers) ได้

คุณสมบัติทางอิเล็กโทรนิกส์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น ได้รับการยืนยันจากทั้งการคำนวณทางทฤษฎีและการทดลองโดยนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มด้วยกัน เช่น กลุ่มนักวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเดลฟท์ ประเทศเนเธอร์แลนด์ และมหาวิทยาลัยเบิร์กเล่ย์ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้มีการสร้างห้องวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีนาโนอิเล็กโทรนิกส์ หรือโมเลกุลาร์อิเล็กโทรนิกส์ขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อทำการค้นคว้าและประดิษฐ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่นทรานซิสเตอร์ ไดโอด สายไฟควอนตัม และตัวนำยิ่งยวดที่ทำจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว

นักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อยาฮาชิ ไซโตะ (Yahachi Saito) สามารถประดิษฐ์จอภาพแบบรังสีแคโทดที่ใช้ในจอทีวี หรือจอคอมพิวเตอร์ โดยใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์แทนโลหะ ในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายลำอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่เหนือกว่าคือมันให้ความสม่ำเสมอ ให้ปริมาณที่เพียงพอและมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนั้นแล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดงอย่างกรณีการใช้โลหะ ซึ่งตัวอย่างนี้อาจจะกำลังพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าชิ้นแรกของญี่ปุ่นที่ได้มีการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวบ์

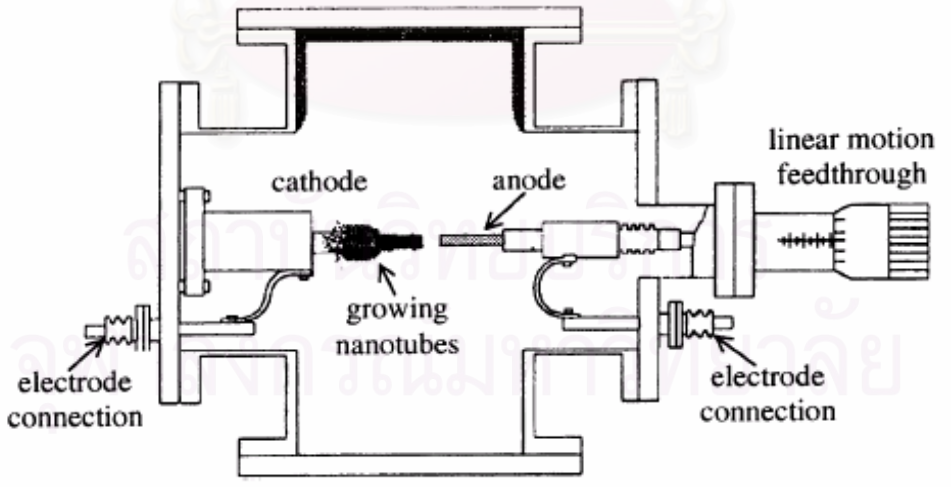
ด้วยเหตุผลเหล่านี้เองคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยในวงกว้าง ไม่ว่าจะเป็น นักฟิสิกส์ นักเคมีและวิศวกร ตามผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติเกี่ยวกับเรื่องนี้ทั้งด้านทฤษฎีและการทดลอง จะมีออกมาในอัตราที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ทั้ง ๆ ที่ช่วงเวลาตั้งแต่การค้นพบครั้งแรกจนถึงขณะนี้เพิ่งผ่านไปเพียงสิบกว่าปีเท่านั้น จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและน่าติดตามเป็นอย่างยิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น

ปัญหาที่พบและยังเป็นสิ่งท้าทายต่อนักวิจัย ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นก็คือ ขั้นตอนการควบคุมการผลิตเพื่อให้ได้ทั้งสมบัติ ขนาด และรูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอนกับขั้นตอนการทำให้มีความบริสุทธิ์ คือไม่ให้มีเขม่า หรือผงเม็ดคาร์บอนหรือมีสิ่งเจือปนอื่น ๆ อย่างไรก็ตามนัก วิทยาศาสตร์พบว่ามี 4 วิธีหลัก ๆ ที่สามารถสร้างและควบคุมการผลิตคาร์บอนนาโนทิวบ์ ให้ได้ตามต้องการในระดับหนึ่งได้ ดังนี้

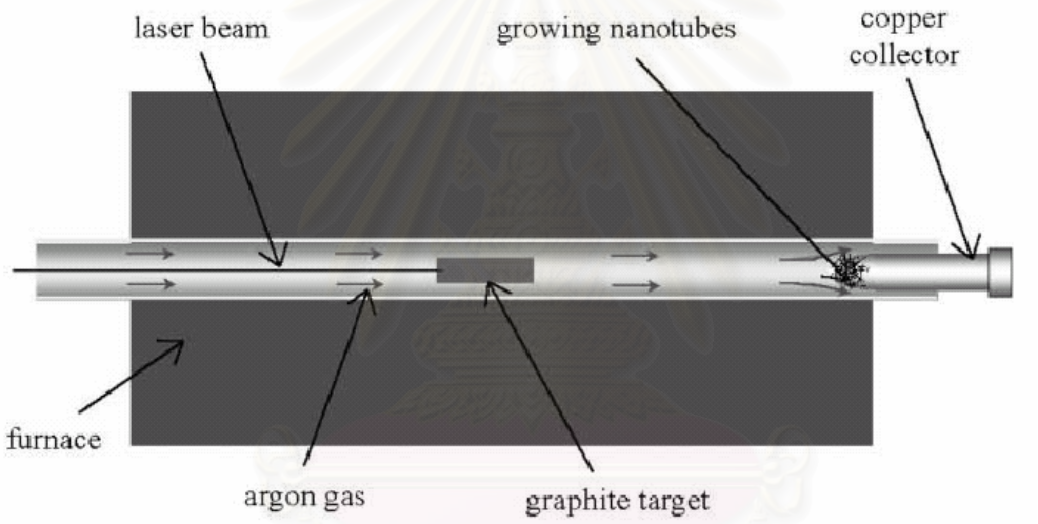
1. วิธีอาร์กดิสชาร์จ (Arc discharge) เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงประมาณ 100 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ 18 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งกราไฟต์สองแท่ง จะทำให้เกิดประกายไฟหรือเกิดสถานะพลาสมาขึ้นระหว่างแท่งแกรไฟต์นี้ โดยเลือกใช้ขนาดของแท่งแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน คือให้มีขนาด 6 มม.และ 9 มม.ตามลำดับ เมื่อวางไว้ใกล้ ๆ กันในระยะห่างประมาณ 1 มม. ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลี่ยม ที่ความดัน 500 มม.ปรอท จะให้ผลลัพธ์คือ ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ตรงบริเวณกลาง ๆ ขั้วของแท่งแกรไฟต์อันใหญ่ที่ต่อให้เป็นขั้วลบ ส่วนการควบคุมขนาดและความยาวของท่อนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของพลาสมาดังกล่าว



รูปที่ 11 แสดงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีอาร์กดิสชาร์จ(Harris, 1999)

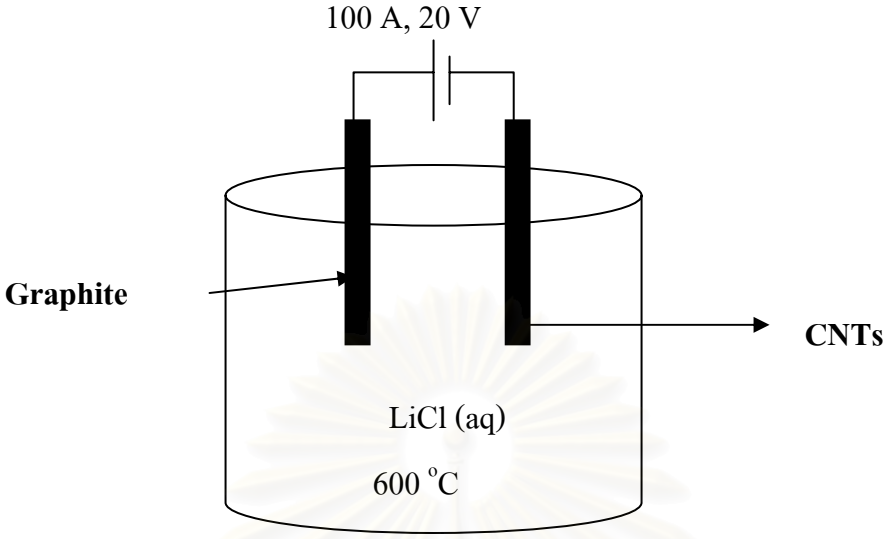
2. วิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) ของไฮโดรคาร์บอน เป็นวิธีการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงอย่างต่ำ 600 องศาเซลเซียส ไปยังโมเลกุลของสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น เบนซิน ขณะโมเลกุลมีการจับคู่กับไอออนหรืออะตอมของโลหะ (Metallocenes) ซึ่งใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิเกิลและโคบอลต์ เป็นต้น วิธีนี้บางครั้งจะเรียกว่าวิธี Chemical vapor deposition (CVD)

3. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser vaporization) วิธีนี้จะคล้ายๆ กับวิธีไพโรไลซิส เพียงแต่จะใช้ลำแสงเลเซอร์ เป็นตัวให้ความร้อนสูงกับแกรไฟต์ในขณะผสมกับผงเม็ดละเอียดของโลหะโคบอลต์และนิเกิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย



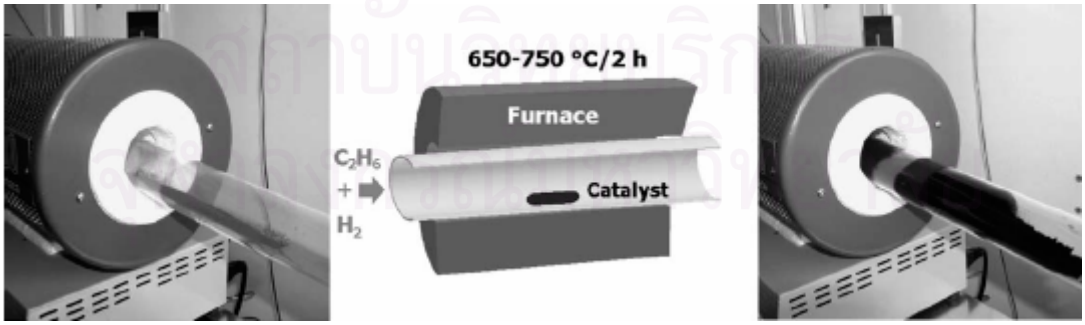
รูปที่ 12 แสดงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Harris, 1999)

4. วิธีอิเล็กโตรไลซิส (Electrolysis) ซึ่งก็เช่นเดียวกันวิธีนี้จะใช้การผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วแกรไฟต์ ขณะจุ่มอยู่ในของเหลวที่เรียกว่าอิเล็กโทรไลท์ เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยการผสมหรือเจือสารอิเล็กโทรไลท์ด้วยธาตุหรือสารประกอบอื่นๆ เช่น ผสมด้วยเกลือที่มีบิสมัสและปรอทจะสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ได้

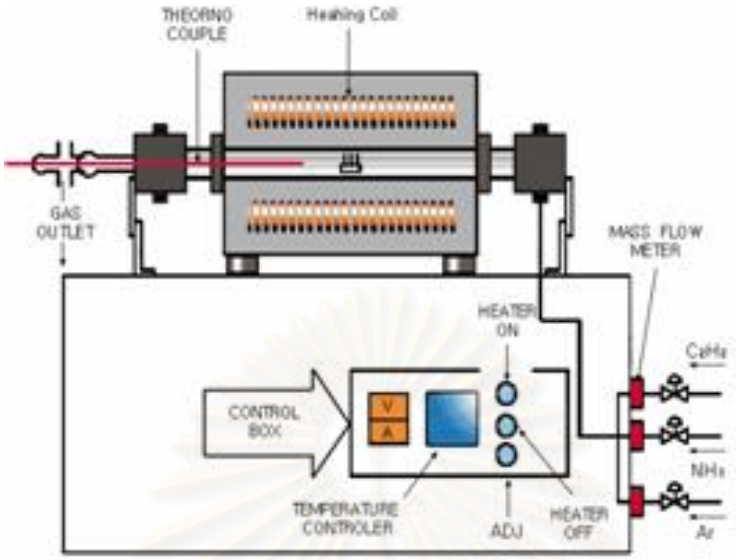


รูปที่ 13 แสดงวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีอิเล็กโตรไลซิส

จากวิธีการทั้งหมดนี้ กระบวนการ CVD เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNTs มากที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและให้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก สามารถสังเคราะห์และควบคุมการผลิต MWNTs ให้ได้ตามต้องการในระดับหนึ่ง และที่สำคัญ คือ มีต้นทุนต่ำกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ๆ จึงเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการผลิตเพื่อจำหน่าย การทำงานเริ่มจากก๊าซตั้งต้น (Precursor gases) ซึ่งส่วนใหญ่จะเจือจางในก๊าซตัวนำพา (carrier gases) เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อก๊าซผ่านเข้าไปสัมผัสกับตัวรองรับ (substrate) ที่ร้อน จะเกิดปฏิกิริยาหรือสลายตัวเพื่อก่อตัวเป็นของแข็ง ซึ่งจะเกิดขึ้นบนตัวรองรับ สำหรับอุณหภูมิของตัวรองรับนั้นจะเป็นอุณหภูมิวิกฤตเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาขึ้น



รูปที่ 14 แสดงการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยวิธี CVD (Gulino และคณะ, ค.ศ. 2005)



รูปที่ 15 แผนภาพการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD (Harris, 1999)

งานวิจัยนี้ได้เลือกงานวิจัยที่สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณมาก (large scale) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD มาทำการประเมินวัฏจักรชีวิต, การประเมินความเสี่ยงและการพิจารณาต้นทุนการผลิต ดังนี้

1. การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนเป็นสารตั้งต้นและใช้เหล็กบนอะลูมินาเป็นคะตะลิสต์ (Gulino และคณะ, ค.ศ. 2005) โดยใช้คำว่า CVD1 เรียกแทนกระบวนการนี้

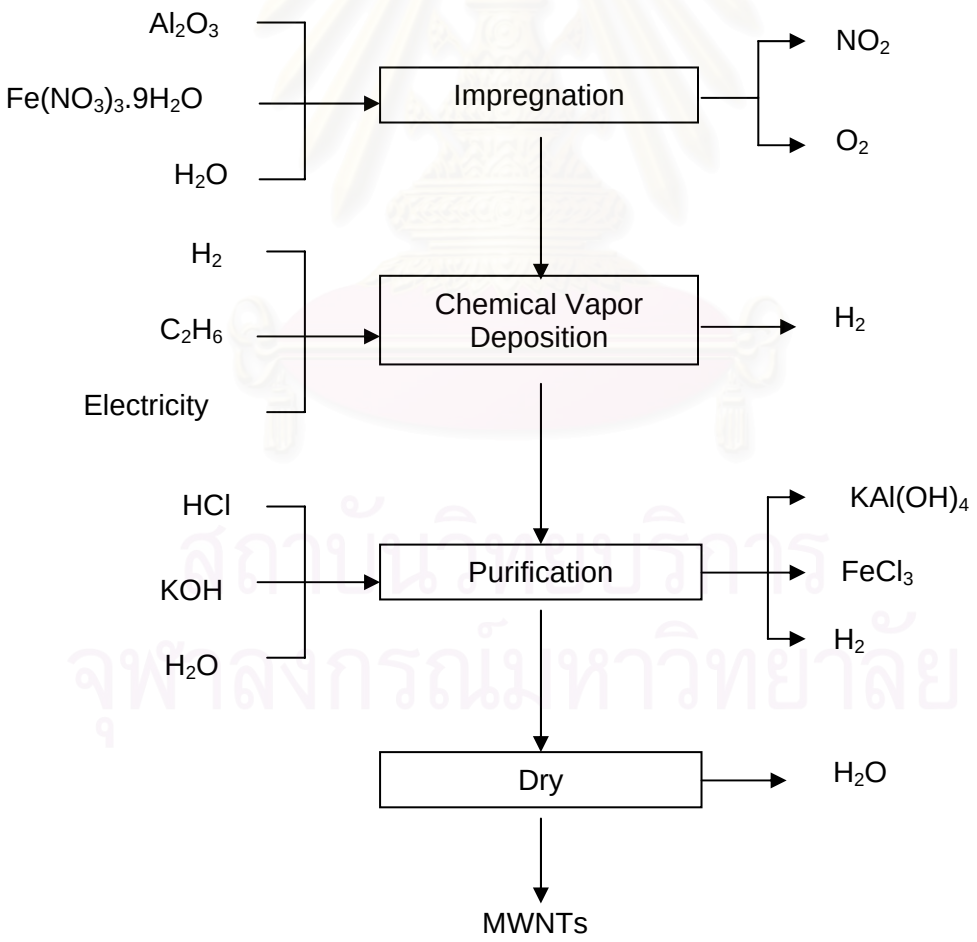
2. การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและเหล็กกับโคบอลต์บนแคลเซียมคาร์บอเนต (Couteau และคณะ, ค.ศ.2003) โดยใช้คำว่า CVD2 เรียกแทนกระบวนการนี้

3. การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและโคบอลต์กับโมลิบดีนัมบนแมกนีเซียมออกไซด์ (Kibria และคณะ, ค.ศ.2004) โดยใช้คำว่า CVD3 เรียกแทนกระบวนการนี้

3.1 การสังเคราะห์ MWNTs โดย CVD1

การสังเคราะห์ MWNTs ใช้อีเทนเป็นแหล่งให้คาร์บอน ส่วนคะตะลิสต์คือเหล็กบนตัวรองรับอะลูมินา โดยใช้อะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวมาก(γ-Al_2O_3) อะลูมินาจะถูกบดและกรองให้มีขนาด 80-150 ไมโครเมตร ใส่ลงในสารละลาย $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ โดยให้มีเหล็ก 20%โดยน้ำหนัก ระเหยตัวทำละลายออก นำผงของแข็งที่เปียกไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง และแคลไซด์

ในอากาศที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อเปลี่ยนรูปคะตะลิสต์ให้อยู่ในรูปของออกไซด์ จากนั้นคะตะลิสต์ 1 กรัม จะถูกวางไว้ในถ้วยเซรามิกซึ่งอยู่ในท่อควอตซ์(เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม., ยาว 600 มม.) ที่วางตามแนวนอนในเตาเผาไฟฟ้า ทำการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นป้อนก๊าซผสมของอีเทนและไฮโดรเจนมีอัตราการไหลเท่ากันที่ 60 ลบ.ซม.ต่อนาทีและเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 650 องศาเซลเซียส หลังจากทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จึงนำ MWNTs ไปกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก โดยการสกัดล้างด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดตัวรองรับอะลูมินา แล้วจึงล้างตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นสกัดล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก(ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร) เพื่อกำจัดเหล็กที่เหลืออยู่แล้วล้างตามด้วยน้ำกลั่น สุดท้ายจึงอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ 20 กรัมต่อกรัมของคะตะ-ลิสต์ใน 1 ชั่วโมง แผนผังการสังเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 16

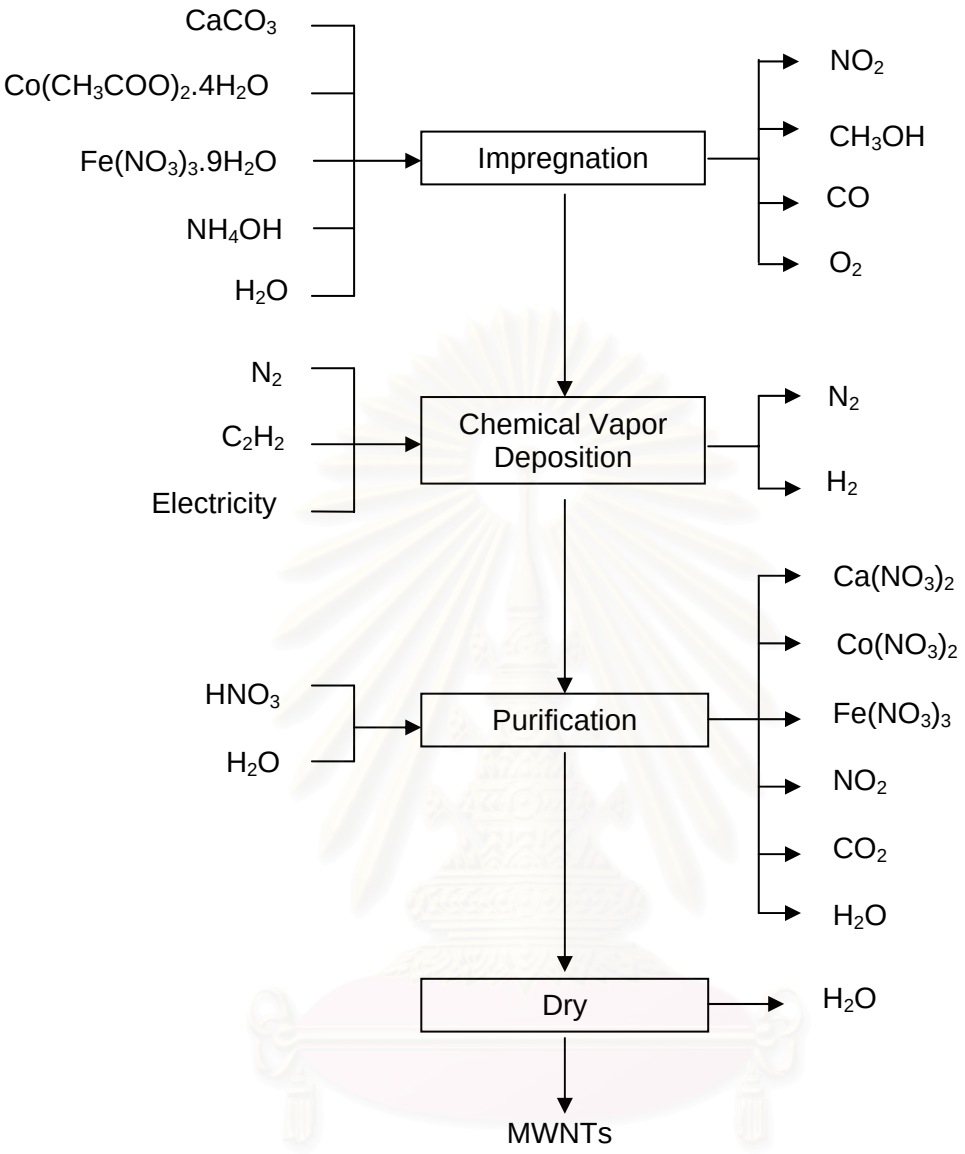


รูปที่ 16 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนและเหล็กบนอะลูมินา (CVD1)

3.2 การสังเคราะห์ MWNTs โดย CVD2

การสังเคราะห์ MWNTs ใช้ก๊าซอะเซทิลีนเป็นแหล่งให้คาร์บอน และใช้คะตะลิสต์บนตัวรองรับ $CaCO_3$ โดยใช้โลหะสองชนิด คือ Fe(III) และ Co(II) เป็นคะตะลิสต์ การเตรียมใช้วิธีเคลือบฝังโดยใส่ $CaCO_3$ ลงในสารละลาย $Co(CH_3COO)_2.4H_2O$ และ $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ โดยให้คะตะลิสต์มีความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก ในระหว่างการเตรียมคะตะลิสต์ต้องให้สารละลายมีค่า pH 7.2 โดยการหยดสารละลายแอมโมเนียลงไป จากนั้นจึงนำสารผสมใส่ลงในบีกเกอร์ที่วางอยู่บนแผ่นให้ความร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป แล้วจึงนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นำคะตะลิสต์ 50 มก. ใส่ลงในถ้วยซึ่งอยู่ในท่อควอตซ์ภายในเตาเผาไฟฟ้า ทำการรีดิวซ์และแคลไซด์ จากนั้นเพิ่มความร้อนไปที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ป้อนก๊าซไนโตรเจน 70 ลิตรต่อชั่วโมง และก๊าซอะเซทิลีน 10 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ท่อควอตซ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม. ความยาวของพื้นที่ที่ได้รับความร้อน 200 มม. สำหรับการทำให้บริสุทธิ์จะนำ MWNTs ไปล้างด้วยกรดไนตริก (30 % โดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เพื่อกำจัดคะตะลิสต์และตัวรองรับในขั้นตอนเดียว จากนั้นจึงกรองและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ 0.07 กรัมต่อ 0.1 กรัมของคะตะลิสต์ แผนผังการสังเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

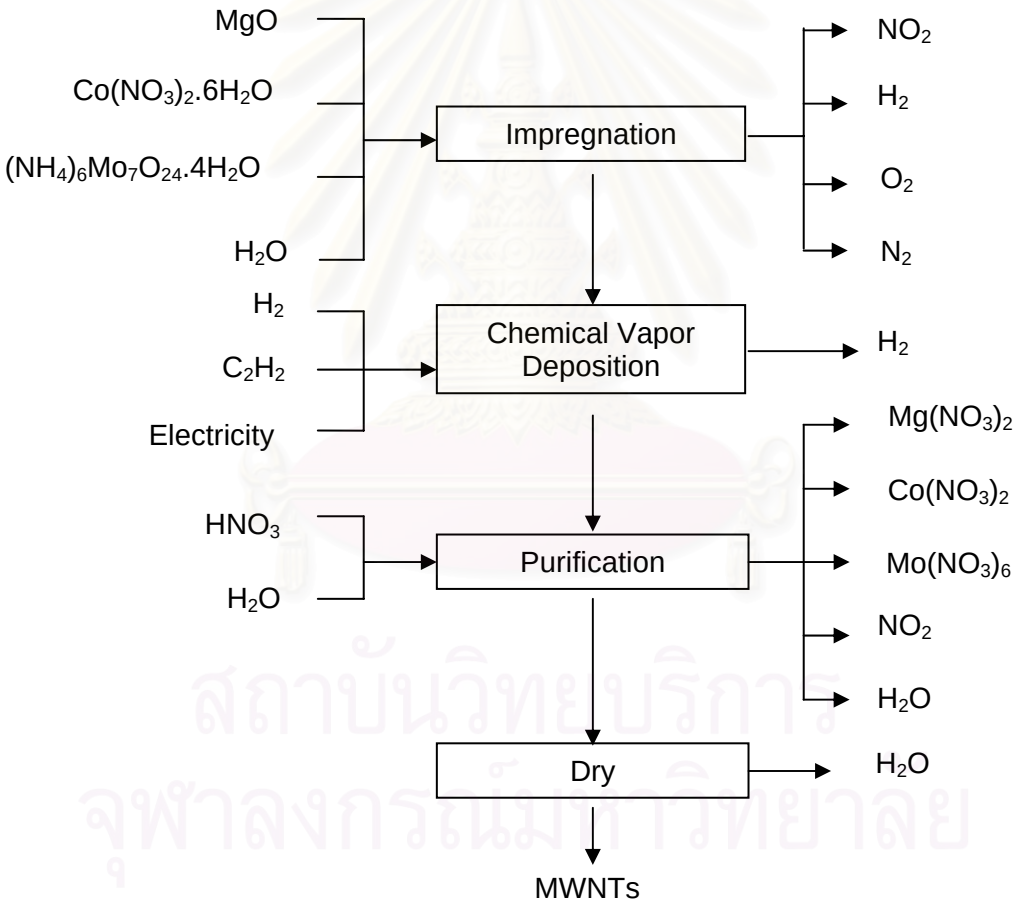


รูปที่ 17 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและเหล็กกับโคบอลต์บนแคลเซียมคาร์บอเนต (CVD2)

3.3 การสังเคราะห์ MWNTs โดย CVD3

การสังเคราะห์ MWNTs ใช้คะตะลิสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างโคบอลต์และโมลิบดีนัมบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ คือ 15Mo/15Co/70MgO การเตรียมคะตะลิสต์จะใช้วิธีการเคลือบฝังจากสารละลาย $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$ และ $Co(NO_3)_2.6H_2O$ ผสมกับ MgO กวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12

ชั่วโมง แคลไซด์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อีก 6 ชั่วโมง และสุดท้ายรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำคะตะลิสต์ 0.4 กรัมใส่ลงในถ้วยอะลูมินาที่อยู่ในท่อควอตซ์ภายในเตาเผาไฟฟ้า กระตุ้นคะตะลิสต์ด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นป้อนก๊าซอะเซทิลีน 10 ลบ.ซม.ต่อนาทีและก๊าซไฮโดรเจน 100 ลบ.ซม.ต่อนาที ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สุดท้ายล้างด้วยกรดไนตริก (30 % โดยน้ำหนัก) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคะตะลิสต์และตัวรองรับ จากนั้นจึงกรองและอบให้แห้ง การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ 1.84 กรัมต่อ 0.4 กรัมของคะตะลิสต์ใน 1 ชั่วโมง แผนผังการสังเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อะเซทิลีนและโคบอลต์กับโมลิบดีนัมบนแมกนีเซียมออกไซด์ (CVD3)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 การประมาณข้อมูลให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกัน

เนื่องจากกระบวนการที่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลที่ค่าอ้างอิงต่างกัน เช่น เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์, ปริมาณของคะตะลิสต์ที่ใช้ และปริมาณ MWNTs ที่สังเคราะห์ได้ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณข้อมูลต่าง ๆ ให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกัน คือ สังเคราะห์ MWNTs ปริมาณ 1 กรัม เพื่อสามารถบอกถึงปริมาณการใช้สารตั้งต้นและคะตะลิสต์ เหตุผลในการเลือกปริมาณเป็น 1 กรัม ของ MWNTs นั้น เนื่องจากเป็นค่ากลางจากปริมาณที่กระบวนการทั้ง 3 สังเคราะห์ได้

ในการประมาณข้อมูลจะใช้วิธีการหารตลอดด้วยปริมาณ MWNTs ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งการทำเช่นนี้นั้นอาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากความสัมพันธ์ของการสังเคราะห์นั้นไม่ได้เป็นลักษณะของเชิงเส้น มีตัวแปรอีกมากที่เกี่ยวข้อง เช่น กลไกการเกิดปฏิกิริยาจากการใช้คะตะ-ลิสต์หรือสารตั้งต้น เป็นต้น แต่เนื่องจากงานวิจัยมีข้อจำกัดในเรื่องของข้อมูลจึงใช้วิธีการนี้เพื่อประมาณข้อมูลให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกัน ข้อมูลของการสังเคราะห์ทั้ง 3 วิธีแสดงดังตารางที่ 3 ส่วนตารางที่ 4 แสดงข้อมูลเมื่อได้ทำการประมาณให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกัน

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลของการสังเคราะห์ทั้ง 3 วิธี ใน 1 การทดลอง

Material	CVD1	CVD2	CVD3
C_2H_6 (cm^3)	3,600		
C_2H_2 (cm^3)		300	600
H_2 (cm^3)	3,600		6,000
N_2 (cm^3)		35,000	
Support	Al_2O_3	$CaCO_3$	MgO
Catalyst	Fe	Fe, Co	Co, Mo
Cat. amount(g)	1	0.05	0.4
KOH, HCl (mol/l)	1		
HNO_3 (% wt)		30	30
Diameter of MWNTs (nm)	40	20	15
Purity	95-98%	95%	>90%
Resident time (hr)	2	0.5	1
MWNTs (g)	40	0.035	1.84

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลที่ได้ทำการประมาณให้อยู่บนค่าอ้างอิงเดียวกันที่การสังเคราะห์ MWNTs ปริมาณ 1 กรัม

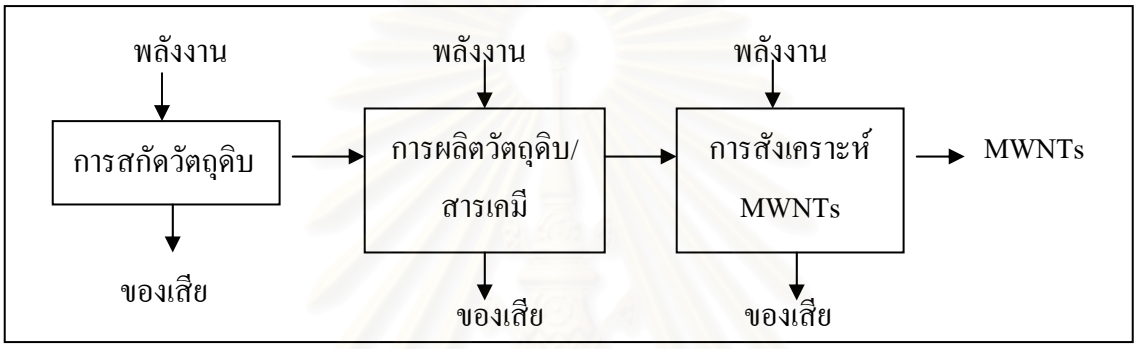
Material	CVD1	CVD2	CVD3
C_2H_6 (cm^3)	90.00		
C_2H_2 (cm^3)		8,571.43	326.09
H_2 (cm^3)	90.00		3,260.87
N_2 (cm^3)		1,000,000.00	
Cat.amount (g)	0.025	1.429	0.217
KOH (g)	0.01		
HCl (g)	0.02		
HNO_3 (g)		2.10	0.90
MWNTs (g)	1.00	1.00	1.00

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่ากระบวนการทั้ง 3 สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณที่ค่อนข้างต่างกัน, ความบริสุทธิ์มีค่าใกล้เคียงกัน และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน แต่สำหรับความแตกต่างนี้ถือว่าไม่มีผลมากนักสำหรับการนำ MWNTs ไปใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุอื่น และจากตารางที่ 4 เมื่อทำการประมาณข้อมูลแล้วพบว่า CVD2 มีการใช้ก๊าซไนโตรเจนในปริมาณมากเมื่อเทียบกับวิธีการอื่น ๆ และยังใช้คะตะลิสต์ในปริมาณมากกว่าอีกด้วย จึงเป็นผลให้ต้องใช้กรดไนตริกในปริมาณมากตามไปด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การประเมินวัฏจักรชีวิต

การศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง สามารถทำได้หลายวิธี แต่มีวิธีการหนึ่งที่สามารถประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ตลอดทั้งช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ นั่นคือ การประเมินวัฏจักรชีวิต ในงานวิจัยนี้มีขอบเขตของการประเมินวัฏจักรตั้งแต่การสกัดวัตถุดิบจนถึงกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs แสดงได้ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงขอบเขตในการประเมินวัฏจักรชีวิต

สำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 จะต้องป้อนค่าต่าง ๆ ที่ใช้และเกิดขึ้นในกระบวนการลงในโปรแกรม SimaPro6.0 ซึ่งจะต้องมีการคำนวณเพื่อเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในรูปของมวลสารทั้งหมด ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลสำหรับป้อนลงในโปรแกรม SimaPro6.0

	Material	CVD1 (g)	CVD2 (g)	CVD3 (g)
Input	C_2H_6	0.4821		
	C_2H_2		9.9490	0.3785
	H_2	0.0321		0.2911
	N_2		1250	
	Catalyst	0.0500	1.4286	0.2174
	KOH	0.0500		
	HCl	0.0200		
	HNO_3		2.1	0.9

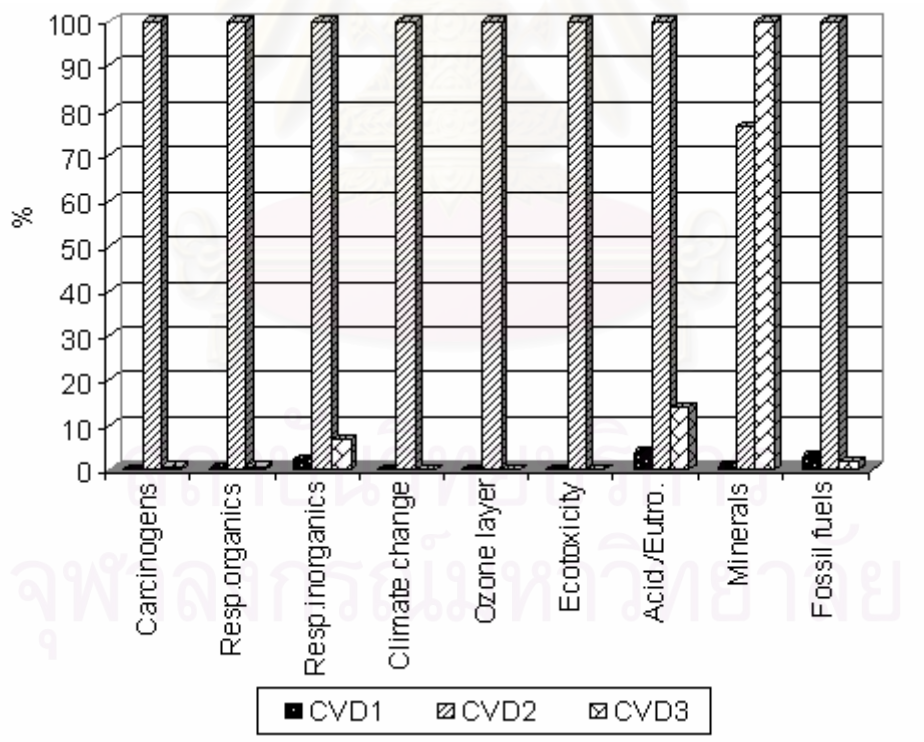
ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลสำหรับป้อนลงในโปรแกรม SimaPro6.0 (ต่อ)

	Material	CVD1 (g)	CVD2 (g)	CVD3 (g)
Metal on Catalyst	Fe	0.025	0.0357	
	Co		0.0357	
	Co			0.0326
	Mo			0.0326
Output Cat.preparation	NO_2	0.0123	0.0880	0.0508
	CH_3OH		0.0387	
	CO		0.0339	
	N_2			0.0285
	H_2			0.0082
Output CVD	N_2		1250	
	H_2	0.2089	1.5306	0.3494
Output Purification	$FeCl_3$	0.0290		
	$KAl(OH)_4$	0.1051		
	$Co(NO_3)_2$		0.0660	0.0602
	$Ca(NO_3)_2$		2.5966	
	CO_2		0.5971	
	$Fe(NO_3)_3$		0.3601	
	NO_2		0.1437	
	$Mg(NO_3)_2$			0.5630
	$Mo(NO_3)_6$			0.1591
	H_2O		0.3005	0.1251
	H_2	0.0003		
	NO_2			0.1446
Out put Product	MWNTs	1	1	1

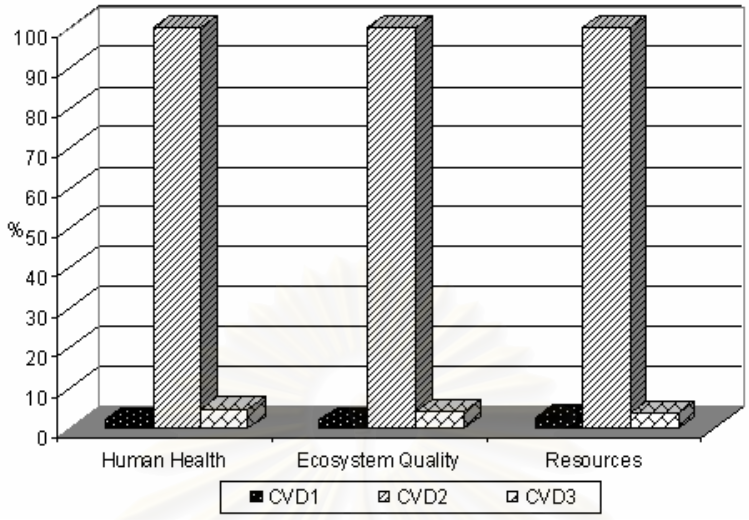
4.1 ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ MWNTs

ในการประเมินวัฏจักรชีวิตโดยใช้โปรแกรม SimaPro6.0 นั้นจะเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของแต่ละกระบวนการเทียบกันว่าส่งผลมากน้อยกว่ากันอย่างไร ถ้าส่งผลมากที่สุดจะคิดเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งต้องคิดทั้งในแง่ของวัสดุและพลังงานที่ใช้ แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการ CVD เหมือนกัน ในแง่ของพลังงานที่ใช้จึงไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงวิเคราะห์เฉพาะผลที่เกิดจากการใช้สารเคมีเท่านั้น ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการทั้ง 3 แสดงผลในลักษณะกราฟ ผลกระทบในด้านต่าง ๆ มีดังนี้ เป็นสารก่อมะเร็ง, ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์, ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์, ภาวะโลกร้อน, การลดลงของชั้นโอโซน, ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์, ภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน, การใช้ทรัพยากรแร่และการใช้เชื้อเพลิง แต่ถ้าสรุปวิเคราะห์เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ จะได้แก่ สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์และการใช้ทรัพยากร

4.1.1 กราฟเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นในด้านต่าง ๆ ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3



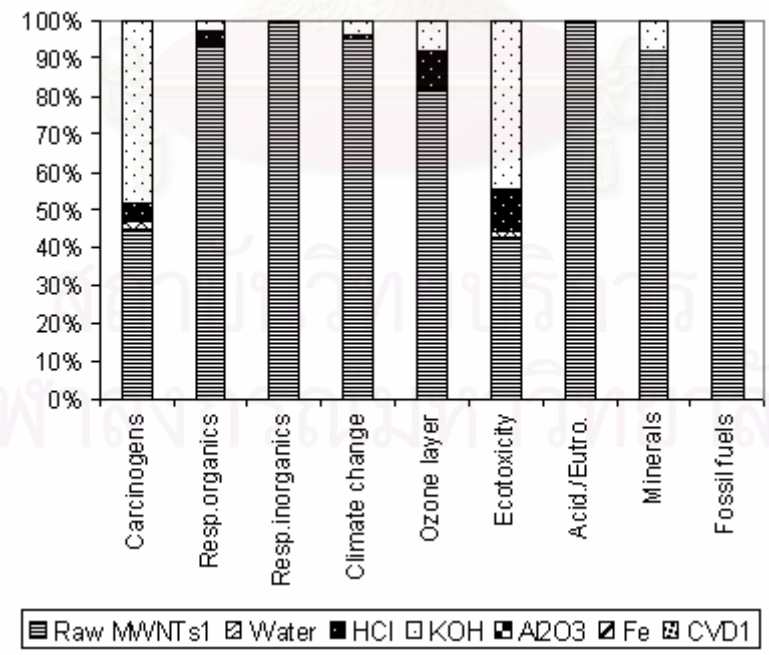
รูปที่ 20 แสดงผลกระทบในด้านต่าง ๆ ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 สำหรับการผลิต MWNTs 1 กรัม ใน 1 ชั่วโมง



รูปที่ 21 แสดงผลกระทบใน 3 ด้านหลัก ๆ ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 สำหรับการผลิต MWNTs 1 กรัมใน 1 ชั่วโมง

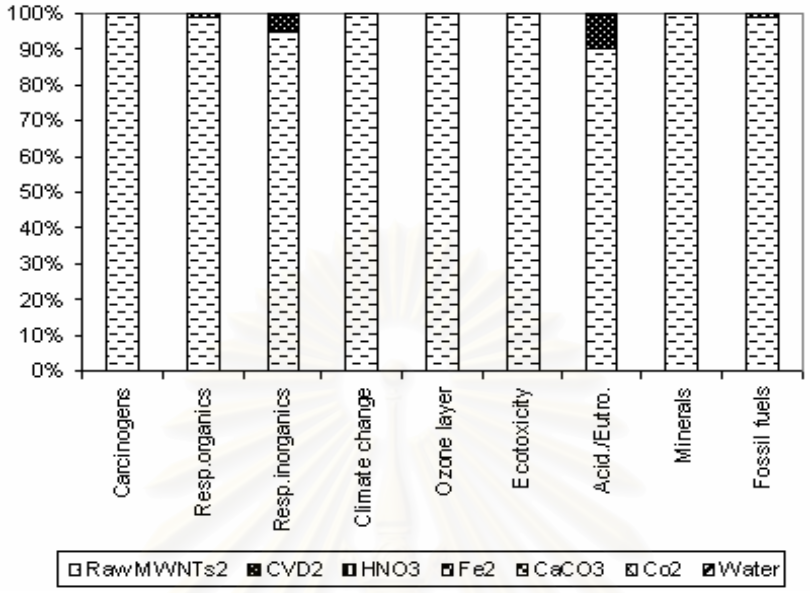
เมื่อทำการวิเคราะห์กระบวนการสังเคราะห์ทีละกระบวนการ ได้ผลดังรูปที่ 21-23

4.1.2 กราฟผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD1



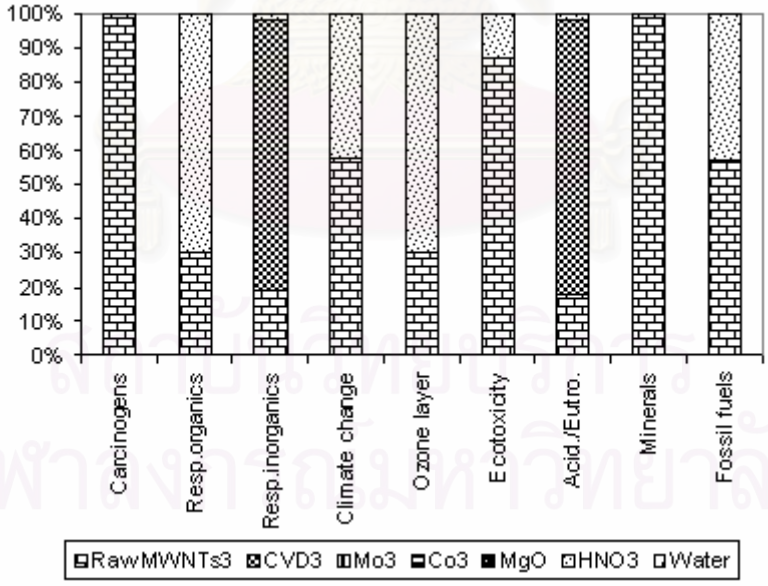
รูปที่ 22 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD1

4.1.3 กราฟผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD2



รูปที่ 23 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD2

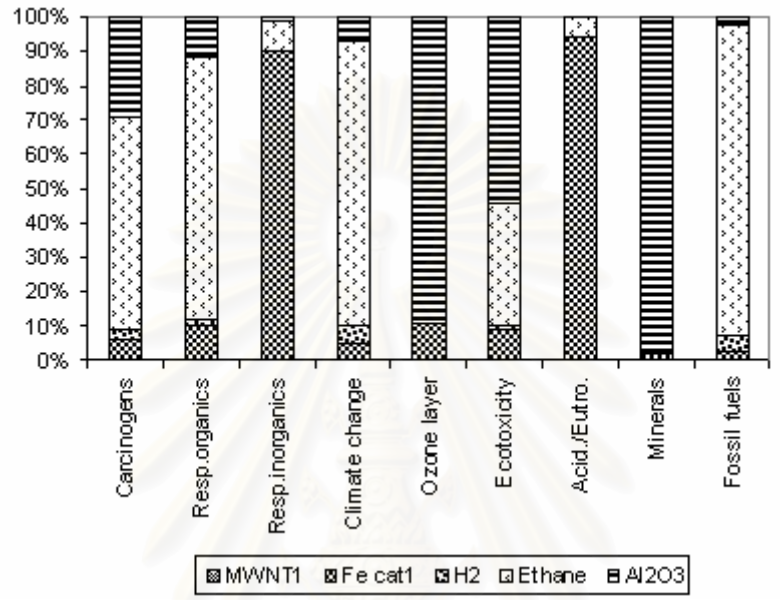
4.1.4 กราฟผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD3



รูปที่ 24 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs โดยกระบวนการ CVD3

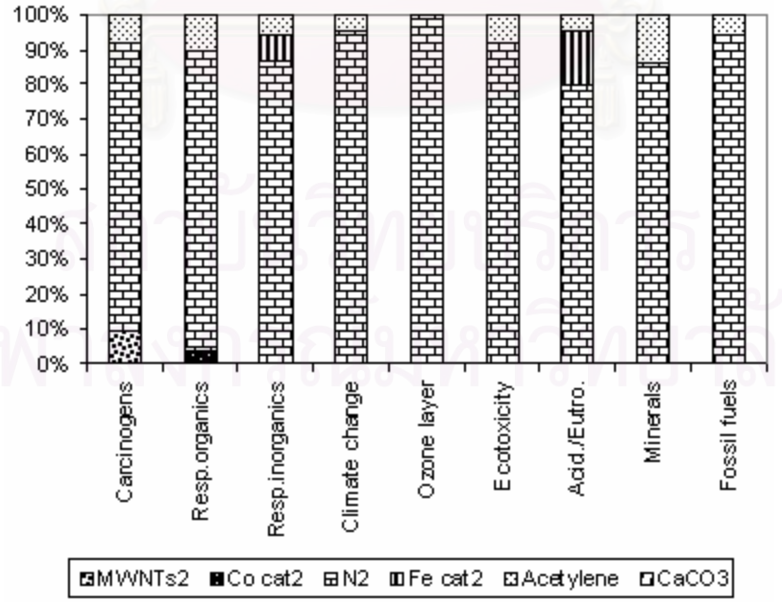
เมื่อทำการวิเคราะห์การสังเคราะห์ Raw MWNTs (ก่อนกระบวนการทำให้บริสุทธิ์) ได้ผลดังรูปที่ 24-26

4.1.5 กราฟผลระทบของการสังเคราะห์ MWNTs 1



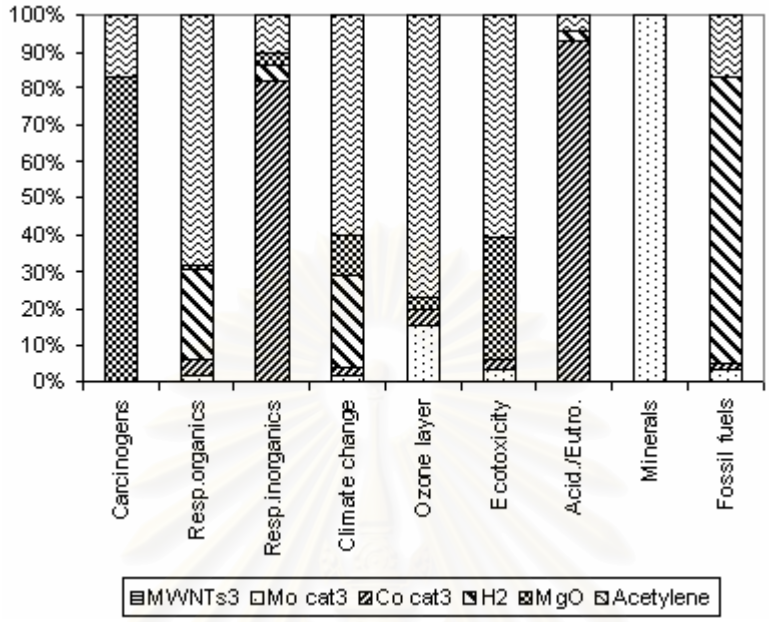
รูปที่ 25 แสดงผลระทบของการสังเคราะห์ MWNTs 1

4.1.6 กราฟแสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs2



รูปที่ 26 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs2

4.1.7 กราฟแสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs3



รูปที่ 27 แสดงผลกระทบของการสังเคราะห์ MWNTs3

4.2 สรุปผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการสังเคราะห์ MWNTs

จากรูปที่ 20 การสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD2 ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลาย ๆ ด้านสูงสุด เช่น เป็นสารก่อมะเร็ง, ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์ ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์, ภาวะโลกร้อน, การลดลงของชั้นโอโซน, ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์, ภาวะการเกิดฝนกรด/สาหร่ายเติบโตผิดปกติ และการใช้เชื้อเพลิง มีเพียงการใช้ทรัพยากรแร่ที่ส่งผลน้อยกว่ากระบวนการ CVD3 แต่ก็ยังส่งผลในปริมาณมาก เมื่อเทียบกับกระบวนการ CVD1 ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทุกด้านในปริมาณน้อยมาก สำหรับกระบวนการ CVD3 ส่งผลชัดเจนในเรื่องของการใช้ทรัพยากรแร่, ผลกระทบของระบบหายใจจากสารอนินทรีย์และภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน

เมื่อวิเคราะห์เป็นประเภทหลัก ๆ จากรูปที่ 21 พบว่าการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD1 ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์, ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด ถัดมา คือ กระบวนการ CVD3 ส่วนกระบวนการ CVD2 ส่งผลกระทบต่อทุกประเภทมากที่สุด

จากการวิเคราะห์กระบวนการ CVD1 (รูปที่ 22) พบว่า ผลกระทบส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเกิดจากการสังเคราะห์ MWNTs1 (ก่อนการทำให้บริสุทธิ์) โดยเฉพาะส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์, ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์, ภาวะโลกร้อน, การลดลงของชั้นโอโซน, ภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน, การใช้ทรัพยากรแร่และการใช้เชื้อเพลิง รองลงมา คือ การผลิตโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลในด้านของการเป็นสารก่อมะเร็งและความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์

การสังเคราะห์ MWNTs 1 (รูปที่ 25) ก่อนเข้ากระบวนการทำให้บริสุทธิ์ ผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากอีเทน, อลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็ก โดยการผลิตอีเทนส่งผลในด้านของเป็นสารก่อมะเร็ง, ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์, ภาวะโลกร้อนและการใช้เชื้อเพลิง ส่วนการผลิตอลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลกระทบในด้านการใช้ทรัพยากรแร่, การลดลงของชั้นโอโซนและความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ การสังเคราะห์เหล็กจากสารละลาย $Fe(NO_3)_3$ ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์และภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน

จากการวิเคราะห์กระบวนการ CVD2 (รูปที่ 23) ผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากการสังเคราะห์ MWNTs2 (ก่อนการทำให้บริสุทธิ์) จากรูปที่ 26 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากการใช้ไนโตรเจนเป็นก๊าซตัวพาในกระบวนการ CVD ซึ่งในกระบวนการนี้มีการใช้ก๊าซไนโตรเจนในปริมาณมาก (มากกว่ากระบวนการอื่นหลายเท่า) การผลิตก๊าซไนโตเจนส่งผลกระทบในทุก ๆ ด้าน

ผลกระทบที่เกิดขึ้นในกระบวนการ CVD3 (รูปที่ 24) ส่วนใหญ่เกิดจากการสังเคราะห์ MWNTs3 (ก่อนการทำให้บริสุทธิ์) โดยส่งผลในด้านเป็นสารก่อมะเร็ง, ภาวะโลกร้อน, ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์, การใช้ทรัพยากรแร่และการใช้เชื้อเพลิง การใช้กรดไนตริกส่งผลในหลายด้านด้วยกัน คือ ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์, การลดลงของชั้นโอโซนและการใช้เชื้อเพลิง กระบวนการ CVD3 มีผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์ และภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน

จากรูปที่ 27 เมื่อพิจารณาการสังเคราะห์ MWNTs3 (ก่อนการทำให้บริสุทธิ์) พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากอะเซทิลีน, โมลิบดีนัม, โคบอลต์, ไฮโดรเจนและแมกนีเซียมออกไซด์ โดยการผลิตอะเซทิลีนส่งผลมากในด้านส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์, ภาวะโลกร้อน, การลดลงของชั้นโอโซนและความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ การสังเคราะห์โมลิบดีนัมจากสารละลาย $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ ส่งผลกระทบมากในด้านการใช้ทรัพยากรแร่ การสังเคราะห์โคบอลต์จากสารละลาย

$Co(NO_3)_2$ ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์และภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน การผลิตไฮโดรเจนส่งผลมากในด้านการใช้เชื้อเพลิง และการผลิตแมกนีเซียมออกไซด์ส่งผลกระทบในด้านเป็นสารก่อมะเร็ง และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์

เมื่อพิจารณาจากผลกระทบที่เกิดขึ้นของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการ CVD1 ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการผลิตอีเทนและการผลิตคะตะลิสต์ (เหล็ก)

กระบวนการ CVD 2 ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากรมากที่สุด ผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากไนโตรเจน ซึ่งในกระบวนการนี้มีการใช้ไนโตรเจนในปริมาณมาก

สำหรับกระบวนการ CVD 3 ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากรมากกว่า CVD 1แต่ยังส่งผลน้อยกว่า CVD2 มาก ผลกระทบที่เกิดขึ้นเกิดจากการผลิตอะเซทิลีนและการผลิตคะตะลิสต์ (โคบอลต์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
ความเสี่ยง

ความเสี่ยงแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นกับความเสี่ยงในด้านการลงทุน ในบทนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตรายว่าสารที่ปล่อยออกมามีความเป็นพิษมากน้อยขนาดใดและปล่อยออกมา ณ จุดใดของกระบวนการ เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันอันตราย ส่วนที่สอง คือ การวิเคราะห์ผลตอบแทนที่คาดหวังและความเสี่ยงในเชิงธุรกิจ

5.1 การประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตราย

ในปัจจุบันนี้มนุษย์ต้องสัมผัส กับวัตถุอันตรายมากมายหลายชนิดในชีวิตประจำวัน วัตถุอันตรายเหล่านี้นำประโยชน์ทางเศรษฐกิจ และทำให้มนุษย์มีความเป็นอยู่อย่างสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมทั่วโลก และมลพิษดังกล่าวบางชนิดสามารถถูกขนส่งไปในภาคต่าง ๆ ของสิ่งแวดล้อมได้อย่างกว้างไกล (Long range transport) อันอาจก่อให้เกิดผลกระทบในระยะสั้นและระยะยาวต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในโลกนานาชนิด รวมทั้งมนุษย์ด้วย

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่ต้องทำงานเกี่ยงข้องกับวัตถุอันตรายโดยตรง ซึ่งมีโอกาสสัมผัสวัตถุอันตรายเหล่านี้ในปริมาณสูงมากกว่าบุคคลทั่วไปตามปกติ บทเรียนของหลายประเทศที่ได้ผ่านประสบการณ์เหล่านี้มาแล้วพบว่า การใช้เงินจำนวนมหาศาลและการบังคับใช้กฎหมายจะไม่สามารถแก้ปัญหามลพิษได้ แต่การจัดการความเสี่ยงที่มีประสิทธิภาพต้องมีฐานมาจากระบบการประเมินความเสี่ยงตามหลักวิทยาศาสตร์ จึงจะทำให้การแก้ปัญหามลพิษสำเร็จได้

ในปัจจุบันการประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตราย เป็นวิธีการที่มีผู้ประยุกต์ใช้โดยทั่วไปแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสหรัฐอเมริกา, แคนาดา, ออสเตรเลีย และองค์กรระหว่างประเทศ เช่น องค์การอนามัยโลก (WHO), องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) เป็นต้น

ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตราย

ขั้นตอนที่ 1 การบ่งชี้ถึงอันตราย(Hazard Identification)

เป็นการประเมินเชิงคุณภาพเพื่อตอบคำถามว่า วัตถุอันตรายชนิดใดชนิดหนึ่ง มีความเป็นพิษในตัวเองมากน้อยเพียงใด หรืออีกนัยหนึ่ง มีความน่าจะเป็นเพียงใดที่วัตถุอันตรายนั้นจะแสดงผลอันไม่พึงประสงค์ในลักษณะต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่สุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 2 การประเมินการตอบสนองต่อปริมาณ (Dose-Response Assessment) หรือบางครั้งเรียกว่า Hazard Characterization

ในการใช้ข้อมูลการทดสอบในสัตว์ทดลองมาประเมินความเสี่ยงอันตรายในสภาพการใช้ของมนุษย์นั้น ต้องการทำอนุมาน (Extrapolation) หลายประเด็น โดยเฉพาะประเด็นเกี่ยวกับ

- การอนุมานเนื่องจากความแตกต่างระหว่างชนิดของสัตว์ทดลอง ซึ่งมีขนาด, ช่วงชีวิต, เมตาบอลิสึมแตกต่างจากมนุษย์ การดูดซึมสารต่างกัน ทำให้ต้องมีการอนุมานขนาดเมื่อใช้สัตว์ทดลองชนิดต่าง ๆ ในการทดสอบพิษ

- การอนุมานขนาดและผลที่คาดว่าจะเกิด เมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับขนาดและผล จากวัตถุอันตรายขนาดต่ำมากจากสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นสภาพที่มนุษย์ได้รับจริง เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบในสัตว์ทดลองที่ได้รับวัตถุอันตรายในขนาดสูงกว่านั้นมาก

วิธีการอนุมานข้อมูลดังกล่าว ในปัจจุบันยังคงมีความแตกต่างของวิธีการและค่าที่นำมาใช้ รวมถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีผู้คิดขึ้น เพราะความแตกต่างดังกล่าวเป็นสาเหตุให้ค่าตัวเลขการประเมินความเสี่ยงต่อพิษของวัตถุอันตรายมีความแตกต่างกันได้

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินสัมผัส (Exposure Assessment)

เนื่องจากการสัมผัสมีความสัมพันธ์กับขนาดของวัตถุอันตรายในร่างกาย และขนาดของวัตถุอันตรายในร่างกายมีความสัมพันธ์กับพิษของวัตถุอันตราย ดังนั้นการสัมผัสจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการประเมินความเสี่ยงจากพิษของวัตถุอันตราย

ขั้นตอนที่ 4 การอธิบายลักษณะความเสี่ยง (Risk Characterization)

เป็นการนำข้อมูลที่รวบรวมในขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 นำมาเชื่อมโยงเพื่อประเมินความรุนแรงหรือความเป็นไปได้ที่จะเกิดพิษจากวัตถุอันตราย

สำหรับการประเมินความเสี่ยงของการผลิต MWNTs นั้นจะพิจารณาในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 3 ว่าสารเคมีที่ปล่อยมานั้นมีความเป็นพิษมากน้อยเพียงใด รวมทั้งพิจารณาว่าเกิดการปล่อยหรือหลุดรอดของสารเคมี ณ จุดใดของกระบวนการ เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันอันตรายขณะปฏิบัติงาน

5.1.1 ข้อบ่งชี้ถึงอันตราย(Hazard Identification)

เป็นการประเมินเพื่อตอบคำถามว่า วัตถุอันตรายชนิดใดชนิดหนึ่งมีความเป็นพิษในตัวเองมากน้อยเพียงใด หรืออีกนัยหนึ่ง มีความน่าจะเป็นไปได้เพียงใดที่วัตถุอันตรายนั้นจะแสดงผลอันไม่พึงประสงค์ในลักษณะต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่สุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ

แนวทางในการบ่งชี้ถึงอันตราย ควรใช้วิธีการตัดสินโดยน้ำหนักของหลักฐาน (weight of evidence) ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงคุณภาพและความเพียงพอของหลักฐาน รวมทั้งชนิดและความสม่ำเสมอของการตอบสนองของสิ่งมีชีวิต โดยใช้ข้อมูลหลักจากการทดสอบระยะยาว, ระยะสั้น, การศึกษาทางเภสัชจลนศาสตร์, ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและการออกฤทธิ์ และการศึกษาด้านพิษวิทยาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

น้ำหนักของหลักฐานได้จากการพิจารณาการทดสอบพิษที่ทำในสัตว์ทดลอง โดยวิธีการที่เป็นที่ยอมรับและได้มาตรฐาน (เช่น มาตรฐานขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อม (สหรัฐอเมริกา) หรือมาตรฐานขององค์การระหว่างประเทศต่าง ๆ เป็นต้น) โดยการทดสอบดังกล่าวใช้หลักปฏิบัติที่ดีในห้องปฏิบัติการและมีระบบการประกันคุณภาพที่เข้ามาตรฐาน

วิธีการให้วัตถุอันตรายแก่สัตว์ทดลอง (Route of administration)

โดยทั่วไปมักเลือกวิถีการให้วัตถุอันตราย เหมือนกับวิถีที่มนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตที่ต้องการพิทักษ์จะสัมผัสในสภาพการใช้จริง และมักนิยมการทดสอบพิษโดยทางปาก (oral route) เพื่อใช้ทำนายผลที่เกิดขึ้นจากการได้รับวัตถุอันตรายโดยอุบัติเหตุ หรือการจงใจฆ่าตัวตาย บางครั้ง ใช้การ

ฉีดเข้าหลอดเลือดดำ (intravenous route) เพื่อวัดพิษเฉียนพลันในขั้นต้นที่ไม่มีองค์ประกอบของเมตาบอลิสึม และการดูดซึมเข้ามาเกี่ยว

การทดสอบแบบมาตรฐานในสัตว์ทดลอง

โดยทั่วไป เป็นที่ยอมรับว่าอันตรายที่ตรวจพบในสัตว์ทดลอง สามารถใช้ทำนายอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ได้ ยกเว้นเฉพาะในกรณีที่มีปรากฏอย่างเด่นชัดว่าข้อมูลที่เกิดในสัตว์ทดลองมีความแตกต่างไม่เกี่ยวข้องกับข้อมูลในมนุษย์ เช่น มีหลักฐานว่าการเปลี่ยนแปลงวัตถุอันตรายที่เกิดขึ้นในมนุษย์แตกต่างกับสัตว์ทดลอง เป็นต้น

การทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลัน(Acute exposure tests) เป็นการทดสอบโดยให้สารแก่สัตว์ทดลอง โดยวิธีที่เหมือนกับการได้รับสัมผัสสารในสภาพจริงมากที่สุด การให้มักให้ครั้งเดียว หรือต่อเนื่องภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นสัตว์ทดลองทั้งสองเพศ เพศละ 5-10 ตัว หลังจากนั้นเฝ้าสังเกตอาการของสัตว์ทดลองเป็นเวลานาน 14 วัน สัตว์ทดลองที่มีชีวิตเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะถูกฆ่า และนำไปตรวจด้านพยาธิวิทยาชีวเคมี เพื่อตรวจหาความผิดปกติต่อไป ค่ามาตรฐานที่บอกถึงการทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลัน คือ ค่า LD_{50}และ LC_{50}

รูปที่ 28 แสดงการป้อนสารเคมีแก่หนูทดลอง(Oral rat)

LD_{50} (Lethal Dose 50) หมายถึง ปริมาณ (dose) ของสารเคมีซึ่งคาดว่าจะทำให้สัตว์ทดลองที่ได้รับสารนั้นเพียงครั้งเดียว ตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่ง (50 %) ของจำนวนเริ่มต้น LD_{50} เป็นค่าที่คำนวณได้จากผลการศึกษา ซึ่งให้สัตว์ทดลองหลายกลุ่มได้รับสารเคมีที่ปริมาณต่าง ๆ กัน

ระยะเวลาที่เฝ้าสังเกตการตายของสัตว์ ประมาณ 2-3 วัน แต่จะไม่เกิน 2 สัปดาห์ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความเป็นพิษของสารเคมีในสัตว์ต่างชนิด ซึ่งมีน้ำหนักตัวแตกต่างกันได้ จึงรายงานค่า LD_{50} เป็นน้ำหนักของสารเคมีต่อน้ำหนักของสัตว์ทดลอง เช่น LD_{50} (oral) ของ benzene ในหนู rat เท่ากับ 4,900 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

LC_{50} (Lethal Concentration 50) หมายถึง ความเข้มข้นของสารเคมีในอากาศหรือน้ำ ซึ่งคาดว่าจะทำให้สัตว์ทดลองที่สูดดมในระยะเวลาที่ระบุไว้หรืออาศัยในน้ำตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่ง (50%) ของจำนวนเริ่มต้น LC_{50} เป็นค่าที่คำนวณได้จากผลการศึกษา การทดลอง ทำโดยแบ่งสัตว์ทดลองออกเป็นกลุ่ม จำนวนสัตว์ในแต่ละกลุ่มเท่า ๆ กัน กลุ่มละ 10 ตัวหรือมากกว่า ให้สัตว์ทดลองสูดดม ดังนั้น การรายงานค่า LC_{50} จึงต้องระบุระยะเวลาของการทดลองด้วย เช่น LC_{50} (4 ชั่วโมง) ของ benzene ในหนู rat เท่ากับ 44,660 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร

TLV (Threshold Limit Value) คือ ค่าขีดจำกัดความเข้มข้นของสารเคมีในบรรยากาศการทำงาน ที่พนักงานเกือบทั้งหมดสัมผัสสารเคมีดังกล่าวซ้ำ ๆ โดย ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย กำหนดขึ้นโดย The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) เพื่อเป็นแนวทางหรือข้อแนะนำในการควบคุมสภาพแวดล้อมในการทำงาน แบ่งออกเป็น

- ค่าขีดจำกัดเฉลี่ยตลอดเวลาการทำงาน (TLV-TWA) คิดที่ 8 ชั่วโมงต่อวันหรือ 40 ชั่วโมงต่อสัปดาห์

- ค่าขีดจำกัดสำหรับการสัมผัสในระยะเวลาสั้น ๆ (TLV-STEL) สำหรับการสัมผัสกับสารเคมีในระยะเวลาสั้น ๆ ปกติประมาณ 15 นาที

- ค่าขีดจำกัดสูงสุด (TLV-Ceiling) จะต้องไม่เกิดค่านี้ไม่ว่าในเวลาใด ๆ ของการทำงาน

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า LD_{50}, LC_{50}, TLV-TWA และ TLV-STEL (MSDS, 2003) มาใช้เป็นค่ามาตรฐานในการประเมินความเป็นพิษของสารเคมีที่ปล่อยมาจากกระบวนการ

กระบวนการ CVD มีการปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษ ดังนี้

ในสถานะสารละลาย

$FeCl_3$ เมื่อถูกผิวหนังหรือเข้าตาจะทำให้เกิดอาการระคายเคือง สำหรับสารประกอบไอร์ออนที่ละลายได้ เมื่อกลืนกินเข้าไปจะทำให้คลื่นไส้และอาเจียน เมื่อมีการดูดซึมในปริมาณมากจะทำให้ระบบเลือดเลี้ยงหัวใจทำงานผิดปกติ เป็นพิษต่อตับและไต

$Ca(NO_3)_2$ เมื่อสูดดมฝุ่นจะทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ เมื่อสัมผัสผิวหนังทำให้ระคายเคืองเฉพาะที่ เมื่อกลืนกินทำให้คลื่นไส้และอาเจียน

$Fe(NO_3)_3$ เมื่อสูดดมทำให้เกิดอาการระคายเคือง เมื่อถูกผิวหนังหรือเข้าตาทำให้ระคายเคืองอย่างรุนแรง เมื่อกลืนกินทำให้ระคายเคืองและก่อให้เกิดอาการแพ้

$Co(NO_3)_2$ เมื่อสัมผัสผิวหนังอาจทำให้เกิดการแพ้ เมื่อกลืนกินทำให้เกิดอาการท้องร่วง, เบื่ออาหาร, ความดันโลหิตลดลง, กระสับกระส่าย, ชัก เป็นพิษต่อไต, หัวใจและตับอ่อน

$Mg(NO_3)_2$ เมื่อถูกผิวหนังหรือเข้าตา จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย เมื่อกลืนกินจะทำให้คลื่นไส้ และอาเจียน เมื่อดูดซึมในปริมาณมากทำให้อ่อนเพลีย, อาการโลหิตจาง เนื่องจากเกิดเมทฮีโมโกลบิน ปวดศีรษะ, หัวใจเต้นผิดปกติ, ความดันโลหิตลด, หายใจลำบาก, และกระตุก (spasm)

ในสถานะก๊าซ

NO_2 การหายใจเอาสารนี้เข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงต่อระบบทางเดินหายใจ อาการเริ่มต้นของการหายใจจะมีอาการปานกลางรวมทั้งระคายเคืองต่อตา และคอด้วย แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาการรุนแรงจะเกิดขึ้นภายใน 5-7 ชั่วโมง รวมทั้งอาการตัวเขียวคล้ำเนื่องจากขาดออกซิเจน หายใจลำบากยิ่งขึ้น อ่อนเพลียและตายในที่สุดเนื่องจากปอดบวมน้ำ การสัมผัสกับของเหลวจะเป็นเหตุให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงต่อผิวหนัง

CH_3OH เมื่อสูดดมไอระเหยทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ เมื่อเข้าตาจะทำให้ระคายเคือง เมื่อร่างกายดูดซึมเข้าไปจะทำให้คลื่นไส้, อาเจียน, ปวดศีรษะ, การมองเห็นผิดปกติ, ตาบอด (ทำอันตรายต่อระบบประสาทที่เกี่ยวกับการมองเห็น อย่างไม่สามารถแก้ไขได้) เกิดภาวะผิดปกติเนื่องจากกรดสะสม, ความดันโลหิตลดลง, กระสับกระส่าย, ชัก, ง่วงซึม, สลบ อาจแสดงอาการ หลังหมดระยะแฝง

CO การหายใจเข้าไปจะไปจับกับเลือดเกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งจะทำให้ออกซิเจนไม่สามารถถ่ายเทได้ ทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบเลือด การหายใจ อัตราการเต้นของหัวใจและระบบไหลเวียนโลหิต มีอาการปวดศีรษะ, มึนงง, หัวใจเต้นเร็ว, อ่อนเพลีย, ชัก, หมดสติ และอาจทำให้เสียชีวิตได้ สามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบประสาทและการทำลายสมองได้

CO_2 การหายใจเข้าไปทำให้คลื่นไส้, หัวใจเต้นผิดปกติ, ปวดศีรษะ, มึนงง, รบกวนการมองเห็น, หายใจไม่ออก, มีอาการชัก

ตารางที่ 6 แสดงค่ามาตรฐานด้านความปลอดภัยของสารเคมีต่าง ๆ ที่ปล่อยออกจากกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs

LD_{50} (oral, rat) mg/kg	**CVD1**	**CVD2**	**CVD3**
$FeCl_3$	1,872		
$Ca(NO_3)_2$		3,900	
$Fe(NO_3)_3$		3,250	
$Co(NO_3)_2$		691	691
$Mg(NO_3)_2$			5,440
LC_{50} (per 4 hour rat) mg/m^3	**CVD1**	**CVD2**	**CVD3**
NO_2	165.44	165.44	165.44
CH_3OH		83,840	
CO		1,807	
TLV-TWA (ppm)	**CVD1**	**CVD2**	**CVD3**
NO_2	3	3	3
CH_3OH		200	
CO_2		5,000	
CO		25	
TLV-STEL (ppm)	**CVD1**	**CVD2**	**CVD3**
NO_2	5	5	5
CH_3OH		250	
CO_2		30,000	

5.1.2 การประเมินสัมผัส

ในการสังเคราะห์ MWNTs, สารเคมีมีโอกาสหลุดรอดออกจากกระบวนการได้ 3 ทาง คือ ขั้นตอนของการเตรียมคะตะลิสต์, กระบวนการ CVD และกระบวนการทำให้บริสุทธิ์

การเตรียมคะตะลิสต์

ในการเตรียมคะตะลิสต์ จะมีการให้ความร้อนกับสารละลายที่มีส่วนประกอบของโลหะที่ใช้เป็นคะตะลิสต์ โดยทำการระเหยสารละลายออกไปโดยตรงแล้วจึงนำไปอบแห้ง ซึ่งจะทำให้มีสารเคมีระเหยออกมา และอาจทำอันตรายต่อร่างกายของผู้ปฏิบัติงานได้ สารเคมีที่ปล่อยออกมา เช่น NO_2, CO และ CH_3OH ซึ่งสารเคมีเหล่านี้เป็นอันตรายต่อร่างกายทั้งสิ้น

ดังนั้นการปฏิบัติงานในขั้นตอนนี้ จึงควรทำในตู้ดูดควัน และมีอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสวมอยู่ด้วยตลอดเวลา โดยเฉพาะแว่นตา, หน้ากากและถุงมือ

กระบวนการ CVD

กระบวนการ CVD ในระหว่างการสังเคราะห์อาจมีการหลุดรอดของสารเคมีออกมา คือ ก๊าซ H_2, N_2 และไฮโดรคาร์บอนที่อาจลงเหลืออยู่ การหายใจเอา H_2 เข้าไป จะไม่เป็นพิษที่อุณหภูมิและความดันปกติ ไฮโดรเจนจะแทนที่ออกซิเจน ซึ่งทำให้มีออกซิเจนไม่เพียงพอ ถ้าขาดออกซิเจน (เมื่อออกซิเจนในอากาศต่ำกว่า 18%) อาจมีผลต่อหัวใจและระบบประสาท ส่วนการหายใจเอา N_2 เข้าไปจะทำให้ร่างกายขาดออกซิเจน ทำให้มีอาการหายใจติดขัด, หายใจถี่รัว, อารมณ์แปรปรวน, กล้ามเนื้อทำงานไม่ประสานกัน, สับสน, ความรู้สึกช้า, เหนื่อย, ทำให้สลบ, คลื่นไส้, อาเจียน, อ่อนเพลีย หมดสติ และเสียชีวิตได้

การปฏิบัติงานในขั้นตอนนี้ จึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสวมอยู่ด้วยตลอดเวลา โดยเฉพาะแว่นตา, หน้ากากและถุงมือ

กระบวนการทำให้บริสุทธิ์

การทำ MWNTs ให้บริสุทธิ์จะใช้กรดและเบสเป็นสารสกัดโลหะคะตะลิสต์ออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะสกัดออกมาในสถานะของสารละลาย ขั้นตอนนี้อาจทำให้สารเคมีสัมผัสกับร่างกายของผู้ปฏิบัติงานได้ สารเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ คือ $FeCl_3$, $Ca(NO_3)_2$, $Fe(NO_3)_3$, $Co(NO_3)_2$, $Mo(NO_3)_6$ และ $Mg(NO_3)_2$ เมื่อสัมผัสกับสารเคมีเหล่านี้จะทำให้เกิดอาการระคายเคือง ขั้นตอนสุดท้ายคือการอบแห้ง ซึ่งอาจมีสารเคมีที่ตกค้างอยู่ระเหยออกมาได้ เช่น NO_2 และ CO_2

การปฏิบัติงานในขั้นตอนนี้ จึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลสวมอยู่ด้วยตลอดเวลา โดยเฉพาะแว่นตา, หน้ากากและถุงมือ

5.1.3 สรุปผลการประเมินความเสี่ยงของการสังเคราะห์ MWNTs

จากขั้นตอนการบ่งชี้ถึงอันตราย พบว่า $Co(NO_3)_2$ มีอันตรายมากที่สุด ซึ่งเป็นสารเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการ CVD2 และ CVD3 ส่วนกระบวนการ CVD1 มี $FeCl_3$ เกิดขึ้นแต่มีความเป็นพิษน้อยกว่ามาก สารเคมีทั้ง 2 นี้เกิดขึ้นในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์

สำหรับ NO_2 ซึ่งเป็นก๊าซที่มีอันตรายมากที่สุด มีโอกาสหลุดรอดออกจากขั้นตอนการเตรียมคะตะลิสต์ของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 และขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ของ CVD2 และ CVD3

เมื่อพิจารณาจากความเสี่ยงที่เกิดขึ้นของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการ CVD1 มีความเสี่ยงน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดสารเคมีที่เป็นอันตรายน้อยกว่า สำหรับขั้นตอนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด คือ การเตรียมคะตะลิสต์ที่มีโอกาสปล่อยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นในระหว่างปฏิบัติงานในขั้นตอนนี้จึงควรระมัดระวังมากเป็นพิเศษ โดยการสวมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล สำหรับองค์กรควรมีการวางมาตรการด้านความปลอดภัย เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

5.2 ผลตอบแทนที่คาดหวังและความเสี่ยง

นักวิจัยส่วนใหญ่มุ่งศึกษาทำการทดลอง เพื่อให้กระบวนการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของตนมีประสิทธิภาพดีกว่างานวิจัยที่เคยมีมา โดยยึดหลักวิชาการประยุกต์ทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์ให้สามารถเกิดผลผลิตที่ดี แต่บ่อยครั้งก็พบว่ากระบวนการเหล่านั้นไม่เป็นผลดีในเชิงเศรษฐศาสตร์ซึ่งหมายความว่าไม่ประหยัดนั่นเอง ในปัจจุบันนี้เนื่องจากความจำกัดของทรัพยากร เช่น วัสดุ แรงงาน ทรัพย์สิน รวมทั้งเวลา ทำให้กระบวนการผลิตมีข้อจำกัดสูงขึ้น การพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านคุณค่าหรือประสิทธิภาพของกระบวนการเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายจึงมีบทบาทมากขึ้น

ในเรื่องของธุรกิจไม่ว่าจะเป็นการวางแผนทางการตลาดหรือการผลิต โดยเฉพาะทางการเงิน ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการพิจารณาในปัจจุบันคือข้อมูลที่เกิดจากการคาดการณ์ถึงผลที่จะเกิดในอนาคตอันไม่แน่นอน นักลงทุนจึงต้องพิจารณาถึงผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับจากการลงทุนและความไม่แน่นอนของผลตอบแทน ซึ่งเรียกว่า ความเสี่ยง

ผลตอบแทน(Return)

จากวัตถุประสงค์ในการประกอบธุรกิจ คือ “เพื่อทำให้มูลค่ากิจการสูงสุด” มูลค่ากิจการในที่นี้หมายถึงมูลค่าตามราคาตลาด ดังนั้นในการพิจารณาผลตอบแทนจะพิจารณาจากกระแสเงินสดที่เกิดจากการลงทุนนั้น ๆ ไม่ใช่กำไรทางบัญชี การที่ผู้ลงทุนนำเงินไปลงทุนแทนที่จะใช้จ่ายในขณะนี้ ก็เพราะผู้ลงทุนหวังว่าจะได้รับผลประโยชน์จากการลงทุนนั้นในอนาคตมากกว่าเงินที่ลงทุนไป อันทำให้ผู้ลงทุนมีความมั่งคั่งและความพึงพอใจมากขึ้น ซึ่งเป็นผลตอบแทนจากการลงทุน ดังนั้นเมื่อพูดถึงผลตอบแทนจากการลงทุน จะหมายถึงผลประโยชน์ที่พึงจะได้รับจาการลงทุนที่ทำให้ส่วนของผู้ลงทุนมีมูลค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลงทุนเป็นเรื่องของการจ่ายเงินสดลงทุน ผลประโยชน์หรือผลตอบแทนที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบจึงควรอยู่ในรูปของกระแสเงินสดเช่นกัน

ผลตอบแทน = กระแสเงินสดรับปลายงวด- เงินลงทุนต้นงวด

$$\text{อัตราผลตอบแทน} = \frac{\text{เงินสดรับปลายงวด-เงินลงทุนต้นงวด}}{\text{เงินลงทุนต้นงวด}}$$

ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นสิ่งสำคัญของโครงการ จุดคุ้มทุนหรือจุดเท่าทุน คือ จุดซึ่งรายได้จากการลงทุนคุ้มกับค่าลงทุน หรืออีกนัยหนึ่งหมายถึง จุดที่แสดงค่าใช้จ่ายกับรายรับเท่ากัน ซึ่งมีความหมายว่าเป็นจุดซึ่งมีกำไรเป็นศูนย์นั่นเอง

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน (Cost) รายได้ (Revenue) และผลกำไร (Profit) ซึ่งผันแปรไปตามความเปลี่ยนแปลงของปริมาณการผลิต (Volume) เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางเศรษฐศาสตร์ของสถานะต่าง ๆ ในระยะสั้น

ขั้นตอนในการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนสรุปได้ดังนี้

1. วิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมของต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เพื่อจะได้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายซึ่งแปรผันไปตามปริมาณเพิ่มขึ้นหรือลดลงของผลผลิต

ถ้า N = ปริมาณการผลิต

C = ค่าใช้จ่าย

$C \propto N$

$C = KN$

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเพื่อแสดงความสัมพันธ์กับปริมาณการผลิตนี้ ทำให้เกิดความจำเป็นต้องแยกชนิดของค่าใช้จ่ายเป็นค่าใช้จ่ายคงที่หรือต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และค่าใช้จ่ายแปรผัน (Variable Cost)

ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน (Fixed and Variable Cost)

ต้นทุนคงที่ คือ ต้นทุนที่คิดสำหรับทรัพย์สินที่ให้บริการหรือผลิตผลได้ โดยต้นทุนไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนหน่วยที่ให้บริการหรือที่ผลิตได้ เช่น ต้นทุนเครื่องจักรและตัวอาคารโรงงานจะเป็นต้นทุนคงที่ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าโรงงานจะไม่ได้ผลิตอะไร หรือผลิตมากขึ้นภายใต้สมรรถภาพที่มีอยู่ ส่วนต้นทุนแปรผันจะเปลี่ยนไปตามจำนวนหน่วยผลิตที่เพิ่มขึ้น เช่น ค่าวัสดุ ถ้าจำนวนวัสดุใช้เพิ่มขึ้น ค่าวัสดุก็จะสูงขึ้นด้วย

2. ศึกษารายได้ (Revenue) ที่เกิดจากการขายผลิตภัณฑ์ ซึ่งโดยมากจะผันแปรโดยตรงกับปริมาณการขาย ถ้าจำนวนที่ผลิตได้ทั้งหมดสามารถจัดขายเป็นรายได้ทั้งหมด รายได้ก็จะผันแปรโดยตรงกับปริมาณการผลิตเช่นกัน

ถ้า R = รายได้

$R \alpha N$

$R = pN$

P = ราคาขายผลิตภัณฑ์ต่อหน่วย(Price)

อย่างไรก็ตาม รายได้ก็ไม่จำเป็นต้องแปรผันโดยตรงกับจำนวนการผลิตหรือปริมาณการขายเสมอไป เพราะราคาของผลิตภัณฑ์ไม่จำเป็นต้องคงที่เสมอไป บางครั้งราคาก็แปรผันตามจำนวนการขายได้ เช่น ถ้าขายได้จำนวนมากขึ้น ราคาอาจจะลดลง

3. เมื่อได้รายละเอียดของค่าใช้จ่ายและรายได้ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณการผลิตแล้ว นำมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อหาผลกำไรจากค่าของรายได้ลบค่าใช้จ่าย

ถ้า P = ผลกำไร(Profit)

$P = R-C$

จุดคุ้มทุน คือ จุดซึ่งค่าใช้จ่ายเท่ากับรายรับหรือกำไรเป็นศูนย์

$P = 0$ หรือ $R = C$

5.2.1 ต้นทุนการสังเคราะห์ MWNTs

ต้นทุนคงที่

ต้นทุนคงที่ของการสังเคราะห์ MWNTs ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ต้นทุนจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ภายในห้องปฏิบัติการ มาเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs ทั้ง 3 กระบวนการ ซึ่งกระบวนการทั้ง 3 เป็นกระบวนการ CVD เหมือนกัน ดังนั้นต้นทุนคงที่จึงมีค่าเท่ากันหรืออาจแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ค่าที่ได้นี้เป็นค่าโดยประมาณของราคาอุปกรณ์ต่าง ๆ ต้นทุนคงที่แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงต้นทุนคงที่ในการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการCVD

เครื่อง	ราคา (บาท)*
Hotplate & Stirrer	3,500
Oven	40,000
Muffle furnace	130,000
Tube furnace	150,000
Tube line gas	3,000
Flow meter	12,000
เครื่องแก้ว	625
ท่อควอตซ์	5,000
รวม	**344,125**

*ราคาเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ อ้างอิงจากราคาขายของบริษัทประภาชัย จำกัด

ต้นทุนแปรผัน

เนื่องจากกระบวนการทั้ง 3 เป็นกระบวนการ CVD เหมือนกัน ต้นทุนคงที่หรือต้นทุนที่เกิดจากเครื่องมือและอุปกรณ์จึงมีค่าเท่ากัน ดังนั้นต้นทุนที่เป็นตัวชี้วัดว่ากระบวนการใดมีต้นทุนต่ำกว่าก็คือ ต้นทุนแปรผันนั่นเอง ต้นทุนจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ CVD ทั้ง 3 แสดงได้ดังตารางที่ 8 ราคาสารเคมีต่าง ๆ อ้างอิงจากราคาของสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (Aldrich Chemical, 2004) ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับบริษัทขายสารเคมี สำหรับราคาก๊าซอีเทน, อะเซทีลีน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจนเป็นราคาที่ขายในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ CVD ทั้ง 3 ต่อการสังเคราะห์ MWNTs 1 กรัม

ต้นทุนจากสารเคมี	ต้นทุน (บาท)		
	CVD1	CVD2	CVD3
C_2H_6	0.3995		
C_2H_2		0.2415	0.0092
H_2	0.0007		0.0123
N_2		6.0000	
Al_2O_3	3.0400		
KOH	0.2043		
HCl	0.8969		
$Fe(NO_3)_3.9H_2O$	2.9472	21.0515	
$Co(CH_3COO)_2.4H_2O$		3.6514	
$CaCO_3$		10.2600	
HNO_3		2.2920	
$Co(NO_3)_2.6H_2O$			11.3258
$(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$			5.0767
MgO			2.8000
H_2O	5.7600	5.7600	5.7600
Total cost	**13.25**	**49.26**	**24.98**

จากตารางจะเห็นว่ากระบวนการ CVD2 มีค่าใช้จ่ายจากสารตั้งต้นมากที่สุด ซึ่งเกิดจากกระบวนการนี้สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณน้อยมาก เมื่อคำนวณเป็นกรัมจึงทำให้ปริมาณสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่ใช้เพิ่มขึ้นมากต้นทุนในการผลิตจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับกระบวนการ CVD1 มีค่าใช้จ่ายจากสารตั้งต้นน้อยที่สุด เนื่องจากกระบวนการสามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ 40 กรัม เมื่อคำนวณเป็นต่อกรัมจึงทำให้ใช้สารตั้งต้นลดลง ต้นทุนจึงต่ำที่สุด

ต้นทุนแปรผันที่สำคัญอีกค่าหนึ่ง คือ ค่าไฟฟ้าโดยคิดจากขั้นตอนที่มีการใช้ไฟฟ้า คือ การระเหยโดยใช้ Hotplate & Stirrer, การอบแห้งโดยใช้ Oven, การ Calcine โดยใช้ Muffle furnace และการสังเคราะห์ใช้ Horizontal tube furnace, ค่าไฟฟ้าคิดจากกิจการขนาดเล็ก อัตราปกติแบบอัตราก้าวหน้าของการไฟฟ้านครหลวง แสดงได้ตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงค่าไฟฟ้าของการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD ทั้ง 3 กระบวนการ

กระบวนการ	Unit (kWh)	ค่าไฟฟ้า (บาท)/ การสังเคราะห์ 1 ครั้ง	ปริมาณ MWNTs (g) ที่สังเคราะห์ได้ 1 ครั้ง	ค่าไฟฟ้า (บาท)/ MWNTs 1 g
CVD1	27.207	49.101	40.000	1.228
CVD2	23.041	41.583	0.035	1188.079
CVD3	29.287	52.853	1.840	28.725

จะเห็นว่ากระบวนการ CVD2 มีค่าไฟฟ้าต่อครั้งในการสังเคราะห์ต่ำที่สุด แต่กระบวนการนี้สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณน้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ มาก เมื่อคำนวณเป็นค่าไฟฟ้าต่อกรัมของ MWNTs จึงมีค่าใช้จ่ายจากค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาก เมื่อรวมค่าใช้จ่ายจากสารตั้งต้นและค่าไฟฟ้าของกระบวนการทั้ง 3 แสดงได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงค่าใช้จ่ายต่อการสังเคราะห์ MWNTs 1 กรัม

ค่าใช้จ่าย	Cost (Baht)		
	CVD1	CVD2	CVD3
ค่าสารเคมี	13.25	49.26	24.98
ค่าไฟฟ้า	1.23	1188.08	28.72
รวม	**14.48**	**1237.34**	**53.71**

ในงานวิจัยนี้จะถือว่าค่าใช้จ่ายที่เกิดจากสารตั้งต้นและค่าไฟฟ้าต่อการผลิต MWNTs 1 กรัม เป็นต้นทุนแปรผัน โดยยกเว้นค่าแรงงานและค่าใช้จ่ายในการบริหารและการขาย ต้นทุนแปรผันในการผลิตจริงจึงมีค่ามากกว่าที่แสดงไว้ในตาราง จากตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่ากระบวนการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD1 มีต้นทุนต่อกรัมต่ำที่สุด

ราคาและคุณสมบัติของ MWNTs จากบริษัทต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 11 (Nanotechnology Now)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 11 แสดงราคาและคุณสมบัติของ MWNTs จากบริษัทต่าง ๆ

บริษัท	กำลังการผลิต	คุณสมบัติ	ราคา(บาท)
Catalytic Materials	1.2 kg/day	Diameter 10 nm Purity > 99.5 %	2,400/g
NanoLab	20-100 g/day	Diameter 30 ± 15 nm Length 1-5 microns Purity > 95% Residuals may include iron, cobalt, nickel.	5,600/g
NanoLab	20-100 g/day	Diameter 30 ± 15 nm Length 5-20 microns Purity > 95% Residuals may include iron, cobalt, nickel.	4,400/g
MER Corporation Nanotubes		Diameter 35 ± 10 nm Length 30 microns Purity of > 90% Metal (Fe) content less than 0.1%	2,400/g
Nanostructured & Amorphous Materials, Inc	30 - 50 kg/day	Diameter 10-30 nm Length 5-15 microns Purity > 95%	872/g
Nanostructured & Amorphous Materials, Inc	30 - 50 kg/day	Diameter 20-40 nm Length 5-15 microns Purity > 95%	792/g

จากตารางเมื่อเฉลี่ยราคาของ MWNTs จากหลาย ๆ บริษัท จะใช้ราคา 2,400 บาท เป็นราคาในการคำนวณหาผลตอบแทนและจุดคุ้มทุน

ผลตอบแทนของการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD1

จากการเปรียบเทียบต้นทุนแปรผันพบว่ากระบวนการ CVD1 มีต้นทุนต่ำที่สุด จึงเลือกกระบวนการนี้มาคำนวณหาผลตอบแทน การคำนวณหาผลตอบแทนคิดเป็น 1 ปี ของการลงทุน โดยคิดจากการลงทุนเมื่อต้นปีด้วยเงิน 344,125 บาทเป็นต้นทุนคงที่ และมีต้นทุนแปรผันในแต่ละกรัมของ MWNTs ที่ผลิตได้ สมมุติตลอดปีมีวันทำงาน 250 วันและทำงานวันละ 7 ชั่วโมง

การสังเคราะห์ MWNTs 1 ครั้ง ใช้เวลาทั้งหมด 35.5 ชั่วโมง สังเคราะห์ได้ 40 กรัม

1 ปี สามารถทำการผลิตได้ 49.3 ครั้ง สังเคราะห์ MWNTs ได้ 1,971.83 กรัม

ถ้าสามารถขายได้ทั้งหมดจะมีรายรับ = 4,732,394 บาท

ต้นทุนแปรผันทั้งหมด = 14.48x1,971.83 = 28,552 บาท

ต้องมีเงินลงทุนต้นงวด = 344,125 + 28,552 = 372,677 บาท

ดังนั้น มีอัตราผลตอบแทน $= \frac{4732394 - 372677}{372677} \times 100 = 1170\%$ ต่อปี

ซึ่งถือว่าเป็นการลงทุนที่มีผลตอบแทนมาก แต่อัตราผลตอบแทนนี้เป็นค่าที่สูงกว่าความเป็นจริง เนื่องจากต้นทุนแปรผันของการผลิตจะมีค่าแรงงานและค่าบริหารด้วย อีกทั้งรายรับอาจลดลงอีก เนื่องจากถ้ามีการสั่งซื้อในปริมาณมากจะซื้อได้ในราคาต่ำกว่าซื้อทีละกรัม

จุดคุ้มทุนของการสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD1 คำนวณได้ดังนี้

ค่าใช้จ่ายคงที่ = 344,125 บาท

ค่าใช้จ่ายแปรผัน = 14.48 บาท/กรัม

ค่าใช้จ่าย C = 344,125 + 14.48N บาท

ราคา MWNTs p = 2,400 บาท/กรัม

รายได้ R = 2,400N บาท

ณ จุดคุ้มทุน R = C

$2{,}400N = 344{,}125 + 14.48N$

$N = 144.3$ กรัม

จากผลการวิเคราะห์ จุดคุ้มทุนคือ ปริมาณผลิต 144.3 กรัม สรุปได้ว่า ถ้าการผลิต MWNTs ทำไม่ถึงจำนวน 144.3 กรัม การผลิตจะไม่คุ้มค่าการลงทุน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

จากการเปรียบเทียบต้นทุนของกระบวนการสังเคราะห์ทั้ง 3 กระบวนการ พบว่า การสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD1 มีค่าใช้จ่ายจากสารตั้งต้นและค่าไฟฟ้าต่ำที่สุดที่ 14.48 บาทต่อกรัม ส่วนกระบวนการ CVD 2 มีค่าใช้จ่ายสูงที่สุด เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณน้อยมาก เมื่อคำนวณเป็นกรัมจึงทำให้ปริมาณสารตั้งต้นต่าง ๆ รวมทั้งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นมาก ต้นทุนในการผลิตจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เมื่อนำกระบวนการผลิต MWNTs ด้วยกระบวนการ CVD 1 มาคำนวณหาผลตอบแทนตลอดปีพบว่ามีอัตราผลตอบแทน 1170% ซึ่งสูงมากแสดงถึงการลงทุนนี้มีผลตอบแทนสูง ดังนั้นกระบวนการ CVD1 จึงเป็นกระบวนการที่มีความน่าสนใจในการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรมมากที่สุดในด้านการลงทุนเพราะมีต้นทุนการผลิตต่ำสุด และต้องทำการผลิตอย่างน้อย 144.3 กรัม จะทำให้คุ้มค่ากับการลงทุน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุป

6.1 การสังเคราะห์ MWNTs

การสังเคราะห์ MWNTs ด้วยกระบวนการ Chemical Vapor Deposition (CVD) มีความน่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ๆ กระบวนการไม่ซับซ้อน และให้ผลิตภัณฑ์จำนวนมาก

เมื่อทำการประเมินวัฏจักรชีวิตและการประเมินความเสี่ยงของกระบวนการ CVD ทั้ง 3 พบว่า กระบวนการ CVD1 หรือ การสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนเป็นสารตั้งต้นและใช้เหล็กบนอะลูมินาเป็นคะตะลิสต์ มีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์ และการใช้ทรัพยากรน้อยที่สุด ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดจากการผลิตอีเทนและการผลิตคะตะลิสต์ (เหล็ก) และเป็นกระบวนการที่มีความเสี่ยงน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดสารเคมีที่เป็นอันตรายน้อยกว่าอีก 2 กระบวนการ สำหรับขั้นตอนที่มีความเสี่ยงมากที่สุด คือ การเตรียมคะตะลิสต์ที่มีโอกาสปล่อยก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นในระหว่างปฏิบัติงานในขั้นตอนนี้จึงควรระมัดระวังมากเป็นพิเศษ โดยการสวมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล อีกทั้งกระบวนการนี้ยังมีค่าใช้จ่ายจากต้นทุนของสารตั้งต้นและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่ำที่สุดอีกด้วย โดยมีอัตราผลตอบแทนตลอดปี 1170% และมีจุดคุ้มทุนที่ 144.3 กรัม

ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์ MWNTs โดยใช้อีเทนเป็นสารตั้งต้นและใช้เหล็กบนอะลูมินาเป็นคะตะลิสต์ จึงเป็นกระบวนการที่มีความเหมาะสมในการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรมมากที่สุด เมื่อประเมินจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม, ความเสี่ยง และต้นทุนการผลิต กระบวนการนี้สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ 20 กรัมต่อกรัมของคะตะลิสต์ต่อชั่วโมง MWNTs มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 นาโนเมตร ความบริสุทธิ์ 95-98%

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการประเมินกระบวนการ หรือเทคโนโลยีใหม่ในอนาคต โดยทำการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ MWNTs 3 กระบวนการ ที่มีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก แต่ในอนาคตย่อมต้องมีกระบวนการที่พัฒนาขึ้นและสามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้ในปริมาณมากเพิ่มขึ้น กระบวนการเหล่านั้น จึงมีความน่าสนใจในการลงทุนมากกว่า แต่อย่างไรก็ตาม

ควรนำกระบวนการนั้นมาทำการประเมินวัฏจักรชีวิตก่อน เพื่อจะได้รู้ถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงเพื่อสิ่งแวดล้อมของโลกในอนาคต

6.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางที่เสนอขึ้นเพื่อประเมินกระบวนการ หรือเทคโนโลยีใหม่ในอนาคต โดยในส่วนของการประเมินวัฏจักรชีวิต พิจารณาที่กระบวนการผลิตวัตถุดิบและการสังเคราะห์ MWNTs ส่วนการประเมินความเสี่ยงพิจารณาเฉพาะกระบวนการ CVD จึงยังมีแนวทางในการประเมินเพิ่มเติมอีก เช่น การประเมินการนำ MWNTs ไปใช้งานในด้านต่าง ๆ หรือการกำจัดเศษซากของ MWNTs และการประเมินความเป็นพิษของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นต้น

การใช้โปรแกรม SimaPro ในการประเมินและแสดงผลนั้น ตัวโปรแกรม SimaPro ยังมีข้อจำกัดทางด้านฐานข้อมูล เนื่องจากฐานข้อมูลส่วนใหญ่เป็นฐานข้อมูลของยุโรป การนำโปรแกรมนี้มาใช้ในประเทศไทยจึงเป็นการแสดงแนวโน้นของผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยอ้างอิงฐานข้อมูลจากยุโรป หากในอนาคตประเทศไทยมีการเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยงข้องกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ได้มากพอ ก็สามารถที่จะพัฒนาโปรแกรมประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับสภาวะในประเทศไทย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1.J.S.A. Bhat. Concerns of new technology based industries-the case of nanotechnology. Technovation 25 (2005): 457–462.

2.O.M.T. Rutger, L. Harro. Tracing emerging irreversibilities in emerging technologies: The case of nanotubes. Technological Forecasting & Social Change 72 (2005): 1094–1111.

3.X. Zeng , X. Sun, G. Cheng, X. Yan, X. Xu. Production of multi-wall carbon nanotubes on a large scale. Physica B 323 (2002): 330–332.

4.N. Nagaraju, A Fonseca, Z. Konya, J.B. Nagy. Alumina and silica supported metal catalysts for the production of carbon nanotubes. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 181 (2002): 57–62.

5.X.H. Chen, C.S. Chen, Q. Chen, F.Q. Cheng, G. Zhang, Z.Z. Chen. Non-destructive purification of multi-walled carbon nanotubes produced by catalyzed CVD. Materials Letters 57 (2002): 734– 738.

6.J. Muller, F. Huaux, N. Moreau, P. Misson, J. F. Heilier, M. Delos, M. Arras, A. Fonseca, J. B. Nagy, D. Lison. Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes. Toxicology and Applied Pharmacology 207 (2005): 221– 231.

7.Y. Nishioka, J. I. Levy, G. A. Norris, A. Wilson, P. Hofstetter, J. D. Spengler. Integrating Risk Assessment and Life Cycle Assessment: A Case Study of Insulation. Risk Analysis 22 (2002): 1003-1017.

8.S. I. Olsen, F. M. Christensen, M. Hauschild, F. Pedersen, H. F. Larsen, J. Torslov. Life cycle impact assessment and risk assessment of chemicals – a methodological comparison. Environmental Impact Assessment Review 21 (2001): 385-404.

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

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

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

12.ฝ่ายธุรกิจและสิ่งแวดล้อม. คู่มือการจัดทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย เมืองทองธานี อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี, 2547.

13.P.J.F. Harris. Carbon nanotubes and related structures: New materials for the Twenty-first century. Cambridge University, 1999.

14.G. Gulino, R. Vieira, J. Amadou, P. Nguyen, M. J. Ledoux, S. Galvagno, G. Centi, C. P. Huu. C2H6 as an active carbon source for a large scale synthesis of carbon nanotubes by chemical vapor deposition. Applied Catalysis A: General 279 (2005): 89–97.

15.E. Couteau, K. Hernadi, J. W. Seo, L. T. Nga, C. Miko, R. Gaal, L. Forr. CVD synthesis of high-purity multiwalled carbon nanotubes using CaCO3 catalyst support for large-scale production. Chemical Physics Letters 378 (2003): 9–17.

16.F. Kibria, M. Shajahan, Y. H. Mo, M. J. Kim, K. S. Nahm. Long activity of Co–Mo/MgO catalyst for the synthesis of carbon nanotubes in large-scale and application feasibility of the grown tubes. Diamond & Related Materials 13 (2004): 1865–1872.

17.ดรรชนีเวปไซต์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. MSDS. Available from: http://www. links.sc.chula.ac.th/index[2003]

18.Aldrich Chemical Co. Aldrich handbook of fine chemicals and laboratory equipment 2003-2004. Milwaukee WI USA, 2003.

19.Nanotechnology Now. Nanotube Surveys. Available from: http:// www. Nanotech-now.com.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรม SimaPro6.0

โปรแกรมสำเร็จรูป SimsPro มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เช่น มีการวิเคราะห์ผลกระทบตามระบบ ISO มีการเปรียบเทียบผลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเปรียบเทียบ มีฐานข้อมูล มีการแสดงผลในรูปตาราง หรือกราฟ เป็นโปรแกรมที่เหมาะสมกับวิศวกรสิ่งแวดล้อม วิศวกรออกแบบ ให้ความยืดหยุ่นในการเพิ่มข้อมูลใหม่ ใช้ระยะเวลาในการศึกษามาก มีการปรับปรุงฐานข้อมูล โปรแกรม LCA อื่นๆ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ SimaPro ก็มีการใช้งานอยู่บ้าง แต่ SimaPro มีข้อได้เปรียบที่สำคัญอีก 2 อย่าง คือ ราคาและการยอมรับของผู้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณลิขสิทธ์ที่ขายได้ของโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการสังเคราะห์ MWNTs

การประเมินผลกระทบ

การประเมินผลกระทบ ประกอบด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

การกำหนดบทบาท (Charaterisation)

เป็นขั้นตอนในการแสดงประเภทของผลกระทบให้อยู่ในเทอมของตัวบ่งชี้ (Indicater) โดยใช้ค่าแฟกเตอร์ (Characterization factor) ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากปริมาณน้ำหนักเป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบและทำการรวมค่าทั้งหมดของแต่ละผลกระทบตามสมการ

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

EP_j (Environmental impact potential) คือ ศักยภาพของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสำหรับผลกระทบประเภท j ใดๆ (kg substance equivalent)

Q (Quantity of substance) คือ ปริมาณมลภาวะสาร j ที่ปล่อยออกมา (kg substance j)

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

การหาขนาดของผลกระทบ (Normalization)

เป็นขั้นตอนในการแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์หรือการบริการโดยเปรียบเทียบกับผลผลิตหรือบริการที่ต้องการอ้างอิง

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

$NP_{j(product)}$ (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 สุขภาพมนุษย์, ระบบนิเวศน์, การใช้ทรัพยากร และรวมค่าของตัวชี้วัดทั้ง 3 ประเภทให้เป็นคะแนนเดี่ยว

$$WP_j = WF_j \times NP_j$$

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

WF_j (Weighting factor) คือค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ใด ๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

Eco-indicator 99

วิธีในการประเมินค่าทางผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี เช่น Ecoscarcity method และ Environmental theme method พัฒนาโดย Baumann (1994) EdIP (Environmental Design of Industrial Products) method พัฒนาโดย Wenzel (1997) EPS method พัฒนาโดย Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems และ Eco-indicator 99 พัฒนาโดย Pre' Consultants (1999) โดยวิธีนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายและมีระบบการให้

น้ำหนักที่สนับสนุนข้อมูลทางสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังถูกใช้เพื่อช่วยเหลือการออกแบบในการคัดเลือกวัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ขั้นตอนการหาค่าการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวิธี Eco-indicator 99

1. วัตถุดิบ, พลังงานและของเสียจะถูกแจกแจง ประเภทของผลกระทบซึ่งมีทั้งหมด 9 ประเภท
2. ผลกระทบทั้ง 9 ประเภท จะถูกจัดกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของกลุ่มเป้าหมาย
3. การให้น้ำหนักหรือความสำคัญและรวมคะแนนเป็นคะแนนเดี่ยว

กลุ่มเป้าหมายและประเภทของผลกระทบ มีดังนี้

Human Health (สุขภาพมนุษย์) ประกอบด้วย สารก่อมะเร็ง (Carcinogenic), ส่งผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอินทรีย์ (Respiration of organic substance), ผลกระทบต่อระบบหายใจจากสารอนินทรีย์ (Respiration of inorganic substance), ภาวะโลกร้อน (Climate change), การลดลงของชั้นโอโซน (Ozone depletion)

Ecosystem (ระบบนิเวศน์วิทยา) ประกอบด้วย ภาวะการเกิดฝนกรด/การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของแพลงค์ตอน (Acidification/Eutrophication), ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ (Ecotoxicity)

Resource depletion (การลดลงของทรัพยากร) ประกอบด้วย การใช้ทรัพยากรแร่ (Mineral), การใช้เชื้อเพลิง (Fossil fuels)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววารุณี มุสิกชาติ เป็นบุตรคนที่สองของครอบครัว บิดาและมารดารับราชการในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผู้เขียนจบการศึกษาชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนอนุบาลพระนครศรีอยุธยา และมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์ จากนั้นเข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่ภาควิชาเคมีเทคนิค สาขาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปี 2547 และศึกษาในระดับปริญญาโท ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย