

**METHANE CONVERSION TO SYNTHESIS GAS IN
CORONA DISCHARGE**



Ms. Korada Supat

A Dissertation Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy
The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University
in Academic Partnership with
The University of Michigan, The University of Oklahoma,
and Case Western Reserve University

2003

ISBN 974-17-2264-8

Thesis Title : Methane Conversion to Synthesis Gas in Corona Discharge
By : Ms. Korada Supat
Program : Petrochemical Technology
Thesis Advisors : Prof. Richard G. Mallinson
Assoc. Prof. Sumaeth Chavadej

Accepted by the Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

K. Bunyakit.
..... College Director
(Assoc. Prof. Kunchana Bunyakit)

Thesis Committee:

K. Bunyakit.
.....
(Assoc. Prof. Kunchana Bunyakit)

Sumaeth Chavadej
.....
(Assoc. Prof. Sumaeth Chavadej)

Thirasak Rirksomboon
.....
(Asst. Prof. Thirasak Rirksomboon)

Richard G. Mallinson
.....
(Prof. Richard G. Mallinson)

Chaivitya Silawatshanani
.....
(Assoc. Prof. Chaivitya Silawatshanani)

Pramoch Rangsunvigit
.....
(Asst. Prof. Pramoch Rangsunvigit)

บทคัดย่อ

กรดา สุพรรณ : การเปลี่ยนมีเทนเป็นก๊าซสังเคราะห์ภายใต้การปลดปล่อยโคโรนา (Methane Conversion to Synthesis Gas in Corona Discharge) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ริชาร์ด จี แมลลินสัน (Prof. Richard G. Mallinson) และ รศ. สุเมธ ชวเดช เอกสารจำนวน 146 หน้า ISBN 974-17-2264-8

ก๊าซสังเคราะห์เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ต่าง ๆ มีปฏิกิริยาพื้นฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตก๊าซสังเคราะห์ ซึ่งได้แก่ การเปลี่ยนรูปของไอน้ำ การเกิดออกซิเดชันบางส่วน และ การเปลี่ยนรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ แต่กระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ต้องควบคุมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากพลาสมาอุณหภูมิต่ำมีคุณสมบัติความไม่สมดุล ดังนั้นพลาสมาอุณหภูมิต่ำจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการขับเคลื่อนปฏิกิริยามีเทนให้เป็นก๊าซสังเคราะห์แทนกระบวนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ในการศึกษาการผลิตรวมทั้งการผลิตก๊าซสังเคราะห์จากมีเทนภายใต้การปลดปล่อยโคโรนาไฟฟ้ากระแสสลับได้ถูกดำเนินการทั้งที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา อากาศถูกใช้เป็นตัวตั้งต้นในการศึกษาออกซิเดชันบางส่วนของมีเทนแทนใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการ การเปลี่ยนแปลงมีเทนลดลงอย่างมากแต่การเปลี่ยนแปลงออกซิเจนสูงขึ้นเมื่อเติมมีเทนในก๊าซตั้งต้น ในโตรเจนในอากาศไม่เพียงเป็นก๊าซเฉื่อยแต่ยังมีผลต่อระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าออกซิเจนเป็นสารว่องไวที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการลดการเกิดคาร์บอนและการเพิ่มการเปลี่ยนแปลงของมีเทนรวมทั้งลดค่าการใช้พลังงานจำเพาะ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถดำเนินการเปลี่ยนรูปไอน้ำเพื่อเปลี่ยนมีเทนเป็นก๊าซสังเคราะห์ภายใต้กระแสไฟฟ้าโคโรนาได้เนื่องจากเกิดการก่อตัวของคาร์บอน สำหรับการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยมีเทนในพลาสมาอุณหภูมิต่ำพบว่าทั้งการเปลี่ยนแปลงมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และอัตราส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมีเทนตั้งต้นโดยโมล แต่ลดลงเมื่อเพิ่มความถี่และอัตราการใช้สภาวะที่ใช้ในการทดลอง การเปลี่ยนแปลงมีเทนสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไดออกไซด์เสมอ การเปลี่ยนแปลงของก๊าซตั้งต้นและการกระจายของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนของมีเทน โดยอากาศและปฏิกิริยาการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีเทนด้วยคลื่นรูปแบบไมโครเวฟหรือสควาร์ให้ผลไม่ต่างกัน

ในการหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซสังเคราะห์นั้น ได้ดำเนินการปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนของมีเทนกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเพลาตตินัมบนซีโอไลต์

เคแอลและตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตตินัมบนเซอร์โคเนียมออกไซด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการรวมระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและการปลดปล่อยไฟฟ้าทำให้การเปลี่ยนแปลงออกซิเจนสูงขึ้นแต่การเปลี่ยนแปลงมีเทนกลับลดลงเล็กน้อย การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้แสดงคุณสมบัติการส่งเสริมซึ่งกันและกันต่อออกซิเดชันบางส่วนและการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์

ได้ดำเนินการศึกษาวิธีที่ท้าทายในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซสังเคราะห์โดยการเติมน้ำในสารป้อน การรวมการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำกับมีเทนทำให้การเปลี่ยนแปลงมีเทนและอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอน 2 อะตอมสูงกว่าการใช้การเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์หรือการเปลี่ยนรูปไอน้ำเพียงลำพัง ในกรณีของการรวมออกซิเดชันบางส่วนกับการเปลี่ยนรูปไอน้ำ พลังงานที่ถูกใช้ในการเปลี่ยนโมเลกุลของมีเทนลดลงอย่างมากจาก 68 เป็น 13 อิเล็กตรอน โวลต์/โมเลกุลของคาร์บอนที่เกิดปฏิกิริยา เมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละของน้ำจาก 0 เป็น 50 ที่อัตราส่วนมีเทนต่อออกซิเจนเป็น 2:1

ABSTRACT

4181002063 : PETROCHEMICAL TECHNOLOGY PROGRAM
Ms. Korada Supat: Methane Conversion to Synthesis Gas in
Corona Discharge
Thesis Advisors: Prof. Richard G. Mallinson and Assoc. Prof.
Sumaeth Chavadej, 146 pp. ISBN 974-17-2264-8
Keywords : Corona, Plasma, Partial Oxidation, Methane Reforming, Carbon
Dioxide Reforming, Steam Reforming

Synthesis gas is a versatile feedstock for many synthesis processes. There are several conventional reactions to produce synthesis gas i.e. steam reforming, partial oxidation, and carbon dioxide reforming but these catalytic processes have to be operated at high temperatures. Because of non-equilibrium property of low temperature plasma, it is thought to be an alternative way to drive the methane reforming reaction to synthesis gas instead of high temperature catalytic processes. In this study, synthesis gas production from methane using an ac corona discharge was conducted with and without catalysts. To study partial oxidation of methane, air was used as feed gas for reducing investment and operating cost as compared to pure oxygen. The methane conversion dropped dramatically but oxygen conversion increased with addition of ethane to the feed gas. The nitrogen in air not only acts as a dilute gas but also affects the reactions. The results show that oxygen is the most effective active species to reduce carbon formation and increases methane conversion as well as lower the specific energy consumption. For this reason, steam reforming could not be operated alone under corona discharge to convert methane into synthesis gas because of the carbon formation. For carbon dioxide reforming with methane in low temperature plasmas, methane and carbon dioxide conversions both increased with increasing voltage, gap width, and carbon dioxide to methane feed mole ratio but decreased with increasing frequency and flowrate. Under the studied conditions, methane conversion was always higher than carbon dioxide conversion. Sinusoidal and square waveforms gave negligibly different results of the

reactant conversions and the product distribution of partial oxidation of methane with air and carbon dioxide reforming with methane.

To find the way to increase the efficiency of producing synthesis gas, the partial oxidation of methane with carbon dioxide was carried out in the presence and absence of Pt loaded KL zeolite (Pt/KL) and Pt/ZrO₂. The results showed that the combination of catalyst and electric discharge gave a higher oxygen conversion but a little bit lower methane conversion. The presence of catalyst did not show the synergetic effect on both partial oxidation and carbon dioxide reforming.

The challenging method to improve synthesis gas production efficiency by introducing water in feed steam was investigated. Combined carbon dioxide and steam reforming with methane produced higher methane conversion and CO/C₂ ratio than either carbon dioxide or steam reforming. In case of the combined partial oxidation and steam reforming, the energy consumed to convert a methane molecule decreased dramatically from 68 to 13 eV/m_c with increasing the percentage of water-vapor from 0 to 50% at a CH₄/O₂ ratio of 2:1.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work cannot be successful without the participation of the following individuals and organizations.

I would like to express my deepest appreciation to my thesis advisors, Professor Richard G. Mallinson and Associate Professor Sumaeth Chavadej, for all of their special guidance and assistance while I was conducting my research. Professor Richard G. Mallinson is an outstanding advisor and teacher. He has taught me not only about theoretical knowledge but also about the industrial overview. Discussions with him have made me realize that research work is very challenging. Associate Professor Sumaeth Chavadej has taught me both the skills to do the research and how to succeed in my life. His excellent character as a researcher provides me with a model for my future work.

It is a pleasure to acknowledge the Thailand Research Fund for supporting this research work and giving me a scholarship and opportunity to study for a Ph.D.

I would also like to give special thanks to Professor Lance L. Lobban for his valuable suggestion and comments. In addition, I would like to thank Associate Professor Chaivitya Silawatshananai for his valuable advice about the principle of plasmas.

I would like to take this opportunity to thank CPO. Poon Arjpru, who helped me to set up experimental instrument and gave me a helpful hand constantly especially about electrical parts.

Thanks are also expressed to my family and my friends both in Thailand and at the University of Oklahoma. Their encouragement helped me conduct my research without any stress.

Finally, special thanks are forwarded to the faculty members and staff of the Petroleum and Petrochemical College and the Department of Chemical Engineering at the University of Oklahoma for providing all facilities needed for this research work.

TABLE OF CONTENTS

	PAGE
Title Page	i
Abstract (in English)	iii
Abstract (in Thai)	v
Acknowledgements	vii
Table of Contents	viii
List of Tables	xiii
List of Figures	xiv
CHAPTER	
I INTRODUCTION	1
1.1 General Introduction	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scope of Work	2
1.4 Chemicals Produced from Synthesis Gas	4
1.5 Synthesis Gas Production	5
1.5.1 Steam Reforming	5
1.5.2 Partial Oxidation	6
1.5.3 Carbon Dioxide Reforming	7
1.6 Plasma Chemistry	8
1.6.1 Plasma Classification	8
1.6.2 Types of Non-equilibrium Plasma	9
1.6.2.1 Radio Frequency Discharge	10
1.6.2.2 Microwave Discharge	10
1.6.2.3 Glow Discharge	10
1.6.2.4 Dielectric-Barrier Discharge	11
1.6.2.5 Corona Discharge	11
1.6.3 Corona Discharge Application	13
1.6.3.1 Electrostatic Precipitators	13
1.6.3.2 Electrophotographys	13

CHAPTER		PAGE
	1.6.3.3 Clean Room Ionizers for Static Control	14
	1.6.3.4 Atmospheric Pressure Ionization Sources	14
II	CARBON DIOXIDE REFORMING WITH METHANE IN LOW TEMPERATURE PLASMAS	15
	2.1 Abstract	15
	2.2 Introduction	15
	2.3 Experimental	18
	2.4 Results and Discussion	19
	2.5 Conclusions	29
	2.6 Acknowledgements	29
	2.7 References	30
III	SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM PARTIAL OXIDATION OF METHANE WITH AIR IN AC ELECTRIC GAS DISCHARGE	31
	3.1 Abstract	31
	3.2 Introduction	32
	3.3 Experimental	34
	3.4 Results and Discussion	37
	3.4.1 Effect of CH ₄ /O ₂ Feed Mole Ratio	37
	3.4.2 Effect of Ethane Addition	40
	3.4.3 Effect of Diluent Gas	45
	3.4.4 Effect of Residence Time	45
	3.4.5 Effect of Input Power	49
	3.4.6 Effect of Frequency	50
	3.4.7 Effect of Waveform	51
	3.5 Conclusions	51
	3.6 Acknowledgements	52
	3.7 References	52

CHAPTER		PAGE
IV	SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM REFORMING OF METHANE WITH CARBON DIOXIDE IN AN AC ELECTRIC DISCHARGE OVER Pt/ZrO₂	55
	4.1 Abstract	55
	4.2 Introduction	56
	4.3 Experimental	59
	4.3.1 Plasma System	59
	4.3.2 Catalyst Preparation	60
	4.4 Results and Discussion	61
	4.4.1 Effect of Oxygen Content	61
	4.4.2 Effect of Temperature	62
	4.4.3 Effect of Frequency	65
	4.4.4 Effect of Applied Voltage	67
	4.5 Conclusions	69
	4.6 Acknowledgements	69
	4.7 References	70
V	SYNTHESIS GAS PRODUCTION IN CORONA DISCHARGE OVER Pt/KL	72
	5.1 Abstract	72
	5.2 Introduction	72
	5.3 Experimental	75
	5.3.1 Experimental Set up	75
	5.3.2 Catalyst Preparation	76
	5.4 Results and Discussion	77
	5.5 Conclusions	92
	5.6 Acknowledgements	92
	5.7 References	92

CHAPTER		PAGE
VI	COMBINED CARBON DIOXIDE AND STEAM REFORMING WITH METHANE IN LOW TEMPERATURE PLASMAS	95
	6.1 Abstract	95
	6.2 Introduction	95
	6.3 Experimental	98
	6.4 Results and Discussion	100
	6.4.1 Reaction Pathways in Plasma Environment	100
	6.4.2 Effect of Carbon Sources with Water-Vapor	103
	6.4.3 Effect of Water-Vapor on Carbon Dioxide Reforming with Methane	104
	6.4.4 Effect of Power and Water-Vapor on Carbon Dioxide Reforming of Methane with Water-Vapor	106
	6.4.5 Effect of Power and Frequency on Carbon Dioxide Reforming of Methane with Water	107
	6.4.6 Effect of CO ₂ /CH ₄ Ratio on Carbon Dioxide Reforming of Methane with Water	108
	6.5 Conclusions	110
	6.6 Acknowledgements	110
	6.7 References	111
VII	COMBINED STEAM REFORMING AND PARTIAL OXIDATION OF METHANE TO SYNTHESIS GAS UNDER ELECTRICAL DISCHARGE	113
	7.1 Abstract	113
	7.2 Introduction	113
	7.3 Experimental	116
	7.4 Results and Discussion	119
	7.4.1 Effect of Feed Gas Composition	119
	7.4.2 Effect of Applied Power	124

CHAPTER		PAGE
	7.4.3 Effect of Frequency	128
	7.4.4 Effect of Residence Time	132
	7.5 Conclusions	134
	7.6 Acknowledgements	135
	7.7 References	135
VIII	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	138
	8.1 Conclusions	138
	8.2 Recommendations	140
	REFERENCES	141
	APPENDIX	143
	CURRICULUM VITAE	145

LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
3.1 Effects of power on partial oxidation reaction of methane. Overall flow rate: 100 sccm. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. Applied frequency: 300 Hz.	42
3.2 Effect of frequency on partial oxidation reaction of methane. Overall flow rate: 100 sccm. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. Input power: 10 W.	43
3.3 Effects of power on partial oxidation reaction of methane with oxygen in helium. Overall flow rate: 100 sccm. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. Applied frequency: 300 Hz.	44
6.1 Reactions of methane, carbon dioxide, carbon monoxide with water-vapor.	104
6.2 Carbon dioxide reforming of methane with/without water-vapor at a 3:1 CO ₂ /CH ₄ ratio.	105
6.3 Effect of power and water-vapor on carbon dioxide reforming of methane with water at a 5:1 CO ₂ /CH ₄ ratio.	107
6.4 Effect of power and frequency on carbon dioxide reforming of methane with water at a 1:1 CO ₂ /CH ₄ ratio.	108
6.5 Effect of CO ₂ /CH ₄ ratio on carbon dioxide reforming of methane with water at 50% water-vapor.	109
7.1 Effect of feed gas composition on conversions and product distribution. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. Input power: 11 W. Applied frequency: 300 Hz.	120
7.2 Effect of power on conversions and product distribution. Gap width: 10 mm. Percentage of water-vapor: 30.	125
7.3 Effect of frequency on conversions and product distribution. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. CH ₄ /O ₂ ratio: 5. Input power: 11 W.	130

LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
1.1 Chemicals from synthesis gas	4
1.2 Plasma environment with corona discharge	12
2.1 Effect of CO ₂ /CH ₄ feed mole ratio (a) conversions and current (b) H ₂ /CO and CO/C ₂ . Overall flowrate: 50 sccm. Input low side voltage: 48 V. Input frequency: 700 Hz. Gap width: 1.2 cm.	20
2.2 Effect of input voltage (a) conversions and current (b) H ₂ /CO and CO/C ₂ . Overall flowrate: 50 sccm. Input frequency: 700 Hz. Gap width: 1.2 cm. CO ₂ /CH ₄ feed mole ratio: 3.	23
2.3 Effect of input frequency (a) conversions and current (b) H ₂ /CO and CO/C ₂ . Overall flowrate: 50 sccm. Gap width: 1.2 cm. Input low side voltage: 60 V. CO ₂ /CH ₄ feed mole ratio: 3.	24
2.4 Effect of flowrate (a) conversions and current (b) H ₂ /CO and CO/C ₂ . Gap width: 1.2 cm. Input low side voltage: 48 V. Input frequency: 700 Hz. CO ₂ /CH ₄ feed mole ratio: 3.	25
2.5 Effect of gap width (a) conversions and current (b) H ₂ /CO and CO/C ₂ . Overall flowrate: 50 sccm. Input low side voltage: 48 V. Input frequency: 700 Hz. CO ₂ /CH ₄ feed mole ratio: 3.	27
2.6 Effect of waveform: (a) Input low side voltage vs. Power (b) CO/C ₂ vs. Power. Overall flowrate: 100 sccm. Input frequency: 700 Hz. Gap width, 1.0 cm. CO ₂ /CH ₄ feed mole ratio: 3.	28
3.1 Schematic diagram of reactor system	35

FIGURE	PAGE
3.2 Effects of CH ₄ /O ₂ ratio on conversions of CH ₄ and O ₂ and specific energy consumption (a), on selectivities of CO, CO ₂ , H ₂ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , and C ₂ H ₂ (b). Overall flow rate: 100 sccm. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. Input power: 10 W. Applied frequency: 300 Hz.	38
3.3 Effect of residence time by varying flow rate on conversions of CH ₄ and O ₂ and specific energy consumption (a), on selectivities of CO, CO ₂ , H ₂ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , and C ₂ H ₂ (b). CH ₄ /O ₂ molar ratio: 3:1. Gap width: 10 mm. Input power: 10 W. Applied frequency: 300 Hz.	48
3.4 Effect of gap width on conversions of CH ₄ and O ₂ , specific energy consumption and current. CH ₄ /O ₂ molar ratio: 3:1. Overall flow rate: 100 sccm. Input power: 10 W. Applied frequency: 300 Hz.	49
4.1 Corona discharge reactor configuration.	60
4.2 Effects of oxygen content on conversions without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Applied frequency: 600 Hz. Input low side voltage: 64 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ feed mole ratio: 1:1.	61
4.3 Effects of oxygen content on H ₂ /CO and CO/C ₂ without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Applied frequency: 600 Hz. Input low side voltage: 64 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ feed mole ratio: 1:1.	62
4.4 Effects of operating temperature of Pt/ZrO ₂ catalyst without plasma on methane, carbon dioxide and oxygen conversions. Overall flowrate: 50 sccm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	63

FIGURE	PAGE
4.5 Effects of operating temperature on conversions with/without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Applied frequency: 600 Hz. Input low side voltage: 56 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	64
4.6 Effects of operating temperature on H ₂ /CO and CO/C ₂ with/without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Applied frequency: 600 Hz. Input low side voltage: 56 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	64
4.7 Effects of applied frequency on conversions with/without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Input low side voltage: 56 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	65
4.8 Effects of applied frequency on H ₂ /CO and CO/C ₂ with/without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Input low side voltage: 56 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	66
4.9 Effects of input low side voltage on conversions with and without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Applied frequency: 600 Hz. Input low side voltage: 56 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	67
4.10 Effects of input low side voltage on H ₂ /CO and CO/C ₂ with/without catalyst. Overall flowrate: 50 sccm. Applied frequency: 600 Hz. Input low side voltage: 56 V. Gap width: 1.3 cm. CH ₄ /CO ₂ /O ₂ feed mole ratio: 12:12:1.	68
5.1 Corona discharge reactor configuration.	76
5.2 Effects of applied frequency on reactant conversions for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Input low side voltage: 64 V.	78
5.3 Effects of input low side voltage on reactant conversions for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Applied frequency: 500 Hz.	79

FIGURE	PAGE
5.4 Effects of applied frequency on current for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Input low side voltage: 64 V.	80
5.5 Effects of input low side voltage on current for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Applied frequency: 500 Hz.	80
5.6 Effects of applied frequency on CO/C ₂ mole ratio for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Input low side voltage: 64 V.	83
5.7 Effects of input low side voltage on CO/C ₂ for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Applied frequency: 500 Hz.	83
5.8 Effects of applied frequency on H ₂ /CO mole ratio for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Input low side voltage: 64 V.	84
5.9 Effects of input low side voltage on H ₂ /CO for methane partial oxidation in air with/without Pt/KL. Applied frequency: 500 Hz.	84
5.10 Effects of applied frequency on reactant conversions for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Input low side voltage: 56 V.	86
5.11 Effects of input low side voltage on reactant conversions for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Applied frequency: 600 Hz.	86
5.12 Effects of applied frequency on current for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Input low side voltage: 56 V.	87
5.13 Effects of input low side voltage on current for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Applied frequency: 600 Hz.	87
5.14 Effects of applied frequency on CO/C ₂ for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Input low side voltage: 56 V.	90

FIGURE	PAGE
5.15 Effects of input low side voltage on CO/C ₂ for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Applied frequency: 600 Hz.	90
5.16 Effects of applied frequency on H ₂ /CO for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Input low side voltage: 56 V.	91
5.17 Effects of input low side voltage on H ₂ /CO for carbon dioxide reforming with methane with/without Pt/KL. Applied frequency: 600 Hz.	91
7.1 Schematic diagram of corona discharge reactor.	117
7.2 Effect of feed gas composition on energy consumed to convert a methane molecule. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. Input power: 11 W. Applied frequency: 300 Hz.	124
7.3 Effect of power on current. Gap width: 10 mm. Percentage of water-vapor: 30.	127
7.4 Effect of power on energy consumed to convert a methane molecule. Gap width: 10 mm. Percentage of water-vapor: 30.	128
7.5 Effect of frequency on current. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. CH ₄ /O ₂ ratio: 5. Input power: 11 W.	131
7.6 Effect of frequency on energy consumed to convert a methane molecule. Gap width: 10 mm. Residence time: 0.23 s. CH ₄ /O ₂ ratio: 5. Input power: 11 W.	131
7.7 Effect residence time on conversion and energy consumed to convert a methane molecule. Gap width: 10 mm. CH ₄ /O ₂ ratio: 5. Percent water-vapor: 30. Input power: 16 W. Applied frequency, 400 Hz.	132

FIGURE	PAGE
7.8 Effect residence time on CO/C ₂ molar ratio. Gap width: 10 mm. CH ₄ /O ₂ ratio: 5. Percent water-vapor: 30. Input power: 14 W. Applied frequency: 400 Hz.	133
7.9 Effect residence time on energy consumed to convert a methane molecule. Gap width: 10 mm. CH ₄ /O ₂ ratio: 5. Percent water-vapor: 30. Input power: 14 W. Applied frequency: 400 Hz.	133