

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E41030

การสังเคราะห์อนุภาคคอมโพสิตของเส้นใยดีออกไซด์และอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร
ด้วยปฏิกิริยาออสโมติก

นางสาวจีเพร กลั่นหวาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

600255431

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



การสังเคราะห์อนุภาคคอมโพสิตของสังกะสีออกไซด์และอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร
ด้วยปฏิกิริยาสถานะก๊าซ

นางสาวจิรพร กลั่นหวาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



SYNTHESIS OF PARTICULATE COMPOSITE OF ZINC OXIDE AND CARBON
NANOPARTICLES BY GAS PHASE REACTION

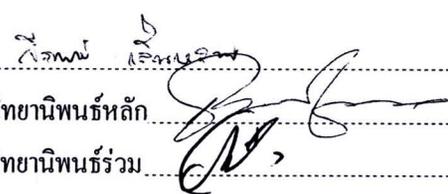
Miss Jiraporn Klanwan

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

จิรพร กลั่นหวาน : การสังเคราะห์อนุภาคคอมโพสิตของสังกะสีออกไซด์และอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรด้วยปฏิกิริยาสถานะก๊าซ (SYNTHESIS OF PARTICULATE COMPOSITE OF ZINC OXIDE AND CARBON NANOPARTICLES BY GAS PHASE REACTION) อ. ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ธวัชชัย ชรินพามิชกุล, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.
 อภินันท์ สุทธิธารวัช, 135 หน้า.

E41030

งานวิจัยนี้ อนุภาคคอมโพสิตของสังกะสีออกไซด์และอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาสถานะก๊าซในขั้นตอนเดียวโดยใช้กลีเซอรอลและเฟอร์โรซีนเป็นแหล่งของคาร์บอนและเหล็กสำหรับการเกิดอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร ขณะที่ใช้ผงสังกะสีบริสุทธิ์สำหรับการเกิดอนุภาคสังกะสีออกไซด์ การสังเคราะห์แบบแยกเดี่ยวของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรและอนุภาคสังกะสีออกไซด์ถูกทำการศึกษาแยกจากกัน เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดของแต่ละองค์ประกอบของอนุภาคคอมโพสิตของสังกะสีออกไซด์/อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่คาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการตกตะกอนไอเชิงเคมี ภายใต้การควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน การสังเคราะห์ที่คาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังชั้นเดียวถูกทำการศึกษาเช่นกันด้วยวิธียิงเลเซอร์โดยการควบคุมความเข้มเลเซอร์และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ เพื่อให้เกิดเข้าใจในการเกิดที่คาร์บอนระดับนาโนเมตร ในขณะที่อนุภาคสังกะสีออกไซด์ระดับนาโนเมตรถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันของสังกะสีบริสุทธิ์ โดยการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซในโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน หลังจากนั้นอนุภาคคอมโพสิตถูกทำการศึกษาภายใต้สภาวะที่ถูกออกแบบจากข้อมูลของการศึกษาข้างต้น การศึกษาทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนและเหล็กอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ภายใต้ช่วงกว้างของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ อุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ถูกพบว่าเป็นตัวแปรหลักของการสังเคราะห์อนุภาคคอมโพสิตของสังกะสีออกไซด์/คาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้น จากผลการทดลอง อนุภาคคอมโพสิตของสังกะสีออกไซด์/คาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นถูกสังเคราะห์ขึ้นภายใต้สภาวะของอัตราการไหลของก๊าซในโตรเจน อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน และอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ 500 มิลลิลิตรต่อนาที 100 มิลลิลิตรต่อนาที และ 800 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ภาควิชา: วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต 
 สาขาวิชา: วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 ปีการศึกษา: 2553 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

4971804921: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ZnO / CARBON NANOPARTICLES / COMPOSITE / GAS PHASE REACTION

JIRAPORN KLANWAN: SYNTHESIS OF PARTICULATE COMPOSITE OF ZINC OXIDE AND CARBON NANOPARTICLES BY GAS PHASE REACTION. ADVISOR : ASSOC. PROF. TAWATCHAI CHARINPANITKUL, D.Eng., CO-ADVISOR : APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., 135 pp.

E 41030

In this work, particulate composites of ZnO and carbon nanoparticles were synthesized by single-step gas phase reaction. Glycerol and ferrocene were used as carbon and iron sources for formation of the carbon nanoparticles, while Zn powder was employed as Zn source for the formation of ZnO. Isolated synthesis of carbon nanoparticles and ZnO particles was separately studied for investigating experimental parameters which affected the formation of each constituent of ZnO/CNT composite. The carbon nanoparticles, especially MWCNTs, were synthesized by chemical vapor deposition by manipulating N₂ flow rate, synthesizing temperature and glycerol to ferrocene molar ratio. To understand the formation of the CNTs, synthesis of SWCNTs by laser ablation was also investigated by controlling laser intensity and synthesizing temperature. While, the ZnO nanoparticles were synthesized by oxidation of pure Zn by adjusting N₂ flow rate, synthesizing temperature and O₂ flow rate. The composites were then investigated under designated conditions with respect to data of previous investigation. The study of thermodynamics exhibited unavoidable oxidation of C and Fe over wide ranges of the synthesizing temperature. The synthesizing temperature was found to be a major parameter for the synthesis of the ZnO/CNT composites. Based on the experimental results, the ZnO/MWCNT composites could be synthesized under the condition of the N₂ flow rate, O₂ flow rate and synthesizing temperature of 500 mL/min, 100 mL/min and 800 °C, respectively.

Department : Chemical Engineering

Student's Signature Jiraporn Klanwan

Field of Study : Chemical Engineering

Advisor's Signature T. Charinpanitkul

Academic Year : 2010

Co-advisor's Signature A. Soottitawat

ACKNOWLEDGEMENTS

I am very thankful to my thesis advisor and co-advisor, Assoc Prof. Tawatchai Charinpanitkul and Dr. Apinan Soottitantawat, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, for their introducing me to this interesting project, and for their helpful and deep discussion and encouraging guidance throughout the course of this work. I am also very thankful to my shared advisors, Prof. Yoshio Otani and Assoc Prof. Takafumi Seto, Department of Chemical Engineering, Kanazawa University, for their useful guidance, educational suggestion and their particle processing laboratory facilities. Furthermore, I am also thankful to Prof. Piyasarn Praserttham, Asst. Prof. Varong Pavarajarn, Asst. Prof. Nattaporn Tonanon and Dr. Sorapong Pavasupree for their comments and participation as my thesis committee.

I would like to acknowledge the Centennial Fund of Chulalongkorn University for the partial financial support of this work. This work was also partially supported by Kanazawa University, Japan.

Furthermore, I would like to thank all members of Center of Excellence in Particle Technology for their help, suggestion and warm collaborations. I am also thankful to Mr. Hisashi Yamamoto, Mr. Takuma Furukawa and all members in Kanazawa University for their kind and helpful suggestion.

Finally, I would like to express my cordial and deep thanks to my family for their love and encouragement.

CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI	iv
ABSTRACT IN ENGLISH	v
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
CONTENTS.	vii
LIST OF TABLES	xii
LIST OF FIGURES	xiii
NOMENCLATURE	xxi
CHAPTER	
I INTRODUCTION	1
1.1 Background and Motivation.....	1
1.2 Objective of research.....	2
1.3 Scope of research.....	2
1.4 Procedure of the research.....	3
1.5 Obtained benefits.....	3
II FUNDAMENTAL KNOWLEDGE AND LITERATURE REVIEW	4
2.1 Carbon nanotubes (CNTs).....	4
2.1.1 Structure of CNTs.....	4
2.1.2 Physical properties of CNTs.....	6
2.1.3 Synthesis of CNTs.....	8
2.2 Zinc Oxide (ZnO) nanostructures	9
2.2.1 Structure of ZnO.....	9

CHAPTER	Page
2.2.2 Physical properties of ZnO nanostructure.....	10
2.2.3 Synthesis of ZnO nanostructure.....	11
2.3 Composite material.....	13
2.4 Differential Mobility Analyzer (DMA).....	14
2.5 Gibbs free energy of reaction.....	18
2.6 Reaction equilibrium in a system containing condensed phases and a gaseous phase.....	18
2.7 Ellingham diagram for oxides.....	22
2.8 Literature reviews.....	24
2.8.1 Investigation of synthesis of the SWCNTs by laser ablation...	24
2.8.2 Investigation of synthesis of the carbon nanoparticles by CVD.....	25
2.8.3 Investigation of synthesis of the ZnO nanoparticles by oxidation	26
2.8.4 Investigation of synthesis of the ZnO/MWCNT composites	28
III EXPERIMENT.....	32
3.1 Synthesis of the SWCNTs by laser ablation.....	33
3.1.1 Raw materials and experiment.....	33
3.1.2 Experimental procedures.....	35
3.1.2.1 Variation of laser intensity.....	35
3.1.2.2 Variation of temperature.....	35

3.2 Synthesis of the carbon nanoparticles by CVD of glycerol and ferrocene.....	35
3.2.1 Raw materials and experiment.....	35
3.2.2 Experimental procedures.....	36
3.2.2.1 Variation of nitrogen flow rate.....	37
3.2.2.2 Variation of synthesizing temperature.....	37
3.2.2.3 Variation of glycerol to ferrocene molar ratio.....	37
3.3 Synthesis of the ZnO nanoparticles by oxidation of Zn.....	38
3.3.1 Raw materials and experiment.....	38
3.3.2 Experimental procedures.....	39
3.3.2.1 Variation of nitrogen flow rate.....	39
3.3.2.2 Variation of synthesizing temperature.....	39
3.3.2.3 Variation of oxygen flow rate.....	39
3.4 Synthesis of the ZnO/MWCNT composites by gas phase reaction.....	40
3.4.1 Raw materials and experiment.....	40
3.4.2 Experimental procedures.....	41
3.5 Analytical instruments.....	41
3.5.1 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	41
3.5.2 Transmission Electron Microscope (TEM).....	41
3.5.3 Raman Spectroscope.....	42
3.5.4 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS).....	42
3.5.5 X-Ray Diffraction (XRD).....	42
3.5.6 UV-Visible Spectrophotometer (UV-Vis).....	42

CHAPTER	Page
3.5.7 Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)	42
IV RESULTS AND DISCUSSION	43
4.1 Synthesis of the SWCNTs by laser ablation.....	43
4.1.1 Effect of laser intensity.....	43
4.1.2 Effect of temperature.....	46
4.1.3 Possible mechanisms.....	55
4.2 Synthesis of the carbon nanoparticles by CVD of glycerol and ferrocene.....	58
4.2.1 Effect of nitrogen flow rate.....	58
4.2.2 Effect of synthesizing temperature.....	68
4.2.3 Effect of glycerol to ferrocene molar ratio.....	75
4.2.4 Possible mechanisms.....	83
4.3 Synthesis of the ZnO nanoparticles by oxidation of Zn.....	86
4.3.1 Effect of nitrogen flow rate.....	86
4.3.2 Effect of synthesizing temperature.....	94
4.3.3 Effect of oxygen flow rate.....	98
4.4.4 Possible mechanisms.....	101
4.4 Synthesis of the ZnO/MWCNT composites by single-step gas phase reaction.....	103
4.4.1 Investigation of thermodynamics	103
4.4.2 Effect of synthesizing temperature	106
4.4.3 Possible Mechanisms.....	116

CHAPTER	Page
V CONCLUSION AND RECOMMENDATION.....	119
5.1 Analysis of the SWCNT synthesis by laser ablation.....	119
5.2 Analysis of the carbon nanoparticle synthesis by CVD of glycerol and ferrocene.....	120
5.3 Analysis of the ZnO synthesis by oxidation of Zn	120
5.4 Analysis of the ZnO/MWCNT composites.....	121
5.5 Recommendation for future work.....	121
REFERENCES.....	122
APPENDICES.....	129
APPENDIX A Temperature profiles inside reactor.....	130
APPENDIX B Calculation of partial pressure.....	132
APPENDIX C International research papers.....	134
VITA.....	135

LIST OF TABLES

		Page
Table 2.1	Classification of carbon nanotubes and their electrical conductivity.....	6
Table 2.2	Theoretical mechanical properties of CNTs	7
Table 2.3	Physical properties of wurtzite ZnO.....	11
Table 2.4	Literature reviews of the synthesis of the SWCNTs by Nd:YAG pulse laser ablation.....	30
Table 2.5	Literature reviews of the synthesis of the MWCNTs by CVD under atmospheric pressure.....	30
Table 2.6	Literature reviews of the synthesis of the ZnO nanoparticles by oxidation of Zn	31
Table 2.7	Literature reviews of the synthesis of the ZnO/MWCNT composites	31
Table 4.1	Standard free energy change of oxidation of Zn, C and Fe at different synthesizing temperatures.....	105

LIST OF FIGURES

		Page
Figure 2.1	Structures of (a) SWCNTs and (b) MWCNTs.....	4
Figure 2.2	Structures of (a) an unrolled graphene sheet of the nanotube, (b) an armchair nanotube, (c) a zigzag nanotube and (d) a chiral nanotube.....	5
Figure 2.3	Wurtzite structure of ZnO.....	10
Figure 2.4	Differential Mobility Analyzer (DMA) for classifying and generating monodisperse aerosol particles.....	16
Figure 2.5	Ellingham diagram for metallurgical oxides.....	23
Figure 3.1	C/Ni/Co target rod.....	33
Figure 3.2	Schematic diagram of experimental apparatus for aerosol generation of the SWCNTs by pulsed Nd:YAG laser ablation.....	34
Figure 3.3	Experimental set up for synthesizing carbon nanoparticles by CVD of glycerol and ferrocene.....	36
Figure 3.4	Experimental set up for synthesizing ZnO nanoparticles by oxidation of Zn.....	38
Figure 3.5	Experimental set up for synthesizing ZnO/MWCNT composites.....	40
Figure 4.1	SEM images of the synthesized carbon nanoparticles at different laser intensities: (a) 0.4 W, (b) 0.5 W and (c) 0.6 W.....	44

Figure 4.2	Size distributions of the agglomerated carbon nanoparticles synthesized at different laser intensities: (a) 0.4 W, (b) 0.5 W and (c) 0.6 W.....	45
Figure 4.3	Raman spectrum of the agglomerated carbon nanoparticles synthesized at the laser intensity of 0.6 W.....	46
Figure 4.4	SEM images of the synthesized carbon nanoparticles at different temperatures on membrane filter: (a) 25 °C, (b) 600 °C, (c) 800 °C, (d) 1000 °C and (e) 1080 °C.....	48
Figure 4.5	Mobility based size distribution of the synthesized carbon nanoparticles at different temperatures.....	49
Figure 4.6	SEM images of the classified particles by DMA synthesized at the maximal temperature of 1080 °C with different classified size: (a) 100 nm and (b) 200 nm.....	50
Figure 4.7	Raman spectra of the airborne SWCNTs synthesized at different maximal temperatures: (a) 25 °C, (b) 1000 °C and (c) 1080 °C.....	53
Figure 4.8	The I_D/I_G ratios of the synthesized carbon nanoparticles at different maximal temperatures.....	54
Figure 4.9	TEM images with different magnifications of the airborne SWCNTs synthesized at maximal temperature of 1080 °C.....	54

Figure 4.10	Size distribution of the isolated SWCNTs at the maximal temperature of 1080 °C measured by TEM image processing.....	55
Figure 4.11	Vapor-liquid-solid Mechanisms of the SWCNTs synthesized by laser ablation.....	57
Figure 4.12	SEM images of the MWCNTs deposited at zone 1 with different nitrogen flow rates: (a) 50 mL/min, (b) 200 mL/min, (c) 350 mL/min and (d) 500 mL/min.....	59
Figure 4.13	Raman spectra of the MWCNTs deposited at zone 1 with different nitrogen flow rates: (a) 50 mL/min, (b) 200 mL/min, (c) 350 mL/min and (d) 500 mL/min.....	60
Figure 4.14	SEM images of the MWCNTs deposited at zone 2 with different nitrogen flow rates: (a) 50 mL/min, (b) 200 mL/min, (c) 350 mL/min and (d) 500 mL/min.....	61
Figure 4.15	Raman spectra of the MWCNTs deposited at zone 2 with different nitrogen flow rates: (a) 50 mL/min, (b) 200 mL/min, (c) 350 mL/min and (d) 500 mL/min.....	62
Figure 4.16	SEM images of the MWCNTs deposited at zone 3 with different nitrogen flow rates: (a) 50 mL/min, (b) 200 mL/min, (c) 350 mL/min and (d) 500 mL/min.....	63

Figure 4.17	Raman spectra of the MWCNTs deposited at zone 3 with different nitrogen flow rates: (a) 50 mL/min, (b) 200 mL/min, (c) 350 mL/min and (d) 500 mL/min.....	64
Figure 4.18	I_D/I_G ratios of the synthesized MWCNTs at different nitrogen flow rates.....	65
Figure 4.19	Yields of the synthesized carbon nanoparticles at different nitrogen flow rates.....	66
Figure 4.20	Residence time by varying nitrogen flow rate.....	67
Figure 4.21	SEM images of the MWCNTs deposited at zone 1 with different synthesizing temperatures: (a) 800 °C, (b) 850 °C and (c) 900 °C.....	69
Figure 4.22	SEM images of the MWCNTs deposited at zone 2 with different synthesizing temperatures: (a) 800 °C, (b) 850 °C and (c) 900 °C.....	70
Figure 4.23	SEM images of the MWCNTs deposited at zone 3 with different synthesizing temperatures: (a) 800 °C, (b) 850 °C and (c) 900 °C.....	71
Figure 4.24	I_D/I_G ratios of the synthesized MWCNTs at different synthesizing temperatures.....	72
Figure 4.25	Yields of the synthesized carbon nanoparticles at different nitrogen flow rates.....	73

Figure 4.26	Rate constant of CNTs by varying synthesizing temperature.....	74
Figure 4.27	SEM images of the carbon nanoparticles deposited at zone 1 with different molar ratios of glycerol to ferrocene: (a) 5/1, (b) 10/1 and (c) 20/1.....	75
Figure 4.28	SEM images of the carbon nanoparticles deposited at zone 2 with different molar ratios of glycerol to ferrocene: (a) 5/1, (b) 10/1 and (c) 20/1.....	76
Figure 4.29	SEM images of the carbon nanoparticles deposited at zone 3 with different molar ratios of glycerol to ferrocene: (a) 5/1, (b) 10/1 and (c) 20/1.....	77
Figure 4.30	I_D/I_G ratios of the synthesized MWCNTs at different molar ratios of glycerol to ferrocene.....	78
Figure 4.31	Yields of the synthesized carbon nanoparticles at different molar ratios of glycerol to ferrocene.....	79
Figure 4.32	TEM images of the synthesized MWCNTs under the condition of the nitrogen flow rate of 350 mL/min, the synthesizing temperature of 800 °C and the molar ratio of glycerol to ferrocene of 5/1 at different deposited positions: (a) zone 1, (b) zone 2 and (c1) and (c2) zone 3.....	81

Figure 4.33	XRD patterns of the synthesized MWCNTs under the condition of the nitrogen flow rate of 350 mL/min, the synthesizing temperature of 800 °C and the molar ratio of glycerol to ferrocene of 5/1 at different deposited positions.....	82
Figure 4.34	Fe-C phase diagram.....	83
Figure 4.35	Vapor-liquid-solid mechanisms of the formation of the MWCNTs by CVD of glycerol and ferrocene.....	85
Figure 4.36	The synthesized ZnO deposited at zone 2 and zone 3 with different N ₂ flow rates: (a) and (b) 200 mL/min, (c) and (d) 350 mL/min and (e) and (f) 500 mL/min.....	87
Figure 4.37	Yields of the synthesized ZnO nanoparticles at different nitrogen flow rates.....	89
Figure 4.38	Partial pressure of oxygen and residence time by varying nitrogen flow rate.....	90
Figure 4.39	Diffusion of oxygen through Zn spherical particle.....	91
Figure 4.40	The synthesized ZnO deposited at zone 2 and zone 3 with different synthesizing temperatures: (a) and (b) 800 °C, (c) and (d) 850 °C and (e) and (f) 900 °C.....	95
Figure 4.41	Yields of the synthesized ZnO nanoparticles at different synthesizing temperatures.....	96

Figure 4.42	Rate constant of zinc by varying synthesizing temperature.....	97
Figure 4.43	The synthesized ZnO deposited at zone 2 and zone 3 with different O ₂ flow rates: (a) and (b) 100 mL/min, (c) and (d) 150 mL/min.	99
Figure 4.44	TEM image of the synthesized ZnO.....	100
Figure 4.45	XRD pattern of the synthesized ZnO.....	100
Figure 4.46	Octa-twin ZnO nuclei.....	102
Figure 4.47	Ellingham diagram for oxides of Zn, C and Fe.....	104
Figure 4.48	SEM images of the synthesized products at the synthesizing temperature of 800 °C.....	107
Figure 4.49	XRD pattern the synthesized products at the synthesizing temperature of 800 °C.....	109
Figure 4.50	SEM images of the synthesized products at the synthesizing temperature of 900 °C.....	110
Figure 4.51	XRD pattern the synthesized products at the synthesizing temperature of 900 °C.....	111
Figure 4.52	TEM image of the synthesized ZnO/MWCNT composites at the synthesizing temperature of 800 °C.....	113
Figure 4.53	FT-IR spectrum of the synthesized ZnO/MWCNT composites at the synthesizing temperature of 800 °C.	114
Figure 4.54	EDX pattern of the synthesized ZnO/MWCNT composites at the synthesizing temperature of 800 °C	115

Figure 4.55	UV–visible absorbance of the samples in distillation water: (a) the synthesized MWCNTs, (b) the synthesized ZnO and (c) the synthesized composites of ZnO nanoparticles and MWCNTs.....	116
Figure 4.56	Possible mechanisms of the composites of ZnO nanoparticles and MWCNTs.....	118
Figure A1	Temperature profiles inside the quartz tube reactor at the synthesizing temperatures of 800, 850 and 900 °C.....	130

NOMENCLATURES

Δ	=	Coefficient of Pilling and Bedworth
α	=	Conversion of ZnO
τ	=	Time of totally Zn consumption
ω_{RBM}	=	Radial breathing mode frequency
bcc	=	Body-centered cubic
C	=	Carbon
Co	=	Cobalt
CPC	=	Condensation particle counter
C_{O_2}	=	Concentration of O_2
$C_{\text{O}_2}^e$	=	Equilibrium concentration of O_2
$C_{\text{O}_2}^i$	=	Initial concentration of O_2
d_{Zn}	=	Density of Zn
D_{O_2}	=	Diffusion coefficient of O_2
D_A	=	Projected area diameter of CNT
D_f	=	Diameter of fibrous CNT
D_m	=	Mobility based diameter of CNT
DMA	=	Differential mobility analyzer
d_t	=	Diameter of SWCNT
fcc	=	Face-centered cubic
Fe	=	Iron
Fe_3C	=	Iron carbide
k_{CNTs}	=	Rate constant of CNTs
k_{Zn}	=	Rate constant of zinc
L_f	=	Length of CNT,
m_{O_2}	=	Mass of O_2
m_{Zn}^0	=	Initial mass of zinc
m_{Zn}^t	=	Mass of zinc at time t

N_2	=	Nitrogen
N_{O_2}	=	Diffusion flux of O_2
Ni	=	Nickel
O_2	=	Oxygen
R	=	Radius
r_0	=	Initial radius of Zn particle
r_1	=	Initial radius of the reaction interface (metal/oxide)
r_2	=	Initial radius of the oxide layer
RBM	=	Radial breathing mode
S_1	=	Surface area of the reaction interface
SEM	=	Scanning electron microscopy
SMPS	=	Scanning mobility particle analyzer
T	=	Temperature
t	=	time
TEM	=	Transmission electron microscopy
VLS	=	Vapor-liquid-solid
VS	=	Vapor-solid
V_{Zn}^0	=	Initial volume of Zn
V_{Zn}	=	Volume of Zn
V_{ZnO}	=	Volume of ZnO
$W_{C,1}$	=	Weight of synthesized carbon at zone 1
$W_{C,2}$	=	Weight of synthesized carbon at zone 2
$W_{C,3}$	=	Weight of synthesized carbon at zone 3
$W_{ferrocene}$	=	Weight of used ferrocene
$W_{glycerol}$	=	Weight of used glycerol
$W_{ZnO,2}$	=	Weight of synthesized ZnO at zone 2
$W_{ZnO,3}$	=	Weight of synthesized ZnO at zone 3
$W_{ZnO/MWCNT}$	=	Weight of synthesized ZnO/MWCNT composites
XRD	=	X-Ray Diffraction
Zn	=	Zinc
ZnO	=	Zinc oxide
Z_p	=	Electrical mobility of the collected particles

R_1	=	Radius of the inner electrode
R_2	=	Radius of the outer electrode
L	=	Length of electrode
V	=	Applied voltage
n	=	Number of elementary charge units
e	=	Elementary unit of charge
C_c	=	Cunningham slip correction factor
μ	=	Gas viscosity
d_p	=	Particle diameter
K_n	=	Knudsen number
λ	=	Mean free path
ΔH	=	Enthalpy of reaction
ΔS	=	Entropy of reaction
T	=	Temperature of reaction
ΔG°	=	Difference between the free energy of 1 mole of gaseous MO at 1 atm pressure, and the sum of the free energies of a half of 1 mole of O_2 at 1 atm pressure and 1 mole of gaseous M at 1 atm pressure, all at the temperature T
p_{MO}	=	Equilibrium vapor pressure of solid MO at temperature of T
p_M	=	Equilibrium vapor pressure of solid M at temperature of T
p_{O_2}	=	Equilibrium pressure of O_2 at temperature of T
$G_{M(g)}^\circ$	=	Molar free energy of the gaseous M under a pressure of 1 atm and temperature of T
$G_{M(s)}^\circ$	=	Molar free energy of the solid M under a pressure of 1 atm and temperature of T
$G_{MO(g)}^\circ$	=	Molar free energy of the gaseous MO under a pressure of 1 atm and temperature of T
$G_{MO(s)}^\circ$	=	Molar free energy of the solid MO under a pressure of 1 atm and temperature of T

$V_{M(s)}$ = Molar volume of the solid M at the pressure of P and temperature of T

$V_{MO(s)}$ = Molar volume of the solid MO at the pressure of P and temperature of T