

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



E47393



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย

การเปลี่ยนรูปก๊าซธรรมชาติที่มีองค์ประกอบคาร์บอนไดออกไซด์
เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ภายใต้ระบบพลาสมาอุณหภูมิ
ต่ำแบบไพโรนแบบหลายขั้นตอน

โดย

สุเมธ ชวเดช
ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์
กฤติยา พรใหม่

กุมภาพันธ์ 2555



E47393



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนวิจัย
กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานวิจัย



การเปลี่ยนรูปก๊าซธรรมชาติที่มีองค์ประกอบคาร์บอนไดออกไซด์
เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ภายใต้ระบบพลาสมาอุณหภูมิ
ต่ำแบบไพโรนแบบหลายขั้นตอน

โดย

สุเมธ ชวเดช
ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์
กฤติยา พรใหม่

กุมภาพันธ์ 2555

Acknowledgments

This project was financially supported by The Ratchada Pisak Sompot Fund, Chulalongkorn University. The Excellence Center for Petroleum, Petrochemical and Advanced Materials is also acknowledged for providing all research facilities.

ชื่อโครงการวิจัย: “การเปลี่ยนรูปก๊าซธรรมชาติที่มีองค์ประกอบคาร์บอนไดออกไซด์

เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ภายใต้ระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบไฟฟ้าร้อนแบบหลายขั้นตอน”

ชื่อผู้วิจัย: ศ. ดร. สุเมธ ชวเดช, ผศ. ดร. ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์, นางสาวกฤติยา พรใหม่

เดือนและปีที่ทำการวิจัย: เมษายน 2553

บทคัดย่อ

E 47393

ส่วนที่ 1: ได้ทำการศึกษาผลกระทบของจำนวนเครื่องปฏิกรณ์ของระบบพลาสมาประกายไฟฟ้าร้อน

อุณหภูมิต่ำแบบหลายขั้นตอนต่อประสิทธิภาพระบบรวมการเปลี่ยนรูปและการออกซิเดชันบางส่วน

ของก๊าซธรรมชาติจำลองที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบโดยมีอัตราส่วนโดยโมลของมีเทน,

อีเทน, โพรเพน, และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็น 70:5:5:20 สำหรับการทดลองปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบ

บางส่วนนั้น ออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศถูกนำมาใช้เป็นแหล่งออกซิเจนโดยมีอัตราส่วนระหว่าง

ไฮโดรคาร์บอนต่อออกซิเจนเป็น 2/1 จากการศึกษาพบว่า ในระบบที่ไม่มีการออกซิเดชันบางส่วนและ

มีอัตราการใช้ของสารตั้งต้นคงที่ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นทั้งหมดยกเว้น

คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนเครื่องปฏิกรณ์จาก 1 ถึง 3 เครื่อง แต่ถ้าเพิ่มจำนวนเครื่อง

ปฏิกรณ์มากกว่า 3 เครื่อง ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามสำหรับ

ระบบที่มีการควบคุมให้มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาคงที่ เฉพาะค่าการเปลี่ยนแปลงของโพรเพนเท่านั้นที่

เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นตัวอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อจำนวน

ของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเติมออกซิเจนให้แก่ระบบ พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ

เปลี่ยนรูปของก๊าซธรรมชาติเป็นอย่างมาก การใช้อากาศเป็นแหล่งของออกซิเจนส่งผลดีต่อ

ประสิทธิภาพของระบบมากกว่าการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ทั้งในรูปของค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น และค่าการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยพบว่าค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น คือ 3.21×10^{-18} วัตต์ วินาที ต่อโมเลกุลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไป และ 2.57×10^{-18} วัตต์ วินาที ต่อโมเลกุลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ซึ่งได้จากระบบที่มีการใช้อากาศเป็นแหล่งของออกซิเจนและใช้เครื่องปฏิกรณ์จำนวน 3 เครื่อง ที่เวลาของการเกิดปฏิกิริยาครั้งที่ 4.38 วินาที

ส่วนที่ 2: โดยปกติแล้วก๊าซธรรมชาติประกอบด้วยมีเทนเป็นส่วนใหญ่และมีคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง ๒๐% การผลิตทางการค้าก๊าซสังเคราะห์ (มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์) มักใช้กระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยาของมีเทนที่แยกจากก๊าซธรรมชาติร่วมกับการเปลี่ยนรูปด้วยไอน้ำ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการตัวเร่งปฏิกิริยานี้ต้องควบคุมภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ดังนั้นการควบคุมระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูปไอน้ำและพลาสมาอุณหภูมิต่ำจึงถูกพิจารณาเป็นวิธีการที่เป็นไปได้ในการเปลี่ยนรูปก๊าซธรรมชาติที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ในงานวิจัยนี้ ระบบพลาสมาอุณหภูมิต่ำแบบประกายไฟฟารอนได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของปริมาณไอน้ำและค่าปัจจัยการควบคุมระบบต่างๆ อาทิ อัตราการไหลของสารตั้งต้น ค่าความต่างศักย์ และค่าความถี่กระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปก๊าซธรรมชาติที่มีองค์ประกอบคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาเปิดเผยว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นทั้งหมดและค่าผลิตผลของไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงสุดที่ปริมาณไอน้ำมีค่า 10 โมล% อัตราการไหลของสารตั้งต้น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ค่าความต่างศักย์ 13.5 กิโลโวลต์ และค่าความถี่ 300 เฮิร์ตซ์ โดยที่สภาวะเหมาะสมดังกล่าวให้ค่าพลังงาน

ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นคือ 2.26×10^{-18} วัตต์วินาทีต่อโมเลกุลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไป และ 1.58×10^{-18} วัตต์วินาทีต่อโมเลกุลของไฮโดรเจนที่ผลิตได้

ส่วนที่ 3: ในการศึกษาี้ ได้ทำการทดลองวิธีการร่วมระหว่างการเปลี่ยนรูปโดยไอน้ำและการออกซิเดชันบางส่วนของก๊าซธรรมชาติที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบภายใต้ประกายไฟฟ้าแบบร่อน โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยการควบคุมระบบต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนโมลที่เดิมของไฮโดรคาร์บอนต่อออกซิเจน, ความต่างศักย์ไฟฟ้า, ความถี่กระแสไฟฟ้า, และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้น, การเลือกเกิดและผลิตผลของผลิตภัณฑ์ต่างๆ, และพลังงานที่ใช้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงของมีเทนหรือผลิตผลของก๊าซสังเคราะห์เมื่อมีการเพิ่มของความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แต่ได้ผลตรงกันข้ามเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนโมลที่เดิมของไฮโดรคาร์บอนต่อออกซิเจนและความถี่กระแสไฟฟ้า ที่สภาวะเหมาะสมคือ อัตราส่วนโมลที่เดิมของไฮโดรคาร์บอนต่อออกซิเจนเท่ากับ 2/1, ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 14.5 กิโลโวลต์, ความถี่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 300 เฮิร์ตซ์, และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 6 มม ให้การการเปลี่ยนแปลงทั้งออกซิเจนและมีเทนที่สูงกว่า การเลือกเกิดก๊าซสังเคราะห์ที่สูงกว่า และความต้องการพลังงานที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ (การเปลี่ยนรูปของก๊าซธรรมชาติอย่างเดียว, การเปลี่ยนรูปของก๊าซธรรมชาติด้วยไอน้ำ, และการเปลี่ยนรูปของก๊าซธรรมชาติร่วมกับการออกซิเดชันบางส่วน)

Project Title: “Reforming of CO₂-Containing Natural Gas for Synthesis Gas Production in Low-Temperature Multistage Gliding Arc Plasma System”

Name of the Investigators: Prof. Dr. Sumaeth Chavadej, Asst. Prof. Dr. Thammanoon Sreethawong, and Ms. Krittiya Pornami

Year: April, 2010

Abstract

E 47393

Part 1: The effect of stage number of multistage AC gliding arc discharge reactors on the process performance of the combined reforming and partial oxidation of simulated CO₂-containing natural gas having a CH₄:C₂H₆:C₃H₈:CO₂ molar ratio of 70:5:5:20 was investigated. For the experiments with partial oxidation, either pure oxygen or air was used as the oxygen source with a fixed hydrocarbon-to-oxygen molar ratio of 2/1. Without partial oxidation at a constant feed flow rate, all conversions of hydrocarbons, except CO₂, greatly increased with increasing number of stages from 1 to 3; but beyond 3 stages, the reactant conversions remained almost unchanged. However, for a constant residence time, only C₃H₈ conversion gradually increased, whereas the conversions of the other reactants remained almost unchanged. The addition of oxygen was found to significantly enhance the process performance of natural gas reforming. The utilization of air as an oxygen source showed a superior process performance to pure oxygen in terms of reactant conversion and desired product selectivity. The optimum energy consumption of 12.059×10^{24} eV per mole of reactants converted and 9.659×10^{24} eV per mole of hydrogen produced was obtained using air as an oxygen source and 3 stages of plasma reactors at a constant residence time of 4.38 s.

Part 2: Generally, natural gas mainly contains methane with a very high carbon dioxide content up to 20 %. Synthesis gas (a mixture of hydrogen and carbon monoxide) is produced commercially by using the conventional catalytic processes of methane separated from natural gas with steam reforming; however, the catalytic processes have to be operated under high temperatures and pressures. Therefore, the combination of steam reforming and non-thermal plasma is considered to be a new promising way for the reforming of natural gas at ambient temperature and atmospheric pressure without a catalyst required. In this present work, a low-temperature gliding arc discharge system was employed to investigate the effects of steam content and operational parameters, i.e. total feed flow rate, applied voltage, and input frequency, on the reforming performance of CO₂-containing natural gas. The results reveal that the reactant conversions and yields of hydrogen and carbon monoxide were found to reach maximum values at a steam content of 10 mol%, a total feed flow rate of 100 cm³/min, an applied voltage 13.5 kV, and an input frequency 300 Hz. Under these optimum conditions, the power consumptions were as low as 2.26×10^{-18} Ws (14.10 eV) per reactant molecule converted and 1.58×10^{-18} Ws (9.85 eV) per molecule of produced hydrogen.

Part 3: In this study, a technique of combining steam reforming with partial oxidation of CO₂-containing natural gas in a gliding arc discharge plasma was investigated. The effects of several operating parameters including: hydrocarbons (HCs)/O₂ feed molar ratio; applied voltage; input frequency; and electrode gap distance; on reactant conversions, product selectivities and yields, and power consumptions were examined. The results showed an increase in either methane (CH₄) conversion or synthesis gas yield with increasing applied voltage and electrode gap distance, whereas the opposite trends

were observed with increasing HCs/O₂ feed molar ratio and input frequency. The optimum conditions were found at a HCs/O₂ feed molar ratio of 2/1, an applied voltage of 14.5 kV, an input frequency of 300 Hz, and an electrode gap distance of 6 mm, providing high CH₄ and O₂ conversions with high synthesis gas selectivity and relatively low power consumptions, as compared with the other processes (sole natural gas reforming, natural gas reforming with steam, and combined natural gas reforming with partial oxidation).

Table of Contents

	Page
Title page	i
Acknowledgments	ii
Abstract	iii
Table of Contents	ix
List of Tables	xiii
List of Figures	xiii
 Part 1	
1.1 Introduction and Survey of Related Literature	1
1.2 Procedure	4
1.2.1 Reactant Gases	4
1.2.2 Multistage Gliding Arc Discharge System	4
1.3 Results and Discussion	9
1.3.1 Reforming of Natural Gas without Partial Oxidation	14
1.3.1.1 Effect of Feed Flow Rate at Constant Residence Time	14
1.3.1.1.1 Effect on Reactant Conversion and Product Yield	14
1.3.1.1.2 Effect on Product Selectivity	16
1.3.1.1.3 Effect on Power Consumption	18
1.3.1.2 Effect of Residence Time at Constant Feed Flow Rate	19
1.3.1.2.1 Effect on Reactant Conversion and Product Yield	19

	Page
1.3.1.2.2 Effect on Product Selectivity	22
1.3.1.2.3 Effect on Power Consumption	23
1.3.2 Reforming of Natural Gas with Partial Oxidation	24
1.3.2.1 Reforming of Natural Gas with Partial Oxidation by using of Pure Oxygen	25
1.3.2.1.1 Effect of Feed Flow Rate at Constant Residence Time	25
1.3.2.1.1.1 Effect on Reactant Conversion	25
1.3.2.1.1.2 Effect on Product Selectivity	28
1.3.2.1.1.3 Effect on Power Consumption	29
1.3.2.1.2 Effect of Residence Time at Constant Feed Flow Rate	29
1.3.2.1.2.1 Effect on Reactant Conversion and Product Yield	29
1.3.2.1.2.2 Effect on Product Selectivity	30
1.3.2.1.2.3 Effect on Power Consumption	33
1.3.2.2 Reforming of Natural Gas with Partial Oxidation by using Air	34
1.3.2.2.1 Effect of Feed flow Rate at Constant Residence Time	34
1.3.2.2.1.1 Effect on Reactant Conversion and Product Yield	34
1.3.2.2.1.2 Effect on Product Selectivity	36
1.3.2.2.1.3 Effect on Power Consumption	37
1.3.2.2.2 Effect of Residence Time at Constant Feed Flow Rate	37
1.3.2.2.2.1 Effect on Reactant Conversion and Product Yield	37
1.3.2.2.2.2 Effect on Product Selectivity	39
1.3.2.2.2.3 Effect on Power Consumption	41

	Page
1.3.3 Comparison of Reforming of Natural Gas without and with Partial Oxidation using either Oxygen or Air	42
1.4 Conclusions	48
References	50
 Part 2	
2.1 Introduction and Survey of Related Literature	53
2.2 Procedure	54
2.2.1 Reactant Gases	54
2.2.2 AC Gliding Arc Discharge System	54
2.3 Results and Discussion	59
2.3.1 Effect of Hydrocarbons-to-Steam Molar Ratio	64
2.3.2 Effect of Total Feed Flow Rate and Residence Time	70
2.3.3 Effect of Applied Voltage	74
2.3.4 Effect of Input Frequency	80
2.4 Conclusions	86
References	87
 Part 3	
3.1 Introduction and Survey of Related Literature	90
3.2 Procedure	92
3.2.1 Reactant Gases	92
3.2.2 AC Gliding Arc Discharge System	92

	Page
3.2.3 Reaction Performance Calculation	94
3.3 Results and Discussion	96
3.3.1 Effect of the Hydrocarbons (HCs)-to-O ₂ Feed Molar Ratio	99
3.3.2 Effect of Applied Voltage	104
3.3.3 Effect of Input Frequency	108
3.3.4 Effect of Electrode Gap Distance	112
3.3.5 Comparisons of CO ₂ -Containing Natural Gas Conversion Performances with Different Reforming Processes	116
3.4 Conclusions	120
References	121
Appendix	125

List of Table

Table	Page
2.1 The corresponding steam contents at various hydrocarbons-to steam molar ratio	65
3.1 Comparison of the CO ₂ -containing natural gas conversion performances with different processes under their corresponding optimum conditions	119

List of Figures

Figure	Page
1.1 The schematic of the multistage gliding arc discharge system.	5
1.2 Schematic of the gliding arc reactor.	5
1.3 Effect of stage number of plasma reactors on reactant conversions and product yields for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	14
1.4 Effect of stage number of plasma reactors on concentrations of outlet gases for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	15
1.5 Effect of stage number of plasma reactors on product selectivities for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	16

	Page
1.6 Effect of stage number of plasma reactors on product molar ratios for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	17
1.7 Effect of stage number of plasma reactors on power consumptions for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	18
1.8 Effect of stage number of plasma reactors on reactant conversions and product yields for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	19
1.9 Effect of stage number of plasma reactors on concentrations of outlet gases for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	21
1.10 Effect of stage number of plasma reactors on product selectivities for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	22

	Page
1.11 Effect of stage number of plasma reactors on product molar ratios for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	22
1.12 Effect of stage number of plasma reactors on power consumptions for reforming of natural gas without partial oxidation in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	23
1.13 Effect of stage number of plasma reactors on reactant conversions and product yields for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	25
1.14 Effect of stage number of plasma reactors on concentrations of outlet gases for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	25
1.15 Effect of stage number of plasma reactors on product selectivities for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	27

	Page
1.16 Effect of stage number of plasma reactors on product molar ratios for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	27
1.17 Effect of stage number of plasma reactors on power consumptions for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	28
1.18 Effect of stage number of plasma reactors on reactant conversions and product yields for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	29
1.19 Effect of stage number of plasma reactors on concentrations of outlet gases for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	30
1.20 Effect of stage number of plasma reactors on product selectivities for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in case the of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	31

	Page
1.21 Effect of stage number of plasma reactors on product molar ratios for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	32
1.22 Effect of stage number of plasma reactors on power consumptions for reforming of natural gas with pure O ₂ addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	33
1.23 Effect of stage number of plasma reactors on reactant conversions and product yields for reforming of natural gas with air addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	34
1.24 Effect of stage number of plasma reactors on concentrations of outlet gases for reforming of natural gas with air addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	34
1.25 Effect of stage number of plasma reactors on product selectivities for reforming of natural gas with air addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	36

	Page
1.26 Effect of stage number of plasma reactors on product molar ratios for reforming of natural gas with air addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	36
1.27 Effect of stage number of plasma reactors on power consumptions for reforming of natural gas with air addition in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	37
1.28 Effect of stage number of plasma reactors on reactant conversions and product yields for reforming of natural gas with air addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	38
1.29 Effect of stage number of plasma reactors on concentrations of outlet gases for reforming of natural gas with air addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	39
1.30 Effect of stage number of plasma reactors on product selectivities for reforming of natural gas with air addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	40

	Page
1.31 Effect of stage number of plasma reactors on product molar ratios for reforming of natural gas with air addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	40
1.32 Effect of stage number of plasma reactors on power consumptions for reforming of natural gas with air addition in the case of varying residence time (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and feed flow rate, 125 cm ³ /min).	41
1.33 Comparison of conversions of (a) CH ₄ , (b) C ₂ H ₆ , (c) C ₃ H ₈ , (d) CO ₂ , and (e) O ₂ for combined reforming and partial oxidation of natural gas in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	43
1.34 Comparison of yields of (a) H ₂ and (b) C ₂ for combined reforming and partial oxidation of natural gas in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38).	44
1.35 Comparison of selectivities for (a) H ₂ , (b) C ₂ H ₂ , (c) C ₂ H ₄ , (d) CO, and (e) C ₄ H ₁₀ for combined reforming and partial oxidation of natural gas in the case of varying feed flow rate (applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	45

	Page
1.36 Comparison of power consumptions for combined reforming and partial oxidation of natural gas in the case of varying feed flow rate:	46
(a) power consumption per reactant molecule converted,	
(b) power consumption per hydrogen molecule produced)	
(applied voltage, 17.5 kV; frequency, 300 Hz; electrode gap distance, 6 mm; and residence time, 4.38 s).	
 Part 2	
2.1 Schematic of gliding arc discharge system.	55
2.2 Effect of steam content on (a) reactant conversions and product yields,	67
(b) concentrations of outlet gas, (c) product selectivities, and (d) product molar ratios for the reforming of natural gas with steam (total feed flow rate, 100 cm ³ /min; applied voltage, 17.5 kV; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm).	
2.3 Effect of steam content on power consumptions for the reforming of natural gas with steam (total feed flow rate, 100 cm ³ /min; applied voltage, 17.5 kV; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm)	70
(E _C : power per reactant molecule converted; E _{H₂} : power per H ₂ molecule produced).	

	Page
2.4 Effect of total feed flow rate on (a) reactant conversions and product yields, (b) concentrations of outlet gas, (c) product selectivities, and (d) product molar ratios for the reforming of natural gas with steam (steam content, 10 mol%; applied voltage, 17.5 kV; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm).	71
2.5 Effect of total feed flow rate on power consumptions for the reforming of natural gas with steam (steam content, 10 mol%; applied voltage, 17.5 kV; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm) (E_C : power per reactant molecule converted; E_{H_2} : power per H_2 molecule produced).	75
2.6 Effect of applied voltage on (a) reactant conversions and product yields, (b) concentrations of outlet gas, (c) product selectivities, and (d) product molar ratios for the reforming of natural gas with steam (steam content, 10 mol%; total feed flow rate, 100 cm ³ /min; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm).	76
2.7 Effect of applied voltage on power consumptions for the reforming of natural gas with steam (steam content, 10 mol%; total feed flow rate, 100 cm ³ /min; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm) (E_C : power per reactant molecule converted; E_{H_2} : power per H_2 molecule produced).	80

	Page
2.8 Effect of input frequency on (a) reactant conversions and product yields, (b) concentrations of outlet gas, (c) product selectivities, and (d) product molar ratios for the reforming of natural gas with steam (steam content, 10 mol%; total feed flow rate, 100 cm ³ /min; applied voltage 13.5 kV; and electrode gap distance, 6 mm).	82
2.9 Effect of input frequency on power consumptions for the reforming of natural gas with steam (steam content, 10 mol%; total feed flow rate, 100 cm ³ /min; applied voltage 13.5 kV; and electrode gap distance, 6 mm) (E _C : power per reactant molecule converted; E _{H₂} : power per H ₂ molecule produced).	85
 Part 3	
3.1 Schematic of gliding arc discharge system.	92
3.2 Effects of HCs-to-O ₂ feed molar ratio on (a) reactant conversions and product yields, (b) concentrations of outlet gas, (c) product selectivities, (d) product molar ratios, and (e) power consumptions and coke formation studied under conditions: steam content, 10 mol%; total feed flow rate, 100 cm ³ /min; applied voltage, 13.5 kV; input frequency, 300 Hz; and electrode gap distance, 6 mm (E _C : power per reactant molecule converted; E _{H₂} : power per H ₂ molecule produced).	101-102

- 3.3 Effects of applied voltage on (a) reactant conversions and product yields, 105-106
 (b) concentrations of outlet gas, (c) generated current, (d) product selectivities,
 (e) product molar ratios, and (f) power consumptions and coke formation
 under studied conditions: steam content, 10 mol%; HCs/O₂ feed molar ratio,
 2/1; total feed flow rate, 100 cm³/min; input frequency, 300 Hz; and electrode
 gap distance, 6 mm (E_c: power per reactant molecule converted;
 E_{H2}: power per H₂ molecule produced).
- 3.4 Effects of input frequency on (a) reactant conversions and product 109-110
 yields, (b) concentrations of outlet gas, (c) generated current, (d)
 product selectivities, (e) product molar ratios, and (f) power consumptions
 and coke formation under studied conditions: steam content, 10 mol%;
 HCs/O₂ feed molar ratio, 2/1; total feed flow rate, 100 cm³/min; applied voltage,
 14.5kV; and electrode gap distance, 6 mm (E_c: power per reactant
 molecule converted; E_{H2}: power per H₂ molecule produced).
- 3.5 Effects of electrode gap distance on (a) reactant conversions and product 114-115
 yields, (b) concentrations of outlet gas, (c) generated current,
 (d) product selectivities, (e) product molar ratios, and (f) power consumptions
 and coke formation under studied conditions: steam content, 10 mol%;
 HCs/O₂ feed molar ratio, 2/1; total feed flow rate, 100 cm³/min; applied
 voltage, 14.5 kV; and input frequency, 300 Hz (E_c: power per reactant
 molecule converted; E_{H2}: power per H₂ molecule produced).