สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย……I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ……II

กิตติกรรมประกาศ……III

สารบัญ……IV

สารบัญตาราง……VII

สารบัญรูป……VIII

สัญลักษณ์……XI

ศัพท์เทคนิค……XII

บทที่ 1 บทนำ……1

บทที่ 2 พื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานของคาร์บอนนาโนทิวป์……4

2.1 บทนำ……4

2.2 รูปแบบของคาร์บอน……6

2.2.1 เพชร……6

2.2.2 กราไฟต์……6

2.2.3 บัคมินสเตอร์ฟูเลอเรนซ์……8

2.2.4 คาร์บอนนาโนทิวป์……8

2.2.5 คาร์บอนไฟเบอร์……9

2.2.6 อะมอฟัสคาร์บอน……9

2.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวป์……9

2.3.1 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังชั้นเดียว SWNTs……11

2.3.2 คาร์บอนนาโนทิวป์ผนังหลายชั้น MWNTs……11

2.4 โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนนาโนทิวป์……12

2.5 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์……18

2.5.1 Base Growth……18

2.5.2 Tip Growth……18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.6 การประยุกต์การใช้งานคาร์บอนนาโนทิวป์……19
2.6.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ ……..19
2.6.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน……..20
2.6.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์……....20
2.6.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์……21
2.6.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน……23
2.7 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์……..……24
2.7.1 วิธี Arc discharge……24
2.7.2 วิธี Laser ablation……25
2.7.3 วิธี Chemical Vapor Deposition(CVD)……...26
2.7.3.1 แบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition ...….26
2.7.3.2 แบบ Vapor phase growth……...…27
2.7.3.3 แบบ High pressure CO disproportionate process….....27
2.7.3.4 แบบ Plasma enhance chemical vapor deposition…..... ..……28
2.7.3.5 แบบ Thermal chemical vapor deposition …...…….……29

บทที่ 3 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์……33
3.1 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM……...…33
3.1.1 หลักการทำงาน……34
3.2 วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM……...36
3.2.1 หลักการทำงาน……36
3.3 วิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy……..37
3.3.1 หลักการทำงาน.....38
3.3.2 การประยุกต์ใช้วัดคาร์บอนนาโนทิวป์.....39
3.3.2.1 Radial Breathing Mode……...40
3.3.2.2 Tamgential mode-G-band……...…….…….…….....41
3.3.2.3 D-band และ G'-band……...43
3.3.2.4 อัตราส่วน I(G)/I(D)……...…….....43

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การเตรียมการทดลองและวิธีการทดลอง.....43

4.1 การเตรียมฐานรองซิลิคอน.....43

4.2 ขั้นตอนการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา.....44

4.3 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์.....45

บทที่ 5 ศึกษาเงื่อนไขการสังเคราะห์โดยใช้แอลกอฮอล์ที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์.....47

5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ.....47

5.2 ผลกระทบของแรงดัน.....52

5.3 ผลกระทบของเวลา.....57

5.4 ผลกระทบของชนิดแอลกอฮอล์.....62

5.5 ผลของน้ำ DI ที่เติมลงในแอลกอฮอล์ 65

5.6 ผลการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยเทคนิค TEM.....67

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....70

เอกสารอ้างอิง.....72

ภาคผนวก.....76

ภาคผนวก ก.....76

ภาคผนวก ข.....80

ภาคผนวก ค.....83

ภาคผนวก ง.....85

ประวัติผู้เขียน.....103

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ 3 วิธีหลัก……...……...…….....31

2.2 สรุปวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยวิธี CVD แบบต่างๆ……..…..…...……32

5.1 อุณหภูมิที่ปรับเปลี่ยนในการทดลอง……..…….……...47

5.2 ความดันที่ปรับเปลี่ยนในการทดลอง.....52

5.3 เวลาที่ปรับเปลี่ยนในการทดลอง……..….57

5.4 ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้.....62

5.5 ปริมาณของน้ำ DI ที่ทดลอง.....65

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การรวมตัวของอะตอมคาร์บอนแบบไฮบริไดเซชั่น.....4

2.2 พันธะซิกมา(σ)และพันธะพาย(π).....5

2.3 โครงสร้างของเพชร.....6

2.4 โครงสร้างของกราไฟต์.....7

2.5 โครงสร้างฟูเลอเรนซ์.....8

2.6 คาร์บอนนาโนทิวป์.....9

2.7 การม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวป์.....10

2.8 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังเดี่ยว.....11

2.9 คาร์บอนนาโนทิวป์แบบหลายผนัง.....11

2.10 (ก) ยูนิตเซลล์ และ (ข) Brillouin zone ของ 2D กราไฟต์ถูกแทน
ด้วยบริเวณที่แรเงาของสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน(rhombus)
และหกเหลี่ยม(hexagon) ตามลำดับ โดยที่ a_i และ b_i (i=1,2)
คือยูนิตเวคเตอร์และรีซิพโพรคอลแลตทิซเวคเตอร์ ตามลำดับ.
จุดที่สมมาตรใน 2D Brillouin zone เรียกจุด Γ, M และ K 12

2.11 แลตทิซหกเหลี่ยมของคาร์บอนนาโนทิวป์ โดย $C_h = 4a_1 + 2a_2$ SWNT.
ยูนิตเซลล์คือบริเวณที่แรเงา ซึ่ง N = 28 และมุมระหว่าง a_1 และ C_h
คือ มุมไชรอล $\theta\left(0 \le \theta \le 30^o\right)$.....13

2.12 (ก) Brillouin zone ของ SWNT ถูกแทนด้วยเส้น W-W'
ในกรณี (n,m) = (4,2) และ (ข) รูปเสมือนแต่ทำการลดโซน โดยเวคเตอร์ K_1
และ K_2 คือริซิพโพคอลแลตทิซเวคเตอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับ C_h และ T ตามลำดับ.....15

2.13 3D Brillouin zone ของ กราไฟต์และ cutting line สำหรับ (n,m) = (4,2) SWNT.....16

2.14 วงกลมที่แรเงาเป็นสารกึ่งตัวนำและวงกลมที่ไม่แรเงาจะเป็นโลหะ.....17

2.15 โครงสร้างของ (ก) ชนิด zig-zag (ข) ชนิด armchair (ค) ชนิด chiral
โดย (n,m) = (10,0), (8,8), (10,5) ตามลำดับ.....17

2.16 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก)แบบ Base Growth และ (ข)แบบ Tip Growth.. ..19

2.17 ลักษณะ Single-molecule Transistor.....21

2.18 เซมิคัลเซนเซอร์ที่ใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์ สำหรับตรวจวัดก๊าซ หรือสารโมเลกุลอื่น.....21

2.19 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสจับกับหมู่ Carboxyl ที่ปลายเปิดของคาร์บอนนาโนทิวป์.....23

2.20 ภาพจาก AFM ของเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ตรึงอยู่บน SWNTs.....23

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.21 ระบบ Arc discharge……24

2.22 ระบบ Laser ablation……25

2.23 ระบบ Hot-filament enhance Chemical vapor deposition ……26

2.24 ระบบ Vapor phase growth……..27

2.25 ระบบ High pressure CO disproportionate process.....28

2.26 ระบบ Plasma enhance chemical vapor deposition ……...28

2.27 ระบบ Thermal chemical vapor deposition……..30

3.1 แผนภาพการทำงานของ TEM และ SEM……..34

3.2 ภาพจาก TEM แสดงรูปร่างของ MWNTs……...36

3.3 ภาพ SEM แสดงคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้……37

3.4 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering……38

3.5 กราฟความถี่รามานแสดงโหมดต่างๆ……39

3.6 การสั่นของอะตอมคาร์บอนสำหรับ (ก) โหมดRBM และ (ข) โหมดG-band…….……...40

3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่รามานในโหมด RBM ที่แสดงด้วย ω_{RBM} กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ (ก) A=234cm^{-1} และ B=10cm^{-1} ในกรณีของของ SWNT-bumdle(เส้นประ) และ (ข) A=248cm^{-1} และ B=0 ในกรณีของของ Isolated SWNT (เส้นทึบ)..……41

3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง d_t กับ ω_{G+} และ ω_{G-} ของ SWNTs หลายๆท่อ ที่มีคุณสมบัติของโลหะและสารกึ่งนำ โดยที่จุดที่มีการระบายสีดำมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและจุดที่ไม่มีการระบายมีคุณสมบัติเป็นโลหะ……42

4.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน……...43

4.2 ขั้นตอนการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลงบนแผ่นซิลิคอน……...44

4.3 ระบบ CVD แบบความร้อน……..……...45

4.4 เครื่องมือทดลองของระบบ CVD แบบความร้อน……..45

4.5 กราฟแสดงขั้นตอนการปลูกคาร์บอนนาโนทิวป์……...……46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.1 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ความดัน 1-5 mbar ที่อุณหภูมิ
(ก) 550°C (ข) 600°C (ค) 700°C (ง) 800°C และ (จ) 900°C……49
5.2 รามานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆที่ความดัน
ช่วง 1-5mbar ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM……50
5.3 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D) กับอุณหภูมิต่างๆที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์
ที่ความดัน 1-5mbar……...50
5.4 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 800°C ที่ความดัน
(ก) 0.5mbar (ข) 1-5mbar (ค) 10-15mbar และ (ง) 20-30mbar……53
5.5 รามานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่ความดันต่างๆที่อุณหภูมิ 800°C
ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM……54
5.6 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D)กับ ความดันต่างๆที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์
ที่อุณหภูมิ 800ºC…….. 55
5.7 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D) กับ ความดันที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ……...56
5.8 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D) กับอุณหภูมิที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ……57
5.9 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ
(ก) 30s (ข) 1min (ค) 5min (ง) 10min และ (จ) 30min……60
5.10 รามานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ
ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM...……...……61
5.11 อัตราส่วนระหว่าง I(G)/I(D) กับเวลาต่างที่ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์…....…...61
5.12 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้โดยแอลกอฮอล์ชนิด
(ก) เอทานอล (ข) เมทานอล……...……..63
5.13 รามานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ได้ในแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ
ในโหมด (ก) ความถี่สูง (ข) ความถี่ RBM……..……64
5.14 ภาพจาก SEM คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์เติมน้ำ DI ในปริมาณ
(ก) ไม่เติมน้ำ DI (ข) 0.01wt% (ค) 0.05wt%.....…….....66
5.15 รามานสเปคตรัมของคาร์บอนนาโนทิวป์สังเคราะห์ได้ในโหมดความถี่สูง……67
5.16 ภาพจาก TEM แสดง SWNT…….....….67
5.17 ภาพจาก TEM แสดง SWNT ที่มี Defect……..……...68
5.18 ภาพจาก TEM แสดง MWNTs และ SWNTs…….……69

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
σ	Sigma bond
π	Pi bond
eV	electron Volt
Å	Angstrom
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital
LUMO	Lowest Unoccuppied Molecular Orbital
CNTs	Carbon nanotubes
SWNTs	Single-Walled Nanotubes
MWNTs	Multi-Wall Nanotubes
C_h	Chairal Vector
T	Translational vector
d_t	Diamer of CNTs
θ	Chairal angle
d_R	Greatest common divisor(gcd)
Fe	Iron
Ni	Nikel
Co	Cobalt
C_2H_2	Acetelyne
H_2	Hydrogen
Ar	Argon
SCCM	Standard cubic centemeter
°C	Celcies degree

ศัพท์เทคนิค

ไฮบริดไดเซชั่น	Hybridization
ออร์บิตัล	Orbital
เตตระฮีดรอน	Tetrahedral
เพชร	Diamond
กราไฟต์	Graphite
วาน เดอร์ พาว	Wall der paund
โอเวอร์แลป	Over lap
บัคมินสเตอร์ฟูเรอเรนส์	Buckminster fullernce
แผ่นกราฟีน	Graphene sheet
คาร์บอนไฟเบอร์	Carbon fiber
อะมอฟัสคาร์บอน	Amorphous carbon
คาร์บอนนาโนทิวป์	Carbon nanotube
ยูนิตเซลล์	Unit cell
ค่าคงตัวแลตทิซ	Lattice constant
บริลลอนโซน	Brillouin zone
รีซิพโพรคอลแลตทิซเวคเตอร์	Reciprocal lattice vector
ไชรอลเวคเตอร์	Chiral vector
ทรานซิชั่นเวคเตอร์	Translational vector
เรียลสเปซ	Real-space
แลตทิซหกเหลี่ยม	Hexagon lattice
ออโทกอนอลแลตทิซเวคเตอร์	Orthogonal lattice vector
เฟิร์สบริลลอนโซน	First Brillouin zone
ไลน์เซกเมนต์	Line segment
ดิสครีตเวฟเวคเตอร์	Discrete wave vector
เอ็นเนอร์จีดิสเพอร์ชั่น	Energy dispersion
เลขคลื่น	Wave number
คัทติ้งไลน์	Cutting line
เวฟเวคเตอร์	Wave vector
ควอนไตซ์เวฟเวคเตอร์	Quantize wave vector
ไทด์บินดิ่ง	Tight binding

ศัพท์เทคนิค(ต่อ)

พารามิเตอร์	Parameter
วาเลนซ์แบนด์	Valence band
คอนดัคชั่นแบนด์	Conduction band
สารกึ่งตัวนำ	Semiconductor
โลหะ	Metallic
ระดับเฟอร์มิ	Fermi level
ซิกแซก	Zigzag
อาร์มแชร์	Armchair
เบสโกรท	Base growth
ทิปโกรท	Tip growth
วัสดุคอมโพสิต	Composite material
เทอร์มอลซีวีดี	Thermal CVD