ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
E46962

# MODELING AND SIMULATION OF IGCC (INTEGRATED GASIFICATION COMBINED CYCLE) PLANTS WITH CARBON CAPTURE AND STORAGE

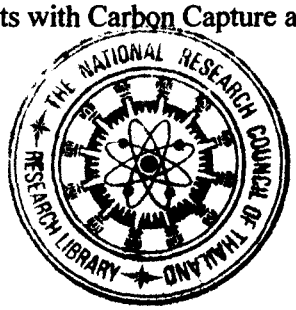
MISS AUE-ANUCH YONGSUWAN

A SPECIAL RESEARCH PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI
2010

b00246626

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
E46962

# Modeling and Simulation of IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) Plants with Carbon Capture and Storage




Miss Aue-anuch Yongsuwan B.Eng. (Chemical Engineering)

A Special Research Project Submitted in Partial Fulfillment
of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering (Chemical Engineering)
Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
2010

Special Research Project Committee

| | |
|---|---|
| ..... (Assoc. Prof. Thongchai Srinophakun, Ph.D.) | Chairman of Special Research Project Committee |
| ..... (Lect. Hong-ming Ku, Ph.D.) | Member and Special Research Project Advisor |
| ..... (Asist. Prof. Kwanchanok Pasuwat, Ph.D.) | Member |

Copyright reserved

| | |
|---|---|
| Special Research Project Title | Modeling and Simulation of IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) Plants with Carbon Capture and Storage |
| Special Research Project Credits | 6 |
| Candidate | Miss Aue-anuch Yongsuwan |
| Special Research Project Advisor | Dr. Hong-ming Ku |
| Program | Master of Engineering |
| Field of Study | Chemical Engineering |
| Department | Chemical Engineering |
| Faculty | Engineering |
| B.E. | 2553 |

E46962

## Abstract

To meet the growing world energy demand, fossil fuels, particularly coal, have been consumed increasingly. Coal is quite abundant compared to other fossil fuels such as oil and natural gas. However, the use of coal releases greenhouse gases especially $CO_2$ which causes climate change or more generally known as global warming. IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) is a technology which combines the gasification with the high efficient power production and produces a very high amount of $CO_2$. Recently, CCS (Carbon Capture and Storage) technology is added to the IGCC plant to significantly reduce $CO_2$ emission. In this project 'advanced' IGCC plants with and without carbon capture were modeled and simulated with Aspen Plus™. A physical absorption, Rectisol wash™ or Methanol process was applied to the carbon capture process. The performance based on energy and the environment was compared. Additionally, different amounts of oxygen fed to a gasifier were also compared to improve the plant efficiency. Based on 45 kg/s of coal feed, the overall efficiency of the IGCC plant with carbon capture was 35.3 - 38.4% which dropped by approximately 16.5 – 18.3%-points compared to the corresponding none-carbon capture plant. For the environment, 96.4 - 98.5% $CO_2$ capture and 498 - 670 kg of avoided $CO_2$ /MWh were obtained.

Keywords: IGCC power plants/ CO shift conversion/ Rectisol wash™/ Methanol process/ Carbon capture/ Aspen Plus™

| | |
|---|---|
| หัวข้อโครงการศึกษาวิจัย | การออกแบบและจำลองกระบวนการความร้อนร่วมแก๊สซิฟิเคชั่นและเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอน |
| หน่วยกิต | 6 |
| ผู้เขียน | นางสาวเอื้ออนุช ยงสุวรรณ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | Dr. Hong-ming Ku |
| หลักสูตร | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| ภาควิชา | วิศวกรรมเคมี |
| คณะ | วิศวกรรมศาสตร์ |
| พ.ศ. | 2553 |

E46962

## บทคัดย่อ

เพื่อตอบสนองความต้องการทางด้านพลังงานซึ่งยังคงมีแนวโน้มสูงขึ้น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทถ่านหินก็เพิ่มขึ้นตามเนื่องจากถ่านหินนั้นมีปริมาณค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลชนิดอื่นๆอย่างน้ำมัน หรือแก๊สธรรมชาติ อย่างไรก็ดี การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงได้ปล่อยแก๊สเรือนกระจกโดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปสู่บรรยากาศของโลก แก๊สดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศหรือที่รู้จักกันทั่วไปว่าภาวะโลกร้อน การออกแบบและจำลองกระบวนการความร้อนร่วมแก๊สซิฟิเคชั่นและเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนเป็นเทคโนโลยีที่รวมกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่นเข้ากับกระบวนการผลิตพลังงานประสิทธิภาพสูง แต่เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมหาศาล ปัจจุบันจึงมีการเพิ่มกระบวนการดักจับและกักเก็บคาร์บอนเข้าไปเพื่อลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โครงงานนี้ กระบวนการความร้อนร่วมแก๊สซิฟิเคชั่นแบบก้าวหน้าแบบมีและไม่มีเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนออกแบบและจำลองด้วยโปรแกรมแอสเพ่น พลัส การดูดซับแบบกายภาพที่มีชื่อว่าการล้างเรกติซอลหรือกระบวนการเมทานอลถูกเลือกประยุกต์เข้ากับกระบวนการดักจับคาร์บอน และมีการเปรียบเทียบสมรรถนะด้านพลังงานและด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการ นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบปริมาณที่แตกต่างกันของแก๊สออกซิเจนที่ป้อนเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ จากผลการออกแบบและจำลองพบว่า สำหรับถ่านหินป้อน 45 กิโลกรัม/วินาที กระบวนการความร้อนร่วมแก๊สซิฟิเคชั่นและการดักจับคาร์บอนมีประสิทธิภาพด้านความร้อนโดยรวมอยู่ที่ 35.3-38.4% ซึ่งตกลงจากกระบวนเดียวกันที่ไม่มีการดักจับคาร์บอน 16.5 – 18.3% ส่วนในด้านสิ่งแวดล้อม การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 96.4 – 98.5% และสามารถหลีกเลี่ยงการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 498 – 670 กิโลกรัม/เมกะวัตต์ ต่อชั่วโมง

E46962

คำสำคัญ : โรงไฟฟ้ากระบวนการความร้อนร่วมแก๊สซิฟิเคชั่น/ ปฏิกิริยาเปลี่ยน CO เป็น $CO_2$/
การล้างเรกติซอล/ กระบวนการเมทานอล/ การดักจับคาร์บอน/ แอสเพ่น พลัส

# ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis would not have been finished without the support of many people. I would like to gratefully acknowledge Prof. Dr. Karimi, Iftekhar A., my thesis co-supervisor at the National University of Singapore (NUS), Singapore, and Dr. Hong-ming Ku, my thesis supervisor at KMUTT, for the chance, the course of this research, and the guidance. I would like to give special regards to Assoc. Prof. Dr. Thongchai Srinophakun, and Asst. Prof. Dr. Kwanchanok Pasuwat, members of my thesis supervisory committee. My sincere thanks go to all my labmates at NUS who contributed to make this work possible through their help and support along the way. My deepest appreciation also goes to the Chemical Engineering Practice School, KMUTT for giving me more than only practice school in Thailand. My heartiest thanks to Pinthep Sethapokin and Sutipa Asirapoj in helping me during the rush time. Finally I would like to express my appreciation to my parents who always support me in every way.

# CONTENTS


| | PAGE |
|---|---|
| ENGLISH ABSTRACT | ii |
| THAI ABSTRACT | iii |
| ACKNOWLEDGEMENTS | v |
| CONTENTS | vi |
| LIST OF TABLES | viii |
| LIST OF FIGURES | ix |
| LIST OF SYMBOLS | x |
| **CHAPTER** | |
| **1. INTRODUCTION** | 1 |
| 1.1 Background | 1 |
| 1.2 Objective | 1 |
| 1.3 Scopes of Work | 1 |
| 1.4 Expected Results | 2 |
| **2. THEORY AND LITERATURE REVIEWS** | 3 |
| 2.1 IGCC Power Plants | 3 |
| 2.1.1 The Advantages of IGCC Power Plants | 5 |
| 2.2 Chemical Reactions | 6 |
| 2.3 IGCC Efficiency | 8 |
| 2.4 Absorption Process | 8 |
| 2.5 Literature Reviews | 10 |
| **3. METHODOLOGY** | 13 |
| 3.1 Researching and Gathering Data | 13 |
| 3.2 Identifying a Process Configuration and Simulator | 13 |
| 3.3 Modeling and Simulating the Process | 14 |
| 3.4 Comparing the Performances and Discussing the Results | 16 |
| **4. RESULTS AND DISCUSSION** | 17 |
| 4.1 Simulation Approaches | 17 |
| 4.1.1 Physical Properties | 17 |
| 4.2 Plant Modeling | 17 |
| 4.2.1 Coal Feed | 17 |
| 4.2.2 Gasification Section | 19 |
| 4.2.3 Shift Conversion | 22 |
| 4.2.4 Air Separation Unit (ASU) | 26 |
| 4.2.5 $CO_2$ Separation and Compression Unit | 29 |
| 4.2.6 Combined Cycle | 34 |
| 4.3 Performance of IGCC | 39 |
| **5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS** | 40 |
| 5.1 Conclusion | 40 |
| 5.2 Recommendation | 41 |

**REFERENCES** **42**

**APPENDIX** **44**
A Aspen Plus™ Fortran Statement 44
B Aspen Plus™ Input Summary 47

**CURRICULUM VITAE** **77**

# LIST OF TABLES


| TABLE | | PAGE |
|---|---|---|
| 3.1 | Main parameters and process assumptions for the simulation | 15 |
| 3.2 | Representative models using in the simulation | 16 |
| 4.1 | The composition of Illinois #6 coal | 18 |
| 4.2 | The particle size distribution of coal fed to gasification section | 18 |
| 4.3 | Mole fractions of H2 CO and CO2 in the syngas steam leaving the gasifier for the maximum cases | 21 |
| 4.4 | Main Gasification results | 21 |
| 4.5 | Compositions of coal slurry and syngas in gasification unit | 21 |
| 4.6 | Input assumptions of CO shift conversion | 25 |
| 4.7 | Steam temperatures generated by using heat from CO-shift reaction | 25 |
| 4.8 | The main composition results in CO shift reactor | 25 |
| 4.9 | Input assumptions for the columns in the air separation unit (ASU) | 27 |
| 4.10 | Simulation results in the ASU | 28 |
| 4.11 | The ASU compressor specifications and power required | 28 |
| 4.12 | Cooling results of the air separation unit (ASU) | 28 |
| 4.13 | Input data for the columns in the $CO_2$ separation or methanol process | 30 |
| 4.14 | Flash drum specifications | 30 |
| 4.15 | The simulation results in the $CO_2$ separation or methanol process | 31 |
| 4.16 | Input data for the columns in the $CO_2$ compression unit | 32 |
| 4.17 | Results of the columns in the $CO_2$ compression unit | 32 |
| 4.18 | $CO_2$ compressor and pumps specifications and results | 33 |
| 4.19 | Cooling results in $CO_2$ compression unit | 33 |
| 4.20 | Main results of $CO_2$ capture process | 34 |
| 4.21 | Process assumptions for combined cycle plant | 35 |
| 4.22 | The simulation results of gas-turbine engine | 36 |
| 4.23 | Condenser duty and amount of cooling water required | 38 |
| 4.24 | Pump specifications and results | 38 |
| 4.25 | Power acquired from steam turbines | 38 |
| 4.26 | Performance of IGCC based on 45 kg coal/s | 39 |

# LIST OF FIGURES


| FIGURE | | PAGE |
|---|---|---|
| 2.1 | Simplified scheme of an IGCC power plant | 3 |
| 2.2 | Classical dry coal IGCC system with $CO_2$ capture | 4 |
| 2.3 | Advanced coal IGCC system with $CO_2$ capture | 5 |
| 2.4 | Typical absorption process | 9 |
| 3.1 | Steps of methodology | 13 |
| 4.1 | Schematic process flow diagram of the coal gasification system | 19 |
| 4.2 | Gasification section in Aspen Plus™ | 20 |
| 4.3 | The sensitivity of composition of $H_2$, CO, and $CO_2$ in the syngas against the amount of oxygen feed ($O_2$/C) | 20 |
| 4.4 | Schematic process flow diagram of the shift conversion | 23 |
| 4.5 | CO shift conversion unit in Aspen Plus™ | 23 |
| 4.6 | The sensitivity of the conversion of $H_2O$, CO and the production of $H_2$ against temperature for Case I | 24 |
| 4.7 | The sensitivity of the conversion of $H_2O$, CO and the production of $H_2$ against temperature for Case II | 24 |
| 4.8 | Schematic process flow diagram of cryogenic distillation of air | 26 |
| 4.9 | ASU in Aspen Plus™ | 27 |
| 4.10 | Schematic process flow diagram of the CCS process | 29 |
| 4.11 | $CO_2$ Separation process flow diagram in Aspen Plus™ | 29 |
| 4.12 | $CO_2$ compression units in Aspen Plus™ | 31 |
| 4.13 | Schematic process flow diagram of a combined cycle plant | 34 |

# LIST OF SYMBOLS

| | | |
|---|---|---|
| $\Theta$ | = | Overall plant efficiency |
| $\eta$ | = | Isentropic efficiency |