

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์  
เพื่อการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย

USING MATHEMATICAL MODELS FOR ENERGY  
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THAILAND

แหลมทอง เหล่าคงถาวร  
LAEMTHONG LAOKHONGTHAVORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-098-206

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

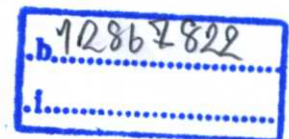
การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์  
เพื่อการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย

USING MATHEMATICAL MODELS FOR ENERGY  
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THAILAND

แหลมทอง เหล่าคงถาวร  
LAEMTHONG LAOKHONGTHAVORN



เลขทศ.....  
เลขทะเบียน 148242  
ในเดือนปี 18 มี.ค. 2559



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-D-098-206

USING MATHEMATICAL MODELS FOR ENERGY  
AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THAILAND

LAEMTHONG LAOKHONGTHAVORN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016  
KMITL-2016-EN-D-098-206



คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย  
Thesis Title Using Mathematical Models for Energy and Environmental Management in Thailand  
นักศึกษา นายแหลมทอง เหล่าคงถาวร  
รหัสประจำตัว 54610408  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชลิตา อุตะภา  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-D-098-206

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วัชระ	เพียรสุภาพ	
รศ.ดร.นันทวัฒน์	จรัสโรจน์ธนเดช	
ผศ.ดร.อาทิตย์	เพชรศศิธร	
ผศ.ดร.ภาสกร	ขันทองทิพย์	
ผศ.ดร.ชลิตา	อุตะภา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย
นักศึกษา	นายแหลมทอง เหล่าคงถาวร
รหัสนักศึกษา	54610408
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชลิตา อุตะภา

### บทคัดย่อ

ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก กำลังให้ความสำคัญกับการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากทุกประเทศกำลังประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกๆ ปี แนวทางการแก้ไขปัญหาหนึ่งได้เน้นการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของสภาวะโลกร้อน โดยใช้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Carbon dioxide equivalent emissions, CDE) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งบอกปริมาณก๊าซเรือนกระจกอันเกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ ของ มนุษย์ ในขณะที่เดียวกัน ปัญหาวิกฤตพลังงานโลกเร่งเร้าให้เกิดการวิจัยหาแหล่งพลังงานทดแทนอย่างมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่อย่างจำกัดและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโลกอย่างมาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการนำแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกวิธีการการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อน เนื่องจากมีหลายปัจจัย หลายวัตถุประสงค์ หลายข้อจำกัด ซึ่งต้องถูกพิจารณาในเวลาเดียวกัน และ ข้อมูลมีความไม่แน่นอนสูง งานวิจัยได้นำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาตลาดสมดุลของการผลิตเอทานอลในประเทศไทย ปัญหาการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการน้ำเสีย และการบริหารจัดการขยะในกรุงเทพมหานคร

แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่าถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการตัดสินใจการผลิตเอทานอลในประเทศไทย แบบจำลองนี้ประกอบด้วยผู้เล่น 3 ฝ่ายซึ่งแข่งขันซึ่งกันและกันในการผลิตเอทานอล ผู้เล่นทั้ง 3 ผลิตเอทานอลจากผลผลิตการเกษตรและมีส่วนในการกำหนดราคาเอทานอล ผู้เล่นคนแรกผลิตเอทานอลจากอ้อย และ อีก 2 ฝ่ายที่เหลือ ผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังและกากน้ำตาล การพิจารณาตัดสินใจในการผลิตเอทานอลขึ้นกับปริมาณของ ผลผลิตอ้อย มันสำปะหลัง และ กากน้ำตาล ซึ่งสัมพันธ์กับราคาขายเอทานอล และ ราคาผลผลิต งานวิจัยนี้ได้ใช้การวิจัยดำเนินการเพื่อหาค่าเหมาะสมของวัตถุประสงค์ของผู้ตัดสินใจภายใต้ปริมาณผลผลิตการเกษตรที่มีจำกัดและยังผลให้เกิดการผลิตพลังงานทดแทนอย่างยั่งยืน

เพื่อบริหารจัดการน้ำการกำจัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ อย่างยั่งยืน โดยการนำไปผลิตพลังงานทดแทน และ ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองหลายวัตถุประสงค์ ในการพิจารณาวิธีการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ด้วยการหมักเพื่อผลิตไบโอแก๊ส การฝังกลบ การนำไปทำปุ๋ยหมัก และ นำไปเผาเพื่อผลิตพลังงานความร้อน ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองได้แนะนำให้บริหารจัดการ การกำจัดตะกอนน้ำเสียด้วย วิธีการย่อยสลาย และการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งได้ผล

พลอยได้คือ ก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และ ปุ๋ยหมัก ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าดำเนินการที่ถูกกว่า การนำไปเผา และ การฝังกลบ นอกจากนั้น การใช้พลังงานทดแทน และ ปุ๋ยหมักที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสียยังช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อกำจัดขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ซึ่งมี 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือการหาค่าผลกำไรสูงสุดและการลดค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ชนิดและปริมาณของขยะ และ ค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอน มีผลต่อการเลือกวิธีการในการกำจัดขยะ ซึ่งได้แก่ การฝังกลบ การเผา การนำไปทำปุ๋ยหมัก และ การนำกลับมาใช้ใหม่ จากผลการวิเคราะห์ แบบจำลองได้แนะนำให้เลือกวิธีการกำจัดขยะในกรุงเทพฯ ด้วยวิธีการนำไปหมักและฝังกลบ ค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะและค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณของขยะ

<b>Thesis Title</b>	USING MATHEMATICAL MODELS FOR ENERGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THAILAND
<b>Student</b>	Mr.LAEMTHONG LAOKHONGTHAVORN
<b>Student ID.</b>	54610408
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Civil Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Dr. Chalida U-tapao

### ABSTRACT

Countries around the world are focused on solving environmental problems. Since all countries are faced with the problem of global warming is becoming more intense every year. Solutions have focused on reducing greenhouse gases, a cause of the greenhouse effect. Carbon Dioxide Equivalent, CDE, is a parameter which is used to control the amount of carbon dioxide emissions caused by human activities. Meanwhile global energy crisis is urging the researches for renewable energy sources dramatically because quantity of fossil fuel limits and highly impacts on environment of the world. This thesis proposes the application of a mathematical model for analyzing the optimization to be used in decision making how to manage energy and the environment. It is a complex problem because it involves about many factors, multi-objectives and many constraints, that must be considered simultaneously and their information contain with high uncertainty. This research presents mathematical models for analysis of the complimentary base-equilibrium model of ethanol market in Thailand, problems of finding the optimization for the management of wastewater and solid waste management in Bangkok.

The complementarity-based model is used to aid in the decision making to produce ethanol in Thailand. This model has three strategic players completely against each other on the ethanol productions. All three players make up ethanol fuel from agricultural products and they are price-takers. The first player represents producers who produce and sell ethanol from sugarcane. The second and third players produce and sell ethanol from cassava and molasses, respectively. The strategic player's decisions involve quantities of sugarcane, cassava and molasses related with the market price. This paper uses operation research to optimize a decision maker's objectives within the limits of available agricultural products and also provide results for sustainable energy production.

To lessen the impacts on environment, it is necessary for wastewater treatment plants to formulate optimal operational strategies by which more renewable energy could be harvested and carbon dioxide equivalent (CDE) emissions are reduced. This research had applied a multi-objectives model to consider how to manage sewage sludge, by

composition to produce bio-gas, landfill, fertilization and incineration to produce heat energy. The research found that the model was introduced to dispose sewage sludge by composting and fertilization which yield biogas to produce electricity and fertilizer respectively. Because their operation cost are lower than incineration and landfill. Moreover, use of the renewable energy and organic fertilizers from sewage sludge helps offset the amounts of carbon dioxide emissions.

This dissertation has applied operation research to solid waste disposal by which two objective functions are optimized to minimize the expected operational costs (maximize revenues) and the expected net carbon dioxide equivalent (CDE) emissions. Types and uncertain amounts of solid wastes as well as costs of electricity were factored into the selection decision of solid waste disposal, i.e. landfill, incineration, composting and recycling. An optimization model was applied to the solid waste disposal of Bangkok, Thailand. Composting and landfill are effective alternatives for Bangkok's solid waste disposal system. The operational costs and net CDE emissions are highly correlated with the quantity of solid waste. Policy-makers and plant operators could adopt the proposed optimization model under uncertainty in the selection of an optimal solid waste disposal.

## กิตติกรรมประกาศ

ไม่มีคำกล่าวใดที่สามารถใช้แสดงได้เพียงพอต่อความรู้สึกซาบซึ้ง และ สำนึกในบุญคุณของ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ผศ.ดร.ชลิดา อุตะเกา ผู้ซึ่ง ตลอดทั้งหลักสูตร และการทำวิจัยนี้ ได้สอนข้าพเจ้าหลากหลายสิ่งที่มีค่านอกเหนือจากความรู้ทางด้านวิศวกรรม อาจารย์ได้เน้น ข้าพเจ้าให้อุทิศตนให้กับการทำงานวิจัยและการปรับปรุงทักษะด้านภาษาก็เป็นสิ่งที่อาจารย์ได้ เน้นมาก ซึ่งถือเป็นสิ่งอันมีค่าที่ข้าพเจ้าได้จากการศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลิดา อุตะเกา อย่างสุดซึ้ง

ข้าพเจ้าได้รับความช่วยการสนับสนุน คำแนะนำ และกำลังใจ จาก ท่าน ศ.ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์ อธิการบดี และรศ.ดร.สกุล ท่อโนทยาน รองอธิการบดี และประธานหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ข้าพเจ้าได้รับเกียรติอย่างสูงสุดจาก ผศ.ดร.วัชร เพ็ญสุภาพ รศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจนธนะเดช หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา ดร.อาทิตย์ เพชร ศศิธร และ ดร.ภาสกร ชันทองทิพย์ ในฐานะของกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอชี้แนะและคำแนะนำ ของท่านเหล่านี้มีมุมมองที่ลึกซึ้งถึงแก่นแท้ของงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีคุณค่าอย่างยิ่ง ข้าพเจ้า ได้เรียนรู้หลากหลายสิ่ง จากท่านเหล่านี้ และ พึงระลึกเสมอว่าท่านเป็นอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิอย่าง แท้จริง

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ท่าน รศ.สุพจน์ ศรีนิล ศ.สมศักดิ์ ธรรมเวชวิณี รศ.ดร.เอกชัย สุมาลี สำหรับคำแนะนำ กำลังใจ และ การช่วยเหลือในหลายๆ สิ่งที่ข้าพเจ้าได้รับจากท่านเหล่านี้

ขอขอบคุณกำลังใจ และความเข้าใจ จาก อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุก ท่าน ผู้อำนวยการส่วนและเจ้าหน้าที่ประจำ ส่วนอาคารสถานที่ ส่วนซ่อมบำรุงรักษาและยานพาหนะ และ ส่วนพัสดุ

ในงานศึกษาวิจัยนี้ ข้าพเจ้าได้รับความช่วยเหลือ ด้านข้อมูลจาก เจ้าหน้าที่ของหน่วยงาน ต่างๆ ได้แก่ สำนักระบายน้ำ กรุงเทพมหานคร สำนักงานสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร และ สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม ทำให้ได้รับข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ จน วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านเหล่านี้

ท้ายที่สุดแต่ไม่ใช่น้อยที่สุดสำหรับคำขอบคุณอันพิเศษสุดที่มอบให้แก่สมาชิกครอบครัวทุก คนของข้าพเจ้า รวมทั้ง พี่ต๋อย เสียดู๋ พี่แฝด วิน เบียร์ เขม พิซ หนึ่ง อุ นุ่น เต็ง จอม นิค อัย ดิก นนท์ แบงค์ที่มอบความรัก ความห่วงใย และให้การช่วยเหลืออย่างต่อเนื่องตลอดการศึกษาของ ข้าพเจ้า และขอขอบคุณห้องสมุด KMITL สำหรับหนังสือและแหล่งข้อมูลอันทรงค่าสำหรับงานศึกษา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XIII
สารบัญคำย่อ.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	9
บทที่ 2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	10
2.1 แบบจำลอง.....	10
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	12
2.3 การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม (Optimization).....	13
2.3.1 หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม.....	14
2.3.1.1 ตัวแปรออกแบบ (Design Variable).....	14
2.3.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function).....	15
2.3.1.3 ข้อจำกัด (Constraints).....	15
2.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่มีตัวแปรอิสระเพียงหนึ่งตัวแปร (Optimization with One Choice Variable).....	16
2.3.3 การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันกรณีที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปร (Optimization with More Than One Choice Variables).....	19
2.3.4 การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่มีขอบเขตจำกัด (Optimization with Equality Constraints).....	21
2.4 กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming).....	24
2.4.1 รูปแบบกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming Model).....	24
2.4.1.1 Maximization Problem.....	24
2.4.1.2 Minimization Problem.....	25
2.4.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการกราฟ (Graphical method).....	25

# สารบัญ

	หน้า
2.4.3 การแก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้น โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel.....	28
2.4.4 การแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้น ด้วย GAMS.....	30
2.4.4.1 การสร้างเซต (Set).....	30
2.4.4.2 การสร้างตัวแปร (Variable).....	31
2.4.4.3 การสร้างข้อมูล (Parameter).....	32
2.4.4.4 การสร้างสมการข้อจำกัด (Equation).....	33
2.4.4.5 การใช้คำสั่งเพื่อหาคำตอบ (Solve).....	34
บทที่ 3 แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่าของตลาดเอทานอลในประเทศไทย.....	35
3.1 ความสำคัญของพลังงานกับการพัฒนาเศรษฐกิจ.....	35
3.2 วิฤตพลังงานโลก.....	35
3.3 เอทานอล พลังงานทดแทน.....	37
3.3.1 ประเภทของน้ำมันแก๊สโซฮอล์.....	39
3.3.2 การผลิตเอทานอล.....	40
3.3.3 สถานการณ์เอทานอลในไทย.....	43
3.3.4 อุปสงค์และอุปทานเอทานอลของประเทศไทย.....	46
3.3.5 อุปสงค์และอุปทานเอทานอลของตลาดแข่งขันสมบูรณ์.....	46
3.4 การสร้างแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับตลาดเอทานอล.....	47
3.4.1 นิยามพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอทานอล.....	48
3.4.2 ผู้ผลิตที่เกี่ยวข้อง และ ตลาดของเอทานอล.....	48
3.4.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข.....	48
3.4.4 การวิเคราะห์เรื่องราว (Scenarios consideration).....	51
3.5 ผลและการวิเคราะห์ผล.....	52
บทที่ 4 การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ การบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียในกรุงเทพฯ.....	56
4.1 วิฤตปัญหาสิ่งแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของของเสีย.....	56
4.2 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	56
4.3 แนวทางการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน.....	57
4.4 การกำจัดน้ำเสีย และ การบริหารจัดการระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร.....	59
4.4.1 การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์.....	60
4.4.2 การนำตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์.....	66
4.4.3 การผลิตไบโอแก๊สจากตะกอนน้ำเสีย.....	64
4.4.3.1 ปริมาณไบโอแก๊สที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสีย.....	65

# สารบัญ

	หน้า
4.4.3.2 ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้.....	65
4.4.3.3 ความร้อนจากขบวนการเผาตะกอนน้ำเสีย.....	65
4.4.3.4 การใช้ตะกอนน้ำเสียเป็นปุ๋ยอินทรีย์.....	65
4.4.4 ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล.....	66
4.5 แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อบริหารจัดการ โรงบำบัดน้ำเสีย.....	66
4.5.1 การนำตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์.....	66
4.5.2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	68
4.5.2.1 การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable).....	68
4.5.2.2 การกำหนดตัวแปรอิสระ (Independent Variable).....	68
4.5.2.3 การสร้างสมการ.....	72
4.5.3 กำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับตะกอนน้ำเสีย.....	73
4.5.3.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ.....	73
4.5.3.2 การสร้างสมการ.....	74
4.5.4 กำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับไบโอแก๊สที่ผลิตขึ้น.....	75
4.5.4.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ.....	75
4.5.4.2 การสร้างสมการ.....	76
4.5.5 กำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับปุ๋ยหมักที่ผลิตขึ้น.....	76
4.5.5.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ.....	76
4.5.5.2 การสร้างสมการ.....	77
4.5.6 กำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า.....	77
4.5.6.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ.....	77
4.5.6.2 การสร้างสมการ.....	78
4.5.7 กำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับพลังงาน.....	79
4.5.7.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ.....	79
4.5.7.2 การสร้างสมการ.....	79
4.5.8 กำหนดค่าพารามิเตอร์.....	80
4.6 ผลและการวิเคราะห์ผล.....	81
บทที่ 5 การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ การกำจัดขยะ.....	85
5.1 ปัญหาขยะของสังคมเมือง.....	85
5.2 พารามิเตอร์ในการดำเนินการของโรงงานบริหารจัดการขยะ.....	89
5.2.1 โรงงานบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ.....	89

# สารบัญ

	หน้า
5.2.2 ปริมาณขยะชุมชนและองค์ประกอบ.....	90
5.2.3 การบริหารจัดการขยะ.....	91
5.2.4 แบบจำลองหาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์แบบเฟ้นสุ่มสำหรับ SWMP.....	92
5.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ภายใต้สภาวะ ความไม่แน่นอน กรณีศึกษาการบริหารจัดการของเสียในกรุงเทพมหานคร.....	94
5.3.1 นิยามตัวแปรและพารามิเตอร์.....	94
5.3.1.1 การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable).....	94
5.3.1.1.1 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณขยะ.....	94
5.3.1.1.2 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับไบโอแก๊ส.....	94
5.3.1.1.3 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับเงินได้จากเศษขยะ.....	95
5.3.1.1.4 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับปุ๋ย.....	95
5.3.1.1.5 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับขยะ Recycle.....	95
5.3.1.1.6 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า.....	96
5.3.1.1.7 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับค่าการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	96
5.3.1.1.8 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับต้นทุน.....	96
5.3.1.1.9 การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับผลตอบแทน.....	97
5.3.1.2 การกำหนดพารามิเตอร์.....	97
5.3.2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	99
5.3.2.1 สมการมูลค่าการลงทุนน้อยสุด.....	99
5.3.2.2 สมการการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด.....	100
5.3.3 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไข.....	101
5.3.3.1 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับปริมาณขยะ.....	101
5.3.3.2 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับการตัดสินใจเลือกขบวนการ.....	102
5.3.3.3 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับไบโอแก๊ส.....	103
5.3.3.4 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับปุ๋ย.....	104
5.3.3.5 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับเงินจากการเผา.....	105
5.3.3.6 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับขบวนการ Recycle.....	105
5.3.3.7 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า.....	106
5.3.3.8 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	107
5.3.3.9 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับต้นทุน.....	108
5.3.3.10 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับรายได้.....	109

# สารบัญ

	หน้า
5.3.4 การกำหนดค่าให้กับพารามิเตอร์.....	111
5.4 ผลและการวิเคราะห์ผล.....	112
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	116
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	116
6.1.1 แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่าของตลาดเอทานอลในประเทศไทย.....	116
6.1.2 การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดี ที่สุดสำหรับการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียในกรุงเทพฯ.....	116
6.1.3 การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุด สำหรับการกำจัดขยะ.....	118
6.1.4 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการบริหารจัดการพลังงานและ สิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาประเทศไทย.....	118
6.2 แนวทางการวิจัยในอนาคต.....	120
เอกสารอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	129
ภาคผนวก ก การกำหนดตัวแปร การสร้างสมการใน GAMS และผลการคำนวณ สำหรับแบบจำลองหาค่าเหมาะสมตลาดเอทานอล.....	130
ภาคผนวก ข การกำหนดตัวแปร การสร้างสมการใน GAMS และผลการคำนวณ สำหรับแบบจำลองการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียอย่างยั่งยืน.....	135
ภาคผนวก ค การกำหนดตัวแปร การสร้างสมการใน GAMS และผลการคำนวณ สำหรับแบบจำลองการบริหารจัดการพลังงานและขยะอย่างยั่งยืน.....	148
ภาคผนวก ง รายงานการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ ประจำปีการผลิต 2554/55.....	184
ภาคผนวก จ รายการคำนวณปริมาณเอทานอลจากวัตถุดิบต่างๆ.....	188
ภาคผนวก ฉ รายการคำนวณปริมาณการบำบัดน้ำเสีย.....	190
ภาคผนวก ช พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการบริหารจัดการน้ำเสีย.....	196
ภาคผนวก ซ ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	118
ประวัติผู้เขียน.....	199

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ข้อมูลจำนวนประชากร ตามสำมะโนประชากร พ.ศ. 2453 – 2553.....	1
1.2 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำเสียกับประชากร.....	3
1.3 ประมาณอัตราการเกิดน้ำเสียต่อคน.....	3
2.1 ข้อมูลประกอบตัวอย่างการใช้ Solver.....	30
3.1 พื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของอ้อยโรงงาน.....	44
3.2 พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของมันสำปะหลัง.....	45
3.3 แสดงต้นทุนการผลิตเอทานอล (ลิตร).....	45
3.4 ข้อมูลราคาและปริมาณเอทานอล พ.ศ. 2553-2555.....	47
3.5 นิยามตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอทานอล.....	49
3.6 แสดงแบบแผนการวิเคราะห์ของการวิเคราะห์เรื่องราว.....	51
3.7 ปริมาณและราคาของเอทานอลที่ผลิตจาก อ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล.....	53
4.1 การดำเนินการของโรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ ทั้ง 19 แห่ง.....	60
4.2 นิยามตัวแปรตัดสินใจ.....	67
4.3 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ $CDE_{Total}$ .....	68
4.4 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ $CDE_{Total}$ .....	68
4.5 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรสำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ $CDE_{Total}$ .....	68
4.6 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ $Benefit_{Total}$ .....	69
4.7 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปร Revenues.....	69
4.8 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการ ตัวแปร Revenues.....	69
4.9 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรสำหรับสมการ ตัวแปร Revenues.....	69
4.10 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปร Costs.....	69
4.11 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการ ตัวแปร Costs.....	70
4.12 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรสำหรับสมการ ตัวแปร Costs.....	70
4.13 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Solid.....	72
4.14 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Solid.....	73
4.15 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Solid.....	73
4.16 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Biogas.....	74
4.17 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Biogas.....	75
4.18 ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Biogas.....	75
4.19 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Fertilizer.....	76
4.20 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Fertilizer.....	76
4.21 ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Fertilizer.....	76

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.22	นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Elec..... 76
4.23	นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Elec..... 77
4.24	ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Elec..... 77
4.25	นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Energy..... 78
4.26	นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Energy..... 78
4.27	ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Energy..... 78
4.28	พารามิเตอร์ และ ค่าของพารามิเตอร์..... 79
4.29	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสีย..... 81
5.1	องค์ประกอบเฉลี่ยของตัวอย่างขยะรวมในเทศบาลที่มีปริมาณมากกว่า 100 ตัน/วันและ 50-100 ตัน/วัน..... 90
5.2	การประมาณค่าปริมาณขยะ และ ราคาค่ากระแสไฟฟ้า..... 91
5.3	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับตะกอนน้ำเสีย..... 93
5.4	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับไบโอแก๊ส..... 93
5.5	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับเถ้าจากเผาขยะ..... 94
5.6	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับปุ๋ย..... 94
5.7	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับขยะ Recycle..... 94
5.8	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า..... 95
5.9	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์..... 95
5.10	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับต้นทุน..... 96
5.11	นิยามตัวแปรเกี่ยวกับผลตอบแทน..... 96
5.12	นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Biogas..... 97
5.13	แสดงค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง..... 110
5.14	ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม และ เป้าหมายค่าเหมาะสมของแบบจำลอง ภายใต้ค่าดำเนินการต่ำสุด (หรือผลตอบแทนสูงสุด) และค่า CDE ต่ำสุด..... 112
ฉ.1	ข้อมูลโรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพมหานคร 19 แห่ง..... 191
ฉ.2	ข้อมูลผลการคำนวณปริมาณตะกอน Benefit และ CDE โรงบำบัดน้ำเสียใน กรุงเทพมหานคร 19 แห่ง..... 195

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงการคาดการณ์ประชากรโลกในปี ค.ศ. 1950-2050 (พ.ศ. 2493-2593)	1
1.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของปัญหาในการศึกษา	5
1.3 แผนงานแบบ Precedence Diagram แสดงขั้นตอนการศึกษา	8
2.1 แสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์	16
2.2 แสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์	17
2.3 จุดเปลี่ยนเว้า (infection point)	18
2.4 การใช้อนุพันธ์อันดับที่สองเพื่อทดสอบ (Critical Point) จากเงื่อนไขอันดับที่หนึ่ง	19
2.5 การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่มีขอบเขตจำกัด	22
2.6 แสดงการพลอตกราฟตามสมการ ตัวอย่างการแก้ปัญหาโดย วิธีเชิงกราฟ	26
2.7 แสดง Feasible Region จากปัญหาข้างต้น	26
2.8 แสดงการ ลากลง (Move Down) ให้ขนานกับเส้นความชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าจุดที่มีคำตอบที่ต่ำที่สุด (Minimum Solution)	27
2.9 แสดงการ ลากขึ้น (Move up) ให้ขนานกับเส้นความชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าจุดที่มีคำตอบที่สูงที่สุด (Maximum Solution)	27
2.10 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ Excel	29
2.11 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Solver	29
2.12 ตัวอย่างการนิยามเซต (Set) ในโปรแกรม GAMS	31
2.13 ตัวอย่างการสร้างตัวแปร (Variable) ในโปรแกรม	32
2.14 ตัวอย่างการสร้างข้อมูล (Parameter) ในโปรแกรม	33
2.15 ตัวอย่างการสร้างสมการข้อจำกัด (Equation)	34
2.16 ตัวอย่างการใช้คำสั่งเพื่อหาคำตอบ (Solve)	34
3.1 แสดงพลังงานจากแหล่งต่างๆ	36
3.2 การใช้เอทานอลของโลก	37
3.3 ผู้ผลิตเอทานอลรายใหญ่ของโลก	37
3.4 ราคาน้ำมันดิบตลาดดูไบ และ ตลาดเทกซ์สตีตะวันตก	38
3.5 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์	40
3.6 การหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส	41
3.7 การหมักเอทานอลจากแป้ง	41
3.8 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล	42
3.9 กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง	43
3.10 อุปสงค์และอุปทานเอทานอล	46
3.11 อุปสงค์และอุปทานเอทานอลตลาดแข่งขันสมบูรณ์	47
3.12 กราฟข้อมูลราคาและปริมาณเอทานอล พ.ศ. 2553-2555	48
3.13 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของอ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล กับ ตลาดเอทานอล	49

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.14 รายละเอียดของการวิเคราะห์เรื่องราว.....	52
4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปัญหาการเพิ่มของประชากรที่มีต่อการเพิ่มของของเสีย.....	56
4.2 หลักการการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน.....	57
4.3 โรงบำบัดน้ำเสีย 19 แห่ง (จุดน้ำเงิน) และ โรงบริหารจัดการกากตะกอนน้ำเสีย 3 แห่ง (จุดแดง) ในกรุงเทพฯ.....	61
4.4 ปริมาณการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ในแต่ละเดือนของ ปี พ.ศ. 2554.....	61
4.5 ปริมาณปุ๋ยหมักที่ผลิตได้ และแจกจ่าย ระหว่างปี พ.ศ. 2549 – 2554.....	62
4.6 รูปแบบการบริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสีย.....	63
4.7 แผนภาพแสดงแนวคิดของแบบจำลองในการนำกากตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์.....	66
4.8 แผนภาพแบบจำลองในการนำกากตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ที่ได้จากการวิเคราะห์.....	82
5.1 การไหลของขยะมูลฝอยชุมชนปี พ.ศ. 2556.....	85
5.2 จำแนกประเภทขยะชุมชนทั้งประเทศไทยปี พ.ศ. 2556.....	85
5.3 สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยทั่วประเทศ 2,490 แห่ง.....	86
5.4 การบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ.....	88
5.5 การบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ.....	89
5.6 ปริมาณขยะมูลฝอยในกรุงเทพมหานคร จากปี 2535 ถึง 2553.....	89
5.7 สามเหลี่ยม pdf ของปริมาณ MSW ในกรุงเทพฯ.....	90
5.8 ภาพรวมของแบบจำลองเพื่อการบริหารจัดการขยะ.....	92
5.9 การประมาณค่าชายแดนพาเรโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรายได้คาดหวังกับ Net CDE Emission คาดหมาย.....	113
6.1 แผนภาพการบริหารจัดการน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียที่แนะนำโดยแบบจำลอง สำหรับการบริหารจัดการน้ำเสียในกรุงเทพฯ.....	116

# คำย่อ

## คำย่อ

## ความหมาย

ฟุต <sup>3</sup>	ลูกบาศก์ฟุต
ม <sup>3</sup>	ลูกบาศก์เมตร
ลบ.ม.	ลูกบาศก์เมตร
สรอ.	สหรัฐอเมริกา
Alg	Algorithm
Btu	British Thermal Unit
CDE	Carbon Dioxide Equivalent
CNG	Compressed Natural Gas
DFD	Data Flow Diagram
Dt(s)	Dry Ton(s)
Elec.	Electric
ES	Expert System
FOC	First-order Condition
Gal	Gallon
Gals	Gallons
GAMS	General Algebraic Modeling System
GHG	Greenhouse Gas
IEA	International Energy Agency
Kcal	Kilo Calorie(s)
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
kWh	Kilowatt Hour
m	Meter(s)
MGs	Million Gallons
MSW	Municipal Solid Waste
MTBE	Methyl Tertiary Butyl Ether
MTs	Million Tons
MWh	Megawatt Hour
NG	Natural Gas
Pdf	Probability Density Function
SWMPs	Solid Waste Managing Plants
SOC	Second-order Condition
TH	Thermal Hydrolysis

# คำย่อ

## คำย่อ

## ความหมาย

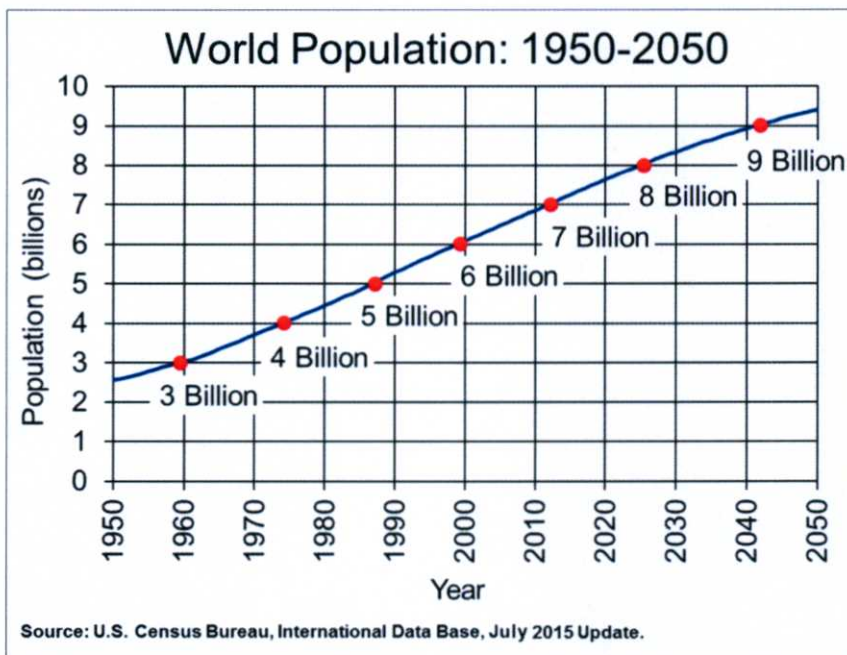
USD	United State of America Dollar
VS	Volatile Solids
WWTP	Wastewater Treatment Plants

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันประชากรโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ในปัจจุบันองค์การสหประชาชาติ (UN) ประเมินการว่าประชากรโลก ณ เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559 มีจำนวนราว 7,300 ล้านคน [1] และจากการคาดการณ์ของ สำนักงานสถิติของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Census Bureau) พบว่าประชากรโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ จะมีจำนวนประชากรโลกถึง 9 พันล้านคน ในปี พ.ศ. 2583 (ค.ศ. 2040) (ดูรูปที่ 1.1.) การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกนี้ ส่งผลให้มีการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดเพิ่มขึ้น ทั้งเพื่อการอุปโภค บริโภค และเป็นพลังงาน ยังผลให้อาจเกิดภาวะการขาดแคลนทรัพยากรในอนาคตอันใกล้ หากไม่มีการบริหารจัดการที่ดีพอ



รูปที่ 1.1 แสดงการคาดการณ์ประชากรโลกในปี ค.ศ. 1950-2050 (พ.ศ. 2493-2593)[2]

ในขณะเดียวกัน การอุปโภคบริโภค ทรัพยากรจำนวนมากมหาศาล ก็ส่งผลให้เกิด ขยะ ของเสีย และ น้ำเสีย ในอัตราที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันมีขยะครัวเรือนจากทั่วโลกประมาณ 1.3 พันล้านตันต่อปี และ คาดการณ์ในปี พ.ศ. 2568 ขยะครัวเรือนจากทั่วโลก จะเพิ่มเป็น 2.2 พันล้านตันต่อปี [3] ขยะที่เกิดขึ้นทุกวันนี้ ทั้งจากภาคครัวเรือน และ ภาคอุตสาหกรรม เป็นภาระที่รัฐบาลแต่ละประเทศ ต้องทำการกำจัด และบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และ สุขภาพอนามัยของประชากรในประเทศของตน

เมื่อประชากรเพิ่มขึ้นเมืองก็ขยายตัวใหญ่ขึ้น เมื่อเมืองใหญ่ขึ้น บ้านและที่ทำงานก็จะอยู่ห่างไกลกันมากขึ้น ทำให้เราต้องใช้พาหนะในการเดินทาง อันจะนำมาซึ่งการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิง ปล่อยปล่อยแก๊สเรือนกระจกขึ้นสู่บรรยากาศ ทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น [4] ก่อให้เกิด ปฏิกริยาเรือน

กระจก และ สภาวะโลกร้อน ส่งผลให้พืชผลอาหารและพลังงานให้ผลผลิตในอัตราที่น้อยลง

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าจากปัญหาประชากรโลกที่มีจำนวนมากในปัจจุบัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกมากในอนาคตอันใกล้ การบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างได้ประสิทธิภาพสูงสุดและยั่งยืนจึงมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และ พลังงานเกิดประโยชน์สูงสุด โดยใช้ทรัพยากรธรรมชาติน้อยที่สุด มีค่าต้นทุนจากการผลิตทรัพยากรธรรมชาติ และ พลังงานน้อยที่สุด และ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ได้แก่ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Emission) และก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas) น้อยที่สุด เกิด ขยะและมลพิษน้อยที่สุด เป็นต้น

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทย ก็เป็นหนึ่งในประเทศที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างมาก ในปัจจุบัน มีจำนวนประชากร 65,729,098 คน [5] จากตารางที่ 1.1. พบว่า จำนวนประชากรประเทศไทย มีอัตราการเพิ่มขึ้นทุกปี แม้ว่าแนวโน้มในปัจจุบัน อัตราการเพิ่มขึ้นของประชากร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง จาก ปี พ.ศ. 2513 ถึง 2553 ในระยะเวลาเพียง 40 ปี จำนวนประชากรไทยเพิ่มขึ้นประมาณ 31 ล้านคน คือเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จากปี พ.ศ. 2513 ด้วยปัจจุบันที่ประชากรไทยมีจำนวนมากถึง 65.7 ล้านคน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นประเทศไทยจึงเป็นประเทศหนึ่งที่กำลังประสบปัญหาด้าน

ตารางที่ 1.1 ข้อมูลจำนวนประชากร ตามสำมะโนประชากร พ.ศ. 2453 – 2553 [6]

ครั้ง	ปีที่สำรวจ (พ.ศ./ค.ศ.)	จำนวน (คน)	อัตราเพิ่ม (ร้อยละ/ต่อ 10 ปี)
1	2453 (1910)	8,131,247	-
2	2462 (1919)	9,207,355	+ 13.2 (ต่อ 9 ปี)
3	2472 (1929)	11,506,207	+ 25.0
4	2480 (1937)	14,464,105	+ 25.7 (ต่อ 8 ปี)
5	2490 (1947)	17,442,689	+ 20.6
6	2503 (1960)	26,257,916	+ 50.5 (ต่อ 13 ปี)
7	2513 (1970)	34,397,371	+ 31.0
8	2523 (1980)	44,824,540	+ 30.3
9	2533 (1990)	54,548,530	+ 21.7
10	2543 (2000)	60,916,441	+ 11.7
11	2553 (2010)	65,926,261	+ 8.2

การอุปโภคบริโภค ทรัพยากรธรรมชาติและพลังงานเช่นเดียวกัน ขณะเดียวกัน ก็มีปริมาณของการเพิ่มขึ้นของ ขยะ และน้ำเสีย เพิ่มขึ้นอย่างมาก ในปี พ.ศ. 2558 มีปริมาณขยะทั้งประเทศ 49,680

ตันต่อวัน หรือ 17.8 ล้านตันต่อปี [7] เฉพาะในกรุงเทพฯ ปี พ.ศ. 2558 มีปริมาณขยะที่จัดเก็บได้เท่ากับ 10,166.84 ตันต่อวัน [8] ตารางที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดน้ำเสียที่สัมพันธ์กับจำนวนประชากร ยิ่งจำนวนประชากรมากขึ้น ปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากอุปโภค บริโภคยิ่งมากขึ้น จากตารางที่ 1.3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละปีมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี ดังนั้นปัญหาการบริหารจัดการการกำจัดขยะ และน้ำเสีย จึงเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศไทย เฉกเช่นเดียวกับเมืองใหญ่หลายเมืองทั่วโลก

ปริมาณขยะ และ น้ำเสีย เหล่านี้จะต้องถูกกำจัดอย่างเหมาะสม และยั่งยืน กล่าวคือ ในการบริหารจัดการการกำจัดขยะและน้ำเสียเหล่านี้ ต้อง ใช้ต้นทุนในการกำจัดน้อยที่สุด ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์ต่อสาธารณะมากที่สุด และขณะเดียวกัน ต้องไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

ตารางที่ 1.2 ความสัมพันธ์ปริมาณน้ำเสียกับประชากร [9]

จำนวนประชากร (คน)	ปริมาณน้ำเสียต่อวัน (ลิตร)	ปริมาณน้ำเสียต่อวัน (ลบ.ม)
100	200,000	200
200	400,000	400
500	1,000,000	1,000
1,000	2,000,000	2,000
1,500	3,000,000	3,000
2,000	4,000,000	4,000
4,000	8,000,000	8,000
6,000	12,000,000	12,000
8,000	16,000,000	16,000
10,000	20,000,000	20,000

ตารางที่ 1.3 ปริมาณอัตราการเกิดน้ำเสียต่อคน [10]

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคนต่อวัน					
	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/คน-วัน)					
	2536	2540	2545	2550	2555	2560
กลาง	160-214	165-242	170-288	176-342	183-406	189-482
เหนือ	183	200	225	252	282	316
ตะวันออกเฉียงเหนือ	200-253	216-263	239-277	264-291	291-306	318-322
ใต้	171	195	204	226	249	275

การเพิ่มขึ้นของประชากรไทย ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของที่อยู่อาศัย และภาคการผลิต ทั้งภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งพลังงาน เป็นปัจจัยพื้นฐาน ของอุตสาหกรรมทุกภาคส่วน จึงมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นมากตามไป ใน พ.ศ. 2548 องค์การข้อมูลข่าวสารด้านพลังงานแห่งสหรัฐอเมริกา (United States Energy Information Administration) [11] ได้ประเมินว่าในบรรดาผลิตผลจากพลังงานในโลกนี้ ร้อยละแปดสิบหกมีต้นกำเนิดจากการเผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล หรือ

เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ร้อยละหกจุดสามมีต้นกำเนิดจากพลังงานไฟฟ้าจากน้ำ (hydroelectric) และร้อยละหกจากพลังงานนิวเคลียร์ ส่วนร้อยละศูนย์จุดเก้าที่เหลือจากแหล่งพลังงานอื่น ๆ เป็นต้นว่า ความร้อนจากธรณีภาค (geothermal) พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากไม้ และ พลังงานจากของใช้แล้ว ประเทศไทย ก็เช่นกัน ที่ใช้พลังงานที่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลในสัดส่วนที่มากที่สุด เมื่อเทียบกับพลังงานประเภทอื่น

ในปัจจุบัน ทั่วโลกกำลังประสบปัญหา พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังจะหมดไป เนื่องจากเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป และการเกิดทดแทนใช้เวลานานนับล้านปี ทำให้ราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลในปัจจุบันมีความผันผวนอย่างมาก ทุกประเทศต่างมองพลังงานทดแทนในฐานะทางออกของการแก้ปัญหาวิกฤตพลังงานฟอสซิล

การผลิตเอทานอล เพื่อเป็นพลังงานทดแทน กำลังได้รับความสนใจจากหลายประเทศเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตได้โดยใช้วัตถุดิบจาก ขบวนการกำจัดขยะ น้ำเสีย และ ผลิตจากพืชพลังงาน โดยเอทานอลสามารถผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis) และการหมักโดยจุลินทรีย์ (Yeast Fermentation) ปัจจุบันเอทานอลที่ผลิตส่วนใหญ่จะได้จากกระบวนการทางชีวภาพที่หมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ เอทานอลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีมีปริมาณน้อยมาก โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ทั้งหมดในโลก [12]

ประเทศไทย ก็มีการผลิตเอทานอล เพื่อใช้ในประเทศ ส่วนใหญ่ผลิตโดยขบวนการหมักวัตถุดิบที่ได้จากผลผลิตการเกษตร คือ มันสำปะหลัง อ้อย และกากน้ำตาล ซึ่งเรียกว่าพืชพลังงาน แต่ขณะเดียวกัน พืชพลังงานเหล่านี้ ก็เป็นพืชอาหารสำหรับคนและสัตว์ด้วย สถานการณ์การผลิตพืชพลังงานเหล่านี้ ในปัจจุบัน ยังไม่เพียงพอ ทั้งสำหรับตลาดพลังงาน และ ตลาดการบริโภค แม้ว่ารัฐบาลได้ให้การส่งเสริมการเพาะปลูกเพิ่มขึ้นแล้ว ดังนั้น เกษตรกรผู้เพาะปลูกพืชพลังงานเหล่านี้ ต้องพิจารณาว่าจะเลือกขายผลผลิตให้กับตลาดพลังงาน หรือ ตลาดการบริโภค จึงจะให้ผลตอบแทนสูงสุด ขณะเดียวกัน ผู้ผลิตเอทานอล ก็ต้องพิจารณาว่าจะเลือกใช้วัตถุดิบจากแหล่งใด ในสัดส่วนเท่าไรบ้าง เพื่อผลิตให้ได้ปริมาณเอทานอลสูงสุด ในราคาต้นทุนการผลิตเอทานอลที่ต่ำสุด เนื่องจากวัตถุดิบที่เป็นพืชพลังงานทั้ง 3 แหล่ง ก็มีปริมาณผลผลิตและราคาที่ผันผวน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการพลังงานทดแทนจากเอทานอล อย่างยั่งยืน และมีประสิทธิภาพ

จากประเด็นที่มาของปัญหาในงานวิจัยนี้ ดังที่ได้กล่าวไปเบื้องต้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้แผนภาพในรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศของเราต้องมีการบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน และมีประสิทธิภาพสูงสุด นั่นหมายถึงว่า ต้องบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เกิดประโยชน์หรือผลตอบแทนสูงสุด ภายใต้ต้นทุนในการกำจัดขยะ น้ำเสีย และการผลิตพลังงานที่ต่ำสุด ในขณะเดียวกันก็ต้องก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด คือเลือกใช้วิธีการที่ก่อให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุด และต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดอย่างคุ้มค่าที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแก้ปัญหการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมและพลังงานนี้ เป็นการแก้ปัญหาที่ต้องพิจารณาหลายวัตถุประสงค์ และหลายข้อจำกัด (Constraints) พร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งการวิเคราะห์และพิจารณาแก้ไขปัญหานั้นมีข้อจำกัด เพราะ มนุษย์ไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อน โดยมีหลายวัตถุประสงค์ หลายข้อจำกัด และ ข้อมูลจำนวนมากๆ ด้วยสมรรถนะเพียงอย่างเดียวในเวลาสั้นๆ ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม (Optimization Analysis) นำมาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การกำหนดขบวนการการบริหารจัดการขยะและน้ำเสีย

และ การบริหารจัดการการผลิตเอทานอล ซึ่งเป็นปัญหาในการวิเคราะห์แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi Objectives) และ หลายข้อจำกัด (Multi Constraints)



รูปที่ 1.2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของปัญหาในการศึกษา

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อทำการพัฒนาและประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมที่สุด มาใช้ในการบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยประยุกต์ใช้กับ การตัดสินใจในการเลือกใช้วัตถุดิบทางการเกษตรมาผลิตเอทานอล การบริหารจัดการขยะ และการบริหารจัดการตะกอนน้ำเสีย เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และ ยั่งยืน

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม สำหรับการบริหารจัดการการกำจัดขยะ และ น้ำเสีย และ การสร้างโมเดลเพื่อช่วยในการตัดสินใจ เลือกใช้วัตถุดิบทางการเกษตรมาผลิตเอทานอล โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1. แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นใช้แบบจำลองสถานการณ์และแบบสุ่ม (Deterministic and Stochastic Model) และ วิเคราะห์ ด้วยวิธี การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยใช้ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Functions) และ ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint Functions) เป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และหาคำตอบด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming)
2. ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมกับโรงบำบัด น้ำเสีย และ โรงกำจัดขยะ ในกรุงเทพมหานครเท่านั้น เนื่องจากปริมาณ กรุงเทพฯ มี ปริมาณประชากรอาศัยอยู่หนาแน่น และ มีปริมาณของน้ำเสียและ ขยะ ต่อวัน มากที่สุดใน ประเทศ เมื่อเทียบกับจังหวัดอื่น ดังนั้นโมเดลที่สร้างขึ้นสำหรับประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาใน กรุงเทพมหานคร จึงมีความสำคัญ และคุ้มค่า ต่อการบริหารจัดการมากที่สุด และสามารถ นำไปประยุกต์ใช้กับ จังหวัด และ เทศบาลอื่นๆ ได้ต่อไป
3. ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม กับ การผลิต เอทานอล โดยใช้วัตถุดิบทางการเกษตรได้แก่ มันสำปะหลัง อ้อย และ กากน้ำตาลที่ผลิตได้ใน ประเทศเท่านั้น
4. ใช้ข้อมูลสถิติภูมิ ที่แต่ละหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้รวบรวมเอาไว้แล้ว และได้ทำการเผยแพร่ เท่านั้น
5. แบบจำลองการบริหารจัดการขยะ เน้นใช้กับขยะชุมชนในกรุงเทพฯ ไม่รวมขยะประเภทขยะ อุตสาหกรรม
6. ไม่รวมการบริหารจัดการ และ วิเคราะห์การกำจัดขยะมีพิษและขยะอันตราย และ การใช้ ประโยชน์จากความร้อนที่ได้จากขบวนการเผาขยะ ในแบบจำลองที่สร้างขึ้น

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

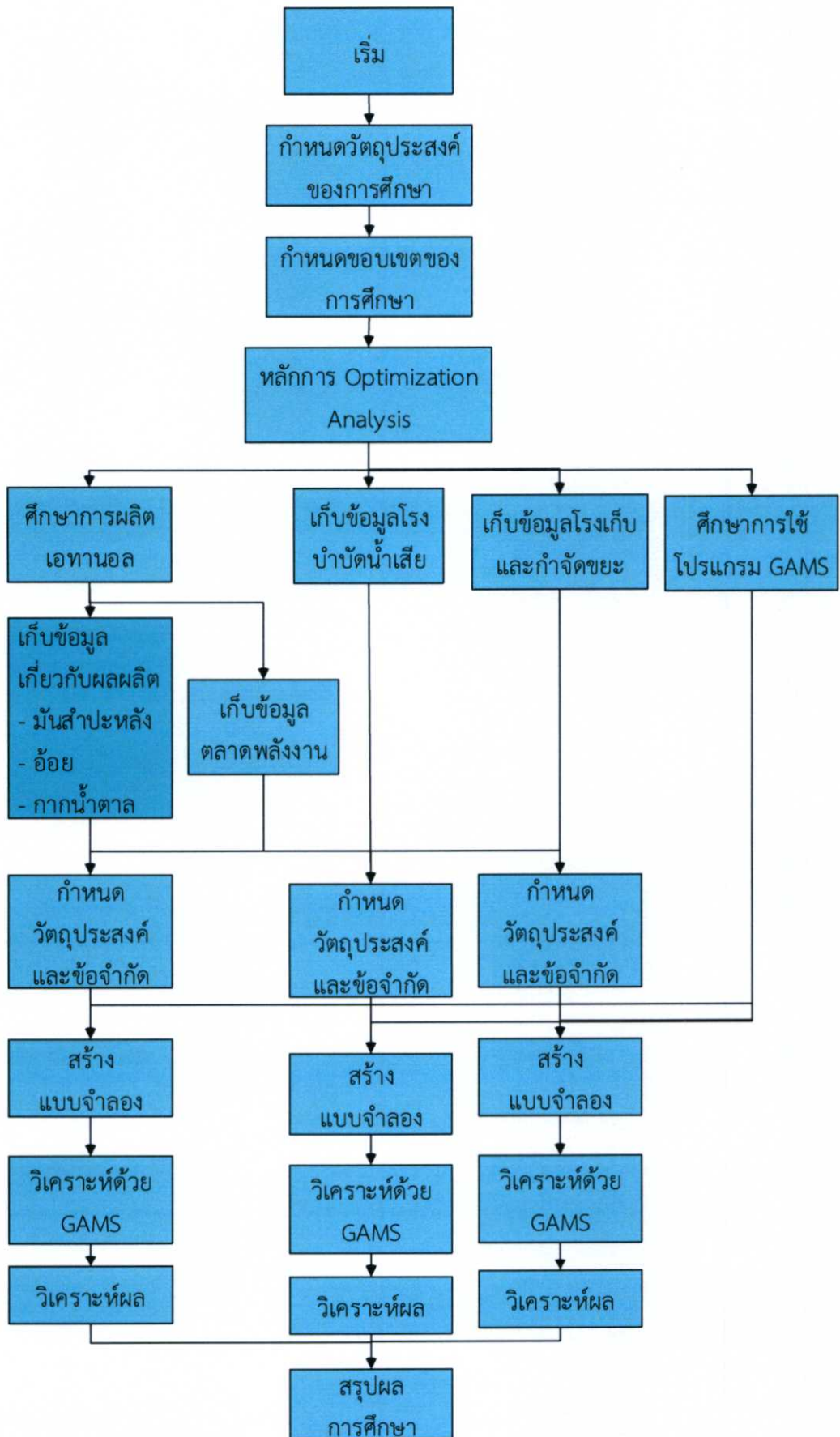
ขั้นตอนการศึกษา สามารถสรุปเป็นแผนภาพ ในรูปแบบแผนงานโครงข่ายลำดับ (Precedence Diagram) ได้ดังรูปที่ 1.3 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การศึกษาวิจัยนี้เริ่มดำเนินการ โดยการกำหนดวัตถุประสงค์การศึกษาให้ชัดเจน เพื่อใช้เป็น แนวทางในการกำหนดการศึกษาทุกขั้นตอนให้บรรลุยังเป้าหมายเดียวกัน การกำหนด วัตถุประสงค์ของการวิจัยได้จากการทบทวน ที่มาและความสำคัญของปัญหาของงานวิจัย จนเกิดแรงจูงใจในการศึกษา
2. กำหนดขอบเขตของงานวิจัย เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา และ เหมาะสม กับระยะเวลาในการวิจัย โดยขอบเขตของงานวิจัยนี้ กำหนดกรอบของการศึกษา ในด้าน ต่างๆ ดังต่อไปนี้
  - แบบจำลองและวิธีการวิเคราะห์
  - กลุ่มตัวอย่างที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษา

- วิธีการเก็บข้อมูล
3. ศึกษาหลักการและทฤษฎีการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม จากหนังสือ พร้อมทั้งศึกษากรณีศึกษาที่เกี่ยวข้อง จากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่มีการนำ วิธีการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมมาประยุกต์ใช้งานในงานวิศวกรรมและงานบริหารจัดการด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม การศึกษาในขั้นตอนนี้ เพื่อให้มีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเทคนิคการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลอง พร้อมทั้งแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้
  4. ศึกษาการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ คัดเลือกโปรแกรมที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจาก ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก และการสร้างสมการมีความสะดวกและทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน มีการตอบสนองการใช้งานของผู้ใช้ (User Interface) ได้ดี ในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้โปรแกรม GAMS
  5. หลังจากที่มีความรู้เกี่ยวกับหลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมแล้ว เก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับตลาดพลังงาน เอทานอล ได้แก่ ราคาจำหน่าย ปริมาณที่รับซื้อสูงสุด ราคาและปริมาณนำเข้าจากต่างประเทศ ราคาและปริมาณส่งออกไปต่างประเทศ ความต้องการใช้พลังงานรวม และ ปริมาณความต้องการเอทานอล อัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา
  6. การเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ การผลิตเอทานอล ได้แก่
    - ขั้นตอนและขบวนการผลิตเอทานอล
    - ข้อมูลเกี่ยวกับผลผลิตวัตถุดิบทางการเกษตร คือ มันสำปะหลัง อ้อย และ กากน้ำตาลได้แก่ ปริมาณผลผลิตในแต่ละปี ราคาจำหน่ายให้กับตลาดบริโภค ราคาจำหน่ายให้กับตลาดพลังงาน ปริมาณความสามารถในการเพาะปลูกได้สูงสุด
    - ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นจากขบวนการผลิตเอทานอล
    - ปริมาณมลพิษที่ลงได้ จากการใช้เอทานอลแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดย การทำหนังสือถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อขอข้อมูล การสืบค้นทางเว็บไซต์ วารสาร และ รายงานทางวิชาการต่างๆ
  7. ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ การบำบัดน้ำเสีย ได้แก่
    - ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย
    - การนำกากตะกอนน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ ปริมาณกากตะกอนน้ำเสียที่ผลิตได้แต่ละเดือน ราคาจำหน่าย
    - ปริมาณน้ำเสียที่โรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ แต่ละแห่งต้องทำการบำบัด ปริมาณที่รับน้ำเสียได้สูงสุด และปริมาณน้ำเสียต่อเดือน
    - ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดย การทำหนังสือถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อขอข้อมูล การสืบค้นทางเว็บไซต์ วารสาร และ รายงานทางวิชาการต่างๆ
  8. การเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ การกำจัดขยะ ได้แก่
    - ขบวนการและวิธีการในการกำจัดขยะ
    - ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนที่ได้ของแต่ละวิธีการในการกำจัดขยะ
    - การนำซีเมนต์จากการเผาขยะไปใช้ประโยชน์ ปริมาณซีเมนต์จากการเผาขยะที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือน



รูปที่ 1.3 แผนงานแบบ Precedence Diagram แสดงขั้นตอนการศึกษา

- ปริมาณขยะที่โรงกำจัดขยะในกรุงเทพฯ แต่ละแห่งต้องทำการบริหารจัดการ ปริมาณขยะที่โรงกำจัดขยะแต่ละแห่งสามารถรับได้สูงสุด และปริมาณขยะต่อเดือน
  - ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นของแต่ละวิธีการในการกำจัดขยะ
- การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการโดย การทำหนังสือถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อขอข้อมูล การสืบค้นทางเว็บไซต์ วารสาร และ รายงานทางวิชาการต่างๆ
9. ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับข้อมูลที่รวบรวมได้ ในข้อ 5 7 และ ข้อ 8 แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GAMS จากนั้นทำการแปลความหมายของผลวิเคราะห์จากโปรแกรม
  10. ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับข้อมูลที่รวบรวมได้ ในข้อ 5 และ ข้อ 6 แล้วนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GAMS จากนั้นทำการแปลความหมายของผลวิเคราะห์จากโปรแกรม
  11. วิเคราะห์ประเมินผลลัพธ์ จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้ ในข้อ 9 และ ข้อ 10 มาใช้ในการบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
  12. สรุปผลการศึกษา

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลลัพธ์ของการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ดังนี้

1. เพื่อเป็นแบบอย่างแก่ผู้สนใจและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมมาช่วยในการตัดสินใจ ในการกำหนดแนวทางในการบริหารจัดการ ด้านสิ่งแวดล้อม และ พลังงาน ซึ่งในงานศึกษานี้ คือ การกำจัด ขยะ น้ำเสีย และการเลือกวัตถุดิบทางการเกษตร สำหรับผลิตเอทานอล
2. ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จัดทำขึ้น ช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องเห็นว่า เราสามารถบริหารจัดการการกำจัดขยะ และการกำจัดน้ำเสีย โดยได้ผลตอบแทนที่เหมาะสม พร้อมกับการช่วยลดมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อมได้อย่างไร
3. ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจ เห็นแนวทางในการตัดสินใจในการเลือกวัตถุดิบทางการเกษตร ได้อย่างเหมาะสม และยั่งยืน นั่นคือ ได้ผลตอบแทนที่เหมาะสม ภายใต้ข้อจำกัดด้านผลผลิตทางการเกษตรและความสามารถในการผลิต พร้อมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## บทที่ 2

# การประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึง หลักการของแบบจำลอง และ แบบจำลองคณิตศาสตร์ การสร้างแบบจำลองวิเคราะห์ค่าเหมาะสมด้วยโปรแกรมเชิงเส้น และ การวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

### 2.1 แบบจำลอง

มีนักวิจัยหลายคนให้ความหมายของแบบจำลอง ดังนี้

ณัฐภัทรศญา ทับทิมเทศ [13] กล่าวว่า แบบจำลอง หมายถึง ตัวแบบที่ช่วยในการนำเสนอข้อมูลต่าง ๆ ของระบบ เพื่อจะนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้ในการแก้ไขปัญหา ตัวแบบนี้อาจจะเป็นโปรแกรม ที่มีความสามารถในการใช้สูตรคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล ค้นหาคำตอบหรือจำลองให้เห็นภาพของข้อมูล เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหา

Bardo and Hartman [14] กล่าวว่า แบบจำลองเป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อบรรยายคุณลักษณะที่สำคัญของปรากฏการณ์อย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจแบบจำลองจึงมิใช่การบรรยายหรืออธิบายปรากฏการณ์อย่างละเอียดทุกแง่มุม เพราะการกระทำเช่นนั้นจะทำให้แบบจำลองนั้นด้อยลงไป ส่วนการที่จะระบุว่าแบบจำลองใด ๆ จะต้องประกอบด้วยรายละเอียดมากน้อยเพียงใดจึงจะเหมาะสมและแบบจำลองนั้นๆ ควรมีย่อประกอบอะไรบ้าง ไม่ได้มีการกำหนดตายตัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์แต่ละอย่าง และวัตถุประสงค์ของผู้สร้างแบบจำลองนั้นว่าต้องการจะอธิบายปรากฏการณ์นั้นๆ อย่างไร

อุทัย บุญประเสริฐ [15] กล่าวว่า แบบจำลองหมายถึงสิ่งที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบที่สำคัญ ๆ ในเรื่องหนึ่งเรื่องใดโดยเฉพาะ

สมาน อัครวภูมิ [16] กล่าวว่า แบบจำลองหรือรูปแบบ หมายถึง แบบจำลองอย่างง่ายหรือย่อส่วน (Simplified Form) ของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่ผู้เสนอได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นมา เพื่อแสดงหรืออธิบายปรากฏการณ์ให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น หรือในบางกรณีอาจจะใช้ประโยชน์ในการทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้น ตลอดจนอาจใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไป

กรรณิกา เจิมเทียนชัย [17] กล่าวว่า แบบจำลองหรือรูปแบบ หมายถึง แบบจำลองอย่างง่ายหรือย่อส่วนของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่ผู้เสนอได้ศึกษาและพัฒนาขึ้น เพื่อแสดงอธิบายปรากฏการณ์ให้เข้าใจง่ายขึ้น หรือบางกรณีอาจจะใช้ประโยชน์ในการทำนายปรากฏการณ์ที่จะเกิดขึ้น ตลอดจนอาจใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไป

ดังนั้น คำว่าแบบจำลอง จึงมีความหมายที่ค่อนข้างกว้าง และ ครอบคลุมในหลายสาขาวิชา และ มีการนำไปใช้ในด้านต่างๆ กัน เราสามารถแบ่งประเภทของแบบจำลองตามชนิดของการใช้งาน [13] ได้ดังนี้

#### 1) แบบจำลองเชิงบรรยาย (Description Model) ประกอบด้วย

##### 1.1) แบบจำลองเชิงกราฟิก (Graphic Model) : เป็นแบบจำลองที่แทนข้อมูลใน

ลักษณะของตรรกะ (Logical) มักใช้แผนภาพ (Diagram) ต่าง ๆ สำหรับแสดงข้อมูล เช่น Document Flow ใช้สำหรับแสดงการไหลของเอกสารในกระบวนการทำงานของระบบ Context Diagram เป็นแผนภาพบริบทที่ใช้แสดงการไหลของข่าวสารโดยภาพรวมของระบบ Data Flow Diagram (DFD) เป็นแผนภาพกระแสข้อมูลใช้แสดงการไหลของข่าวสารที่ขยายความจาก Context Diagram ให้มีความละเอียดในเรื่องของกระบวนการมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ผู้พัฒนาโปรแกรมนั้น สามารถเข้าใจกระบวนการของระบบ

1.2) **แบบจำลองการเล่าเรื่อง (Narrative Model)** ใช้บรรยายเรื่องราวด้วยภาษาธรรมชาติเล่าเรื่องหรือบรรยายสิ่งต่าง ๆ ที่ต้องการ

1.3) **แบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical Model)** เป็นแบบจำลองทางด้านกรอกแบบสิ่งนำเข้า (Input Design) การออกแบบผลลัพธ์ (Output Design) เช่น แบบจำลองการสร้างบ้าน แบบจำลองหุ่นยนต์ หรือการเคลื่อนที่ หรืออาจจะเป็นแบบจำลองในโปรแกรม 2 มิติ และ 3 มิติ เช่น การเขียนแบบบ้านและแบบเครื่องจักรกลด้วยโปรแกรม AutoCAD เป็นต้น

## 2) แบบจำลองคงที่และแบบพลวัต (Static and Dynamic Model)

2.1) **แบบจำลองคงที่ (Static Analysis)** เป็นแบบจำลองที่ใช้เฉพาะกิจในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งตามท้องครต้องการ เช่น ตารางในการวิเคราะห์งบประมาณประจำปี ประจำปีไตรมาส หรือตามช่วงเวลา

2.2) **แบบจำลองพลวัต (Dynamic Analysis)** เป็นแบบจำลองสำหรับประเมินสถานการณ์ที่สามารถเปลี่ยนตัวแปรได้ตลอดเวลา เช่น การประเมินโครงการซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา สถานการณ์หรือผลของโครงการจะขึ้นอยู่กับเวลา

## 3) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model) ประกอบด้วย

### 3.1) แบบจำลองในการหาทางเลือกที่ดีที่สุด (Optimization Model)

1. การหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่มีทางเลือกน้อย ได้แก่

- **ตารางตัดสินใจ (Decision Table)** เป็นตารางการตัดสินใจอย่างง่าย แก้ปัญหาที่ไม่มีความซับซ้อน มีทางเลือกในการตัดสินใจไม่มากนัก

- **แผนภาพต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree)** ใช้โครงสร้างต้นไม้ (Tree) เป็นแบบจำลองในการตัดสินใจ ใช้แก้ปัญหาต่าง ๆ ที่มีเงื่อนไขไม่มาก ไม่ซับซ้อน เพื่อให้เห็นภาพข้อมูลสำหรับตัดสินใจได้ง่ายขึ้น

2. **แบบจำลองที่ใช้ Algorithm** ใช้เมื่อการหาคำตอบนั้นยุ่งยากเกินไปสำหรับวิธีแบบ Decision Table และ Decision Tree ดังนั้นแบบจำลองที่มีการใช้ Algorithm (Alg) ในการทำงานนั้น จึงเหมาะกับปัญหาที่มีทางเลือกมากมาย ผู้ตัดสินใจเกิดความสับสน ไม่สามารถเลือกทางเลือกได้ถูกต้อง จึงต้องใช้ Algorithm มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วย

- **แบบจำลอง การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming Model)** แบบจำลองชนิดนี้ต้องอาศัยสูตรหรือสมการทางคณิตในการคำนวณ มีองค์ประกอบของการกำหนด Function วัตถุประสงค์ (Objective function) ตัวแปรอิสระ (Independence variable) ตัวแปรตาม (Dependence variable) Function ภายใต้อำนาจจำกัด (Constrain function) และขอบเขตของ

ตัวแปรในการตัดสินใจ สำหรับวิธีการใช้งานนั้นสามารถคำนวณด้วยมือ หรือใช้โปรแกรมอำนวยความสะดวกที่มีความสามารถด้านคำนวณ Linear Programming

- **แบบจำลองการโปรแกรมเป้าหมาย (Goal Programming Model)** ใช้ในการหาผลลัพธ์จากเป้าหมายหลาย ๆ ค่า ทำการเปรียบเทียบค่า (Compare) ในแต่ละค่าเป้าหมายจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด วิธีนี้จะใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นภายใต้ข้อจำกัดที่เรามีอยู่ มักใช้ในการวิเคราะห์การตัดสินใจทางธุรกิจ เช่น แก้ปัญหาการผลิต การจัดสรรแรงงาน เป็นต้น

- **แบบจำลองเครือข่าย (Network model)** ลักษณะของ Network Model จะคล้ายกับ Net หรือ Graph ซึ่งแต่ละ Node มักจะแทนด้วยเมืองต่าง ๆ ที่ต้องเดินทาง แต่ละเมืองหรือแต่ละ Node นั้นจะเชื่อมถึงกัน เรามักนำ Network Model มาใช้ในการแก้ปัญหาการเดินทางเพื่อให้ใช้ระยะทางสั้นที่สุด หรือแก้ปัญหาการขนส่งที่เดินทางน้อยสุด

**3. แบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model)** เป็นแบบจำลองที่ใช้เทคนิคทางด้านคอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง

**4. Heuristic Algorithm** ใช้สำหรับหาคำตอบที่ดีที่สุด ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน เมื่อปัญหานั้นไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นแล้ว เราจะใช้ Heuristic ระบบที่มีการใช้ Heuristic ได้แก่ ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System : ES) และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent :AI) ใช้กับการวิเคราะห์ที่ต้องการคุณภาพ

## 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Models) เป็นการใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ในการจำลองระบบใด ๆ ก็ตาม ที่กำลังสนใจอยู่ การจำลองนี้ เป็นการประยุกต์ใช้ความรู้คณิตศาสตร์ในศาสตร์ด้านอื่น ๆ โดยมีได้มีจำกัดแต่เพียงในวิทยาศาสตร์กายภาพ (เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา) แต่ยังสามารถใช้ในวิทยาศาสตร์สายสังคมศาสตร์ได้อีกด้วย

การแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาจแบ่งได้เป็น [18]

### 1) เจาะจง กับ ทัวไป (Specific vs. General)

คือ แบบจำลองที่สร้าง เจาะจงกับปัญหา (หรือ ระบบ) หนึ่ง ๆ เท่านั้น หรือว่า สามารถนำไปปรับใช้กับรูปแบบปัญหาหลาย ๆ รูปแบบได้

### 2) ประมาณ กับ ละเอียดและถูกต้อง (Model Estimation vs. First-principles)

คือ ผลจากแบบจำลองเป็นผลประมาณ ที่มีความถูกต้องระดับหนึ่ง ในช่วงของตัวแปรที่สนใจ หรือ มาจากหลักการพื้นฐานที่ได้ผลที่ละเอียดและถูกต้องเสมอ

### 3) เชิงเลข กับ เชิงวิเคราะห์ (Numerical vs. Analytical)

ระเบียบวิธีที่ใช้ในการหาคำตอบ เป็นวิธีเชิงเลข หรือ ใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์หรือสมการ

### 4) แบบสุ่ม กับ แบบกำหนดได้ (Stochastic vs. Deterministic)

แบบจำลองที่สนใจมีการใช้การสุ่มหรือไม่

### 5) ระดับเล็ก กับ ระดับใหญ่ (Microscopic vs. Macroscopic)

การสร้างแบบจำลอง เราคำนึงถึงระบบ ในระดับสเกลใด ระดับเล็กคือมองภาพในมุมแคบ มองเฉพาะกลุ่มเป้าหมายบางกลุ่ม ขณะที่ระดับใหญ่คือการสร้างแบบจำลองโดยให้ครอบคลุมในหลายกลุ่มเป้าหมาย หรือ หลายๆ มุมมอง

### 6) ดิสครีต กับ ต่อเนื่อง (Discrete vs. Continuous)

การจำลอง มีหน่วยย่อย เป็นตัวแปรที่แบ่งแบบดิสครีต หรือ เป็นตัวแปรต่อเนื่อง

### 7) เชิงคุณภาพ กับ เชิงปริมาณ (Qualitative vs. Quantitative)

ผลที่ได้จากการจำลองเป็นการบรรยายเชิงคุณภาพ หรือ บ่งบอกเชิงปริมาณ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เพื่อนำมาหาแบบจำลอง โดยรายละเอียดทฤษฎีการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

## 2.3 การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม (Optimization)

การทำ Optimization [19] เกิดขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการแก้โจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ออกมาเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ นั้น เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มาจากหลักพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของระบบนั้นๆ ก่อนปี ค.ศ. 1940 วิธีที่ใช้ในการทำ Optimization ของฟังก์ชันที่มีหลายตัวแปรนั้นมีไม่มากนัก เช่น การทำ Least Square ซึ่งถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านฟิสิกส์บางประเภท แต่วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับ คือ การทำ Newton Method ซึ่งถูกนำมาใช้กับปัญหาของระบบที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางเคมี ในช่วงปี ค.ศ. 1940 – ค.ศ. 1950 มีการแนะนำสาขาใหม่ทางด้าน Optimization ที่เรียกกันว่า กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming) จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากันมาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบันนี้ได้มีการนำวิธีการทำ Optimization มาใช้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์, วิศวกรรมศาสตร์, คณิตศาสตร์ และ เศรษฐศาสตร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันนี้การทำ Optimization ไม่ได้จำกัดอยู่แค่สาขาวิชาทางด้านวิศวกรรม แต่กลายมาเป็นสิ่งสำคัญในทุกๆ สาขาวิชา โดยเฉพาะทางด้านเศรษฐศาสตร์ การทำ Optimization ถือว่ามีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากมีการนำหลักการของการทำ Optimization มาช่วยในเรื่องของเงินทุนและผลกำไร เช่น การลดต้นทุนการผลิต และการเพิ่มผลผลิต เป็นต้น สำหรับในด้านอื่นๆ เช่น สาขาทางด้านการบินและยานอวกาศ มีการใช้หลักการของ Optimization เพื่อหาเส้นทางการบินจากโลกไปที่ดวงจันทร์และกลับลงมายังโลกอีกครั้ง โดยใช้เชื้อเพลิงให้น้อยที่สุด หรือการหาโครงสร้างของเครื่องบินที่มวลน้อยที่สุด เป็นต้น สำหรับในภาคอุตสาหกรรมนั้น การตัดสินใจที่จะปรับปรุงให้ได้สิ่งที่ดีที่สุด เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นให้เห็นอยู่บ่อยครั้ง ตัวอย่างเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอุตสาหกรรมการผลิตทั้งหมด, การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่างๆ ซึ่งผู้จัดการต้องมีการวางแผนการทำงานที่ดีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ให้ได้ตามที่ต้องการ และในทางเดียวกัน วิศวกรต้องออกแบบระบบใหม่ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่เสียค่าใช้จ่ายน้อยลง บางปัญหาที่เกิดขึ้นกลายเป็นเรื่องยุ่งยากขึ้นมา เมื่อผู้จัดการหรือวิศวกรพบกับทางเลือกมากมายในการแก้ไขปัญหาเหล่านั้น และจะหาอย่างไรถึงจะสามารถเลือกทางเลือกที่ให้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการและดีที่สุด เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มี

การพัฒนาเทคนิคในการทำ Optimization ที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับที่เรียกว่า Modern Optimization Method ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่มีแบบแผน (Nontraditional) และได้มีการนำวิธีนี้เข้าไปร่วมกับสาขาวิชาทางด้านพันธุศาสตร์ เช่น Genetic Algorithm, Simulated Annealing, Particle Swarm Optimization, Ant Colony Optimization, Neural Network-based Optimization และ Fuzzy Optimization การใช้ Modern Method เข้ากับ Genetic Algorithm ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1975 โดย John Holland และการใช้ Modern Method เข้ากับ Simulated Annealing ถูกคิดค้นและพัฒนาโดย Kirkpatrick, Gelatt และ Vecchi สำหรับ Particle Swarm Optimization ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1995 โดย Kennedy และ Eberhart สำหรับ Ant Colony Optimization ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1992 โดย Marco Dorigo และ Neural Network Method เป็นวิธีการคำนวณคล้ายกับโครงข่ายระบบประสาท ซึ่งได้มีการใช้เทคนิคการทำ Optimization เข้ากับ Neural Network ครั้งแรกในปี ค.ศ.1985 โดย Hopfield และ Tank และวิธีการใช้ Optimization ร่วมกับ Fuzzy เพื่อแก้ปัญหาในด้านระบบข้อมูล และถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดย Rao

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Optimization ทางด้านวิศวกรรม

- 1) การออกแบบเครื่องบินหรือยานอวกาศให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด
- 2) การหาเส้นทางการบินที่สั้นที่สุด
- 3) การออกแบบโครงสร้างของตึก สะพาน ที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด
- 4) การออกแบบระบบกักเก็บน้ำที่ให้ผลกำไรมากที่สุด
- 5) การออกแบบโครงสร้างของพลาสติกที่เหมาะสมที่สุด
- 6) การเลือกเครื่องจักรสำหรับกระบวนการตัดเหล็กที่ใช้ต้นทุนในการผลิตที่น้อยที่สุด
- 7) การออกแบบ Pump หรือ Turbine ที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด
- 8) การออกแบบวัสดุที่ใช้ทำรถยนต์ให้เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

### 2.3.1 หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม

การทำ Optimization สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลายสาขาวิชาดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยหลักการแล้ว การทำ Optimization เป็นขบวนการทางคณิตศาสตร์อย่างหนึ่ง ซึ่งจะให้ผลในเชิงปริมาณ (Quantity) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำนวน หรือค่าของตัวเลขของปัญหาที่กำหนด ดังนั้น ปัญหาที่นำมาเลือกใช้ในการทำ Optimization จะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จุดประสงค์ของการทำ Optimization คือ เพื่อต้องการหาค่าสูงสุด (Maximum) หรือค่าต่ำสุด (Minimum) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนด (Objective Function) และการหาค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ บางครั้งอาจจะมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ที่เรียกว่า ข้อจำกัด (Constraints) ไว้ด้วย ดังนั้นสิ่งที่สำคัญสำหรับการทำ Optimization คือการกำหนด Objective Function และการกำหนด Constraints เพื่อใช้ในการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด

#### 2.3.1.1 ตัวแปรออกแบบ (Design Variable)

ตัวแปรออกแบบ (Design Variable) หมายถึง ตัวแปรที่เป็นคำตอบของการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งตัวแปรออกแบบจะถูกกำหนดเพื่อใช้อธิบายลักษณะของระบบทางด้านวิศวกรรมอย่างชัดเจน เช่น ขนาด, น้ำหนัก, รูปทรงของวัสดุ, จำนวนของฟันในเกียร์, จำนวนของคอยล์ในสปริง, หรือจำนวนของท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการกำหนดตัวแปรออกแบบนั้นต้องเลือกตัว

แปรที่ใช้กำหนดในระบบให้ถูกต้องกับโจทย์แต่ละประเภท

### 2.3.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ ฟังก์ชันที่เราต้องการหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุด โดยเราจะต้องทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ติดอยู่ในรูปของตัวแปรออกแบบ เพื่อที่จะทำการหาค่าของตัวแปรที่เป็นจุด Maximum หรือ Minimum ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์นั้น โดยทั่วไปแล้ว เราสามารถเขียน Objective Function ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$J = f(x) \quad (2.1)$$

โดย  $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  หรือตัวแปรที่มีจำนวน Dimension เป็น  $m$  โดยทั่วไปแล้วปัญหาของการทำ Optimization ส่วนมากจะเป็นปัญหาในรูปของ Minimization Problem เช่นจะออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างไรเพื่อให้เกิดต้นทุนน้อยที่สุด หรือจะขับรถไปด้วยความเร็วเท่าใดที่จะทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด บางปัญหาอาจจะเป็นการผสมผสานของการหาค่าต่ำสุดและสูงสุดในโจทย์เดียวกันได้ ตัวอย่างเช่น เราจะออกแบบรถยนต์อย่างไรเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดโดยโครงสร้างรถจะต้องมีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งขบวนการหาค่าตอบนั้นเราสามารถแปลงโจทย์ให้เป็นการหาค่าต่ำสุดเพียงอย่างเดียว

### 2.3.1.3 ข้อจำกัด (Constraints)

Constraints เป็นเงื่อนไขหรือข้อจำกัดของ Objective Function ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว Constraints จะแบ่งเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ External Constraints และ Internal Constraints ซึ่ง External Constraints เป็นข้อจำกัดของระบบที่อยู่เหนือการควบคุมของผู้ออกแบบ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราทราบว่า Material A สามารถลดต้นทุนได้มากกว่าการใช้ Material B แต่ Material A นั้นหาซื้อได้ยากกว่า ซึ่งความยากในการหาซื้อ Material A นี้คือ External Constraint ในโจทย์นี้ และสำหรับ Internal Constraints เป็นข้อจำกัดที่กำหนดขึ้นโดยผู้ออกแบบระบบ ซึ่งในตัวอย่างที่แล้ว Internal Constraint อาจหมายถึงจำนวนของ Material แต่ละประเภท รูปแบบทั่วไปของ Constraints เป็นไปดังสมการ

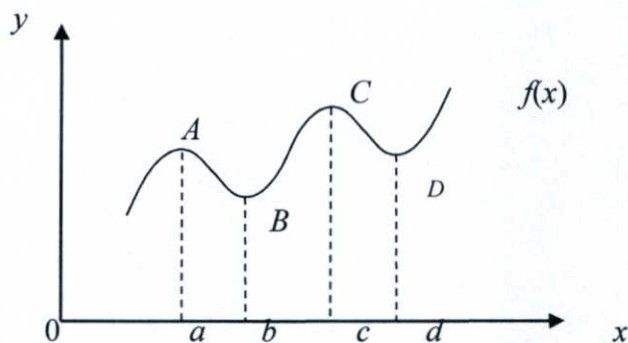
$$U_{\min} \leq u(t) \leq U_{\max} \quad (2.2)$$

Constraints จะมีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรที่เลือกไว้ใน Objective Function ด้วยหมายความว่า ถ้าฟังก์ชันของ Constraints มีการเปลี่ยนแปลงค่า คำตอบที่ได้จาก Objective Function ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการทำ Optimization สิ่งสำคัญคือค่าที่ได้จาก Objective Function จะต้องสอดคล้องกับ Constraints ที่กำหนดไว้ การแบ่งประเภทของ constraints สามารถแบ่งได้ตามเครื่องหมายทั้งหมด 2 ประเภท ได้แก่ Equality Constraints เป็นเงื่อนไขที่กำหนดด้วยเครื่องหมาย (=) และ Inequality Constraints เป็นเงื่อนไขที่กำหนดด้วยเครื่องหมาย ( $\leq$ ,  $\geq$ ) สำหรับบางปัญหาที่ไม่ได้มีการกำหนด Constraints เอาไว้ จะเรียกปัญหานี้ว่า

### Unconstrained Problem

การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันในทางคณิตศาสตร์จะหมายถึงการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ของฟังก์ชัน ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันในที่นี้จะหมายถึงค่าสูงสุดสัมพัทธ์หรือต่ำสุดสัมพัทธ์ (relative Maximum and Minimum) โดยค่าสูงสุดสัมพัทธ์ (Relative Maximum) ของฟังก์ชัน หมายถึงค่าสูงสุดของจุดที่กำลังพิจารณาซึ่งสูงกว่าจุดอื่นๆที่อยู่ข้างเคียง จากรูปที่ 2.1 ค่าสูงสุดสัมพัทธ์ของฟังก์ชัน  $f(x)$  คือ จุด  $A$  และ  $C$  สำหรับค่าต่ำสุดสัมพัทธ์ (Relative Minimum) ของฟังก์ชัน หมายถึง ค่าต่ำสุดของจุดที่กำลังพิจารณาซึ่งต่ำกว่าจุดอื่นๆที่อยู่ข้างเคียง จากรูปที่ 2.1 ค่าต่ำสุดสัมพัทธ์ของฟังก์ชัน  $f(x)$  คือ จุด  $B$  และ  $D$  ซึ่งค่าสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์ทั้งสองรวมเรียกว่า ค่าขีดสุดสัมพัทธ์ (Relative Extremum) ทั้งนี้ค่าสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์ของฟังก์ชันอาจมีได้หลายค่า โดยค่าสูงสุดสัมพัทธ์ไม่จำเป็นต้องเป็นจุดสูงที่สุดของฟังก์ชันเพียงแต่เป็นจุดซึ่งให้ค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับจุดข้างเคียงเท่านั้น ในลักษณะเดียวกันค่าต่ำสุดสัมพัทธ์ไม่จำเป็นต้องเป็นจุดต่ำที่สุดของฟังก์ชันเพียงแต่เป็นจุดซึ่งให้ค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับจุดข้างเคียงเท่านั้น

การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันตามหลักการทางคณิตศาสตร์สามารถแบ่งออกได้เป็นการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่มีตัวแปรอิสระเพียงหนึ่งตัวแปร การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปร และการหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่มีขอบเขตจำกัด

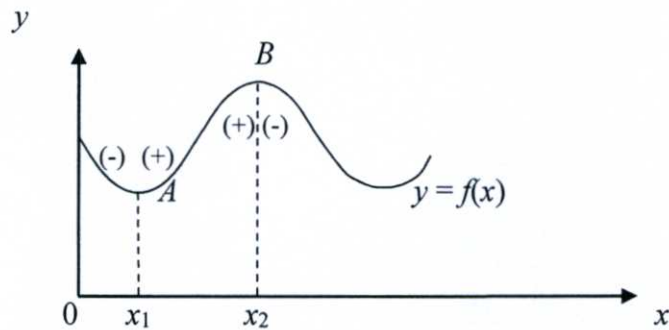


รูปที่ 2.1 แสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์ [19]

### 2.3.2 การหาค่าที่เหมาะสมของฟังก์ชันที่มีตัวแปรอิสระเพียงหนึ่งตัวแปร (Optimization with One Choice Variable)

กำหนดให้ฟังก์ชัน เป็นฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่อง (Continuous) และสามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ (Differentiable) ค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First-order Derivative) ของฟังก์ชันที่กำหนดให้ นั่นคือค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งนี้จะบอกถึงค่าความชันของจุดต่างๆบนเส้นกราฟ ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน ถูกแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปภาพเราสามารถพบความสัมพันธ์ที่ว่า จุด  $A$  และ  $B$  เป็นจุดต่ำที่สุดและจุดสูงสุดตามลำดับของฟังก์ชัน หากเราหาค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของฟังก์ชัน ณ จุด  $A$  และ  $B$  เรา จะพบว่าค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งหรือค่าความชันของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับศูนย์ และนอกจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วยังพบว่าค่าความชันของเส้นก่อนจุด  $A$  ซึ่งเป็นจุดต่ำสุดจะมีค่าความชันเป็นลบ แต่ค่าความชันของเส้นหลังผ่านจุด  $A$  จะมีค่าเป็นบวก ในขณะที่ค่าความชันของเส้นก่อนจุด  $B$  ซึ่งเป็นจุดสูงสุดจะมีค่าความชันเป็นบวก แต่ค่าความชันของเส้นหลังผ่านจุด  $B$  จะมีค่าเป็นลบ ความสัมพันธ์ดังกล่าวถือได้ว่ามีความสำคัญในการกำหนดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันใดๆที่กำลัง

พิจารณา



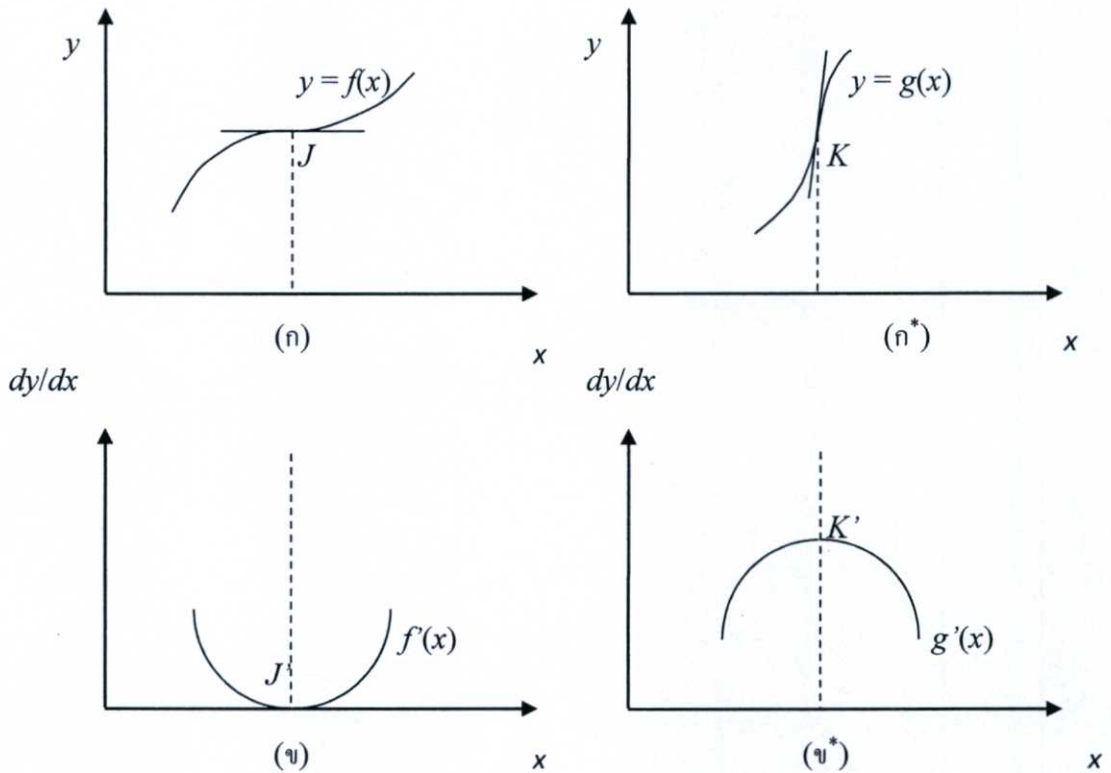
รูปที่ 2.2 แสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดสัมพัทธ์ [20]

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะกำหนดเพื่อหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด ของฟังก์ชันใดๆ พิจารณารูปที่ 2.3 (ก) จากกราฟของฟังก์ชัน ค่าความชันที่จุด  $J$  มีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนั้นค่าความชันของเส้นก่อนจุด  $J$  และค่าความชันของเส้นหลังผ่านจุด  $J$  ไม่ได้เปลี่ยนแปลงเครื่องหมายแต่อย่างใด นั่นคือ มีค่าเป็นบวก เมื่อนำค่าความชันของฟังก์ชัน ไปแสดงเป็นกราฟจะได้ลักษณะตามรูปที่ 2.3 (ข) ดังนั้น ถึงแม้ว่าค่าความชันที่จุด  $J$  มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่จุด  $J$  ไม่ได้เป็นจุดสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชัน เนื่องจากค่าความชันของเส้นก่อนจุด  $J$  และหลังผ่านจุด  $J$  ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมาย เราเรียกจุด  $J$  ว่าเป็นจุดเปลี่ยนเว้า (Inflection Point)

รูปที่ 2.3 (ก\*) และ 3 (ข\*) ก็แสดงให้เห็นถึงจุดเปลี่ยนเว้า (Inflection Point) ของฟังก์ชัน พิจารณาค่าความชันที่จุด  $K$  มีค่ามากกว่าศูนย์ โดยที่ค่าความชันของเส้นก่อนจุด  $K$  และค่าความชันของเส้นหลังผ่านจุด  $K$  ไม่ได้เปลี่ยนแปลงเครื่องหมายแต่อย่างใด ดังนั้น ถ้าค่าความชันที่จุด  $K$  มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จุด  $K$  ไม่ได้เป็นจุดสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชัน

ดังนั้นในการตรวจสอบหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันใดๆที่กำลังพิจารณา ค่าความชันหรือค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะทำการสรุปหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นได้ จึงจำเป็นต้องทำการวัดหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งหรือค่าความชันของฟังก์ชันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของความชัน ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถหาได้โดยการคำนวณหาค่าอนุพันธ์อันดับที่สองของฟังก์ชัน

รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง ค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง จุดต่ำสุด และจุดสูงสุดของฟังก์ชัน



รูปที่ 2.3 จุดเปลี่ยนเว้า (inflection point) [20]

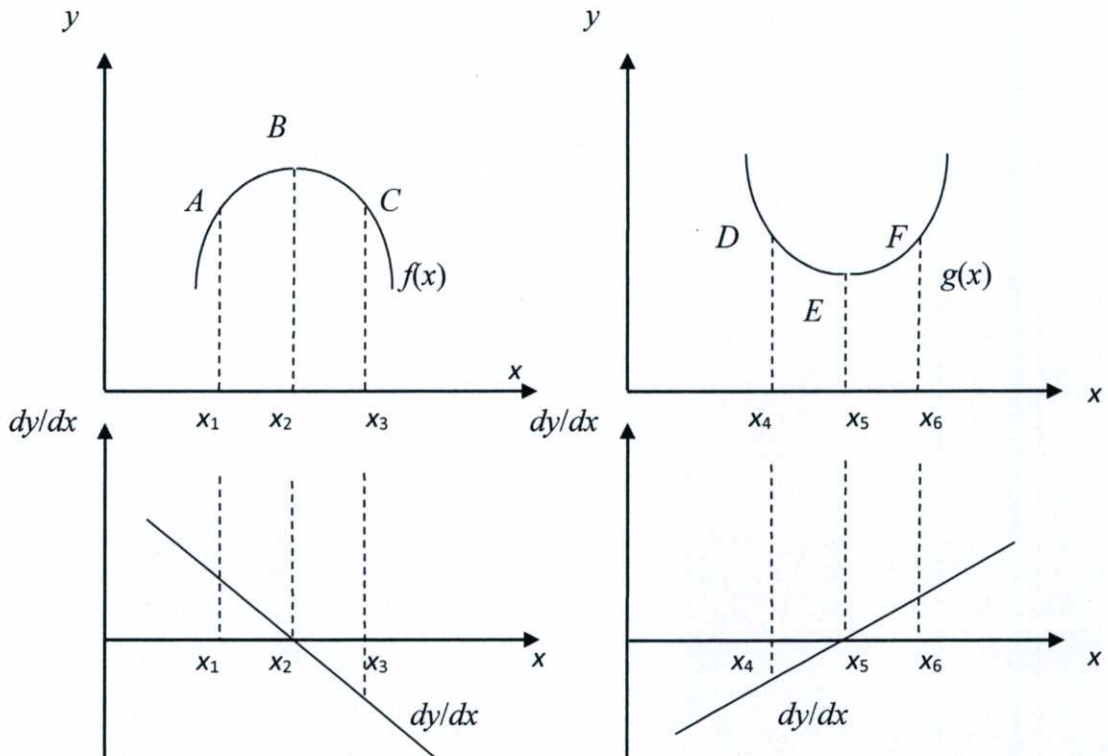
ณ จุด A นั่นคือ	$x = x_1$	$f'(x_1) > 0$	$f''(x_1) < 0$
ณ จุด B นั่นคือ	$x = x_2$	$f'(x_2) = 0$	$f''(x_2) < 0$
ณ จุด C นั่นคือ	$x = x_3$	$f'(x_3) < 0$	$f''(x_3) < 0$
ณ จุด D นั่นคือ	$x = x_4$	$g'(x_4) < 0$	$g''(x_4) > 0$
ณ จุด E นั่นคือ	$x = x_5$	$g'(x_5) = 0$	$g''(x_5) > 0$
ณ จุด F นั่นคือ	$x = x_6$	$g'(x_6) > 0$	$g''(x_6) > 0$

สรุปขั้นตอนในการตรวจสอบเพื่อหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันใด ๆ ที่กำลังพิจารณา เงื่อนไขที่สำคัญที่ใช้ตรวจสอบประกอบไปด้วย

(1) เงื่อนไขที่จำเป็นหรือเงื่อนไขอันดับที่หนึ่ง (Necessary Conditions or First-order Condition, FOC) หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้เพื่อตรวจสอบค่าอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของฟังก์ชัน หรือตรวจสอบค่าความชันของฟังก์ชัน โดยที่ค่า  $x=x_0$  จะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพัทธ์ของฟังก์ชัน ก็ต่อเมื่อ ค่าความชันของฟังก์ชัน ณ จุด  $x=x_0$  จะต้องมามีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ  $\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_0} = f'(x_0) = 0$

(2) เงื่อนไขที่ยืนยันหรือเงื่อนไขอันดับที่สอง (Sufficient Conditions or Second-order Condition, SOC) หมายถึง เงื่อนไขที่ใช้เพื่อตรวจสอบค่าอนุพันธ์อันดับที่สองของฟังก์ชัน หรือตรวจสอบค่าการเปลี่ยนแปลงของอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งหรือค่าการเปลี่ยนแปลงของความชันของฟังก์ชัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $x$  พิจารณาระดับ  $x=x_0$  ที่ทำให้  $f'(x_0)=0$  แล้ว

- $f(x_0)$  จะเป็นค่าสูงสุดสัมพัทธ์ ถ้าค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง  $f''(x_0) < 0$
- $f(x_0)$  จะเป็นค่าต่ำสุดสัมพัทธ์ ถ้าค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง  $f''(x_0) > 0$
- $f(x_0)$  จะเป็นค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดสัมพัทธ์หรืออาจจะเป็นจุดเปลี่ยนเว้า ถ้าค่าอนุพันธ์อันดับที่สอง  $f''(x_0) = 0$



รูปที่ 2.4 การใช้อนุพันธ์อันดับที่สองเพื่อทดสอบ (Critical Point) จากเงื่อนไขอันดับที่หนึ่ง [20]

### 2.3.3 การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันกรณีที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปร (Optimization with More Than One Choice Variables)

พิจารณากรณีที่ฟังก์ชันประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปร

$$z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.3)$$

โดยที่  $z$  คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

$x_1, x_2, \dots, x_n$  คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variable)

การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปรสามารถทำได้โดยการตรวจสอบเงื่อนไขอันดับที่หนึ่งและเงื่อนไขอันดับที่สองในลักษณะเดียวกันกับการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่มีตัวแปรอิสระเพียงหนึ่งตัวแปร

- (1) เงื่อนไขที่จำเป็นหรือเงื่อนไขอันดับที่หนึ่ง (Necessary Conditions or First-order Condition, FOC) เงื่อนไขดังกล่าวนี้ถูกใช้เพื่อคำนวณหาค่าวิกฤต (critical value) ของฟังก์ชัน นั่นคือ  $dz = 0$  ก็ต่อเมื่อ  $f_1 = f_2 = \dots = f_n = 0$
- (2) เงื่อนไขที่ยืนยันหรือเงื่อนไขอันดับที่สอง (Sufficient Conditions or Second-order Condition, SOC) เงื่อนไขดังกล่าวนี้ถูกใช้เพื่อตรวจสอบว่าค่าวิกฤตที่คำนวณได้จากเงื่อนไขที่จำเป็นหรือเงื่อนไขอันดับที่หนึ่งนั้นเป็นค่าที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพัทธ์ของฟังก์ชัน

ถ้า  $d^2z > 0$  แสดงว่า  $z$  จะเป็นค่าต่ำสุด

ถ้า  $d^2z < 0$  แสดงว่า  $z$  จะเป็นค่าสูงสุด

ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Hessian Determinant นั่นคือ

$$|H| = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nn} \end{vmatrix} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $f_{11} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \quad (2.5)$

$$f_{12} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} = \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \quad (2.6)$$

$$f_{1n} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} = \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \text{ เป็นต้น} \quad (2.7)$$

ถ้าฟังก์ชันประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ  $n$  ตัว จะสามารถสร้าง Hessian Determinant ได้ขนาด  $n \times n$  ด้วยเช่นกัน ซึ่งการพิจารณาเครื่องหมายของ Determinant สามารถทำได้โดยอาศัยเงื่อนไขที่ยืนยันหรือเงื่อนไขอันดับที่สอง ดังนี้

ถ้า  $z$  เป็นค่าต่ำสุดเมื่อ  $d^2z > 0$  ก็ต่อเมื่อ  $|H_1| > 0, |H_2| > 0, |H_3| > 0, \dots$

ถ้า  $z$  เป็นค่าสูงสุดเมื่อ  $d^2z < 0$  ก็ต่อเมื่อ  $|H_1| < 0, |H_2| > 0, |H_3| < 0, \dots$

เมื่อ  $|H_1| = |f_{11}| \quad (2.8)$

$$|H_2| = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{vmatrix} \quad (2.9)$$

$$|H_3| = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{vmatrix} \quad (2.10)$$

⋮

$$|H_n| = |H| = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nn} \end{vmatrix} \quad (2.11)$$

### 2.3.4. การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่มีขอบเขตจำกัด (Optimization with Equality Constraints)

ค่าเหมาะสมไม่ว่าจะเป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพัทธ์ของฟังก์ชัน ที่ประกอบไปด้วยขอบเขตจำกัด ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันนี้สามารถเป็นค่าเดียวกันกับ หรือแตกต่างจากกรณีที่มีฟังก์ชันไม่ได้ถูกจำกัดด้วยขอบเขตจำกัดก็ได้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของขอบเขตจำกัดที่ถูกกำหนด พิจารณารูปภาพข้างล่างนี้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงฟังก์ชัน  $f(x)$  ถูกจำกัดด้วยเส้นแสดงขอบเขตจำกัด  $g(x)$  จากรูปจะพบว่าค่าสูงสุดของฟังก์ชันจะมีค่าไม่เท่ากันระหว่างกรณีที่ฟังก์ชันถูกจำกัดด้วยขอบเขตจำกัด และกรณีที่ฟังก์ชันไม่ได้ถูกจำกัดด้วยขอบเขตจำกัด ตำแหน่ง A แสดงถึงจุดสูงสุดของฟังก์ชันกรณีที่ฟังก์ชันไม่ได้ถูกจำกัดด้วยขอบเขตจำกัด แต่เมื่อฟังก์ชัน  $f(x)$  ถูกจำกัดด้วยเส้นแสดงขอบเขตจำกัด  $g(x)$  จุดสูงสุดของฟังก์ชัน  $f(x)$  จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง B แทน

การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันภายใต้ขอบเขตจำกัด จึงไม่สามารถใช้เงื่อนไขเดียวกันกับกรณีที่ฟังก์ชันไม่ได้ถูกจำกัดด้วยขอบเขตดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตาม วิธีการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันภายใต้ขอบเขตจำกัดก็สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน แต่ทั้งนี้ในการวิเคราะห์จะต้องพิจารณาถึงฟังก์ชัน 2 ชนิดประกอบกัน อันได้แก่ ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าเหมาะสม และฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraints) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่กำหนดขอบเขตของฟังก์ชันเป้าหมาย

กำหนด ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) คือ  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

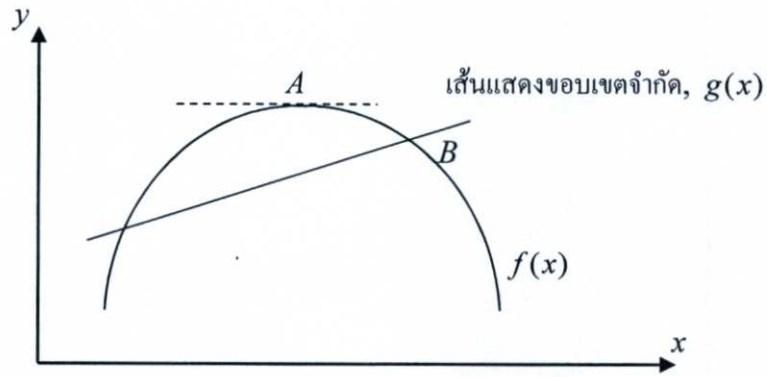
และฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint) ประกอบไปด้วย 1 ข้อจำกัด คือ

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = c \quad \text{โดยที่ } c \text{ คือ ค่าคงที่ใดๆ} \quad (2.12)$$

ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันข้อจำกัดสามารถนำมาเขียนเป็นฟังก์ชันใหม่ที่เรียกว่าฟังก์ชัน Lagrangian ได้ดังนี้

$$L = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \lambda[c - g(x_1, x_2, \dots, x_n)] \quad (2.13)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ตัวคูณ Lagrangian หรือ Lagrangian multiplier



รูปที่ 2.5 การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่มีขอบเขตจำกัด [20]

ดังนั้น ฟังก์ชัน Lagrangian จะกลายเป็นฟังก์ชันที่ไม่มีข้อจำกัด โดยฟังก์ชัน Lagrangian จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่า  $x_1, x_2, \dots, x_n$  และ  $\lambda$  นั่นคือ  $L = L(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda)$  การหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชัน Lagrangian ก็สามารทำได้โดยการประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันจะต้องทำการตรวจสอบเงื่อนไข 2 ประการ อันได้แก่ เงื่อนไขที่จำเป็นหรือเงื่อนไขอันดับที่หนึ่ง (Necessary Conditions or First-order Condition, FOC) และเงื่อนไขที่ยืนยันหรือเงื่อนไขอันดับที่สอง (Sufficient Conditions or Second-order Condition, SOC)

- (1) เงื่อนไขที่จำเป็นหรือเงื่อนไขอันดับที่หนึ่ง (Necessary Conditions or First-order Condition, FOC) เงื่อนไขดังกล่าวนี้ถูกใช้เพื่อคำนวณหาค่าวิกฤต (Critical Value) ของฟังก์ชัน Lagrangian นั่นคือ  $dL = 0$  ก็ต่อเมื่อ

$$L_i \equiv \frac{\partial L}{\partial x_i} = f_{x_i} - \lambda g_{x_i} = 0 \quad (2.14)$$

$$L_\lambda \equiv \frac{\partial L}{\partial \lambda} = c - g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

สมการความสัมพันธ์ที่ได้จาก FOC ประกอบไปด้วยจำนวน  $n+1$  สมการ และตัวแปรที่ต้องการหาค่ามีจำนวน  $n+1$  ตัวแปร ดังนั้น เราสามารถแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปร  $x_1, x_2, \dots, x_n$  และ  $\lambda$  ที่ทำให้ได้ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชัน Lagrangian ได้

- (2) เงื่อนไขที่ยืนยันหรือเงื่อนไขอันดับที่สอง (Sufficient Conditions or Second-order Condition, SOC) เงื่อนไขดังกล่าวนี้ถูกใช้เพื่อตรวจสอบว่าค่าวิกฤตที่คำนวณได้จากเงื่อนไขที่จำเป็นนั้นเป็นค่าที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพัทธ์แก่ฟังก์ชัน Lagrangian หรือเป็นค่าที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดสัมพัทธ์แก่ฟังก์ชันเป้าหมาย  $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ที่อยู่ภายใต้ฟังก์ชันข้อจำกัด  $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = c$  ที่กำหนดให้

เงื่อนไขเพื่อยืนยันดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จาก Bordered Hessian Determinant  $|\bar{H}|$  ซึ่งเขียนได้ในรูป

$$|\bar{H}| = \begin{vmatrix} 0 & g_1 & g_2 & \dots & g_n \\ g_1 & L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ g_2 & L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ g_n & L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{vmatrix} \quad (2.16)$$

เราสามารถกำหนด Hessian determinant ที่เรียกว่า Bordered Principal Minors ได้ดังนี้

$$|\bar{H}_2| = \begin{vmatrix} 0 & g_1 & g_2 \\ g_1 & L_{11} & L_{12} \\ g_2 & L_{21} & L_{22} \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

$$|\bar{H}_3| = \begin{vmatrix} 0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ g_1 & L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ g_2 & L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ g_3 & L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

ซึ่งตัวสุดท้ายของ Bordered Principal Minors คือ  $|\bar{H}_n| = |\bar{H}|$  เราใช้สัญลักษณ์ “-” แทน Bordered และ Subscript แสดงถึงลำดับของ Principal Minor ที่จะต้องมี Bordered ตัวอย่างเช่น  $|\bar{H}_2|$  เกี่ยวข้องกับ Second Principal Minor ของ Hessian Determinant ธรรมดาและมี Bordered คือ 0,  $g_1$  และ  $g_2$  ตามลำดับ โดยเงื่อนไขของการหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชันเป้าหมาย คือ

$$z \text{ จะเป็นค่าสูงสุด ถ้าค่า } d^2 z < 0 \text{ เมื่อ } |\bar{H}_2| > 0, |\bar{H}_3| < 0, |\bar{H}_4| > 0, \dots$$

$$z \text{ จะเป็นค่าต่ำสุด ถ้าค่า } d^2 z > 0 \text{ เมื่อ } |\bar{H}_2|, |\bar{H}_3|, |\bar{H}_4|, \dots, |\bar{H}_n| < 0$$

ปัญหาการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เกี่ยวกับปัญหาการบริหารจัดการทางสิ่งแวดล้อมและพลังงาน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับสมการกำไร-ขาดทุน คือ ฟังก์ชันเกี่ยวกับค่าใช้จ่าย และ รายรับ จึงเป็นแบบจำลองของสมการเส้นตรงมากกว่าที่จะเป็นฟังก์ชันแบบโพ

ลิโนเมียล หรือ เส้นโค้ง ดังนั้นจึงเหมาะกับการหาค่าเหมาะสมแบบกำหนดการเชิงเส้น ซึ่งมีหลักการดังหัวข้อต่อไปนี้

## 2.4 กำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming)

กำหนดการเชิงเส้น หรือที่เรียกว่า Linear Programming เป็นเทคนิคการทำ Optimization ที่ใช้สำหรับปัญหาที่มี Objective Function และ ข้อจำกัดหรือเงื่อนไข (Constraints) เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) โดยที่สมการของ Constraints จะอยู่ในรูปที่เป็นสมการข้อจำกัด (Equalities Constraints) หรือ อสมการข้อจำกัด (Inequalities Constraints) ในการใช้ Linear Programming สำหรับการทำให้ Optimization เริ่มมีการคิดค้นขึ้น ในปี ค.ศ.1930 โดยนักเศรษฐศาสตร์คนหนึ่ง ขณะที่กำลังหาวิธีที่สามารถแบ่ง Resources ได้เหมาะสมที่สุด และในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 กองทัพอากาศของสหรัฐอเมริกาพยายามหา Resources ที่มีความสมบูรณ์มากที่สุด โดยการใช้วิธี Linear Programming ซึ่ง George B. Dantzig สมาชิกคนหนึ่งในกองทัพอากาศ ได้คิดค้นวิธีในการหาค่าตอบสำหรับปัญหาที่เป็น Linear Programming เรียกว่า Simplex Method ได้ในปี ค.ศ.1974 [21] วิธีนี้ กลายมาเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้มีการใช้ Linear Programming มากขึ้น จากนั้น ได้มีการพัฒนาทฤษฎีของ Linear Programming เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ

### 2.4.1. รูปแบบกำหนดการเชิงเส้น (Linear Programming Model)

Linear Programming (LP) Model จะประกอบไปด้วย 2 ฟังก์ชันด้วยกัน คือ Objective Function และ Constraints โดยที่การพิจารณาปัญหาของระบบจะมีอยู่ทั้ง 2 แบบด้วยกัน คือ การพิจารณาปัญหาในการหาค่าสูงสุด (Maximization Problem) และการพิจารณาปัญหาในการหาค่าน้อยสุด (Minimization Problem) โดยมีรูปแบบสมการของปัญหาทั้ง 2 แบบ [22] ดังนี้

#### 2.4.1.1 Maximization Problem

มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$\text{Objective Function } c^T x = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \quad (2.19)$$

ที่สอดคล้องกับ Constraints ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_n \end{array} \right\} (Ax \leq b) \quad (2.20)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

จะได้แบบฟอร์มทั่วไปของปัญหาในการหาค่าสูงสุด คือ

$$\text{Maximize } c^T x \quad (2.21)$$

$$\text{ภายใต้เงื่อนไข } Ax \leq b \quad (2.22)$$

$$x \geq 0 \quad (2.23)$$

#### 2.4.1.2 Minimization Problem

มีรูปแบบสมการ ดังนี้

$$\text{Objective Function } y^T b = y_1 b_1 + y_2 b_2 + \dots + y_m b_m \quad (2.24)$$

ที่สอดคล้องกับ Constraints ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} a_{11}y_1 + a_{21}y_2 + \dots + a_{m1}y_m \geq c_1 \\ a_{12}y_1 + a_{22}y_2 + \dots + a_{m2}y_m \geq c_2 \\ \vdots \\ a_{1n}y_1 + a_{2n}y_2 + \dots + a_{mn}y_m \geq c_n \end{array} \right\} (Ay^T \geq c^T) \quad (2.25)$$

$$y_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

จะได้แบบฟอร์มทั่วไปของปัญหาในการหาค่าต่ำสุด คือ

$$\text{Minimize } y^T b \quad (2.26)$$

$$\text{ภายใต้เงื่อนไข } y^T A \geq c^T \quad (2.27)$$

$$y \geq 0 \quad (2.28)$$

#### 2.4.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีกราฟ (Graphical method)

การทำ Optimization ด้วยวิธี Graphical Method คือการหาค่า Maximum หรือ Minimum จากกราฟที่อยู่ภายใต้ขอบเขตของ Constraints ทั้งหมด และพื้นที่ที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขของ Constraints นั้น จะเรียกว่า Convex Area และคำตอบที่ได้ของ Objective Function จะอยู่บนจุดตัดต่างๆ ของ Convex Area โดยขั้นตอนการทำ Optimization ด้วยวิธี Graphical Method มีดังนี้

- 1) ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ของสองตัวแปรในระบบที่ต้องการหาค่า Optimal
- 2) เปลี่ยนจากอสมการใน Constraint ให้เป็นสมการเชิงเส้น แล้ววาดเส้นตรงที่ได้ลงในกราฟ
- 3) พิจารณาพื้นที่ที่เราสนใจในแต่ละอสมการใน Constraint แล้วนำพื้นที่ที่ได้มาซ้อนทับ (Intersection) กันซึ่งจะทำให้เกิดพื้นที่ปิด (Convex Area)
- 4) หากจุดตัดที่เกิดขึ้น ทั้งหมดใน Convex Area ที่ได้
- 5) หาค่าของ Objective Function จากจุดตัดทั้งหมด เพื่อหาค่าที่จะ Optimal ปัญหานี้

การทำ Optimization ด้วยวิธี Graphical Method มีข้อจำกัดอยู่ว่า ตัวแปรของ Objective Function ควรมีเพียง 2 ตัวแปรเท่านั้น เพื่อให้สามารถมองเห็นขอบเขตของบริเวณคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Region)

ตัวอย่างการแก้ปัญหาโดย วิธีเชิงกราฟ กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และ ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraints Function) ดังนี้

$$\text{Minimize and Maximize } Z = x_1 + 2x_2$$

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

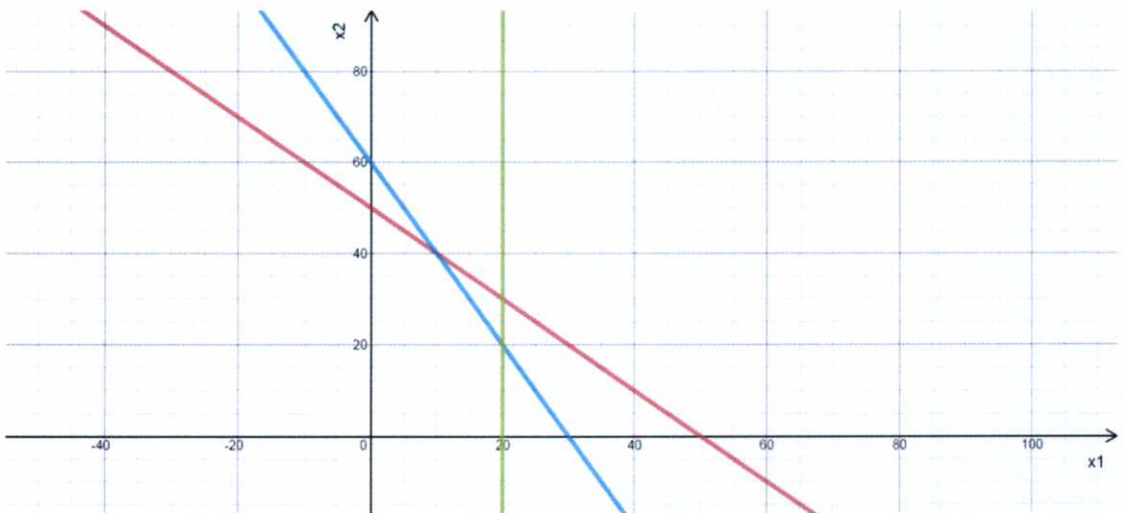
$$x_1 + x_2 \leq 50$$

$$2x_1 + x_2 \leq 60$$

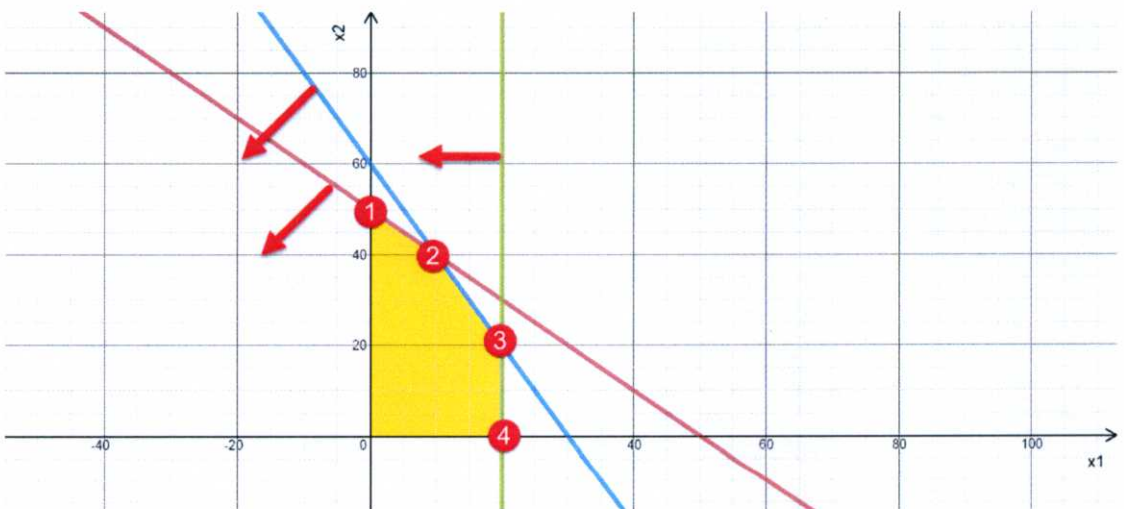
$$x_1 \leq 20$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

นำสมการ ทั้งหมดที่กำหนดมา พล็อตกราฟเพื่อหา Feasible Region ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการพลอตกราฟตามสมการ ตัวอย่างการแก้ปัญหาโดย วิธีเชิงกราฟ



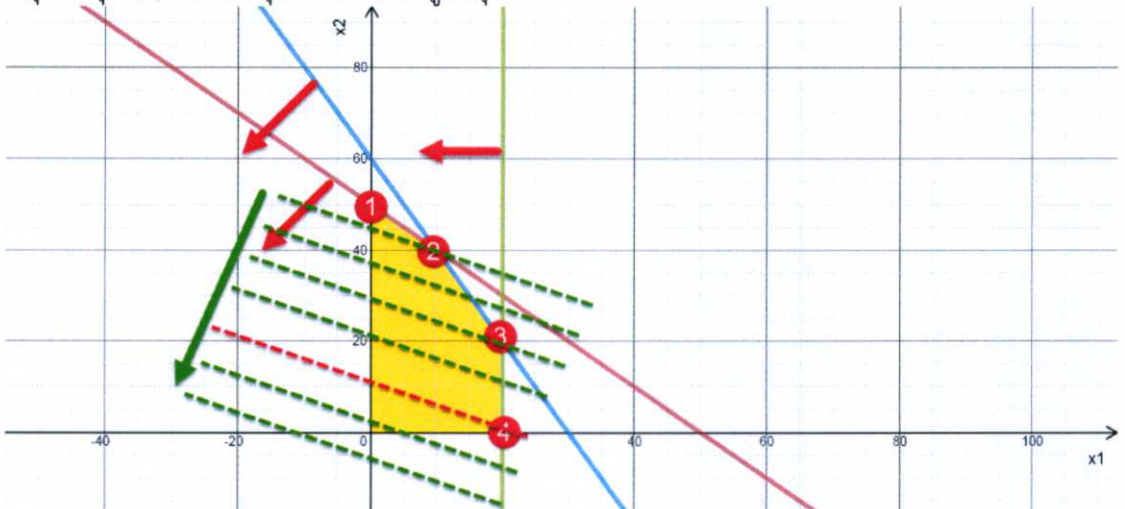
รูปที่ 2.7 แสดง Feasible Region จากปัญหาข้างต้น

จะเห็นได้ว่า มีจุด Feasible Point ที่อยู่ตรงมุมของ Feasible Region ทั้งหมด สืบเนื่องจากการ วาดกราฟ ของสมการทั้งสามเส้น ซึ่งหลังจากนี้เราจะทำการวาดเส้นกราฟความชัน ของสมการ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) และลากลง (Move Down) ให้ขนานกับเส้นความชัน

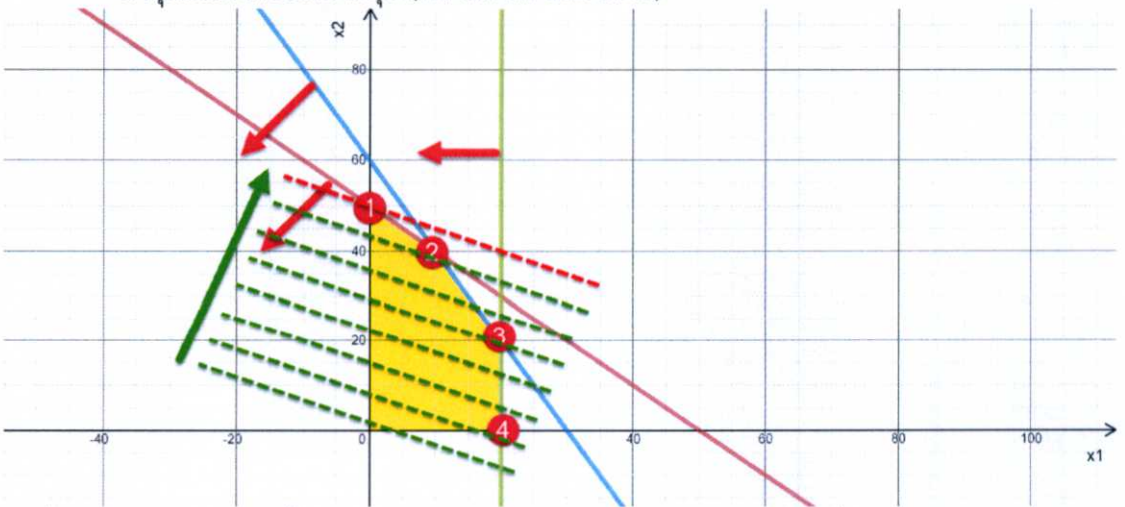
ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จนกระทั่งตัดจุด Feasible Point จุดสุดท้ายจะเป็นจุดที่มีค่าตอบที่ต่ำที่สุด จะเรียกว่า Minimum Solution

เมื่อลากลงให้ขนานกับ เส้นความชันของชั้น ของสมการ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) จะเห็นได้ว่า จุดแรกที่ตัด คือจุดที่ 4 จากรูปที่ 2.8 ซึ่งมีค่า (0,20) นำไปแทนค่าในสมการ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) มีค่าเท่ากับ 20 ซึ่งจะได้เป็นค่า Minimum ตามฟังก์ชัน ข้อจำกัด (Constraints Function) เมื่อลองนำค่า Feasible Point อื่นๆ จุดที่ 1 , 2 , 3 ซึ่งมีค่า (0,50), (10,40), (20,20) นำไปแทนเพื่อหาค่าตอบในสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะได้คำตอบคือ 100, 90, 60 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า Minimum ที่สุดคือจุด (0,20) เป็นจุดที่มีค่าตอบที่ต่ำที่สุด

ในทางกลับกัน การลากขึ้น (Move up) ให้ขนานกับเส้นความชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จนกระทั่งตัดจุด Feasible Point จุดสุดท้าย จะเป็นการหาค่า จุดที่มีค่าตอบที่สูงที่สุด จะเรียกว่า Maximum Solution จากตัวอย่างข้างต้น จุดสุดท้ายที่ตัดคือจุดที่ 1 ซึ่งมีค่า (0,50) นำไปแทนค่าใน สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) มีค่าเท่ากับ 100 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า Maximum ที่สุดคือจุด (0,50) เป็นจุดที่มีค่าตอบที่สูงที่สุด



รูปที่ 2.8 แสดงการ ลากลง (Move Down) ให้ขนานกับเส้นความชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าจุดที่มีค่าตอบที่ต่ำที่สุด (Minimum Solution)



รูปที่ 2.9 แสดงการ ลากขึ้น (Move up) ให้ขนานกับเส้นความชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าจุดที่มีค่าตอบที่สูงที่สุด (Maximum Solution)

### 2.4.3 การแก้ปัญหากำหนดการเชิงเส้น โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel

การแก้ปัญหาในงานวิจัย หรือ การแก้ปัญหาในกิจกรรมต่างๆหลายๆอย่าง จะมีข้อจำกัดอยู่มากมาย ซึ่งเมื่อตัวแปรต่างๆเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือเพื่อมาช่วยในการ แก้ไขปัญหา เนื่องจากการวาดกราฟ อาจจะเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด สะดวกแต่ใช้ได้สำหรับ ปัญหาที่ไม่ซับซ้อนมาก ตัวแปรไม่เกิน สามตัวแปร ในโปรแกรมสำเร็จรูปอย่าง Microsoft Excel ก็มีฟังก์ชัน Solver สำหรับช่วยคำนวณหาค่า Optimization ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานโดยสรุปดังนี้

ในเซลล์ที่ต้องการคำนวณเช่น เซลล์ที่เตรียมไว้สำหรับวัตถุประสงค์ หรือการหาผลรวมของทรัพยากรที่ใช้ไปเพื่อเปรียบเทียบกับข้อจำกัดที่มี ซึ่งเราอาจจะใช้สูตรหรือใช้ฟังก์ชันเช่น ในฟังก์ชัน วัตถุประสงค์จากตัวอย่างร้านผ้าไทยเจริญ อาจใช้ฟังก์ชัน SUMPRODUCT ซึ่งเป็นฟังก์ชันการคูณสมาชิกแต่ละตัวที่ตรงกันของอาร์เรย์สองตัวหรือมากกว่าสองตัวขึ้นไป แล้วหาผลรวมของผลคูณทั้งหมด แล้วส่งค่านั้นกลับเป็นผลลัพธ์ของฟังก์ชัน ค่าของอาร์กิวเมนต์ที่ไม่ใช้ตัวเลขจะคิดเป็น 0 ฟังก์ชันมีรูปแบบ [23] ดังนี้

$$=SUMPRODUCT(array1,array2,.....) \quad (2.29)$$

เช่นในตัวอย่างที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของเราคือ  $Z=200X_1+220X_2$  อาร์เรย์ กำไรต่อหน่วย คือ C5:D5 จำนวนที่ต้องผลิตของ  $X_1$  และ  $X_2$  คือ C6:D6 เราจะพิมพ์ฟังก์ชันลงไปในเซลล์ C7

$$=SUMPRODUCT(C5:D5,C6:D6) \quad (2.30)$$

$$Z=200X_1 + 220X_2 \quad (2.31)$$

หรืออาจจะใช้สูตร

$$=(C5*C6)+(D5*D6) \quad (2.32)$$

และในเซลล์ E10 และ E11 ก็เช่นเดียวกัน เราจะได้ทราบว่าหากต้องผลิตแต่ละแบบเท่าใดแล้วจะใช้ทรัพยากรไปเท่าใด เพื่อที่เราจะนำไปเทียบกับปริมาณที่เรามีอยู่หรือข้อจำกัดของเรานั้นเอง ดังรูปที่ 2.10

$$=sumproduct(c6:d6,c10:d10) \quad (2.33)$$

$$=sumproduct(c6:d6,c11:d11) \quad (2.34)$$

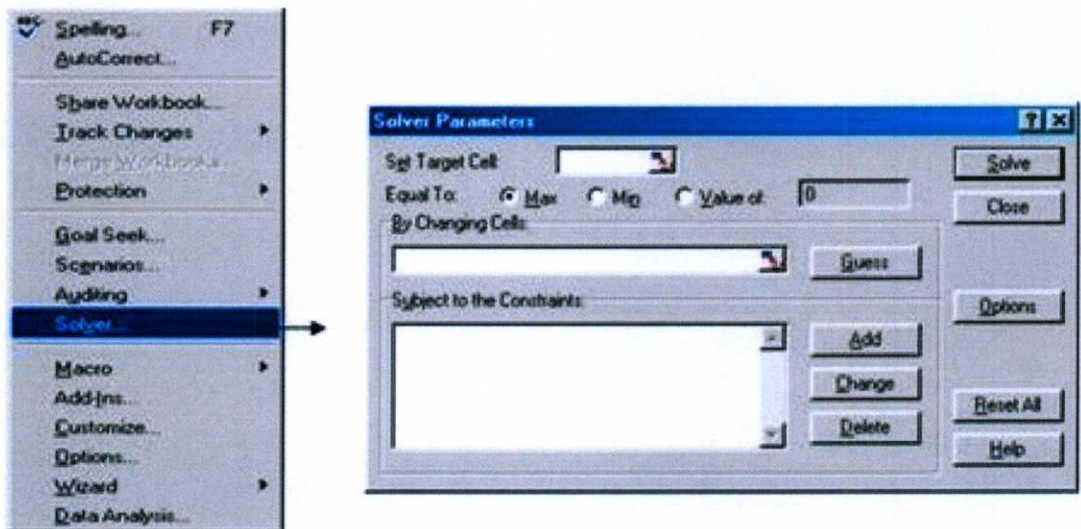
	A	B	C	D	E	F	G
4			แบบแรก	แบบที่สอง			
5		กำไรต่อหน่วย	200	220			
6		จำนวนที่ต้องผลิต					
7	พิจารณาวัตถุประสงค์	กำไรสูงสุด	0				
8							
9							
10	ข้อจำกัด	ผ้า (เมตร)	3	15	0	500	
11		กำลังการผลิต (นาฬิกา)	30	50	0	12000	
12							

Formulas shown in the image:

- Cell C7: `=SUMPRODUCT(C5:D5,C6:D6)`
- Cell E5: `=sumproduct(c6:d6,c10:d10)`
- Cell E6: `=sumproduct(c6:d6,c11:d11)`

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้ Excel

Solver เป็นเครื่องมือหนึ่งที่อยู่โปรแกรม Excel ที่จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์และหาคำตอบที่ดีที่สุด(Optimize solution) โดยที่เราไม่ต้องลองคำนวณทุก ๆ ค่าของตัวเลือกที่จะเป็นไปได้ การใช้ Solver ทำได้โดยการเลือกคำสั่ง Tools แล้วเลือก Solver รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Solver

หากเลือกคำสั่ง Tools (เครื่องมือ) แล้วไม่มีคำสั่ง Solver.. สามารถเรียกใช้โดยเลือกที่ Add-Ins.. แล้วจะมีหน้าต่างขึ้นมาให้เราเลือกโปรแกรมเพิ่ม ให้เลือก Solver Add-in แล้วกดปุ่ม OK ในการใช้ Solver ต้องให้ข้อมูลแก่ Solver Parameters สามอย่างคือ

1. จุดประสงค์หรือเป้าหมาย (ว่าจะให้ค่าใช้จ่าน้อยที่สุด หรือกำไรมากที่สุด) ลงไปในเซลล์ใด ลงในช่อง Set Target Cell ซึ่งในตัวอย่างนี้คือ C7 และเราเลือก Max เพราะเราต้องการกำไรสูงสุด
2. ตัวแปร หรือเซลล์เปลี่ยนแปลง คือจำนวนที่ต้องผลิตผ้าผ่านในแต่ละแบบ ซึ่งในตัวอย่างที่เราพิมพ์ไว้ในเซลล์ C6 และ D6
3. เงื่อนไข (constraint) หรือข้อจำกัดที่เราสรุปไว้ในตาราง ตามตัวอย่างข้อจำกัดของโจทย์ดังตาราง

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลประกอบตัวอย่างการใช้ Solver

ข้อจำกัด	อสมการ	กำหนดลงในโปรแกรม
ผ้า	$3X_1 + 1.5X_2 \leq 500$	E10 <= F10
กำลังการผลิต	$30X_1 + 50X_2 \leq 12000$	E11 <= F10
การผลิตทั้งสองแบบต้องไม่ติดลบ	$X_1, X_2 \geq 0$	C6:D6 >= 0

#### 2.4.4 การแก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้น ด้วย GAMS

ในการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีข้อมูลจำนวนมาก ไม่สะดวกในการวิเคราะห์คำนวณด้วยมือ หรือ ด้วยกราฟ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการคำนวณนาน และ ยังอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย สำหรับการวิเคราะห์การใช้ Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel 2013 สามารถใช้กับปัญหาที่มี ตัวแปรในการตัดสินใจ (Variable Decision) หลายๆตัว และเหมาะกับ ปัญหาที่มีแบบแผนเหมาะที่จะใช้แก้ปัญหาในรูปแบบของตาราง ง่ายต่อการทำเอกสารรายงาน สามารถสรุปและจัดพิมพ์เอกสารได้สะดวกสวยงาม แต่เมื่อปัญหาที่มีความซับซ้อนขึ้นกว่านี้ และเขียนเป็นตารางได้ยาก มีตัวแปรในการตัดสินใจที่ซับซ้อน และจำนวนมากจะยากต่อการใส่ข้อมูลและการเรียงข้อมูลเพื่อที่จะใช้ ฟังก์ชัน SUMPRODUCT จึงมีผู้พัฒนาโปรแกรม ที่สามารถเพิ่มข้อมูลหรือ ภาษาที่คล้ายคลึงกับสมการคณิตศาสตร์ เพื่อให้การทำงานสะดวกขึ้น

GAMS ย่อมาจาก General Algebraic Modeling System (GAMS) [24] [25] คือ โปรแกรมสำหรับสร้างระบบแบบจำลองระดับสูงสำหรับการวิเคราะห์ค่าเหมาะสมทางคณิตศาสตร์ GAMS ถูกออกแบบให้สามารถสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมสำหรับปัญหาที่เป็นสมการเชิงเส้นตรง ไม่ใช่เส้นตรง และ แบบผสม ประกอบไปด้วยตัวแปลภาษาและตัววิเคราะห์ประสิทธิภาพสูง และมีความเสถียรมาก GAMS ถูกออกแบบให้ใช้งานได้ง่ายสำหรับการประยุกต์ใช้ในการสำหรับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนสูง และมีข้อมูลจำนวนมาก และ ยังช่วยให้ผู้ใช้สามารถทำการปรับปรุงแบบจำลองได้ง่ายและรวดเร็ว

โครงสร้างหลักในการเขียนโปรแกรม GAMS จะแยกออกเป็นทั้งหมด 5 ส่วน

- การสร้างเซต (Set)
- การนิยามตัวแปร (Variable)
- การกำหนดข้อมูลจากปัญหา (Parameter)
- การเขียนสมการ (Equation)
- การใช้คำสั่งใน GAMS (Solve)

##### 2.4.4.1 การสร้างเซต (Set)

จำเป็นต่อนิยามเซตหรือชื่อของเซตให้เหมาะสมกับปัญหาที่เราสนใจอยู่โดยเพื่อง่ายในการตรวจสอบรูปแบบ ในการนิยามเซตของ GAMS มีวิธีการดังนี้

##### ตัวอย่างการนิยามเซต

```
SET sname ["text"]/ele ["text"]{, ele ["text"]} /
```

```
{ sname ["text"]/ele ["text"]{, ele ["text"] /} ;
```

โดยมีความหมายของเครื่องหมายต่างๆ ดังนี้

ภายใต้ [...] เครื่องหมายนี้จะป็นข้อความที่ใส่ก็ได้หรือไม่ใส่ก็ได้

ภายใต้ {...} เครื่องหมายนี้จะหมายถึงข้อความนั้นปรากฏซ้ำกันได้ตั้งแต่ 0 ครั้งขึ้นไป

sname ชื่อของเซตซึ่งต้องไม่เกิน 10 ตัวอักษร

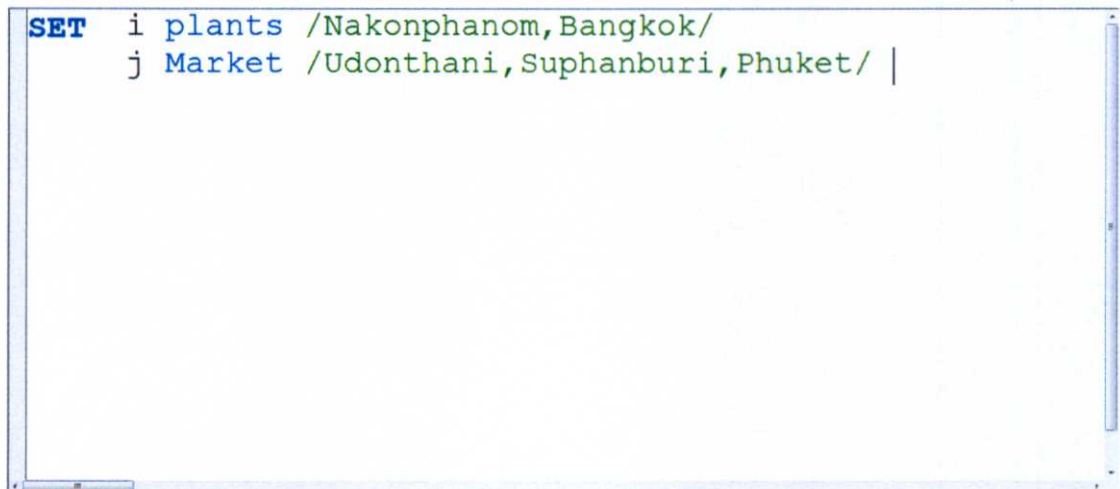
"Text" คำอธิบายของเซตซึ่งสูงสุด 80 ตัวอักษร

ele เป็นชื่อของสมาชิกของเซตซึ่งไม่เกิน 10 ตัวอักษร

ยกตัวอย่าง เช่น

SET i plants /Nakonphanom , Bangkok/

j Market /Udonthani , Suphanburi/;



```
SET i plants /Nakonphanom, Bangkok/
    j Market /Udonthani, Suphanburi, Phuket/ |
```

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการนิยามเซต (Set) ในโปรแกรม GAMS

#### 2.4.4.2 การสร้างตัวแปร (Variable)

ในการนิยามตัวแปรจำเป็นต้อง กำหนดให้สอดคล้องกับปัญหา ที่เรากำลังสนใจเพื่อถ่ายทอดความเข้าใจและแก้ไข โดยตัวแปรจะทำหน้าที่เก็บข้อมูลผลหรือเฉลย ซึ่งเป็นค่าที่เราต้องการทราบหลังจากทำการ Solve เพื่อหาคำตอบ

ตัวอย่างการสร้างตัวแปร

```
[var-type] variable[s] vname ["text"] {, vname["text"]};
```

ตัวแปร  $X(i,j)$  เมื่อ  $i$  เป็นเซตของ  $\{A,B,C,D\}$  และ  $j$  เป็นเซตของ  $\{E,F,G\}$  โดยรูปแบบของการสร้างตัวแปรแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ Free คือ ตัวแปรสามารถเป็นได้ทั้งค่าบวกหรือค่าลบ , Positive ตัวแปรจะมีค่าเป็นบวกอย่างเดียว และ Binary ตัวแปรจะมีค่า 1 หรือ 0 เท่านั้น สำหรับชื่อ

ของตัวแปรต้องไม่เกิน 10 ตัวอักษร และคำอธิบายต้องไม่เกิน 80 ตัวอักษร ตัวอย่าง การสร้างตัวแปร แสดงดังรูปที่ 2.13

```
Variable Profit "Total profit";

Positive Variable Cost "Cost per ton";

Variables x(i,j) Shipment
          z      objective;
```

รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการสร้างตัวแปร (Variable) ในโปรแกรม

#### 2.4.4.3 การสร้างข้อมูล (Parameter)

แบ่งออกเป็น 3 คำสั่งคือ Scalar[s] และ Parameter[s] และ Table

##### ตัวอย่างการสร้างข้อมูล

โดยการนิยามแบบ Scalar เป็นการนิยามข้อมูลที่ไม่มีมิติ โดยการสร้างข้อมูลอธิบายดังนี้

```
Scalar[s] scalar_name["text"] [/signed_num/]
{,scalar_name["text"] [/signed_num/]};
```

การใส่ชื่อ ตัวอักษรต้องไม่เกิน 10 ตัว และคำอธิบายตัวอักษรต้องไม่เกิน 80 ตัว ภายในสมาชิกของเซตสามารถมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้

โดยการนิยามแบบ Parameter เป็นการนิยามข้อมูลที่มีมิติ หรือ ไม่มีมิติก็ได้ โดยการสร้างข้อมูลอธิบายดังนี้

```
Parameter[s] p_name["text"][/e[=] snum{,e[=] snum}/]
{,p_name["text"][/e[=] snum{,e[=] snum}/]};
```

การใส่ชื่อ ตัวอักษรต้องไม่เกิน 10 ตัว และคำอธิบายตัวอักษรต้องไม่เกิน 80 ตัว ภายในสมาชิกของเซตสามารถมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้

โดยการนิยามแบบ Table เป็นการนิยามข้อมูลที่มีมิติ หรือ ไม่มีมิติก็ได้ โดยการสร้างข้อมูลอธิบายดังนี้

```
Table tablename ["text"] EOL
Element {element}
Element signed_num {signed_num} EOL
{Element signed_num {signed_num} EOL};
```

ตัวอย่างการสร้างข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.14

```
Scalar T time factor /60/
Parameter x(i) safety factor/3,4,5,6/
Parameter C coefficient/0.0023/
TABLE y(i,j) cost from i to j
      1      2      3
A      3.1    3.3    3.4
B      4.4    4.5    6.7
C      3.4    4.4    6.6
```

รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการสร้างข้อมูล (Parameter) ในโปรแกรม

#### 2.4.4.4 การสร้างสมการข้อจำกัด(Equation)

ในสมการจะประกอบไปด้วย นิพจน์ซ้ายและขวา และจะมีเครื่องหมายในสมการทั้งหมด 3 ประเภท คือมากกว่าเท่ากับ น้อยกว่าเท่ากับ และเท่ากับ โดยรูปแบบการเขียนสมการ อธิบายได้ดังนี้

```
Equation[s] eqn_name["text"] {,eqn_name["text"]};
```

Eqn\_name หมายถึงชื่อของสมการโดยต้องมีตัวอักษรไม่เกิน 10 ตัวอักษร

Text หมายถึงคำอธิบายของสมการ ซึ่งต้องไม่เกิน 80 ตัวอักษร

ในส่วนที่สองของการเขียนสมการ คือการกำหนดสมการหลังจากได้ตั้งชื่อมาแล้วโดยมาลักษณะดังนี้

```
Eqn_name(domain_list).. expression epn_type expression;
```

Eqn\_name หมายถึงชื่อสมการที่เราได้นิยามไว้ก่อนหน้า

Expression แทนสูตรคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรและข้อมูลโดยเครื่องหมายการเปรียบเทียบของสมการจะประกอบด้วย =E=, =L= และ =G=

ตัวอย่างการสร้างสมการข้อจำกัดแสดงดังรูปที่ 2.15

```

EQUATION SUPPLYEQ (m)      Supply equation
            DEMANDQ (n)      Demand equation
            OBJECTIVE         The minimum cost objective function;

SUPPLYEQ (m) ..      sum (j$cost (m, j) , x (m, j) )=l=Supply (m) ;
DEMANDQ (n) ..      sum (i$cost (i, n) , x (i, n) )=e=Demand (n) ;
OBJECTIVE ..        Totalcost=e=sum ( (i, j) $cost (i, j) , cost (i, j) *x (i, j) );|

```

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการสร้างสมการข้อจำกัด (Equation)

#### 2.4.4.5 การใช้คำสั่งเพื่อหาคำตอบ (Solve)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้าย เป็นการใช้คำสั่งเพื่อหาคำตอบให้กับ ปัญหาเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยรูปแบบการใช้คำสั่งในการแก้ปัญหาอธิบายได้ดังนี้

```

MODEL[s] m_name["text"] [/all | eqn_name {, epn_name}/]
{, m_name["text"/all | eqn_name{, epn_name} /]} ;

```

m\_name เป็นชื่อของโมเดลโดยการตั้งชื่อต้องไม่เกิน 10 ตัวอักษร

text เป็นคำอธิบายโมเดลซึ่งต้องไม่เกิน 80 ตัวอักษร

eqn\_name เป็นชื่อของสมการที่จะรวบรวมไว้ในโมเดลซึ่งปกติจะใช้คำสั่ง All เพื่อให้ใช้ทุก

สมการ

ตัวอย่างการสร้างคำสั่งเพื่อหาคำตอบแสดงดังรูปที่ 2.16

```

MODEL TRANS /all/;
SOLVE TRANS USING LP MINIMIZING Totalcost;|

```

รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการใช้คำสั่งเพื่อหาคำตอบ (Solve)

## บทที่ 3

# แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่า ของตลาดเอทานอลในประเทศไทย

ในบทนี้จะกล่าวถึงปัญหาวิกฤตพลังงานของโลกและประเทศไทย ซึ่งมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่พลังงานประเภทเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) มีอยู่จำกัด และมีแนวโน้มที่จะถูกใช้หมดลงในอนาคต เนื่องจากเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป เอทานอลจึงถูกมองเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือก เพื่อช่วยลดปัญหาวิกฤตขาดแคลนพลังงานในอนาคต แต่ปัจจัยการผลิตเอทานอลซึ่งเป็นผลผลิตการเกษตรที่ใช้ในการบริโภคสำหรับคนและสัตว์ มีกำลังการผลิตอย่างจำกัดเช่นกัน ในบทนี้จึงได้นำเสนอการนำแบบจำลองคณิตศาสตร์มาใช้ในการช่วยตัดสินใจในการเลือกวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล และการเลือกจำหน่ายวัตถุดิบการเกษตรให้กับตลาดบริโภคหรือตลาดพลังงาน เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด

### 3.1 ความสำคัญของพลังงานกับการพัฒนาเศรษฐกิจ

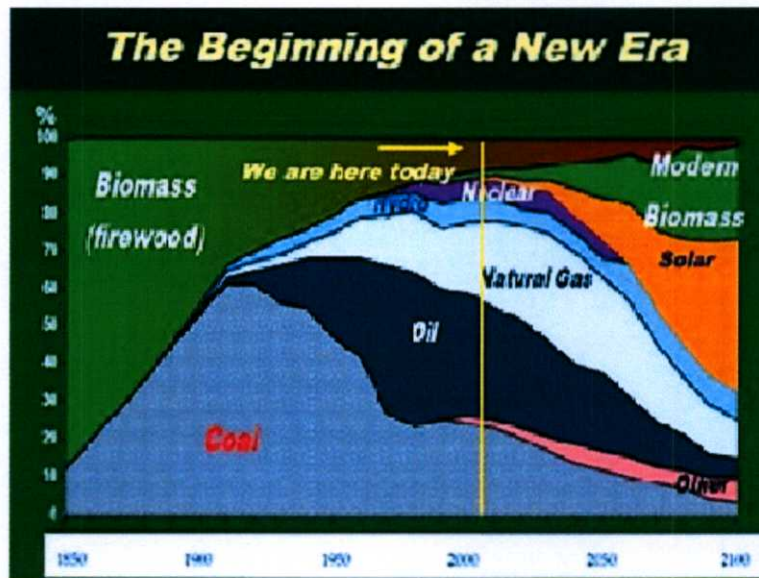
การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกอย่างมากดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุปสงค์และอุปทานในทุกด้านเพื่อการดำรงชีพ ภาคการผลิตเกิดการขยายตัวเพื่อรองรับการบริโภคและอุปโภคของประชากรให้เพียงพอ การขยายตัวของที่อยู่อาศัยและชุมชนเมืองเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับปัจจัยด้านที่พักอาศัย การคมนาคมขนส่งเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการเดินทางของประชากรระหว่างที่อยู่อาศัยกับย่านธุรกิจ และรองรับการคมนาคมของภาคการผลิตที่ต้องขนวัตถุดิบจากแหล่งผลิตเข้าโรงงานและการขนสินค้าจากแหล่งผลิตไปยังจุดจำหน่าย การเพิ่มของประชากรจึงส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเศรษฐกิจอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการเติบโตของเศรษฐกิจ เพราะการขับเคลื่อนเศรษฐกิจทุกภาคส่วนต้องใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ และยังมีแนวโน้มของการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

### 3.2 วิกฤตพลังงานโลก

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการเติบโตทางเศรษฐกิจของนานาประเทศทั่วโลก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2550 โลกมีการใช้พลังงาน 495 พันล้านล้าน BTU (British Thermal Unit , 1 Btu คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 ปอนด์) องค์กรพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) [26] คาดว่าในปี พ.ศ. 2578 โลกจะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 739 พันล้านล้าน BTU ประมาณร้อยละ 50 มาจากประเทศเศรษฐกิจเกิดใหม่ (Emerging economies) โดยเฉพาะจีน อินเดีย บราซิล และรัสเซีย

ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ราคาพลังงานสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยในรอบ 10 ปี นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 ราคาน้ำมันดิบเฉลี่ยบาเรลละ 19.44 ดอลลาร์สหรัฐฯ (สรอ.) จนถึงปี พ.ศ.2554 ราคาเฉลี่ยบาเรลละ 104.01 ดอลลาร์สหรัฐฯ หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 435 ถึงแม้จะเกิดวิกฤติเศรษฐกิจ เช่น วิกฤติต้มยำกุ้ง (ปี พ.ศ. 2540) วิกฤติเศรษฐกิจ Subprime (ปี พ.ศ. 2551) และวิกฤติหนี้สาธารณะของยุโรป รวมถึงความไม่แน่นอนของสถานการณ์ในตะวันออกกลาง เป็นต้น แต่ส่งผลต่อการชะลอตัวของราคาน้ำมันระยะหนึ่งเท่านั้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการใช้พลังงานของโลก [27]

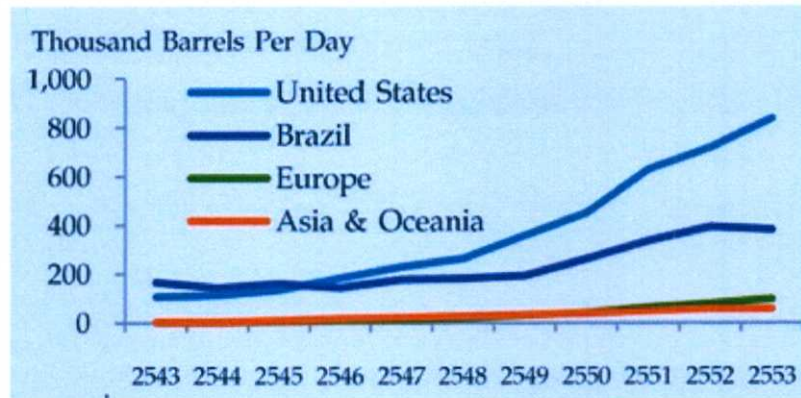
อย่างไรก็ตาม แหล่งพลังงานในปัจจุบันมีอยู่อย่างจำกัด และคาดว่าจะหมดไปภายในเวลาไม่กี่สิบปีข้างหน้า โดยเฉพาะน้ำมันจะถูกใช้หมดภายใน 42 ปี ในขณะที่ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินจะหมดภายใน 60 ปี และ 122 ปี ตามลำดับ [27] ทั้งนี้ การแสวงหาแหล่งพลังงานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจึงเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นในเวทีโลก โดยเฉพาะพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green Energy) เนื่องจากอุตสาหกรรมจากภัยสึนามิที่ญี่ปุ่นทำให้พลังงานนิวเคลียร์เริ่มมีการทบทวนถึงความปลอดภัย และหันมาให้ความสนใจพลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานชีวภาพและพลังงานชีวมวลเพิ่มขึ้น



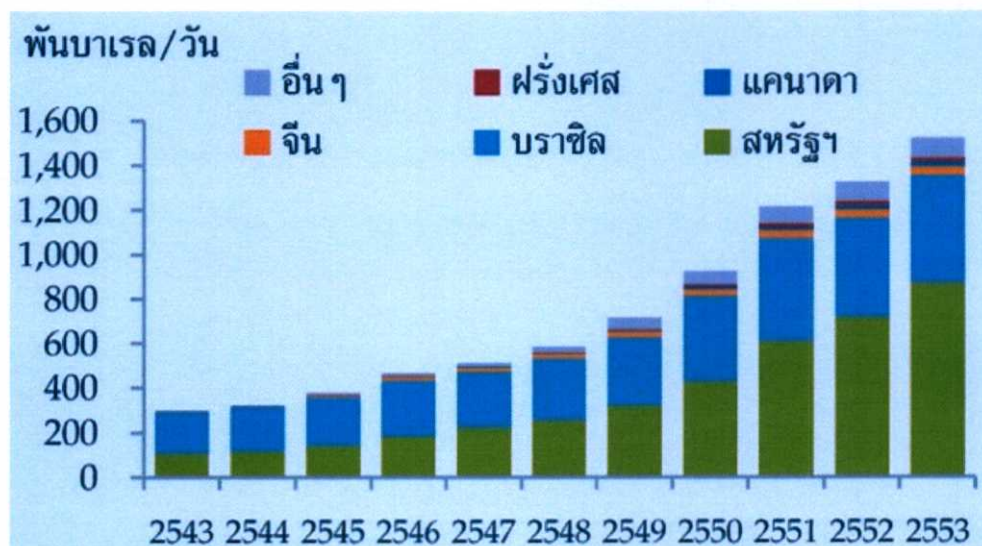
รูปที่ 3.1 แสดงพลังงานจากแหล่งต่างๆ [27]

เอทานอลเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่หลายประเทศได้ให้ความสำคัญ จากข้อมูลสำนักงานสารสนเทศด้านพลังงานของสหรัฐฯ [28] พบว่า ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543- พ.ศ. 2553 ความต้องการใช้เอทานอลเพิ่มขึ้นจาก 285.2 พันบาร์เรลต่อวัน เป็น 1,418.5 พันบาร์เรลต่อวัน หรือประมาณปีละ 82,000 ล้านลิตร หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 17.9 ต่อปี สำหรับประเทศที่ใช้เอทานอลรายใหญ่ 5 อันดับแรกของโลก (มีสัดส่วนรวมกันมากถึงร้อยละ 92.9 ของความต้องการใช้ทั่วโลก) ได้แก่ สหรัฐฯ 838.8 พันบาร์เรลต่อวัน (คิดเป็นร้อยละ 59.1 ของการใช้ทั่วโลก) บราซิล 381.9 พันบาร์เรลต่อวัน จีน 37 พันบาร์เรลต่อวัน แคนาดา 32 พันบาร์เรลต่อวัน และเยอรมัน 25 พันบาร์เรลต่อวัน สำหรับประเทศไทยเป็นผู้บริโภคอันดับ 9 ของโลกอยู่ที่ 7 พันบาร์เรลต่อวัน

ปี พ.ศ. 2553 การผลิตเอทานอลทั่วโลกมีปริมาณ 1,520 พันบาร์เรลต่อวัน หรือประมาณ 88,000 ล้านลิตรต่อปี โดยผู้ผลิตเอทานอลรายใหญ่ 5 อันดับแรกของโลก ได้แก่ สหรัฐฯ 867.4 พันบาร์เรลต่อวัน (คิดเป็นร้อยละ 50 ของการผลิตทั่วโลก) บราซิล 486 พันบาร์เรลต่อวัน จีน 37 พันบาร์เรลต่อวัน แคนาดา 24 พันบาร์เรลต่อวัน และฝรั่งเศส 18 พันบาร์เรลต่อวัน สำหรับประเทศไทยเป็นผู้ผลิตอันดับ 8 ของโลกอยู่ที่ 7.5 พันบาร์เรลต่อวัน



รูปที่ 3.2 การใช้เอทานอลของโลก [28]



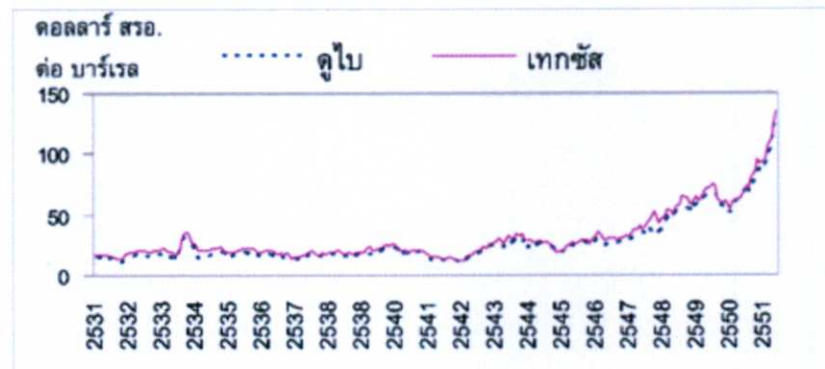
รูปที่ 3.3 ผู้ผลิตเอทานอลรายใหญ่ของโลก [28]

### 3.3 เอทานอล พลังงานทดแทน

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่พึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศเป็นหลัก และเป็นสินค้าที่มีมูลค่านำเข้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการนำเข้าสินค้าหมวดอื่น ๆ ในปี พ.ศ. 2549 การนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและหล่อลื่นมีมูลค่าสูงถึง 961,384 ล้านบาท หรือคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 20 ของมูลค่าการนำเข้าทั้งหมด ดังนั้นราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องย่อมมีผลกระทบต่อประเทศไทย [29]

เมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา หรือในช่วงสิ้นปี พ.ศ. 2531 ราคาน้ำมันดิบดูไบอยู่ที่ประมาณบาร์เรลละ 13 ดอลลาร์สหรัฐ. ถึงแม้ว่าในบางช่วงจะมีราคาสูงถึงบาร์เรลละ 30 ดอลลาร์สหรัฐ. ในปี พ.ศ. 2533 แต่ก็เป็นภาวะชั่วคราวเนื่องจากผลของวิกฤตการณ์อ่าวเปอร์เซีย แต่ภายหลังจากนั้นราคาน้ำมันดิบดูไบก็กลับมาอยู่ที่ระดับบาร์เรลละ 14 - 21 ดอลลาร์สหรัฐ. ตลอดระยะเวลา 8 ปี (พ.ศ.2534 - พ.ศ.2541) และนับจากปี พ.ศ.2542 เป็นต้นมาราคาน้ำมันดิบก็เริ่มมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเริ่มเห็น

ชัดเจนในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งเป็นปีแรกที่ราคาน้ำมันดิบดูไบแตะระดับบาร์เรลละ 34.2 ดอลลาร์ สรอ. ซึ่งสูงที่สุดนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยสิ้นปี 2548 อยู่ที่บาร์เรลละ 53.2 ดอลลาร์ สรอ ปี พ.ศ. 2549 อยู่ที่บาร์เรลละ 56.7 ดอลลาร์ สรอ. ปี พ.ศ. 2550 อยู่ที่บาร์เรลละ 85.6 ดอลลาร์ สรอ. และเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2551 ราคาสูงขึ้นถึงบาร์เรลละ 127.8 ดอลลาร์ สรอ. ถึงแม้ว่าปัจจุบัน (26 เมย. 2559) ราคาจะอยู่ที่บาร์เรลละ 40.63 ดอลลาร์ สรอ. [30] ซึ่งเป็นที่คาดการณ์ว่าเป็นการผันผวนของราคาน้ำมันที่ลดลงในระยะสั้นๆ ที่เป็นผลมาจากปัจจัยทางการเมืองระหว่างประเทศ ในภูมิภาคตะวันออกกลาง และรัฐเซีย



รูปที่ 3.4 ราคาน้ำมันดิบตลาดดูไบ และ ตลาดเทกซัสตะวันตก [29]

น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะในภาคการคมนาคมขนส่งที่มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณสูง โดยคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 37.1 ในขณะที่สัดส่วนการใช้พลังงานในสาขาอุตสาหกรรมเท่ากับร้อยละ 36.6 สาขาบ้านอยู่อาศัยและธุรกิจการค้า ร้อยละ 5.6 และภาคเกษตรกรรมร้อยละ 5.6 [31] จากสถานการณ์พลังงานของประเทศที่มีอุปสงค์สูงและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่มีอุปทานที่ต้องพึ่งพาแหล่งน้ำมันดิบนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูงส่งผลทำให้เกิดวิกฤตด้านพลังงานของประเทศ รัฐบาลจึงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน ที่จะต้องพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นที่สามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้กับประเทศไทยมีหลายแหล่ง เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานลม เป็นต้น แต่แหล่งพลังงานหลาย ๆ แหล่ง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม มีข้อจำกัดที่ต้องนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง การพัฒนาแหล่งพลังงานดังกล่าวจึงทำได้ยาก แม้ประเทศไทยจะมีความได้เปรียบมากที่จะนำแหล่งพลังงานดังกล่าวมาใช้ แหล่งพลังงานที่เหมาะสมกับประเทศไทยในขณะนี้จึงเป็นพลังงานชีวมวล (Bioenergy) เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีแหล่งชีวมวลจากภาคการเกษตรมากมาย เช่น มันสำปะหลัง อ้อย แกลบ ชานอ้อย ฯลฯ จึงมีความได้เปรียบทางวัตถุดิบ ปัจจุบันหลายฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชน ต่างให้ความสนใจกับการพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวล เช่น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ไบโเอทานอล (Bioethanol) และไบโอดีเซล (Biodiesel) [31]

สำหรับกรณีประเทศไทย เอทานอลก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเริ่มมีการผลิตและใช้เอทานอลผสมกับน้ำมันเบนซินหรือที่เรียกว่าน้ำมันแก๊สโซฮอล์นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ นโยบายด้านพลังงานของประเทศไทยก็ให้การสนับสนุนให้มีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์เพื่อมุ่งลดภาระการพึ่งพิงน้ำมันเชื้อเพลิงจากการนำเข้า

น้ำมันดิบ และเพื่อให้เกิดความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ

ความเป็นมาของน้ำมันแก๊สโซฮอล์ในประเทศไทยเกิดขึ้นจากแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เมื่อปี พ.ศ. 2528 ที่ทรงเล็งเห็นว่าประเทศไทยอาจประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำมันและปัญหาพิษผลทางการเกษตรมีราคาตกต่ำจึงทรงมีพระราชดำริให้โครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดาศึกษาการนำอ้อยที่ผลิตได้มาแปรรูปเป็นเอทานอล โครงการส่วนพระองค์ได้ดำเนินการศึกษาทดลองปรับปรุงคุณภาพการนำเอาเอทานอลที่ผลิตได้ไปผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อผลิตเป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ใช้เติมรถยนต์ โดยนำเอาเอทานอลที่กลั่นได้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 (โดยปริมาตร) ไปกลั่นซ้ำจนเป็นเอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 (โดยปริมาตร) และนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตราเอทานอล 1 ส่วนน้ำมันเบนซิน 9 ส่วน [27]

ในปี พ.ศ. 2543 โครงการทดสอบน้ำมันแก๊สโซฮอล์เริ่มมีความชัดเจนขึ้น เมื่อ ปตท.ดำเนินการทดสอบการใช้แก๊สโซฮอล์ในรถยนต์ พบว่า ช่วยลดมลพิษ ประหยัดน้ำมัน และไม่มีผลต่อสมรรถนะ และได้มีการผลิตเอทานอลจากหัวมันสด โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และส่งให้โรงกลั่นของบางจากผลิตเป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์โดยทดลองจำหน่ายเมื่อปี พ.ศ. 2544 ในสถานีบริการน้ำมันของบางจาก 5 แห่งในเขตกรุงเทพฯ โดยมีราคาจำหน่ายต่ำกว่าน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วออกเทน 95 เล็กน้อย

### 3.3.1 ประเภทของน้ำมันแก๊สโซฮอล์

แก๊สโซฮอล์ (Gasohol) เป็นชื่อเรียกของน้ำมันเบนซิน (Gasoline) [31] ไร้สารตะกั่วที่ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือเอทานอล (Ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 เมื่อสัดส่วนของน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วต่อเอทานอลเท่ากับ 90:10 จะเรียกส่วนผสมของแก๊สโซฮอล์นี้ว่า E10 การใช้ไม่เกินร้อยละ 10 นั้นไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ก่อนใช้แก๊สโซฮอล์ เอทานอลที่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งค่าออกซิเจน (Oxygenates) และค่าออกเทน (Octane) ของน้ำมันเบนซิน ซึ่งแต่ก่อนจะใช้สาร MTBE หรือ Methyl Tertiary Butyl Ether เป็นสารเติมแต่งค่าออกซิเจน และค่าออกเทน เอทานอลในแก๊สโซฮอล์นอกจากจะเป็นสารเพิ่มค่าออกเทนแล้ว ยังมีประโยชน์อื่น ๆ อีก กล่าวคือโมเลกุลของเอทานอลไม่มีสารประกอบซัลเฟอร์เบนซิน หรือสารประกอบอะโรมาติกส์ (Aromatics) หรือโอเลฟินส์ (Olefins) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สร้างมลพิษทางอากาศและมีผลต่อสุขภาพ ดังนั้นการใช้เอทานอลจึงมีส่วนช่วยลดปัญหามลภาวะที่เกิดขึ้นได้

ปัจจุบันน้ำมันแก๊สโซฮอล์มีส่วนผสมของเอทานอลตั้งแต่ร้อยละ 3 ร้อยละ 5 ร้อยละ 20 ร้อยละ 25 ร้อยละ 85 และการใช้เอทานอลเพียงอย่างเดียว หรือ E100 ซึ่งบราซิลเป็นประเทศเดียวที่ใช้ E100 เป็นพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์สำหรับในปัจจุบัน น้ำมันแก๊สโซฮอล์ในประเทศไทยมี

ส่วนผสมของเอทานอลร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และ ร้อยละ 85 แบ่งออกเป็น

- น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 ออกเทน 91 หรือที่เรียกกัน โดยทั่วไปว่า แก๊สโซฮอล์ 91 คือ ส่วนผสมของน้ำมันเบนซินกับ เอทานอลในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยปริมาตร
- น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E10 ออกเทน 95 หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า แก๊สโซฮอล์ 95 คือ ส่วนผสมของน้ำมันเบนซินกับเอทานอลในอัตราส่วน 90 ต่อ 10 โดยปริมาตร
- น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E20 หรือแก๊สโซฮอล์ E20 คือ ส่วนผสมของน้ำมันเบนซินกับเอทานอลในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยปริมาตร
- น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 หรือแก๊สโซฮอล์ E85 คือ ส่วนผสมของน้ำมันเบนซินกับเอทานอลใน

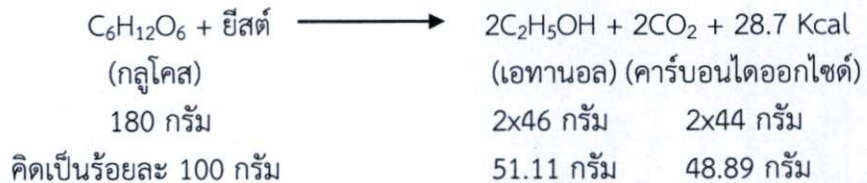
อัตราส่วน 15 ต่อ 85 โดยปริมาตร

จากความจำเป็นในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่หมุนเวียน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล เพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในรูปแบบของแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทยขยายตัวอย่างมาก

### 3.3.2 การผลิตเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือที่เรียกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือเกรนแอลกอฮอล์ (Grain alcohol) หรือแอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี จุดติดไฟ และระเหยง่าย มีสูตรทางเคมีคือ  $C_2H_5OH$  สามารถละลายได้ในน้ำและสารละลายอื่นๆ มีจุดเดือด 78.32 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็ง - 243.1 องศาเซลเซียส เอทานอลสามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis) และการหมักโดยจุลินทรีย์ (Yeast Fermentation) ปัจจุบันเอทานอลที่ผลิตส่วนใหญ่จะได้จากกระบวนการทางชีวภาพที่หมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ เอทานอลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีมีปริมาณน้อยมาก โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ทั้งหมดในโลก[31]

สำหรับการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมัก จะอาศัยกระบวนการทำงานของเชื้อยีสต์ โดยเชื้อยีสต์นั้นจะใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์นั้น น้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะถูกเปลี่ยนเป็นเอทานอล 51.11 กรัม และคาร์บอนไดออกไซด์ 48.89 กรัม นอกจากนั้นยังมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีก 28.7 กิโลแคลอรี (Kcal) ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



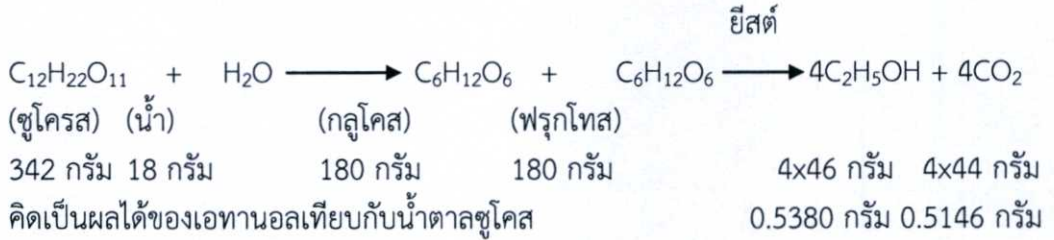
รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์ [31]

ดังนั้นวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถนำมาใช้ในการหมักเอทานอล โดยวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย และกากน้ำตาล วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และอื่นๆ และประเภทสุดท้ายคือวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ที่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และซังข้าวโพด เป็นต้น

#### การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล

วัตถุดิบประเภทน้ำตาลที่ใช้การผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล และบิทน้ำตาล ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส ที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส ในการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส

นั้นมีขั้นตอนดังนี้ คือ ขั้นแรกน้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้น้ำตาลกลูโคส และฟรุกโทสอย่างละโมเลกุล จากนั้นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสจะถูกยีสต์เปลี่ยนไปเป็นเอทานอล และคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 4 โมเลกุล



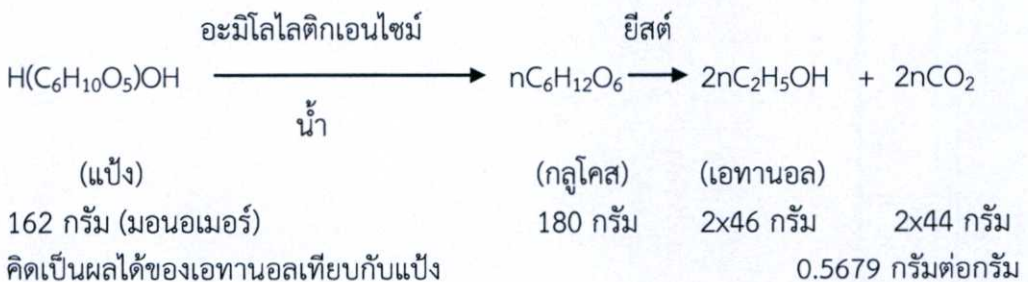
รูปที่ 3.6 การหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส

#### การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง

วัตถุดิบประเภทแป้งที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ มันสำปะหลัง (ทั้งหัวมันสด และมันเส้น) ข้าวโพด ข้าว และเมล็ดข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการย่อย (Hydrolysis) ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลได้ โดยปัจจุบันจะนิยมย่อยแป้งด้วยเอนไซม์มากกว่ากรด เนื่องจากสามารถควบคุมการย่อยได้ง่ายกว่าและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีความบริสุทธิ์มากกว่า การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์จะประกอบด้วยการย่อย 2 ครั้ง คือ

- การย่อยแป้งครั้งแรกหรือการทำให้แป้งเหลว (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส ( $\alpha$ -amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเด็กทรีนซ์ (Dextrin)

- การย่อยแป้งครั้งสุดท้ายหรือการเปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Saccharification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะมิเลส (Glucoamylase) ย่อยเด็กทรีนซ์ที่อุณหภูมิ 55-65 องศาเซลเซียส ให้ได้น้ำตาลกลูโคส ซึ่งยีสต์สามารถใช้หมักเป็นเอทานอลได้ โดยกระบวนการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



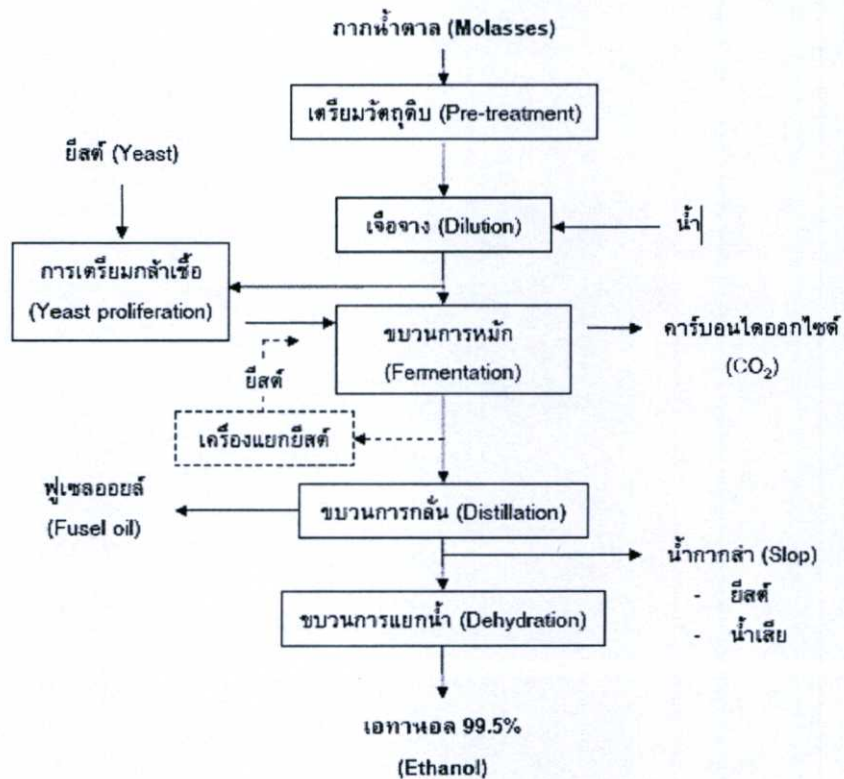
รูปที่ 3.7 การหมักเอทานอลจากแป้ง

#### การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส

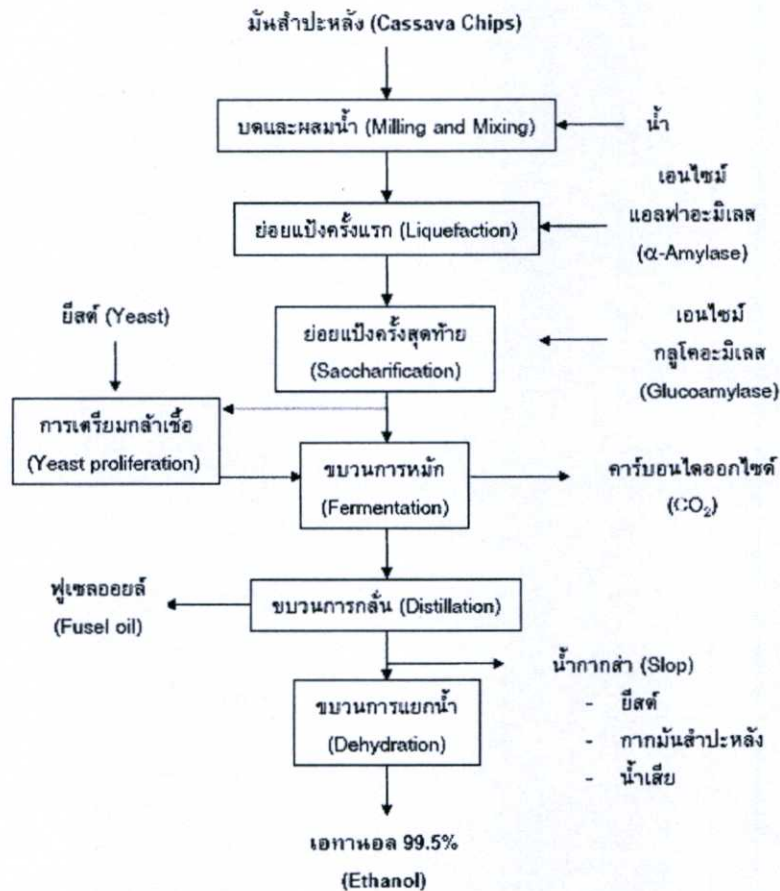
วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด และเศษไม้ เป็นต้น

วัตถุดิบประเภทนี้มีองค์ประกอบที่เป็น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวและอยู่ในรูปผลึกมี ลักษณะเป็นเส้นใยเหนียว และไม่ละลายน้ำ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโทส(Pentose) หลายชนิด เช่นไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) และอะราบินโนส (Arabinose) เป็นต้น ส่วน ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของฟีนิลโพรเพน (Phenyl propane) ซึ่งทนต่อการย่อยสลายอย่างมาก

ขั้นตอนในการผลิตเอทานอล โดยทั่วไปจะประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation) การหมัก (Fermentation) การกลั่น (Distillation) และการกำจัดน้ำ (Dehydration) ซึ่งในกรณีที่วัตถุดิบเป็นแป้งหรือวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส จะต้องมีขั้นตอนการย่อยเพื่อ เปลี่ยนเป็นน้ำตาลก่อนการหมัก (Hydrolysis) แผนภาพการผลิตเอทานอลโดยใช้กากน้ำตาลและมัน สำปะหลังเป็นวัตถุดิบแสดงดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล [31]



รูปที่ 3.9 กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง [31]

### 3.3.3 สถานการณ์เอทานอลในไทย

เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีความสำคัญ เชื้อเพลิงเอทานอลถูกใช้ในหลายประเทศทั่วโลก และเป็นที่นิยมมากในประเทศไทยเช่นกัน กระทรวงพลังงาน ประเทศไทย มีแผนกลยุทธ์ที่จะเพิ่มการใช้เอทานอล 25% ภายใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2564) [27] ในประเทศไทย เอทานอลคือพลังงานทางเลือกที่ผลิตทดแทนได้จากผลิตผลการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง และ กากน้ำตาล (ผลพลอยได้จากขบวนการผลิตน้ำตาล) โดยใน พ.ศ. 2555 มีเอทานอลที่ผลิตจากกากน้ำตาลประมาณ 100.6 ล้านแกลลอน (MGs) (คิดเป็น 73.3% ของการผลิตทั้งหมด) ผลิตจากอ้อย ประมาณ 9.77 MGs (คิดเป็น 7% ของการผลิตทั้งหมด) และ ผลิตจากมันสำปะหลังประมาณ 27.2 MGs [32]

การบริโภคแก๊สโซฮอล์เพิ่มขึ้นในภาคการขนส่งเนื่องจากปัจจัยอุปสงค์และอุปทาน อุปสงค์พลังงานในภาคการขนส่งมาจากรถยนต์ส่วนตัวเป็นหลัก และอุปทานของแก๊สโซฮอล์หลักๆ มาจากทั้งเชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงเอทานอล ประเทศไทยไม่ได้เป็นประเทศที่ผลิตปิโตรเลียม ดังนั้นรัฐบาลไทยจึงได้ผลักดันนโยบายจำนวนมากเพื่อเพิ่มการผลิตอ้อยและมันสำปะหลังเพื่อนำมาผลิตเอทานอล อย่างไรก็ตาม อ้อยและมันสำปะหลังก็เป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ตัวอย่างเช่น อ้อยถูกใช้ในการผลิตน้ำตาล (ประเทศไทยเป็นประเทศส่งออกน้ำตาลอันดับสองของโลก) มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแป้ง และ กากน้ำตาลถูกใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ ในปี พ.ศ. 2555 ผลผลิตอ้อยทั้งหมดประมาณ 80.9 ล้านตัน (MTs) ผลผลิตมันสำปะหลังประมาณ 20.7 ล้านตัน และ ผลผลิตกากน้ำตาล ประมาณ 4,711 ล้านลิตร [27]

ในปี พ.ศ. 2555 [33] ปริมาณการผลิตกากน้ำตาลมี 4.4 ล้านตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.8 จากปีก่อน เนื่องจากผลผลิตอ้อยต่อไร่ที่เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 2.9 ส่งผลให้ผลผลิตโดยรวมเพิ่มขึ้น ถึงแม้พื้นที่ปลูกจะลดลงจากปีก่อนก็ตาม ทั้งนี้ เมื่อนำกากน้ำตาลมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นภายในประเทศ 1.4 ล้านตันและส่งออก 1.0 ล้านตันแล้ว คงเหลือกากน้ำตาลเพื่อใช้ผลิตเอทานอลเพียง 2.0 ล้านตัน สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 480 ล้านลิตรเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ยังคงมีปริมาณกากน้ำตาลคงเหลือจากปี พ.ศ. 2554 จึงทำให้มีวัตถุดิบเพียงพอต่อการผลิตเอทานอล แต่ในระยะต่อไป กากน้ำตาลที่นำไปผลิตเอทานอลอาจถึงตัวและส่งผลกระทบต่อการผลิตเอทานอล

### ตารางที่ 3.1 พื้นที่เพาะปลูก ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของอ้อยโรงงาน

ปี พ.ศ.	พื้นที่ เพาะปลูก (พันไร่)	ผลผลิต (พันตัน)	ผลผลิต/ไร่ (กิโลกรัม)	ปริมาณกาก น้ำตาล (พันตัน)
2551	6,600.5	73,308.3	11,218	2,999.2
2552	6,576.9	66,463.3	10,910	3,278.3
2553	8,159.4	68,485.3	12,197	2,977.6
2554	8,307.7	95,358.9	12,288	4,235.0
2555	8,101.5	97,979.7	12,640	4,389.6

ที่มา : สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (สอน.) และสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

ผลผลิตมันสำปะหลังปี 2555 [33] มีปริมาณ 26.6 ล้านตัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 21.5 จากปีก่อน เนื่องจากพื้นที่เก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีผลผลิตถึง 14.5 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 54.5 ของผลผลิตมันสำปะหลังทั่วประเทศ ขณะที่ผลผลิตต่อไร่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมีผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่เท่ากับ 3,431 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.1 จากปีก่อน เนื่องจากปริมาณฝนที่ตกค่อนข้างต่อเนื่องตลอด

มันสำปะหลัง และ อ้อยมีอัตราส่วนการแปรสภาพ ดังต่อไปนี้ [29] [34]

- เอทานอล 1 ลิตร ใช้หัวมันสำปะหลัง 5.6 กิโลกรัม หรือใช้กากน้ำตาล 3.8 กิโลกรัม
- แป้งมัน 1 กิโลกรัม ใช้หัวมันสำปะหลัง 4 กิโลกรัม
- มันเส้น 1 กิโลกรัม ใช้หัวมันสำปะหลัง 2 กิโลกรัม
- มันอัดเม็ด 1 กิโลกรัม ใช้หัวมันสำปะหลัง 2 กิโลกรัม
- กากน้ำตาล 50 กิโลกรัม ใช้อ้อย 1 ตัน
- กากน้ำตาล 1 ตัน ผลิตเอทานอลได้ 260 ลิตร
- อ้อย 1 ตัน ผลิตเอทานอลได้ 70 ลิตร
- หัวมันสำปะหลังสด 1 ตัน ผลิตเอทานอลได้ 180 ลิตร

ตารางที่ 3.2 พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของมันสำปะหลัง

ปี พ.ศ.	พื้นที่เก็บเกี่ยว (พันไร่)	ผลผลิต (พันตัน)	ผลผลิต/ไร่ (กิโลกรัม)
2551	7,397.1	25,565.6	3,456
2552	8,292.1	30,088.0	3,628
2553	7,405.2	22,005.7	2,972
2554	7,096.2	21,912.4	3,088
2555	7,911.3	26,601.1	3,431

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

ส่วนต้นทุนการผลิตเอทานอลของไทยที่ผลิตจากกากน้ำตาลเฉลี่ยประมาณลิตรละ 19.0 บาท (คำนวณที่ราคากากน้ำตาลเฉลี่ยกิโลกรัมละ 2.53 บาท) ลดลงจากปีก่อนร้อยละ 20.7 และจากมันสำปะหลังเฉลี่ยลิตรละ 20.58 บาท (คำนวณที่ราคาหัวมันสำปะหลังเฉลี่ยกิโลกรัมละ 2.02 บาท) ลดลงจากปีก่อนร้อยละ 9.3 ตามราคาหัวมันสำปะหลังที่ลดลง เนื่องจากจีนชะลอการนำเข้ามันสำปะหลังจากไทย โดยหันไปนำเข้ามันสำปะหลังที่สะอาดจากเวียดนามและกัมพูชา [29]

ตารางที่ 3.3 แสดงต้นทุนการผลิตเอทานอล (ลิตร)

ประเทศ	ต้นทุนเฉลี่ย ปี 2555	ราคาตลาดเฉลี่ย ปี 2555
<b>ไทย (บาท)</b>		19.50 - 20.25
กากน้ำตาล	19.0	
มันสำปะหลัง	20.18	
<b>สหรัฐฯ (ดอลลาร์สหรัฐฯ)</b>	0.62	0.67
<b>บราซิล (ดอลลาร์สหรัฐฯ)</b>	0.44	0.64

ที่มา : สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, United State Department of Energy และ Centro De Estudos Avancados Em Economia Aplicada และคำนวณ

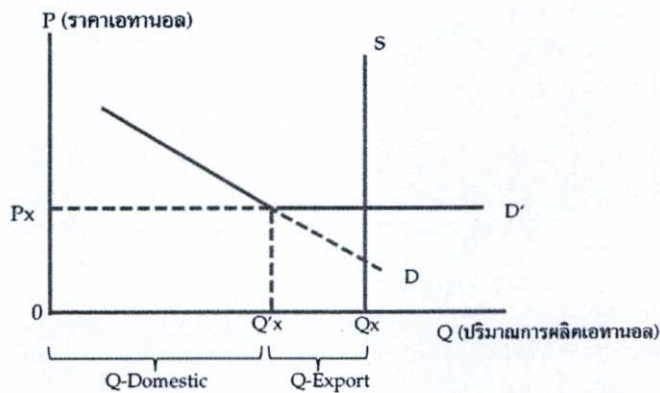
ดังที่ได้กล่าวเอาไว้แล้ว เราสามารถแบ่งการผลิตอ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาลได้เป็น 2 กลุ่มผู้ผลิตคือ ผู้ผลิตเพื่อผลิตพลังงาน และ ผู้ผลิตเพื่อเป็นอาหาร เฉพาะฉะนั้นไม่เพียงราคาของการเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตอาหารที่ดึงดูดผู้ปลูก อ้อย มันสำปะหลัง และ ผู้ผลิตน้ำตาล แต่ราคาของเชื้อเพลิงเอทานอล ก็เป็นอีกผลตอบแทนหนึ่งสำหรับผู้ผลิตเกษตรกรเหล่านี้ วิทยาลัยพจนานุกรมแนะนำเสนอและวิเคราะห์แบบจำลองสมดุลของตลาดการแข่งขัน ซึ่งสามารถนำประยุกต์ใช้กับตลาดเอทานอลได้สามารถนำไปใช้เพื่อช่วยให้ผู้ปลูกอ้อย มันสำปะหลัง และ ผู้ผลิตน้ำตาล (กากน้ำตาล) หรือ ผู้ตัดสินใจ

ตัดสินใจขายผลผลิตเหล่านี้เพื่อผลิตพลังงานหรือเพื่อผลิตอาหาร

### 3.3.4 อุปสงค์และอุปทานเอทานอลของประเทศไทย

ปัจจุบัน ปริมาณการผลิตเอทานอลมีจำนวนคงที่ตามกำลังการผลิตและจำนวนโรงงาน ทำให้เส้นอุปทานของเอทานอลมีลักษณะตั้งฉากกับแกนนอน ในขณะที่เส้นอุปสงค์มีความชันเป็นลบ และได้รับอิทธิพลจากตลาดต่างประเทศ ประกอบกับความต้องการใช้เอทานอลภายในประเทศต่ำกว่าปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ทำให้มีเอทานอลส่วนเกินสำหรับการส่งออก

จากกราฟรูปที่ 3.10 เส้น S แสดงอุปทานของเอทานอลซึ่งมีกำลังการผลิตคงที่ โดยมีปริมาณการผลิตที่  $Q_x$  ขณะที่เส้น D แสดงอุปสงค์ของเอทานอล ซึ่ง ณ ระดับราคา  $P_x$  เส้นอุปสงค์จะเลื่อนไป  $D'$  โดยปริมาณความต้องการ  $Q'_x$  ซึ่งยังต่ำกว่าปริมาณการผลิต โดย  $Q_x - Q'_x$  คือปริมาณการส่งออก



รูปที่ 3.10 อุปสงค์และอุปทานเอทานอล

### 3.3.5 อุปสงค์และอุปทานเอทานอลของตลาดแข่งขันสมบูรณ์

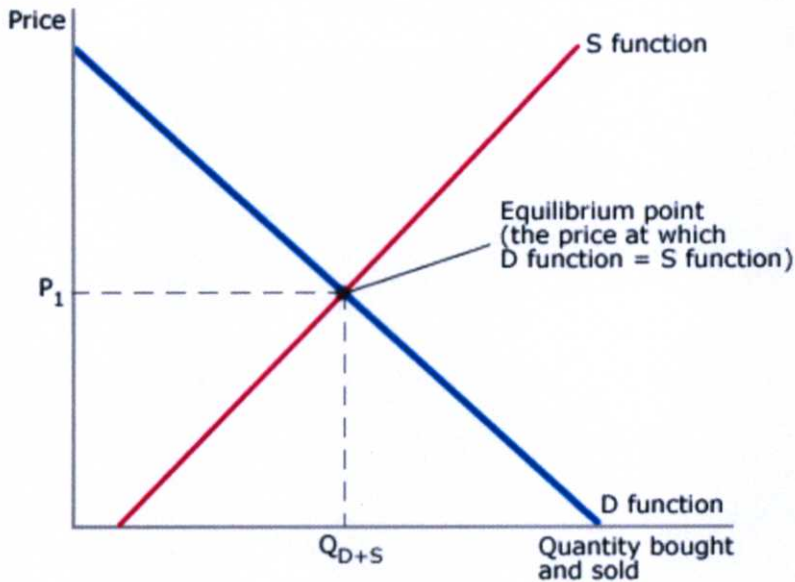
รูปที่ 3.11 แสดง กราฟอุปสงค์ อุปทานเอทานอลของตลาดแข่งขันสมบูรณ์ เกษตรกรผู้ผลิต อ้อย และมันสำปะหลัง ต่างก็มีการตอบสนองการผลิตตามระดับราคาของเอทานอลเช่นกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์ของราคา และ ปริมาณการผลิต โดยมีความสัมพันธ์ของ ราคาเอทานอล ( $\pi_E$ ) และ ปริมาณเอทานอลที่ผลิตจาก อ้อย ( $q_{ES}$ ) และ มันสำปะหลัง ( $q_{EC}$ ) เป็นไปดังสมการ (3.1)

$$\pi_E = a - b(q_{ES} + q_{EC}) \quad (3.1)$$

โดย

$b$  = ความชันของกราฟ

$a$  = จุดตัดแกนราคาเอทานอลที่ปริมาณความต้องการเอทานอลเท่ากับ 0



รูปที่ 3.11 อุปสงค์และอุปทานเอทานอลตลาดแข่งขันสมบูรณ์

เมื่อนำข้อมูลราคาและปริมาณเอทานอลในตารางที่ 3.4 มาพล็อตกราฟ จะได้กราฟดังรูปที่ 3.12 เมื่อทำการลากเส้นแนวโน้มระหว่างจุดข้อมูลเหล่านี้ แล้วทำการคำนวณหาสมการของเส้นแนวโน้ม ที่เป็นเส้นตรงนี้ จะได้ค่า สัมประสิทธิ์ความชัน และ จุดตัดของกราฟ ดังนี้

$$a = 39.937$$

$$b = -0.00001$$

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลราคาและปริมาณเอทานอล  
พ.ศ. 2553-2555[27]

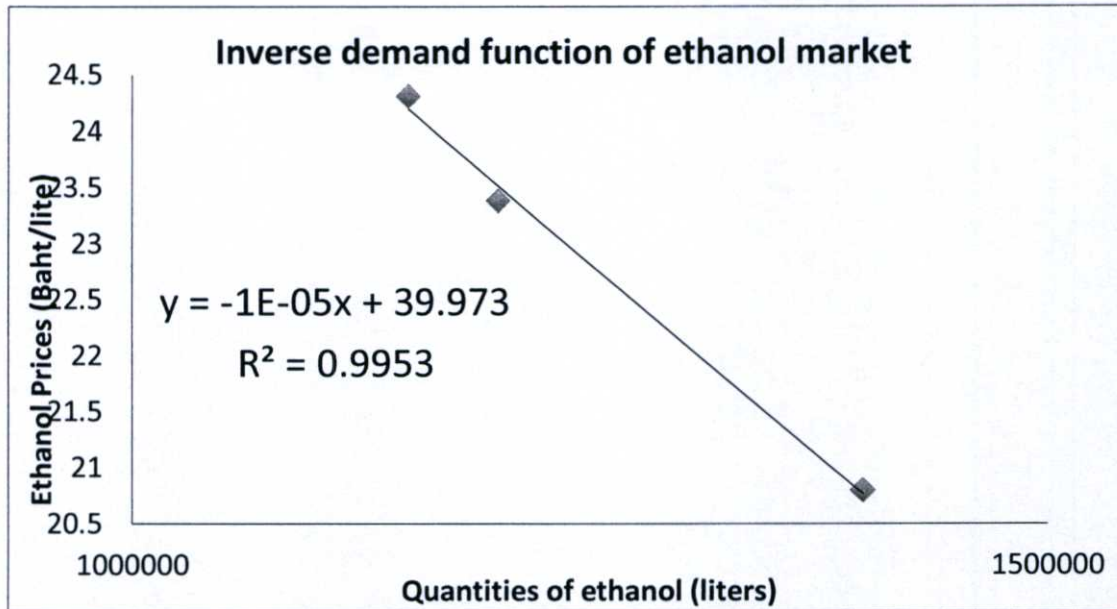
ปี พ.ศ.	Prices (บาท)	Quantities (ลิตร)
2553	23.38	1,200,000
2554	24.31	1,150,000
2555	20.8	1,400,000

### 3.4 การสร้างแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับตลาดเอทานอล

เนื้อหาจากนี้ เราจะอธิบายผู้ผลิตที่เกี่ยวข้องทั้งหมด รวมทั้ง ผู้ปลูกอ้อย ผู้ปลูกมันสำปะหลัง และ ผู้ผลิตกากน้ำตาล และบรรยายรายละเอียดของตลาดเอทานอล รวมทั้งนำเสนอตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เงื่อนไข และ ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด

แบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับตลาดเอทานอล ที่สร้างขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อใช้ช่วยในการวิเคราะห์ตัดสินใจเลือกวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลจาก อ้อย มันสำปะหลัง และ

กากน้ำตาล เพื่อให้ได้ต้นทุนในการผลิตเอทานอลถูกที่สุด และเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปริมาณ สัดส่วนของวัตถุดิบทั้ง 3 ว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตเอทานอลอย่างไร ผู้ผลิตเอทานอล และ รัฐบาล หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเอทานอล สามารถใช้แบบจำลองนี้ในการวิเคราะห์ตัดสินใจการ เลือกวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.12 กราฟข้อมูลราคาและปริมาณเอทานอล พ.ศ. 2553-2555

#### 3.4.1 นิยามพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอทานอล

เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์หาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับตลาดเอทานอล ได้ นิยามตัวแปรและพารามิเตอร์ ไว้ดังตารางที่ 3.5

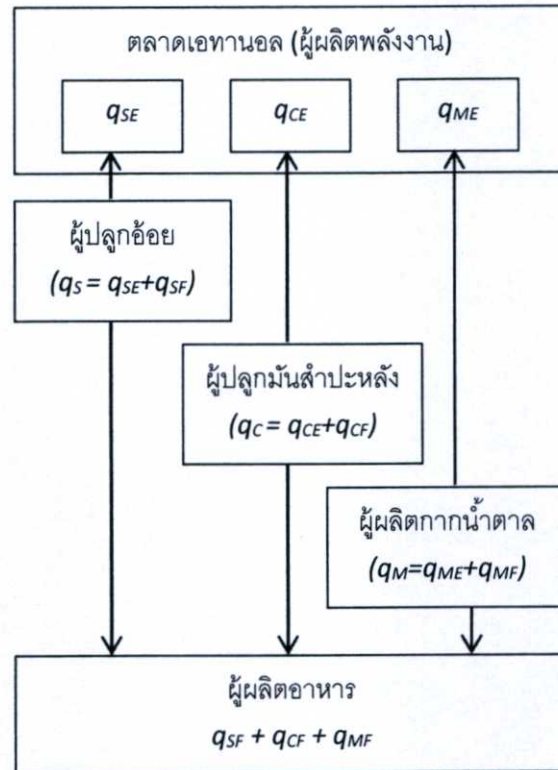
#### 3.4.2 ผู้ผลิตที่เกี่ยวข้อง และ ตลาดของเอทานอล

ผู้ผลิตที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองสมดุลของตลาดเอทานอล ประกอบด้วย ผู้ปลูกอ้อย ผู้ปลูกมันสำปะหลัง และ ผู้ผลิตกากน้ำตาล สามผู้ผลิตนี้ สามารถตัดสินใจในการขายอ้อย (qS) มันสำปะหลัง (qC) และ กากน้ำตาล (qM) ไม่ว่าจะขายให้กับ ผู้ผลิตพลังงาน (qSE, qCE, qME) หรือ ขายให้กับ ผู้ผลิตอาหาร (qSF, qCF, qMF) ตามลำดับ ผู้ปลูกสามารถตัดสินใจที่จะขายผลผลิตทั้งหมดให้กับ ผู้ผลิตพลังงาน หรือ ขายผลผลิตบางส่วน หรือ ไม่ขายผลผลิตเลย ทั้งนี้ขึ้นกับอุปสงค์ของตลาดเอทานอล รูปที่ 3.13 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของอ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล กับ ตลาดเอทานอล

#### 3.4.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองสมดุลนี้ คือ เพื่อการหากำไร(รายรับ - รายจ่าย) สูงสุดของผู้ผลิตพลังงาน ผู้เล่น 3 ฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย ผู้ผลิตซึ่งผลิตเอทานอลจากอ้อย (แทนด้วยสมการ (3.2) และ (3.3)) ผู้ผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (แทนด้วยสมการ (3.4) และ (3.5)) และ

ผู้ผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล (แทนด้วยสมการ (3.6) และ (3.7)) ข้อจำกัดในความสามารถการผลิต แทนด้วยปริมาณสูงสุดของอ้อย มันสำปะหลัง และ กากน้ำตาล ที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล [34]



รูปที่ 3.13 การตัดสินใจเลือกขายผลผลิตของผู้ปลูกอ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล โดยเลือกขายให้กับตลาดพลังงานหรือตลาดอาหาร

ตารางที่ 3.5 นิยามตัวแปรและพารามิเตอร์ของแบบจำลองเอทานอล

ตัวแปรและพารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
qS	ปริมาณผลผลิตอ้อยที่ผลิตได้ต่อปี	ตัน
qC	ปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังที่ผลิตได้ต่อปี	ตัน
qM	ปริมาณผลผลิตกากน้ำตาลที่ผลิตได้ต่อปี	ตัน
qSE	ปริมาณผลผลิตอ้อยที่ขายให้กับผู้ผลิตเอทานอลต่อปี	ตัน
qCE	ปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังที่ขายให้กับผู้ผลิตเอทานอลต่อปี	ตัน
qME	ปริมาณผลผลิตกากน้ำตาลที่ขายให้กับผู้ผลิตเอทานอลต่อปี	ตัน
qSF	ปริมาณผลผลิตอ้อยที่ขายให้กับผู้ผลิตอาหารต่อปี	ตัน
qCF	ปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังที่ขายให้กับผู้ผลิตอาหารต่อปี	ตัน
qMF	ปริมาณผลผลิตกากน้ำตาลที่ขายให้กับผู้ผลิตอาหารต่อปี	ตัน
qES	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตจากอ้อยต่อปี	แกลลอน
qEC	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตจากมันสำปะหลังต่อปี	แกลลอน
qEM	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตจากกากน้ำตาลต่อปี	แกลลอน

ตารางที่ 3.5 (ต่อ)

ตัวแปรและพารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$\pi_E$	ราคาขายเอทานอล	\$/gal
$\gamma_{ES}$	ค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากอ้อย	\$/gal
$\gamma_{EC}$	ค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง	\$/gal
$\gamma_{EM}$	ค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล	\$/gal
$\bar{q}_{ES}$	กำลังการผลิตสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตจากอ้อย	แกลลอน
$\bar{q}_{EC}$	กำลังการผลิตสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตจากมันสำปะหลัง	แกลลอน
$\bar{q}_{EM}$	กำลังการผลิตสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตจากกากน้ำตาล	แกลลอน

สมการผู้ผลิตเอทานอลจากอ้อย ;

$$\max_{q_{ES}} \pi_E q_{ES} - \gamma_{ES} q_{ES} \quad (3.2)$$

ภายใต้เงื่อนไข  $q_{ES} \leq \bar{q}_{ES} \quad (\lambda_{ES}) \quad (3.3)$

สมการผู้ผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง ;

$$\max_{q_{EC}} \pi_E q_{EC} - \gamma_{EC} q_{EC} \quad (3.4)$$

ภายใต้เงื่อนไข  $q_{EC} \leq \bar{q}_{EC} \quad (\lambda_{EC}) \quad (3.5)$

สมการผู้ผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล ;

$$\max_{q_{EM}} \pi_E q_{EM} - \gamma_{EM} q_{EM} \quad (3.6)$$

ภายใต้เงื่อนไข  $q_{EM} \leq \bar{q}_{EM} \quad (\lambda_{EM}) \quad (3.7)$

เงื่อนไขของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

$$0 \leq -\pi_E + \gamma_{ES} + \lambda_{ES} \perp q_{ES} \geq 0 \quad (3.8)$$

$$0 \leq \bar{q}_{ES} - q_{ES} \perp \lambda_{ES} \geq 0 \quad (3.9)$$

$$0 \leq -\pi_E + \gamma_{EC} + \lambda_{EC} \perp q_{EC} \geq 0 \quad (3.10)$$

$$0 \leq \bar{q}_{EC} - q_{EC} \perp \lambda_{EC} \geq 0 \quad (3.11)$$

$$0 \leq -\pi_E + \gamma_{EM} + \lambda_{EM} \perp q_{EM} \geq 0 \quad (3.12)$$

$$0 \leq \bar{q}_{EM} - q_{EM} \perp \lambda_{EM} \geq 0 \quad (3.13)$$

เงื่อนไข Market-clearing (อุปสงค์ = อุปทาน)

$$\pi_E = a - b(q_{ES} + q_{EC} + q_{EM}) \quad (3.14)$$

จากหัวข้อ 3.3.3 และ 3.3.4 สามารถกำหนดค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์การตัดสินใจได้ดังนี้

- $q_{SE}$  = ผลผลิตอ้อย = 97,979,700 (ตัน) (ข้อมูลจากตารางที่ 3.1)
- $q_{CE}$  = ผลผลิตมันสำปะหลัง = 26,601,100 (ตัน) (ข้อมูลจากตารางที่ 3.2)
- $q_{ME}$  = ปริมาณผลิตกากน้ำตาล = 4,389,600 (ตัน) (ข้อมูลรายงานการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศประจำปีการผลิต 2554/55 ดังแสดงในภาคผนวก ง.)
- $\gamma_{ES}$  = ค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากอ้อย (บาท/ลิตร) = 19.45 (เนื่องจากประเทศไทยนำอ้อยไปผลิตน้ำตาล จึงไม่มีราคาอ้างอิงต้นทุนการผลิตเอทานอลจากอ้อยที่เป็นทางการ จึงใช้ราคาอ้างอิงของ บราซิลในตารางที่ 3.3 (0.64 \$/ลิตร) เนื่องจากบราซิลใช้อ้อยในการผลิตเอทานอลเป็นหลัก โดยใช้อัตราแลกเปลี่ยนเท่ากับ 30.3873 บาท/\$ [64])
- $\gamma_{EC}$  = ค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (บาท/ลิตร) = 20.18 (ดูตารางที่ 3.3)
- $\gamma_{EM}$  = ค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล (บาท/ลิตร) = 19.0 (ดูตารางที่ 3.3)
- $\bar{q}_{ES}$  = ปริมาณสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตจากอ้อย = 6,858,579,000 (ลิตร) (คำนวณจากอัตราส่วนแปลงสภาพ หัวข้อ 3.3.3)
- $\bar{q}_{EC}$  = ปริมาณสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตจากมันสำปะหลัง = 4,788,198,000 (ลิตร) (คำนวณจากอัตราส่วนแปลงสภาพ หัวข้อ 3.3.3)
- $\bar{q}_{EM}$  = ปริมาณสูงสุดของเอทานอลที่ผลิตจากกากน้ำตาล = 1,141,296,000 (ลิตร) (คำนวณจากอัตราส่วนแปลงสภาพ หัวข้อ 3.3.3)
- $b = -0.00001$  (จากข้อมูลในหัวข้อ 3.3.5 และสมการ 3.14)
- $a = 39.937$  (จากข้อมูลในหัวข้อ 3.3.5 และสมการ 3.14)

#### 3.4.4 การวิเคราะห์เรื่องราว (Scenarios consideration)

แต่ละแบบการวิเคราะห์เกิดจากการผสมของผลผลิตการเกษตรทั้งสาม ผลผลิตของอ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาลจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตัวอย่างเช่น ผลผลิตอ้อย ถูกนำไปใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอล 100% 50% และ 0% เช่นกัน ผู้ผลิตพลังงานสามารถผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากมันสำปะหลัง 100% 50% และ 0% และ จาก กากน้ำตาล เท่ากับ 100% 0.2% และ 0% ดังนั้นแบบจำลองค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization model) นี้ พิจารณาทั้งหมด 27 แบบการวิเคราะห์ซึ่งสัมพันธ์กันกับปริมาณของผลผลิตการเกษตรแต่ละอย่าง รูปที่ 3.14 และ ตารางที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของแต่ละแบบการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.6 แสดงแบบแผนการวิเคราะห์ของการวิเคราะห์เรื่องราว

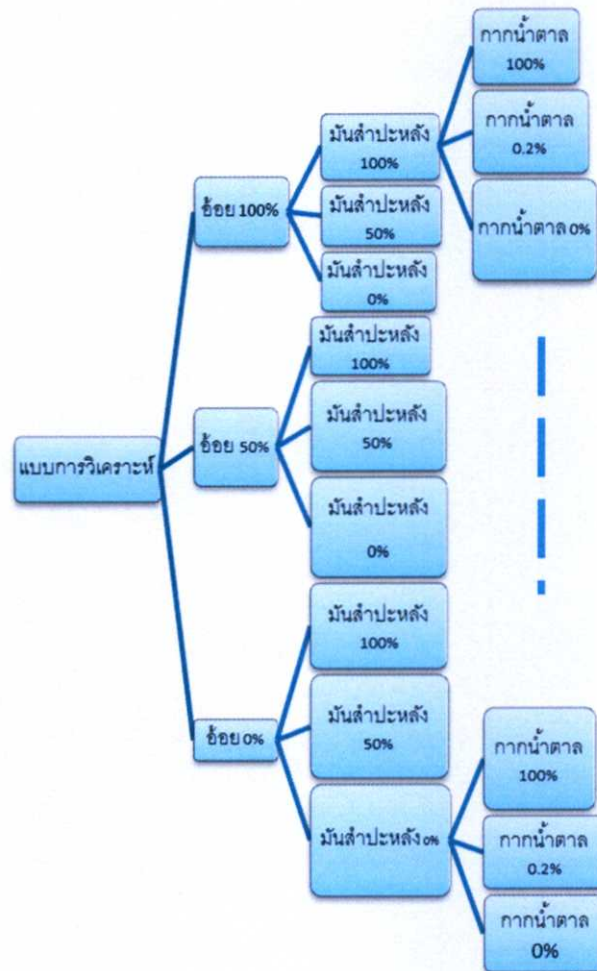
แบบแผนการวิเคราะห์ (Scenarios)	สัดส่วนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอล (%)		
	อ้อย	มันสำปะหลัง	กากน้ำตาล
1	100	100	100
2			0.2
3			0
4		50	100
5			0.2
6			0

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

แบบแผนการวิเคราะห์ (Scenarios)	สัดส่วนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอล (%)		
	อ้อย		อ้อย
7			100
8		0	0.2
9			0
10			100
11		100	0.2
12			0
13			100
14	50	50	0.2
15			0
16			100
17			0.2
18		0	0
19			100
20	0	100	0.2
21			0
22			100
23		50	0.2
24			0
25			100
26		0	0.2
27			0

### 3.5 ผลและการวิเคราะห์ผล

จากสมการวัตถุประสงค์ สมการข้อจำกัด และ การกำหนดแปร ที่กำหนดในหัวข้อ 3.5 สามารถเขียนกำหนดตัวแปร และสมการของแบบจำลองโดยโปรแกรม GAMS เวอร์ชัน 24.7.1 ได้ดังแสดงในภาคผนวก ก. หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดของแบบจำลองด้วยโปรแกรม GAMS ดังแสดงผลการวิเคราะห์คำนวณของปัญหาสมมูลของตลาดเอทานอล ในภาคผนวก ก. และนำมาเขียนเป็นตารางแสดงรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 3.7 โดยปกติแบบจำลองได้เลือกปริมาณของกากน้ำตาลสูงสุดเพื่อใช้ผลิตเอทานอลในตลาดพลังงานจากตารางที่ 3.7 แบบจำลองแสดงให้เห็นได้ว่า ถึงแม้ว่าปริมาณของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดที่ใส่เข้าไปในแบบจำลองจะมีปริมาณผันแปรอย่างไร แบบจำลองก็ยังเลือกผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลสูงสุด (คือ 100% หรือเท่ากับ 4,389.6 พันตัน) ก่อนอันดับแรก เหตุผลที่สำคัญเนื่องจากว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตของกากน้ำตาลถูกที่สุด ปริมาณเอทานอลสูงสุดที่ผลิตจากกากน้ำตาลเท่ากับ 496,663 แกลลอน และราคาเอทานอลเท่ากับ 0.65\$/แกลลอน (มี 9 แบบแผน คือแบบแผนการศึกษาที่ 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22 และ 25) อย่างไรก็ตาม อ้อยและมันสำปะหลัง ก็มีผลกระทบต่อราคาตลาดหากว่า



รูปที่ 3.14 รายละเอียดของการวิเคราะห์เรื่องราว

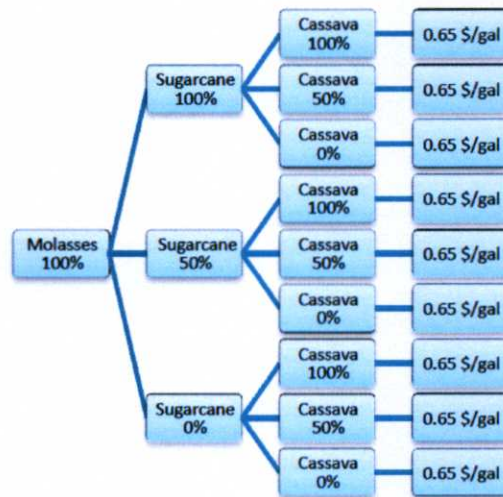
ปริมาณของกากน้ำตาลลดลง ยกตัวอย่างเช่น ผู้ผลิตพลังงานควรเลือกผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากกากน้ำตาลและอ้อย ถ้าปริมาณของกากน้ำตาลลดลงถึง 0.2% และ ผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากอ้อย ถ้า ผู้ปลูกอ้อยไม่มีการป้อนกากน้ำตาลเข้าสู่ตลาดพลังงาน ( $qME = 0\%$ ) ราคาเอทานอลเท่ากับ 0.77\$/แกลลอน ในหลายแบบแผนการวิเคราะห์ มันสำปะหลังจะส่งผลกระทบต่อราคาตลาดเช่นกัน ถ้าไม่มีการป้อนอ้อยและกากน้ำตาลเข้าสู่ตลาดเอทานอล ทำให้ราคาเอทานอลเท่ากับ 0.89 \$/แกลลอน (แบบแผนการวิเคราะห์ที่ 21 และ 24) แบบแผนการวิเคราะห์ที่ 27 แสดงกรณีที่ย่ำแย่ที่สุดของตลาดพลังงานเอทานอล เนื่องจากว่าไม่มีการป้อนอ้อย มันสำปะหลัง และ กากน้ำตาลเข้าสู่ตลาดการผลิตเอทานอลเลย ทำให้ราคาของเอทานอลเท่ากับ 1.23 \$/แกลลอน และส่งผลทำให้ต้องนำพืชผลการเกษตรอื่นมาผลิตเอทานอลแทน รูปที่ 3.15 แสดงสรุปผลการวิเคราะห์ของแบบจำลอง ซึ่งแสดงสัดส่วนวัตถุดิบที่แบบจำลองเลือกใช้ผลิตเอทานอล และต้นทุนการผลิตเอทานอล สำหรับกรณีปริมาณกากน้ำตาลเท่ากับ 100% 0.2% และ 0%

ตารางที่ 3.7 ปริมาณและราคาของเอทานอลที่ผลิตจาก อ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล

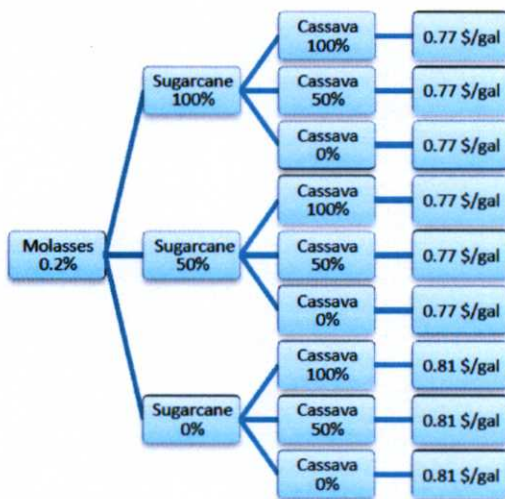
Scenario	$Q_{SE}:Q_{CE}:Q_{ME}$ (1000 tons)	$Q_{ES}$ (gals)	$Q_{EC}$ (gals)	$Q_{EM}$ (gals)	Ethanol price Dollars/gal
1	97,980 : 26,602 : 4,390	0	0	496,663	0.65
2	97,980 : 26,602 : 8.78	29,315	0	365,191	0.77
3	97,980 : 26,602 : 0	394,495	0	0	0.77
4	97,980 : 13,301 : 4,390	0	0	496,663	0.65
5	97,980 : 13,301 : 8.78	29,315	0	365,191	0.77
6	97,980 : 13,301 : 0	394,495	0	0	0.77
7	97,980 : 0 : 4,390	0	0	496,663	0.65
8	97,980 : 0 : 8.78	29,315	0	365,191	0.77
9	97,980 : 0 : 0	394,495	0	0	0.77
10	48,990 : 26,602 : 4,390	0	0	496,663	0.65
11	48,990 : 26,602 : 8.78	29,315	0	365,191	0.77
12	48,990 : 26,602 : 0	394,495	0	0	0.77
13	48,990 : 13,301 : 4,390	0	0	496,663	0.65
14	48,990 : 13,301 : 8.78	29,315	0	365,191	0.77
15	48,990 : 13,301 : 0	394,495	0	0	0.77
16	48,990 : 0 : 4,390	0	0	496,663	0.65
17	48,990 : 0 : 8.78	29,315	0	365,191	0.77
18	48,990 : 0 : 0	394,495	0	0	0.77
19	0 : 26,602 : 4,390	0	0	496,663	0.65
20	0 : 26,602 : 8.78	0	0	365,191	0.81
21	0 : 26,602 : 0	0	294,96	0	0.89
22	0 : 13,301 : 4,390	0	0	496,663	0.65
23	0 : 13,301 : 8.78	0	0	365,191	0.81
24	0 : 13,301 : 0	0	294,96	0	0.89
25	0 : 0 : 4,390	0	0	496,663	0.65
26	0 : 0 : 8.78	0	0	365,191	0.81
27	0 : 0 : 0	0	0	0	1.23

วิทยานิพนธ์นี้ ได้แสดงถึงการนำเอาแบบจำลองสมดุลการแข่งขันมาใช้กับตลาดการผลิตเอทานอล แบบจำลองที่ศึกษานี้ได้เน้นพิจารณาผู้ผลิตและตลาดเอทานอล โดยในตลาดเอทานอลจะมีผู้ผลิตที่เกี่ยวข้อง 3 ฝ่าย ซึ่งแต่ละฝ่ายก็แข่งขันซึ่งกันและกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าโครงสร้างของตลาดเอทานอล เป็นตลาดแบบแข่งขันสมบูรณ์ ดังนั้นผู้ผลิตแต่ละฝ่ายจึงมีบทบาทในการกำหนดราคาเอทานอล ปัญหาสมดุลนี้มีผลมาจากการพิจารณาเงื่อนไข KKT สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (คือการหาค่ากำไรสูงสุดสำหรับผู้ผลิตเอทานอล) ซึ่งเป็นปัญหาที่ประสบโดยผู้ที่เกี่ยวข้องกับตลาดเอทานอล และมีเงื่อนไขข้อจำกัดคือสภาวะ Market-clearing [35] [36] ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ราคาของเอทานอลในตลาดเท่ากับ 0.65\$/แกลลอน ถ้าหากผู้ปลูกอ้อย ขายกากน้ำตาลให้กับผู้ผลิตเอทานอล อย่างไรก็ตาม ปริมาณของกากน้ำตาลที่นำไปใช้ในการผลิตเอทานอล มีปริมาณน้อยกว่า 0.2% ของปริมาณการผลิตสูงสุด ดังนั้น ราคาตลาดของเอทานอล จะเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.77 0.81 0.89 และ 1.23 \$/แกลลอน ทั้งนี้เนื่องจากว่า ค่าใช้จ่ายในการปลูกอ้อยและมัน

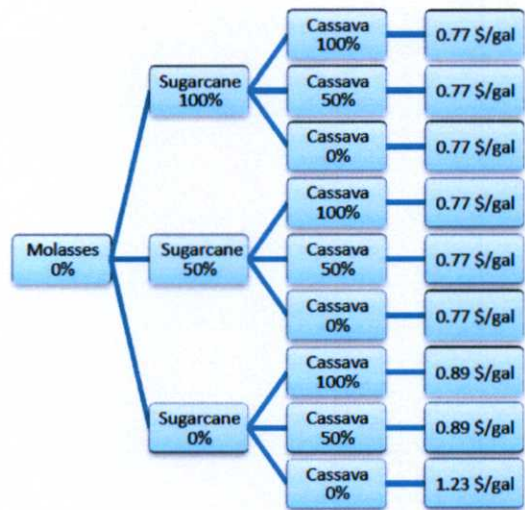
สำปะหลังมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตกากน้ำตาล



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง แสดงสัดส่วนวัตถุดิบที่แบบจำลองเลือกใช้ผลิตเอทานอล และต้นทุนการผลิตเอทานอล (ก) เมื่อปริมาณกากน้ำตาลเท่ากับ 100% (ข) เมื่อปริมาณกากน้ำตาลเท่ากับ 0.2% (ค) เมื่อปริมาณกากน้ำตาลเท่ากับ 0%

## บทที่ 4

# การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียในกรุงเทพฯ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ปัญหาการบำบัดน้ำเสีย ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีผลมาจากการขยายตัวของขนาดเมือง การนำเสนอแนวทางการบริหารจัดการน้ำเสียอย่างยั่งยืน การนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการหาทางเลือกในการบริหารจัดการน้ำเสียในกรุงเทพฯ ซึ่ง ได้ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์ที่เหมาะสม คือ ได้ผลตอบแทนสูงสุด ในขณะเดียวกัน ก็ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจากก๊าซชีวภาพ

### 4.1 วิฤตปัญหาสิ่งแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของของเสีย

การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกเป็นสาเหตุของปัญหามากมาย อาทิ เช่น ปัญหามลพิษ ปัญหาการขาดแคลนอาหารและก๊าซธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเพิ่มขึ้นของประชากรในเมืองใหญ่ทั่วโลก ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาเศรษฐกิจ (ระดับอัตราการเติบโตของประชากรโลกค่อนข้างคงที่ที่ 134 ล้านคนต่อปี (เมื่อปี พ.ศ. 2554) [37]) รูปที่ 4.1. แสดงความสัมพันธ์ของปัญหาการเพิ่มของประชากร ทำให้เกิดการบริโภครทรัพยากรธรรมชาติมากขึ้น เกิดของเสียมากขึ้น ต้องเป็นภาระในการกำจัด ขณะเดียวกัน ทั้งการบริโภครทรัพยากร และ การกำจัดของเสีย ก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีการปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ในปัจจุบันการบริหารจัดการการกำจัดของเสีย ได้หันมาเน้นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ ตามหลักการ 3 R ( คือ นำกลับมาปรับปรุงใหม่(Renewal) นำกลับมาใช้ซ้ำ(Reuse) นำกลับมาแปรสภาพเพื่อใช้(Recycle)) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด ขณะเดียวกัน ก็ยังได้ประโยชน์ และ ลดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> จากขบวนการกำจัด

### 4.2 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์ปล่อยออกสู่บรรยากาศมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมาจากการผลิตพลังงานและการขนส่งเป็นหลัก นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและการทำลายป่ายังเป็นสาเหตุสำคัญด้วย ตัวอย่างเช่น ต้นไม้ เป็น "ตัวดูดซับคาร์บอน" โดยธรรมชาติ โดยดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อมีชีวิตอยู่ และเมื่อถูกทำลายจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ เมื่ออยู่ในบรรยากาศแล้ว คาร์บอนไดออกไซด์จะคงอยู่เป็นเวลา 50 ถึง 200 ปี และบางส่วนคงอยู่ตลอดไป[38]

เชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งหมดประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอน และปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเมื่อถูกเผาไหม้ ในปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นวัตถุดิบหลักของพลังงานเกือบ 80% ของโลกอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นมันจะหมดไปในที่สุด อย่างไรก็ตาม ถ้าเราต้องการหลีกเลี่ยงภาวะโลกร้อนที่อันตราย เราต้องเผาไหม้น้ำมัน ถ่านหิน และ ก๊าซ

ธรรมชาติ น้อยกว่า 1 ใน 4 ของที่สำรองไว้ หากเผาไหม้มากกว่านี้จะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มากพอที่จะเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างน่าวิตก [38]

เนื่องจากประเทศอุตสาหกรรมมีเศรษฐกิจที่เติบโตกว่าและได้เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมา 100 ปีหรือมากกว่า ดังนั้นประเทศเหล่านี้จึงเป็นผู้ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทวีคูณขึ้นเรื่อยๆ ออกสู่บรรยากาศเป็นหลัก อย่างไรก็ตามทุกประเทศมีส่วนรับผิดชอบต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า สิ่งนี้สามารถเปลี่ยนแปลงและควรต้องเปลี่ยนแปลงในอนาคต ในบางประเทศกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากพลังงานหมุนเวียนและประสิทธิภาพทางพลังงานทำให้ความสำเร็จทางเศรษฐกิจและเชื้อเพลิงฟอสซิลไม่เป็นของคู่กันอีกต่อไป ปัญหาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัญหาทั้งในระดับธุรกิจและระดับบุคคล ตัวอย่างเช่น คนที่ขับรถที่กินน้ำมันมากเกินไปนั้นเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมากกว่าคนที่ขับรถที่มีประสิทธิภาพทางพลังงาน เป็นต้น

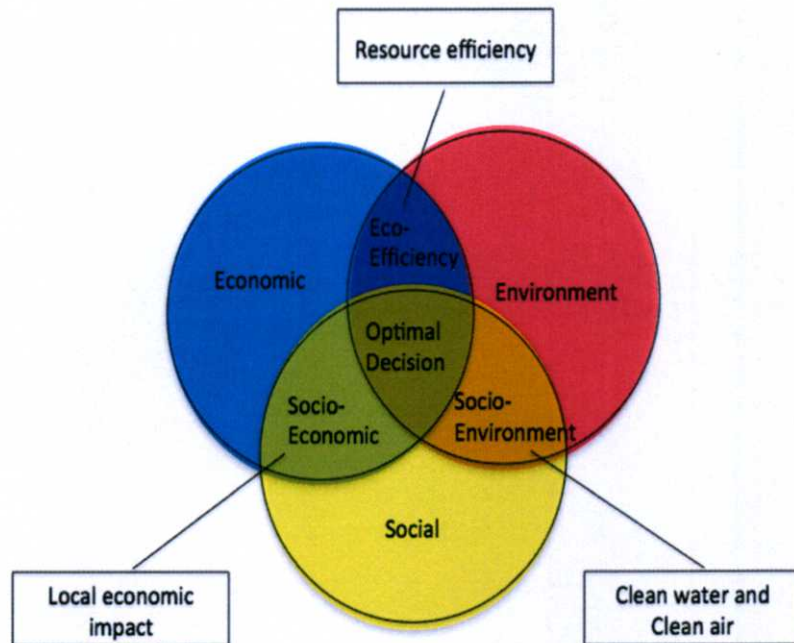


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของปัญหาการเพิ่มของประชากรที่มีต่อการเพิ่มของของเสีย

#### 4.3 แนวทางการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน

หลักการของการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน แสดงดังรูปที่ 4.2 การบริหารจัดการการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน คือการบริหารจัดการการกำจัดของเสียโดยมีเป้าหมายที่ต้องบรรลุใน 3 ด้าน คือ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านเศรษฐศาสตร์ และ ด้านสังคม หากเน้นเฉพาะด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม นั่นคือ แนวทางการบริหารจัดการที่เน้นการใช้ทรัพยากรให้ได้ประสิทธิภาพ (Resource Efficiency) หากเน้นเฉพาะด้านสิ่งแวดล้อมและด้านสังคม นั่นคือการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมชุมชน (Socio-Environment) ที่ไม่ได้คำนึงถึงความคุ้มค่าหรือวิธีการในการกำจัดของเสีย หากเน้นเฉพาะด้านสังคม

และด้านเศรษฐศาสตร์เป็นหลัก คือการบริหารจัดการที่เน้นเศรษฐศาสตร์ชุมชน ซึ่งคำนึงถึงเฉพาะต้นทุน และ ผลตอบแทนจากการกำจัดของเสียเป็นหลัก โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากขบวนการกำจัดของเสียที่เลือกใช้ วิธีการบริหารจัดการของเสียอย่างยั่งยืน จึงต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ทั้ง 3 ด้านไปพร้อมๆ กัน



รูปที่ 4.2 หลักการการกำจัดของเสียอย่างยั่งยืน [41]

การพัฒนาอย่างยั่งยืนเป็นเป้าหมายหลักสำหรับการพัฒนาสังคม กรุงเทพมหานคร เมืองหลวงของประเทศไทย ก็เป็นหนึ่งในประเทศกำลังพัฒนา หลายๆ ประเทศที่กำลังพิจารณาการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติ อย่างเช่น น้ำ และการจัดการน้ำเสีย อย่างยั่งยืน แต่การบริหารจัดการของเสียในกรุงเทพฯ ในปัจจุบันนั้น จะเป็นรูปแบบ Socio-Economic ซึ่งคำนึงถึงเฉพาะต้นทุนในการกำจัด และชุมชน โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากวิธีการที่เลือกใช้

โรงงานบำบัดน้ำ (Wastewater Treatment Plants, WWTP) เป็นหนึ่งในหลายๆ องค์กร ที่มีการบริโภคพลังงานอย่างมากเพื่อใช้ในการดำเนินงาน อย่างเช่น ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานของโรงงาน ค่าเชื้อเพลิงฟอสซิล ที่ใช้ในการขนส่งลำเลียงกากของน้ำเสียไปยังพื้นที่ที่จะใช้ฝังกลบ หากเราทำการพิจารณาประโยชน์ที่จะได้ของผลิตผลที่ได้จากขบวนการบำบัดน้ำเสีย โรงงานบำบัดน้ำเสียก็จะสามารถลดการซื้อพลังงานจากภายนอกได้มาก ดังนั้นจึงเป็นการส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยปกติแล้ว ผลลัพธ์ของโรงงานบำบัดน้ำเสียจะได้ผลิตผลจากขบวนการบำบัดน้ำเสีย 2 อย่าง คือ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว และ กากตะกอน สำหรับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะถูกปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือนำกลับไปใช้ใหม่ในกิจกรรมขององค์กรนั้นๆ สำหรับกากตะกอนที่จะได้จากขบวนการบำบัดน้ำเสีย สามารถนำไปทำให้เกิดประโยชน์ได้หลายอย่าง เพราะมีส่วนประกอบของสารประกอบคาร์บอน และ ธาตุที่เป็นสารอาหารสำหรับพืช ดังนั้นจึงสามารถนำไปทำประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ เช่น นำไปผลิตพลังงานทดแทนจากสารประกอบคาร์บอน และนำไปผลิตเป็นปุ๋ย

อินทรีย์ ประการแรกขบวนการย่อยสลายและขบวนการเผาสามารถเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในกากตะกอนให้เป็นพลังงานทดแทนได้ ตัวอย่างเช่น ก๊าซชีวภาพที่ได้จากขบวนการย่อยสลายแบบแอนาโรบิก และ พลังงานความร้อนที่ได้จากขบวนการเผาไหม้กากตะกอน เหล่านี้เป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญขึ้นกับสารประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในกากตะกอน ก๊าซชีวภาพ และ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้อื่น ๆ อย่างเช่น แก๊ส ไบโอมีเทน [39] และ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากก๊าซชีวภาพ สามารถนำไปใช้ภายในโรงงานบำบัดน้ำเสีย หรือนำไปขายให้ตลาดที่เกี่ยวกับพลังงานได้ เช่นเดียวกับพลังงานความร้อนที่ได้จากขบวนการเผาไหม้กากตะกอนน้ำเสียก็สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงานบำบัดน้ำเสีย หรือนำไปขายให้กับตลาดพลังงานภายนอกได้เช่นกัน ประการที่สอง คาร์บอนและสารอาหารพืชที่มีอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียที่เป็นผลพลอยได้จากขบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถนำไปผลิตปุ๋ยอินทรีย์ และสามารถออกแบบโรงงานบำบัดน้ำเสียเพื่อให้สามารถผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อนำไปขายให้กับตลาดเกษตรกรรมได้

ประโยชน์อีกอย่างหนึ่ง คือ การลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (Carbon Dioxide Equivalent, CDE) จากการนำกากตะกอนน้ำเสียไปใช้ประโยชน์แทนที่จะขนส่งนำไปฝังกลบ ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลสามารถลดลงได้ หาก กากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียถูกนำไปใช้ผลิตพลังงานทดแทน [40] นี่เป็นอีกประการหนึ่งที่ทำให้โรงงานบำบัดน้ำเสียสามารถส่งเสริมการพัฒนาองค์กรและสังคมอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์ของบทนี้คือการนำเสนอการใช้แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อเป็นแนวทางให้กับโรงงานบำบัดน้ำเสียในการดำเนินขบวนการบำบัดน้ำเสียอย่างยั่งยืน ด้วยพลังงานทดแทนและปุ๋ยอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้จากขบวนการผลิต ผลลัพธ์ในบทนี้ คือ การสร้างแบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ใช้ข้อมูลทดสอบจากโรงงานบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดไปประยุกต์ใช้กับโรงงานบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ ได้จริง ส่วนที่เหลือของบทนี้แบ่งออกเป็นส่วนๆ ดังนี้ ส่วนที่ 1 อธิบาย กระบวนการปฏิบัติงานของโรงงานบำบัดน้ำเสียใน กรุงเทพฯ ส่วนที่ 2 นำเสนอรูปแบบ แบบจำลองหาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ ; ส่วนที่ 3 เป็นการวิเคราะห์ผล และ ส่วนที่ 4 เป็นข้อสรุปและ ข้อเสนอแนะ

#### 4.4 การกำจัดน้ำเสีย และ การบริหารจัดการระบบบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร

ปี พ.ศ. 2554 กรุงเทพมหานคร มี ประชากร 5.6 ล้านคน 2.4 ล้านครัวเรือน ขณะที่มีพื้นที่ 1,568.7 ตารางกิโลเมตร ความหนาแน่นประชากร 3,617 คน/ตารางกิโลเมตร [42] มีน้ำทิ้งจากครัวเรือน 1,097,491 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ( $m^3$ /วัน) ถูกบำบัดโดย โรงบำบัดน้ำเสีย 19 แห่ง ประกอบด้วยโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก 12 โรง และ ขนาดใหญ่ 7 โรง [43] ซึ่งดำเนินการโดยสำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร น้ำเสียที่ถูกบำบัดเหล่านี้มาจากพื้นที่ในกรุงเทพฯ โรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก ได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียทุ่งสองห้อง 1 โรงบำบัดน้ำเสียทุ่งสองห้อง 2 โรงบำบัดน้ำเสียบางบัว โรงบำบัดน้ำเสียรามอินทรา โรงบำบัดน้ำเสียห้วยขวาง โรงบำบัดน้ำเสียท่าทราย โรงบำบัดน้ำเสียบางนา โรงบำบัดน้ำเสียบอนไซ โรงบำบัดน้ำเสียคลองเตย โรงบำบัดน้ำเสียคลองจั่น โรงบำบัดน้ำเสียห้วยหมาก และ โรงบำบัดน้ำเสียร์มเกล้า ซึ่งสามารถรับบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 3,000 1,100 1,200 600 1,400 1,486 1,156 350, 635, 1,925, 1,145 และ 2,461  $m^3$ /วัน ตามลำดับ โรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ ได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียสีพระยา โรงบำบัดน้ำเสียรัตนโกสินทร์ โรงบำบัดน้ำ

เสียดินแดง โรงบำบัดน้ำเสียช่องนนทรี โรงบำบัดน้ำเสียหนองแขม โรงบำบัดน้ำเสียทุ่งครุ และ โรงบำบัดน้ำเสียจตุจักร ซึ่งสามารถรับบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 15,275 25,506 204,414 169,336 122,972 58,166 และ 137,985 ม<sup>3</sup>/วัน ตามลำดับ ค่าดำเนินงานสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 15.05 และ 1.06 บาท/ม<sup>3</sup> [44]

กรุงเทพมหานครได้ดำเนินการแก้ไขปัญหาน้ำเสียโดยใช้มาตรการใช้สิ่งก่อสร้าง โดยการดำเนินโครงการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียรวมขนาดใหญ่ ได้แก่ โรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา รัตนโกสินทร์ ช่องนนทรี หนองแขม ทุ่งครุ ดินแดง และจตุจักร จำนวน 7 พื้นที่ 6 โครงการ ครอบคลุมพื้นที่รวม 191.74 ตารางกิโลเมตร ใน 20 เขตการปกครอง ได้แก่ เขตพระนคร ป้อมปราบศัตรูพ่าย สัมพันธวงศ์ บางรัก สาทร บางคอแหลม ยานนาวา ดุสิต ดินแดง ราชเทวี พญาไท ปทุมวัน จตุจักร ห้วยขวาง หนองแขม บางแค ภาษีเจริญ ทุ่งครุ จอมทอง และ ราษฎร์บูรณะ สามารถบำบัดน้ำเสียได้รวมทั้งสิ้น 992,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้จริงในปี พ.ศ. 2554 เท่ากับ 733,654 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน นอกจากนี้ยังมีระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาดเล็กที่รับโอนจากการเคหะแห่งชาติ จำนวน 12 แห่ง คือ โรงควบคุมคุณภาพน้ำทุ่งสองห้อง 1 ทุ่งสองห้อง 2 บางบัว รามอินทราห้วยขวาง ท่าทราย บางนา บ่อนไก่ คลองเตย คลองจั่น หัวหมาก และร่มเกล้า มีขีดความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย 24,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีปริมาณน้ำเสียบำบัดได้จริง 14,165 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน [43]

มีขีดความสามารถในการบำบัดน้ำเสียรวม 992,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันมีปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้จริง 733,654 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน รวมขีดความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียขนาดชุมชนและขนาดใหญ่ตามที่ออกแบบ 1,016,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 42.45 ของปริมาณน้ำเสียทั้งหมดในเขตกรุงเทพมหานครเทียบกับปริมาณการใช้น้ำประปา ปี พ.ศ. 2553 ประมาณ 2.395 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน และเมื่อคิดจากปริมาณน้ำเสียที่บำบัดได้จริง 747,819 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน เทียบกับปริมาณการใช้น้ำประปาดังกล่าว คิดเป็นร้อยละ 31.22 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียรวมของระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่และขนาดชุมชน เป็นจำนวนเงินรวมทั้งสิ้น 509,188,295.- บาท [43] น้ำเสียประมาณ  $264.17 \times 10^6$  ม<sup>3</sup> ให้กากตะกอนน้ำเสีย 1 ตัน (น้ำเสียเฉลี่ย 1.4 ล้านลูกบาศก์เมตร ให้กากตะกอน 1,125 ตันเปียก คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของของแข็งน้ำในน้ำเสียเท่ากับ 27.2%) [45] ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาณกากตะกอนน้ำเสียได้เท่ากับ 287 ตันแห้งต่อวัน [44]

รูปที่ 4.3 แสดง โรงบำบัดน้ำเสียทั้ง 19 แห่ง และ โรงงานบริหารจัดการกากตะกอน 3 แห่งใน กรุงเทพฯ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในตอนต้น โรงบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานครเหล่านี้ สามารถได้รับประโยชน์จากกากตะกอนน้ำเสียโดยการใช้ หรือ ขาย พลังงานทดแทน และ ปุ๋ยอินทรีย์ที่ผลิตได้ [44]

#### 4.4.1 การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์

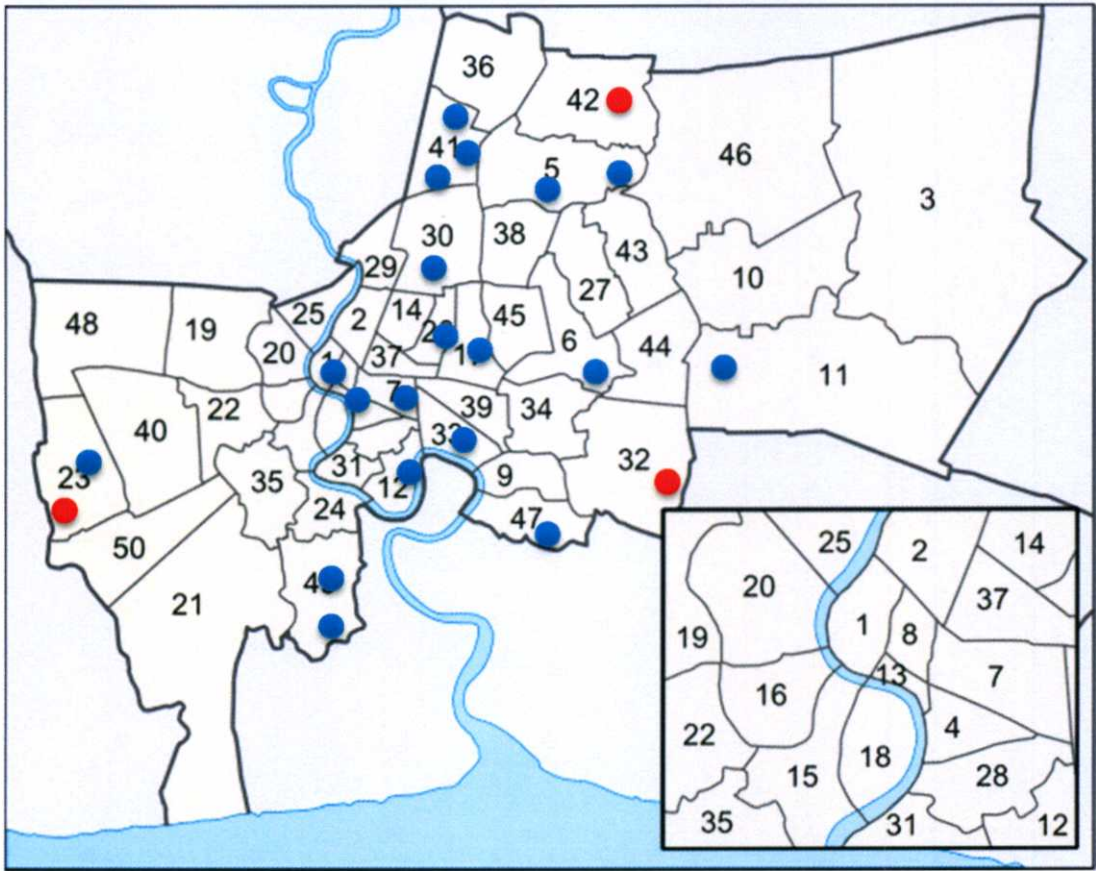
ความเสื่อมโทรมของทรัพยากรน้ำทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากภาวะมลพิษที่ปลดปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจนเกินขีดความสามารถในการบำบัดตัวเองตามธรรมชาติ การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหมุนเวียนทรัพยากรน้ำที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โรงควบคุมคุณภาพน้ำรวมทั้ง 7 แห่งที่เปิดดำเนินการอยู่ในปัจจุบันของ กรุงเทพมหานคร มีขีดความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่ 992,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ในปี พ.ศ. 2554 มีปริมาณน้ำเสียเข้าระบบเพียง 7 แสนกว่า ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมี

การนำกลับมาใช้ประโยชน์ประมาณ 33,500 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละ 4 โดยการใช้ น้ำที่ผ่านการบำบัดยังจำกัดเฉพาะการรดน้ำต้นไม้และล้างทำความสะอาดพื้นถนน เนื่องจากยังมีการปนเปื้อนเชื้อโรคที่เสี่ยงต่อผู้ใช้น้ำ [43]

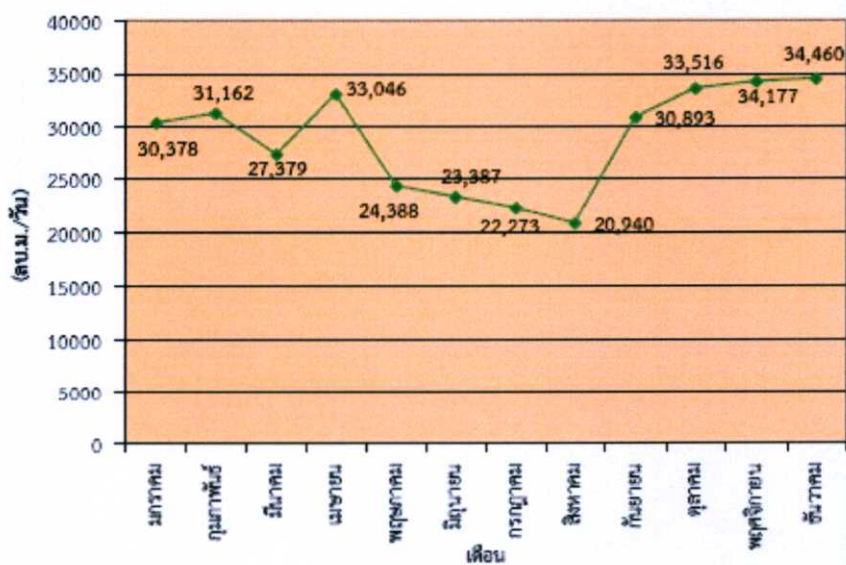
สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ มีนโยบายขยายการใช้ประโยชน์จากน้ำที่บำบัดแล้วเพื่อช่วยลด การใช้น้ำประปา จึงได้ก่อสร้างท่อส่งน้ำที่ผ่านบำบัดแล้วจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ซึ่งมีคุณภาพน้ำทั้งได้ตามเกณฑ์ที่กรุงเทพมหานครกำหนด ไปยังศูนย์เยาวชนไทยญี่ปุ่น-ดินแดง ศูนย์เครื่องมือกล โรงเรียนสุรศักดิ์มนตรี สวนป่าวิภาวดี สวนป่าบึงมักกะสัน และศูนย์รวมรถเขตราชเทวี ซึ่งสามารถใช้น้ำที่ผ่านบำบัดแล้วดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น รดน้ำต้นไม้ ล้างพื้น ถนน และปรับปรุงคุณภาพน้ำของสระน้ำ เป็นต้น และ สร้างท่อส่งน้ำที่ผ่านบำบัดแล้วจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี ซึ่งมีคุณภาพน้ำทั้งได้ตามเกณฑ์ที่กรุงเทพมหานครกำหนด ไปยังบริเวณถนนสีลม ช่วงจากถนนราธิวาสราชนครินทร์ไปยังถนนเจริญกรุง เพื่อใช้รดน้ำต้นไม้ในเกาะกลางและ บริเวณทางเดินเท้าทั้งสองฝั่งถนน ปัจจุบันผู้ใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดรายใหญ่ยังคงเป็นหน่วยงานภายใน สังกัดกรุงเทพมหานคร โดยเฉพาะโรงควบคุมคุณภาพน้ำต่าง ๆ ในกิจกรรมที่หลากหลาย เช่น รดน้ำต้นไม้ ล้างถนน และล้างโรงงาน เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 การดำเนินการของโรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ ทั้ง 19 แห่ง [43]

WWTP	Operation system	Capacity (m <sup>3</sup> /day)	Population (persons)	Operation cost (Baht/m <sup>3</sup> )
Thung Song Hong 1	Activated sludge	3,000	15,000	7.70
Thung Song Hong 2	Activated sludge	1,100	5,500	8.39
Bangbua	Oxidation ditch activated sludge	1,200	8,000	11.07
Ramindra	Extended activated sludge	600	4,060	8.44
Huai Khwang	Conventional activated sludge	1,400	16,800	6.83
Tha Sai	Activated sludge	1,486	7,095	5.01
Bangna	Oxidation ditch activated sludge	1,156	8,280	6.01
Bonkai	Extended activated sludge	350	2,200	15.05
Khlong Toei	Completely mixed activated sludge	635	7,200	13.76
Khlong Chan	Activated sludge	1,925	36,000	5.17
Huamark	Stabilization pond	1,145	2,940	8.57
Rom Klao	Extended activated sludge	2,461	19,000	4.26
Si Phraya	Contract stabilization activated sludge	15,275	120,000	3.13
Rattanakosin	Two-stage activated sludge	25,506	76,000	2.14
Din Daeng	Activated sludge with nutrients removal	204,414	1,080,000	2.45
Chong Nonsi	Cyclic activated sludge system	169,336	580,000	1.06
Nong Khaem	Vertical loop reactor activated sludge	122,972	418,000	1.34
Thung Khru	Vertical loop reactor activated sludge	58,166	171,000	1.58
Chatuchak	Cyclic activated sludge system	137,985	432,500	1.87



รูปที่ 4.3 โรงบำบัดน้ำเสีย 19 แห่ง (จุดน้ำเงิน) และ โรงบริหารจัดการกากตะกอนน้ำเสีย 3 แห่ง (จุดแดง) ในกรุงเทพฯ [43] [46]

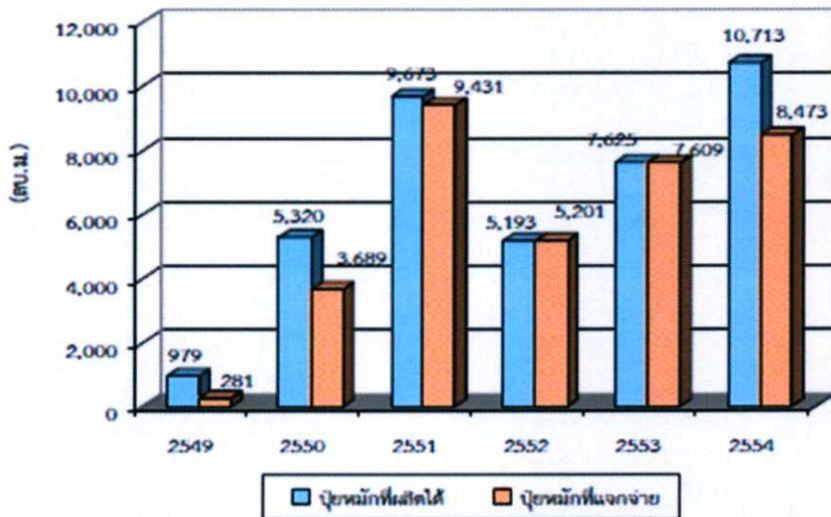


รูปที่ 4.4 ปริมาณการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ในแต่ละเดือนของ ปี พ.ศ. 2554 [43]

#### 4.4.2 การนำตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์

ตะกอนน้ำเสียเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร เนื่องจากประกอบด้วยธาตุอาหารหลักที่สำคัญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมอีกเล็กน้อย จึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตเป็นปุ๋ยหมัก สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ ได้เริ่มโครงการผลิตปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสียตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 โดยกลุ่มงานโครงการและจัดการตะกอน และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน

ตะกอนน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ หรือ Anaerobic Digestion จากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขมและโรงควบคุมคุณภาพน้ำจตุจักรส่วนใหญ่ถูกนำไปยัง โรงทดลองผลิตปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสียหนองแขม (Pilot Plant) เพื่อเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตปุ๋ยหมัก ตะกอนน้ำเสียดังกล่าวจะถูกผสมกับวัสดุธรรมชาติ เช่น หญ้าแห้ง เป็นต้น ต่อจากนั้นจะวางกองแฉะไว้ประมาณ 3 สัปดาห์และมีการกลับกองปุ๋ยทุกสัปดาห์ เพื่อย่อยสลายและฆ่าเชื้อโรคโดยแสงแดด และลมธรรมชาติ เรียกกระบวนการนี้ว่า “กระบวนการหมักแบบกองแฉะ (Windrow Composting)” ปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการหมักสมบูรณ์ถูกแจกจ่ายให้กับหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกสังกัดของกรุงเทพมหานครกว่า 20 หน่วยงาน เช่น สำนักงานเขตทุ่งครุ บางแค บางขุนเทียน สวนธนบุรีรมย์ สวนจตุจักร สวนสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ เป็นต้น เพื่อใช้ในการบำรุงดิน ปลูกไม้ดอก ไม้ประดับ และสนามหญ้า โดยปริมาณปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสียที่ผลิตได้ในปี 2554 อยู่ที่ 10,713 ลูกบาศก์เมตร แจกจ่ายเพื่อใช้งาน 8,473 ลูกบาศก์เมตร หากพิจารณาปริมาณปุ๋ยหมักที่แจกจ่ายให้กับหน่วยงานต่างๆ เทียบกับปริมาณการผลิตพบว่า มีปริมาณใกล้เคียงกันทุกปี ดังแผนภูมิประกอบแสดงถึงความต้องการตะกอนน้ำเสียที่มีอยู่อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.5 ปริมาณปุ๋ยหมักที่ผลิตได้ และแจกจ่าย ระหว่างปี พ.ศ. 2549 - 2554 [43]

อีกวิธีการหนึ่งในการนำกากตะกอนน้ำเสียไปใช้งาน ในกรณีที่มีกากตะกอนน้ำเสียเหลือจากการทำปุ๋ยหมัก คือ การนำกากตะกอนน้ำเสียไปถมที่ Chynoweth [47] ได้กล่าวว่าการนำกากตะกอนน้ำเสียไปถมที่จะปลดปล่อยก๊าซ มีเทนสู่บรรยากาศประมาณ 8% DiStefano, T. D., และ Belenky,

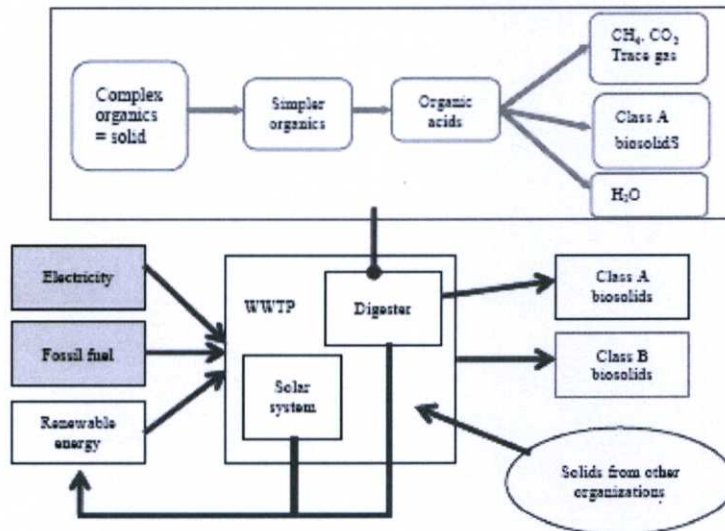
L. G. [49] ได้แนะนำว่า การย่อยสลายกากตะกอนน้ำเสีย (Municipal Solid Waste, MSW) ด้วย Anaerobic Biodegradation ดีกว่า การนำไปถมที่หรือฝังกลบเนื่องจาก

- ควบคุมขบวนการได้ดีกว่า
- ขบวนการย่อยสลายดีกว่า
- ผลิตก๊าซมีเทนได้เร็วกว่า
- ควบคุมการรั่วไหลของก๊าซมีเทนได้ดีกว่า

ในยุโรปตะวันออก ใช้ ขบวนการหมักกากตะกอนน้ำเสียแบบเต็มรูปแบบตั้งแต่ ทศวรรษที่ 1980s แทน การใช้การฝังกลบ [48]

#### 4.4.3 การผลิตไบโอแก๊สจากตะกอนน้ำเสีย

นอกจากที่การนำตะกอนน้ำเสียไปผลิตเป็นปุ๋ยแล้ว ยังสามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซมีเทนได้อีกด้วย (ดูรูปที่ 4.6) ขบวนการย่อยสลายแบบแอนาโรบิค จะย่อยทั้งขนาดและปริมาณของตะกอนให้ลดลงเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก [75] พลังงานความร้อน ถูกใช้ในการรักษาเสถียรภาพของ สารอินทรีย์ ใน ตะกอนน้ำเสียเพื่อช่วยในขบวนการย่อยสลาย [76] และนำเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบแอนาโรบิค เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ และให้ผลผลิตเป็นก๊าซหลายชนิด อาทิ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซมีเทน ขบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า Thermal Hydrolysis และ Anaerobic Digestion (TH และ Anaerobic Digestion) ผลผลิตหลักที่ได้จากขบวนการนี้คือ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และกากตะกอนที่ย่อยเหลือ [77] [78]



รูปที่ 4.6 รูปแบบการบริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสีย [71]

ไบโอแก๊สที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ในหลายรูปแบบ เช่น ก๊าซซีเอ็นจี (Compressed Natural Gas, CNG) สำหรับรถยนต์ ก๊าซธรรมชาติสำหรับผลิตความร้อนหรือ

กระแสไฟฟ้า ฯลฯ ก๊าซซีเอ็นจีสามารถนำไปใช้เติมรถยนต์แทนน้ำมันเบนซิน และ ใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินและน้ำมันเชื้อเพลิง ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

#### 4.4.3.1 ปริมาณไบโอแก๊สที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสีย

ตะกอนน้ำเสียที่ได้จากขบวนการบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ ปริมาณสูงสุด 287.9 ตันแห้งต่อวัน สำหรับการหมักเพื่อย่อยสลายด้วยกระบวนการแอนาโรบิกเพื่อผลิตไบโอแก๊ส ส่วนของแข็งที่ระเหยง่าย (Volatile Solids, VS) 80% จะถูกย่อยสลายเพื่อเปลี่ยนเป็นไบโอแก๊ส และเหลือ 45% ของ VS เป็นกากที่เหลือจากขบวนการหมัก ได้ผลผลิตเป็นไบโอแก๊ส 840 ม<sup>3</sup>/ตัน จากขบวนการหมักนี้ หรือ เท่ากับ 107,156 ม<sup>3</sup>/วัน

#### 4.4.3.2 ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้

การย่อยสลายอินทรีย์สารแบบแอนาโรบิก โดยเฉพาะตะกอนน้ำเสีย ทำให้เกิดไบโอแก๊ส ซึ่งมีก๊าซมีเทน และ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก [78] ก๊าซมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายอินทรีย์สารจะถูกเรียกว่า Bio-methane ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานในรูปของก๊าซธรรมชาติ

ตะกอนน้ำเสีย + สารคาร์บอน  $\rightarrow$  CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + ก๊าซอื่นๆ + Class A Biosolids (4.1)

ไบโอแก๊ส สามารถแยกออกเป็นส่วนประกอบได้ดังนี้ : ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) 55-65% คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 30-40% ไอน้ำ และก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ H<sub>2</sub>S และ ก๊าซไฮโดรเจน H<sub>2</sub> 0-5% [67] ดังนั้นในงานศึกษานี้ ใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วน ก๊าซมีเทนในไบโอแก๊สเท่ากับ 60% และ เรียกว่า Bio-methane

#### 4.4.3.3 ความร้อนจากขบวนการเผาตะกอนน้ำเสีย

ชีวมวล หรือ เชื้อเพลิงก่อนที่จะมีการเผา ปริมาณของแข็งทั้งหมดสามารถมีอยู่ระหว่าง 15-35 % ตะกอนน้ำเสียหลังจากเข้าขบวนการกำจัดน้ำออกแล้ว จะมีศักยภาพที่เหมาะสมกับการเผามากขึ้น สามในสี่ของตะกอนน้ำเสียสามารถเผาติดไหม้ได้ และที่เหลืออีก หนึ่งในสี่ คือเถาที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ เถาที่เหลือจากการเผานี้สามารถนำไปกำจัดหรือใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ความร้อนที่ได้จากขบวนการเผาตะกอนน้ำเสียนี้สูงมาก มีค่าประมาณ 150,000 BTU / Dry Ton ของตะกอนแห้ง [81]

#### 4.4.3.4 การใช้ตะกอนน้ำเสียเป็นปุ๋ยอินทรีย์

ขบวนการอบด้วยความร้อน (Heat Drying Process) ถูกใช้เพื่อกำจัดน้ำออกจากตะกอนน้ำเสีย ขบวนการนี้เป็นหนึ่งในหลายขบวนการ เช่น การหมัก หรือ การใช้ปูนขาว ซึ่งสามารถใช้เพื่อลดขนาดและปรับปรุงคุณภาพของตะกอนน้ำเสีย ตะกอนน้ำเสียที่ผ่านขบวนการอบด้วยความร้อนสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้ ผลผลิตที่ได้จากขบวนการอบแห้งทั่วไปจะมีปริมาณเท่ากับ 90% ของตะกอนน้ำเสีย [82]

#### 4.4.4 ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล

โดยทั่วไปแล้ว โรงบำบัดน้ำเสียใช้ขบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยขบวนการ แอโรบิกและแอนาโรบิก ขบวนการเหล่านี้เป็นแหล่งในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas, GHG) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ปริมาณมาก ก๊าซเรือนกระจกปริมาณมากที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเหล่านี้มาจากขบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ของทั้งขบวนการ บำบัดน้ำเสีย และ ขบวนการกำจัดตะกอนน้ำเสีย

การบริหารจัดการตะกอนน้ำเสียที่ได้ประสิทธิภาพและยั่งยืน นอกจากจะได้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์แล้ว ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วย การนำตะกอนชีวภาพไปฝังกลบสำหรับใช้ในภาคการเกษตรช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักไว้ในดิน ตัวอย่างเช่น สำนักบำบัดและระบายน้ำเสีย ในรัฐโคโลัมเบีย สามารถลด CDE [79] ได้ถึง 1,941 ตัน [80] จากขบวนการฝังกลบตะกอนชีวภาพแบบ B ดังนั้น WWTP สามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลตอบแทนที่เพิ่มขึ้นจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากก๊าซชีวภาพที่ได้จากขบวนการย่อยสลายตะกอนน้ำเสีย ในการศึกษานี้ได้ใช้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า 2.02 kWh/m<sup>3</sup> จากไบโอแก๊สในการศึกษา ในแต่ละเมกะวัตต์ชั่วโมง (Megawatt Hour, MWh) ที่ใช้หรือขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากไบโอแก๊ส สามารถลดการปล่อย CDE ได้ 0.00055 ตัน [79] การใช้ความร้อนจากไบโอแก๊สช่วยลดปริมาณการปล่อย CDE ได้ 0.00197 ตัน/ม<sup>3</sup> หรือ 0.000056 ตัน/ฟุต<sup>3</sup> และ การใช้ ก๊าซ CNG จากไบโอแก๊ส ในภาคการขนส่งช่วยลด CDE 0.001908 ตัน/ม<sup>3</sup> or 0.000054 ตัน/ฟุต<sup>3</sup> [69] นอกจากนั้น การใช้ตะกอนน้ำเสียเป็นปุ๋ยอินทรีย์ยังช่วยลด CDE 0.1 ตัน และ การกักเก็บคาร์บอน (Carbon Sequestration) ในดินช่วยลด CDE 0.2 ตัน [70]

#### 4.5 แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อบริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสีย

จากหัวข้อ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่าการบริหารจัดการการกำจัดน้ำเสียของ กรุงเทพมหานคร เป็นไปในแบบ Socio-Economic ซึ่งยังขาดการบูรณาการครบทั้ง 3 ด้าน ขบวนการดำเนินการบำบัดน้ำเสียที่ปฏิบัติอยู่ในปัจจุบัน เน้นเพียงแค่การปรับปรุงคุณภาพน้ำ และ การนำน้ำเสียที่บำบัดแล้ว และ กากตะกอน ไปใช้ประโยชน์แบบง่ายๆ เช่น นำน้ำไปใช้รดต้นไม้ ล้างพื้น นำกากตะกอนไปทำปุ๋ยหมัก หรือฝังกลบ โดยไม่ได้มีการคำนึงถึงว่าขบวนการเหล่านี้ มีผลกระทบอย่างไร ต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป ในหลายขบวนการเหล่านี้ ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การนำกากตะกอนน้ำเสียไปฝังกลบมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการขนส่ง ทั้งการนำกากตะกอนไปฝังกลบและการทำปุ๋ยหมักมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากขบวนการย่อยสลาย ฯลฯ

##### 4.5.1 การนำตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์

ในหัวข้อนี้ ได้นำเสนอการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ มาช่วยในการบริหารจัดการน้ำเสียอย่างยั่งยืน กล่าวคือ มีการคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการจัดการน้ำเสีย ทั้งด้าน สังคม สิ่งแวดล้อม และ เศรษฐศาสตร์ไปพร้อมกัน โดยมีประเด็นในการวิเคราะห์ดังนี้ (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)

1. กากตะกอนน้ำเสีย จากโรงงานบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Plants, WWTP) จะถูกพิจารณานำไปใช้ใน 4 กรณี คือ

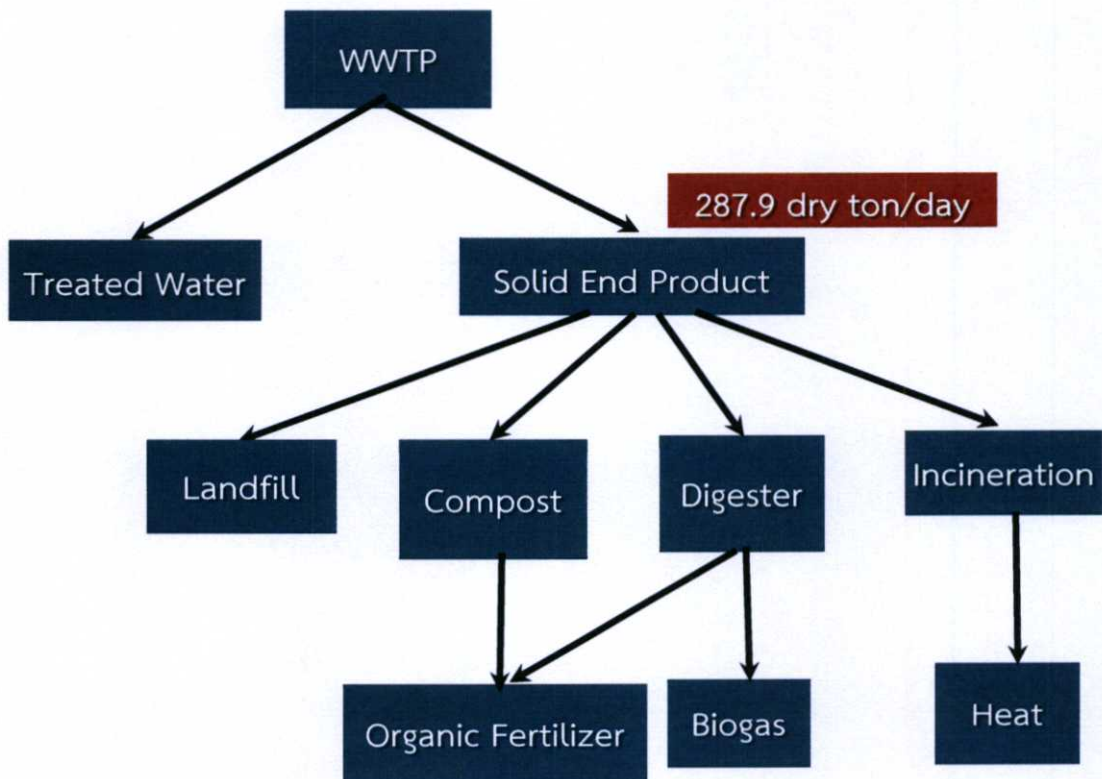
- ก. นำไปถมที่หรือฝังกลบ (Landfill)  
 ข. นำไปหมักเพื่อผลิตเป็นปุ๋ยหมัก (Compost)  
 ค. นำไปหมักเพื่อผลิตไบโอแก๊ส (Digester)  
 ง. ไปเป็นเชื้อเพลิง โดยการเผา (Incineration) เพื่อให้พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า
2. ผลลัพธ์ที่ได้จากขบวนการในข้อ 1 จะเป็นดังนี้

ก. Landfill ได้ผลลัพธ์ คือ

- ก1. ประโยชน์จากการขายกากตะกอนเพื่อถมที่ดิน และเป็นปุ๋ยธรรมชาติ
- ก2. เกิดผลเสียคือการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และก๊าซอื่นๆ โดยขาดการควบคุม
- ก3. ต้องใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการขนส่งกากตะกอนจาก WWTP ไปยังสถานที่ฝังกลบ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลนอกจากเกิดค่าใช้จ่ายแล้ว ยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ข. Compost ได้ผลลัพธ์ คือ

- ข1. ประโยชน์จากการขายปุ๋ยหมัก
- ข2. เกิดผลเสียคือการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และก๊าซอื่นๆ จากขบวนการหมักกองปุ๋ย
- ข3. ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยหมัก ซึ่งเป็นปุ๋ยชีวภาพ แทนการใช้ปุ๋ยเคมี



รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงแนวคิดของแบบจำลองในการนำกากตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์

ค. Digester ได้ผลลัพธ์ คือ

- ค1. ประโยชน์จากการขายก๊าซชีวภาพ ที่ได้จากขบวนการหมัก ซึ่งสามารถขายก๊าซได้โดยตรง หรือ นำก๊าซไปผลิตเป็นความร้อน หรือ เป็นกระแสไฟฟ้า เพื่อขายกระแสไฟฟ้าต่อไปอีก
- ค2. ประโยชน์จากการขายปุ๋ย ซึ่งเป็นกากที่เหลือจากขบวนการหมัก
- ค3. ลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และ ก๊าซอื่นๆ เพราะเป็นการหมักในระบบปิดและขบวนการย่อยสลายแบบแอนาโรบิก ช่วยลดปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ

ง. Incineration ได้ผลลัพธ์ คือ

- ง1. ประโยชน์จากการขายพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผา ซึ่งสามารถขายได้โดยตรง หรือ นำพลังงานความร้อนไปผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อขายกระแสไฟฟ้าต่อไปอีก
- ง2. ประโยชน์จากการขายเถ้ากากตะกอนที่เหลือจากการเผา
- ง3. เกิดผลเสียคือการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ จากขบวนการเผา

#### 4.5.2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ตัดสินใจในการบริหารจัดการกากตะกอนน้ำเสีย มี 2 ข้อคือ

1. การเลือกตัดสินใจบริหารจัดการกากตะกอนน้ำเสียให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด
2. ในขณะเดียวกัน การตัดสินใจบริหารจัดการกากตะกอนน้ำเสียนั้น ต้องให้ได้ค่า การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลน้อยที่สุด

##### 4.5.2.1 การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

ตัวแปรตัดสินใจ หรือ ตัวแปรออกแบบของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 นิยามตัวแปรตัดสินใจ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$CDE_{Total}$	ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (CDE) ทั้งหมด	ตัน
$Benefit_{Total}$	ผลตอบแทนทั้งหมด	บาท

##### 4.5.2.2 การกำหนดตัวแปรอิสระ (Independent Variable)

ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.3 4.6 4.7 และ 4.10 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการ แสดงดังตารางที่ 4.4 4.8 และ 4.11 โดยมีความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.5 4.8 และ 4.12

ตารางที่ 4.3 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ  $CDE_{Total}$

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Elec^{External}$	ปริมาณไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า	KWh
$Solid^{Landfill}$	ปริมาณ ตะกอนน้ำเสีย(Solid)ไปฝังกลบ (Landfill)	ตัน
$Elec^{Plant Biogas}$	ปริมาณ การใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ใช้ใน WWTP	KWh
$Elec^{Sell Biogas}$	ปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ขายคืนให้การไฟฟ้า	KWh
$Elec^{Plant Heat}$	ปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก ความร้อน(Heat) ในขบวนการ Incineration ที่ใช้ใน WWTP	KWh
$Elec^{Sell Heat}$	ปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Heat ที่ขายคืนให้การไฟฟ้า	KWh
$Biogas_{NG}$	ปริมาณก๊าซ NG ที่ได้จากขบวนการผลิต Biogas	$m^3$
$Solid^{Sell Fertilizer}$	ปริมาณ ตะกอนน้ำเสียไปผลิตปุ๋ย (Fertilizer) เพื่อจำหน่าย	ตัน

ตารางที่ 4.4 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ  $CDE_{Total}$

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{CO_2}^{Elec}$	สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้กระแสไฟฟ้า	ตัน/KWh
$f_{CO_2}^{Transport}$	สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล	ตัน/ตัน
$f_{CO_2}^{NG}$	สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ก๊าซ NG	ตัน/ $m^3$
$f_{CO_2}^{Fertilizer}$	สัมประสิทธิ์การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยหมัก	ตัน/ตัน

ตารางที่ 4.5 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรสำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ  $CDE_{Total}$

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{CO_2}^{Elec} Elec^{External}$	ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (CDE)ที่เพิ่มขึ้นจากการใช้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า	ตัน
$f_{CO_2}^{Transport} Solid^{Landfill}$	ปริมาณ CDE ที่เพิ่มขึ้นจากการขนส่งตะกอนน้ำเสีย (Solid)ไปฝังกลบ (Landfill)	ตัน
$f_{CO_2}^{Elec} Elec^{Plant Biogas}$	ปริมาณ CDE ที่ลดลงจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ใน WWTP	ตัน
$f_{CO_2}^{Elec} Elec^{Sell Biogas}$	ปริมาณ CDE ที่ลดลงจากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ให้การไฟฟ้า	ตัน
$f_{CO_2}^{Elec} Elec^{Plant Heat}$	ปริมาณ CDE ที่ลดลงจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก ความร้อน(Heat) ในขบวนการ Incineration ใน WWTP	ตัน
$f_{CO_2}^{Elec} Elec^{Sell Heat}$	ปริมาณ CDE ที่ลดลงจากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Heat	ตัน
$f_{CO_2}^{NG} Biogas_{NG}$	ปริมาณ CDE ที่ลดลงจากการใช้ก๊าซ NG ที่ได้จาก ขบวนการผลิต Biogas	ตัน
$f_{CO_2}^{Fertilizer} Solid^{Sell Fertilizer}$	ปริมาณ CDE ที่ลดลงจากการขายปุ๋ยหมักที่ได้จากนำตะกอนน้ำเสียไปผลิตปุ๋ย (Fertilizer)	ตัน

ตารางที่ 4.6 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปรตัดสินใจ  $Benefit_{Total}$

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Revenues	รายรับ	บาท
Costs	รายจ่าย	บาท

ตารางที่ 4.7 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปร Revenues

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Solid_{Fertilizer}^{Sell}$	ปริมาณ Solid ไปผลิต Fertilizer เพื่อขาย	ตัน
$Elec_{Biogas}^{Sell}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อขาย	KWh
$Elec_{Heat}^{Sell}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อขาย	KWh
$Biogas_{NG}$	ปริมาณ Biogas ที่ขายเป็นก๊าซ NG	$m^3$

ตารางที่ 4.8 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการ ตัวแปร Revenues

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{Fertilizer}^{Sell}$	ราคาขายปุ๋ย	บาท/ตัน
$f_{Elec}^{Sell}$	ราคาขายกระแสไฟฟ้า	บาท/ KWh
$f_{NG}^{Sell}$	ราคาขายก๊าซ NG	บาท/ $m^3$

ตารางที่ 4.9 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรสำหรับสมการ ตัวแปร Revenues

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{Fertilizer}^{Sell} Solid_{Fertilizer}^{Sell}$	รายได้จากการขายปุ๋ยที่ได้จากขบวนการนำ Solid ไปผลิต Fertilizer	บาท
$f_{Elec}^{Sell} Elec_{Biogas}^{Sell}$	รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas	บาท
$f_{Elec}^{Sell} Elec_{Heat}^{Sell}$	รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Heat	บาท
$f_{NG}^{Sell} Biogas_{NG}$	รายได้จากการขายก๊าซ NG ที่ได้จากขบวนการผลิต Biogas	บาท

ตารางที่ 4.10 นิยามตัวแปรอิสระสำหรับสมการ ตัวแปร Costs

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Solid_{Biogas}$	ปริมาณ Solid ที่ไปผลิต Biogas	ตัน
$Solid_{Heat}$	ปริมาณ Solid ที่ไปผลิต Heat	ตัน
$Elec^{External}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า	KWh
$E_{Biogas}^{Plant}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อใช้ใน WWTP	KWh

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$E_{\text{Biogas}}^{\text{Sell}}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อขาย	KWh
$E_{\text{Heat}}^{\text{Plant}}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อใช้ใน WWTP	KWh
$E_{\text{Heat}}^{\text{Sell}}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อขาย	KWh
$\text{Solid}_{\text{Landfill}}$	ปริมาณ Solid ที่นำไป Landfill	ตัน
$\text{Solid}_{\text{Fertilizer}}$	ปริมาณ Solid ที่นำไปผลิตปุ๋ยหมัก	ตัน

ตารางที่ 4.11 นิยามพารามิเตอร์สำหรับสมการ ตัวแปร Costs

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{\text{Biogas}}^{\text{Produce}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิต Biogas จากขบวนการหมักตะกอนน้ำเสีย	บาท/ตัน
$f_{\text{Heat}}^{\text{Produce}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิต ความร้อนจากขบวนการเผาตะกอนน้ำเสีย	บาท/ตัน
$f_{\text{Elec}}^{\text{Cost}}$	ราคาค่ากระแสไฟฟ้า	บาท/KWh
$f_{\text{Elec}}^{\text{Generate}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน	บาท/KWh
$f_{\text{Solid}}^{\text{Transport}}$	อัตราค่าขนส่ง Solid ไป Landfill	บาท/ตัน
$f_{\text{Solid}}^{\text{Landfill}}$	อัตราค่าใช้จ่ายในขบวนการ Landfill	บาท/ตัน
$f_{\text{Fertilizer}}^{\text{Compost}}$	ค่าใช้จ่ายในขบวนการนำ Solid ไปผลิตปุ๋ยหมัก	บาท/ตัน

ตารางที่ 4.12 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรสำหรับสมการ ตัวแปร Costs

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{\text{Biogas}}^{\text{Produce}} \text{Solid}_{\text{Biogas}}$	ต้นทุนจากขบวนการนำ Solid ไปผลิต Biogas	บาท
$f_{\text{Heat}}^{\text{Produce}} \text{Solid}_{\text{Heat}}$	ต้นทุนจากขบวนการนำ Solid ไปผลิต Heat	บาท
$f_{\text{Elec}}^{\text{Cost}} \text{Elec}^{\text{External}}$	ค่าซื้อกระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า	บาท
$f_{\text{Elec}}^{\text{Generate}} E_{\text{Biogas}}^{\text{Plant}}$	ต้นทุนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อใช้ใน WWTP	บาท
$f_{\text{Elec}}^{\text{Generate}} E_{\text{Biogas}}^{\text{Sell}}$	ต้นทุนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อขาย	บาท
$f_{\text{Elec}}^{\text{Generate}} E_{\text{Heat}}^{\text{Plant}}$	ต้นทุนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อใช้ใน WWTP	บาท
$f_{\text{Elec}}^{\text{Generate}} E_{\text{Heat}}^{\text{Sell}}$	ต้นทุนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อขาย	บาท
$f_{\text{Solid}}^{\text{Transport}} \text{Solid}_{\text{Landfill}}$	ค่าขนส่ง Solid ไป Landfill	บาท
$f_{\text{Solid}}^{\text{Landfill}} \text{Solid}_{\text{Landfill}}$	ค่าใช้จ่ายในขบวนการ Landfill	บาท
$f_{\text{Fertilizer}}^{\text{Compost}} \text{Solid}_{\text{Fertilizer}}$	ค่าใช้จ่ายในขบวนการนำ Solid ไปผลิตปุ๋ยหมัก	บาท

### 4.5.2.3 การสร้างสมการ

สามารถเขียนสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

#### ก. สมการการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (Carbon Dioxide Equivalent, CDE)

สามารถเขียนสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลได้ตั้งสมการ (4.2) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ตั้งสมการ (4.3)

CDE ทั้งหมด = CDE จากการใช้กระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า(เพราะเป็นขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น น้ำมัน ถ่านหิน) + CDE จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการขนส่งตะกอนน้ำเสียไป Landfill - CDE ที่ลดลงจาก การนำกระแสไฟฟ้าจากขบวนการ Biogas มาใช้ในโรงงาน(เพราะเป็นขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ลด CDE) - CDE ที่ลดลงจาก การขายกระแสไฟฟ้าที่เหลือจากขบวนการ Biogas ให้การไฟฟ้า - CDE ที่ลดลงจากการนำกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากขบวนการ Incineration (Heat) มาใช้ในโรงงาน - CDE ที่ลดลงจาก การขายกระแสไฟฟ้าที่เหลือจากขบวนการ Incineration ให้การไฟฟ้า - CDE ที่ลดลงจาก การใช้ก๊าซ NG จากขบวนการ Biogas - CDE ที่ลดลงจาก การขายปุ๋ยหมัก

$$CDE_{Total} = f_{CO_2}^{Elec} Elec^{External} + f_{CO_2}^{Transport} Solid_{Landfill} - f_{CO_2}^{Elec} (Elec^{Plant}_{Biogas} + Elec^{Sell}_{Biogas} + Elec^{Plant}_{Heat} + Elec^{Sell}_{Heat}) - f_{CO_2}^{NG} Biogas_{NG} - f_{CO_2}^{Fertilizer} Solid^{Sell}_{Fertilizer} \quad \text{Ton} \quad (4.3)$$

#### ข. สมการผลตอบแทน

สามารถเขียนสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์รายรับได้ตั้งสมการ (4.4) (4.6) และ (4.8) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ตั้งสมการ (4.5) (4.7) และ (4.9)

$$\text{ผลตอบแทน} = \text{รายรับ} - \text{รายจ่าย} \quad (4.4)$$

$$Benefit_{Total} = Revenues - Costs \quad \text{Baht} \quad (4.5)$$

โดยที่

รายรับ = รายได้จากการขายปุ๋ยที่ได้จากการนำตะกอนน้ำเสียไปผลิตปุ๋ยหมัก + รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าจากขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas และ Incineration + รายได้จากการขายก๊าซ NG จากขบวนการ Biogas

$$Revenues = f_{Fertilizer}^{sell} Solid^{Sell}_{Fertilizer} + f_{Elec}^{sell} (Elec^{Sell}_{Biogas} + Elec^{Sell}_{Heat}) + f_{NG}^{sell} Biogas_{NG} \quad (4.7)$$

รายจ่าย = ต้นทุนจากขบวนการนำตะกอนน้ำเสียไปผลิต Biogas + ต้นทุนจากขบวนการนำตะกอนน้ำเสียไปผลิตความร้อนจากขบวนการ Incineration + ค่าซื้อกระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า + ต้นทุนจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากขบวนการ (ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อใช้ในโรงงาน + ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Biogas เพื่อขาย + ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อใช้ในโรงงาน + ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก Heat เพื่อขาย) + ค่าขนส่งตะกอนน้ำเสียไป Landfill + ค่าใช้จ่ายในขบวนการ Landfill + ค่าใช้จ่ายในขบวนการผลิตปุ๋ยหมัก (4.8)

$$\begin{aligned} \text{Costs} = & f_{\text{Biogas}}^{\text{Produce Solid}} \text{Solid}_{\text{Biogas}} + f_{\text{Heat}}^{\text{Produce Solid}} \text{Solid}_{\text{Heat}} + f_{\text{Elec}}^{\text{Cost Elec}} \text{Elec}^{\text{External}} + f_{\text{Elec}}^{\text{Generate}} (E_{\text{Biogas}}^{\text{plant}} + \\ & E_{\text{Biogas}}^{\text{Sell}} + E_{\text{Heat}}^{\text{plant}} + E_{\text{Heat}}^{\text{Sell}}) + f_{\text{Solid}}^{\text{Transport}} \text{Solid}_{\text{Landfill}} + f_{\text{Solid}}^{\text{Landfill}} \text{Solid}_{\text{Landfill}} + \\ & f_{\text{Fertilizer}}^{\text{Compost}} \text{Solid}_{\text{Fertilizer}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

#### 4.5.3 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับตะกอนน้ำเสีย

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับตะกอนน้ำเสีย มี 5 ข้อคือ

1. การนำตะกอนน้ำเสียทั้งหมดไปใช้ในทั้ง 4 ขบวนการต้องไม่เกินปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิตได้ทั้งหมด
2. ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ทั้งหมด อยู่ระหว่างปริมาณที่ผลิตได้ต่อวันสูงสุดและต่ำสุด
3. ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Biogas อยู่ระหว่างปริมาณที่ใช้ได้สูงสุดและต่ำสุด
4. ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Heat อยู่ระหว่างปริมาณที่ใช้ได้สูงสุดและต่ำสุด
5. ต้องเลือกระหว่างการนำตะกอนน้ำเสียไปผลิต Biogas หรือ Heat

##### 4.5.3.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.13 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการ แสดงดังตารางที่ 4.14 โดยมีความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.13 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Solid

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$\text{Solid}_{\text{Total}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียทั้งหมด	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Landfill}}$	ตะกอนน้ำเสียที่ใช้ Land Fill	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Fertilizer}}$	ตะกอนน้ำเสียที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Biogas}}$	ตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิตไปโอแกส	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Heat}}$	ตะกอนน้ำเสียที่ใช้เผาเป็นเชื้อเพลิงผลิต Heat	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Total\_min}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิตได้ต่ำสุด	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Total\_max}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิตได้สูงสุด	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Biogas}}^{\text{Upper}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Biogas ได้สูงสุด	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Biogas}}^{\text{Lower}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Biogas ได้ต่ำสุด	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Heat}}^{\text{Upper}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Heat ได้สูงสุด	Dry tons
$\text{Solid}_{\text{Heat}}^{\text{Lower}}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Heat ได้ต่ำสุด	Dry tons

ตารางที่ 4.14 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Solid

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{Biogas}^{Solid}$	พารามิเตอร์การเลือกผลิต Biogas จาก Solid มีค่าเป็น Binary (1=เลือก, 0=ไม่เลือก)	-
$f_{Heat}^{Solid}$	พารามิเตอร์การเลือกผลิต Heat จาก Solid มีค่าเป็น Binary (1=เลือก, 0=ไม่เลือก)	-

ตารางที่ 4.15 ความหมายของผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Solid

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{Biogas}^{Solid} Solid_{Biogas}^{Upper}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิต Biogas ได้สูงสุด	Dry tons
$f_{Biogas}^{Solid} Solid_{Biogas}^{Lower}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิต Biogas ได้ต่ำสุด	Dry tons
$f_{Heat}^{Solid} Solid_{Heat}^{Upper}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิต Heat ได้สูงสุด	Dry tons
$f_{Heat}^{Solid} Solid_{Heat}^{Lower}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิต Heat ได้ต่ำสุด	Dry tons

#### 4.5.3.2 การสร้างสมการ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับ Solid สามารถอธิบายด้วยสมการ (4.10) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ตั้งสมการ (4.11) ถึง สมการ (4.21)

$$\text{ปริมาณตะกอนน้ำเสียทั้งหมด} = \text{ตะกอนน้ำเสียที่ใช้ Land Fill} + \text{ตะกอนน้ำเสียที่ใช้ทำปุ๋ยหมัก} + \text{ตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิตไบโอแก๊ส} + \text{ตะกอนน้ำเสียที่ใช้เผาเป็นเชื้อเพลิง} \quad (4.10)$$

$$Solid_{Total} = Solid_{Landfill} + Solid_{Fertilizer} + Solid_{Biogas} + Solid_{Heat} \quad dt \quad (4.11)$$

ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่นำไปใช้งานทั้งหมด อยู่ระหว่างปริมาณตะกอนน้ำเสียสูงสุดและต่ำสุดที่ได้จาก WWTP

$$Solid_{Total\_min} \leq Solid_{Total} \leq Solid_{Total\_max} \quad dt \quad (4.12)$$

ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้ได้

$$Solid_{Biogas} \leq f_{Biogas}^{Solid} Solid_{Biogas}^{Upper} \quad dt \quad (4.13)$$

$$Solid_{Biogas} \geq f_{Biogas}^{Solid} Solid_{Biogas}^{Lower} \quad dt \quad (4.14)$$

ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้เผาเป็นเชื้อเพลิง อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดที่ใช้ได้

$$Solid_{Heat} \leq f_{Heat}^{Solid} Solid_{Heat}^{Upper} \quad dt \quad (4.15)$$

$$Solid_{Heat} \geq f_{Heat}^{Solid} Solid_{Heat}^{Lower} \quad dt \quad (4.16)$$

ภาคตะกอนที่นำไปใช้ทำไบโอแกส กับ ใช้เผาเป็นเชื้อเพลิงต้องเลือกอย่างใดอย่างหนึ่ง เพราะปกติในการลงทุน จะเลือกลงทุนอย่างใดอย่างหนึ่งจะคุ้มค่ากว่า เพราะโรงงานทั้ง 2 ลักษณะนี้ใช้เงินลงทุนสูง หากลงทุนทั้ง 2 โรงงานจะไม่คุ้มค่าดำเนินการและค่าต้นทุนแปรผัน

$$f_{Biogas}^{Solid} + f_{Heat}^{Solid} = 1 \quad (4.17)$$

$$f_{Biogas}^{Solid} \in \{0,1\} \quad (4.18)$$

$$f_{Heat}^{Solid} \in \{0,1\} \quad (4.19)$$

ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ Landfill คือปริมาณตะกอนน้ำเสียที่เหลือ จากนำไปผลิตไบโอแกส เผาเป็นเชื้อเพลิง และ ทำปุ๋ยหมัก

$$Solid_{Landfill} \leq Solid_{Total} - Solid_{Biogas} - Solid_{Heat} - Solid_{Fertilizer} \quad dt \quad (4.20)$$

ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ ทำปุ๋ยหมัก คือปริมาณตะกอนน้ำเสียที่เหลือ จากนำไปผลิตไบโอแกส เผาเป็นเชื้อเพลิง และ Landfill

$$Solid_{Fertilizer} \leq Solid_{Total} - Solid_{Biogas} - Solid_{Heat} - Solid_{Landfill} \quad dt \quad (4.21)$$

#### 4.5.4 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับไบโอแกสที่ผลิตขึ้น

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับ Biogas มี 2 ข้อคือ

1. ปริมาณ Biogas ที่ผลิตจากตะกอนน้ำเสีย จะถูกนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า และ ใช้เป็นก๊าซ NG
2. ปริมาณไบโอแกสที่ขายเป็นก๊าซ NG (Natural Gas) ต้องไม่เกินปริมาณไบโอแกสที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสีย

##### 4.5.4.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการ แสดงดังตารางที่ 4.17 โดยมีความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.16 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Biogas

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Solid_{Biogas}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ใช้ผลิต Biogas	Dry tons
$Biogas_{Elec}$	ปริมาณไบโอแกสที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า	$m^3$
$Biogas_{NG}$	ปริมาณไบโอแกสที่ขายเป็นก๊าซ NG	$m^3$

ตารางที่ 4.17 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Biogas

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{Biogas}$	สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแกสจากตะกอนน้ำเสีย	$m^3 / \text{Dry tons}$
$f_{NG}^{Biogas}$	สัมประสิทธิ์ไบโอแกสที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสียส่วนที่ขายเป็นก๊าซ NG	$m^3 / \text{Dry tons}$

ตารางที่ 4.18 ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Biogas

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{Biogas} \text{Solid}_{Biogas}$	ปริมาณไบโอแกสจากตะกอนน้ำเสีย	$m^3$
$f_{NG}^{Biogas} \text{Solid}_{Biogas}$	ปริมาณไบโอแกสที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสียที่ขายเป็นก๊าซ NG	$m^3$

#### 4.5.4.2 การสร้างสมการ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับ Biogas สามารถอธิบายด้วยสมการ (4.22) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (4.23) ถึง สมการ (4.24)

ปริมาณไบโอแกสจากตะกอนน้ำเสีย = ปริมาณไบโอแกสที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า + ปริมาณไบโอแกสที่ขายเป็นก๊าซ NG (4.22)

$$f_{Biogas} \text{Solid}_{Biogas} = Biogas_{Elec} + Biogas_{NG} \quad m^3 \quad (4.23)$$

ปริมาณไบโอแกสที่ขายเป็นก๊าซ NG (Natural Gas) ต้องไม่เกินปริมาณไบโอแกสที่ผลิตได้จากตะกอนน้ำเสีย

$$Biogas_{NG} \leq f_{NG}^{Biogas} \text{Solid}_{Biogas} \quad m^3 \quad (4.24)$$

#### 4.5.5 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับปุ๋ยหมักที่ผลิตขึ้น

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับปุ๋ยหมัก มี 1 ข้อคือ

1. ปุ๋ยหมักที่ขายทั้งหมด มาจากขบวนการนำตะกอนน้ำเสียไปผลิตปุ๋ยหมัก กับ ปุ๋ยที่ได้จากขบวนการผลิต Biogas จากตะกอนน้ำเสีย

##### 4.5.5.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการ แสดงดังตารางที่ 4.20 โดยมีความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.19 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Fertilizer

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Solid_{Biogas}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ไปผลิต Biogas	Dry Tons
$Solid_{Fertilizer}$	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ไปผลิต ปุ๋ย	Dry Tons
$Solid_{Fertilizer}^{Sell}$	ปริมาณปุ๋ยหมักที่ขายทั้งหมด	Dry Tons

ตารางที่ 4.20 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Fertilizer

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{Fertilizer}$	สัดส่วนปุ๋ยที่ได้จากขบวนการผลิต Biogas	ตัน/ตัน

ตารางที่ 4.21 ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Fertilizer

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{Fertilizer}Solid_{Biogas}$	ปริมาณปุ๋ยที่ได้จากตะกอนน้ำเสียไปผลิต Biogas	Dry Tons

#### 4.5.5.2 การสร้างสมการ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับ Fertilizer สามารถอธิบายด้วยสมการ (4.25) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (4.26)  
 ปริมาณปุ๋ยหมักที่ขาย = ปริมาณปุ๋ยที่ได้จากตะกอนน้ำเสีย + ปุ๋ยที่ได้จากขบวนการผลิตไบโอแกส(4.25)

$$f_{Fertilizer}Solid_{Biogas} + Solid_{Fertilizer} = Solid_{Fertilizer}^{Sell} \quad dt \quad (4.26)$$

#### 4.5.6 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับกระแสไฟฟ้ามี 3 ข้อคือ

1. กระแสไฟฟ้าที่นำมาใช้ในโรงบำบัดน้ำเสีย มาจากกระแสไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าผลิตจาก Biogas และ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Heat
2. กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ส่วนหนึ่งนำไปใช้ใน โรงบำบัดน้ำเสีย ส่วนหนึ่งนำไปขาย
3. กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Heat ส่วนหนึ่งนำไปใช้ใน โรงบำบัดน้ำเสีย ส่วนหนึ่งนำไปขาย

##### 4.5.6.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.22 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการ แสดงดังตารางที่ 4.23 โดยมีความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.22 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Elec.

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Plant_{Elec}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน	kWh
$Elec^{External}$	ปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า	kWh

ตารางที่ 4.22 (ต่อ)

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Elec_{Biogas}^{Plant}$	กระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Biogas ส่วนที่นำมาใช้ในโรงงาน	kWh
$Elec_{Heat}^{Plant}$	กระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Heat เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนที่นำมาใช้ในโรงงาน	kWh
$Elec_{Biogas}^{Sell}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ส่วนที่ขาย	kWh
$Biogas_{Elec}$	ปริมาณ Biogas ที่ผลิตกระแสไฟฟ้า	m <sup>3</sup>
$Elec_{Heat}^{Sell}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Heat ส่วนที่ขาย	kWh
$Solid_{Heat}$	ปริมาณ Solid ที่นำมาผลิต Heat	Dry tons

ตารางที่ 4.23 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Elec.

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{Biogas}^{Elec}$	สัมประสิทธิ์กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก Biogas	kWh/m <sup>3</sup>
$f_{Heat}^{Elec}$	สัมประสิทธิ์กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก Heat	kWh/Dry tons

ตารางที่ 4.24 ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Elec.

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{Biogas}^{Elec} Biogas_{Elec}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas	kWh
$f_{Heat}^{Elec} Solid_{Heat}$	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Heat	kWh

#### 4.5.6.2 การสร้างสมการ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับ Elec. สามารถอธิบายด้วยสมการ (4.27) (4.29) และ (4.31) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (4.28) (4.30) และ (4.32)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน ไม่เกินจาก ปริมาณ กระแสไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า + กระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Biogas ส่วนที่นำมาใช้ในโรงงาน + กระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเผาตะกอนน้ำเสีย เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนที่นำมาใช้ในโรงงาน (4.27)

$$Plant_{Elec} \leq Elec^{External} + Elec_{Biogas}^{Plant} + Elec_{Heat}^{Plant} \quad \text{kWh (4.28)}$$

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas = ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Biogas ส่วนที่นำมาใช้ในโรงงาน + ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จาก Biogas ส่วนที่ขายให้การไฟฟ้า (4.29)

$$Elec_{Biogas}^{Plant} + Elec_{Biogas}^{Sell} = f_{Biogas}^{Elec} Biogas_{Elec} \quad \text{kWh (4.30)}$$

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากการเผาตะกอนน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิง = ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเผาตะกอนน้ำเสียส่วนที่นำมาใช้ในโรงงาน + ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเผาตะกอนน้ำเสียส่วนที่ขายให้การไฟฟ้า (4.31)

$$Elec_{Heat}^{Plant} + Elec_{Heat}^{Sell} = f_{Heat}^{Elec} Solid_{Heat} \quad \text{KWh (4.32)}$$

#### 4.5.7 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับพลังงาน

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับกระแสไฟฟ้ามี 1 ข้อคือ

1. พลังงานที่ใช้ทั้งหมด เท่ากับพลังงานที่ใช้ในการขนส่งกากตะกอนไป Landfill และ พลังงานจากการซื้อกระแสไฟฟ้าจากการไฟฟ้า

##### 4.5.7.1 การกำหนดตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.25 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมการ แสดงดังตารางที่ 4.26 โดยมีความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปร แสดงดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.25 นิยามตัวแปรอิสระเกี่ยวกับ Energy

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Energy <sub>Total</sub>	ปริมาณพลังงานภายนอกที่ใช้ทั้งหมด	KWh
Solid <sub>Landfill</sub>	ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่นำไป Landfill	Dry tons
Elec <sub>External</sub>	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า	KWh

ตารางที่ 4.26 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Energy

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{Energy}^{Transport}$	อัตราการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการขนส่งตะกอนน้ำเสียไป Landfill	KWh/Dry tons

ตารางที่ 4.27 ความหมายของผลคูณของพารามิเตอร์กับตัวแปรเกี่ยวกับ Energy

ผลคูณพารามิเตอร์กับตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$f_{Energy}^{Transport} Solid_{Landfill}$	ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการขนส่งตะกอนน้ำเสียไป Landfill	KWh

##### 4.5.7.2 การสร้างสมการ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับ Energy สามารถอธิบายด้วยสมการ (4.33) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (4.34)

ปริมาณพลังงานภายนอกที่ใช้ทั้งหมด = ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการขนส่งตะกอนน้ำเสียไป  
Landfill + ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้า (4.33)

$$Energy_{Total} = f_{Energy}^{Transport} Solid_{Landfill} + Elec^{External} \quad \text{KWh (4.34)}$$

ปริมาณทั้งหมดที่ใช้ในแบบจำลองนี้คิดเป็นต่อวัน เช่น ปริมาณตะกอนน้ำเสียที่ผลิตได้ต่อวัน  
(หน่วยเป็นตัน) รายรับที่ได้ทั้งหมดต่อวัน (หน่วยเป็นบาท)

#### 4.5.8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

สามารถกำหนดพารามิเตอร์ และ ค่าของพารามิเตอร์ได้ดัง ตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 พารามิเตอร์ และ ค่าของพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ความหมาย	ค่า	หน่วย
Solid_Total_min	= 80% ของ Solid Total	158.53 <sup>1</sup>	Dry Ton
Solid_Total_max	= 120% ของ Solid Total	237.79 <sup>1</sup>	Dry Ton
Solid_Upper_Biogas	Binary Value	1	-
Solid_Lower_Biogas	Binary Value	0	-
Solid_Upper_Heat	Binary Value	1	-
Solid_Lower_Heat	Binary Value	0	-
f_Biogas	Biogas Production Factor	339.94 [71]	m <sup>3</sup> / Dry tons
f_NG	Methane Production Factor	0.6 <sup>2</sup>	-
f_Solid_Fer	Class A Biosolids Production from Digester Factor	0.4838 [68]	Dry ton/Dry ton
f_Elec_Biogas	Electric Production from Biogas Factor	2.02 [66]	kWh/m <sup>3</sup>
f_Elec_Heat	Electric Production from Heat Factor	14.318	kWh/Dry tons
Plant_Electricity	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน	260,792	kWh
f_Transport_energy	อัตราการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการขนส่งตะกอนน้ำเสียไป Landfill	1.02	KWh/Dry tons
f_Elec_CO <sub>2</sub>	Factor used to calculate CO <sub>2</sub> emissions from electricity used.	0.00055 [69] ดูภาคผนวก ข	ตัน/KWh
f_Transport_CO <sub>2</sub>	Factor used to calculate CO <sub>2</sub> emissions from transport biosolids.	0.2 [70] ดูภาคผนวก ข	ตัน/ตัน

ตารางที่ 4.28 (ต่อ)

พารามิเตอร์	ความหมาย	ค่า	หน่วย
f_Fertilizer_CO <sub>2</sub>	Factor used to calculate CO <sub>2</sub> offset from used biosolids as fertilizer.	0.1 [70] ดู ภาคผนวก ข	ตัน/ตัน
f_NG_CO <sub>2</sub>	Factor used to calculate CO <sub>2</sub> offset from NG used	0.000056 [70] ดู ภาคผนวก ข	ตัน/ m <sup>3</sup>
f_Compost_Fertilizer	ค่าใช้จ่ายในขบวนการนำ Solid ไปผลิตปุ๋ยหมัก	1,228.44	บาท/ตัน
f_Landfill_Solid	อัตราค่าใช้จ่ายในขบวนการ Landfill	1,146.54 [73]	บาท/ตัน
f_Produce_Heat	สัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิต ความร้อนจากขบวนการเผาตะกอนน้ำเสีย	3,876.40 [73]	บาท/ตัน
f_Produce_Biogas	สัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิต Biogas จากขบวนการหมักตะกอนน้ำเสีย	2,000	บาท/ตัน
f_Transport_Solid	อัตราค่าขนส่ง Solid ไป Landfill	0.31	บาท/ตัน
f_Generate_Elec	สัมประสิทธิ์ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน	0.16 [71]	บาท/KWh
f_Cost_Elec	ราคาค่ากระแสไฟฟ้า	2 [58]	บาท/KWh
f_Price_Fertilizer	fertilizer market price	2,600 [64]	บาท/ตัน
f_Price_Elec	grid market price of sold electricity	2.5 [58]	บาท/kWh
f_Price_NG	ราคาก๊าซ NG	70.671[65]	บาท/m <sup>3</sup>
CDE_min	ปริมาณ CDE ต่ำสุด	300	Ton/วัน

<sup>1</sup> Solid Total = 198.16 Dry ton/day (ดูภาคผนวก ฉ)

<sup>2</sup> ไบโอดีแก๊ส (CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + trace gases) มีส่วนประกอบก๊าซอื่นๆ ดังนี้ : ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) 55-65%, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) 30-40%, และไอน้ำ 0-5%, และก๊าซอื่นๆ ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ H<sub>2</sub>S และ ก๊าซไฮโดรเจน H<sub>2</sub> [67] ดังนั้นในแบบจำลองจึงใช้ปริมาณก๊าซมีเทนในไบโอดีแก๊ส เท่ากับ 60%

#### 4.6 ผลและการวิเคราะห์ผล

จากสมการวัตถุประสงค์ สมการข้อจำกัด และ การกำหนดแปร ที่กำหนดในหัวข้อ 4.4 สามารถเขียนกำหนดตัวแปร และสมการของแบบจำลองโดยโปรแกรม GAMS เวอร์ชัน 24.7.1 ได้ดังแสดงในภาคผนวก ข. หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดของแบบจำลองด้วยโปรแกรม GAMS ดังแสดงผลการวิเคราะห์คำนวณของปัญหาการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียอย่างยั่งยืน ในภาคผนวก ข. และนำมาเขียนเป็นตารางแสดงรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 4.29

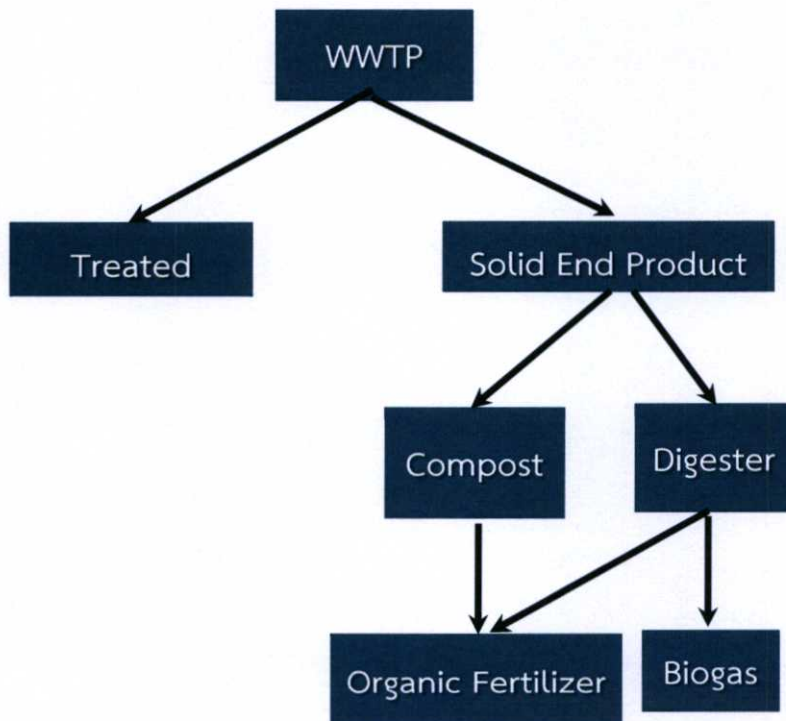
ตารางที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสีย

WWTP	Solid end product dry ton/day	Max Benefit Baht/day	Min CDE Ton/day
ทุ่งสองห้อง 1	0.79	-512,127	142.90
ทุ่งสองห้อง 2	0.29	-518,127	143.24
บางบัว	0.32	-517,827	143.22
รามอินทรา	0.16	-519,641	143.33
ห้วยขวาง	0.37	-517,097	143.18
ท่าทราย	0.39	-516,927	143.17
บางนา	0.31	-517,970	143.23
บ่อนไก่	0.09	-520,527	143.38
คลองเตย	0.17	-519,627	143.32
คลองจั่น	0.51	-515,441	143.09
หัวหมาก	0.30	-517,984	143.23
ร่มเกล้า	0.65	-513,784	142.99
สี่พระยา	4.04	-473,138	140.68
รัตนโกสินทร์	6.74	-440,723	138.83
ดินแดง	54.00	126,448	106.56
ช่องนนทรี	44.73	15,285	112.88
หนองแขม	32.49	-131,722	121.25
ทุ่งครุ	15.37	-337,218	132.94
จตุจักร	36.45	-84,163	118.54
โรงบำบัดน้ำเสียกลาง	198.16	1,856,475	8.10

จากผลการวิเคราะห์ แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดเลือกการย่อยสลายแบบแอนนาโรบิค (Biogas) และ การบริหารจัดการการทำปุ๋ยหมักจากตะกอนน้ำเสีย เพราะว่ามีค่าดำเนินการการบำบัดน้ำเสียต่ำสุด (คือ ผลตอบแทนสูงสุด) และ ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลสุทธิน้อย

ที่สุด (ดูรูปที่ 4.8) การย่อยสลายแบบแอนาโรบิก และการหมักปุ๋ยหมัก ถูกเลือกเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และปุ๋ยอินทรีย์ตามลำดับ ปริมาณน้ำเสีย และ กากตะกอนน้ำเสีย ในกรุงเทพฯ เป็นเหตุผลสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อการเลือกระบบบริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นก๊าซชีวภาพถูกผลิตขึ้นและก๊าซชีวภาพที่ผลิตกระแสไฟฟ้าถูกขายให้กับตลาดพลังงาน นอกจากผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์แล้วยังได้ผลตอบแทนทางสิ่งแวดล้อมในรูปของการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ตัวอย่างเช่น ที่โรงบำบัดน้ำเสียดินแดง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยสุทธิลดลงจาก 132 ตัน/วัน เป็น 106 ตัน/วัน และ ผลตอบแทนเพิ่มขึ้นทุกวัน

จากตารางที่ 4.29 เนื่องจากโรงบำบัดน้ำเสียขนาดเล็ก มีปริมาณตะกอนน้ำเสียปริมาณน้อย ทำให้รายได้ที่ได้จากการขายปุ๋ยหมักและก๊าซชีวภาพ (ที่เป็นผลผลิตของการกำจัดตะกอนน้ำเสียด้วยวิธี Compost และ Digester) น้อยกว่าต้นทุนดำเนินการในการกำจัดตะกอนน้ำเสียในส่วนที่เป็นเงินลงทุนคงที่ (Fix Cost) จึงทำให้ค่า Max Benefit ติดลบ และมีค่าเท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน กรณีของค่า CDE ก็เช่นเดียวกัน เนื่องจากในขบวนการกำจัดตะกอนน้ำเสีย ปริมาณตะกอนน้ำเสียมีปริมาณน้อย ทำให้ค่า CDE ที่ลดลง เนื่องจากการใช้ปุ๋ยหมักและ Biogas มีค่าน้อยกว่า CDE ที่เพิ่มขึ้นจากขบวนการกำจัดตะกอนน้ำเสีย (Fix CDE) จึงทำให้ได้ค่า CDE ออกมาเท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปริมาณตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง (จุดที่ได้ผลตอบแทนคุ้มกับค่า Fix Cost และ Fix CDE) จึงทำให้ได้รายได้เพิ่มขึ้นมากจน ค่า Max Benefit มีค่าเพิ่มขึ้น และได้ค่า CDE สุทธิมีค่าลดลง



รูปที่ 4.8 แผนภาพแบบจำลองในการนำกากตะกอนน้ำเสียกลับมาใช้ประโยชน์ที่ได้จากการวิเคราะห์

ในกรณีที่กรุงเทพมหานคร สร้างโรงบำบัดตะกอนน้ำเสียรวม โดยนำเอาตะกอนแห้งจากโรงบำบัดน้ำเสียทั้ง 19 แห่ง มาจัดการที่โรงบำบัดรวมนี้ จะมีปริมาณตะกอนแห้ง 198.16 ตันแห้ง/วัน ได้

ผลตอบแทนจากกำจัดตะกอนน้ำเสียด้วยวิธี ทำปุ๋ยหมัก และ หมักทำ Biogas เท่ากับ 1,856,475 บาท/วัน และมีค่า CDE เท่ากับ 8.10 ตัน/วัน

แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าเหมาะสม ของฟังก์ชัน 2 วัตถุประสงค์ ถูกใช้เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้ ปริมาณของตะกอนน้ำเสียจาก โรงบำบัดน้ำเสีย 19 แห่งในกรุงเทพฯ ถูกใช้เพื่อประมาณค่าชายแดนพาเรโต (Pareto Frontier) [50] ผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นแนวโน้มที่น่าสนใจซึ่งรายได้ของโรงบำบัดน้ำเสียลดลง ขณะที่ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าค่าดำเนินการเพิ่มขึ้น (หรือ รายได้ลดลง) ด้วยปริมาณกากตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้น แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ ให้ช่วงที่น่าสนใจของค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่คำนึงถึงรายได้ ช่วงของค่าแสดง ว่าค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในหน่วยตันต่อวัน และ โรงบำบัดน้ำเสียลดรายได้ลงในแต่ละวัน

วิทยานิพนธ์นี้เสนอ แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ สำหรับการบริหารจัดการน้ำเสียเพื่อหาค่าเหมาะสมของฟังก์ชัน 2 วัตถุประสงค์ : ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำสุด (รายได้สูงสุด) และ ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่ำสุด ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า โรงบำบัดน้ำเสียควรใช้ทั้งการย่อยสลายแบบแอนาโรบิก และ ขบวนการทำปุ๋ยหมัก เพื่อบริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ และได้ผลพลอยได้เชิงพาณิชย์ ได้แก่ ปุ๋ยอินทรีย์ และ ก๊าซชีวภาพ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ค่าดำเนินการเพิ่มขึ้น (หรือ รายได้ลดลง) ด้วยการเพิ่มของปริมาณ MSW นอกจากนี้ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมเพิ่มขึ้น พร้อมกับการเพิ่มค่าดำเนินการ (รายได้ลดลง) ผู้กำหนดนโยบายและผู้บริหารโรงบำบัดน้ำเสียถูกแนะนำให้ใช้ระบบย่อยสลายแบบแอนาโรบิก และ การหมักปุ๋ย เพื่อบริหารจัดการน้ำเสียในกรุงเทพฯ

## บทที่ 5

# การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลอง การหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดขยะ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ปัญหาการบริหารจัดการขยะ ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีผลมาจากการขยายตัวของขนาดเมือง การนำเสนอแนวทางการบริหารจัดการขยะอย่างยั่งยืน การนำแบบจำลองคณิตศาสตร์หาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์แบบเฟ้นสุ่ม เพื่อช่วยในการหาทางเลือกในการบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ ซึ่ง ได้ก่อให้เกิดอรรถประโยชน์ที่เหมาะสม คือ ได้ผลตอบแทนสูงสุด ในขณะเดียวกัน ก็ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และได้พลังงานจากก๊าซชีวภาพ

### 5.1 ปัญหาขยะของสังคมเมือง

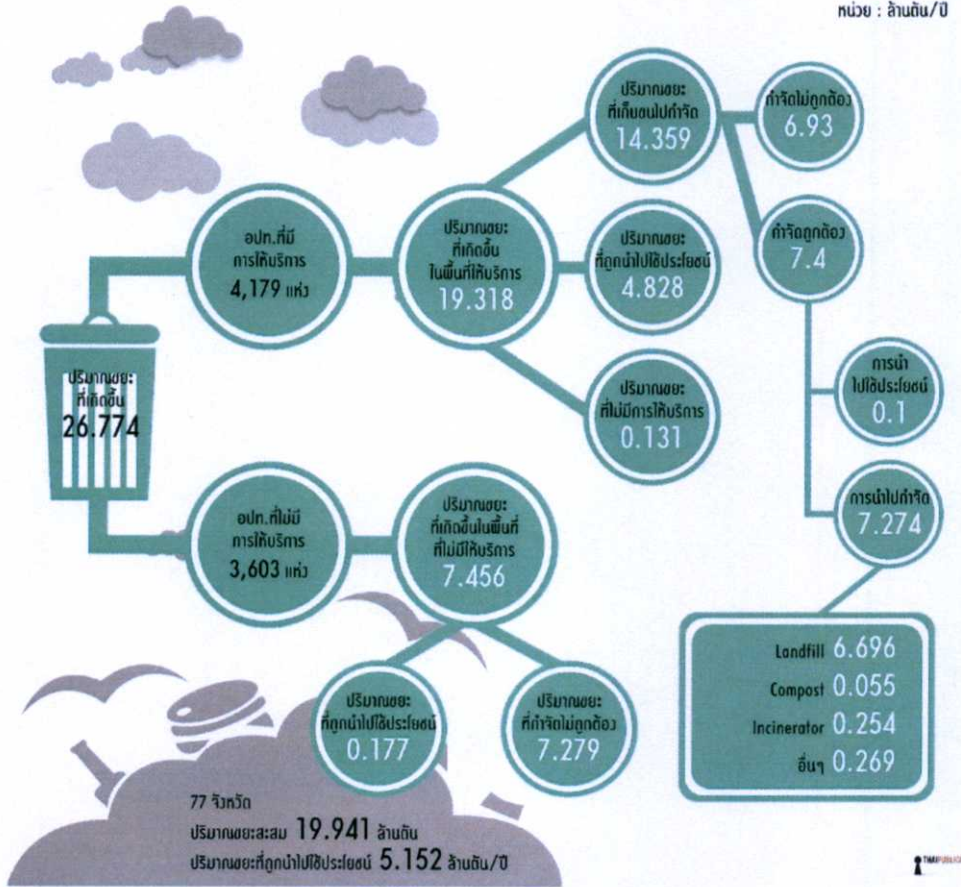
การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของประชากรโลก ส่งผลต่อการเกิดวิกฤตการณ์หลายอย่างที่ต้องทำการแก้ไขอย่างเร่งด่วน อาทิเช่น ปัญหาความไม่มั่นคงทางอาหาร การสูญสิ้นของทรัพยากรธรรมชาติ ปัญหามลพิษและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ฯลฯ ปัญหาเหล่านี้ทวีความรุนแรงมากขึ้นในเมืองหลวงและเมืองใหญ่ ๆ ในหลายประเทศเนื่องจากการขยายตัวของชุมชนเมือง และความหนาแน่นแออัดของประชากรอย่างไร้การควบคุม

ในปี 2556 [55] กรมควบคุมมลพิษสำรวจปริมาณขยะมูลฝอยทั่วประเทศจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจำนวน 7,782 แห่ง พบว่า ประเทศไทยมีปริมาณขยะมูลฝอยรวม 26.77 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีที่แล้ว 2 ล้านตัน โดยขยะมูลฝอยร้อยละ 46 มาจากองค์กรบริหารส่วนตำบล(อบต.) ร้อยละ 38 มาจากเทศบาล และร้อยละ 16 มาจากกรุงเทพ (ดูรูปที่ 5.1. ประกอบ) จากขยะมูลฝอยปริมาณ 26.77 ล้านตัน แบ่งเป็นปริมาณขยะมูลฝอยที่ถูกนำไปกำจัดแบบถูกต้อง จำนวน 7.2 ล้านตัน (ร้อยละ 27) ปริมาณขยะมูลฝอยที่กำจัดแบบไม่ถูกต้อง 6.9 ล้านตัน (ร้อยละ 26) ปริมาณขยะมูลฝอยที่ไม่ได้เก็บขนทำให้ตกค้างในพื้นที่ 7.6 ล้านตัน (ร้อยละ 28) และปริมาณขยะมูลฝอยที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ 5.1 ล้านตัน (ร้อยละ 19)

ปัจจุบันประเทศไทยมีสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยรวม 2,490 แห่ง (ดูรูปที่ 5.3. ประกอบ) แต่เป็นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบถูกต้องเพียง 466 แห่งเท่านั้นหรือคิดเป็นร้อยละ 19 ส่วนที่เหลืออีก ร้อยละ 81 นั้นเป็นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยไม่แบบถูกต้อง เช่น เทกองกลางแจ้ง เผาในที่โล่ง ลักลอบทิ้ง ฯลฯ ดังนั้นในปี 2556 ประเทศไทยจึงมีขยะมูลฝอยสะสม 19.9 ล้านตัน ซึ่งมีขนาดใหญ่เท่ากับ “ตึกโบหยก 2” จำนวน 103 ตึกเรียงต่อกัน [55]

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าในปัจจุบัน ประเทศไทยต้องเร่งดำเนินการบูรณาการในการบริหารจัดการการกำจัดขยะอย่างเร่งด่วน มิฉะนั้น จะส่งผลกระทบเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมในระดับท้องถิ่น และในภาพรวมระดับประเทศต่อไปในอนาคตอันใกล้ ปัญหาข้อจำกัดของสถานที่ฝังกลบอย่างถูกสุขลักษณะ (Sanitary Landfill) อันเป็นวิธีหลักในการกำจัดขยะมูลฝอย เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้ปัญหาขยะมูลฝอยเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญ และต้องการการบริหารจัดการอย่างเป็นระบบ การกำจัดขยะไม่ถูกวิธีจะก่อให้เกิดผลเสียต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมหลายประการ [56] ดังนี้

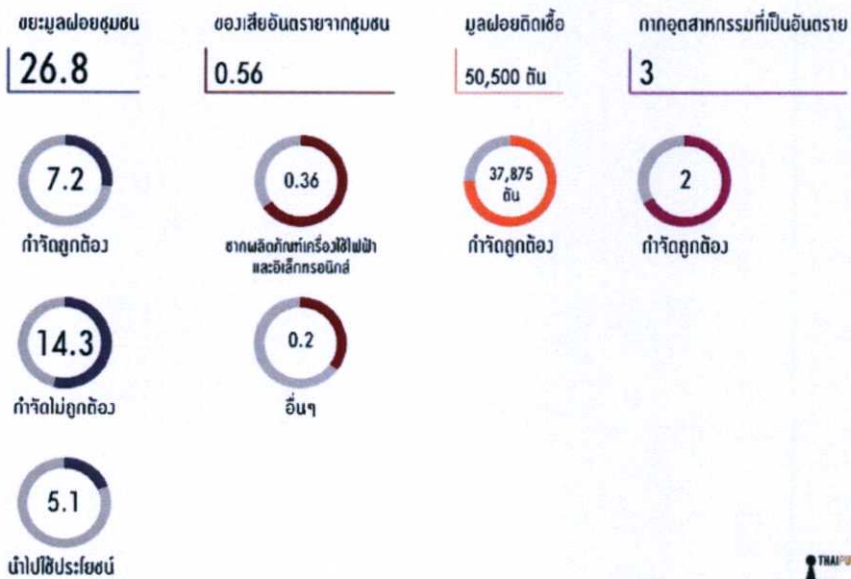
หน่วย : ล้านตัน/ปี



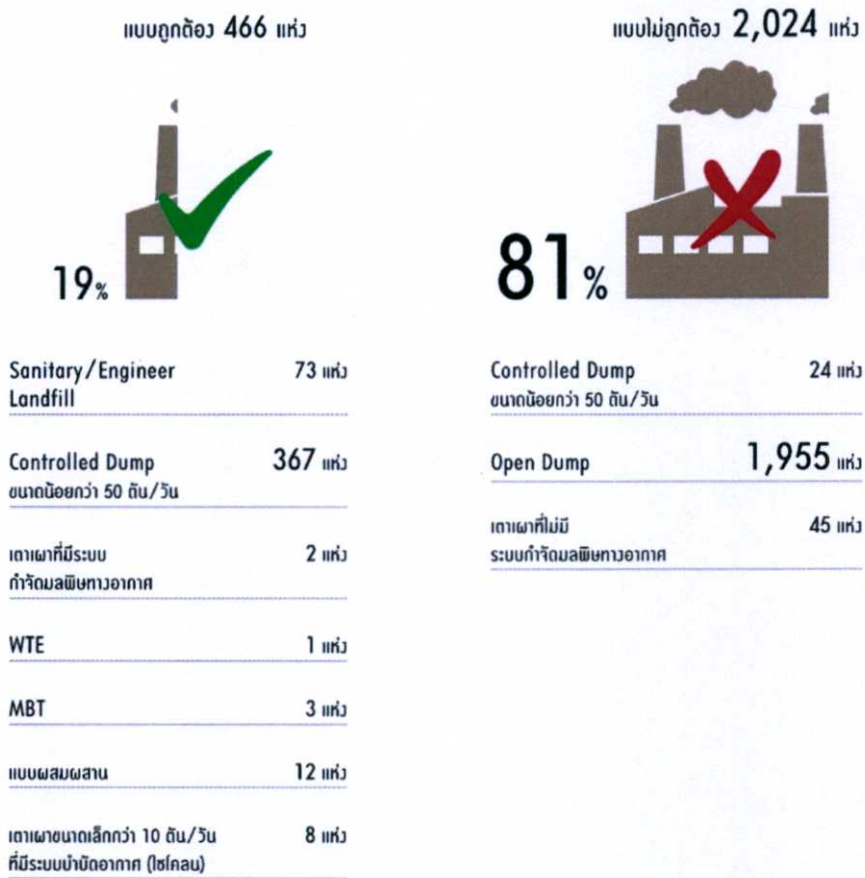
รูปที่ 5.1 การไหลของขยะมูลฝอยชุมชนปี พ.ศ. 2556 [55]

### สถานการณ์โดยรวมปี 2556

หน่วย : ล้านตัน



รูปที่ 5.2 จำแนกประเภทขยะชุมชนทั้งประเทศไทยปี พ.ศ. 2556 [55]



รูปที่ 5.3 สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยทั่วประเทศ 2,490 แห่ง [55]

- ทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่น่าพึงพอใจแก่ผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงรวมทั้งผู้พบเห็น โดยเฉพาะนักท่องเที่ยวชาวต่างชาติ
- เป็นแหล่งเพาะและแพร่เชื้อโรค โดยเฉพาะขยะติดเชื้อจากสถานพยาบาล และขยะเปียกที่แบคทีเรียทำหน้าที่ย่อยสลาย เชื้อโรคตามขยะจะแพร่ไปกับน้ำ แมลง หนู และสุนัขที่มากดมหรือคุ้ยเขี่ย เช่น เชื้อที่ทำให้เกิดโรคอหิวาต์ ไทฟอยด์และโรคบิด
- ทำให้ดินเสื่อมและเกิดมลพิษ เพราะจะทำให้พื้นดินสกปรกดินมีสภาพเป็นเกลือ ด่าง หรือกรด หรือมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในดิน ตลอดจนทำให้สมบัติทางกายภาพของดินเปลี่ยนแปลงไป เช่น โซเดียมทำให้เนื้อดินแตก่วน
- ทำลายแหล่งน้ำ
  - ขยะที่ตกในแหล่งน้ำลำคลอง และท่อระบายน้ำ จะทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน การไหลของน้ำไม่สะดวกจึงเกิดสภาวะน้ำท่วมได้ง่าย
  - ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำในลักษณะต่างๆ เช่น ทำให้น้ำเน่า น้ำเป็นพิษ น้ำที่มีเชื้อโรคและน้ำที่มีคราบน้ำมัน ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้อุปโภคบริโภค สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพ เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะพืชและสัตว์น้ำ
- ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เพราะการเผาขยะทำให้เกิดควันและซี้เถ้า การหมักหมมและเน่าสลายของขยะ จะก่อให้เกิดก๊าซพิษและกลิ่นเหม็น

6. ก่อความรำคาญและบั่นทอนสุขภาพของมนุษย์ เป็นผลจากการเกิดทัศนะจุจาด ก๊าซพิษกลิ่นเหม็น เป็นแหล่งเพาะเชื้อโรคตลอดจนการเกิดมลพิษทางน้ำและอากาศ
7. ทำให้เกิดอค์ศภัย เนื่องจากขยะหลายชนิดติดไฟได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อแห้ง

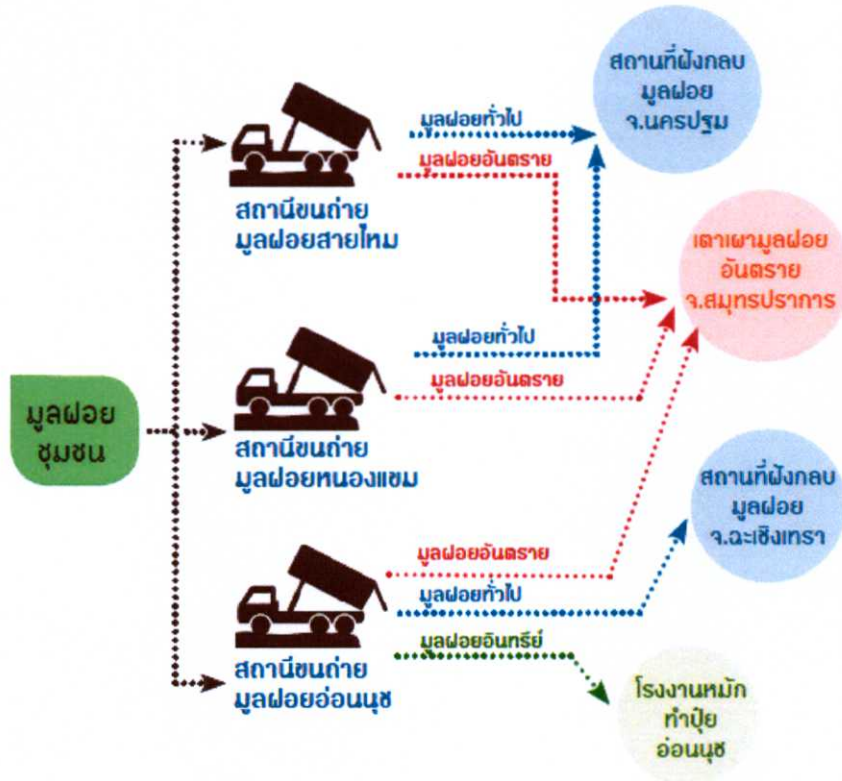
กรุงเทพมหานคร มีการเติบโตของประชากรอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับเมืองใหญ่อื่นๆ และประสบปัญหาด้านสังคม และ สิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของน้ำเสีย (มลพิษทางน้ำ) และขยะมูลฝอยในเมือง (Municipal Solid Waste, MSW) ก็เป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของคนเมืองที่ต้องทำการแก้ไข และ บริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ

ปัญหาขยะมูลฝอยในกรุงเทพฯ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2536 ถึง 2554 ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของประชากร [51] อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์เปิดเผยว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ MSW ในกรุงเทพฯ ลดลงจากปี พ.ศ. 2545 ถึง 2554 เนื่องจากการบริหารจัดการขยะมูลฝอยที่ดี [52]

ปริมาณ MSW ในกรุงเทพฯ จำนวนมาก ได้ถูกเก็บรวบรวมจากบ้านเรือน ชุมชน และธุรกิจห้างร้านต่างๆ แล้วทำการคัดแยก ก่อนจะถูก ขนส่งไปยังที่ทิ้งขยะ ที่ หนองแขม สายไหม อ่อนนุช ซึ่งเป็นโรงงานบริหารจัดการขยะ (Solid Waste Managing Plants, SWMPs) MSW ถูกรวบรวมและถูกขนส่งไปยังโรงบริหารจัดการขยะอ่อนนุช [53] ขยะมูลฝอยถูกคัดแยกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ขยะอินทรีย์ (เช่น เศษอาหาร เศษผลไม้ และ ไม้) ขยะทั่วไป (เช่น กระดาษ พลาสติก แก้ว และ โลหะ) และ ขยะมีพิษ ขยะอินทรีย์ถูกนำไปทำปุ๋ยหมักที่ภายในโรงงานที่อ่อนนุช ขณะที่ขยะอีก 2 ประเภทถูกขนส่งไปที่โรงงานขยะที่อื่นในจังหวัดข้างเคียงเพื่อกำจัด [54] (ดูรูปที่ 5.4) อย่างไรก็ตาม ค่าดำเนินการเนื่องจากระบบการจัดการในลักษณะนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าเชื้อเพลิงฟอสซิลสำหรับการขนส่งมีค่าสูงมาก ดังนั้น ถ้าหาก SWMP สามารถถูกนำมาบริหารจัดการให้เกิดรายได้จากการกำจัดขยะ เช่น ก๊าซชีวภาพ และ ปุ๋ยอินทรีย์ จากขบวนการย่อยสลายขยะ และ รายได้จากผลิตภัณฑ์รีไซเคิล จะมีผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการกำจัดขยะถูกลงมาก เพราะฉะนั้น การรีไซเคิล การนำกลับมาใช้ใหม่ การเผา และ ขบวนการหมักและย่อยสลายขยะ ก่อนขบวนการนำขยะไปกำจัด จึงน่าจะเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับผู้บริหารโรงงานกำจัดขยะ

ไม่แต่เพียงรายได้จากพลังงานทดแทน (ก๊าซชีวภาพ) ปุ๋ยอินทรีย์ ชี๊เถ้า และ ผลิตภัณฑ์รีไซเคิล แต่ยังช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกหลัก (Green House Gas, GHG) ก็เป็นประโยชน์อีกอย่างหนึ่งที่จะได้จากการบริหารจัดการ MSW ที่ดีด้วย

วัตถุประสงค์ของบทนี้ คือ เพื่อใช้แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบเฟ้นสุ่ม นำเสนอกลยุทธ์ที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางสำหรับ SWMP ในกรุงเทพฯ สำหรับนำขบวนการ MSW ประกอบการพิจารณาการดำเนินการ เพื่อเพิ่มรายรับ และลดการปลดปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> แบบจำลองได้ถูกประยุกต์ใช้กับการดำเนินการของ MSW เพื่อลดค่าใช้จ่าย (เพิ่มผลตอบแทน) และ ลดการปลดปล่อย CDE ให้น้อยที่สุด กลยุทธ์ที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ โรงงานบริหารจัดการขยะในจังหวัดอื่นได้เช่นกัน ส่วนที่เหลือของบทนี้ จะนำเสนอพารามิเตอร์ในการดำเนินการของโรงงานบริหารจัดการขยะ (Solid Waste Management Plant) การสร้างแบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายวัตถุประสงค์แบบเฟ้นสุ่ม และการวิเคราะห์ผล

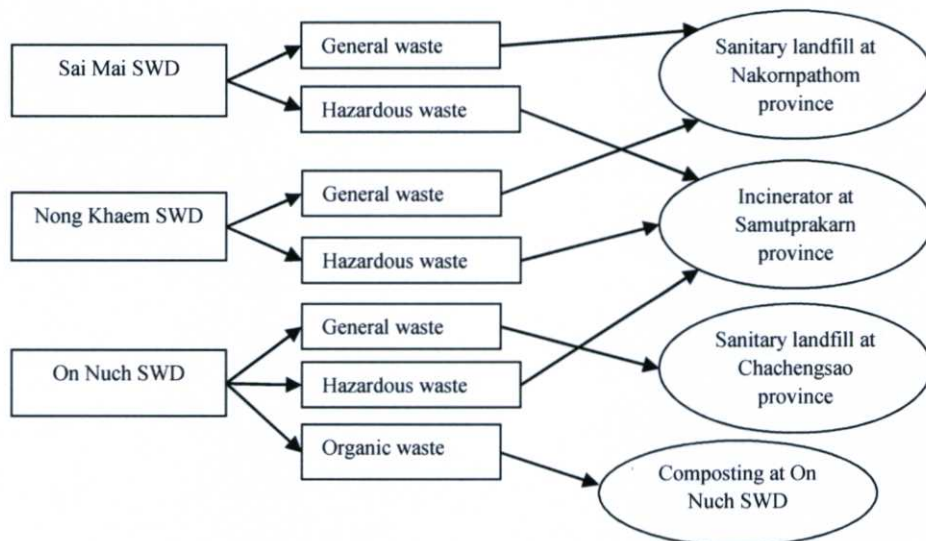


รูปที่ 5.4 การบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ

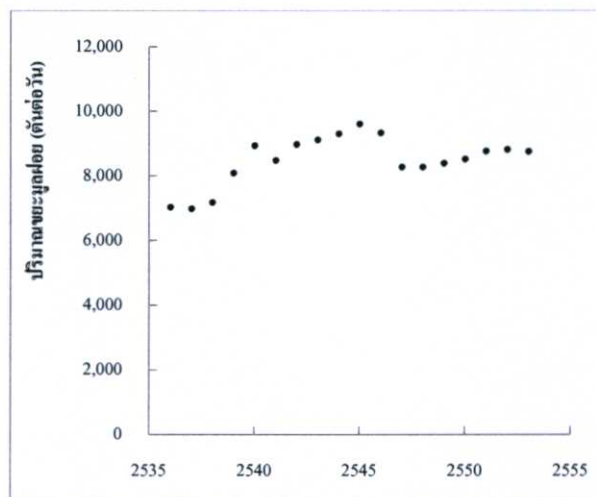
## 5.2 พารามิเตอร์ในการดำเนินการของโรงงานบริหารจัดการขยะ

### 5.2.1 โรงงานบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ

ในทุกวันขยะชุมชนจากครัวเรือนและแหล่งธุรกิจ จะถูกจัดเก็บ และ ขนส่งไปยังไปยังโรงบริหารจัดการขยะ 3 แห่งดังกล่าวข้างต้น ที่อยู่ชานเมืองกรุงเทพฯขยะเหล่านี้จะถูกนำมาคัดแยกประเภทเพื่อขนส่งไปกำจัดยังโรงกำจัดขยะในจังหวัดใกล้เคียง รูปที่ 5.5 แสดงการบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ ปริมาณของขยะมูลฝอยจำนวนมากดังกล่าว รวมทั้งการบริหารจัดการกำจัดขยะจำแนกตามชนิดของขยะ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการและกำจัดโดยรวมสูงตามไปด้วย แต่หากพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้ขยะเป็นแหล่งทรัพยากร เช่น การนำขยะกลับมาใช้ใหม่ การใช้ซ้ำ หรือแม้แต่การเปลี่ยนรูปขยะเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ปุ๋ยหมัก ก๊าซธรรมชาติ รวมถึงซีเมนต์เพื่อใช้ในการก่อสร้าง อาจจะช่วยให้อำนาจการบริหารจัดการมีรายได้เพิ่มขึ้น เห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 5.6 แนวโน้มของการเพิ่มปริมาณขยะมูลฝอยกลับคงที่หรือบางปีมีปริมาณลดลงนับจากปี 2546-2553 สาเหตุเนื่องมาจากมีรณรงค์การนำขยะกลับมาใช้ใหม่ (Recycle and Reuse) นอกจากนี้ประโยชน์จากการใช้ขยะเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติเช่น เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อเป็นวัตถุดิบในการก่อสร้าง เหล่านี้สามารถนำมาคำนวณการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้อีกด้วย



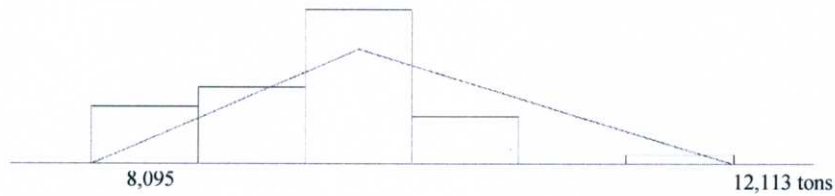
รูปที่ 5.5 การบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ [52]



รูปที่ 5.6 ปริมาณขยะมูลฝอยในกรุงเทพมหานคร จากปี 2535 ถึง 2553 [53]

### 5.2.2 ปริมาณขยะชุมชนและองค์ประกอบ

ปี พ.ศ. 2554 ถึง 2556 ประชากรในกรุงเทพฯ ทำให้เกิดขยะชุมชน ประมาณวันละ 8,095 ถึง 12,113 ตัน [54] เทคนิคความกลมกลืน (Goodness of Fit Technique) ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function, pdf) สำหรับจำนวนของ MSW ในกรุงเทพฯ [57] กราฟรูปร่างสามเหลี่ยมแสดงการกระจายตัวของข้อมูล MSW ในกรุงเทพฯ ดังรูปที่ 5.7 ข้อมูล MSW ที่ได้จากกราฟ (แทนค่าปริมาณ MSW ด้วย น้อย กลาง มาก) และค่าความน่าจะเป็นของค่าเหล่านี้ ถูกประมาณค่าจากหลักการ Three-point Probability ที่คำนวณที่ค่า เปอเซ็นต์ไทล์ (Percentiles) ที่ 30, 60 และ 100 MSW ที่เก็บจากบ้านเรือนและหน่วยธุรกิจในกรุงเทพฯ ประกอบด้วย ขยะอินทรีย์ 53.49% พลาสติก 20.12% กระดาษ 8.95% แก้ว 5.02% โลหะ 1.80% และ อื่นๆ 10.62% [58]



รูปที่ 5.7 สามเหลี่ยม pdf ของปริมาณ MSW ในกรุงเทพฯ [57]

อำนวยการ ทงสถิตย [58] ได้ทำการสำรวจประเภทขยะจากเทศบาลทั่วไปทั่วประเทศ ซึ่งสามารถพบได้ว่าขยะจากครัวเรือน มีสัดส่วนของขยะประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบเฉลี่ยของตัวอย่างขยะรวมในเทศบาลที่มีปริมาณมากกว่า 100 ตัน/วันและ 50-100 ตัน/วัน [58]

องค์ประกอบ	ปริมาณขยะ > 100 ตัน/วัน	ปริมาณขยะ 50-100 ตัน/วัน
เศษอาหาร/ผัก/ผลไม้	53.49%	57.18%
พลาสติก	20.12%	19.40%
กระดาษ	8.95%	8.38%
แก้ว	5.02%	3.47%
โลหะ	1.80%	1.52%
อื่นๆ กระดุก/เปลือก หอย/สารพิษ ผ้าอ้อม/ผ้าอนามัย/ ถ่านไฟฉาย เป็นต้น	10.62%	10.05%

เนื่องจากยังไม่มีหน่วยงานใด ทำการเก็บข้อมูลสถิติเกี่ยวกับประเภทของขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ที่จัดเก็บได้ในแต่ละวัน ดังนั้นเมื่อทราบปริมาณขยะในกรุงเทพฯ ที่จัดเก็บได้ในแต่ละวันเราสามารถประเมินปริมาณขยะแต่ละประเภทได้โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 5.1

### 5.2.3 การบริหารจัดการขยะ

ระบบบริหารจัดการขยะโดยปกติประกอบด้วยหลายขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดสถานที่ทิ้งขยะและวิธีการเก็บรวบรวมขยะ การเก็บรวบรวมขยะ การขนส่งขยะไปยังสถานที่จัดเก็บ การคัดแยกขยะ และการกำจัดขยะ [59] ขั้นตอนการคัดแยกเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการบริหารจัดการขยะ ที่ช่วยให้เกิดผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ในขณะเดียวกัน ก็ช่วยลดภาระในการกำจัดขยะด้วย ตัวอย่างเช่นขยะประเภทขยะอินทรีย์ สามารถนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) และปุ๋ยได้โดยผ่านขบวนการหมัก นอกจากนั้น ขยะประเภท กระดาษ แก้ว โลหะ และ พลาสติก สามารถนำมารีไซเคิล (Recycle) และ/หรือ นำกลับมาใช้ใหม่ (Reusable) โดยทั่วไปการกำจัดขยะในประเทศไทย นิยมใช้วิธีการฝัง

กลบอย่างถูกสุขลักษณะ และ การเผาทำลาย กับขยะทั่วไป ในบทนี้ได้แนะนำระบบการบริหารจัดการขยะ 4 แบบ ที่ให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์คุ้มค่า และ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่ การหมักให้ย่อยสลาย (Composting) การฝังกลบ(Landfill) การเผาทำลาย (Incineration) และ การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling)

#### 5.2.4 แบบจำลองหาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์แบบเฟ้นสุ่มสำหรับ SWMP

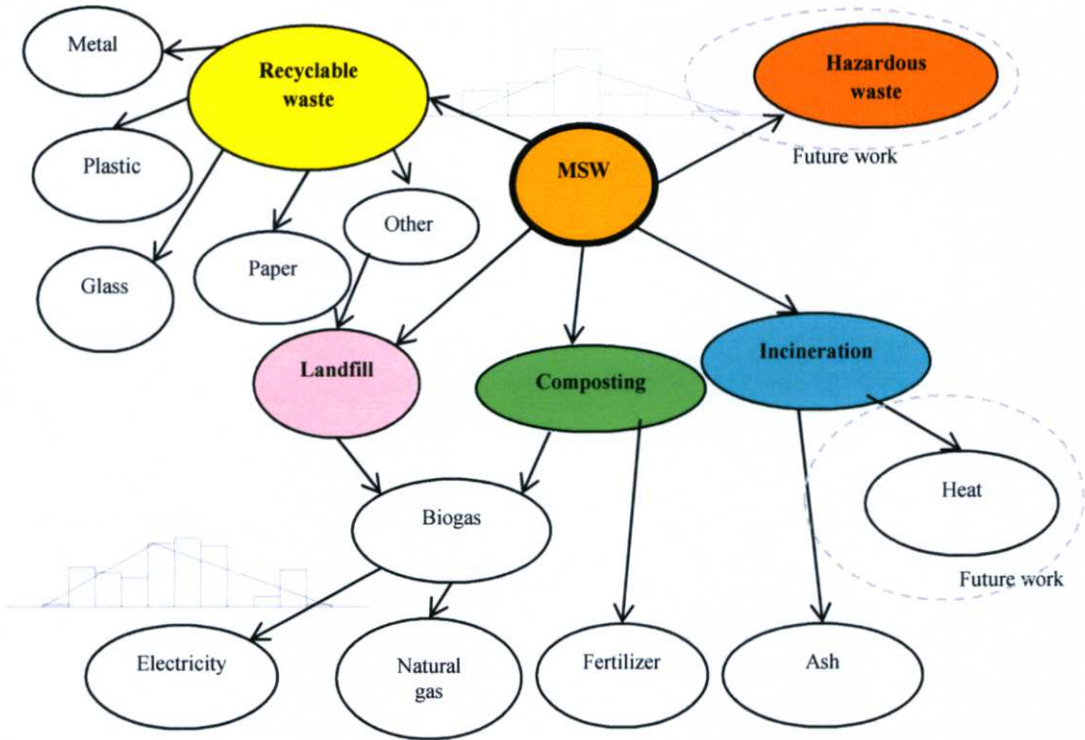
แบบจำลองหาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ภายใต้เทคนิคความไม่แน่นอน ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายข้อสมมุติฐานหนึ่งข้อและกลุ่มข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน 2 กลุ่ม ข้อสมมุติฐานที่ตั้งไว้คือ ค่าการปลดปล่อย CDE น้อยไม่สามารถบรรลุได้ด้วยต้นทุนการดำเนินการที่น้อย ดังนั้นวัตถุประสงค์ 2 ข้อ คือการลดต้นทุนต่ำสุดและการปลดปล่อย CDE ต่ำสุด จึงถูกกำหนดสำหรับผลตอบแทนที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่นอีก เช่น ปริมาณของขยะต่อวัน และ ราคาค่ากระแสไฟฟ้าต่อวัน ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน

บทนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบแผนในการบริหารจัดการขยะ 9 แบบแผนของข้อมูล 2 ชุด คือ ข้อมูลปริมาณขยะในกรุงเทพฯ และ ข้อมูลราคากระแสไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากการประมาณด้วยสามเหลี่ยม pdf ปริมาณของ MSW ถูกสมมุติให้มีปริมาณ น้อย กลาง มาก และ ทำนองเดียวกัน ค่ากระแสไฟฟ้าถูกสมมุติให้มีค่า ต่ำ กลาง สูง เมื่อนำมาวิเคราะห์ในกรณีต่างๆ จึงทำให้มีแบบแผนการวิเคราะห์ทั้งหมด 9 แบบแผน ปริมาณของ MSW ( $SW_T(s)$ ) และ ราคากระแสไฟฟ้า (ElecPrices) ที่ถูกประมาณไว้และโอกาสเกิดแสดงดังตารางที่ 5.2

รูปที่ 5.8 แสดงหลักการบริหารจัดการขยะของแบบจำลอง ขยะในกรุงเทพฯ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ประเภทขยะอินทรีย์ (หรือขยะที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้) และ ขยะอนินทรีย์ (หรือขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้) ขยะอินทรีย์จะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) เพื่อผลิต Biogas และ ปุ๋ยอินทรีย์ (Fer(s)) องค์ประกอบของ Biogas ( $CH_4 + CO_2 + H_2O +$  ก๊าซอื่นๆ) ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) 55-65% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) 30-40% และ ไอน้ำ 0-5% และส่วนที่เหลือคือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และ ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) [60] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ จึงสมมุติให้มีปริมาณของก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 60% (เรียกว่า Bio-methane) ของปริมาณ Biogas ที่ผลิตได้ [61] Bio-methane ( $CH_4C(s)$ ) สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า (เรียกว่า Biogas-based Electricity,  $CH_4CE(s)$ ) เพื่อจำหน่าย และ/หรือ ขายเป็นก๊าซธรรมชาติ ( $CH_4CNG(s)$ )

ตารางที่ 5.2 การประมาณค่าปริมาณขยะ และ ราคากระแสไฟฟ้า

การประมาณค่าด้วย Triangle Probability Density (pdf)		ปริมาณขยะ		กระแสไฟฟ้า	
Range	Percentiles	ปริมาณ (ตัน/วัน)	โอกาสเกิด (%)	ราคา (บาท/kwh)	โอกาสเกิด (%)
ต่ำ	30	9,100	30	2.13	30
กลาง	60	9,850	30	2.41	30
สูง	100	10,800	40	2.79	40



รูปที่ 5.8 ภาพรวมของแบบจำลองเพื่อการบริหารจัดการขยะ

ขยะที่ไม่สามารถนำไปหมักเป็น Biogas ได้ จะถูกเรียกว่า Recycled and Reused Wastes ( $SW_R(s)$ ) และ ถูกคัดแยกออกเป็น แก้ว (GLASS(s)) โลหะ (METAL(s)) กระดาษ (PAPER(s)) พลาสติก (PLASTIC(s)) และ ขยะอื่นๆ (OTHER(s)) ขยะที่ย่อยสลายไม่ได้เหล่านี้ จะถูกขายเพื่อเป็นรายได้เสริม อย่างไรก็ตาม เจ้าหน้าที่ของโรงกำจัดขยะ และ/หรือ ผู้ตัดสินใจบริหารจัดการขยะ อาจจะเลือกกำจัดทั้งขยะอินทรีย์และขยะอนินทรีย์ โดยการเผา หรือการฝังกลบอย่างถูกสุขลักษณะ [62] [63] วิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ Biogas ที่เกิดขึ้นจากขบวนการฝังกลบ ( $CH_4(s)$ ) ซึ่งสามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (biogas-based electricity,  $CH_{4E}(s)$ ) และ/หรือ ขายเป็นก๊าซธรรมชาติ ( $CH_{4LNG}(s)$ ) นอกจากนั้นถ้าที่เกิดจากการเผาขยะยังสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ด้วย

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้ สำหรับวิเคราะห์ตัดสินใจการบริหารจัดการขยะใน 4 วิธี คือ การฝังกลบ การหมัก การเผาทำลาย และ รีไซเคิล อย่างไรก็ตาม การกำจัดขยะมีพิษและขยะอันตราย และ ความร้อนที่ได้จากขบวนการเผาขยะ อยู่นอกเหนือขอบเขตการวิเคราะห์ของแบบจำลองนี้

### 5.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ภายใต้สภาวะความไม่แน่นอน กรณีศึกษาการบริหารจัดการของเสียในกรุงเทพมหานคร

การสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย การกำหนดตัวแปร กำหนดพารามิเตอร์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด ซึ่งรายละเอียดมีดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.3.1 การนิยามตัวแปรและพารามิเตอร์

ตัวแปร และ พารามิเตอร์ ถูกกำหนดเพื่อใช้ในการสร้างสมการวัตถุประสงค์ และ สมการข้อจำกัด โดยหน่วยที่จะใช้ในบทนี้เป็นปริมาณต่อวันทั้งหมด เช่น ต้น/วัน บาท/วัน เป็นต้น ตัวแปรและพารามิเตอร์จะถูกนิยามโดยใช้สัญลักษณ์ที่สามารถสื่อความหมายและเข้าใจได้ง่ายถึงความหมายของตัวแปรหรือพารามิเตอร์นั้นๆ

##### 5.3.1.1 การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

ตัวแปรที่ถูกกำหนดไว้ ได้แก่ ตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณขยะ ตัวแปรเกี่ยวกับไบโอแก๊ส ตัวแปรเกี่ยวกับเงินจากเผาขยะ ตัวแปรเกี่ยวกับปุ๋ย ตัวแปรเกี่ยวกับขยะ Recycle ตัวแปรเกี่ยวกับค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรเกี่ยวกับต้นทุน และ ตัวแปรเกี่ยวกับผลตอบแทน ซึ่งได้มีการนิยามตัวแปร โดยใช้สัญลักษณ์และความหมาย ดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 5.3.1.1.1. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณขยะ

ตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณขยะ แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับปริมาณขยะ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Solid_{Total}(s)$	ปริมาณขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ทั้งหมด	Ton
$Solid_{Compost}(s)$	ปริมาณขยะอินทรีย์ ใช้สำหรับขบวนการหมัก	Ton
$Solid_{Landfill}(s)$	ปริมาณขยะใช้สำหรับ Landfill	Ton
$Solid_{Incineration}(s)$	ปริมาณขยะใช้สำหรับขบวนการ Incineration	Ton
$Solid_{Recycle}(s)$	ปริมาณขยะใช้สำหรับ Recycle	Ton

##### 5.3.1.1.2. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับไบโอแก๊ส

ตัวแปรเกี่ยวกับไบโอแก๊ส แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับไบโอแก๊ส

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
$Biogas_{Compost}(s)$	ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะ	$m^3$
$Biogas_{Compost}^{Elec}(s)$	ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะและนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า	$m^3$

ตารางที่ 5.4 (ต่อ)

Biogas <sub>Compost</sub> <sup>NG</sup> (s)	ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะและขายเป็นก๊าซธรรมชาติ	m <sup>3</sup>
Biogas <sub>Landfill</sub> (s)	ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill	m <sup>3</sup>
Biogas <sub>Landfill</sub> <sup>Elec</sup> (s)	ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill และนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า	m <sup>3</sup>
Biogas <sub>Landfill</sub> <sup>NG</sup> (s)	ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill และขายเป็นก๊าซธรรมชาติ	m <sup>3</sup>

## 5.3.1.1.3. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับเถ้าจากเผาขยะ

ตัวแปรเกี่ยวกับ เถ้าจากเผาขยะ แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับเถ้าจากเผาขยะ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Ash(s)	เถ้าจากขบวนการเผาขยะ ขายใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง	Ton

## 5.3.1.1.4. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับปุ๋ย

ตัวแปรเกี่ยวกับ ปุ๋ย แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับปุ๋ย

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Fertilizer(s)	ปริมาณปุ๋ยอินทรีย์จากขบวนการหมัก	Ton

## 5.3.1.1.5. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับขยะ Recycle

ตัวแปรเกี่ยวกับ ขยะ Recycle แสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับขยะ Recycle

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Glass(s)	ปริมาณขยะประเภทแก้ว นำไปขาย Recycle	Ton
Paper(s)	ปริมาณขยะประเภทกระดาษ นำไปขาย Recycle	Ton
Metal(s)	ปริมาณขยะประเภทโลหะ นำไปขาย Recycle	Ton
Plastic(s)	ปริมาณขยะประเภทพลาสติก นำไปขาย Recycle	Ton

### 5.3.1.1.6. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า

ตัวแปรเกี่ยวกับ กระแสไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Elec <sup>Sell</sup> <sub>Compost</sub>	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการหมักสำหรับขายให้กับ Spot Market	kWh
Elec <sup>Sell</sup> <sub>Landfill</sub>	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Landfill สำหรับขายให้กับ Spot Market	kWh

### 5.3.1.1.7. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวแปรเกี่ยวกับ ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
CO <sub>2</sub> Total (s)	ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยสุทธิ	Ton
CO <sub>2</sub> Compost (s)	ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Composting	Ton
CO <sub>2</sub> Landfill (s)	ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Landfill	Ton
CO <sub>2</sub> Incineration (s)	ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Incineration	Ton
CO <sub>2</sub> Recycle (s)	ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Recycle	Ton
CO <sub>2</sub> Elec <sub>Landfill</sub> (s)	ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Landfill	Ton
CO <sub>2</sub> NG <sub>Landfill</sub> (s)	ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขาย ก๊าซธรรมชาติ ที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Landfill	Ton
CO <sub>2</sub> Elec <sub>Compost</sub> (s)	ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Composting	Ton
CO <sub>2</sub> NG <sub>Compost</sub> (s)	ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขาย ก๊าซธรรมชาติ ที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Composting	Ton
CO <sub>2</sub> Fertilizer <sub>Compost</sub>	ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขายปุ๋ยอินทรีย์	Ton

### 5.3.1.1.8. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับต้นทุน

ตัวแปรเกี่ยวกับ ต้นทุนแสดงดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับต้นทุน

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Value <sub>Total</sub> (s)	มูลค่าการลงทุนสุทธิ	บาท
Cost <sub>Lanfill</sub> (s)	ต้นทุนในขบวนการ Landfill	บาท
Cost <sub>Compost</sub> (s)	ต้นทุนในขบวนการ Composting	บาท
Cost <sub>Incineration</sub> (s)	ต้นทุนในขบวนการ Incineration	บาท
Cost <sub>(Recycle)</sub> (s)	ต้นทุนในขบวนการ Recycling	บาท

## 5.3.1.1.9. การกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับผลตอบแทน

ตัวแปรเกี่ยวกับ ผลตอบแทนแสดงดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 นิยามตัวแปรเกี่ยวกับผลตอบแทน

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Revenue <sub>Landfill</sub> <sub>Elec</sub> (s)	รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ได้จากขบวนการ Landfill	บาท
Revenue <sub>Landfill</sub> <sub>NG</sub> (s)	รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติ ที่ได้จากขบวนการ Landfill	บาท
Revenue <sub>Compost</sub> <sub>Elec</sub> (s)	รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ได้จากขบวนการ Composting	บาท
Revenue <sub>Compost</sub> <sub>NG</sub> (s)	รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติ ที่ได้จากขบวนการ Composting	บาท
Revenue <sub>Compost</sub> <sub>Fertilizer</sub> (s)	รายได้จากการขายปุ๋ยอินทรีย์ ที่ได้จากขบวนการ Composting	บาท
Revenue <sub>Incineration</sub> <sub>Ash</sub> (s)	รายได้จากการขายขี้เถ้า ที่ได้จากขบวนการ Incineration	บาท
Revenue <sub>Recycle</sub> <sub>Glass</sub> (s)	รายได้จากการนำขยะประเภทแก้วมา Recycle	บาท
Revenue <sub>Recycle</sub> <sub>Metal</sub> (s)	รายได้จากการนำขยะประเภทโลหะมา Recycle	บาท
Revenue <sub>Recycle</sub> <sub>Plastic</sub> (s)	รายได้จากการนำขยะประเภทพลาสติกมา Recycle	บาท
Revenue <sub>Recycle</sub> <sub>Paper</sub> (s)	รายได้จากการนำขยะประเภทกระดาษมา Recycle	บาท
Revenue <sub>CO2</sub> (s)	รายได้จาก CDE credits	บาท

## 5.3.1.2 การกำหนดพารามิเตอร์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 นิยามพารามิเตอร์เกี่ยวกับ Biogas

พารามิเตอร์	ความหมาย	หน่วย
$f_{\text{Solid Compost}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Compost	-
$f_{\text{Compost}}$	Selection Factor (Binary Value)	-
$f_{\text{Solid Incineration}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Incineration	-
$f_{\text{Incineration}}$	Selection Factor (Binary Value)	-
$f_{\text{Solid Landfill}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Landfill	-
$f_{\text{Landfill}}$	Selection Factor (Binary Value)	-
$f_{\text{Solid Recycle}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Recycle	-
$f_{\text{Recycle}}$	Selection Factor (Binary Value)	-
$f_{\text{Compost Biogas}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแก๊สจากขบวนการ Composting	$\text{m}^3/\text{Ton}$
$f_{\text{Landfill Biogas}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแก๊สจากขบวนการ Landfill	$\text{m}^3/\text{Ton}$
$f_{\text{Compost Fertilizer}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตปุ๋ยจากขบวนการ Composting	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Incineration Ash}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตขี้เถ้าจากขบวนการ Incineration	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Recycle Glass}}$	สัดส่วนขยะประเภทแก้ว จาก ขยะ Recycle	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Recycle Metal}}$	สัดส่วนขยะประเภทโลหะ จาก ขยะ Recycle	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Recycle Paper}}$	สัดส่วนขยะประเภทกระดาษ จาก ขยะ Recycle	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Recycle Plastic}}$	สัดส่วนขยะประเภทพลาสติก จาก ขยะ Recycle	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Biogas Elec}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตกระแสไฟฟ้าจากไบโอแก๊ส	$\text{kWh}/\text{m}^3$
$f_{\text{Landfill CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Landfill	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Compost CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Compose	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Incineration CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Incineration	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Elec CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้กระแสไฟฟ้า	$\text{Ton}/\text{kWh}$
$f_{\text{NG CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ก๊าซธรรมชาติ	$\text{Ton}/\text{m}^3$
$f_{\text{Fertilizer CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Recycle CO}_2}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ขยะ Recycle	$\text{Ton}/\text{Ton}$
$f_{\text{Compost Cost}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Composting จากขยะ	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Landfill Cost}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Landfill ด้วยขยะ	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Incineration Cost}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Incineration ด้วยขยะ	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Recycle Cost}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการนำขยะมา Recycle	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Elec Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายกระแสไฟฟ้า	$\text{Baht}/\text{kWh}$
$f_{\text{NG Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ	$\text{Baht}/\text{m}^3$
$f_{\text{Fertilizer Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายปุ๋ยอินทรีย์	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Ash Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายขี้เถ้าจากการเผา	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Glass Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทแก้ว	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Metal Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทโลหะ	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Paper Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทกระดาษ	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{Plastic Price (s)}}$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทพลาสติก	$\text{Baht}/\text{Ton}$
$f_{\text{CO}_2 \text{ Price}}$	มูลค่า CDE	$\text{Baht}/\text{Ton}$

### 5.3.2 การกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองที่ใช้ตัดสินใจในการบริหารจัดการขยะมี 2 ข้อคือ

1. การเลือกตัดสินใจบริหารจัดการขยะให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด
2. ในขณะเดียวกัน การตัดสินใจบริหารจัดการขะนั้น ต้องให้ได้ค่า การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลน้อยที่สุด

#### 5.3.2.1 สมการมูลค่าการลงทุนน้อยสุด

เนื่องจากหนึ่งในวัตถุประสงค์ของแบบจำลองคือ การให้ได้กำไรสูงสุด ซึ่งในทางกลับกัน คือการหาค่าของมูลค่าลงทุนต่ำสุดนั่นเอง และเนื่องจากการประมาณค่าบนค่าความน่าจะเป็น จึงคำนวณผลออกมาเป็นค่าคาดหวัง Expected Value ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าการลงทุนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.1) (5.2) (5.4) และ (5.6) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.3) (5.5) และ (5.7)

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 Minimize } Z = \text{Expected(ValueTotal)} \quad \text{บาท} \quad (5.1)$$

$$\text{มูลค่าการลงทุนสุทธิ} = \text{ต้นทุน} - \text{รายได้} \quad \text{บาท} \quad (5.2)$$

$$\text{ValueTotal (s)} = \text{Costs(s)} - \text{Revenues(s)} \quad \text{บาท} \quad (5.3)$$

โดย

$$\text{ต้นทุน} = \text{ต้นทุนขบวนการ Composting} + \text{ต้นทุนขบวนการ Landfill} + \text{ต้นทุนขบวนการ Incineration} \quad \text{บาท} \quad (5.4)$$

$$\text{Costs(s)} = \text{Cost}_{\text{Compost}}(s) + \text{Cost}_{\text{Landfill}}(s) + \text{Cost}_{\text{Incineration}}(s) + \text{Cost}_{\text{Recycle}}(s) \quad \text{บาท} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \text{รายได้} = & \text{รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ได้จากขบวนการ Landfill} + \text{รายได้} \\ & \text{จากการขายก๊าซธรรมชาติ ที่ได้จากขบวนการ Landfill} + \text{รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้า} \\ & \text{ที่ผลิตจาก Biogas ที่ได้จากขบวนการ Composting} + \text{รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติ} \\ & \text{ที่ได้จากขบวนการ Composting} + \text{รายได้จากการขายปุ๋ยอินทรีย์ ที่ได้จากขบวนการ} \\ & \text{Composting} + \text{รายได้จากการขายซีเมนต์ ที่ได้จากขบวนการ Incineration} + \text{รายได้จาก} \\ & \text{การนำขยะประเภทแก้วมา Recycle} + \text{รายได้จากการนำขยะประเภทโลหะมา Recycle} \\ & + \text{รายได้จากการนำขยะประเภทพลาสติกมา Recycle} + \text{รายได้จากการนำขยะประเภท} \\ & \text{กระดาษมา Recycle} + \text{รายได้จาก CDE credits} \quad \text{บาท} \quad (5.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Revenues}(s) = & \text{Revenue}_{\text{Elec}}^{\text{Landfill}}(s) + \text{Revenue}_{\text{NG}}^{\text{Landfill}}(s) + \text{Revenue}_{\text{Elec}}^{\text{Compost}}(s) + \\
& \text{Revenue}_{\text{NG}}^{\text{Compost}}(s) + \text{Revenue}_{\text{Fertilizer}}^{\text{Compost}}(s) + \text{Revenue}_{\text{Ash}}^{\text{Incineration}}(s) + \\
& \text{Revenue}_{\text{Glass}}^{\text{Recycle}}(s) + \text{Revenue}_{\text{Metal}}^{\text{Recycle}}(s) + \text{Revenue}_{\text{Paper}}^{\text{Recycle}}(s) + \\
& \text{Revenue}_{\text{Plastic}}^{\text{Recycle}}(s) + \text{Revenue}_{\text{CO}_2}(s)
\end{aligned}
\tag{5.7}$$

### 5.3.2.2 สมการการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด

การบริหารจัดการในปัจจุบัน ไม่ได้เน้นเพียงแค่ผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์เพียงอย่างเดียว แต่ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไปด้วยพร้อมกัน เพื่อให้เกิดการบริหารจัดการที่ยั่งยืน ที่มีความคุ้มค่าในทุกด้าน ดังนั้นนอกจากกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เกี่ยวกับผลตอบแทนและต้นทุนแล้ว ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลองอีกข้อหนึ่ง คือ การบริหารจัดการให้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลให้มีค่าน้อยที่สุด นั่นเอง และเนื่องจากการประมาณค่าบนค่าความน่าจะเป็น จึงคำนวณผลออกมาเป็นค่าคาดหวัง Expected Value ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของค่าคาดหวังของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.8) และ (5.9) และเขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.10)

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2} \quad \text{Minimize } Z = \text{Expected}(\text{CO}_{2\text{Total}}) \quad \text{ต้น} \tag{5.8}$$

$$\begin{aligned}
\text{ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยสุทธิ} = & \text{ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Landfill} + \text{ปริมาณ} \\
& \text{CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Composting} + \text{ปริมาณ CDE} \\
& \text{ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Incineration} - \text{ปริมาณ CDE ที่ลดลง} \\
& \text{จากขบวนการ Recycle} - \text{ปริมาณ CDE ที่ลดลงจาก การขาย} \\
& \text{กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogasจากขบวนการ Landfill} - \text{ปริมาณ} \\
& \text{CDE ที่ลดลงจาก การขาย ก๊าซธรรมชาติ ที่ผลิตจาก Biogasจาก} \\
& \text{ขบวนการ Landfill} - \text{ปริมาณ CDE ที่ลดลงจาก การขาย} \\
& \text{กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogasจากขบวนการ Composting} - \\
& \text{ปริมาณ CDE ที่ลดลงจาก การขาย ก๊าซธรรมชาติ ที่ผลิตจาก} \\
& \text{Biogasจากขบวนการ Composting} - \text{ปริมาณ CDE ที่ลดลงจาก} \\
& \text{การขายปุ๋ยอินทรีย์} \quad \text{ต้น} \tag{5.9}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{CO}_{2\text{Total}}(s) = & \text{CO}_{2\text{Landfill}}(s) + \text{CO}_{2\text{Compost}}(s) + \text{CO}_{2\text{Incineration}}(s) - \text{CO}_{2\text{Recycle}}(s) - \\
& \text{CO}_{2\text{Landfill}}^{\text{Elec}}(s) - \text{CO}_{2\text{Landfill}}^{\text{NG}}(s) - \text{CO}_{2\text{Compost}}^{\text{Elec}}(s) - \text{CO}_{2\text{Compost}}^{\text{NG}}(s) - \\
& \text{CO}_{2\text{Compost}}^{\text{Fertilizer}}
\end{aligned}
\tag{5.10}$$

### 5.3.3 การกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไข

หลังจากได้ทำการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแบบจำลอง เพื่อใช้สำหรับหาค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ค่าสอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ค่าที่เป็นคำตอบของแบบจำลองจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขในทางปฏิบัติของกระบวนการต่างๆ ด้วย เพื่อให้สามารถนำค่าที่ได้คำตอบจากสมการมาใช้ได้สอดคล้องกับสถานการณ์จริง จึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในทางเทคนิค และเงื่อนไขในทางปฏิบัติ ให้กับแบบจำลอง ซึ่งสามารถกำหนดฟังก์ชันเงื่อนไขต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

#### 5.3.3.1 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับปริมาณขยะ

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับ ปริมาณขยะ มี 6 ข้อคือ

1. ปริมาณขยะทั้งหมด เท่ากับปริมาณขยะที่นำไปพิจารณาใช้ใน 4 ขบวนการ (Composing, Incineration, Landfill และ Recycle) รวมกัน
2. ปริมาณขยะที่นำไป Compose ไม่เกิน ความสามารถที่สามารถ Compose ได้
3. ปริมาณขยะที่นำไป Incineration ไม่เกิน ความสามารถที่สามารถ Incineration ได้
4. ปริมาณขยะที่นำไป Landfill ไม่เกิน ความสามารถที่สามารถ Landfill ได้
5. ปริมาณขยะที่นำไป Recycle ไม่เกิน ความสามารถที่สามารถ Recycle ได้
6. ปริมาณขยะที่นำไป Recycle แบ่งเป็น 4 ประเภท คือ แก้ว กระดาษ โลหะ และ พลาสติก

ฟังก์ชันเกี่ยวกับปริมาณขยะ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.11) (5.13) (5.15) (5.17) (5.19) และ (5.21) เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.12) (5.14) (5.16) (5.18) (5.20) และ (5.22) สมการ (4.21)

ปริมาณขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ทั้งหมด = ปริมาณขยะอินทรีย์ ใช้สำหรับขบวนการหมัก + ปริมาณขยะใช้สำหรับขบวนการ Incineration + ปริมาณขยะใช้สำหรับ Landfill + ปริมาณขยะใช้สำหรับ recycle ตัน (5.11)

$$\text{Solid}_{\text{Total}}(s) = \text{Solid}_{\text{Compost}}(s) + \text{Solid}_{\text{Incineration}}(s) + \text{Solid}_{\text{Landfill}}(s) + \text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) \quad \text{ตัน} \quad (5.12)$$

ปริมาณขยะอินทรีย์ใช้สำหรับขบวนการหมัก  $\leq$  สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Compost  $\times$  Selection Factor  $\times$  ปริมาณขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ทั้งหมด ตัน (5.13)

$$\text{Solid}_{\text{Compost}}(s) \leq f_{\text{Compost}}^{\text{Solid}} f_{\text{Compost}} \text{Solid}_{\text{Total}}(s) \quad \text{ตัน} \quad (5.14)$$

ปริมาณขยะใช้สำหรับขบวนการ Incineration  $\leq$  สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Incineration x Selection Factor x ปริมาณขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ทั้งหมด ต้น (5.15)

$$\text{Solid}_{\text{Incineration}}(s) \leq f_{\text{Incineration}}^{\text{Solid}} f_{\text{Incineration}} \text{Solid}_{\text{Total}}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.16)$$

ปริมาณขยะใช้สำหรับ Landfill  $\leq$  สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Landfill x Selection Factor x ปริมาณขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ทั้งหมด ต้น (5.17)

$$\text{Solid}_{\text{Landfill}}(s) \leq f_{\text{Landfill}}^{\text{Solid}} f_{\text{Landfill}} \text{Solid}_{\text{Total}}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.18)$$

ปริมาณขยะใช้สำหรับ recycle  $\leq$  สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Recycle x Selection Factor x ปริมาณขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ ทั้งหมด ต้น (5.19)

$$\text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) \leq f_{\text{Recycle}}^{\text{Solid}} f_{\text{Recycle}} \text{Solid}_{\text{Total}}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.20)$$

ปริมาณขยะใช้สำหรับ recycle = ปริมาณขยะประเภทแก้ว + ปริมาณขยะประเภทกระดาษ + ปริมาณขยะประเภทโลหะ + ปริมาณขยะประเภทพลาสติก ต้น (5.21)

$$\text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) = \text{Glass}(s) + \text{Paper}(s) + \text{Metal}(s) + \text{Plastic}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.22)$$

### 5.3.3.2 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับการตัดสินใจเลือกขบวนการ

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับการตัดสินใจเลือกขบวนการ มี 3 ข้อคือ

1. โรงงานกำจัดขยะ ต้องเลือกลงทุนระหว่าง การนำขยะไปเข้าขบวนการ Composting และ Incineration
2. โรงงานกำจัดขยะ ต้องเลือกลงทุนระหว่าง การนำขยะไปเข้าขบวนการ Recycle และ Landfill
3. สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Compost Incineration Landfill และ Recycle มีค่าไม่เกิน 1 และเมื่อนำมารวมกันมีค่าไม่เกิน 1

ฟังก์ชันเงื่อนไขในการตัดสินใจ ในรูปของตัวแปร สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.23) ถึงสมการ (5.30)

$$\text{สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Landfill} \leq 1 \quad (5.23)$$

$$f_{\text{Landfill}}^{\text{Solid}} \leq 1 \quad (5.24)$$

ต้องเลือกในการนำขยะไป Compose หรือ นำไป Incineration

$$f_{\text{Compose}} + f_{\text{Incineration}} = 1 \quad (5.25)$$

ต้องเลือกในการนำขยะไป Recycle หรือ นำไป Landfill

$$f_{\text{Recycle}} + f_{\text{Landfill}} = 1 \quad (5.26)$$

ให้  $f_{\text{Compose}}$  มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 โดย 0 คือไม่เลือกทำในระบบนั้น และ 1 คือเลือกทำในระบบนั้น

$$f_{\text{Compose}} \in \{0,1\} \quad (5.27)$$

ให้  $f_{\text{Incineration}}$  มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 โดย 0 คือไม่เลือกทำในระบบนั้น และ 1 คือเลือกทำในระบบนั้น

$$f_{\text{Incineration}} \in \{0,1\} \quad (5.28)$$

ให้  $f_{\text{Recycle}}$  มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 โดย 0 คือไม่เลือกทำในระบบนั้น และ 1 คือเลือกทำในระบบนั้น

$$f_{\text{Recycle}} \in \{0,1\} \quad (5.29)$$

ให้  $f_{\text{Landfill}}$  มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 โดย 0 คือไม่เลือกทำในระบบนั้น และ 1 คือเลือกทำในระบบนั้น

$$f_{\text{Landfill}} \in \{0,1\} \quad (5.30)$$

### 5.3.3.3 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับไบโอแก๊ส

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับ ไบโอแก๊ส มี 4 ข้อคือ

1. ปริมาณไบโอแก๊สจาก Compose ได้จากขบวนการนำขยะไป Compose แบบแอนนาโรบิค
2. ปริมาณไบโอแก๊สจาก Compose สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า หรือ ขายเป็นก๊าซธรรมชาติ
3. ปริมาณไบโอแก๊สจาก Landfill ได้จากขบวนการนำขยะไป ฝังกลบ

4. ปริมาณไบโอแก๊สจาก Landfill สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า หรือ ขายเป็นก๊าซธรรมชาติ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับไบโอแก๊สสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.31) (5.33) (5.35) และ (5.37) และเขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.32) (5.34) (5.36) และ (5.38)

ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะ = สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแก๊สจากขบวนการ Composting x ปริมาณขยะอินทรีย์ใช้สำหรับขบวนการหมัก  $m^3$  (5.31)

$$\text{Biogas}_{\text{Compost}}(s) = f_{\text{Biogas}}^{\text{Compost}} \text{Solid}_{\text{Compost}}(s) \quad m^3 \quad (5.32)$$

ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะ = ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะและนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า + ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะและขายเป็นก๊าซธรรมชาติ  $m^3$  (5.33)

$$\text{Biogas}_{\text{Compost}}(s) = \text{Biogas}_{\text{Compost}}^{\text{Elec}}(s) + \text{Biogas}_{\text{Compost}}^{\text{NG}}(s) \quad m^3 \quad (5.34)$$

ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill = สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแก๊สจากขบวนการ Landfill x ปริมาณขยะใช้สำหรับ Landfill  $m^3$  (5.35)

$$\text{Biogas}_{\text{Landfill}}(s) = f_{\text{Biogas}}^{\text{Landfill}} \text{Solid}_{\text{Landfill}}(s) \quad m^3 \quad (5.36)$$

ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill = ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill และนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า + ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill และขายเป็นก๊าซธรรมชาติ  $m^3$  (5.37)

$$\text{Biogas}_{\text{Landfill}}(s) = \text{Biogas}_{\text{Landfill}}^{\text{Elec}}(s) + \text{Biogas}_{\text{Landfill}}^{\text{NG}}(s) \quad m^3 \quad (5.38)$$

#### 5.3.3.4 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับปุ๋ย

เงื่อนไขที่เกี่ยวกับ ปุ๋ย คือ ปริมาณปุ๋ยอินทรีย์ ได้จากขบวนการนำขยะไป Compose แบบแอนนาโรบิค

ฟังก์ชันเกี่ยวกับปุ๋ย สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.38) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดัง

สมการ (5.40)

ปริมาณปุ๋ยอินทรีย์จากขบวนการหมัก = สัมประสิทธิ์การผลิตปุ๋ยจากขบวนการ Composting x ปริมาณขยะอินทรีย์ ใช้สำหรับขบวนการหมัก ต้น (5.39)

$$Fertilizer(s) = f_{Fertilizer}^{Compost} Solid_{Compost}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.40)$$

### 5.3.3.5 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับซีเถ้าจากการเผา

ฟังก์ชันเงื่อนไขที่เกี่ยวกับ ซีเถ้าจากการเผา มี 1 ข้อคือ

1. ปริมาณซีเถ้า ได้จากขบวนการนำขยะไป Incineration

ฟังก์ชันเกี่ยวกับซีเถ้าจากการเผา สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.41) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.42)

เถ้าจากขบวนการเผาขยะใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง = สัมประสิทธิ์การผลิตซีเถ้าจากขบวนการ Incineration x ปริมาณขยะใช้สำหรับขบวนการ Incineration ต้น (5.41)

$$Ash(s) = f_{Ash}^{Incineration} Solid_{Incineration}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.42)$$

### 5.3.3.6 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับขบวนการ Recycle

เงื่อนไขที่เกี่ยวกับ ขบวนการ Recycle คือ ปริมาณขยะที่นำไป Recycle จะถูกคัดแยกเป็น 4 ประเภท คือ แก้ว โลหะ กระดาษ และ พลาสติก โดยแสดงออกมาในรูปของค่าสัดส่วน

ฟังก์ชันเกี่ยวกับขบวนการ Recycle สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.43) (5.45) (5.47) และ (5.49) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.44) (5.46) (5.48) และ (5.50)

ปริมาณขยะประเภทแก้ว = สัดส่วนขยะประเภทแก้ว จาก ขยะ Recycle x ปริมาณขยะใช้สำหรับ Recycle ต้น (5.43)

$$Glass(s) = f_{Glass}^{Recycle} Solid_{Recycle}(s) \quad \text{ต้น} \quad (5.44)$$

ปริมาณขยะประเภทโลหะ = สัดส่วนขยะประเภทโลหะ จาก ขยะ Recycle x ปริมาณขยะใช้สำหรับ Recycle ต้น (5.45)

$$\text{Metal}(s) = f_{\text{Metal}}^{\text{Recycle}} \text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) \quad \text{ตัน} \quad (5.46)$$

ปริมาณขยะประเภทกระดาษ = สัดส่วนขยะประเภทกระดาษ จาก ขยะ Recycle x ปริมาณขยะใช้  
สำหรับ Recycle ตัน (5.47)

$$\text{Paper}(s) = f_{\text{Paper}}^{\text{Recycle}} \text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) \quad \text{ตัน} \quad (5.48)$$

ปริมาณขยะประเภทพลาสติก = สัดส่วนขยะประเภทพลาสติก จาก ขยะ Recycle x ปริมาณขยะใช้  
สำหรับ Recycle ตัน (5.49)

$$\text{Plastic}(s) = f_{\text{Plastic}}^{\text{Recycle}} \text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) \quad \text{ตัน} \quad (5.50)$$

### 5.3.3.7 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้า

เงื่อนไขที่เกี่ยวกับ กระแสไฟฟ้า คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่นำไปขาย ได้จากการนำ Biogas ที่ผลิตจากขบวนการ Composing และ Landfill มาผลิตกระแสไฟฟ้า

ฟังก์ชันเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.51) และ (5.53) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.52) และ (5.54)

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Landfill สำหรับขายให้กับ Spot Market =  
สัมประสิทธิ์การผลิตกระแสไฟฟ้าจากไบโอแก๊ส x ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้  
จากขบวนการ Landfill และนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า kWh (5.51)

$$\text{Elec}_{\text{Landfill}}^{\text{Sell}} = f_{\text{Elec}}^{\text{Biogas}} \text{Biogas}_{\text{Landfill}}^{\text{Elec}} \quad [11] \text{kWh} \quad (5.52)$$

ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการหมักสำหรับขายให้กับ Spot Market =  
สัมประสิทธิ์การผลิตกระแสไฟฟ้าจากไบโอแก๊ส x ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้  
จากขบวนการหมักขยะและนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า kWh (5.53)

$$\text{Elec}_{\text{Compost}}^{\text{Sell}} = f_{\text{Elec}}^{\text{Biogas}} \text{Biogas}_{\text{Compost}}^{\text{Elec}} \quad [11] \text{kWh} \quad (5.54)$$

### 5.3.3.8 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เงื่อนไขที่เกี่ยวกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลย์ ขึ้นอยู่กับกิจกรรมแต่ละกิจกรรมในขบวนการ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จาก ค่าสัมประสิทธิ์ CDE คูณ กับปริมาณของกิจกรรมนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ CDE สามารถหาได้จากงานวิจัยขององค์กรต่างๆ ในต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลเหล่านี้

ฟังก์ชันเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.55) (5.57) (5.59) (5.61) (5.63) (5.65) (5.67) (5.69) และ (5.71) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.56) (5.58) (5.60) (5.62) (5.64) (5.66) (5.68) (5.70) และ (5.72)

ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Landfill = สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Landfill x ปริมาณขยะใช้สำหรับ Landfill ตัน (5.55)

$$CO2_{Landfill}(s) = f_{CO2}^{Landfill} Solid_{Landfill}(s) \quad [12] \quad \text{ตัน} \quad (5.56)$$

ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Composting = สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Compose x ปริมาณขยะอินทรีย์ ใช้สำหรับขบวนการหมัก ตัน (5.57)

$$CO2_{Compost}(s) = f_{CO2}^{Compost} Solid_{Compost}(s) \quad [12] \quad \text{ตัน} \quad (5.58)$$

ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Incineration = สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Incineration x ปริมาณขยะใช้สำหรับขบวนการ Incineration ตัน (5.59)

$$CO2_{Incineration}(s) = f_{CO2}^{Incineration} Solid_{Incineration}(s) \quad [13] \quad \text{ตัน} \quad (5.60)$$

ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogasจากขบวนการ Landfill = สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้กระแสไฟฟ้า x ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ Landfill สำหรับขายให้กับ Spot Market ตัน (5.61)

$$CO2_{Landfill}^{Elec}(s) = f_{CO2}^{Elec} Elec_{Landfill}^{Sell} \quad [14] \quad \text{ตัน} \quad (5.62)$$

ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขาย ก๊าซธรรมชาติ ที่ผลิตจาก Biogasจากขบวนการ Landfill = สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ก๊าซธรรมชาติ x ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill และขายเป็นก๊าซธรรมชาติ ตัน (5.63)

$$CO2_{Landfill}^{NG}(s) = f_{CO2}^{NG} Biogas_{Landfill}^{NG} \quad [14] \quad \text{ตัน} \quad (5.64)$$

ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogasจากขบวนการ Composting =  
 สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้กระแสไฟฟ้า x ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่  
 ผลิตจาก Biogas จากขบวนการหมักสำหรับขายให้กับ Spot  
 Market ตัน (5.65)

$$CO2_{Compost}^{Elec}(s) = f_{CO2}^{Elec} Elec_{Compost}^{Sell} \quad [14] \quad \text{ตัน} \quad (5.66)$$

ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขาย ก๊าซธรรมชาติ ที่ผลิตจาก Biogasจากขบวนการ Composting =  
 สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ก๊าซธรรมชาติ x ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้  
 จากขบวนการหมักขยะและขายเป็นก๊าซธรรมชาติ ตัน (5.67)

$$CO2_{Compost}^{NG}(s) = f_{CO2}^{NG} Biogas_{Compost}^{NG} \quad [14] \quad \text{ตัน} \quad (5.68)$$

ปริมาณ CDE ที่ ลดลงจาก การขายปุ๋ยอินทรีย์ = สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ x ปริมาณ  
 ปุ๋ยอินทรีย์จากขบวนการหมัก ตัน (5.69)

$$CO2_{Compost}^{Fertilizer} = f_{CO2}^{Fertilizer} Fertilizer_{Compost} \quad [15] \quad \text{ตัน} \quad (5.70)$$

ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยจากขบวนการ Recycle = สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ขยะ Recycle x  
 (ปริมาณขยะประเภทแก้ว + กระดาษ + โลหะ +  
 พลาสติก) ตัน (5.71)

$$CO2_{Recycle}(s) = f_{CO2}^{Recycle} (Glass(s) + Paper(s) + Metal(s) + Plastic(s)) \quad [12] \quad \text{ตัน} \quad (5.72)$$

### 5.3.3.9 ฟังก์ชันเงินไขเกี่ยวกับต้นทุน

เงินไขที่เกี่ยวกับต้นทุน คือ ต้นทุนของขบวนการ Composting, Landfill, Incineration และ Recycle หาได้จาก ผลคูณของสัมประสิทธิ์ต้นทุนของขบวนการนั้น กับ ปริมาณขยะที่นำมาเข้าขบวนการนั้นๆ

ฟังก์ชันเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.55) (5.57) (5.59) (5.61) (5.63)

(5.65) (5.67) (5.69) และ (5.71) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.56) (5.58) (5.60) (5.62) (5.64) (5.66) (5.68) (5.70) และ (5.72)

ต้นทุนในขบวนการ Composting = สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Composting จากขยะ x ปริมาณ  
ขยะอินทรีย์ ใช้สำหรับขบวนการหมัก บาท (5.73)

$$\text{Cost}_{\text{Compost}}(s) = f_{\text{Cost}}^{\text{Compost}} \text{Solid}_{\text{Compost}}(s) \quad \text{บาท} \quad (5.74)$$

ต้นทุนในขบวนการ Landfill = สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Landfill ด้วยขยะ x ปริมาณขยะใช้  
สำหรับ Landfill บาท (5.75)

$$\text{Cost}_{\text{Landfill}}(s) = f_{\text{Cost}}^{\text{Landfill}} \text{Solid}_{\text{Landfill}}(s) \quad \text{บาท} \quad (5.76)$$

ต้นทุนในขบวนการ Incineration = สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Incineration ด้วยขยะ x ปริมาณ  
ขยะใช้สำหรับขบวนการ Incineration บาท (5.77)

$$\text{Cost}_{\text{Incineration}}(s) = f_{\text{Cost}}^{\text{Incineration}} \text{Solid}_{\text{Incineration}}(s) \quad \text{บาท} \quad (5.78)$$

ต้นทุนในขบวนการ Recycling = สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการนำขยะมา Recycle x ปริมาณขยะใช้  
สำหรับ Recycle บาท (5.79)

$$\text{Cost}_{\text{Recycle}}(s) = f_{\text{Cost}}^{\text{Recycle}} \text{Solid}_{\text{Recycle}}(s) \quad \text{บาท} \quad (5.80)$$

### 5.3.3.10 ฟังก์ชันเงื่อนไขเกี่ยวกับรายได้

เงื่อนไขที่เกี่ยวกับรายได้ คือ รายได้ของผลผลิตต่างๆ หาได้จาก ผลคูณของราคาขายของ  
ผลผลิตของกิจกรรมนั้น กับ ปริมาณที่ขายผลผลิต

ฟังก์ชันเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5.81) (5.83) (5.85) (5.87) (5.89)  
(5.91) (5.93) (5.95) (5.97) (5.99) และ (5.101) และ เขียนในรูปของตัวแปรได้ดังสมการ (5.82)  
(5.84) (5.86) (5.88) (5.90) (5.92) (5.94) (5.96) (5.98) (5.100) และ (5.102)

รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ได้จากขบวนการ Landfill = ราคาจำหน่าย  
กระแสไฟฟ้า x ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ  
Landfill สำหรับขายให้กับ Spot Market บาท (5.81)

$$\text{Revenue}_{\text{Elec}}^{\text{Landfill}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Elec}}(s) \text{Elec}_{\text{Landfill}}^{\text{Sell}}(s) \quad \text{บาท} \quad (5.82)$$

รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติ ที่ได้จากขบวนการ Landfill = ราคาจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ x  
ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการ Landfill และขายเป็นก๊าซ  
ธรรมชาติ บาท (5.83)

$$\text{Revenue}_{\text{NG}}^{\text{Landfill}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{NG}}(s) \text{Biogas}_{\text{Landfill}}^{\text{NG}}(s) \quad \text{บาท (5.84)}$$

รายได้จากการขายกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas ที่ได้จากขบวนการ Composting = ราคาจำหน่าย  
กระแสไฟฟ้า x ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจาก Biogas จากขบวนการ  
หมักสำหรับขายให้กับ Spot Market บาท (5.85)

$$\text{Revenue}_{\text{Elec}}^{\text{Compost}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Elec}}(s) \text{Elec}_{\text{Compost}}^{\text{Sell}}(s) \quad \text{บาท (5.86)}$$

รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติ ที่ได้จากขบวนการ Composting = ราคาจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ x  
ปริมาณไบโอแก๊สที่ได้จากขบวนการหมักขยะและขายเป็นก๊าซ  
ธรรมชาติ บาท (5.87)

$$\text{Revenue}_{\text{NG}}^{\text{Compost}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{NG}}(s) \text{Biogas}_{\text{Compost}}^{\text{NG}}(s) \quad \text{บาท (5.88)}$$

รายได้จากการขายปุ๋ยอินทรีย์ ที่ได้จากขบวนการ Composting = ราคาจำหน่ายปุ๋ยอินทรีย์ x  
ปริมาณปุ๋ยอินทรีย์จากขบวนการหมัก บาท (5.89)

$$\text{Revenue}_{\text{Fertilizer}}^{\text{Compost}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Fertilizer}}(s) \text{Fertilizer}(s) \quad \text{บาท (5.90)}$$

รายได้จากการขายขี้เถ้า ที่ได้จากขบวนการ Incineration = ราคาจำหน่ายขี้เถ้าจากการเผา x เถ้า  
จากขบวนการเผาขยะ ขายใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง บาท (5.91)

$$\text{Revenue}_{\text{Ash}}^{\text{Incineration}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Ash}}(s) \text{Ash}(s) \quad \text{บาท (5.92)}$$

รายได้จากการนำขยะประเภทแก้วมา Recycle = ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทแก้ว x  
ปริมาณขยะประเภทแก้ว บาท (5.93)

$$\text{Revenue}_{\text{Glass}}^{\text{Recycle}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Glass}}(s) \text{Glass}(s) \quad \text{บาท (5.94)}$$

รายได้จากการนำขยะประเภทโลหะมา Recycle = ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทโลหะ x  
ปริมาณขยะประเภทโลหะ บาท (5.95)

$$\text{Revenue}_{\text{Metal}}^{\text{Recycle}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Metal}}(s) \text{Metal}(s) \quad \text{บาท (5.96)}$$

รายได้จากการนำขยะประเภทกระดาษมา Recycle = ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทกระดาษ  
x ปริมาณขยะประเภทกระดาษ บาท (5.97)

$$\text{Revenue}_{\text{Paper}}^{\text{Recycle}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Paper}}(s)\text{Paper}(s) \quad \text{บาท (5.98)}$$

รายได้จากการนำขยะประเภทพลาสติกมา Recycle = ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภท  
พลาสติก x ปริมาณขยะประเภทพลาสติก บาท (5.99)

$$\text{Revenue}_{\text{Plastic}}^{\text{Recycle}}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{Plastic}}(s)\text{Plastic}(s) \quad \text{บาท (5.100)}$$

รายได้จาก CDE credits = มูลค่า CDE x ปริมาณ CDE ที่ปลดปล่อยสุทธิ บาท (5.101)

$$\text{Revenue}_{\text{CO}_2}(s) = f_{\text{Price}}^{\text{CO}_2} \text{CO}_{2\text{Total}}(s) \quad [11] \quad \text{บาท (5.102)}$$

#### 5.3.4 การกำหนดค่าให้กับพารามิเตอร์

เนื่องจากแบบจำลองเกี่ยวข้องกับขบวนการนำขยะ ไปกำจัดใน 4 ขบวนการที่เกี่ยวข้องกับการนำขยะมา Recycle และผลิตพลังงานจากขบวนการกำจัดขยะ ในประเทศไทยยังไม่ค่อยมีข้อมูลทางสถิติเกี่ยวกับขบวนการเหล่านี้มากนัก ดังนั้นค่าของพารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะได้รับการศึกษาทางวิจัยในต่างประเทศ ซึ่งสามารถกำหนด ค่าของพารามิเตอร์ได้ดัง ตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 แสดงค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

พารามิเตอร์	ความหมาย	ค่า	หน่วย
$f_{\text{Compost}}^{\text{Solid}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Compost	คำนวณโดย โปรแกรม	-
$f_{\text{Compost}}$	Selection Factor (Binary Value)		-
$f_{\text{Incineration}}^{\text{Solid}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Incineration		-
$f_{\text{Incineration}}$	Selection Factor (Binary Value)		-
$f_{\text{Landfill}}^{\text{Solid}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Landfill		-
$f_{\text{Landfill}}$	Selection Factor (Binary Value)		-
$f_{\text{Recycle}}^{\text{Solid}}$	สัดส่วนขยะที่นำมาทำขบวนการ Recycle		-
$f_{\text{Recycle}}$	Selection Factor (Binary Value)		-
$f_{\text{Biogas}}^{\text{Compost}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแก๊สจากขบวนการ Composting	61.615	m <sup>3</sup> /Ton
$f_{\text{Biogas}}^{\text{Landfill}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตไบโอแก๊สจากขบวนการ Landfill	52.700	m <sup>3</sup> /Ton
$f_{\text{Fertilizer}}^{\text{Compost}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตปุ๋ยจากขบวนการ Composting	0.150	Ton/Ton
$f_{\text{Ash}}^{\text{Incineration}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตขี้เถ้าจากขบวนการ Incineration	0.280	Ton/Ton
$f_{\text{Glass}}^{\text{Recycle}}$	สัดส่วนขยะประเภทแก้ว จาก ขยะ Recycle	จากตารางที่ 5.1	Ton/Ton
$f_{\text{Metal}}^{\text{Recycle}}$	สัดส่วนขยะประเภทโลหะ จาก ขยะ Recycle		Ton/Ton
$f_{\text{Paper}}^{\text{Recycle}}$	สัดส่วนขยะประเภทกระดาษ จาก ขยะ Recycle		Ton/Ton
$f_{\text{Plastic}}^{\text{Recycle}}$	สัดส่วนขยะประเภทพลาสติก จาก ขยะ Recycle		Ton/Ton

ตารางที่ 5.13 (ต่อ)

$f_{\text{Elec}}^{\text{Biogas}}$	สัมประสิทธิ์การผลิตกระแสไฟฟ้าจากไบโอแก๊ส	2.02 [71]	kWh/m <sup>3</sup>
$f_{\text{CO}_2}^{\text{Landfill}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Landfill	0.175 [83]	Ton/Ton
$f_{\text{CO}_2}^{\text{Compost}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Compose	0.175 [83]	Ton/Ton
$f_{\text{CO}_2}^{\text{Incineration}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากขบวนการ Incineration	1.44 [84]	Ton/Ton
$f_{\text{CO}_2}^{\text{Elec}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้กระแสไฟฟ้า	0.00055 [69]	Ton/kWh
$f_{\text{CO}_2}^{\text{NG}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ก๊าซธรรมชาติ	0.00197 [69]	Ton/m <sup>3</sup>
$f_{\text{CO}_2}^{\text{Fertilizer}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์	0.1 [70]	Ton/Ton
$f_{\text{CO}_2}^{\text{Recycle}}$	สัมประสิทธิ์ CDE จากการใช้ขยะ Recycle	0.175 [83]	Ton/Ton
$f_{\text{Cost}}^{\text{Compost}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Composing จากขยะ	1,098.93 [83]	Baht/Ton
$f_{\text{Cost}}^{\text{Landfill}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Landfill ด้วยขยะ	1,081.78 [85]	Baht/Ton
$f_{\text{Cost}}^{\text{Incineration}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการ Incineration ด้วยขยะ	3,876.50 [85]	Baht/Ton
$f_{\text{Cost}}^{\text{Recycle}}$	สัมประสิทธิ์ต้นทุนขบวนการนำขยะมา Recycle	1,528.86 [85]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{Elec}}(s)$	ราคาจำหน่ายกระแสไฟฟ้า	[86]	Baht/kWh
$f_{\text{Price}}^{\text{NG}}(s)$	ราคาจำหน่ายก๊าซธรรมชาติ	70.52 [65]	Baht/m <sup>3</sup>
$f_{\text{Price}}^{\text{Fertilizer}}(s)$	ราคาจำหน่ายปุ๋ยอินทรีย์	2,600.00 [64]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{Ash}}(s)$	ราคาจำหน่ายขี้เถ้าจากการเผา	1,000 [87]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{Glass}}(s)$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทแก้ว	1,000 [88]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{Metal}}(s)$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทโลหะ	5,250 [88]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{Paper}}(s)$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทกระดาษ	3,450 [88]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{Plastic}}(s)$	ราคาจำหน่ายขยะ Recycle ประเภทพลาสติก	13, 450 [88]	Baht/Ton
$f_{\text{Price}}^{\text{CO}_2}$	มูลค่า CDE	[71]	Baht/Ton

#### 5.4 ผลและการวิเคราะห์ผล

จากสมการวัตถุประสงค์ สมการข้อจำกัด และ การกำหนดแปร ที่กำหนดในหัวข้อ 5.3 สามารถเขียนกำหนดตัวแปร และสมการของแบบจำลองโดยโปรแกรม GAMS เวอร์ชัน 24.7.1 ได้ดังแสดงในภาคผนวก ค. หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ประมวลผลเพื่อหาค่าเหมาะสมที่สุดของแบบจำลองด้วยโปรแกรม GAMS ดังแสดงผลการวิเคราะห์คำนวณของปัญหาการบริหารจัดการพลังงานและขยะอย่างยั่งยืน ในภาคผนวก ค. และนำมาเขียนเป็นตารางแสดงรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการประมวลผลของแบบจำลอง โดยแบบจำลองได้ถูกกำหนดให้ทำการพิจารณาบริหารการกำจัดขยะใน 4 ขบวนการ คือ Composting Landfill Incineration และ Recycle ภายใต้เงื่อนไขการแปรผันค่าปริมาณขยะและราคาค่ากระแสไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์ที่

แสดงในตารางที่ 5.14 แบบจำลองค่าเหมาะสมได้เลือกการบริหารจัดการการกำจัดขยะด้วยวิธี Composting และ Landfill เนื่องจากมีต้นทุนต่ำสุด และให้ค่าการปล่อย CDE ต่ำสุด โดยมีปริมาณขยะที่นำไปเข้าขบวนการ Composting เท่ากับ 6,247 ตัน และ นำไปใช้ฝังกลบ 3,758 ตัน ส่วนประกอบของขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ เป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกขบวนการในการกำจัดขยะไปโอแก๊สที่ผลิตได้ และ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากไปโอแก๊ส ถูกขายให้กับตลาดพลังงาน นอกจากนี้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์แล้ว ยังได้ผลตอบแทนทางสิ่งแวดล้อมในรูปของการค่าการปล่อย CDE ที่ลดลง จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ขบวนการ Composting และ Landfill มีความน่าสนใจ ค่าคาดหวังของค่า CDE สุทธิ ลดลงเหลือ 602 ตัน/วัน และ ผลตอบแทนคาดหวังเท่ากับ 31,846,311 บาท/วัน

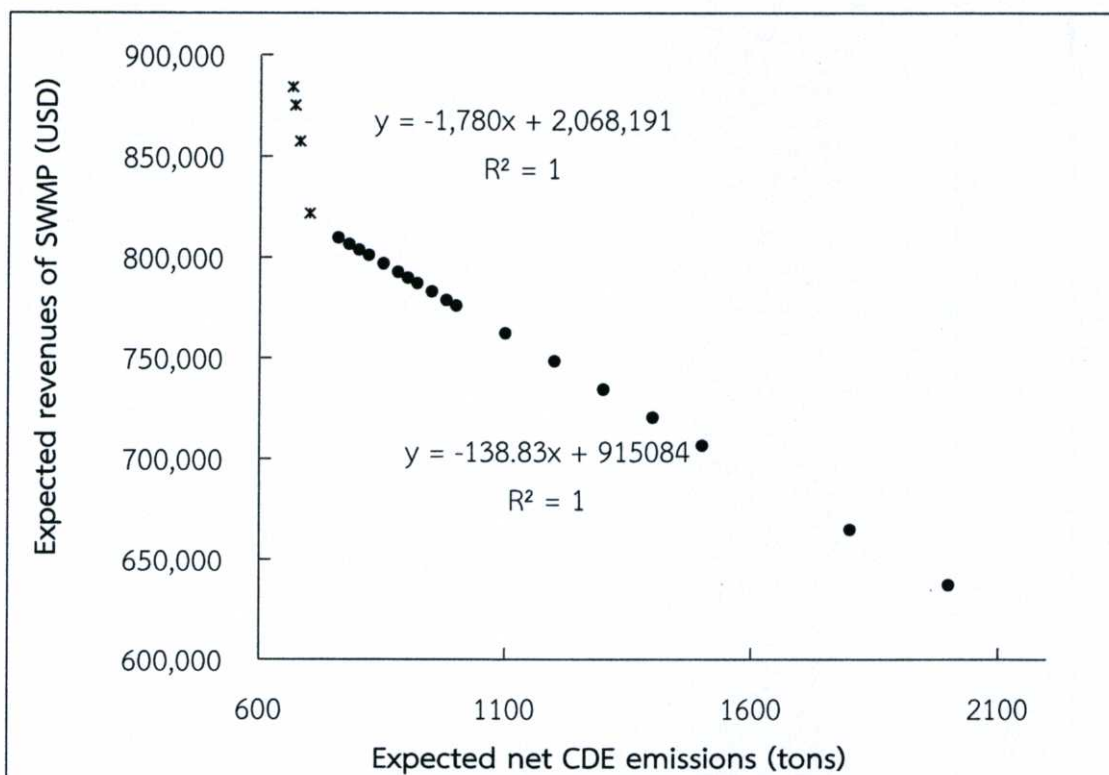
ตารางที่ 5.14 ผลลัพธ์ค่าเหมาะสม และ เป้าหมายค่าเหมาะสมของแบบจำลอง ภายใต้ค่าดำเนินการต่ำสุด (หรือผลตอบแทนสูงสุด) และค่า CDE ต่ำสุด

รายการ	ปริมาณคาดหวัง	
	(Expected Amount)	หน่วย/วัน
1. ปริมาณขยะสำหรับขบวนการ Composting	6,247	ตัน
2. ปริมาณขยะสำหรับขบวนการ Landfill	3,758	ตัน
3. ปริมาณ Biogas ผลิตจากขบวนการ Composting	384,920	m <sup>3</sup>
4. ปริมาณ Biogas ผลิตจากขบวนการ Composting ขายเป็นก๊าซธรรมชาติ	384,920	m <sup>3</sup>
5. ปริมาณ Biogas ผลิตจากขบวนการ Landfill	198,040	m <sup>3</sup>
6. ปริมาณ Biogas ผลิตจากขบวนการ Landfill ขายเป็นก๊าซธรรมชาติ	198,040	m <sup>3</sup>
7. ปริมาณ CDE ที่ปล่อยจากขบวนการ Composting	1,093	ตัน
8. ปริมาณ CDE ที่ปล่อยจากขบวนการ Landfill	658	ตัน
9. ค่า Net CDE emissions	602	ตัน
10. รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติจากขบวนการ Landfill	27,145,532	บาท
11. รายได้จากการขายก๊าซธรรมชาติจากขบวนการ Composting	13,966.466	บาท
12. รายได้รวม	31,846,311	บาท

ขบวนการ Incineration และ Recycle ไม่ได้ถูกเลือกสำหรับการกำจัดขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ เพราะทั้ง 2 ขบวนการ ให้ค่าผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และ ผลตอบแทนทางสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เมื่อเทียบกับขบวนการ Composting และ Landfill

แบบจำลองหลายวัตถุประสงค์ที่กำหนดให้พิจารณาวัตถุประสงค์ 2 ด้าน และถูกใช้เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด การประมาณค่าชายแดนพารेटโต (Approximated Pareto Frontier) [14]

(ดูรูปที่ 5.9) ซึ่งให้เห็นข้อมูลที่สำคัญคือเมื่อรายได้ของโรงกำจัดขยะเพิ่มขึ้น ค่า Net CDE Emission จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ค่าดำเนินการเพิ่มขึ้น (นั่นคือผลตอบแทนลดลง) เมื่อปริมาณขยะครัวเรือนเพิ่มขึ้น และ เพราะค่า CDE Emission จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อปริมาณขยะครัวเรือนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.9 การประมาณค่าขายแดนพาเรโต แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรายได้คาดการณ์กับ Net CDE Emission คาดหมาย

นอกจากนั้นแบบจำลองหลายวัตถุประสงค์ที่ทำการสร้างขึ้นมาทำให้เกิดช่วงของค่า CDE Emission คาดหมาย ที่สัมพันธ์กับ ค่ารายได้คาดการณ์ ที่น่าสนใจ 2 ช่วง (ดูรูปที่ 5.9) ช่วงแรก ค่า CDE Emission มีค่าระหว่าง 665-700 ตัน/วัน และ รายได้ของโรงกำจัดขยะมีรายได้ 884,264-821,953 USD/วัน (1 ดอลลาร์สหรัฐ (USD) = 32.35 บาท) รายได้จะมีค่าลดลง 1,780 USD/ตัน ของ CDE Emission ช่วงที่สอง ค่า CDE Emission มีค่ามากกว่า 700 ตัน/วัน และ โรงกำจัดขยะมีค่าน้อยกว่า 821,953 USD/วัน ลดลงประมาณ 138.83 USD/ตัน ของ CDE Emission

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองหาค่าเหมาะสมแบบสุ่มสำหรับระบบบริหารจัดการการกำจัดขยะโดยมีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ 2 ด้าน คือ ผลตอบแทนสูงสุด (หรือค่าต้นทุนดำเนินการต่ำสุด) และ ค่าการปล่อย CDE ต่ำสุด ข้อมูลนำเข้า คือ ปริมาณขยะครัวเรือนและอัตราค่ากระแสไฟฟ้าซึ่งมีค่าไม่แน่นอน ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า โรงกำจัดขยะควรใช้การกำจัดขยะโดยขบวนการ Composting และ Landfill เพื่อกำจัดขยะครัวเรือนในกรุงเทพฯ และ ได้ผลผลิต คือ ปุ๋ยอินทรีย์ ก๊าซ Bio-methane สำหรับนำมาจำหน่ายเป็นรายได้ให้กับโรงงาน และพบว่าค่า CDE

Emission มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าต้นทุนดำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์แบบจำลองยังชี้ให้เห็นว่า ปริมาณขยะครัวเรือนมีผลต่อการเลือกระบบบริหารจัดการขยะ ต้นทุนดำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้น (นั่นคือ ผลตอบแทนลดลง) เมื่อปริมาณขยะครัวเรือนเพิ่มขึ้น แบบจำลองที่จัดทำการศึกษานี้ได้ ชี้แนวทางให้กับผู้บริหารโรงกำจัดขยะ ให้ใช้ขบวนการ Composing และ Landfill สำหรับกำจัดขยะครัวเรือน ในกรุงเทพฯ ค่าดำเนินการและ Net CDE Emission สามารถลดลงได้เมื่อปริมาณขยะมีปริมาณลดลง

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปผลเป็นประเด็นได้ดังนี้

1. แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่าของตลาดเอทานอลในประเทศไทย
2. การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียในกรุงเทพฯ
3. การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดขยะ
4. การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมกรณีศึกษาประเทศไทย

ซึ่งแต่ละหัวข้อมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

#### 6.1.1 แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่าของตลาดเอทานอลในประเทศไทย

การผลิตเอทานอล มีผู้ผลิตเอทานอล 3 ฝ่าย คือ ผลิตเอทานอลจาก อ้อย มันสำปะหลัง และ กากน้ำตาล เกษตรกรผู้ปลูกอ้อย และ มันสำปะหลังสามารถเลือกในการขายผลผลิตให้กับตลาดอาหาร หรือตลาดพลังงานได้ ดังนั้น การตัดสินใจในการเลือกผลิตเอทานอล จากวัตถุดิบ ทั้ง 3 แหล่ง จึงเป็นการตัดสินใจที่ซับซ้อนขึ้น ในการวิเคราะห์ได้ ใช้การวิเคราะห์เรื่องราว เพื่อช่วยจำลองสถานการณ์ของตลาดผู้ผลิตเอทานอลได้ เพื่อแสดงให้เห็นแนวทางในการตัดสินใจ เพื่อให้ได้ต้นทุนในการผลิตเอทานอลต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ตัดสินใจมีหลายฝ่าย ทั้งฝ่ายผู้ผลิตเอทานอล และ เกษตรกร ผู้ผลิตอ้อย มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล ปัญหาการตัดสินใจแบบนี้จึงมีความซับซ้อนต่อการคาดการณ์สถานการณ์ เพราะปริมาณผลผลิตทางการเกษตรมีปริมาณและราคาที่ไม่แน่นอน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อประกอบการตัดสินใจสำหรับผู้ผลิตเอทานอล

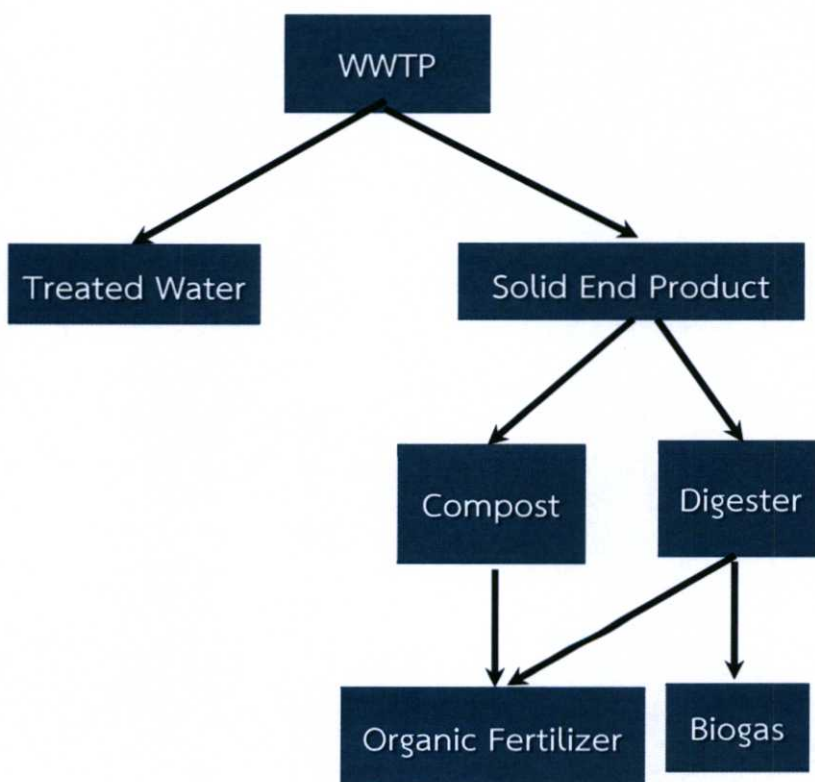
จากแบบจำลองพบว่า ผู้ผลิตเอทานอล จะเลือกผลิตจากกากน้ำตาลอย่างเดียว เนื่องจากมีราคาถูกที่สุด ทำให้ได้ราคาเอทานอลเท่ากับ 0.65 \$/แกลลอน หากว่าปริมาณของกากน้ำตาลลดลง ยกตัวอย่างเช่น ผู้ผลิตพลังงานควรเลือกผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากกากน้ำตาลและอ้อย ถ้าปริมาณของกากน้ำตาลลดลงถึง 0.2% และ ผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจากอ้อย ถ้า ผู้ปลูกอ้อยไม่มีการป้อนกากน้ำตาลเข้าสู่ตลาดพลังงาน ราคาเอทานอลเท่ากับ 0.77\$/แกลลอน

#### 6.1.2 การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียในกรุงเทพฯ

น้ำเสีย ก็เป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ต้องมีการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะน้ำเสียเกิดขึ้นทุกวันจากกิจกรรมต่างๆ ของ คริวเรือน และ อุตสาหกรรม สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานครเป็นผู้รับบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการน้ำเสียในกรุงเทพฯ ที่มี

ปริมาณ 1,097,491 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ( $\text{m}^3/\text{วัน}$ ) สำหรับ โรงบำบัดน้ำเสีย 19 แห่ง ซึ่งมีปริมาณกากตะกอนน้ำเสีย ที่ต้องดำเนินการกำจัดอย่างได้ประสิทธิภาพ คือ ใช้ค่าดำเนินการในการกำจัดตะกอนน้ำเสียน้อยที่สุด ขณะเดียวกัน ก็ต้องคำนึงถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมด้วย คือวิธีการกำจัดตะกอนน้ำเสียนั้น ต้องส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งแสดงออกมาในรูปของ ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลสุทธิที่น้อยที่สุด เนื่องจากมีหลายปัจจัยในการพิจารณา และมี 2 วัตถุประสงค์ จึงทำให้ผู้บริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสียยากต่อการพิจารณาตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพในเวลาอันสั้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ แบบจำลองหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าเหมาะสม ของฟังก์ชัน 2 วัตถุประสงค์ ถูกใช้เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหา

จากผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นพบว่า แบบจำลองได้แนะนำให้บริหารจัดการการกำจัดตะกอนน้ำเสียด้วย วิธีการย่อยสลาย และการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งได้ผลพลอยได้คือ ก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และ ปุ๋ยหมัก ตามลำดับ เนื่องจากมีค่าดำเนินการที่ถูกกว่า การนำไปเผา และการฝังกลบ ทำให้ได้แผนภาพของการบริหารจัดการน้ำเสียและตะกอนน้ำเสียเป็นดังรูปที่ 6.1. ปริมาณน้ำเสีย และ กากตะกอนน้ำเสีย ในกรุงเทพฯ เป็นเหตุผลสำคัญ ที่มีอิทธิพลต่อการเลือกระบบบริหารจัดการโรงบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นก๊าซชีวภาพถูกผลิตขึ้นและก๊าซชีวภาพที่ผลิตกระแสไฟฟ้าถูกขายให้กับตลาดพลังงาน นอกจากผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์แล้ว ยังได้ผลตอบแทนทางสิ่งแวดล้อมในรูปของการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย



รูปที่ 6.1 แผนภาพการบริหารจัดการน้ำเสียและกากตะกอนน้ำเสียที่แนะนำโดยแบบจำลอง สำหรับการบริหารจัดการน้ำเสียในกรุงเทพฯ

ถึงแม้ว่า ผลพลอยได้จากการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ด้วยวิธีการย่อยสลายแบบแอนาโรบิค ซึ่งได้ก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า และการนำไปหมักทำปุ๋ยหมัก ซึ่งได้ปุ๋ยหมักสำหรับนำไปขายหรือใช้งาน แต่เนื่องจากปริมาณกากตะกอนน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพฯ หลายแห่ง ยังมีปริมาณไม่มาก ทำให้รายได้จากผลพลอยได้ ยังไม่เพียงพอกับ รายจ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ยกเว้นโรงบำบัดน้ำเสียที่ ดินแดง ช่องนนทรีที่ได้รายได้จากกากตะกอนน้ำเสีย 126,447 บาท/วัน และ 15,285 บาท/วัน ตามลำดับ เนื่องจากเป็นโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ และ มีปริมาณกากตะกอนน้ำเสียปริมาณมากในแต่ละวัน ทำให้คุ้มค่าในการดำเนินการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกากตะกอนน้ำเสีย และนอกจากนั้นยังสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกด้วย

### 6.1.3 การใช้ทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดขยะ

กรุงเทพมหานคร มีประชากรอาศัยอยู่หนาแน่นมาก จึงทำให้มีปริมาณขยะครัวเรือนจำนวนมากในแต่ละวัน ปัญหาในการจัดการขยะจึงเป็นที่มีความสำคัญต่อการบริหารจัดการเมือง และสิ่งแวดล้อม และ ถือเป็นปัญหาในระดับประเทศ เพราะกรุงเทพมหานคร ถือเป็นต้นแบบของเมืองใหญ่ต่างๆ ในประเทศไทย

วิธีในการกำจัดขยะ ต้องพิจารณาบริหารการกำจัดขยะใน 4 ขบวนการ คือ Composing Landfill Incineration และ Recycle ซึ่งแต่ละวิธีการ ก็มีค่าดำเนินการ และมีผลตอบแทนแตกต่างกัน ในขณะเดียวกัน วิธีการกำจัด ก็ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งแสดงออกมาในรูปของค่า CDE อีกด้วย ดังนั้น การบริหารจัดการขยะอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน เพราะมีหลายปัจจัย ปริมาณขยะ อัตราค่ากระแสไฟฟ้า สัดส่วนของขยะแต่ละประเภท ฯลฯ ก็มีปริมาณที่ไม่แน่นอน และมี 2 วัตถุประสงค์ที่ต้องพิจารณาประกอบกัน จึงเป็นปัญหาที่ยากต่อการวิเคราะห์ตัดสินใจด้วยวิธีธรรมดา ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอการนำทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองหาค่าเหมาะสม มาหาทางเลือกในการบริหารจัดการการกำจัดขยะที่เหมาะสมที่สุด (ค่าดำเนินการน้อยที่สุด และมีค่า CDE น้อยที่สุด)

จากผลของการวิเคราะห์ สำหรับการบริหารจัดการขยะในกรุงเทพฯ แบบจำลองค่าเหมาะสม ได้เลือกการบริหารจัดการการกำจัดขยะด้วยวิธี Composing และ Landfill เนื่องจากมีต้นทุนต่ำสุด และให้ค่าการปล่อย CDE ต่ำสุด โดยมีปริมาณขยะที่นำไปเข้าขบวนการ Composing เท่ากับ 6,247 ตัน และ นำไปใช้ฝังกลบ 3,758 ตัน ไบโอดีที่ผลิตได้ และ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากไบโอดี ถูกขายให้กับตลาดพลังงาน ค่าคาดหมายของค่า CDE สุทธิ ลดลงเหลือ 602 ตัน/วัน และ ผลตอบแทนคาดหมายเท่ากับ 31,846,311 บาท/วัน ผลการวิเคราะห์แบบจำลองยังชี้ให้เห็นว่าปริมาณขยะครัวเรือนมีผลต่อการเลือกระบบบริหารจัดการขยะ ต้นทุนดำเนินการมีค่าเพิ่มขึ้น (นั่นคือผลตอบแทนลดลง) เมื่อปริมาณขยะครัวเรือนเพิ่มขึ้น

### 6.1.4 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการบริหารจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมกรณีศึกษาประเทศไทย

งานวิจัยนี้ ได้นำแบบจำลองการวิเคราะห์หาค่าเหมาะสม เพื่อนำมาใช้ช่วยในการตัดสินใจในการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม คือ การจัดการการผลิตเอทานอลจากผลผลิตการเกษตรซึ่งมีอยู่อย่าง

จำกัด การบริหารจัดการน้ำเสีย และ การบริหารจัดการขยะ ซึ่งปัญหาเหล่านี้มีผลกระทบต่อประเทศไม่เฉพาะแต่ด้านทางเศรษฐศาสตร์ แต่ยังส่งผลกระทบต่อในด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศ จึงถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องให้ความสำคัญในการบริหารจัดการอย่างถูกวิธีและยั่งยืน แต่ในขณะเดียวกัน การวิเคราะห์ตัดสินใจในปัญหาเหล่านี้ยังมีประสิทธิภาพและยั่งยืน ไม่สามารถกระทำได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ธรรมดา เพราะ ปัญหาเหล่านี้ มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาในคราวเดียวกัน และ พารามิเตอร์บางตัวมีความแปรผัน ในปัจจุบัน การวิเคราะห์ที่ใช้เพียงข้อมูลที่ได้รับ ประสบการณ์ของผู้ตัดสินใจ และ ความรู้สึก รวมทั้งการลองผิดลองถูก และ ปรับแก้ตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอาจทำให้เกิดความสูญเสียเงินในการดำเนินการและการบริหารจัดการมหาดศาล หากทำผิดแนวทางสูญเสียโอกาสในการได้รับผลตอบแทน จากการบริหารจัดการการกำจัดน้ำเสีย การกำจัดขยะอย่างถูกวิธี และครอบคลุม นอกจากนั้นวิธีการดำเนินการในปัจจุบันนั้นไม่ได้มีการคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดจากการดำเนินการในการบริหารจัดการการผลิตเอทานอล การกำจัดน้ำเสีย และการกำจัดขยะ

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 3 4 และ 5 ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาตลาดสมดุลของการผลิตเอทานอลในประเทศไทย ปัญหาการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการน้ำเสีย และ การบริหารจัดการขยะในกรุงเทพมหานคร โดยคำนึงปัจจัยต่างๆ ที่จำเป็นต้องพิจารณาได้อย่างครอบคลุม ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ที่มี เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ ทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์ และ สิ่งแวดล้อมในเวลาเดียวกัน

ผลของการวิจัยได้เปิดมิติใหม่ของการจัดการสิ่งแวดล้อม และ พลังงานของประเทศไทย ในการนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การหาค่าเหมาะสม มาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แทนการวิเคราะห์และตัดสินใจในรูปแบบเดิม ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการตัดสินใจผิดพลาด และจากการเสียโอกาสจากการได้รับผลพลอยได้จากการตัดสินใจในการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างถูกวิธี ซึ่งผลของการวิเคราะห์ในบทที่ 3 4 และ 5 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าเหมาะสมที่นำเสนอนี้ ให้ผลของการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมาก และใช้เวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์น้อยมาก อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ของแบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับ การตั้งสมการวัตถุประสงค์ สมการข้อจำกัด และการจัดหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ซึ่งต้องอาศัยการศึกษา ค้นคว้า ทางทฤษฎี และ งานวิจัยอย่างมาก แต่หากมีการเก็บข้อมูลและการศึกษาแบบต่อเนื่อง ก็จะทำให้ผู้ใช้งานแบบจำลองได้ข้อมูลที่มากขึ้นและดีขึ้น ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้ก็มีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วยเช่นกัน จึงเห็นควรให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องเริ่มนำแบบจำลองคณิตศาสตร์การวิเคราะห์หาค่าเหมาะสมมาใช้งานอย่างจริงจัง เพื่อช่วยแก้ปัญหาพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างยั่งยืน

นอกจากนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการหาค่าเหมาะสมทั้ง 3 รูปแบบ ที่มีหลักการในการวิเคราะห์ที่ไม่เหมือนกัน มาใช้ในการช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจ ซึ่งแต่ละแบบจำลอง มีหลักการที่แตกต่างกันดังนี้

#### A. แบบจำลองสมดุลแบบเน้นคุณค่าของตลาดเอทานอลในประเทศไทย

มีหลักการวิเคราะห์ของแบบจำลองดังนี้

1. แบบจำลองนี้ ข้อมูลที่นำเข้าในการวิเคราะห์ ใช้การวิเคราะห์แบบ Scenario Analysis เพื่อทำการแปรผันปริมาณวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลทั้ง 3 ชนิด คือ อ้อย มันสำปะหลัง และ

- กากน้ำตาล เพื่อให้แบบจำลองทำการค้นหาค่าสัดส่วนผสมของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด เพื่อให้ได้ต้นทุนในการผลิตเอทานอลที่ต่ำที่สุด
2. แบบจำลองนี้ มีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 1 ฟังก์ชัน คือ Maximize Profit
  3. มีการใช้หลักการของตลาดแข่งขันสมบูรณ์
  4. มีการใช้เงื่อนไข ของ Karush-Kuhn-Tucker (KKT)
- B. แบบจำลองทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียในกรุงเทพฯ
- มีหลักการวิเคราะห์ของแบบจำลองดังนี้
1. แบบจำลองนี้ ข้อมูลที่นำเข้าในการวิเคราะห์ ใช้ข้อมูลตะกอนน้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสียทั้ง 19 แห่ง และ สมมติกรณีนำมาจัดรวมในโรงบำบัดน้ำเสียกลาง
  2. แบบจำลองนี้ มีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 2 ฟังก์ชัน คือ Maximize Benefit และ Minimize CDE
- C. แบบจำลองทฤษฎีหลายวัตถุประสงค์และแบบจำลองการหาทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดขยะ
- มีหลักการวิเคราะห์ของแบบจำลองดังนี้
1. แบบจำลองนี้ ข้อมูลที่นำเข้าในการวิเคราะห์ ใช้ข้อมูลปริมาณขยะ และ ราคาค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลทั้ง 2 นี้ มีค่าที่ไม่แน่นอน จึงทำการประมาณค่าเป็น 3 ค่า คือ น้อย ปานกลาง มาก พร้อมค่าความน่าจะเป็นของแต่ละค่า โดยใช้หลักการของ pdf ผลที่ได้ออกมาจึงเป็น ค่าคาดหวัง (Expected Value) ซึ่งเป็นจุดหลักของการวิเคราะห์ของแบบจำลองนี้ ที่มีการใช้ค่าเฟ้นสุ่ม (Stochastic)
  2. แบบจำลองนี้ มีการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพียง 2 ฟังก์ชัน คือ Minimize Expected(ValueTotal) และ Minimize Expected(CO2Total)

## 6.2 แนวทางการวิจัยในอนาคต

ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก กำลังให้ความสำคัญกับการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากทุกประเทศกำลังประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นทุกๆ ปี แนวทางการแก้ไขปัญหานี้ได้เน้นการลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของสภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) CDE เป็นพารามิเตอร์ หนึ่งที่ใช้ในการควบคุมปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดจากการทำกิจกรรมต่างๆ ของ มนุษย์

ประเทศไทย ก็เช่นกัน ที่ได้ให้ความสำคัญกับการแก้ไขปัญหภาวะโลกร้อน โดยได้มีโครงการรณรงค์ต่างๆ ออกมามากมาย แต่ประเทศไทยกลับมีข้อมูล CDE ของกิจกรรมต่างๆ น้อยมาก หรือแทบจะไม่มี ในการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ได้อาศัยข้อมูล CDE ของกิจกรรมในการใช้พลังงาน การกำจัดน้ำเสีย การกำจัดขยะ การผลิตกระแสไฟฟ้า ฯลฯ จากงานวิจัยในต่างประเทศ อย่างเช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีข้อมูลค่อนข้างละเอียด และ ครอบคลุมในทุกด้าน

ดังนั้น ประเทศไทยควรส่งเสริมการทำวิจัยเกี่ยวกับการหาค่า CDE ของกิจกรรมต่างๆ รวมถึง การวิจัยด้านการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมที่นำค่า CDE มาใช้ โดยเป็นค่า CDE ที่คำนวณพารามิเตอร์ มาจากกิจกรรมทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย ซึ่งผู้วิจัยท่านอื่น สามารถนำค่า CDE ที่ทำได้เหล่านี้ไปต่อยอดงานวิจัยของตัวเองได้อีกต่อไป และ จะเป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการ พลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนอย่างแท้จริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2015. "UN projects world population to reach 8.5 billion by 2030, driven by growth in developing countries". July 30, 2015.
- [2] U.S. Census Bureau, International Data Base, 2010. World Population: 1950-2050, December.
- [3] KYTE, R. 2016, Sustainable Development, The World Bank, What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. [Online]  
Available: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTURBANDEVELOPMENT/0,,contentMDK:23172887~pagePK:210058~piPK:210062~theSitePK:337178,00.html>.
- [4] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, 2559, การเพิ่มขึ้นของประชากรโลก, [Online].  
Available : <http://www.lesa.biz/earth/global-change/world-population>.
- [5] กรมการปกครอง. กระทรวงมหาดไทย. "ประกาศสำนักทะเบียนกลาง กรมการปกครอง เรื่อง จำนวนราษฎรทั่วราชอาณาจักร ตามหลักฐานการทะเบียนราษฎร ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2558." [ออนไลน์].  
Available : [http://stat.bora.dopa.go.th/stat/y\\_stat58.htm](http://stat.bora.dopa.go.th/stat/y_stat58.htm) 2555.
- [6] สำนักงานสถิติแห่งชาติ, "บทสรุปสำหรับผู้บริหาร สำมะโนประชากรและเคหะ พ.ศ. 2553". 30 มกราคม 2554.
- [7] จูไรรัตน์ ดวงเดือน.// 2553./ การใช้ประโยชน์จากขยะ, โครงการสัมมนา เรื่อง "ปี 2558 ขยะล้นเมือง", 9 พฤศจิกายน 2555, [สไลด์] ณ ห้องประชุมคณะกรรมการฯ หมายเลข 213-216 ชั้น 2 อาคารรัฐสภา 2.
- [8] สำนักงานสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 2559, ปริมาณขยะมูลฝอย มีนาคม 2559. [Online]  
Available : [http://203.155.220.174/pdf/waste59\\_mar59.pdf](http://203.155.220.174/pdf/waste59_mar59.pdf)
- [9] สุรีย์ บุญญาพวงศ์ และณัฐพวงศ์ วรรณวิจิตร, 2551. คู่มือการจัดการน้ำเสีย, กลุ่มศึกษาและสนับสนุนองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [Online]  
Available : <http://www.sri.cmu.ac.th/~sri/local/water/mainpage.htm>
- [10] สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2538. โครงการศึกษาเพื่อจัดลำดับความสำคัญการจัดการน้ำเสียชุมชน [Online]  
Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/water\\_wt.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#s1)
- [11] United States Energy Information Administration, 2005. United States Energy Information Administration. [Online].  
Available : <http://www.eia.doe.gov/iea/overview.html>. (Accessed: 30 June 2008).

- [12] สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549, รายงานเรื่องการนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า เสนอต่อ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- [13] ฌัฎฎัฎฐศฎฐฎ ทั้บทั้มเทศ, 2550. ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ, [Online].  
Available : <http://www.no-poor.com/dssandos/Chapter4-dss.htm>
- [14] Bardo, J. W., and Hartman, J. J., 1982. Urban Sociology : A Systematic Introduction, U.S.A. : F.E. Peacock Publishers, Inc.
- [15] อุทั้ย บุญประเสริฐ, 2516, ตัวแบบ หน้จ้ลอง แบบจ้ลองหรือโมเดล, วารสารเศรษฐศาสตร์, 3, 3-4, เมษายน-กรกฎาคม 2516 : 31.
- [16] สมาน อัศวภูมิ, 2537, การพัฒนารูปแบบการบริหารการประถมศึกษาระดับจังหวัด, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาบริหารการศึกษา, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] กรรณิก้า เจิมเทียนชัย, 2539, การพัฒนารูปแบบการประเมินประสิทธิผลองค์การของวิทยาลัยพยาบาล สังกัดกระทรวงสาธารณสุข, วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาบริหารการศึกษา, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] Bloggang.com, 2553. [Online].  
Available : <http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=nonlocality&month=25-01-2010&group=3&gblog=6>
- [19] Chinyere Onwubiko., 1999, Introduction to Engineering Design Optimization, Prentice Hall, ISBN-13: 978-0201476736.
- [20] ศุฎฎัฎฐจันน์ รุ่งสุริยะวิบูลย์, 2559, เอกสารประกอบการสอน วิชา Econ 302 ทฤษฎีเศรษฐศาสตร์ จุลภาค 2, คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [21] Onwubiko, C., 1999, Introduction to Engineering Design Optimization, Prentice Hall
- [22] เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์, 2515, EEE 603 Advanced Mathematics for Electrical Engineering, มหาวิทยาลัยมหิดล [Online]  
Available : <http://www.inc.eng.kmutt.ac.th/~yoodyui/courses/EEE603/>
- [23] กรกนก โภคสวัสดิ์, 2550, วิธีการใช้โปรแกรม Excel, [Online].  
Available : <https://www.l3nr.org/posts/194516>
- [24] Wikipedia The Free Encyclopedia, 2016., General Algebraic Modeling System, [Online].  
Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Algebraic\\_Modeling\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/General_Algebraic_Modeling_System)
- [25] GAMS, 2016, GAMS Home Page, [Online]  
Available : <https://www.gams.com/>
- [26] Energy Information Administration (EIA), 2011, International Energy Statistics. ค้นเมื่อ 18 มกราคม 2555. [Online]  
Available : [www.eia.gov](http://www.eia.gov)
- [27] ส่วนเศรษฐกิจภาค, สำนักงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2555, เอทานอล โอกาสและความท้าทายของนโยบายพลังงานไทย, รายงานวิจัย, กันยายน, 2555.

- [28] Energy Information Administration (EIA), 2011., International Energy Outlook, World energy demand and economic outlook, ค้นเมื่อ 19 มกราคม 2555. [Online]  
Available : [www.eia.gov](http://www.eia.gov)
- [29] ส่วนวิชาการ, ธนาคารแห่งประเทศไทย, สำนักงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 2551., ผลกระทบจากการใช้น้ำมัน แก๊สโซฮอลล์ที่มีต่อภาคเกษตรกรรมและดุลการค้าไทย, รายงานวิจัย, ตุลาคม 2551.
- [30] บริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน), 2559, ค้นเมื่อ 6 พฤษภาคม 2559. [Online]  
Available : <http://www.iwebgas.com/oil/oil.html>
- [31] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549., การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า, รายงานบทสรุปผู้บริหาร กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ตุลาคม 2549.
- [32] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, 2013, "Annual report 2012".
- [33] ส่วนเศรษฐกิจภาค สำนักงานภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2555, รายงานสถานการณ์เอทานอล ปี 2555 และแนวโน้มปี 2556
- [34] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน, 2559, ค้นเมื่อ 6 พฤษภาคม 2559.[Online]  
Available : [http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=354%3A2010-08-02-02-13-21&catid=99%3Afaq&Itemid=323&lang=th](http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=354%3A2010-08-02-02-13-21&catid=99%3Afaq&Itemid=323&lang=th)
- [35] Gabriel, S. A., Kiet, S., and Zhuang, J., 2005, "A Mixed Complementarity-Based Equilibrium Model of Natural gas Markets," Operations Research, vol. 53, NO. 5, pp. 799-818, September-October 2005.
- [36] Gabriel, S. A., A. J. Conejo, J. D. Fuller, B. F. Hobbs, and C. Ruiz, 2010, Complementarity modeling in energy markets, Springer.
- [37] United Nations, 2011, World Population Prospects, The 2010 Revision, Volume I : Comprehensive Tables, New York.
- [38] Greenpeach Thailand, 2559, การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ค้นเมื่อ 6 พฤษภาคม 2559. [Online]  
Available : <http://www.greenpeace.org/seasia/th/campaigns/climate-and-energy/climate-change-science/co2-emissions/>
- [39] Ryckebosch, E., M. Drouillon, and H. Vervaeren (2011) "Techniques for transformation of biogas to biomethane", Biomass and bioenergy, v. 35, p. 1633-1645.
- [40] Elliott, R. J., M. R. Lyle, and H. Miao, 2010, A model for energy pricing with stochastic emission costs: Energy Economics, v. 32, p. 838-847.
- [41] Inside.Mines, 2559, Achieving Sustainability, Sustainability, ค้นเมื่อ 7 พฤษภาคม 2559. [Online]

Available : <http://inside.mines.edu/SUS-Sustainability>

- [42] สำนักผังเมือง, กรุงเทพมหานคร. 2554, ประชากรกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พ.ศ. 2554.
- [43] สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ, สำนักการระบายน้ำ, กรุงเทพมหานคร, 2554. รายงานประจำปี พ.ศ. 2554
- [44] Srinil, S., U-tapao, C. and Laokhongthavorn, L., "Identification of Optimal Strategies for Energy Management and Reducing Carbon Dioxide Equivalent Emissions at Wastewater Treatment Plants in Bangkok, Thailand", Conference on Advances in Civil engineering for Sustainable Development, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.
- [45] Resource Recovery Division, DC Water, 2014, Biosolids Resource Recovery, Monthly Report February 2014, ค้นเมื่อ 7 พฤษภาคม 2559. [Online]  
Available : <https://www.dewater.com/news/publications/2014%2002%20biosolids%20GM%20report.pdf>
- [46] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2559., กรุงเทพมหานคร, ค้นเมื่อ 7 พฤษภาคม 2559. [Online].  
Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/กรุงเทพมหานคร>
- [47] Chynoweth, D. P., 1992, "Global Significance of Biomethanogenesis," in Global Environmental Chemistry, in Dunnette, D. and O'Brian, eds., ACS Symposium Series, 338-351.
- [48] Vandevivere, P., and BAERE, L. de, 2002. Types of anaerobic digesters for solid wastes, Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes, London, 336 - 367.
- [49] DiStefano, T.D., and L.G.Belenky. 2009. Life-cycle analysis of energy and greenhouse gas emissions from anaerobic biodegradation of municipal solid waste. J. Envir. Engrg. 35 (11), 1097-1105.
- [50] Cohon, J.L., 2003, Multiobjective programming and planning, New York, NY: Academic Press.
- [51] Worldpopulationreview.com, 2559., Thai Population 2016, ค้นเมื่อ 9 พฤษภาคม 2559. [Online].  
Available : <http://worldpopulationreview.com/countries/thailand-population>
- [52] กรมควบคุมมลพิษ, 2553., ปริมาณมูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2548-2553, ค้นเมื่อ 9 พฤษภาคม 2559. [Online].  
Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/waste\\_wastethai48\\_53.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_wastethai48_53.html)
- [53] กรมควบคุมมลพิษ, 2554., รายงานฉบับสมบูรณ์ การสำรวจและเคราะห์ขยะชุมชนในประเทศไทย, ISBN 974-9669-23-1.
- [54] สำนักสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 2556., มูลฝอยจากกรุงเทพฯ ไปไหน?, ค้นเมื่อ 9 พฤษภาคม 2559. [Online].  
Available : <http://203.155.220.174/pdf/wasteJULY2556.pdf>

- [55] กล้าพูดความจริง, Thaipublica.org, 2557., สถานการณ์ขยะของไทย วิกฤตขยะ 26 ล้านตัน กัดได้อย่างถูกต้องแค่ 7.2 ล้านตัน, ค้นเมื่อ 9 พฤษภาคม 2559. [Online].  
Available : <http://thaipublica.org/2014/09/thailands-garbage-crisis/>
- [56] ธนกฤต บวกขุนทด, “การศึกษารูปแบบการจัดการการเก็บขยะชุมชน กรณีศึกษา : องค์การบริหารส่วนตำบลโนนเมืองพัฒนา อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา, โครงการวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต การบริหารงานก่อสร้างและสาธารณูปโภค สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553.
- [57] Ross, S. Simulation. Academic Press, 2012.
- [58] อำนวย ทองสถิตย์, “การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนเพื่อผลิตพลังงาน”, รายงานการศึกษาส่วนบุคคล (Individual Study) การฝึกอบรมหลักสูตรนักบริหารระดับสูง : ผู้นำที่มีวิสัยทัศน์ วิทยาลัยนักรบริหาร สำนักงาน กพ. [Online]  
Available : [http://www.ocsc.go.th/ocsc/th/uploads/File/47\\_1.pdf](http://www.ocsc.go.th/ocsc/th/uploads/File/47_1.pdf).
- [59] Mackenzie L., Masten, D. and Masten, S. J. Principles of Environmental engineering and science, McGraw-hill, 2004.
- [60] Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., and Dewil, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, Prog, Energy Combust. Sci., 2008, Vol. 34, No. 6, pp. 755–781.
- [61] Ryckebosch, E., Drouillon, M. and Vervaeren, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane, Biomass and bioenergy, 2011, Vol. 35, pp. 1633-1645.
- [62] Reitzel, S., Faquhar, G. and McBean, E. Temporal characterization of municipal solid waste leachate, Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, Vol. 19, No. 4, pp. 668-679.
- [63] Shariatmadari, N., Sadeghpour, A. H., and Razaghian, F. Effects of aging on the shear strength behavior of municipal solid waste. International Journal of Civil Engineering, 2014, Vol. 12, No. 3, pp. 226-237.
- [64] กรมสรรพากร, ประกาศกรมสรรพากร เรื่อง การคำนวณค่าหรือราคาเงินตราต่างประเทศเป็นเงินตราไทย, ค้นเมื่อ 10 พฤษภาคม 2559. [Online].  
Available : [http://www.rd.go.th/publish/fileadmin/user\\_upload/kormor/55.1.pdf](http://www.rd.go.th/publish/fileadmin/user_upload/kormor/55.1.pdf)
- [64] taradkaset.com, ปู่อินทรี, ค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2557. [Online].  
Available : <http://market.taradkaset.com/>
- [65] ptt Procurement, Natural Gas Procurement & Distribution, ค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2557. [Online].  
Available : <http://www.pttplc.com/EN/About/Business/PTT-Owned-Business/Gas-Unit/pages/natural-gas-procurement.aspx>
- [66] U-tapao, C., Gabriel, S. A., Peot, C., and Ramirez, M. 2013, A stochastic multi-objective, mixed-integer optimization model for wastewater-derived energy, Journal of Energy Engineering (ASCE), final review.

- [67] Appels, L., J. Baeyens, J. Degreè, and R. Dewil, 2008, Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge: Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, p. 755-781.
- [68] Metcalf&Eddy and AECOM, 2008, Biosolids management program summary report for the Blue Plains Advance Wastewater Treatment Plants.
- [69] The climate registry. General reporting protocols for the voluntary reporting program, version 1.1., 2008.
- [70] Brown, S., and P. Leonard, 2004, Building carbon credits with biosolids recycling: BioCycle, v. 45, p. 25-29.
- [71] Chalida U-tapao, Optimization and Equilibrium Modeling for Renewable Energy : Focus on Wastewater-to-Energy Application, Dissertation of the degree of Doctor of Philosophy, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park
- [72] กรมอาเซียน กระทรวงการต่างประเทศ, ผลการประชุมที่เกี่ยวข้อง : ศูนย์วิจัยกสิกรไทย เผยผลสำรวจ กรุงเทพฯ ศูนย์รวมด้านเศรษฐกิจของไทยและอาเซียน, คั่นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2557. [Online].  
Available : <http://www.mfa.go.th/asean/th/news/2352/32963-ศูนย์วิจัยกสิกรไทย-เผยผลสำรวจ-กรุงเทพฯ-ศูนย์รวมด้าน.html>
- [73] United States Environmental Protection Agency (EPA), Biosolids Technology Fact Sheet, Use of Incineration for Biosolids Management.
- [74] Krich K., Augenstein, D., Batmale, JP, Benemann J., Rutledge and B., Slour, D., Biomethane from Dairy Waste, A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California, Funded in Part through USDA Rural Development, Sustainable Conservation, July 2005, คั่นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2557. [Online].  
Available:<http://suscon.org/cowpower/biomethaneSourcebook/biomethanesourcebook.php>
- [75] Oleszkiewicz, J., and D. Mavinic, 2002, Wastewater biosolids: an overview of processing, treatment, and management: Journal of Environmental Engineering and Science, v. 1, p. 75-88.
- [76] Bonmat, A., X. Flotats, L. Mateu, and E. Campos, 2001, Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry: Water Science & Technology, v. 44, p. 109-116.
- [77] Wang, H., S. L. Brown, G. N. Magesan, A. H. Slade, M. Quintern, P. W. Clinton, and T. W. Payn, 2008, Technological options for the management of biosolids: Environmental Science and Pollution Research-International, v. 15, p. 308-317.
- [78] Rosso, D., and M. K. Stenstrom, 2008, The carbon-sequestration potential of municipal wastewater treatment: Chemosphere, v. 70, p. 1468-1475.

- [79] The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2004, Metrics for expressing greenhouse gas emissions: Carbon equivalents and carbon dioxide equivalents: The U. S. Environmental Protection Agency Office of Transportation and Air Quality, EPA 420-F- 05-2002.
- [80] Columbia Water and Sewer Authority, Biosolids Division Report, August 2011 ค้นเมื่อ 23 สิงหาคม 2557. [Online].  
Available:[http://www.dewater.com/news/publications/2011\\_08\\_biosolids\\_report.pdf](http://www.dewater.com/news/publications/2011_08_biosolids_report.pdf)
- [81] The U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2007, Opportunities for and benefits of combined heat and power at wastewater treatment facilities. EPA-430-R-07-003.
- [82] The United States Environmental Protection Agency (EPA), 2006, Status Report: Land Application of Biosolids (Report no. 2002-S-000004). Office of Inspector General, EPA, Washington, DC.
- [83] Muhle, S., Balsam I. and Cheeseman, C. R. Comparison of carbon emissions associated with municipal solid waste management in Germany and the UK, Resources, conservation and recycling, 2010, Vol. 54, No. 11, pp. 793-801.
- [84] Brown, S., Beecher, N. and Carpenter, A. Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use. Environmental science & technology, 2010, Vol. 44, pp. 9509-9515.
- [85] EPPO : Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand, ราคาน้ำมันวันนี้ ค้นเมื่อ 23 สิงหาคม 2557. [Online].  
Available : [http://www.eppo.go.th/retail\\_prices.html](http://www.eppo.go.th/retail_prices.html)
- [86] PEA, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, โครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้า, ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP), ค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2557. [Online].  
Available : <http://www.pea.co.th/vspp/Pages/vsppProject.aspx>
- [87] Nanagarden.com, ซื้อเก้าอี้, ค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2557. [Online].  
Available : <http://www.nanagarden.com/tag/ซื้อเก้าอี้>
- [88] วงษ์พานิชย์, ราคายะโยนหลัง, ค้นเมื่อ 29 สิงหาคม 2557. [Online].  
Available : <http://www.wongpanit.com/wpnnew/frm.price.php>

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

การกำหนดตัวแปร การสร้างสมการใน GAMS และผลการคำนวณ  
สำหรับแบบจำลองหาค่าเหมาะสมตลาดเอทานอล

```

1 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/07/»
  16 12:08:30 Page 1
2 General Algebraic Modeling System
3 Compilation
4
5
6   1 Positive variables
7   2 q_ES
8   3 R_ES
9   4 q_EC
10  5 R_EC
11  6 q_EM
12  7 R_EM
13  8 ;
14  9
15 10 variables
16 11 pi_E
17 12 ;
18 13
19 14 parameters
20 15 g_ES /25.03/
21 16 g_EC /28.80/
22 17 g_EM /21.16/
23 18 q_ES_max /685857900/
24 19 q_EC_max /478819800/
25 20 q_EM_max /691628600/
26 21 inter /39.973/
27 22 slope /0.00001/
28 23 f_S /0/
29 24 f_C /0/
30 25 f_M /0.002/
31 26 ;
32 27
33 28 Equation
34 29 con1
35 30 con2
36 31 con3
37 32 con4
38 33 con5
39 34 con6
40 35 con7
41 36 ;
42 37
43 38 con1.. -pi_E+g_ES+R_ES=g=0;
44 39 con2.. f_S*q_ES_max=g=q_ES;
45 40 con3.. -pi_E+g_EC+R_EC=g=0;
46 41 con4.. f_C*q_EC_max=g=q_EC;
47 42 con5.. -pi_E+g_EM+R_EM=g=0;
48 43 con6.. f_M*q_EM_max=g=q_EM;
49 44 con7.. q_ES+q_EC+q_EM=e={-(1/slope)*pi_E}+(inter/slope);
50 45
51 46 model ethanol /con1.q_ES, con2.R_ES, con3.q_EC, con4.R_EC, con5.q_EM, c»
  on6
52   .R_EM, con7.pi_E/;
53 47 solve ethanol using MCP;
54
55
56 COMPILATION TIME      = 0.000E+0000 SECONDS      2 MB  24.7.1 r56632 WEX-WEI
57 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/07/»
  16 12:08:30 Page 2
58 General Algebraic Modeling System

```

C:\Users\L\Documents\gamsdir\projdir\Etahnol.lst 7 ¼ÄÈÀÒ¼Á 2016 12:09:10

```
59 Equation Listing      SOLVE ethanol Using MCP From line 47
60
61
62 ---- con1  =G=
63
64 con1..  R_ES - pi_E =G= -25.03 ; (LHS = 0)
65
66
67 ---- con2  =G=
68
69 con2..  - q_ES =G= 0 ; (LHS = 0)
70
71
72 ---- con3  =G=
73
74 con3..  R_EC - pi_E =G= -28.8 ; (LHS = 0)
75
76
77 ---- con4  =G=
78
79 con4..  - q_EC =G= 0 ; (LHS = 0)
80
81
82 ---- con5  =G=
83
84 con5..  R_EM - pi_E =G= -21.16 ; (LHS = 0)
85
86
87 ---- con6  =G=
88
89 con6..  - q_EM =G= -1383257.2 ; (LHS = 0)
90
91
92 ---- con7  =E=
93
94 con7..  q_ES + q_EC + q_EM + 100000*pi_E =E= 3997300 ;
95
96      (LHS = 0, INFES = 3997300 ****)
97
98 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/07/»
   16 12:08:30 Page 3
99 General Algebraic Modeling System
100 Column Listing      SOLVE ethanol Using MCP From line 47
101
102
103 ---- q_ES
104
105 q_ES
106      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
107      -1      con2
108      1      con7
109
110
111 ---- R_ES
112
113 R_ES
114      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
115      1      con1
116
117
118 ---- q_EC
```

```

119
120 q_EC
121      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
122      -1      con4
123      1      con7
124
125
126 ---- R_EC
127
128 R_EC
129      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
130      1      con3
131
132
133 ---- q_EM
134
135 q_EM
136      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
137      -1      con6
138      1      con7
139
140
141 ---- R_EM
142
143 R_EM
144      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
145      1      con5
146
147
148 ---- pi_E
149
150 pi_E
151      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
152      -1      con1
153      -1      con3
154      -1      con5
155      100000  con7
156

```

157 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/07/»  
16 12:08:30 Page 4

158 General Algebraic Modeling System  
159 Model Statistics SOLVE ethanol Using MCP From line 47

160  
161

162 MODEL STATISTICS

```

163
164 BLOCKS OF EQUATIONS      7      SINGLE EQUATIONS      7
165 BLOCKS OF VARIABLES     7      SINGLE VARIABLES      7
166 NON ZERO ELEMENTS      13     NON LINEAR N-Z        0
167 DERIVATIVE POOL        20     CONSTANT POOL        16
168 CODE LENGTH             0
169

```

170  
171

171 GENERATION TIME = 0.281 SECONDS 3 MB 24.7.1 r56632 WEX-WEI

172  
173

174 EXECUTION TIME = 0.297 SECONDS 3 MB 24.7.1 r56632 WEX-WEI

175 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/07/»  
16 12:08:30 Page 5

176 General Algebraic Modeling System  
177 Solution Report SOLVE ethanol Using MCP From line 47

```

178
179
180             S O L V E             S U M M A R Y
181
182     MODEL    ethanol
183     TYPE     MCP
184     SOLVER   PATH                      FROM LINE 47
185
186     **** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
187     **** MODEL STATUS      1 Optimal
188
189     RESOURCE USAGE, LIMIT      0.046      1000.000
190     ITERATION COUNT, LIMIT    0      2000000000
191     EVALUATION ERRORS        0              0
192     7 row/cols, 13 non-zeros, 26.53% dense.
193
194     Path 4.7.04 (Mon Mar 14 08:41:56 2016)
195     Written by Todd Munson, Steven Dirkse, and Michael Ferris
196
197
198             LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
199
200     ---- EQU con1          -25.030   -25.030    +INF      .
201     ---- EQU con2          .           .         +INF      1.110
202     ---- EQU con3          -28.800   -26.140    +INF      .
203     ---- EQU con4          .           .         +INF      .
204     ---- EQU con5          -21.160   -21.160    +INF     1.3833E+6
205     ---- EQU con6          -1.383E+6 -1.383E+6  +INF      4.980
206     ---- EQU con7          3.9973E+6 3.9973E+6 3.9973E+6 26.140
207
208             LOWER      LEVEL      UPPER      MARGINAL
209
210     ---- VAR q_ES          .           .         +INF      .
211     ---- VAR R_ES          .           1.110     +INF      .
212     ---- VAR q_EC          .           .         +INF      2.660
213     ---- VAR R_EC          .           .         +INF      .
214     ---- VAR q_EM          .           1.3833E+6 +INF      .
215     ---- VAR R_EM          .           4.980     +INF      .
216     ---- VAR pi_E         -INF      26.140    +INF      .
217
218
219     **** REPORT SUMMARY :      0      NONOPT
220                               0      INFEASIBLE
221                               0      UNBOUNDED
222                               0      REDEFINED
223                               0      ERRORS
224
225
226     EXECUTION TIME      =      0.016 SECONDS      2 MB 24.7.1 r56632 WEX-WEI
227
228
229     USER: GAMS Development Corporation, Washington, DC G871201/0000CA-ANY
230           Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com DC0000
231
232
233     **** FILE SUMMARY
234
235     Input      D:\Laem\Phd\thesis\ch3-data\seminar-data\EtahnoI.gms
236     Output     C:\Users\L\Documents\gamsdir\projdir\EtahnoI.lst

```

# ภาคผนวก ข

การกำหนดตัวแปร การสร้างสมการใน GAMS และผลการคำนวณ  
สำหรับแบบจำลองการบริหารจัดการพลังงานและน้ำเสียอย่างยั่งยืน

```

1 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/08/16 »
  23:38:34 Page 1
2 General Algebraic Modeling System
3 Compilation
4
5
6 1 binary variables
7 2 f_solid_biogas
8 3 f_solid_heat
9 4 ;
10 5
11 6 positive variables
12 7 Solid_Total solid waste total (tons)
13 8 Solid_Biogas
14 9 Solid_Heat
15 10 Solid_Fertilizer
16 11 Solid_Landfill
17 12 Biogas_NG
18 13 Biogas_Elec
19 14 Solid_Sell_Fertilizer
20 15 Elec_External
21 16 Elec_Plant_Biogas
22 17 Elec_Sell_Biogas
23 18 Elec_Plant_Heat
24 19 Elec_Sell_Heat
25 20 ;
26 21
27 22 variables
28 23 CDE_total
29 24 Energy_total
30 25 Benefit_total
31 26 Revs
32 27 Costs
33 28 z
34 29 c
35 30 ;
36 31
37 32 parameters
38 33 Solid_Total_min lower bound on 80%Solid_T (tons)/158.53 /
39 34 Solid_Total_max upper bound on 120%Solid_T (tons)/237.79 /
40 35 Solid_Upper_Biogas /1 /
41 36 Solid_Lower_Biogas / 0/
42 37 Solid_Upper_Heat /1 /
43 38 Solid_Lower_Heat / 0/
44 39
45 40 f_Biogas biogas production factor /339.94/
46 41 f_NG methane production factor /0.6/
47 42 f_Solid_Fer class A biosoids production from digeter factor /0.4838/
48 43 f_Elec_Biogas /2.02 /
49 44 f_Elec_Heat /14.318 /
50 45
51 46 Plant_Electricity / 260792/
52 47
53 48 f_Transport_energy /1.02 /
54 49
55 50 f_Elec_CO2 factor used to calcualte CO2 emissions from electricity used
56 /0.00055/

```

```

57 51 f_Transport_CO2      factor used to calcualte CO2 emissions from transport b
58 iosolids /0.2/
59 52 f_Fertilizer_CO2     factor used to calcualte CO2 offset from used biosolid
60 s as fertilizer /0.1/
61 53 f_NG_CO2            factor used to calcualte CO2 offset from NG used /0.000056/
62 54
63 55 f_Compost_Fertilizer /1228.44/
64 56 f_Landfill_Solid     /1146.54/
65 57 f_Produce_Heat      /3876.40/
66 58 f_Produce_Biogas     baht per cubic meter /2000 /
67 59 f_Transport_Solid    transportation cost of biosolids /0.31 /
68 60 f_Generate_Elec      cost on generated electricity /0.16 /
69 61 f_Cost_Elec         /2 /
70 62
71 63 f_Price_Fertilizer   fertilizer market price /2600/
72 64 f_Price_Elec        grid market price of sold electricity /2.5/
73 65 f_Price_NG          /70.671/
74 66
75 67 CDE_min            /300/
76 68 ;
77 69
78 70 equations
79 71 conserv_solid      conservation of solid waste
80 72 solid_min
81 73 solid_max
82 74 solid_Biogas_min
83 75 solid_Biogas_max
84 76 solid_Heat_min
85 77 solid_Heat_max
86 78 weight
87 79 landfill_solid
88 80 fertilizer_solid
89 81 conserv_biogas
90 82 NG_biogas
91 83 fertilizer_sell
92 84 conserv_elec
93 85 elec_biogas
94 86 elec_heat
95 87 conserv_energy
96 88 conserv_CDE
97 89 total_revs
98 90 total_costs
99 91 conserv_value
100 92 obj
101 93 CO2                net CO2 emissions
102 94
103 95 ;
104 96 conserv_solid..    Solid_Total=e=Solid_Landfill+Solid_Fertilizer+S
105 olid_Biogas+Solid_Heat;
106 97 solid_min..        Solid_Total=g=Solid_Total_min;
107 98 solid_max..        Solid_Total=l=Solid_Total_max;
108 99 solid_Biogas_min.. Solid_Biogas=g=f_solid_biogas*Solid_Lower_Bioga
109 s*Solid_Total_min;
110 100 solid_Biogas_max.. Solid_Biogas=l=f_solid_biogas*Solid_Upper_Bioga
111 s*Solid_Total_min;
112 101 solid_Heat_min..  Solid_Heat=g=f_solid_heat*Solid_Lower_Heat*Soli
113 d_Total_min;

```

```

114 102 solid_Heat_max..      Solid_Heat=1=f_solid_heat*Solid_Upper_Heat*Soli
115      d_Total_min;
116 103 weight..              f_solid_biogas+f_solid_heat=e=1;
117 104 landfill_solid..      Solid_Landfill=1=Solid_Total+Solid_Fertilizer+S
118      olid_Biogas+Solid_Heat;
119 105 fertilizer_solid..     Solid_Landfill=1=Solid_Total+Solid_Fertilizer+S
120      olid_Biogas+Solid_Heat;
121 106 conserv_biogas..       Biogas_NG+Biogas_Elec=e=f_Biogas*Solid_Biogas;
122 107 NG_biogas..            Biogas_NG=1=f_NG*f_Biogas*Solid_Biogas;
123 108 fertilizer_sell..      Solid_Fertilizer+(f_Solid_Fer*Solid_Biogas)=e=S
124      olid_Sell_Fertilizer;
125 109 conserv_elec..        Plant_Electricity=1=Elec_External+Elec_Plant_Bi
126      ogas+Elec_Plant_Heat;
127 110 elec_biogas..          Elec_Sell_Biogas+Elec_Plant_Biogas=e=f_Elec_Bio
128      gas*Biogas_Elec;
129 111 elec_heat..           Elec_Sell_Heat+Elec_Plant_Heat=e=f_Elec_Heat*So
130      lid_Heat;
131 112 conserv_energy..      Energy_total=e=(f_Transport_energy*Solid_Landfi
132      ll)+Elec_External;
133 113 conserv_CDE..         CDE_total=e=(f_Elec_CO2*Elec_External)+(f_Trans
134      port_CO2*Solid_Landfill)-(f_Elec_CO2*(Elec_Sell_Biogas+Elec_Plant_Biogas+E
135      lec_Sell_Heat+Elec_Plant_Heat))-(f_NG_CO2*Biogas_NG)-(f_Fertilizer_CO2*Sol
136      id_Sell_Fertilizer);
137 114 total_revs..         Revs=e=(f_Price_Fertilizer*Solid_Sell_Fertilize
138      r)+(f_Price_Elec*(Elec_Sell_Biogas+Elec_Sell_Heat))+(f_Price_NG *Biogas_NG
139      );
140 115 total_costs..        Costs=e=(f_Produce_Biogas*Solid_Biogas)+(f_Prod
141      uce_Heat*Solid_Heat)+(f_Cost_Elec*Elec_External)+(f_Generate_Elec*(Elec_Se
142      ll_Biogas+Elec_Plant_Biogas+Elec_Sell_Heat+Elec_Plant_Heat))+(Solid_Landfi
143      ll*(f_Landfill_Solid+f_Transport_Solid ))+(f_Compost_Fertilizer*Solid_Fert
144      ilizer);
145 116 conserv_value..      Benefit_total=e=Revs-Costs;
146 117 CO2..                 CDE_total=g=CDE_min;
147 118 obj..                 z=e=Benefit_total;
148 119
149 120 model project / all /;
150 121 solve project maximizing z using mip;
151 122 display z.l;
152 123
153 124
154 125
155 126
156 127
157 128
158 129
159
160
161 COMPILATION TIME      =          0.016 SECONDS          2 MB  24.7.1 r56632 WEX-WEI
162 GAMS 24.7.1  r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/08/16 »
163   23:38:34 Page 2
163 G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
164 Equation Listing      SOLVE project Using MIP From line 121
165
166
167 ---- conserv_solid  =E=  conservation of solid waste
168
169 conserv_solid..      Solid_Total - Solid_Biogas - Solid_Heat - Solid_Fertilizer

```

```

170
171     - Solid_Landfill =E= 0 ; (LHS = 0)
172
173
174 ---- solid_min  =G=
175
176 solid_min..  Solid_Total =G= 158.53 ; (LHS = 0, INFES = 158.53 ****)
177
178
179 ---- solid_max  =L=
180
181 solid_max..  Solid_Total =L= 237.79 ; (LHS = 0)
182
183
184 ---- solid_Biogas_min  =G=
185
186 solid_Biogas_min..  Solid_Biogas =G= 0 ; (LHS = 0)
187
188
189 ---- solid_Biogas_max  =L=
190
191 solid_Biogas_max..  - 158.53*f_solid_biogas + Solid_Biogas =L= 0 ; (LHS = 0)
192
193
194 ---- solid_Heat_min  =G=
195
196 solid_Heat_min..  Solid_Heat =G= 0 ; (LHS = 0)
197
198
199 ---- solid_Heat_max  =L=
200
201 solid_Heat_max..  - 158.53*f_solid_heat + Solid_Heat =L= 0 ; (LHS = 0)
202
203
204 ---- weight  =E=
205
206 weight..  f_solid_biogas + f_solid_heat =E= 1 ; (LHS = 0, INFES = 1 ****)
207
208
209 ---- landfill_solid  =L=
210
211 landfill_solid..  - Solid_Total - Solid_Biogas - Solid_Heat - Solid_Fertilizer
212
213     + Solid_Landfill =L= 0 ; (LHS = 0)
214
215
216 ---- fertilizer_solid  =L=
217
218 fertilizer_solid..  - Solid_Total - Solid_Biogas - Solid_Heat - Solid_Fertilizer
219
220     + Solid_Landfill =L= 0 ; (LHS = 0)
221
222
223 ---- conserv_biogas  =E=
224
225 conserv_biogas..  - 339.94*Solid_Biogas + Biogas_NG + Biogas_Elec =E= 0 ;
226

```

```

227         (LHS = 0)
228
229
230 ---- NG_biogas  =L=
231
232 NG_biogas.. - 203.964*Solid_Biogas + Biogas_NG =L= 0 ; (LHS = 0)
233
234
235 ---- fertilizer_sell  =E=
236
237 fertilizer_sell.. 0.4838*Solid_Biogas + Solid_Fertilizer
238
239         - Solid_Sell_Fertilizer =E= 0 ; (LHS = 0)
240
241
242 ---- conserv_elec  =L=
243
244 conserv_elec.. - Elec_External - Elec_Plant_Biogas - Elec_Plant_Heat =L=
245         -260792 ; (LHS = 0, INFES = 260792 ****)
246
247
248 ---- elec_biogas  =E=
249
250 elec_biogas.. - 2.02*Biogas_Elec + Elec_Plant_Biogas + Elec_Sell_Biogas =E= 0 ;
251
252         (LHS = 0)
253
254
255 ---- elec_heat  =E=
256
257 elec_heat.. - 14.318*Solid_Heat + Elec_Plant_Heat + Elec_Sell_Heat =E= 0 ;
258
259         (LHS = 0)
260
261
262 ---- conserv_energy  =E=
263
264 conserv_energy.. - 1.02*Solid_Landfill - Elec_External + Energy_total =E= 0 ;
265
266         (LHS = 0)
267
268
269 ---- conserv_CDE  =E=
270
271 conserv_CDE.. - 0.2*Solid_Landfill + 5.6E-5*Biogas_NG
272
273         + 0.1*Solid_Sell_Fertilizer - 0.00055*Elec_External
274
275         + 0.00055*Elec_Plant_Biogas + 0.00055*Elec_Sell_Biogas
276
277         + 0.00055*Elec_Plant_Heat + 0.00055*Elec_Sell_Heat + CDE_total =E= 0 ;
278
279         (LHS = 0)
280
281
282 ---- total_revs  =E=
283

```

```

284 total_revs.. - 70.671*Biogas_NG - 2600*Solid_Sell_Fertilizer
285
286     - 2.5*Elec_Sell_Biogas - 2.5*Elec_Sell_Heat + Revs =E= 0 ; (LHS = 0)
287
288
289 ---- total_costs =E=
290
291 total_costs.. - 2000*Solid_Biogas - 3876.4*Solid_Heat
292
293     - 1228.44*Solid_Fertilizer - 1146.85*Solid_Landfill - 2*Elec_External
294
295     - 0.16*Elec_Plant_Biogas - 0.16*Elec_Sell_Biogas - 0.16*Elec_Plant_Heat
296
297     - 0.16*Elec_Sell_Heat + Costs =E= 0 ; (LHS = 0)
298
299
300 ---- conserv_value =E=
301
302 conserv_value.. Benefit_total - Revs + Costs =E= 0 ; (LHS = 0)
303
304
305 ---- obj =E=
306
307 obj.. - Benefit_total + z =E= 0 ; (LHS = 0)
308
309
310 ---- CO2 =G= net CO2 emissions
311
312 CO2.. CDE_total =G= 300 ; (LHS = 0, INFES = 300 ****)
313
314 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/08/16 »
    23:38:34 Page 3
315 G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
316 C o l u m n   L i s t i n g           S O L V E   p r o j e c t   U s i n g   M I P   F r o m   l i n e   1 2 1
317
318
319 ---- f_solid_biogas
320
321 f_solid_biogas
322     (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
323     -158.53     solid_Biogas_max
324     1           weight
325
326
327 ---- f_solid_heat
328
329 f_solid_heat
330     (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
331     -158.53     solid_Heat_max
332     1           weight
333
334
335 ---- Solid_Total solid waste total (tons)
336
337 Solid_Total
338     (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
339     1           conserv_solid

```

```

340      1      solid_min
341      1      solid_max
342     -1      landfill_solid
343     -1      fertilizer_solid
344
345
346 ---- Solid_Biogas
347
348 Solid_Biogas
349          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
350     -1      conserv_solid
351      1      solid_Biogas_min
352      1      solid_Biogas_max
353     -1      landfill_solid
354     -1      fertilizer_solid
355    -339.94  conserv_biogas
356    -203.964 NG_biogas
357      0.4838 fertilizer_sell
358    -2000   total_costs
359
360
361 ---- Solid_Heat
362
363 Solid_Heat
364          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
365     -1      conserv_solid
366      1      solid_Heat_min
367      1      solid_Heat_max
368     -1      landfill_solid
369     -1      fertilizer_solid
370    -14.318  elec_heat
371   -3876.4  total_costs
372
373
374 ---- Solid_Fertilizer
375
376 Solid_Fertilizer
377          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
378     -1      conserv_solid
379     -1      landfill_solid
380     -1      fertilizer_solid
381      1      fertilizer_sell
382   -1228.44 total_costs
383
384
385 ---- Solid_Landfill
386
387 Solid_Landfill
388          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
389     -1      conserv_solid
390      1      landfill_solid
391      1      fertilizer_solid
392     -1.02   conserv_energy
393     -0.2    conserv_CDE
394   -1146.85 total_costs
395
396

```

```

397 ---- Biogas_NG
398
399 Biogas_NG
400          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
401          1      conserv_biogas
402          1      NG_biogas
403          5.6000000E-5 conserv_CDE
404          -70.671 total_revs
405
406
407 ---- Biogas_Elec
408
409 Biogas_Elec
410          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
411          1      conserv_biogas
412          -2.02   elec_biogas
413
414
415 ---- Solid_Sell_Fertilizer
416
417 Solid_Sell_Fertilizer
418          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
419          -1     fertilizer_sell
420          0.1    conserv_CDE
421          -2600  total_revs
422
423
424 ---- Elec_External
425
426 Elec_External
427          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
428          -1     conserv_elec
429          -1     conserv_energy
430          -0.0005 conserv_CDE
431          -2     total_costs
432
433
434 ---- Elec_Plant_Biogas
435
436 Elec_Plant_Biogas
437          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
438          -1     conserv_elec
439          1      elec_biogas
440          0.0005 conserv_CDE
441          -0.16  total_costs
442
443
444 ---- Elec_Sell_Biogas
445
446 Elec_Sell_Biogas
447          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
448          1      elec_biogas
449          0.0005 conserv_CDE
450          -2.5   total_revs
451          -0.16  total_costs
452
453

```

```

454 ---- Elec_Plant_Heat
455
456 Elec_Plant_Heat
457      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
458      -1      conserv_elec
459      1      elec_heat
460      0.0005  conserv_CDE
461      -0.16   total_costs
462
463
464 ---- Elec_Sell_Heat
465
466 Elec_Sell_Heat
467      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
468      1      elec_heat
469      0.0005  conserv_CDE
470      -2.5    total_revs
471      -0.16   total_costs
472
473
474 ---- CDE_total
475
476 CDE_total
477      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
478      1      conserv_CDE
479      1      CO2
480
481
482 ---- Energy_total
483
484 Energy_total
485      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
486      1      conserv_energy
487
488
489 ---- Benefit_total
490
491 Benefit_total
492      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
493      1      conserv_value
494      -1     obj
495
496
497 ---- Revs
498
499 Revs
500      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
501      1      total_revs
502      -1     conserv_value
503
504
505 ---- Costs
506
507 Costs
508      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
509      1      total_costs
510      1      conserv_value

```

```

511
512
513 ---- z
514
515 z
516          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
517      1      obj
518
519 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/08/16 »
      23:38:34 Page 4
520 G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
521 Model Statistics      SOLVE project Using MIP From line 121
522
523
524 MODEL STATISTICS
525
526 BLOCKS OF EQUATIONS          23      SINGLE EQUATIONS          23
527 BLOCKS OF VARIABLES         21      SINGLE VARIABLES          21
528 NON ZERO ELEMENTS           75      DISCRETE VARIABLES        2
529
530
531 GENERATION TIME      =          0.172 SECONDS      3 MB  24.7.1 r56632 WEX-WEI
532
533
534 EXECUTION TIME      =          0.188 SECONDS      3 MB  24.7.1 r56632 WEX-WEI
535 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/08/16 »
      23:38:34 Page 5
536 G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
537 Solution Report      SOLVE project Using MIP From line 121
538
539
540          S O L V E      S U M M A R Y
541
542      MODEL  project          OBJECTIVE  z
543      TYPE   MIP              DIRECTION  MAXIMIZE
544      SOLVER CPLEX            FROM LINE  121
545
546 **** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
547 **** MODEL STATUS      1 Optimal
548 **** OBJECTIVE VALUE    1136766.5854
549
550 RESOURCE USAGE, LIMIT    0.484      1000.000
551 ITERATION COUNT, LIMIT  10      2000000000
552
553 IBM ILOG CPLEX  24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEI x86 64bit/MS Windows
554 Cplex 12.6.3.0
555
556 Space for names approximately 0.00 Mb
557 Use option 'names no' to turn use of names off
558 MIP status(101): integer optimal solution
559 Cplex Time: 0.12sec (det. 0.07 ticks)
560 Fixing integer variables, and solving final LP...
561 Fixed MIP status(1): optimal
562 Cplex Time: 0.02sec (det. 0.03 ticks)
563 Proven optimal solution.
564
565 MIP Solution:          1136766.585428      (3 iterations, 0 nodes)

```

566 Final Solve: 1136766.585428 (7 iterations)

567

568 Best possible: 1136766.585428

569 Absolute gap: 0.000000

570 Relative gap: 0.000000

571

572

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--	-------	-------	-------	----------

574

575 ---- EQU conserv_s~	.	.	.	-1007.924
-------------------------	---	---	---	-----------

576 ---- EQU solid_min	158.530	237.790	+INF	.
------------------------	---------	---------	------	---

577 ---- EQU solid_max	-INF	237.790	237.790	1007.924
------------------------	------	---------	---------	----------

578 ---- EQU solid_Bio~	.	158.530	+INF	.
-------------------------	---	---------	------	---

579 ---- EQU solid_Bio~	-INF	.	.	12540.223
-------------------------	------	---	---	-----------

580 ---- EQU solid_Hea~	.	.	+INF	.
-------------------------	---	---	------	---

581 ---- EQU solid_Hea~	-INF	.	.	.
-------------------------	------	---	---	---

582 ---- EQU weight	1.000	1.000	1.000	.
---------------------	-------	-------	-------	---

583 ---- EQU landfill_~	-INF	-475.580	.	.
-------------------------	------	----------	---	---

584 ---- EQU fertilize~	-INF	-475.580	.	.
-------------------------	------	----------	---	---

585 ---- EQU conserv_b~	.	.	.	0.687
-------------------------	---	---	---	-------

586 ---- EQU NG_biogas	-INF	.	.	69.781
------------------------	------	---	---	--------

587 ---- EQU fertilize~	.	.	.	-2236.364
-------------------------	---	---	---	-----------

588 ---- EQU conserv_e~	-INF	-6.206E+5	-2.608E+5	.
-------------------------	------	-----------	-----------	---

589 ---- EQU elec_biog~	.	.	.	0.340
-------------------------	---	---	---	-------

590 ---- EQU elec_heat	.	.	.	0.340
------------------------	---	---	---	-------

591 ---- EQU conserv_e~	.	.	.	EPS
-------------------------	---	---	---	-----

592 ---- EQU conserv_C~	.	.	.	3636.364
-------------------------	---	---	---	----------

593 ---- EQU total_revs	.	.	.	1.000
-------------------------	---	---	---	-------

594 ---- EQU total_cos~	.	.	.	-1.000
-------------------------	---	---	---	--------

595 ---- EQU conserv_v~	.	.	.	1.000
-------------------------	---	---	---	-------

596 ---- EQU obj	.	.	.	1.000
------------------	---	---	---	-------

597 ---- EQU CO2	300.000	300.000	+INF	-3636.364
------------------	---------	---------	------	-----------

598

599 conserv\_solid conservation of solid waste

600 CO2 net CO2 emissions

601

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--	-------	-------	-------	----------

603

604 ---- VAR f_solid_b~	.	1.000	1.000	1.9880E+6
-------------------------	---	-------	-------	-----------

605 ---- VAR f_solid_h~	.	.	1.000	EPS
-------------------------	---	---	-------	-----

606 ---- VAR Solid_Tot~	.	237.790	+INF	.
-------------------------	---	---------	------	---

607 ---- VAR Solid_Bio~	.	158.530	+INF	.
-------------------------	---	---------	------	---

608 ---- VAR Solid_Heat	.	.	+INF	-4879.456
-------------------------	---	---	------	-----------

609 ---- VAR Solid_Fer~	.	79.260	+INF	.
-------------------------	---	--------	------	---

610 ---- VAR Solid_Lan~	.	.	+INF	-1427.501
-------------------------	---	---	------	-----------

611 ---- VAR Biogas_NG	.	32334.413	+INF	.
------------------------	---	-----------	------	---

612 ---- VAR Biogas_El~	.	21556.275	+INF	.
-------------------------	---	-----------	------	---

613 ---- VAR Solid_Sel~	.	155.957	+INF	.
-------------------------	---	---------	------	---

614 ---- VAR Elec_Ext~	.	6.2065E+5	+INF	.
------------------------	---	-----------	------	---

615 ---- VAR Elec_Plan~	.	.	+INF	-2.500
-------------------------	---	---	------	--------

616 ---- VAR Elec_Sell~	.	43543.676	+INF	.
-------------------------	---	-----------	------	---

617 ---- VAR Elec_Plan~	.	.	+INF	-2.500
-------------------------	---	---	------	--------

618 ---- VAR Elec_Sell~	.	.	+INF	.
-------------------------	---	---	------	---

619 ---- VAR CDE_total	-INF	300.000	+INF	.
------------------------	------	---------	------	---

620 ---- VAR Energy_to~	-INF	6.2065E+5	+INF	.
-------------------------	------	-----------	------	---

621 ---- VAR Benefit_t~	-INF	1.1368E+6	+INF	.
-------------------------	------	-----------	------	---

622 ---- VAR Revs	-INF	2.7995E+6	+INF	.
-------------------	------	-----------	------	---

```

623 ---- VAR Costs          -INF  1.6627E+6      +INF      .
624 ---- VAR z              -INF  1.1368E+6      +INF      .
625
626   Solid_Total   solid waste total (tons)
627
628
629 **** REPORT SUMMARY :           0      NONOPT
630                                0 INFEASIBLE
631                                0 UNBOUNDED
632 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/08/16 »
633   23:38:34 Page 6
634 G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
635 E x e c u t i o n
636
637 ----      122 VARIABLE z.L                =  1136766.585
638
639
640 EXECUTION TIME          =           0.015 SECONDS      2 MB  24.7.1 r56632 WEX-WEI
641
642
643 USER: GAMS Development Corporation, Washington, DC  G871201/0000CA-ANY
644   Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com  DC0000
645
646
647 **** FILE SUMMARY
648
649 Input      D:\Laem\Phd\thesis\ch4-data\chalida7thAEECMulti.gms
650 Output     C:\Users\L\Documents\gammdir\projdir\chalida7thAEECMulti.lst

```

# ภาคผนวก ค

การกำหนดตัวแปร การสร้างสมการใน GAMS และผลการคำนวณ  
สำหรับแบบจำลองการบริหารจัดการพลังงานและขยะอย่างยั่งยืน

```

1 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/20/»
  16 16:59:49 Page 1
2 General Algebraic Modeling System
3 Compilation
4
5
6 1 Set
7 2 s scenario /1*9/
8 3 ;
9 4
10 5 positive variables
11 6 Solid_Compost(s) solid waste with compost process (tons)
12 7 Solid_Landfill(s) solid waste with landfill process (tons)
13 8 Solid_Incineration(s) solid waste with incineration process (tons)
14 9 Solid_Recycle(s) solid waste with recycling process (td)
15 10 *f_solid_landfill
16 11 Biogas_Compost(s) biogas from compost process (m3)
17 12 Biogas_Ele_Compost(s)
18 13 Biogas_NG_Compost(s)
19 14 Biogas_Landfill(s) biogas from landfill process (m3)
20 15 Biogas_Ele_Landfill(s)
21 16 Biogas_NG_Landfill(s)
22 17 Ash(s) ash from incineration process (tons)
23 18 Fertilizer(s) organic fertilizer from composting process (tons)
24 19 GLASS(s) glass from recycling process (tons)
25 20 PAPER(s) paper from recycling process (tons)
26 21 METAL(s) metal from recycling process (tons)
27 22 PLASTIC(s) plastic from recycling process (tons)
28 23 Ele_Sell_Compost(s) electricity generated from composting process and »
old
29 (kWh)
30 24 Ele_Sell_Landfill(s) electricity generated from landfill process and so»
ld
31 (kWh)
32 25 CO2_Compost(s) carbon dioxide emissions from composting process (t»
ons
33 )
34 26 CO2_Landfill(s) carbon dioxide emissions from landfill process (to»
ns)
35 27 CO2_Incineration(s) carbon dioxide emissions from incineration pro»
ces
36 s (tons)
37 28 CO2_Elec_Landfill(s) carbon dioxide offset from using generated elec»
tri
38 city from landfill gas (tons)
39 29 CO2_NG_Landfill(s) carbon dioxide offset from using producing NG from»
la
40 ndfill gas (tons)
41 30 CO2_Elec_Compost(s) carbon dioxide offset from using generated elect»
ric
42 ity from composting gas (tons)
43 31 CO2_NG_Compost(s) carbon dioxide offset from using producing NG from »
com
44 posting gas (tons)
45 32 CO2_Fertilizer_Compost(s) carbon dioxide offset from using producing»
fe
46 rtilicer from composting gas (tons)
47 33 CO2_Recycle(s) carbon dioxide offset recycling process (tons)
48 34 C_Compost(s)
49 35 C_Landfill(s)
50 36 C_Incineration(s)

```

```

51 37 C_Recycle(s)
52 38 R_Landfill_Elec(s)
53 39 R_Landfill_NG(s)
54 40 R_Compost_Elec(s)
55 41 R_Compost_NG(s)
56 42 R_Compost_Fertilizer(s)
57 43 R_Incineration_Ash(s)
58 44 R_Recycle_Glass(s)
59 45 R_Recycle_Metal(s)
60 46 R_Recycle_Paper (s)
61 47 R_Recycle_Plastic(s)
62 48 R_CO2(s)
63 49 ;
64 50
65 51 variables
66 52 C_T(s)
67 53 V_T(s)
68 54 z, c, A, B, D, E, F, G, H, I, J, K
69 55 ;
70 56 *****
71 57 Binary variables
72 58 f_compost
73 59 f_incineration
74 60 f_recycle
75 61 f_landfill
76 62 ;
77 63 *****
78 64 parameters
79 65 Solid_Total(s) solid waste (tons)/1 9100, 2 9100, 3 9100, 4 9850, 5 985»
0,
80 66 Pr(s) probability /1 0.09, 2 0.09, 3 0.12, 4 0.09, 5 0.09, 6 0.12, 7»
0.
82 12, 8 0.12, 9 0.16/
83 67 f_solid_compost /0.6244/
84 68 f_solid_incineration /0.8256/
85 69 f_solid_recycle /0.3589/
86 70 f_solid_landfill /1/
87 71 f_compost_biogas /61.615/
88 72 f_landfill_biogas /52.700/
89 73 f_compost_fertilizer /0.150/
90 74 f_incineration_ash /0.280/
91 75 f_recycle_glass /0.050/
92 76 f_recycle_metal /0.018/
93 77 f_recycle_paper /0.089/
94 78 f_recycle_plastic /0.201/
95 79 f_biogas_Elec /2.02 /
96 80 f_compost_co2 /0.175/
97 81 f_landfill_co2 /0.175/
98 82 f_incineration_co2 /1.44/
99 83 f_NG_co2 /0.00197/
100 84 f_elec_co2 /0.00055/
101 85 f_fertilizer_co2 /0.1/
102 86 f_recycle_co2 /0.175/
103 87 f_compost_cost /37.97/
104 88 f_landfill_cost /33.44/
105 89 f_incineration_cost /119.83/
106 90 f_recycle_cost /47.26/
107 91 f_elec_price(s) /1 0.065, 2 0.074, 3 0.086, 4 0.065, 5 0.074, 6 0.0»
86,
108 7 0.065, 8 0.074, 9 0.086/

```

```

109 92 f_NG_price /2.18/
110 93 f_fertilizer_price /80.37/
111 94 f_ash_price /30.91/
112 95 f_glass_price /30.91/
113 96 f_metal_price /162.29/
114 97 f_paper_price /108.19/
115 98 f_plastic_price /417.31/
116 99 f_co2_price /1.89/
117 100 C_min /1000/
118 101 ;
119 102
120 103 equations
121 104 conserv_solid(s) conservation of solid waste
122 105 solid_composting(s)
123 106 solid_incineration1(s)
124 107 solid_landfilling(s)
125 108 solid_recycling1(s)
126 109 solid_recycling2(s)
127 110 *landfill_factor(s)
128 111 cons1
129 112 cons2
130 113 biogas_composting(s)
131 114 conserv_biogas_compost(s)
132 115 biogas_landfill1(s)
133 116 conserv_biogas_landfill(s)
134 117 fer_composting(s)
135 118 ash_incineration(s)
136 119 glass_recycling(s)
137 120 metal_recycling(s)
138 121 paper_recycling(s)
139 122 plastic_recycling(s)
140 123 elec_composting_s(s)
141 124 elec_landfill_s(s)
142 125 CO2_C_Em(s)
143 126 CO2_L_Em(s)
144 127 CO2_I_Em(s)
145 128 CO2_LE_Of(s)
146 129 CO2_LNG_Of(s)
147 130 CO2_CE_Of(s)
148 131 CO2_CNG_Of(s)
149 132 CO2_CF_Of(s)
150 133 CO2_R_Of(s)
151 134 conserv_CO2(s)
152 135 conserv_value(s) conservation of value
153 136 cost_C(s)
154 137 cost_L(s)
155 138 cost_I(s)
156 139 cost_R(s)
157 140 rev_E_L(s)
158 141 rev_NG_L(s)
159 142 rev_E_C(s)
160 143 rev_NG_C(s)
161 144 rev_F_C(s)
162 145 rev_A_I(s)
163 146 rev_G_R(s)
164 147 rev_M_R(s)
165 148 rev_PA_R(s)
166 149 rev_PL_R(s)
167 150 rev_CO2(s)
168 151 CO2(s)
169 152 obj_co2

```

```

170 153 obj_cost          net cost
171 154 ;
172 155 conserv_solid(s)..   Solid_Total(s)=e=Solid_Compost(s)+Solid_L»
and
173      fill(s)+Solid_Incineration(s)+Solid_Recycle(s);
174 156 solid_composting(s).. Solid_Compost(s)=l=f_solid_compost*f_comp»
ost
175      *Solid_Total(s);
176 157 solid_incineration1(s).. Solid_Incineration(s)=l=f_solid_incinerat»
ion
177      *f_incineration*Solid_Total(s);
178 158 solid_landfilling(s).. Solid_Landfill(s)=l=f_solid_landfill*f_la»
ndf
179      ill*Solid_Total(s);
180 159 solid_recycling1(s).. Solid_Recycle(s)=l=f_solid_recycle*f_recy»
cle
181      *Solid_Total(s);
182 160 solid_recycling2(s).. Solid_Recycle(s)=e=GLASS(s)+PAPER(s)+META»
L(s
183      )+PLASTIC(s);
184 161 *landfill_factor(s)..   f_solid_landfill(s)=l=1;
185 162 cons1..                 f_compost+f_incineration=e=1;
186 163 cons2..                 f_recycle+f_landfill=e=1;
187 164 biogas_composting(s).. Biogas_Compost(s)=e=f_compost_biogas*Soli»
d_C
188      ompost(s);
189 165 conserv_biogas_compost(s).. Biogas_Compost(s)=e=Biogas_Ele_Compost(s)»
+Bi
190      ogas_NG_Compost(s);
191 166 biogas_landfill1(s)..   Biogas_Landfill(s)=e=f_landfill_biogas*S»
oli
192      d_Landfill(s);
193 167 conserv_biogas_landfill(s).. Biogas_Landfill(s)=e=Biogas_Ele_Landfill(»
s)+
194      Biogas_NG_Landfill(s);
195 168 fer_composting(s)..   Fertilizer(s)=e=f_compost_fertilizer*Soli»
d_C
196      ompost(s);
197 169 ash_incineration(s)..   Ash(s)=e=f_incineration_ash*Solid_Inciner»
ati
198      on(s);
199 170 glass_recycling(s)..   GLASS(s)=e=f_recycle_glass*Solid_Recycle(»
s);
200 171 metal_recycling(s)..   METAL(s)=e=f_recycle_metal*Solid_Recycle(»
s);
201 172 paper_recycling(s)..   PAPER(s)=e=f_recycle_paper*Solid_Recycle(»
s);
202 173 plastic_recycling(s).. PLASTIC(s)=e=f_recycle_plastic*Solid_Recy»
cle
203      (s);
204 174 elec_composting_s(s)..   Ele_Sell_Compost(s)=e=f_biogas_elec*Bioga»
s_E
205      le_Compost(s);
206 175 elec_landfill_s(s)..   Ele_Sell_Landfill(s)=e=f_biogas_elec*Biog»
as_
207      Ele_Landfill(s);
208 176 CO2_C_Em(s)..         CO2_Compost(s)=e=f_compost_co2*Solid_Comp»
ost
209      (s);
210 177 CO2_L_Em(s)..         CO2_Landfill(s)=e=f_landfill_co2*Solid_La»
ndf

```

```

211     ill(s);
212 178 CO2_I_Em(s)..          CO2_Incineration(s)=e=f_incineration_co2*»
Sol
213     id_Incineration(s);
214 179 CO2_LE_Of(s)..      CO2_Elec_Landfill(s)=e=f_elec_co2*Ele_Sel»
l_L
215     andfill(s);
216 180 CO2_LNG_Of(s)..     CO2_NG_Landfill(s)=e=f_NG_co2*Biogas_NG_l»
and
217     fill(s);
218 181 CO2_CE_Of(s)..      CO2_Elec_Compost(s)=e=f_elec_co2*Ele_Sell»
_Co
219     mpost(s);
220 182 CO2_CNG_Of(s)..     CO2_NG_Compost(s)=e=f_NG_co2*Biogas_NG_Co»
mpo
221     st(s);
222 183 CO2_CF_Of(s)..      CO2_Fertilizer_Compost(s)=l=f_fertilizer_»
co2
223     *Fertilizer(s);
224 184 CO2_R_Of(s)..      CO2_Recycle(s)=e=f_recycle_co2*(GLASS(s)+»
PAP
225     ER(s)+METAL(s)+PLASTIC(s));
226 185 conserv_CO2(s)..    C_T(s)=e=CO2_Landfill(s)+CO2_Compost(s)+C»
O2_
227     Incineration(s)-CO2_Elec_Landfill(s)-CO2_NG_Landfill(s)-CO2_Elec_Compos»
t(s
228     )-CO2_NG_Compost(s)-CO2_Fertilizer_Compost(s)-CO2_Recycle(s) ;
229 186 conserv_value(s)..  V_T(s)=e=-C_Compost(s)-C_Landfill(s)-C_In»
cin
230     eration(s)-C_Recycle(s)+R_Landfill_Elec(s)+R_Landfill_NG(s)+R_Compost_E»
lec
231     (s)+R_Compost_NG(s)+R_Compost_Fertilizer(s)+R_Incineration_Ash(s)+R_Rec»
ycl
232     e_Glass(s)+R_Recycle_Metal(s)+R_Recycle_Paper(s)+R_Recycle_Plastic(s)+R»
_CO
233     2(s);
234 187 cost_C(s)..        C_Compost(s)=e=f_compost_cost*Solid_Compo»
st(
235     s);
236 188 cost_L(s)..        C_Landfill(s)=e=f_landfill_cost*Solid_Lan»
dfi
237     ll(s);
238 189 cost_I(s)..        C_Incineration(s)=e=f_incineration_cost*S»
oli
239     d_Incineration(s);
240 190 cost_R(s)..        C_Recycle(s)=e=f_recycle_cost*Solid_Recyc»
le(
241     s);
242 191 rev_E_L(s)..      R_Landfill_Elec(s)=e=f_elec_price(s)*Ele_»
Sel
243     l_Landfill(s);
244 192 rev_NG_L(s)..     R_Landfill_NG(s)=e=f_NG_price*Biogas_NG_L»
and
245     fill(s);
246 193 rev_E_C(s)..      R_Compost_Elec(s)=e=f_elec_price(s)*Ele_S»
ell
247     _Compost(s);
248 194 rev_NG_C(s)..     R_Compost_NG(s)=e=f_NG_price*Biogas_NG_Co»
mpo
249     st(s);
250 195 rev_F_C(s)..      R_Compost_Fertilizer(s)=e=f_fertilizer_pr»

```

```

ice
251      *Fertilizer(s);
252 196  rev_A_I(s)..          R_Incineration_Ash(s)=e=f_ash_price*Ash(s)
);
253 197  rev_G_R(s)..          R_Recycle_Glass(s)=e=f_glass_price*GLASS(s);
254 198  rev_M_R(s)..          R_Recycle_Metal(s)=e=f_metal_price*Metal(s);
255 199  rev_PA_R(s)..         R_recycle_Paper(s)=e=f_paper_price*PAPER(s);
256 200  rev_PL_R(s)..         R_recycle_plastic(s)=e=f_plastic_price*PL
AST
257      IC(s);
258 201  rev_CO2(s)..          R_CO2(s)=e=f_co2_price*C_T(s);
259 202  CO2(s)..              C_T(s)=g=C_min;
260 203  obj_co2..             c=e=sum(s,Pr(s)*C_T(s));
261 204  obj_cost..            z=e=sum(s,Pr(s)*V_T(s));
262 205
263 206
264 207
265 208
266 209
267 210  model project / all /;
268 211  solve project maximizing z using mip;
269 212  option Optcr=0.00;
270 213  display z.l, c.l;
271 214
272 215
273 216
274 217
275
276 **** LIST OF STRAY NAMES - CHECK DECLARATIONS FOR SPURIOUS COMMAS
277 **** STRAY NAME A OF TYPE VAR
278 **** STRAY NAME B OF TYPE VAR
279 **** STRAY NAME D OF TYPE VAR
280 **** STRAY NAME E OF TYPE VAR
281 **** STRAY NAME F OF TYPE VAR
282 **** STRAY NAME G OF TYPE VAR
283 **** STRAY NAME H OF TYPE VAR
284 **** STRAY NAME I OF TYPE VAR
285 **** STRAY NAME J OF TYPE VAR
286 **** STRAY NAME K OF TYPE VAR
287
288
289 COMPILATION TIME      = 0.000E+0000 SECONDS      3 MB  24.7.1 r56632 WEX-WEI
290 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/20/»
16 16:59:49 Page 2
291 General Algebraic Modeling System
292 Equation Listing      SOLVE project Using MIP From line 211
293
294
295 ---- conserv_solid =E= conservation of solid waste
296
297 conserv_solid(1).. - Solid_Compost(1) - Solid_Landfill(1)
298
299 - Solid_Incineration(1) - Solid_Recycle(1) =E= -9100 ;
300
301 (LHS = 0, INFES = 9100 ****)
302
303 conserv_solid(2).. - Solid_Compost(2) - Solid_Landfill(2)
304

```

```
305     - Solid_Incineration(2) - Solid_Recycle(2) =E= -9100 ;
306
307     (LHS = 0, INFES = 9100 ****)
308
309 conserv_solid(3).. - Solid_Compost(3) - Solid_Landfill(3)
310
311     - Solid_Incineration(3) - Solid_Recycle(3) =E= -9100 ;
312
313     (LHS = 0, INFES = 9100 ****)
314
315 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
316
317
318 ---- solid_composting =L=
319
320 solid_composting(1).. Solid_Compost(1) - 5682.04*f_compost =L= 0 ; (LHS = 0)
321
322 solid_composting(2).. Solid_Compost(2) - 5682.04*f_compost =L= 0 ; (LHS = 0)
323
324 solid_composting(3).. Solid_Compost(3) - 5682.04*f_compost =L= 0 ; (LHS = 0)
325
326 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
327
328
329 ---- solid_incineration1 =L=
330
331 solid_incineration1(1).. Solid_Incineration(1) - 7512.96*f_incineration =L= »
332 0 ;
333     (LHS = 0)
334
335 solid_incineration1(2).. Solid_Incineration(2) - 7512.96*f_incineration =L= »
336 0 ;
337     (LHS = 0)
338
339 solid_incineration1(3).. Solid_Incineration(3) - 7512.96*f_incineration =L= »
340 0 ;
341     (LHS = 0)
342
343 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
344
345
346 ---- solid_landfilling =L=
347
348 solid_landfilling(1).. Solid_Landfill(1) - 9100*f_landfill =L= 0 ; (LHS = 0)
349
350 solid_landfilling(2).. Solid_Landfill(2) - 9100*f_landfill =L= 0 ; (LHS = 0)
351
352 solid_landfilling(3).. Solid_Landfill(3) - 9100*f_landfill =L= 0 ; (LHS = 0)
353
354 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
355
356
357 ---- solid_recycling1 =L=
358
359 solid_recycling1(1).. Solid_Recycle(1) - 3265.99*f_recycle =L= 0 ; (LHS = 0)
360
361 solid_recycling1(2).. Solid_Recycle(2) - 3265.99*f_recycle =L= 0 ; (LHS = 0)
362
```

```

363 solid_recycling1(3).. Solid_Recycle(3) - 3265.99*f_recycle =L= 0 ; (LHS = 0)
364
365 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
366
367
368 ---- solid_recycling2 =E=
369
370 solid_recycling2(1).. Solid_Recycle(1) - GLASS(1) - PAPER(1) - METAL(1)
371
372     - PLASTIC(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
373
374 solid_recycling2(2).. Solid_Recycle(2) - GLASS(2) - PAPER(2) - METAL(2)
375
376     - PLASTIC(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
377
378 solid_recycling2(3).. Solid_Recycle(3) - GLASS(3) - PAPER(3) - METAL(3)
379
380     - PLASTIC(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
381
382 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
383
384
385 ---- cons1 =E=
386
387 cons1.. f_compost + f_incineration =E= 1 ; (LHS = 0, INFES = 1 ****)
388
389
390 ---- cons2 =E=
391
392 cons2.. f_recycle + f_landfill =E= 1 ; (LHS = 0, INFES = 1 ****)
393
394
395 ---- biogas_composting =E=
396
397 biogas_composting(1).. - 61.615*Solid_Compost(1) + Biogas_Compost(1) =E= 0 ;
398
399     (LHS = 0)
400
401 biogas_composting(2).. - 61.615*Solid_Compost(2) + Biogas_Compost(2) =E= 0 ;
402
403     (LHS = 0)
404
405 biogas_composting(3).. - 61.615*Solid_Compost(3) + Biogas_Compost(3) =E= 0 ;
406
407     (LHS = 0)
408
409 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
410
411
412 ---- conserv_biogas_compost =E=
413
414 conserv_biogas_compost(1).. Biogas_Compost(1) - Biogas_Ele_Compost(1)
415
416     - Biogas_NG_Compost(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
417
418 conserv_biogas_compost(2).. Biogas_Compost(2) - Biogas_Ele_Compost(2)
419
420     - Biogas_NG_Compost(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
421
422 conserv_biogas_compost(3).. Biogas_Compost(3) - Biogas_Ele_Compost(3)
423

```

```

424      - Biogas_NG_Compost(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
425
426 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
427
428
429 ---- biogas_landfill1 =E=
430
431 biogas_landfill1(1).. - 52.7*Solid_Landfill(1) + Biogas_Landfill(1) =E= 0 ;
432
433      (LHS = 0)
434
435 biogas_landfill1(2).. - 52.7*Solid_Landfill(2) + Biogas_Landfill(2) =E= 0 ;
436
437      (LHS = 0)
438
439 biogas_landfill1(3).. - 52.7*Solid_Landfill(3) + Biogas_Landfill(3) =E= 0 ;
440
441      (LHS = 0)
442
443 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
444
445
446 ---- conserv_biogas_landfill =E=
447
448 conserv_biogas_landfill(1).. Biogas_Landfill(1) - Biogas_Ele_Landfill(1)
449
450      - Biogas_NG_Landfill(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
451
452 conserv_biogas_landfill(2).. Biogas_Landfill(2) - Biogas_Ele_Landfill(2)
453
454      - Biogas_NG_Landfill(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
455
456 conserv_biogas_landfill(3).. Biogas_Landfill(3) - Biogas_Ele_Landfill(3)
457
458      - Biogas_NG_Landfill(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
459
460 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
461
462
463 ---- fer_composting =E=
464
465 fer_composting(1).. - 0.15*Solid_Compost(1) + Fertilizer(1) =E= 0 ; (LHS = 0»
466 )
467 fer_composting(2).. - 0.15*Solid_Compost(2) + Fertilizer(2) =E= 0 ; (LHS = 0»
468 )
469 fer_composting(3).. - 0.15*Solid_Compost(3) + Fertilizer(3) =E= 0 ; (LHS = 0»
470 )
471 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
472
473
474 ---- ash_incineration =E=
475
476 ash_incineration(1).. - 0.28*Solid_Incineration(1) + Ash(1) =E= 0 ; (LHS = 0»
477 )
478 ash_incineration(2).. - 0.28*Solid_Incineration(2) + Ash(2) =E= 0 ; (LHS = 0»
479 )

```

```

480 ash_incineration(3).. - 0.28*Solid_Incineration(3) + Ash(3) =E= 0 ; (LHS = 0»
)
481
482 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
483
484
485 ---- glass_recycling =E=
486
487 glass_recycling(1).. - 0.05*Solid_Recycle(1) + GLASS(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
488
489 glass_recycling(2).. - 0.05*Solid_Recycle(2) + GLASS(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
490
491 glass_recycling(3).. - 0.05*Solid_Recycle(3) + GLASS(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
492
493 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
494
495
496 ---- metal_recycling =E=
497
498 metal_recycling(1).. - 0.018*Solid_Recycle(1) + METAL(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
499
500 metal_recycling(2).. - 0.018*Solid_Recycle(2) + METAL(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
501
502 metal_recycling(3).. - 0.018*Solid_Recycle(3) + METAL(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
503
504 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
505
506
507 ---- paper_recycling =E=
508
509 paper_recycling(1).. - 0.089*Solid_Recycle(1) + PAPER(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
510
511 paper_recycling(2).. - 0.089*Solid_Recycle(2) + PAPER(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
512
513 paper_recycling(3).. - 0.089*Solid_Recycle(3) + PAPER(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
514
515 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
516
517
518 ---- plastic_recycling =E=
519
520 plastic_recycling(1).. - 0.201*Solid_Recycle(1) + PLASTIC(1) =E= 0 ; (LHS = »
0)
521
522 plastic_recycling(2).. - 0.201*Solid_Recycle(2) + PLASTIC(2) =E= 0 ; (LHS = »
0)
523
524 plastic_recycling(3).. - 0.201*Solid_Recycle(3) + PLASTIC(3) =E= 0 ; (LHS = »
0)
525
526 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
527
528
529 ---- elec_composting_s =E=
530
531 elec_composting_s(1).. - 2.02*Biogas_Ele_Compost(1) + Ele_Sell_Compost(1) =E»
= 0
532 ; (LHS = 0)
533
534 elec_composting_s(2).. - 2.02*Biogas_Ele_Compost(2) + Ele_Sell_Compost(2) =E»
= 0

```

```

535         ; (LHS = 0)
536
537 elec_composting_s(3).. - 2.02*Biogas_Ele_Compost(3) + Ele_Sell_Compost(3) =E»
= 0
538         ; (LHS = 0)
539
540 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
541
542
543 ---- elec_landfill_s =E=
544
545 elec_landfill_s(1).. - 2.02*Biogas_Ele_Landfill(1) + Ele_Sell_Landfill(1) =E»
= 0
546         ; (LHS = 0)
547
548 elec_landfill_s(2).. - 2.02*Biogas_Ele_Landfill(2) + Ele_Sell_Landfill(2) =E»
= 0
549         ; (LHS = 0)
550
551 elec_landfill_s(3).. - 2.02*Biogas_Ele_Landfill(3) + Ele_Sell_Landfill(3) =E»
= 0
552         ; (LHS = 0)
553
554 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
555
556
557 ---- CO2_C_Em =E=
558
559 CO2_C_Em(1).. - 0.175*Solid_Compost(1) + CO2_Compost(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
560
561 CO2_C_Em(2).. - 0.175*Solid_Compost(2) + CO2_Compost(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
562
563 CO2_C_Em(3).. - 0.175*Solid_Compost(3) + CO2_Compost(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
564
565 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
566
567
568 ---- CO2_L_Em =E=
569
570 CO2_L_Em(1).. - 0.175*Solid_Landfill(1) + CO2_Landfill(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
571
572 CO2_L_Em(2).. - 0.175*Solid_Landfill(2) + CO2_Landfill(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
573
574 CO2_L_Em(3).. - 0.175*Solid_Landfill(3) + CO2_Landfill(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
575
576 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
577
578
579 ---- CO2_I_Em =E=
580
581 CO2_I_Em(1).. - 1.44*Solid_Incineration(1) + CO2_Incineration(1) =E= 0 ;
582
583         (LHS = 0)
584
585 CO2_I_Em(2).. - 1.44*Solid_Incineration(2) + CO2_Incineration(2) =E= 0 ;
586
587         (LHS = 0)
588
589 CO2_I_Em(3).. - 1.44*Solid_Incineration(3) + CO2_Incineration(3) =E= 0 ;
590
591         (LHS = 0)

```

```
592
593 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
594
595
596 ---- CO2_LE_Of =E=
597
598 CO2_LE_Of(1).. - 0.00055*Ele_Sell_Landfill(1) + CO2_Elec_Landfill(1) =E= 0 ;
599
600     (LHS = 0)
601
602 CO2_LE_Of(2).. - 0.00055*Ele_Sell_Landfill(2) + CO2_Elec_Landfill(2) =E= 0 ;
603
604     (LHS = 0)
605
606 CO2_LE_Of(3).. - 0.00055*Ele_Sell_Landfill(3) + CO2_Elec_Landfill(3) =E= 0 ;
607
608     (LHS = 0)
609
610 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
611
612
613 ---- CO2_LNG_Of =E=
614
615 CO2_LNG_Of(1).. - 0.00197*Biogas_NG_Landfill(1) + CO2_NG_Landfill(1) =E= 0 ;
616
617     (LHS = 0)
618
619 CO2_LNG_Of(2).. - 0.00197*Biogas_NG_Landfill(2) + CO2_NG_Landfill(2) =E= 0 ;
620
621     (LHS = 0)
622
623 CO2_LNG_Of(3).. - 0.00197*Biogas_NG_Landfill(3) + CO2_NG_Landfill(3) =E= 0 ;
624
625     (LHS = 0)
626
627 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
628
629
630 ---- CO2_CE_Of =E=
631
632 CO2_CE_Of(1).. - 0.00055*Ele_Sell_Compost(1) + CO2_Elec_Compost(1) =E= 0 ;
633
634     (LHS = 0)
635
636 CO2_CE_Of(2).. - 0.00055*Ele_Sell_Compost(2) + CO2_Elec_Compost(2) =E= 0 ;
637
638     (LHS = 0)
639
640 CO2_CE_Of(3).. - 0.00055*Ele_Sell_Compost(3) + CO2_Elec_Compost(3) =E= 0 ;
641
642     (LHS = 0)
643
644 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
645
646
647 ---- CO2_CNG_Of =E=
648
649 CO2_CNG_Of(1).. - 0.00197*Biogas_NG_Compost(1) + CO2_NG_Compost(1) =E= 0 ;
650
651     (LHS = 0)
652
```

```

653 CO2_CNG_Of(2).. - 0.00197*Biogas_NG_Compost(2) + CO2_NG_Compost(2) =E= 0 ;
654
655     (LHS = 0)
656
657 CO2_CNG_Of(3).. - 0.00197*Biogas_NG_Compost(3) + CO2_NG_Compost(3) =E= 0 ;
658
659     (LHS = 0)
660
661 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
662
663
664 ---- CO2_CF_Of  =L=
665
666 CO2_CF_Of(1).. - 0.1*Fertilizer(1) + CO2_Fertilizer_Compost(1) =L= 0 ;
667
668     (LHS = 0)
669
670 CO2_CF_Of(2).. - 0.1*Fertilizer(2) + CO2_Fertilizer_Compost(2) =L= 0 ;
671
672     (LHS = 0)
673
674 CO2_CF_Of(3).. - 0.1*Fertilizer(3) + CO2_Fertilizer_Compost(3) =L= 0 ;
675
676     (LHS = 0)
677
678 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
679
680
681 ---- CO2_R_Of  =E=
682
683 CO2_R_Of(1).. - 0.175*GLASS(1) - 0.175*PAPER(1) - 0.175*METAL(1)
684
685     - 0.175*PLASTIC(1) + CO2_Recycle(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
686
687 CO2_R_Of(2).. - 0.175*GLASS(2) - 0.175*PAPER(2) - 0.175*METAL(2)
688
689     - 0.175*PLASTIC(2) + CO2_Recycle(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
690
691 CO2_R_Of(3).. - 0.175*GLASS(3) - 0.175*PAPER(3) - 0.175*METAL(3)
692
693     - 0.175*PLASTIC(3) + CO2_Recycle(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
694
695 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
696
697
698 ---- conserv_CO2  =E=
699
700 conserv_CO2(1).. - CO2_Compost(1) - CO2_Landfill(1) - CO2_Incineration(1)
701
702     + CO2_Elec_Landfill(1) + CO2_NG_Landfill(1) + CO2_Elec_Compost(1)
703
704     + CO2_NG_Compost(1) + CO2_Fertilizer_Compost(1) + CO2_Recycle(1) + C_T(»
705     1)
706     =E= 0 ; (LHS = 0)
707
708 conserv_CO2(2).. - CO2_Compost(2) - CO2_Landfill(2) - CO2_Incineration(2)
709
710     + CO2_Elec_Landfill(2) + CO2_NG_Landfill(2) + CO2_Elec_Compost(2)
711
712     + CO2_NG_Compost(2) + CO2_Fertilizer_Compost(2) + CO2_Recycle(2) + C_T(»
713     2)

```

```

712      =E= 0 ; (LHS = 0)
713
714 conserv_CO2(3).. - CO2_Compost(3) - CO2_Landfill(3) - CO2_Incineration(3)
715
716      + CO2_Elec_Landfill(3) + CO2_NG_Landfill(3) + CO2_Elec_Compost(3)
717
718      + CO2_NG_Compost(3) + CO2_Fertilizer_Compost(3) + CO2_Recycle(3) + C_T(»
719      3)
720      =E= 0 ; (LHS = 0)
721 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
722
723
724 ---- conserv_value =E= conservation of value
725
726 conserv_value(1).. C_Compost(1) + C_Landfill(1) + C_Incineration(1)
727
728      + C_Recycle(1) - R_Landfill_Elec(1) - R_Landfill_NG(1) - R_Compost_Elec»
729      (1)
730      - R_Compost_NG(1) - R_Compost_Fertilizer(1) - R_Incineration_Ash(1)
731
732      - R_Recycle_Glass(1) - R_Recycle_Metal(1) - R_Recycle_Paper(1)
733
734      - R_Recycle_Plastic(1) - R_CO2(1) + V_T(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
735
736 conserv_value(2).. C_Compost(2) + C_Landfill(2) + C_Incineration(2)
737
738      + C_Recycle(2) - R_Landfill_Elec(2) - R_Landfill_NG(2) - R_Compost_Elec»
739      (2)
740      - R_Compost_NG(2) - R_Compost_Fertilizer(2) - R_Incineration_Ash(2)
741
742      - R_Recycle_Glass(2) - R_Recycle_Metal(2) - R_Recycle_Paper(2)
743
744      - R_Recycle_Plastic(2) - R_CO2(2) + V_T(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
745
746 conserv_value(3).. C_Compost(3) + C_Landfill(3) + C_Incineration(3)
747
748      + C_Recycle(3) - R_Landfill_Elec(3) - R_Landfill_NG(3) - R_Compost_Elec»
749      (3)
750      - R_Compost_NG(3) - R_Compost_Fertilizer(3) - R_Incineration_Ash(3)
751
752      - R_Recycle_Glass(3) - R_Recycle_Metal(3) - R_Recycle_Paper(3)
753
754      - R_Recycle_Plastic(3) - R_CO2(3) + V_T(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
755
756 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
757
758
759 ---- cost_C =E=
760
761 cost_C(1).. - 37.97*Solid_Compost(1) + C_Compost(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
762
763 cost_C(2).. - 37.97*Solid_Compost(2) + C_Compost(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
764
765 cost_C(3).. - 37.97*Solid_Compost(3) + C_Compost(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
766
767 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
768

```

```
769
770 ---- cost_L =E=
771
772 cost_L(1).. - 33.44*Solid_Landfill(1) + C_Landfill(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
773
774 cost_L(2).. - 33.44*Solid_Landfill(2) + C_Landfill(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
775
776 cost_L(3).. - 33.44*Solid_Landfill(3) + C_Landfill(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
777
778 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
779
780
781 ---- cost_I =E=
782
783 cost_I(1).. - 119.83*Solid_Incineration(1) + C_Incineration(1) =E= 0 ;
784           (LHS = 0)
785
786
787 cost_I(2).. - 119.83*Solid_Incineration(2) + C_Incineration(2) =E= 0 ;
788           (LHS = 0)
789
790
791 cost_I(3).. - 119.83*Solid_Incineration(3) + C_Incineration(3) =E= 0 ;
792           (LHS = 0)
793
794
795 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
796
797
798 ---- cost_R =E=
799
800 cost_R(1).. - 47.26*Solid_Recycle(1) + C_Recycle(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
801
802 cost_R(2).. - 47.26*Solid_Recycle(2) + C_Recycle(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
803
804 cost_R(3).. - 47.26*Solid_Recycle(3) + C_Recycle(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
805
806 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
807
808
809 ---- rev_E_L =E=
810
811 rev_E_L(1).. - 0.065*Ele_Sell_Landfill(1) + R_Landfill_Elec(1) =E= 0 ;
812           (LHS = 0)
813
814
815 rev_E_L(2).. - 0.074*Ele_Sell_Landfill(2) + R_Landfill_Elec(2) =E= 0 ;
816           (LHS = 0)
817
818
819 rev_E_L(3).. - 0.086*Ele_Sell_Landfill(3) + R_Landfill_Elec(3) =E= 0 ;
820           (LHS = 0)
821
822
823 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
824
825
826 ---- rev_NG_L =E=
827
828 rev_NG_L(1).. - 2.18*Biogas_NG_Landfill(1) + R_Landfill_NG(1) =E= 0 ; (LHS =>
      0)
```

```

829
830 rev_NG_L(2).. - 2.18*Biogas_NG_Landfill(2) + R_Landfill_NG(2) =E= 0 ; (LHS =>
    0)
831
832 rev_NG_L(3).. - 2.18*Biogas_NG_Landfill(3) + R_Landfill_NG(3) =E= 0 ; (LHS =>
    0)
833
834 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
835
836
837 ---- rev_E_C =E=
838
839 rev_E_C(1).. - 0.065*Ele_Sell_Compost(1) + R_Compost_Elec(1) =E= 0 ; (LHS = >>
    0)
840
841 rev_E_C(2).. - 0.074*Ele_Sell_Compost(2) + R_Compost_Elec(2) =E= 0 ; (LHS = >>
    0)
842
843 rev_E_C(3).. - 0.086*Ele_Sell_Compost(3) + R_Compost_Elec(3) =E= 0 ; (LHS = >>
    0)
844
845 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
846
847
848 ---- rev_NG_C =E=
849
850 rev_NG_C(1).. - 2.18*Biogas_NG_Compost(1) + R_Compost_NG(1) =E= 0 ; (LHS = 0>>
    )
851
852 rev_NG_C(2).. - 2.18*Biogas_NG_Compost(2) + R_Compost_NG(2) =E= 0 ; (LHS = 0>>
    )
853
854 rev_NG_C(3).. - 2.18*Biogas_NG_Compost(3) + R_Compost_NG(3) =E= 0 ; (LHS = 0>>
    )
855
856 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
857
858
859 ---- rev_F_C =E=
860
861 rev_F_C(1).. - 80.37*Fertilizer(1) + R_Compost_Fertilizer(1) =E= 0 ; (LHS = >>
    0)
862
863 rev_F_C(2).. - 80.37*Fertilizer(2) + R_Compost_Fertilizer(2) =E= 0 ; (LHS = >>
    0)
864
865 rev_F_C(3).. - 80.37*Fertilizer(3) + R_Compost_Fertilizer(3) =E= 0 ; (LHS = >>
    0)
866
867 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
868
869
870 ---- rev_A_I =E=
871
872 rev_A_I(1).. - 30.91*Ash(1) + R_Incineration_Ash(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
873
874 rev_A_I(2).. - 30.91*Ash(2) + R_Incineration_Ash(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
875
876 rev_A_I(3).. - 30.91*Ash(3) + R_Incineration_Ash(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
877
878 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED

```

```
879
880
881 ---- rev_G_R =E=
882
883 rev_G_R(1).. - 30.91*GLASS(1) + R_Recycle_Glass(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
884
885 rev_G_R(2).. - 30.91*GLASS(2) + R_Recycle_Glass(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
886
887 rev_G_R(3).. - 30.91*GLASS(3) + R_Recycle_Glass(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
888
889 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
890
891
892 ---- rev_M_R =E=
893
894 rev_M_R(1).. - 162.29*METAL(1) + R_Recycle_Metal(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
895
896 rev_M_R(2).. - 162.29*METAL(2) + R_Recycle_Metal(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
897
898 rev_M_R(3).. - 162.29*METAL(3) + R_Recycle_Metal(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
899
900 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
901
902
903 ---- rev_PA_R =E=
904
905 rev_PA_R(1).. - 108.19*PAPER(1) + R_Recycle_Paper(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
906
907 rev_PA_R(2).. - 108.19*PAPER(2) + R_Recycle_Paper(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
908
909 rev_PA_R(3).. - 108.19*PAPER(3) + R_Recycle_Paper(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
910
911 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
912
913
914 ---- rev_PL_R =E=
915
916 rev_PL_R(1).. - 417.31*PLASTIC(1) + R_Recycle_Plastic(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
917
918 rev_PL_R(2).. - 417.31*PLASTIC(2) + R_Recycle_Plastic(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
919
920 rev_PL_R(3).. - 417.31*PLASTIC(3) + R_Recycle_Plastic(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
921
922 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
923
924
925 ---- rev_CO2 =E=
926
927 rev_CO2(1).. R_CO2(1) - 1.89*C_T(1) =E= 0 ; (LHS = 0)
928
929 rev_CO2(2).. R_CO2(2) - 1.89*C_T(2) =E= 0 ; (LHS = 0)
930
931 rev_CO2(3).. R_CO2(3) - 1.89*C_T(3) =E= 0 ; (LHS = 0)
932
933 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
934
935
936 ---- CO2 =G=
937
938 CO2(1).. C_T(1) =G= 1000 ; (LHS = 0, INFES = 1000 ****)
939
```

```

940 CO2(2).. C_T(2) =G= 1000 ; (LHS = 0, INFES = 1000 ****)
941
942 CO2(3).. C_T(3) =G= 1000 ; (LHS = 0, INFES = 1000 ****)
943
944 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
945
946
947 ---- obj_co2 =E=
948
949 obj_co2.. - 0.09*C_T(1) - 0.09*C_T(2) - 0.12*C_T(3) - 0.09*C_T(4) - 0.09*C_T»
(5)
950
951 - 0.12*C_T(6) - 0.12*C_T(7) - 0.12*C_T(8) - 0.16*C_T(9) + c =E= 0 ;
952
953 (LHS = 0)
954
955
956 ---- obj_cost =E= net cost
957
958 obj_cost.. - 0.09*V_T(1) - 0.09*V_T(2) - 0.12*V_T(3) - 0.09*V_T(4)
959
960 - 0.09*V_T(5) - 0.12*V_T(6) - 0.12*V_T(7) - 0.12*V_T(8) - 0.16*V_T(9) +»
z
961 =E= 0 ; (LHS = 0)
962
963 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/20/»
16 16:59:49 Page 3
964 General Algebraic Modeling System
965 Column Listing SOLVE project Using MIP From line 211
966
967
968 ---- Solid_Compost solid waste with compost process (tons)
969
970 Solid_Compost(1)
971 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
972 -1 conserv_solid(1)
973 1 solid_composting(1)
974 -61.615 biogas_composting(1)
975 -0.15 fer_composting(1)
976 -0.175 CO2_C_Em(1)
977 -37.97 cost_C(1)
978
979 Solid_Compost(2)
980 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
981 -1 conserv_solid(2)
982 1 solid_composting(2)
983 -61.615 biogas_composting(2)
984 -0.15 fer_composting(2)
985 -0.175 CO2_C_Em(2)
986 -37.97 cost_C(2)
987
988 Solid_Compost(3)
989 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
990 -1 conserv_solid(3)
991 1 solid_composting(3)
992 -61.615 biogas_composting(3)
993 -0.15 fer_composting(3)
994 -0.175 CO2_C_Em(3)
995 -37.97 cost_C(3)
996
997 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED

```

```
998
999 ---- Solid_Landfill  solid waste with landfill process (tons)
1000
1001 Solid_Landfill(1)
1002      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1003      -1      conserv_solid(1)
1004      1      solid_landfilling(1)
1005      -52.7   biogas_landfill1(1)
1006      -0.175 CO2_L_Em(1)
1007      -33.44 cost_L(1)
1008
1009 Solid_Landfill(2)
1010      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1011      -1      conserv_solid(2)
1012      1      solid_landfilling(2)
1013      -52.7   biogas_landfill1(2)
1014      -0.175 CO2_L_Em(2)
1015      -33.44 cost_L(2)
1016
1017 Solid_Landfill(3)
1018      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1019      -1      conserv_solid(3)
1020      1      solid_landfilling(3)
1021      -52.7   biogas_landfill1(3)
1022      -0.175 CO2_L_Em(3)
1023      -33.44 cost_L(3)
1024
1025 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1026
1027 ---- Solid_Incineration  solid waste with incineration process (tons)
1028
1029 Solid_Incineration(1)
1030      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1031      -1      conserv_solid(1)
1032      1      solid_incineration1(1)
1033      -0.28   ash_incineration(1)
1034      -1.44   CO2_I_Em(1)
1035      -119.83 cost_I(1)
1036
1037 Solid_Incineration(2)
1038      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1039      -1      conserv_solid(2)
1040      1      solid_incineration1(2)
1041      -0.28   ash_incineration(2)
1042      -1.44   CO2_I_Em(2)
1043      -119.83 cost_I(2)
1044
1045 Solid_Incineration(3)
1046      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1047      -1      conserv_solid(3)
1048      1      solid_incineration1(3)
1049      -0.28   ash_incineration(3)
1050      -1.44   CO2_I_Em(3)
1051      -119.83 cost_I(3)
1052
1053 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1054
1055 ---- Solid_Recycle  solid waste with recycling process (td)
1056
1057 Solid_Recycle(1)
1058      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
```

```
1059      -1      conserv_solid(1)
1060       1      solid_recycling1(1)
1061       1      solid_recycling2(1)
1062     -0.05    glass_recycling(1)
1063     -0.018   metal_recycling(1)
1064     -0.089   paper_recycling(1)
1065     -0.201   plastic_recycling(1)
1066     -47.26   cost_R(1)
1067
1068 Solid_Recycle(2)
1069          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1070      -1      conserv_solid(2)
1071       1      solid_recycling1(2)
1072       1      solid_recycling2(2)
1073     -0.05    glass_recycling(2)
1074     -0.018   metal_recycling(2)
1075     -0.089   paper_recycling(2)
1076     -0.201   plastic_recycling(2)
1077     -47.26   cost_R(2)
1078
1079 Solid_Recycle(3)
1080          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1081      -1      conserv_solid(3)
1082       1      solid_recycling1(3)
1083       1      solid_recycling2(3)
1084     -0.05    glass_recycling(3)
1085     -0.018   metal_recycling(3)
1086     -0.089   paper_recycling(3)
1087     -0.201   plastic_recycling(3)
1088     -47.26   cost_R(3)
1089
1090 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1091
1092 ---- Biogas_Compost  biogas from compost process  (m3)
1093
1094 Biogas_Compost(1)
1095          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1096       1      biogas_composting(1)
1097       1      conserv_biogas_compost(1)
1098
1099 Biogas_Compost(2)
1100          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1101       1      biogas_composting(2)
1102       1      conserv_biogas_compost(2)
1103
1104 Biogas_Compost(3)
1105          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1106       1      biogas_composting(3)
1107       1      conserv_biogas_compost(3)
1108
1109 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1110
1111 ---- Biogas_Ele_Compost
1112
1113 Biogas_Ele_Compost(1)
1114          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1115      -1      conserv_biogas_compost(1)
1116     -2.02    elec_composting_s(1)
1117
1118 Biogas_Ele_Compost(2)
1119          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
```

```
1120      -1      conserv_biogas_compost(2)
1121     -2.02     elec_composting_s(2)
1122
1123 Biogas_Ele_Compost(3)
1124      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1125      -1      conserv_biogas_compost(3)
1126     -2.02     elec_composting_s(3)
1127
1128 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1129
1130 ---- Biogas_NG_Compost
1131
1132 Biogas_NG_Compost(1)
1133      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1134      -1      conserv_biogas_compost(1)
1135     -0.002    CO2_CNG_Of(1)
1136     -2.18     rev_NG_C(1)
1137
1138 Biogas_NG_Compost(2)
1139      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1140      -1      conserv_biogas_compost(2)
1141     -0.002    CO2_CNG_Of(2)
1142     -2.18     rev_NG_C(2)
1143
1144 Biogas_NG_Compost(3)
1145      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1146      -1      conserv_biogas_compost(3)
1147     -0.002    CO2_CNG_Of(3)
1148     -2.18     rev_NG_C(3)
1149
1150 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1151
1152 ---- Biogas_Landfill biogas from landfill process      (m3)
1153
1154 Biogas_Landfill(1)
1155      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1156      1      biogas_landfill1(1)
1157      1      conserv_biogas_landfill(1)
1158
1159 Biogas_Landfill(2)
1160      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1161      1      biogas_landfill1(2)
1162      1      conserv_biogas_landfill(2)
1163
1164 Biogas_Landfill(3)
1165      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1166      1      biogas_landfill1(3)
1167      1      conserv_biogas_landfill(3)
1168
1169 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1170
1171 ---- Biogas_Ele_Landfill
1172
1173 Biogas_Ele_Landfill(1)
1174      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1175      -1      conserv_biogas_landfill(1)
1176     -2.02     elec_landfill_s(1)
1177
1178 Biogas_Ele_Landfill(2)
1179      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1180      -1      conserv_biogas_landfill(2)
```

```

1181      -2.02      elec_landfill_s(2)
1182
1183 Biogas_Ele_Landfill(3)
1184      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1185      -1          conserv_biogas_landfill(3)
1186      -2.02      elec_landfill_s(3)
1187
1188 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1189
1190 ---- Biogas_NG_Landfill
1191
1192 Biogas_NG_Landfill(1)
1193      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1194      -1          conserv_biogas_landfill(1)
1195      -0.002      CO2_LNG_Of(1)
1196      -2.18      rev_NG_L(1)
1197
1198 Biogas_NG_Landfill(2)
1199      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1200      -1          conserv_biogas_landfill(2)
1201      -0.002      CO2_LNG_Of(2)
1202      -2.18      rev_NG_L(2)
1203
1204 Biogas_NG_Landfill(3)
1205      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1206      -1          conserv_biogas_landfill(3)
1207      -0.002      CO2_LNG_Of(3)
1208      -2.18      rev_NG_L(3)
1209
1210 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1211
1212 ---- Ash  ash from incineration process (tons)
1213
1214 Ash(1)
1215      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1216      1          ash_incineration(1)
1217      -30.91     rev_A_I(1)
1218
1219 Ash(2)
1220      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1221      1          ash_incineration(2)
1222      -30.91     rev_A_I(2)
1223
1224 Ash(3)
1225      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1226      1          ash_incineration(3)
1227      -30.91     rev_A_I(3)
1228
1229 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1230
1231 ---- Fertilizer  organic fertilizer from composting process (tons)
1232
1233 Fertilizer(1)
1234      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1235      1          fer_composting(1)
1236      -0.1        CO2_CF_Of(1)
1237      -80.37     rev_F_C(1)
1238
1239 Fertilizer(2)
1240      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1241      1          fer_composting(2)

```

```

1242      -0.1      CO2_CF_Of(2)
1243     -80.37     rev_F_C(2)
1244
1245 Fertilizer(3)
1246          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1247          1      fer_composting(3)
1248      -0.1      CO2_CF_Of(3)
1249     -80.37     rev_F_C(3)
1250
1251 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1252
1253 ---- GLASS  glass from recycling process (tons)
1254
1255 GLASS(1)
1256          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1257      -1      solid_recycling2(1)
1258          1      glass_recycling(1)
1259     -0.175     CO2_R_Of(1)
1260    -30.91     rev_G_R(1)
1261
1262 GLASS(2)
1263          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1264     -1      solid_recycling2(2)
1265          1      glass_recycling(2)
1266     -0.175     CO2_R_Of(2)
1267    -30.91     rev_G_R(2)
1268
1269 GLASS(3)
1270          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1271     -1      solid_recycling2(3)
1272          1      glass_recycling(3)
1273     -0.175     CO2_R_Of(3)
1274    -30.91     rev_G_R(3)
1275
1276 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1277
1278 ---- PAPER  paper from recycling process (tons)
1279
1280 PAPER(1)
1281          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1282     -1      solid_recycling2(1)
1283          1      paper_recycling(1)
1284     -0.175     CO2_R_Of(1)
1285    -108.19     rev_PA_R(1)
1286
1287 PAPER(2)
1288          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1289     -1      solid_recycling2(2)
1290          1      paper_recycling(2)
1291     -0.175     CO2_R_Of(2)
1292    -108.19     rev_PA_R(2)
1293
1294 PAPER(3)
1295          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1296     -1      solid_recycling2(3)
1297          1      paper_recycling(3)
1298     -0.175     CO2_R_Of(3)
1299    -108.19     rev_PA_R(3)
1300
1301 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1302

```

```

1303 ---- METAL metal from recycling process (tons)
1304
1305 METAL(1)
1306          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1307          -1      solid_recycling2(1)
1308           1      metal_recycling(1)
1309          -0.175  CO2_R_Of(1)
1310          -162.29 rev_M_R(1)
1311
1312 METAL(2)
1313          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1314          -1      solid_recycling2(2)
1315           1      metal_recycling(2)
1316          -0.175  CO2_R_Of(2)
1317          -162.29 rev_M_R(2)
1318
1319 METAL(3)
1320          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1321          -1      solid_recycling2(3)
1322           1      metal_recycling(3)
1323          -0.175  CO2_R_Of(3)
1324          -162.29 rev_M_R(3)
1325
1326 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1327
1328 ---- PLASTIC plastic from recycling process (tons)
1329
1330 PLASTIC(1)
1331          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1332          -1      solid_recycling2(1)
1333           1      plastic_recycling(1)
1334          -0.175  CO2_R_Of(1)
1335          -417.31 rev_PL_R(1)
1336
1337 PLASTIC(2)
1338          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1339          -1      solid_recycling2(2)
1340           1      plastic_recycling(2)
1341          -0.175  CO2_R_Of(2)
1342          -417.31 rev_PL_R(2)
1343
1344 PLASTIC(3)
1345          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1346          -1      solid_recycling2(3)
1347           1      plastic_recycling(3)
1348          -0.175  CO2_R_Of(3)
1349          -417.31 rev_PL_R(3)
1350
1351 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1352
1353 ---- Ele_Sell_Compost electricity generated from composting process and sold»
      (k
1354          Wh)
1355
1356 Ele_Sell_Compost(1)
1357          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1358           1      elec_composting_s(1)
1359          -0.0005  CO2_CE_Of(1)
1360          -0.065  rev_E_C(1)
1361
1362 Ele_Sell_Compost(2)

```

```

1363      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1364      1      elec_composting_s(2)
1365      -0.0005 CO2_CE_Of(2)
1366      -0.074  rev_E_C(2)
1367
1368 Ele_Sell_Compost(3)
1369      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1370      1      elec_composting_s(3)
1371      -0.0005 CO2_CE_Of(3)
1372      -0.086  rev_E_C(3)
1373
1374 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1375
1376 ---- Ele_Sell_Landfill  electricity generated from landfill process and sold »
      (kW
1377
1378      h)
1379 Ele_Sell_Landfill(1)
1380      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1381      1      elec_landfill_s(1)
1382      -0.0005 CO2_LE_Of(1)
1383      -0.065  rev_E_L(1)
1384
1385 Ele_Sell_Landfill(2)
1386      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1387      1      elec_landfill_s(2)
1388      -0.0005 CO2_LE_Of(2)
1389      -0.074  rev_E_L(2)
1390
1391 Ele_Sell_Landfill(3)
1392      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1393      1      elec_landfill_s(3)
1394      -0.0005 CO2_LE_Of(3)
1395      -0.086  rev_E_L(3)
1396
1397 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1398
1399 ---- CO2_Compost  carbon dioxide emissions from composting process (tons)
1400
1401 CO2_Compost(1)
1402      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1403      1      CO2_C_Em(1)
1404      -1     conserv_CO2(1)
1405
1406 CO2_Compost(2)
1407      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1408      1      CO2_C_Em(2)
1409      -1     conserv_CO2(2)
1410
1411 CO2_Compost(3)
1412      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1413      1      CO2_C_Em(3)
1414      -1     conserv_CO2(3)
1415
1416 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1417
1418 ---- CO2_Landfill  carbon dioxide emissions from landfill process (tons)
1419
1420 CO2_Landfill(1)
1421      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1422      1      CO2_L_Em(1)

```

```

1423      -1      conserv_CO2(1)
1424
1425 CO2_Landfill(2)
1426      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1427      1      CO2_L_Em(2)
1428      -1      conserv_CO2(2)
1429
1430 CO2_Landfill(3)
1431      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1432      1      CO2_L_Em(3)
1433      -1      conserv_CO2(3)
1434
1435 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1436
1437 ---- CO2_Incineration carbon dioxide emissions from incineration process (to»
ns)
1438
1439 CO2_Incineration(1)
1440      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1441      1      CO2_I_Em(1)
1442      -1      conserv_CO2(1)
1443
1444 CO2_Incineration(2)
1445      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1446      1      CO2_I_Em(2)
1447      -1      conserv_CO2(2)
1448
1449 CO2_Incineration(3)
1450      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1451      1      CO2_I_Em(3)
1452      -1      conserv_CO2(3)
1453
1454 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1455
1456 ---- CO2_Elec_Landfill carbon dioxide offset from using generated electricit»
y f
1457      rom landfill gas (tons)
1458
1459 CO2_Elec_Landfill(1)
1460      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1461      1      CO2_LE_Of(1)
1462      1      conserv_CO2(1)
1463
1464 CO2_Elec_Landfill(2)
1465      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1466      1      CO2_LE_Of(2)
1467      1      conserv_CO2(2)
1468
1469 CO2_Elec_Landfill(3)
1470      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1471      1      CO2_LE_Of(3)
1472      1      conserv_CO2(3)
1473
1474 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1475
1476 ---- CO2_NG_Landfill carbon dioxide offset from using producing NG from land»
fil
1477      l gas (tons)
1478
1479 CO2_NG_Landfill(1)
1480      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)

```

```
1481      1      CO2_LNG_Of(1)
1482      1      conserv_CO2(1)
1483
1484 CO2_NG_Landfill(2)
1485      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1486      1      CO2_LNG_Of(2)
1487      1      conserv_CO2(2)
1488
1489 CO2_NG_Landfill(3)
1490      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1491      1      CO2_LNG_Of(3)
1492      1      conserv_CO2(3)
1493
1494 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1495
1496 ---- CO2_Elec_Compost carbon dioxide offset from using generated electricity»
      fr
1497      om composting gas (tons)
1498
1499 CO2_Elec_Compost(1)
1500      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1501      1      CO2_CE_Of(1)
1502      1      conserv_CO2(1)
1503
1504 CO2_Elec_Compost(2)
1505      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1506      1      CO2_CE_Of(2)
1507      1      conserv_CO2(2)
1508
1509 CO2_Elec_Compost(3)
1510      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1511      1      CO2_CE_Of(3)
1512      1      conserv_CO2(3)
1513
1514 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1515
1516 ---- CO2_NG_Compost carbon dioxide offset from using producing NG from compo»
      sti
1517      ng gas (tons)
1518
1519 CO2_NG_Compost(1)
1520      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1521      1      CO2_CNG_Of(1)
1522      1      conserv_CO2(1)
1523
1524 CO2_NG_Compost(2)
1525      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1526      1      CO2_CNG_Of(2)
1527      1      conserv_CO2(2)
1528
1529 CO2_NG_Compost(3)
1530      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1531      1      CO2_CNG_Of(3)
1532      1      conserv_CO2(3)
1533
1534 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1535
1536 ---- CO2_Fertilizer_Compost carbon dioxide offset from using producing ferti»
      lic
1537      er from composting gas (tons)
1538
```

```
1539 CO2_Fertilizer_Compost(1)
1540      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1541      1      CO2_CF_Of(1)
1542      1      conserv_CO2(1)
1543
1544 CO2_Fertilizer_Compost(2)
1545      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1546      1      CO2_CF_Of(2)
1547      1      conserv_CO2(2)
1548
1549 CO2_Fertilizer_Compost(3)
1550      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1551      1      CO2_CF_Of(3)
1552      1      conserv_CO2(3)
1553
1554 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1555
1556 ---- CO2_Recycle carbon dioxide offset recycling process (tons)
1557
1558 CO2_Recycle(1)
1559      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1560      1      CO2_R_Of(1)
1561      1      conserv_CO2(1)
1562
1563 CO2_Recycle(2)
1564      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1565      1      CO2_R_Of(2)
1566      1      conserv_CO2(2)
1567
1568 CO2_Recycle(3)
1569      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1570      1      CO2_R_Of(3)
1571      1      conserv_CO2(3)
1572
1573 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1574
1575 ---- C_Compost
1576
1577 C_Compost(1)
1578      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1579      1      conserv_value(1)
1580      1      cost_C(1)
1581
1582 C_Compost(2)
1583      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1584      1      conserv_value(2)
1585      1      cost_C(2)
1586
1587 C_Compost(3)
1588      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1589      1      conserv_value(3)
1590      1      cost_C(3)
1591
1592 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1593
1594 ---- C_Landfill
1595
1596 C_Landfill(1)
1597      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1598      1      conserv_value(1)
1599      1      cost_L(1)
```

```

1600
1601 C_Landfill(2)
1602      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1603      1      conserv_value(2)
1604      1      cost_L(2)
1605
1606 C_Landfill(3)
1607      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1608      1      conserv_value(3)
1609      1      cost_L(3)
1610
1611 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1612
1613 ---- C_Incineration
1614
1615 C_Incineration(1)
1616      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1617      1      conserv_value(1)
1618      1      cost_I(1)
1619
1620 C_Incineration(2)
1621      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1622      1      conserv_value(2)
1623      1      cost_I(2)
1624
1625 C_Incineration(3)
1626      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1627      1      conserv_value(3)
1628      1      cost_I(3)
1629
1630 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1631
1632 ---- C_Recycle
1633
1634 C_Recycle(1)
1635      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1636      1      conserv_value(1)
1637      1      cost_R(1)
1638
1639 C_Recycle(2)
1640      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1641      1      conserv_value(2)
1642      1      cost_R(2)
1643
1644 C_Recycle(3)
1645      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1646      1      conserv_value(3)
1647      1      cost_R(3)
1648
1649 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1650
1651 ---- R_Landfill_Elec
1652
1653 R_Landfill_Elec(1)
1654      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1655      -1     conserv_value(1)
1656      1      rev_E_L(1)
1657
1658 R_Landfill_Elec(2)
1659      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1660      -1     conserv_value(2)

```

```
1661      1      rev_E_L(2)
1662
1663 R_Landfill_Elec(3)
1664      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1665     -1      conserv_value(3)
1666      1      rev_E_L(3)
1667
1668 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1669
1670 ---- R_Landfill_NG
1671
1672 R_Landfill_NG(1)
1673      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1674     -1      conserv_value(1)
1675      1      rev_NG_L(1)
1676
1677 R_Landfill_NG(2)
1678      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1679     -1      conserv_value(2)
1680      1      rev_NG_L(2)
1681
1682 R_Landfill_NG(3)
1683      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1684     -1      conserv_value(3)
1685      1      rev_NG_L(3)
1686
1687 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1688
1689 ---- R_Compost_Elec
1690
1691 R_Compost_Elec(1)
1692      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1693     -1      conserv_value(1)
1694      1      rev_E_C(1)
1695
1696 R_Compost_Elec(2)
1697      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1698     -1      conserv_value(2)
1699      1      rev_E_C(2)
1700
1701 R_Compost_Elec(3)
1702      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1703     -1      conserv_value(3)
1704      1      rev_E_C(3)
1705
1706 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1707
1708 ---- R_Compost_NG
1709
1710 R_Compost_NG(1)
1711      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1712     -1      conserv_value(1)
1713      1      rev_NG_C(1)
1714
1715 R_Compost_NG(2)
1716      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1717     -1      conserv_value(2)
1718      1      rev_NG_C(2)
1719
1720 R_Compost_NG(3)
1721      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
```

```

1722      -1      conserv_value(3)
1723       1      rev_NG_C(3)
1724
1725 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1726
1727 ---- R_Compost_Fertilizer
1728
1729 R_Compost_Fertilizer(1)
1730      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1731      -1      conserv_value(1)
1732       1      rev_F_C(1)
1733
1734 R_Compost_Fertilizer(2)
1735      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1736      -1      conserv_value(2)
1737       1      rev_F_C(2)
1738
1739 R_Compost_Fertilizer(3)
1740      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1741      -1      conserv_value(3)
1742       1      rev_F_C(3)
1743
1744 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1745
1746 ---- R_Incineration_Ash
1747
1748 R_Incineration_Ash(1)
1749      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1750      -1      conserv_value(1)
1751       1      rev_A_I(1)
1752
1753 R_Incineration_Ash(2)
1754      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1755      -1      conserv_value(2)
1756       1      rev_A_I(2)
1757
1758 R_Incineration_Ash(3)
1759      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1760      -1      conserv_value(3)
1761       1      rev_A_I(3)
1762
1763 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1764
1765 ---- R_Recycle_Glass
1766
1767 R_Recycle_Glass(1)
1768      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1769      -1      conserv_value(1)
1770       1      rev_G_R(1)
1771
1772 R_Recycle_Glass(2)
1773      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1774      -1      conserv_value(2)
1775       1      rev_G_R(2)
1776
1777 R_Recycle_Glass(3)
1778      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1779      -1      conserv_value(3)
1780       1      rev_G_R(3)
1781
1782 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED

```

```
1783
1784 ---- R_Recycle_Metal
1785
1786 R_Recycle_Metal(1)
1787      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1788      -1      conserv_value(1)
1789      1      rev_M_R(1)
1790
1791 R_Recycle_Metal(2)
1792      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1793      -1      conserv_value(2)
1794      1      rev_M_R(2)
1795
1796 R_Recycle_Metal(3)
1797      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1798      -1      conserv_value(3)
1799      1      rev_M_R(3)
1800
1801 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1802
1803 ---- R_Recycle_Paper
1804
1805 R_Recycle_Paper(1)
1806      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1807      -1      conserv_value(1)
1808      1      rev_PA_R(1)
1809
1810 R_Recycle_Paper(2)
1811      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1812      -1      conserv_value(2)
1813      1      rev_PA_R(2)
1814
1815 R_Recycle_Paper(3)
1816      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1817      -1      conserv_value(3)
1818      1      rev_PA_R(3)
1819
1820 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1821
1822 ---- R_Recycle_Plastic
1823
1824 R_Recycle_Plastic(1)
1825      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1826      -1      conserv_value(1)
1827      1      rev_PL_R(1)
1828
1829 R_Recycle_Plastic(2)
1830      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1831      -1      conserv_value(2)
1832      1      rev_PL_R(2)
1833
1834 R_Recycle_Plastic(3)
1835      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1836      -1      conserv_value(3)
1837      1      rev_PL_R(3)
1838
1839 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1840
1841 ---- R_CO2
1842
1843 R_CO2(1)
```

```
1844          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1845      -1      conserv_value(1)
1846       1      rev_CO2(1)
1847
1848 R_CO2(2)
1849          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1850      -1      conserv_value(2)
1851       1      rev_CO2(2)
1852
1853 R_CO2(3)
1854          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1855      -1      conserv_value(3)
1856       1      rev_CO2(3)
1857
1858 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1859
1860 ---- C_T
1861
1862 C_T(1)
1863          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1864       1      conserv_CO2(1)
1865     -1.89    rev_CO2(1)
1866       1      CO2(1)
1867     -0.09    obj_co2
1868
1869 C_T(2)
1870          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1871       1      conserv_CO2(2)
1872     -1.89    rev_CO2(2)
1873       1      CO2(2)
1874     -0.09    obj_co2
1875
1876 C_T(3)
1877          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1878       1      conserv_CO2(3)
1879     -1.89    rev_CO2(3)
1880       1      CO2(3)
1881     -0.12    obj_co2
1882
1883 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1884
1885 ---- V_T
1886
1887 V_T(1)
1888          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1889       1      conserv_value(1)
1890     -0.09    obj_cost
1891
1892 V_T(2)
1893          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1894       1      conserv_value(2)
1895     -0.09    obj_cost
1896
1897 V_T(3)
1898          (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1899       1      conserv_value(3)
1900     -0.12    obj_cost
1901
1902 REMAINING 6 ENTRIES SKIPPED
1903
1904 ---- z
```

```

1905
1906 z
1907      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1908      1      obj_cost
1909
1910
1911 ---- c
1912
1913 c
1914      (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
1915      1      obj_co2
1916
1917
1918 ---- f_compost
1919
1920 f_compost
1921      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1922      -5682.04 solid_composting(1)
1923      -5682.04 solid_composting(2)
1924      -5682.04 solid_composting(3)
1925      -6150.34 solid_composting(4)
1926      -6150.34 solid_composting(5)
1927      -6150.34 solid_composting(6)
1928      -6743.52 solid_composting(7)
1929      -6743.52 solid_composting(8)
1930      -6743.52 solid_composting(9)
1931      1      cons1
1932
1933
1934 ---- f_incineration
1935
1936 f_incineration
1937      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1938      -7512.96 solid_incineration1(1)
1939      -7512.96 solid_incineration1(2)
1940      -7512.96 solid_incineration1(3)
1941      -8132.16 solid_incineration1(4)
1942      -8132.16 solid_incineration1(5)
1943      -8132.16 solid_incineration1(6)
1944      -8916.48 solid_incineration1(7)
1945      -8916.48 solid_incineration1(8)
1946      -8916.48 solid_incineration1(9)
1947      1      cons1
1948
1949
1950 ---- f_recycle
1951
1952 f_recycle
1953      (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1954      -3265.99 solid_recycling1(1)
1955      -3265.99 solid_recycling1(2)
1956      -3265.99 solid_recycling1(3)
1957      -3535.165 solid_recycling1(4)
1958      -3535.165 solid_recycling1(5)
1959      -3535.165 solid_recycling1(6)
1960      -3876.12 solid_recycling1(7)
1961      -3876.12 solid_recycling1(8)
1962      -3876.12 solid_recycling1(9)
1963      1      cons2
1964
1965

```

```

1966 ---- f_landfill
1967
1968 f_landfill
1969          (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, 1, 0)
1970      -9100      solid_landfilling(1)
1971      -9100      solid_landfilling(2)
1972      -9100      solid_landfilling(3)
1973      -9850      solid_landfilling(4)
1974      -9850      solid_landfilling(5)
1975      -9850      solid_landfilling(6)
1976     -10800      solid_landfilling(7)
1977     -10800      solid_landfilling(8)
1978     -10800      solid_landfilling(9)
1979          1      cons2
1980
1981 GAMS 24.7.1 r56632 Released Mar 14, 2016 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows 05/20/»
      16 16:59:49 Page 4
1982 G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
1983 Model Statistics      SOLVE project Using MIP From line 211
1984
1985
1986 MODEL STATISTICS
1987
1988 BLOCKS OF EQUATIONS          49      SINGLE EQUATIONS          409
1989 BLOCKS OF VARIABLES          50      SINGLE VARIABLES          402
1990 NON ZERO ELEMENTS           1,113    DISCRETE VARIABLES          4
1991
1992
1993
1994 **** THE MODEL EXCEEDS THE DEMO LIMITS
1995 **** MAX MATRIX ROWS          300
1996 **** MAX MATRIX COLUMNS      300
1997 **** MAX NON ZERO ELEMENTS    2000
1998 **** MAX NON LINEAR N-Z       1000
1999 **** MAX DISCRETE VARIABLES   50
2000 **** Terminated due to a licensing error
2001
2002      GAMS Development Corporation, Washington, DC      G871201/0000CA-ANY
2003      Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com
2004      10510128000S                                          00
2005      012345670000000
2006      DC0000      Ref: Generated by Base      A Demo

```

# ภาคผนวก ง

รายงานการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ  
ประจำปีการผลิต 2554/55

รายงานการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ

ประจำปีการผลิต 2554/55

ประจำปีการผลิต 2554/55 (ฉบับปิดหีบ)

หน่วย/กระสอบ 100 กก

\* รายงานแยกตามประเภท (ภาค) \*

ชื่อโรงงาน	เปิดหีบ	ณ.วันที่ (*ปิดหีบ)	จำนวน คันหีบ	ปริมาณเฉลี่ยเข้าหีบ		รวมปริมาณเฉลี่ย (ตัน)	ผล C.C.S ถึงวันที่	น้ำตาลทรายขาว			น้ำตาลทรายดิบ			* จัดอื่นๆ	รวมทั้งสิ้น	น้ำตาลดิบ กก.	ปริมาณการผลิต กาน้ำตาล(ตัน)	เฉลี่ยคันหีบ กก.
				ร้อยละ (ตัน)	ร้อยละ (ตัน)			ขาวธรรมดา(ก.ส.)	ขาวบริสุทธิ์(ก.ส.)	รวม(ก.ส.)	ทอง(ตัน)	กระสอบ	รวม (ก.ส.)					
ภาคเหนือ																		
แม่วัง	9/12/54	29/4/55	143	70,584.939	249,122.482	319,707.421	11.79	150,215.000	0.000	150,215.000	2,803.287	145,298.670	173,331.540	0.000	323,546.540	101.201	14,733.000	46.083
พิชญ์อุทัย(สุภาวิณี)	18/11/54	11/5/55	176	201,264.040	910,201.110	1,111,465.150	11.91	126,153.000	7,394.000	133,547.000	37,912.950	542,025.150	921,154.650	0.000	1,054,701.650	94.893	48,928.343	44.021
ไทยเอกสิทธิ์	21/11/54	24/4/55	156	1,185,907.890	1,146,208.510	2,332,116.400	12.15	219,872.500	717,442.500	937,315.000	98,025.030	546,371.600	1,526,621.900	0.000	2,463,936.900	105.652	97,106.000	41.639
กำแพงเพชร	1/12/54	14/4/55	136	205,742.210	1,015,509.890	1,221,252.100	11.76	405,034.000	0.000	405,034.000	48,481.850	250,192.200	735,010.700	0.000	1,140,044.700	93.350	52,400.000	42.907
รวมผลฯ	25/11/54	5/5/55	163	514,609.270	1,614,156.310	2,128,765.580	11.30	236,191.500	477,211.500	713,403.000	129,654.120	0.000	1,296,541.200	0.000	2,009,944.200	94.418	98,887.000	46.453
นครแพร่	18/11/54	10/5/55	175	1,233,843.710	2,752,482.730	3,986,326.440	11.55	361,293.500	222,023.000	583,316.500	317,667.960	0.000	3,176,679.600	0.000	3,759,996.100	94.322	167,618.630	42.048
สหราชอาณาจักร	15/11/54	6/5/55	174	1,685,668.940	5,214,714.570	6,900,383.510	11.93	949,472.000	920,901.000	1,870,373.000	441,179.688	739,769.110	5,151,565.990	0.000	7,021,938.990	101.762	292,859.560	42.441
ไทยรุ่งเรือง	25/11/54	2/5/55	160	1,507,195.980	3,315,203.860	4,822,399.840	12.11	406,804.000	1,295,099.000	1,701,903.000	352,043.840	0.000	3,520,638.400	774.250	5,223,315.650	108.314	221,486.870	45.929
พินิจโลก	1/12/54	1/5/55	153	456,337.550	1,696,194.760	2,152,532.310	11.51	387,304.000	617,440.000	1,004,744.000	110,351.160	0.000	1,103,511.600	0.000	2,108,255.600	97.943	100,604.000	46.738
**รวม**				7,061,154.529	17,913,794.222	24,974,948.751	11.83	3,242,339.50	4,257,511.00	7,499,850.500	1,538,139.885	2,223,656.730	17,605,055.580	774.25	25,105,680.330	100.523	1,094,623.403	43.829
ภาคกลาง																		
สิงห์บุรี	20/11/54	12/5/55	175	310,913.270	1,658,475.190	1,969,388.460	11.63	126,532.000	527,740.250	654,272.250	133,818.002	0.000	1,338,180.020	0.000	1,992,452.270	101.171	92,108.280	46.770
สุพรรณบุรี	8/12/54	18/4/55	133	50,464.050	414,212.980	464,677.030	11.49	1,189.000	27,707.000	28,896.000	42,217.560	0.000	422,179.600	0.000	451,075.600	97.073	22,819.710	49.109
วิภาวดีนคร	13/12/54	30/4/55	140	227,880.040	933,185.290	1,161,065.330	11.68	379,725.000	99,025.000	478,750.000	66,633.830	0.000	666,338.300	1,500.000	1,146,588.300	98.753	59,760.000	51.470
ไทยพัฒนา	10/12/54	10/5/55	153	527,177.620	648,592.700	1,175,770.320	11.52	0.000	952,249.000	952,249.000	26,366.960	0.000	263,669.600	0.000	1,215,918.600	103.415	52,124.000	44.332
ไทยอุตสาหกรรม	10/12/54	7/4/55	120	433,874.290	886,891.930	1,320,766.220	11.23	309,861.000	579,870.000	889,731.000	38,208.300	0.000	382,083.000	0.000	1,271,814.000	96.294	62,355.000	47.211
ประจวบฯ	10/12/54	18/5/55	161	382,541.590	702,346.070	1,084,887.660	11.45	208,815.000	676,787.500	885,602.500	17,037.720	0.000	170,377.200	0.000	1,055,979.700	97.335	52,576.540	48.463
ท่ามะกา	10/12/54	27/4/55	140	482,801.130	1,249,380.300	1,732,181.430	11.34	328,434.500	753,652.000	1,082,086.500	63,720.190	0.000	637,201.900	0.000	1,719,288.400	99.256	83,957.380	48.469
นิวกิ่งไทย	1/12/54	31/3/55	122	677,073.840	1,712,421.490	2,389,495.330	11.40	183,345.000	331,688.900	515,033.900	191,626.704	0.000	1,916,267.040	0.000	2,431,300.940	101.750	110,109.128	46.080
อุตสาหกรรมน้ำตาลบ้านไร่	25/11/54	13/4/55	141	714,949.300	3,054,372.880	3,769,322.180	11.84	104,729.000	662,373.005	767,102.005	321,037.900	0.000	3,210,379.000	105.095	3,977,586.100	105.525	176,195.480	46.745
ไทยกาญจนบุรี	10/12/54	10/5/55	153	659,713.190	854,775.710	1,514,488.900	11.20	855,858.500	540,527.000	1,396,385.500	13,570.153	0.000	135,701.530	0.000	1,532,087.030	101.162	61,983.780	40.927
มิตรภาพ	10/12/54	8/4/55	121	617,886.610	648,365.060	1,266,251.670	11.67	627,269.000	226,914.000	854,183.000	45,227.010	0.000	452,270.100	0.000	1,306,453.100	103.175	57,537.990	45.440
มิตรผล	25/11/54	21/4/55	149	1,128,373.610	4,137,736.860	5,266,110.470	11.65	294,905.200	1,429,504.910	1,724,410.110	359,161.967	0.000	3,591,619.670	330,577.800	5,646,607.580	107.225	252,934.370	48.031
บ้านโป่ง	10/12/54	6/4/55	119	401,884.810	804,486.820	1,206,371.630	11.40	223,254.000	565,475.000	788,729.000	41,538.400	0.000	415,384.000	0.000	1,204,113.000	99.813	52,186.750	43.259
ราชบุรี	19/12/54	14/4/55	118	783,218.830	425,192.330	1,208,411.160	11.90	320,669.500	655,368.500	976,038.000	29,242.380	0.000	292,423.800	0.000	1,268,461.800	104.969	58,109.090	48.087
พืชน์	1/12/54	29/5/55	181	433,214.050	1,442,482.310	1,875,696.360	12.03	359,450.500	151,326.000	510,776.500	134,644.310	0.000	1,346,443.100	97,789.500	1,955,009.100	104.228	86,640.030	46.191
ปราณบุรี	10/12/54	1/5/55	144	392,339.860	109,242.400	501,582.260	10.94	181,954.500	280,193.500	462,148.000	3,364.040	0.000	33,640.400	0.000	495,788.400	98.845	26,004.835	51.846
สระบุรี	25/11/54	17/5/55	175	1,201,830.440	2,747,094.550	3,948,924.990	12.03	393,945.750	844,013.000	1,237,958.750	302,732.502	0.000	3,027,325.020	0.000	4,265,283.770	108.011	189,954.310	48.103
**รวม**				9,426,136.530	22,429,254.870	31,855,391.400	11.64	4,899,937.450	9,304,414.565	14,204,352.015	1,830,148.328	0.000	18,301,483.280	429,972.395	32,935,807.690	103.392	1,497,356.673	47.005

ชื่อโครงการ	เปิดรับ	ณ.วันที่ (ปีเปิดรับ)	รวมวัน ที่รับ	ปริมาณข้อมูลเข้าเทียบ		รวมปริมาณข้อมูล (ตัน)	เฉลี่ย C.C.S. ตัน/วัน	น้ำหนักทรายขาว			น้ำหนักทรายดิบ			* ชนิดอื่นๆ	รวมทั้งสิ้น	น้ำหนักหน่วย กก.	ปริมาณการบริโภค กิโลกรัม/ตัน	เฉลี่ย/ตันข้อมูล	
				ข้อมูลสด(ตัน)	ข้อมูลไปใหม่(ตัน)			ขาวรวมค.ค.ส. (ก.ก.)	ขาวบริสุทธิ์(ก.ก.)	รวม(ก.ก.)	ตกบง(ตัน)	กระสอบ	รวม (ก.ก.)						
ภาคตะวันออก																			
นิคมวัง	21/11/54	6/4/55	138	89,608.170	351,237.560	440,845.730	11.26	55,683.000	65,619.000	121,302.000	31,150.600	0.000	311,506.000	0.000	432,808.000	98.177	18,504.970	41.976	
สหการชลบุรี	12/12/54	31/3/55	111	149,814.990	576,849.080	726,664.070	10.56	219,634.000	224,000.000	443,634.000	21,905.090	0.000	219,050.900	0.000	662,684.900	91.195	37,538.680	51.659	
น้ำทะเลและข้อมูลตะวันออก	30/11/54	14/4/55	137	464,945.760	1,849,488.780	2,314,434.540	12.11	502,150.000	125,231.000	627,381.000	156,136.170	240,000.000	1,801,361.700	0.000	2,428,742.700	104.939	99,850.000	43.142	
ระยอง	2/12/54	6/4/55	127	130,330.950	482,179.640	612,510.590	11.19	234,799.500	108,077.000	342,876.500	21,032.000	0.000	210,320.000	0.000	553,196.500	90.316	34,775.000	56.775	
**รวม**				834,699.870	3,259,755.060	4,094,454.930	11.61	1,012,266.500	522,927.000	1,535,193.500	230,223.860	240,000.000	2,542,238.600	0.000	4,077,432.100	99.584	190,668.650	46.568	
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ																			
สุรินทร์	7/12/54	11/4/55	127	781,344.550	1,547,316.910	2,328,661.460	12.74	209,100.000	889,867.900	1,098,967.900	154,470.310	0.000	1,544,703.100	0.000	2,643,671.000	113.527	104,723.620	44.972	
อีสาน	28/11/54	26/5/55	181	296,901.200	1,120,941.870	1,417,843.070	12.85	447,452.500	0.000	447,452.500	108,493.030	0.000	1,084,930.300	0.000	1,532,382.800	108.078	54,570.410	38.488	
มิตรผล(กาฬสินธุ์)	23/11/54	20/5/55	179	1,054,095.470	1,937,194.540	2,991,290.010	13.37	132,462.500	758,011.500	890,474.000	244,702.500	0.000	2,447,025.000	0.000	3,337,499.000	111.574	123,449.140	41.270	
วังขนาย(มหาวิง)	1/12/54	7/4/55	129	483,342.910	330,161.540	813,504.450	12.91	0.000	0.000	0.000	78,351.110	30,024.500	813,535.600	70,348.500	883,884.100	108.651	36,689.970	45.101	
เกษตรผล	24/11/54	13/4/55	142	555,234.350	1,229,849.920	1,785,084.270	12.79	489,056.500	100,125.000	589,181.500	121,519.110	160,065.000	1,375,256.100	0.000	1,964,437.600	110.047	73,349.150	41.090	
โคราช	1/12/54	4/5/55	156	1,432,361.350	2,002,314.760	3,434,676.110	12.02	947,854.600	911,375.000	1,859,229.600	192,293.240	0.000	1,922,932.400	0.000	3,782,162.000	110.117	139,659.630	40.662	
มิตรภูเวียง	20/11/54	7/5/55	170	3,076,164.030	1,344,724.950	4,420,888.980	12.56	498,772.500	0.000	498,772.500	402,681.460	141,770.000	4,168,584.600	284,877.640	4,952,734.740	112.019	185,432.850	41.945	
อำเภอนน	1/12/54	27/5/55	179	1,407,933.710	1,110,072.840	2,518,006.550	12.00	448,788.000	153,867.000	602,655.000	174,082.900	20,026.000	1,760,855.000	235,525.000	2,599,035.000	103.218	126,455.900	50.221	
ศรีบุญ	26/11/54	11/5/55	168	702,669.750	1,844,678.250	2,547,348.000	11.96	226,917.000	1,141,369.400	1,368,286.400	111,732.540	103,406.000	1,220,731.400	44,539.500	2,633,557.300	103.384	118,445.970	46.498	
เริ่มสุดม	8/12/54	9/4/55	124	887,654.490	607,891.400	1,495,545.890	12.36	492,094.000	0.000	492,094.000	108,571.808	0.000	1,085,718.080	0.000	1,577,812.080	105.501	66,668.830	44.578	
กุ่มกาวปี	25/11/54	23/4/55	151	435,722.410	1,244,966.410	1,680,688.820	12.64	507,233.750	475,215.000	982,448.750	81,816.730	1,936.945	820,104.245	0.000	1,802,552.995	107.251	73,116.000	43.504	
ขอนแก่น	26/11/54	12/4/55	139	859,286.850	1,876,813.290	2,736,100.140	12.26	547,337.600	730,072.000	1,277,409.600	167,312.650	0.000	1,673,126.500	0.000	2,950,536.100	107.837	120,003.870	43.859	
สาลืออง	6/12/54	18/4/55	136	492,899.010	1,293,326.730	1,786,225.740	13.76	944,349.000	0.000	944,349.000	122,652.450	0.000	1,226,524.500	0.000	2,170,873.500	121.534	73,889.230	41.366	
บุรีรัมย์	24/11/54	12/4/55	141	543,401.660	945,896.090	1,489,297.750	12.29	482,921.750	0.000	482,921.750	96,158.230	180,613.000	1,142,195.300	0.000	1,625,117.050	109.120	66,111.950	44.391	
รวมภาคตรวจ	20/11/54	5/5/55	168	2,239,873.390	1,201,523.400	3,441,396.790	12.69	372,831.500	1,508,074.700	1,880,906.200	180,488.223	0.000	1,804,882.230	4,080.000	3,689,868.430	107.220	147,033.602	42.725	
เฮราวัน	20/11/54	20/4/55	153	1,202,519.650	965,817.440	2,168,337.090	12.51	662,229.000	126,507.500	788,736.500	145,889.300	0.000	1,458,893.000	0.000	2,247,629.500	103.657	97,381.490	44.911	
**รวม**				16,451,404.780	20,603,490.340	37,054,895.120	12.57	7,409,400.200	6,794,485.000	14,203,885.200	2,491,215.591	637,841.445	25,549,597.355	639,370.640	40,393,253.195	109.009	1,606,981.612	43.368	
รวมทั้งสิ้น				33,773,395.709	64,206,294.492	97,979,690.201	12.04	16,563,943.650	20,879,337.565	37,443,281.215	6,089,727.664	3,101,498.175	63,998,774.815	1,070,117.285	102,512,173.315	104.626	4,389,630.338	44.801	

1. ข้อมูล C.C.S. งอซึ่งที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้น
2. 32. กุมภวิปีคิต H.T.M. จำนวน 325.00 เมทริกตันและได้แปลงค่าเป็นน้ำเค็มทรายดิบได้ 193.6945 เมทริกตัน รวมไว้ในชั่งน้ำหนักทรายดิบ  
 กระดาษคัตเป็นสัดส่วนภาคน้ำเกลือคุณภาพสูง : น้ำเค็มทรายดิบเท่ากับ 1.6779 : 1
3. 32. มิตรผลผลิตน้ำเชื่อม 325,498.30 กก. น้ำตาลทรายแดงจำนวน 18.00 กก. และน้ำเค็มทรายดิบจำนวน 5,061.50 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
4. 32. รวมเกษตรกรผลิต Caster Sugar จำนวน 4,080.00 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
5. 32. มิตรเกลือเม็ดน้ำเค็มทรายแดงจำนวน 46,410.00 กก. และ Mineral จำนวน 238,467.64 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
6. 32. กัมมันตภาพ Demerara จำนวน 13,301.50 กก. Natural 80,898.00 กก. ทรายแดง 3,436.00 และกรวด 154.00 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
7. 32. ส่วนเวียนผลิต Natural จำนวน 166,382.00 กก. และ Organic จำนวน 18,552.00 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
8. 32. ส่วนเวียนผลิต Demerara จำนวน 50,591.00 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
9. 32. ไร่ฟุ้งเกลือการแดงจำนวน 1,000.00 กก. น้ำเค็มทรายขาวบริสุทธิ์เสริมแคลเซียม 500 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
10. 32. มหาวังผลิต Demerara จำนวน 70,348.50 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
11. 32. ทรัพย์ผลิต Natural Sugar จำนวน 44,539.50 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
12. 32. สุกขบ้านไร่ผลิตน้ำเค็มทรายกรวด 105,095 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
13. 32. ไร่รุ่งเรืองผลิตน้ำเค็มทรายกรวด จำนวน 774.25 กก. รวมไว้ในชั่งอื่น ๆ
14. 32. ไร่รุ่งเรืองผลิตน้ำเค็มทรายจำนวน 13,858.10 พันตันได้คำนวณเป็นน้ำเค็มทรายดิบได้จำนวน 1,866.83 ตันและได้กากจำนวน 972.22 ตัน ตามมติคณะกรรมการควบคุม  
 ประจําโรงงานน้ำตาลไร่รุ่งเรืองครั้งที่ 6 ลงวันที่ 26 พฤษภาคม 2555 ได้รวมไว้ในตารางฉบับนี้แล้ว
15. 32. น้ำเค็มที่ชะลอน้ำเค็มทรายดิบที่กระบวนการผลิตเอชซีเอ็นการละลายมี 9 โรงงานได้แก่ ค่าแพงพร, พินอุโลก, ไทยสุดฯ, มิตรเกษตร, นิเวศวัง, ระยอง, เริ่มสุด, เกษตรผลและราชบุรี  
 ยอดทางการละลายได้รวมไว้ในตารางนี้แล้ว
16. 32. น้ำเค็มที่ชะลอน้ำเค็มทรายดิบที่กระบวนการผลิตยอดทางการละลายยังไม่ได้รวมไว้ในตารางนี้มี 7 โรงงานได้แก่ ไร่รุ่งเรือง, สิงห์บุรี, นครพร, มิตรเกลือ, สหเจริญ,  
 มิตรภาพสินธุ์ และรวมเกษตรกร
17. 32. น้ำเค็มที่ทำการละลายตั้งเนื่องที่ชลประทานเอชซีเอ็นได้แก่ กัม, สุกขบ้านไร่, เมธาวัง และอ่างเวียนผลผลิตจากการละลายรวมอยู่ในตารางฉบับนี้แล้ว
18. 32. น้ำเค็มที่ทำการละลายตั้งเนื่องและได้ประมาณการนำเค็มที่ค้างหลังจากทุบอัดของคณะโรงงานนำมาประมวลเป็นผลผลิตอยู่ในฉบับนี้มี 8 โรงงานได้แก่  
 นิกรรุ่งไทย, มิตรผล, สุกขบ้านไร่, สระบุรี, สุรินทร์, โคราฯ, ทรัพย์ และขอนแก่น
19. 32. มหาวังปรับปริมาณผลิตออก 330,161.34 ตันเป็น 330,161.54 ตันตามบันทึกปิดที่บอวันที่ 18 พ.ค.55
20. 32. มิตรเกลือปรับปริมาณผลิตออกจำนวน 1,366.79 ตันและเพิ่มอ้อยใหม่จำนวน 1,366.79 ตันตามบันทึกปิดที่บอวันที่ 14 พ.ค.55
21. 32. รวมผลปรับปริมาณน้ำเค็มทรายดิบออกจำนวน 30.00 ตันตามบันทึกปิดที่บอวันที่ 5 พ.ค.55
22. 32. สระบุรีปรับปริมาณผลิตออกจำนวน 20.67 ตันและเพิ่มอ้อยใหม่จำนวน 20.67 ตันตามบันทึกปิดที่บอวันที่ 17 พ.ค.55
23. 32. มิตรภาพสินธุ์ปรับปริมาณน้ำเค็มทรายดิบออกจำนวน 992.33 ตันตามบันทึกปิดที่บอวันที่ 20 พ.ค.55

# ภาคผนวก จ

รายการคำนวณปริมาณเอทานอลจากวัตถุดิบต่างๆ

## รายการคำนวณปริมาณเอทานอลจากวัตถุดิบต่างๆ

### 1. ข้อมูลประกอบ

จากหัวข้อ 3.3.3 พบว่าอัตราส่วนแปรสภาพของผลิตมีดังนี้

- อ้อย 1 ตัน                      ผลิตเอทานอลได้ 70 ลิตร
- มัน 1 ตัน                        ผลิตเอทานอลได้ 180 ลิตร
- กากน้ำตาล 1 ตัน              ผลิตเอทานอลได้ 260 ลิตร
- rỉญพีช 1 ตัน                  ผลิตเอทานอลได้ 375 ลิตร

ข้อมูลปริมาณผลผลิต อ้อย มันสำปะหลัง และ กากน้ำตาล มีดังนี้

- ปี 2555 อ้อยมีปริมาณผลผลิต = 97,979,700 ตัน (ข้อมูลจากตารางที่ 3.1)
- ปี 2555 มันสำปะหลังมีปริมาณผลผลิต = 26,601,100 ตัน (ข้อมูลจากตารางที่ 3.2)
- ปี 2555 กากน้ำตาลมีปริมาณผลผลิต = 4,389,600 ตัน (ข้อมูลรายงานการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศประจำปีการผลิต 2554/55 ดังแสดงในภาคผนวก ง.)

### 2. ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้สูงสุด ที่ผลิตจากอ้อย

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอ้อยสูงสุด} &= 97,979,700 \text{ ตัน} \\ \text{ดังนั้นผลิตเอทานอลได้} &= 97,979,700 \times 70 \\ &= 6,858,579,000 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

### 3. ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้สูงสุด ที่ผลิตจากมันสำปะหลัง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอ้อยสูงสุด} &= 26,601,100 \text{ ตัน} \\ \text{ดังนั้นผลิตเอทานอลได้} &= 26,601,100 \times 180 \\ &= 4,788,198,000 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

### 4. ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้สูงสุด ที่ผลิตจากกากน้ำตาล

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอ้อยสูงสุด} &= 4,389,600 \text{ ตัน} \\ \text{ดังนั้นผลิตเอทานอลได้} &= 4,389,600 \times 260 \\ &= 1,141,296,000 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

# ภาคผนวก ฉ

รายการคำนวณปริมาณการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลโรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพมหานคร 19 แห่ง

WWTP	Operation system	Capacity[43] m <sup>3</sup> /day	Cover area km <sup>2</sup>	Population persons	Operation cost[43] bath/m <sup>3</sup>	Solid end product dry ton/day <sup>1</sup>
Rama 9	Areated lagoon	86,400		2,000	0.23	22.82
		260,000			0.02	68.68
	Chemical Precipitation	979			12.92	0.26
Thung Song Hong 1	Activated sludge	3,000		15,000	7.70	0.79
Thung Song Hong 2	Activated sludge	1,100		5,500	8.39	0.29
Bangbua	Oxidation ditch activated sludge	1,200		8,000	11.07	0.32
Ramindra	Extended activated sludge	600		4,060	8.44	0.16
Huai Khwang	Conventional activated sludge	1,400		16,800	6.83	0.37
Tha Sai	Activated sludge	1,486		7,095	5.01	0.39
Bangna	Oxidation ditch activated sludge	1,156		8,280	6.01	0.31
Bonkai	Extended activated sludge	350		2,200	15.05	0.09
Khlong Toei	Completely mixed activated sludge	635		7,200	13.76	0.17
Khlong Chan	Activated sludge	1,925		36,000	5.17	0.51
Huamark	Stabilization pond	1,145		2,940	8.57	0.30
Rom Klao	Extended activated sludge	2,461		19,000	4.26	0.65
Si Phraya	Contract stabilization activated sludge	15,275	2.70	120,000	3.13	4.04

ตารางที่ ๑.1 (ต่อ)

WWTP	Operation system	Capacity[43]	Cover area	Population	Operation cost[43]	Solid end product
		m <sup>3</sup> /day	km <sup>2</sup>	persons	bath/m <sup>3</sup>	dry ton/day <sup>1</sup>
Rattanakosin	Two-stage activated sludge	25,506	4.10	76,000	2.14	6.74
Din Daeng	Activated sludge with nutrients removal	204,414	37.00	1,080,000	2.45	54.00
Chong Nonsi	Cyclic activated sludge system	169,336	28.50	580,000	1.06	44.73
Nong Khaem	Vertical loop reactor activated sludge	122,972	44.00	418,000	1.34	32.49
Thung Khru	Vertical loop reactor activated sludge	58,166	42.00	177,000	1.58	15.37
Chatuchak	Cyclic activated sludge system	137,985	33.40	432,500	1.87	36.45
รวม		1,097,491		3,015,575		198.16

<sup>1</sup>น้ำเสียประมาณ  $264.17 \times 10^{-6}$  ม<sup>3</sup> ให้กากตะกอนน้ำเสีย 1 ตัน (น้ำเสียเฉลี่ย 1.4 ล้านลูกบาศก์เมตร ให้กากตะกอน 1,125 ตันเปียก คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของของแข็งน้ำในน้ำเสียเท่ากับ 27.2%) [45]

ตารางที่ ๑.๑ ข้อมูลโรงบำบัดตารางที่ ๑.๑ (ต่อ)

WWTP	Biogas m <sup>3</sup> /day	Residule dry ton/day	Fertilizer dry ton/day	Heat BTU/day	Volatile Solids dry ton/day
Rama 9	8435.86	8.22	20.54	3,423,643	18.26
	25385.68	24.73	61.82	10,302,630	54.95
	95.59	0.09	0.23	38,793	0.21
Thung Song Hong 1	292.91	0.29	0.71	118,877	0.63
Thung Song Hong 2	107.40	0.10	0.26	43,588	0.23
Bangbua	117.16	0.11	0.29	47,551	0.25
Ramindra	58.58	0.06	0.14	23,775	0.13
Huai Khwang	136.69	0.13	0.33	55,476	0.30
Tha Sai	145.09	0.14	0.35	58,883	0.31
Bangna	112.87	0.11	0.27	45,807	0.24
Bonkai	34.17	0.03	0.08	13,869	0.07
Khlong Toei	62.00	0.06	0.15	25,162	0.13
Khlong Chan	187.95	0.18	0.46	76,279	0.41
Huamark	111.79	0.11	0.27	45,371	0.24
Rom Klao	240.29	0.23	0.59	97,518	0.52
Si Phraya	1491.41	1.45	3.63	605,280	3.23



ตารางที่ ๑.2 ข้อมูลผลการคำนวณปริมาณตะกอน Benefit และ CDE โรงบำบัดน้ำเสียในกรุงเทพมหานคร 19 แห่ง

WWTP	Solid end product dry ton/day	Solid Qty min dry ton/day	Solid Qty max dry ton/day	Distance <sup>1</sup> km	Power used kWh/d	Max Benefit Baht/day	Min CDE Ton/day
1 Thung Song Hong 1	0.79	0.63	0.95	12.00	5,670	- 512,126.68	142.897
2 Thung Song Hong 2	0.29	0.23	0.35	13.20	2,079	- 518,126.97	143.239
3 Bangbua	0.32	0.25	0.38	6.00	2,268	- 517,826.96	143.222
4 Ramindra	0.16	0.13	0.19	9.60	1,134	- 519,640.76	143.325
5 Huai Khwang	0.37	0.30	0.44	19.80	2,646	- 517,097.50	143.18
6 Tha Sai	0.39	0.31	0.47	16.80	2,809	- 516,926.92	143.17
7 Bangna	0.31	0.24	0.37	14.40	2,185	- 517,970.11	143.23
8 Bonkai	0.09	0.07	0.11	26.40	662	- 520,527.09	143.375
9 Khlong Toei	0.17	0.13	0.20	19.20	1,200	- 519,627.05	143.324
10 Khlong Chan	0.51	0.41	0.61	12.00	3,638	- 515,440.56	143.086
11 Huamark	0.30	0.24	0.36	12.00	2,164	- 517,983.83	143.231
12 Rom Klao	0.65	0.52	0.78	9.00	4,651	- 513,783.62	142.992
13 Si Phraya	4.04	3.23	4.84	22.80	28,870	- 473,138.50	140.679
14 Rattanakosin	6.74	5.39	8.09	30.00	48,206	- 440,723.20	138.834
15 Din Daeng	54.00	43.20	64.80	24.00	386,342	126,447.59	106.555
16 Chong Nonsi	44.73	35.79	53.68	27.60	320,045	15,285.31	112.881
17 Nong Khaem	32.49	25.99	38.98	4.80	232,417	- 131,721.85	121.248
18 Thung Khru	15.37	12.29	18.44	22.80	109,934	- 337,218.16	132.943
19 Chatuchak	36.45	29.16	43.74	21.00	260,792	- 84,162.68	118.541
Total	198.16	158.53	237.79	323.40	1,417,712	1,856,475.06	8.095
เฉลี่ย				17.02			

<sup>1</sup> วัดระยะทางจาก Google Map

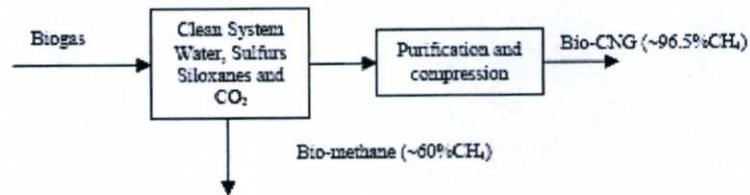
# ภาคผนวก ช

พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการบริหารจัดการน้ำเสีย

## พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองการบริหารจัดการน้ำเสีย

### 1. การคำนวณ Bio-methane และ Bio-CNG จาก ไบโogas

ขบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ โดยเฉพาะ จากการฝังกลบขยะ น้ำเสียและน้ำทิ้ง จะทำให้เกิดไบโogas ซึ่งมีก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก ก๊าซมีเทน ที่ได้จากขบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะเรียกว่า ก๊าซมีเทนชีวภาพ (Bio-methane) Bio-methane สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้เหมือนกับก๊าซธรรมชาติ โดยการใช้ที่ไซต์งาน ในรูปของพลังงานความร้อน หรือนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า หรือนำออกไปใช้นอกไซต์ โดยการขนส่งทางท่อก๊าซธรรมชาติ หรือขนส่งทางรถบรรทุกใน 2 รูปแบบคือ ในรูปของก๊าซซีเอ็นจี (Compressed Natural Gas, CNG) และในรูปของก๊าซธรรมชาติเหลว (Liquefied Natural Gas, LNG) [74]



รูปที่ ข1. ส่วนประกอบของ Bio-methane และ Bio-CNG ใน ไบโogas [67]

### 2. การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (CDE Emissions) จากการใช้กระแสไฟฟ้า

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (CDE Emissions) จากการใช้กระแสไฟฟ้าดังนี้

Emission factors สำหรับ Washington, DC [69]	1,095.53	lbs CO <sub>2</sub> /MWh
	0.028	lbs CH <sub>4</sub> /MWh
	0.017	lbs N <sub>2</sub> O/MWh

CDE Emission Factors จากกระแสไฟฟ้า ถูกคำนวณโดยการพิจารณาจากน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละสารประกอบดังนี้

$$1095.53 + 0.028 \times 21 + 0.017 \times 310 = 1,101.388 \text{ lbs CDE/MWh}$$

$$= 0.00055 \text{ t CDE/kWh}$$

ค่านี้ใช้สำหรับพารามิเตอร์  $f_{CO_2}^{Elec}$

### 3. การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูล (CDE Emissions/Offsets) จากการใช้ขบวนการฝังกลบ

$$CO_2 \text{ Emissions จากการขนส่ง [70]} f_{CO_2}^{Transport} = 0.2 \text{ t CDE/dt ของปริมาณตะกอน}$$

CO<sub>2</sub> ที่ชดเชยได้ (Offsets) จากการใช้ ตะกอนน้ำเสียมาผลิตปุ๋ย [70] $f_{CO_2}^{Fertilizer}$

= 0.1 t CDE/dt ของปริมาณตะกอน

4. การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สมมูลจากการใช้ Bio-methane  
ในรูปของก๊าซธรรมชาติ

CO<sub>2</sub> Emissions จาก Natural Gas $f_{CO_2}^{NG}$  = 53.06 kg CDE/mmBTU

= 0.000056 t CDE/cf

ประวัติผู้เขียน

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายแหลมทอง เหล่าคงถาวร
วัน เดือน ปีเกิด	16 เมษายน 2515 ที่จังหวัดนครราชสีมา
ที่อยู่	333/10 ม.อนาวิลส์ ซ.1 ถ.ฉลองกรุง ลำปลาทิว ลาดกระบัง จ.กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	2536 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมการก่อสร้าง (เกียรตินิยม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง 2540 Construction Engineering and Management (Royal Thai Government Scholarship) Asian Institute of Technology (AIT) Bangkok, Thailand
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2536	บริษัท เพ็นทากอนวิศวกรรม ตำแหน่ง วิศวกรโยธา
พ.ศ. 2538-ปัจจุบัน	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ตำแหน่ง: อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา
พ.ศ.2541-ปัจจุบัน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่ง:อาจารย์ สอนหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) และหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการก่อสร้างและการจัดการ)
พ.ศ. 2541-พ.ศ.2549	สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ตำแหน่ง : หัวหน้าศูนย์ทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธา
พ.ศ.2554-2557	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่ง : อาจารย์พิเศษ วิชา Project Evaluation and Project Feasibility Analysis หลักสูตรบริหารธุรกิจอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต คณะวิทยาลัยการ บริหารและการจัดการ
พ.ศ.2553	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่ง: ผู้ช่วย คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.2553-2558	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่ง: รอง คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.2555-2557	สภาวิศวกร ตำแหน่ง : ผู้ชำนาญการพิเศษเพื่อทดสอบความรู้ความชำนาญ การประกอบวิชาชีพระดับสามัญวิศวกร สาขาวิศวกรรมโยธา
พ.ศ.2555-ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (วิทยาเขตอุเทนถวาย) ตำแหน่ง : อาจารย์พิเศษ วิชา Construction Engineering and Management, วิชา Construction Productivity และ วิชา Construction Risk Management สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
พ.ศ.2555	วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) ตำแหน่ง : คณะทำงานมาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้าง

พ.ศ.2558-2559

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่ง: ผู้ช่วย  
อธิการบดี

พ.ศ.2559-ปัจจุบัน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตำแหน่ง: รอง  
อธิการบดี