การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร

นายเทอดศักดิ์ ทองคำธรรมชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FEASIBILITY STUDY OF ELECTRICAL POWER GENERATION FROM WASTEWATER TREATMENT OF BANGKOK METROPOLITAN ADMINISTRATION

Mr.Thordsak Thongkhumtammachat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

490629

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร
โดย	นายเทอดศักดิ์ ทองคำธรรมชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย)

.....กรรมการ

(ดร.ปธาน บรรจงปรุ)

เทอดศักดิ์ ทองคำธรรมชาติ : การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร . (FEASIBILITY STUDY OF ELECTRICAL POWER GENERATION FROM WASTEWATER TREATMENT OF BANGKOK METROPOLITAN ADMINISTRATION) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 128 หน้า

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ การผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานหมุนเวียน(Renewable Energy) ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาช่วยสนับสนุนและเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร โดยใช้ก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดตะกอนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ในส่วนของการประเมินความเป็นไปได้ด้านเทคนิค ได้ทำการวิเคราะห์ผลขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสม จำนวนชั่วโมงเดินเครื่อง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงพลวัต เพื่อกำหนดการเดินเครื่องรายสัปดาห์ที่เหมาะสมที่สุด และประเมินความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยใช้ดัชนีชี้วัด ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน เพื่อนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจลงทุนในโครงการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้ได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครให้มีความคุ้มค่ายิ่งขึ้น ได้แก่ การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน และการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียและบีโอดี ผลการศึกษา พบว่า ด้วยการจัดการน้ำเสียในปัจจุบันของกรุงเทพมหานคร ขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสม คือ 32 กิโลวัตต์ จำนวนชั่วโมงเดินเครื่อง 7,280 ชั่วโมงต่อปี และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ 232,960 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี มีอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับร้อยละ 26.81 และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนเท่ากับ 1.55 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของโครงการทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ ส่วนแนวทางการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าให้มีความคุ้มค่ายิ่งขึ้น ทำได้โดยการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน ซึ่งคาดว่ามีความเป็นไปได้สูงสุดที่กำลังการผลิตขนาด 52 กิโลวัตต์ และให้อัตราผลตอบแทนการลงทุนร้อยละ 31.28 หรือคิดเป็นอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน 1.8 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2549

4770301121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: RENEWABLE ENERGY / WASTE-TO-ENERGY / BIOGAS / WASTEWATER TREATMENT

THORDSAK THONGKHUMTAMMACHAT : FEASIBILITY STUDY OF ELECTRICAL POWER GENERATION FROM WASTEWATER TREATMENT OF BANGKOK METROPOLITAN ADMINISTRATION. THESIS ADVISOR : NAEBBOON HOONCHAREON,Ph.D., 128 pp.

Electrical energy demand in Thailand has been continually increased due to the country's economic growth. Electricity generation from renewable energy sources, including solar, wind, biomass, hydropower, and hydrogen is an alternative that can help support and increase the security of power systems. Moreover it is considerd as a clean and environmental friendly source of energy.

In this thesis, the feasibility study of electrical power generation from wastewater treatment of Bangkok Metropolitan Administration has been conducted. It employs biogas from sludge treatment unit of the Nongkhaem Wastewater Treatment Plant as the fuel for internal combustion engine to convert mechanical energy to electrical energy. Then, for technical feasibility analysis the installed capacity, the number of operating hours , and electrical energy produced are estimated using Dynamic Programming to determine optimal weekly schedule of power generation. Economic feasibility is evaluated by the net present value(NPV) , internal rate of return(IRR) ,and benefit-cost ratio (B-C ratio). These economic indices are used to determine the electricity generation project feasibility. Additionally, the guidelines of how to improve the effectiveness of electricity generation from the BMA's wastewater treatment have been studied. The research findings are that with current BMA's wastewater treatment, suitable installed capacity is 32 kW with 7,280 operating hours ,and 232,960 kWh produced,yearly. The corresponding IRR is 26.81% and the benefit to cost ratio is 1.55. Hence,the project is technically and economically feasible. To effectively improve the worth of the project , we should increase the amount of the biogas produced, of which the installed capacity could be increased up to 52 kW, resulting in IRR of 31.28 % ,and the benefit to cost ratio equal 1.8, respectively.

Department Electrical Engineering Student's signature Thordsak T.

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature

Academic year 2006 .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้ให้เห็นข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไขต่าง ๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ดร.ปธาน บรรจงปรุ และอาจารย์ไชยะ แช่มช้อย ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของกรุงเทพมหานครและเจ้าหน้าที่ของบริษัทประจำโรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี ดินแดง รัตนโกสินทร์ สี่พระยา ทุ่งครุ และหนองแขม ที่ได้ให้ข้อมูลเพื่อใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่สาวและพี่ชายที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจน เพื่อน ๆ พี่น้องทุก ๆ คนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 2

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน 3

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ 3

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 4

2 การผลิตไฟฟ้าจากระบบจัดการน้ำเสีย. 5

2.1 นิยามและคำจำกัดความ 5

2.2 ที่มาของน้ำเสีย 6

2.3 การเปลี่ยนน้ำเสียเป็นตะกอนน้ำเสีย 7

2.3.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น 7

2.3.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง 7

2.3.3 การบำบัดน้ำเสียขั้นที่สาม 8

2.4 การหมักตะกอนน้ำเสีย 8

2.5 ประโยชน์ของการหมักตะกอนน้ำเสีย 9

2.6 การผลิตไฟฟ้าจากก๊าซหมัก 10

2.6.1 องค์ประกอบของการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซหมัก 10

2.6.2 ระบบผลิตพลังงานร่วม 11

2.7 เทคโนโลยีระบบผลิตพลังงานร่วมโดยใช้ก๊าซหมัก 12

2.7.1 กังหันแก๊ส 12

บทที่		หน้า
	2.7.1.1 ระบบผลิตพลังงานร่วมโดยกังหันแก๊สและเครื่องถ่ายเทความร้อนชนิดกำเนิดไอน้ำผลิตไอน้ำความดันสูง	13
	2.7.1.2 ระบบผลิตพลังงานร่วมโดยกังหันแก๊สและเครื่องถ่ายเทความร้อน	14
	2.7.2 กังหันแก๊สขนาดเล็ก	16
	2.7.3 เครื่องยนต์สันดาปภายใน	19
	2.7.4 เซลล์เชื้อเพลิง	24
	2.7.5 สรุปการเปรียบเทียบชนิดและคุณลักษณะของระบบผลิตพลังงานร่วม	29
	2.8 ตัวอย่างการผลิตไฟฟ้าจากระบบจัดการน้ำเสียในต่างประเทศ	30
	2.8.1 โรงบำบัดน้ำเสีย Point Loma ประเทศสหรัฐอเมริกา	30
	2.8.2 โรงบำบัดน้ำเสีย Gold Bar ประเทศแคนาดา	31
	2.8.3 โรงบำบัดน้ำเสีย Littleton/Englewood ประเทศสหรัฐอเมริกา	32
	2.8.4 โรงบำบัดน้ำเสีย Gloversville-Johnstown ประเทศสหรัฐอเมริกา	33
	2.8.5 โรงบำบัดน้ำเสียอื่นๆ ประเทศสหรัฐอเมริกา	34
3	ระบบจัดการน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร	38
	3.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย	38
	3.2 การจัดการน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร	38
	3.3 ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่และระบบบำบัดตะกอนรวมศูนย์	40
	3.3.1 โรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา	40
	3.3.2 โรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี	42
	3.3.3 โรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์	43
	3.3.4 โรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ	44
	3.3.5 โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง	45
	3.3.6 โรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม	46
	3.3.7 ระบบบำบัดตะกอน	49
	3.4 ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่และระบบบำบัดตะกอนแยก	51
	3.5 ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก	51
4	หลักการประเมินความเป็นไปได้ของโครงการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ	54
	4.1 นิยามตัวแปร	54
	4.1.1 ตัวแปรด้านเทคนิค	54
	4.1.2 ตัวแปรด้านเศรษฐศาสตร์และการเงิน	55
	4.2 การหาขนาดกำลังการผลิต	56

บทที่		หน้า
	4.3 การกำหนดเวลาในการเดินเครื่องและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	57
	4.3.1 แบบจำลองของถังเก็บก๊าซชีวภาพ	58
	4.3.2 มูลค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้	59
	4.3.3 การพัฒนาโปรแกรมเชิงพลวัต	60
	4.4 การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์	74
	4.4.1 รายได้	75
	4.4.2 รายจ่าย	75
	4.4.3 มูลค่าปัจจุบัน	77
	4.4.4 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	79
	4.4.5 อัตราผลตอบแทนภายใน	80
	4.4.6 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน	81
5	การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการผลิตไฟฟ้าจากการบำบัดน้ำเสีย ของกรุงเทพมหานคร	83
	5.1 แหล่งที่มาของก๊าซหมัก	83
	5.2 การศึกษาความเป็นไปได้ด้านเทคนิค	84
	5.2.1 เครื่องต้นกำลัง	85
	5.2.2 สมมติฐานและเงื่อนไขที่ใช้	86
	5.2.3 ขั้นตอนการคำนวณ	89
	5.2.4 ผลการศึกษา	91
	5.3 การประเมินความคุ้มค่าจากการผลิตไฟฟ้า	92
	5.3.1 สมมติฐานและเงื่อนไขที่ใช้	92
	5.3.2 ขั้นตอนการคำนวณ	93
	5.3.3 ผลการศึกษา	95
6	แนวทางการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร	99
	6.1 การเพิ่มขนาดความจุของถังเก็บก๊าซ	99
	6.2 การเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน	101
	6.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซหมักกับปริมาณน้ำเสียและบีโอดี	104
	6.3.1 ระบบบำบัดน้ำเสีย	105
	6.3.2 ระบบบำบัดตะกอน	110

บทที่ หน้า

7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 113
7.1 สรุปผลการวิจัย 113
7.2 ข้อเสนอแนะ 115
รายการอ้างอิง 116
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. 121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างคุณลักษณะของการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากกังหันแก๊ส	15
2.2	คุณลักษณะการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากกังหันแก๊สเมื่อใช้กับก๊าซชีวภาพ	15
2.3	ตัวอย่างคุณลักษณะของการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากกังหันแก๊สขนาดเล็ก	18
2.4	คุณลักษณะการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากกังหันแก๊สขนาดเล็ก เมื่อใช้กับก๊าซชีวภาพ	18
2.5	ตัวอย่างคุณลักษณะของการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วม จากเครื่องยนต์สันดาปภายใน	21
2.6	คุณลักษณะการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน เมื่อใช้กับก๊าซชีวภาพ	22
2.7	ตัวอย่างคุณลักษณะของการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากเซลล์เชื้อเพลิง	27
2.8	คุณลักษณะการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมจากเซลล์เชื้อเพลิง เมื่อใช้กับก๊าซชีวภาพ	27
2.9	เปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบผลิตพลังงานร่วมเมื่อใช้กับก๊าซชีวภาพ	29
2.10	เปรียบเทียบคุณลักษณะสมบัติที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า จากการบำบัดน้ำเสียของที่ต่างๆ	36
3.1	สรุปข้อมูลโรงควบคุมคุณภาพน้ำของระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ และระบบบำบัดตะกอนรวมศูนย์	48
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีชี้วัดเชิงเศรษฐศาสตร์และการตัดสินใจลงทุน	82
5.1	เปรียบเทียบคุณลักษณะของระบบผลิตพลังงานร่วมด้วยเทคโนโลยีประเภทต่างๆ	85
5.2	สมมติฐานในการศึกษาความเป็นไปได้ด้านเทคนิค	86
5.3	สรุปจำนวนชั่วโมงเดินเครื่อง และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ที่ขนาดกำลังการผลิตต่างๆ กันของเครื่องยนต์สันดาปภายในต่อสัปดาห์	90
5.4	สมมติฐานในการศึกษาเพื่อประเมินความคุ้มค่าจากการผลิตไฟฟ้า	92
5.5	สรุปดัชนีชี้วัดความคุ้มค่าจากการผลิตไฟฟ้าจากระบบบำบัดน้ำเสีย ของกรุงเทพมหานครที่ขนาดกำลังการผลิตต่างๆ กัน	95
5.6	การวิเคราะห์งบลงทุนของการติดตั้งและดำเนินงานของระบบผลิตไฟฟ้า ขนาด 32 กิโลวัตต์ จากระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร	97
6.1	ผลการประเมินความเป็นไปได้ด้านเทคนิค และความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ จากการเพิ่มขนาดความจุของถังเก็บก๊าซ	100

6.2 ผลการประเมินความเป็นไปได้ด้านเทคนิค และความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์จากการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน 102
6.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และสัมประสิทธิ์ค่าคงตัวของสมการความถดถอยระหว่างปริมาณตะกอนน้ำเสียกับปริมาณน้ำเสีย บีโอดี และผลคูณของปริมาณน้ำเสียกับบีโอดี 107
ก.1 สรุปข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์สันดาปภายในจากผู้ผลิตเครื่องยนต์สันดาปภายในของยี่ห้อ CATERPILLAR 123
ก.2 สรุปข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์สันดาปภายในจากผู้ผลิตเครื่องยนต์สันดาปภายในของยี่ห้อ PERKINS 124
ก.3 ราคาอาคารและสิ่งปลูกสร้างที่ขนาดกำลังการผลิตต่างๆ กัน 125
ก.4 สรุปข้อมูลด้านเทคนิคของเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ 126
ก.5 สรุปข้อมูลด้านการเงินของเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ 127

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	องค์ประกอบของการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมจากก๊าซหมัก	10
2.2	องค์ประกอบของระบบผลิตพลังงานร่วมจากกังหันแก๊ส	13
2.3	วัฏจักรการทำงานระบบผลิตพลังงานร่วมโดยกังหันแก๊สและเครื่องถ่ายเทความร้อนชนิดกำเนิดไอน้ำผลิตไอน้ำความดันสูง	14
2.4	วัฏจักรการทำงานของระบบผลิตพลังงานร่วมโดยกังหันแก๊สและเครื่องถ่ายเทความร้อน	14
2.5	องค์ประกอบของระบบผลิตพลังงานร่วมจากกังหันแก๊สขนาดเล็ก	17
2.6	องค์ประกอบของระบบผลิตพลังงานร่วมจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน	20
2.7	สัดส่วนการประยุกต์ใช้งานระบบผลิตพลังงานร่วมจากเครื่องยนต์สันดาปภายในในประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี ค.ศ.2000	23
2.8	กระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง 1 เซลล์	25
2.9	องค์ประกอบของระบบผลิตพลังงานร่วมจากเซลล์เชื้อเพลิง	25
2.10	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสีย Point Loma	30
2.11	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสีย Gold Bar	31
2.12	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสีย Littleton/Englewood	32
2.13	กระบวนบำบัดน้ำเสียรวมของโรงบำบัดน้ำเสีย Gloversville-Johnstown	33
3.1	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา	41
3.2	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี	43
3.3	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์	44
3.4	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งครุ	45
3.5	กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง	46
3.6	กระบวนการบำบัดน้ำเสียและบำบัดตะกอนของโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม	47
3.7	แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งและพื้นที่บริการของแต่ละโรงควบคุมคุณภาพน้ำ	49
3.8	ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่และระบบบำบัดตะกอนรวมศูนย์	50
3.9	ระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่และระบบบำบัดตะกอนรวมแยก	51
4.1	ภาพรวมของแนวทางการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการผลิตไฟฟ้าด้วยก๊าซชีวภาพ	57
4.2	แบบจำลองของถังเก็บก๊าซชีวภาพ	58
4.3	อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาใช้งานรายสัปดาห์	60
4.4	แผนผังโปรแกรมเชิงพลวัตของการเปลี่ยนสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใน 168 ชั่วโมง	61

ภาพประกอบ หน้า

4.5 แผนผังโปรแกรมเชิงพลวัตของการเปลี่ยนสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่พิจารณา 62
4.6 เส้นทางการเปลี่ยนสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตั้งแต่โนดเริ่มต้นจนถึงโนดสิ้นสุด 71
4.7 การคำนวณเส้นทางการเปลี่ยนสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จำนวน 3 ชั่วโมง 72
4.8 แผนผังกระแสเงินสดของการคิดมูลค่าปัจจุบัน 78
5.1 ฮีสโตรแกรมของค่าประสิทธิผลของปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซหมัก 84
5.2 เปรียบเทียบค่าประสิทธิผลของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจริงต่อวันกับค่าประสิทธิผลของปริมาณก๊าซมีเทนที่มีการแจกแจงแบบปกติ 87
5.3 อัตราการไหลเข้าของก๊าซมีเทนสู่ถังเก็บ 88
5.4 แผนผังของโปรแกรมเชิงพลวัตของการเปลี่ยนสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายใน 168 ชั่วโมง 90
5.5 แผนผังการคำนวณของการศึกษาความเป็นไปได้และความคุ้มค่าจากการผลิตไฟฟ้า 94
5.6 สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิต 32 กิโลวัตต์ ในช่วงเวลา 1 สัปดาห์เทียบกับช่วงอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU 96
6.1 แผนผังแสดงภาพรวมการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร 105
6.2 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนน้ำเสียจริงกับปริมาณตะกอนน้ำเสียจากสมการความถดถอยเชิงเส้น กรณีที่สมมติให้ปริมาณตะกอนน้ำเสียขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเสียเพียงอย่างเดียว 109
6.3 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนน้ำเสียจริงกับปริมาณตะกอนน้ำเสียจากสมการความถดถอยเชิงเส้น กรณีที่สมมติให้ปริมาณตะกอนน้ำเสียขึ้นอยู่กับบีโอดีเพียงอย่างเดียว 109
6.4 เปรียบเทียบปริมาณตะกอนน้ำเสียจริงกับปริมาณตะกอนน้ำเสียจากสมการความถดถอยเชิงเส้น กรณีที่สมมติให้ปริมาณตะกอนน้ำเสียขึ้นอยู่กับผลคูณของปริมาณน้ำเสียและบีโอดีเพียงอย่างเดียว 110
6.5 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซหมักจริงกับปริมาณก๊าซหมักจากสมการความถดถอยเชิงเส้น กรณีที่สมมติให้ปริมาณก๊าซหมักขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนเข้าถังหมัก 111