

การประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

นายฉัตรบดินทร์ นาคศรีสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEPENDABLE CAPACITY EVALUATION OF RENEWABLE ENERGY  
GENERATION SYSTEM

Mr. Chatbordin Naksrisuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2012  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้า  
พลังงานหมุนเวียน

โดย

นายฉัตรบดินทร์ นาคศรีสุข

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.สมภาพ อัชฌวมงคล)

ฉัตรบดินทร์ นาคศรีสุข : การประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน. (DEPENDABLE CAPACITY EVALUATION OF RENEWABLE ENERGY GENERATION SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี, 97 หน้า.

การใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้าถือเป็นทางเลือกหนึ่งของการแก้ปัญหาสถานะโลกร้อนและการขาดแคลนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ในการผลิตไฟฟ้า ผลกระทบที่เกิดตามมาจากการพึ่งพาการผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนบางประเภท เช่น พลังงานลมหรือพลังงานแสงอาทิตย์ ก็คือระบบไฟฟ้าโดยรวมของประเทศอาจมีความเชื่อถือได้ต่ำลงเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าประเภทดังกล่าวมีความสามารถในการพึ่งพาได้ต่ำอันมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนของแหล่งผลิตธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้และมีความไม่แน่นอน ในปัจจุบัน ยังไม่มีวิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามจากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ระบุค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ พลังงานขยะชุมชน และพลังงานน้ำขนาดเล็ก เท่ากับ 21%, 2%, 36%, 0%, 36% และ 36% ตามลำดับ ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นค่าที่ต่ำเกินจริง ดังนั้นการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้ชัดเจนและมีหลักวิชาการประกอบวิธีการประเมินจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

การประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแบบจำลองเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียน แบบจำลองสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยที่แบบจำลองเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีความไม่แน่นอนแฝงอยู่ด้วย จากนั้นจึงนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าสู่วิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ โดยอาศัยการพิจารณาจากระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งวัดจากโอกาสของการเกิดไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้า (Loss of Load Probability; LOLP)

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

# # 5470152021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : RENEWABLE ENERGY / DEPENDABLE CAPACITY / UNCERTAINTY / UNAVAILABILITY / RELIABILITY INDICES

CHATBORDIN NAKSRISUK: DEPENDABLE CAPACITY EVALUATION OF RENEWABLE ENERGY GENERATION SYSTEM. ADVISOR: ASST. PROF. KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 97 pp.

Integration of renewable energy sources, such as wind energy and solar energy, into the generation system can enhance country's energy security. These alternative energy help diversify sources of primary energy used to produce electricity. However, the disadvantage of using these types of renewable energy generation system is that it might reduce power system reliability because these intermittent renewable energy sources have low dependable capacity. Currently, there is neither standard nor reasonable methodology to evaluate the dependable capacity, especially for the renewable energy power plant. However, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) defined the dependable capacity of the solar PV, wind, biomass, biogas, municipal solid waste (MSW), and small hydro generation system in Thailand as 21%, 2%, 36%, 0%, 36%, and 36%, respectively. The values defined by EGAT are considered as too much low. Thus, more reasonable method to recalculate the dependable capacity for the renewable energy power plant in Thailand is needed.

The purpose of this thesis is to propose a novel method to evaluate the dependable capacity of the renewable energy generation system. The proposed method takes uncertainties due to intermittent renewable energy and unavailability of their corresponding generators into consideration. Additionally, load uncertainty is also taken into account. The dependable capacity of renewable energy generation system is determined from the principle of generation system reliability evaluation. The reliability index such as Loss of Load Probability (LOLP) will be used as a key indicator to define the dependable capacity of renewable energy generation.

Department: Electrical Engineering Student's Signature.....

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year: 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุตมวงศ์เสรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนนบุญ หุนเจริญ และ ดร. สมภพ อัมภมมงคล ที่ได้เสียเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ มีอุปการคุณทุกท่านที่ได้ ช่วยตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาดในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุเคราะห์ทุนโครงการศิษย์ก้นกุฏิเป็นทุนการศึกษาในการเรียนระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 แนวคิดของกำลังผลิตพึงได้.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	6
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม.....	6
2.1.1 แบบจำลองความเร็วลม.....	6
2.1.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม.....	9
2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	11
2.2.1 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม.....	11
2.2.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	16
2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก.....	19
2.3.1 แบบจำลองอัตราการไหลของน้ำ.....	21
2.3.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก.....	21
2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ.....	23
2.4.1 แบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ.....	24
2.4.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ.....	28
2.4.2.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล.....	28
2.4.2.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	30
2.4.2.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะ.....	33
บทที่ 3 การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังและหลักการประเมินกำลังผลิตพึงได้ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน.....	36
3.1 การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	36
3.1.1 แบบจำลองสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	37

	หน้า
3.1.2 แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	40
3.1.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า.....	40
3.2 หลักการประเมินกำลังผลิตที่ทำได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	41
บทที่ 4 การทดสอบ.....	45
4.1 ระบบทดสอบ.....	45
4.1.1 ระบบทดสอบอ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573.....	45
4.1.1.1 ระบบผลิตไฟฟ้า.....	46
4.1.1.2 ความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	46
4.2 สมมติฐานและวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
4.2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
4.2.2 วิธีการที่ใช้ในการทดสอบ.....	47
4.2.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง.....	48
4.3 ผลการทดสอบ.....	49
4.3.1 ผลการจำลองพลังงานหมุนเวียน.....	50
4.3.2 ผลการจำลองเทคโนโลยีในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้า.....	52
4.3.3 ผลการจำลองลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน หมุนเวียน.....	55
4.3.4 ผลการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	58
4.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ.....	63
บทที่ 5 สรุป.....	66
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	67
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก.....	72
ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค.....	82
ภาคผนวก ง.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความต้องการเชื้อเพลิงตามแผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียน 25% ใน 10 ปี.....	24
ตารางที่ 2.2 ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย.....	25
ตารางที่ 2.3 ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต่างๆ.....	26
ตารางที่ 2.4 ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากขยะเทศบาลต่างๆทั่วประเทศไทย.....	27
ตารางที่ 2.5 ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพที่เทียบกับสัดส่วนมีเทน.....	31
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดข้อมูลโรงไฟฟ้าอ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย.....	46
ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม.....	59
ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	59
ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก.....	60
ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล.....	61
ตารางที่ 4.6 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	62
ตารางที่ 4.7 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน.....	62
ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	64
ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้เฉลี่ยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	65
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้า อ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573.....	73
ตารางที่ ค.1 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือน ในปี พ.ศ.2548 ที่บริเวณแหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต.....	83
ตารางที่ ค.2 ระดับความเร็วลมในการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลมรุ่น DeWind D6-1250.....	83
ตารางที่ ค.3 ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงตามฤดูกาล.....	84
ตารางที่ ค.4 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงตามฤดูกาล ปี พ.ศ.2550 จ.เชียงใหม่.....	85
ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงตามฤดูกาล ปี พ.ศ.2550 จ.เชียงใหม่.....	85
ตารางที่ ค.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง เมื่อหาด้วยวิธี MLE.....	86
ตารางที่ ค.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมง เมื่อหาด้วยวิธี MLE.....	86
ตารางที่ ค.8 คุณสมบัติเครื่องกังหันน้ำในโครงการไฟฟ้าพลังน้ำห้วยคัง จ.เชียงใหม่.....	87
ตารางที่ ค.9 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโครงการไฟฟ้าพลังน้ำห้วยคัง จ.เชียงใหม่.....	87
ตารางที่ ง.1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตาม IEEE Reliability Test System.....	89
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทดสอบ.....	90

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 แนวคิดของวิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน .....	5
ภาพที่ 2.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม.....	9
ภาพที่ 2.2 ระดับความเร็วลมกับกำลังผลิตจากกังหันลม .....	10
ภาพที่ 2.3 ฟังก์ชันการกระจายสะสมและการแจกแจงตามขอบระหว่างตัวแปรสุ่ม X และ Y ที่มีรูปแบบ Frank Copula .....	13
ภาพที่ 2.4 ฟังก์ชันการกระจายสะสมและการแจกแจงตามขอบระหว่างตัวแปรสุ่ม X และ Y ที่มีรูปแบบ Gumbel Copula .....	14
ภาพที่ 2.5 ฟังก์ชันการกระจายสะสมและการแจกแจงตามขอบระหว่างตัวแปรสุ่ม X และ Y ที่มีรูปแบบ Clayton Copula.....	14
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการแจกแจงสะสมร่วมของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม.....	16
ภาพที่ 2.7 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	17
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร กับ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์.....	17
ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม.....	18
ภาพที่ 2.10 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี .....	20
ภาพที่ 2.11 โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ.....	20
ภาพที่ 2.12 แบบจำลองความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของน้ำ .....	21
ภาพที่ 2.13 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ.....	22
ภาพที่ 2.14 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล .....	24
ภาพที่ 2.15 ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวมวล.....	27
ภาพที่ 2.16 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลโดยใช้กระบวนการความร้อน .....	29
ภาพที่ 2.17 แบบจำลองความไม่แน่นอนของสถานะการทำงานของส่วนแปลงพลังงาน ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล .....	29
ภาพที่ 2.18 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	31
ภาพที่ 2.19 ความสามารถในการแปลงเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพ.....	32
ภาพที่ 2.20 แบบจำลองความไม่แน่นอนของสถานะการทำงานของส่วนแปลงพลังงาน ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ.....	32
ภาพที่ 2.21 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน .....	34
ภาพที่ 2.22 สัดส่วนของขยะที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ต่อปริมาณขยะทั้งหมดที่สามารถจัดหาได้.....	34
ภาพที่ 3.1 ประเภทของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	36
ภาพที่ 3.2 การแบ่งระดับชั้นในการศึกษาความเชื่อถือได้ .....	37
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า.....	37

ภาพที่ 3.4	แบบจำลอง 2 สถานะ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	38
ภาพที่ 3.5	ลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	38
ภาพที่ 3.6	สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดจากการสุ่มตามช่วงเวลา.....	39
ภาพที่ 3.7	แบบจำลองความไม่แน่นอนของความต้องการใช้ไฟฟ้า.....	40
ภาพที่ 3.8	การประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนโดยอาศัยดัชนี ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า.....	41
ภาพที่ 3.9	ค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	42
ภาพที่ 3.10	แผนผังขั้นตอนการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน.....	43
ภาพที่ 4.1	ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดรายชั่วโมง ปี พ.ศ.2555.....	47
ภาพที่ 4.2	ตัวอย่างลักษณะความเร็วลมรายชั่วโมงในรอบ 1 วัน.....	51
ภาพที่ 4.3	ตัวอย่างลักษณะความเข้มแสงอาทิตย์รายชั่วโมง ณ ช่วงเวลา 7.00 น.-18.00 น.....	51
ภาพที่ 4.4	ตัวอย่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายชั่วโมงในรอบ 1 วัน ณ ช่วงเวลา 7.00 น.-18.00 น.....	51
ภาพที่ 4.5	ตัวอย่างลักษณะอัตราการไหลของน้ำรายวันในรอบ 1 เดือน.....	52
ภาพที่ 4.6	ตัวอย่างลักษณะความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพรายเดือนในรอบ 1 ปี.....	52
ภาพที่ 4.7	ระดับความเร็วลมกับช่วงการทำงานของกังหันลม.....	53
ภาพที่ 4.8	ความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพในการเผาไหม้.....	54
ภาพที่ 4.9	ลักษณะสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพรายวันในรอบ 1 เดือน.....	54
ภาพที่ 4.10	ลักษณะสัดส่วนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) รายวันในรอบ 1 เดือน.....	54
ภาพที่ 4.11	สถานะการทำงานของกังหันน้ำรายวันในรอบ 1 เดือน.....	55
ภาพที่ 4.12	สถานะการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซรายวันในรอบ 1 เดือน.....	55
ภาพที่ 4.13	ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมรายชั่วโมง ในรอบ 1 วัน.....	56
ภาพที่ 4.14	ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายชั่วโมง ในรอบ 1 วัน.....	57
ภาพที่ 4.15	ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กรายวัน ในรอบ 1 เดือน.....	57
ภาพที่ 4.16	ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลรายวัน ในรอบ 1 เดือน.....	57
ภาพที่ 4.17	ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพรายวัน ในรอบ 1 เดือน.....	58
ภาพที่ 4.18	ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะรายวัน ในรอบ 1 เดือน.....	58
ภาพที่ ข.1	ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดรายชั่วโมงที่ ณ ปี พ.ศ.2554.....	81

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษา ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และแนวคิดของกำลังผลิตฟิวด์

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากปัญหาด้านการขาดแคลนเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ เช่น น้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติสำหรับผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นทุกปีประกอบกับการตระหนักถึงปัญหาภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ในการผลิตไฟฟ้า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจมากขึ้นเพื่อนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนยังถือเป็นการเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานของประเทศไทยด้วยโดยจะช่วยกระจายความเสี่ยงจากการพึ่งพาเชื้อเพลิงหลักเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตไฟฟ้า โดยเฉพาะก๊าซธรรมชาติซึ่งถือว่าเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยและมีมูลค่าการนำเข้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

จากข้อมูลตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 – 2564) หรือ Alternative Energy Development Plan: AEDP (2012-2021) โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจะถูกนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถแยกเป็นพลังงานทดแทนเพื่อการผลิตไฟฟ้า 6 ประเภท ดังนี้

1. พลังงานแสงอาทิตย์ เป้าหมายในปี 2564 คือ 2,000 เมกะวัตต์
2. พลังงานลม เป้าหมายในปี 2564 คือ 1,200 เมกะวัตต์
3. ไฟฟ้าพลังน้ำ (ไม่รวมระบบสูบกลับที่มีอยู่ปัจจุบันของ กฟผ. คือ ลำตะคอง 1-2 500 เมกะวัตต์) เป้าหมายในปี 2564 คือ 1,608 เมกะวัตต์
4. พลังงานจากขยะ เป้าหมายในปี 2564 คือ 160 เมกะวัตต์
5. ชีวมวล เป้าหมายในปี 2564 คือ 3,630 เมกะวัตต์
6. ก๊าซชีวภาพ เป้าหมายในปี 2564 คือ 600 เมกะวัตต์

จากข้อมูลข้างต้น จะพบว่า พลังงานหมุนเวียนมีแนวโน้มจะถูกใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบมากขึ้น ดังนั้น ผลกระทบที่เกิดตามมาจากการพึ่งพาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนบางประเภท เช่น พลังงานลมหรือพลังงานแสงอาทิตย์ คือ ระบบไฟฟ้าโดยรวมของประเทศอาจมีความเชื่อถือได้ต่ำลงเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าประเภทดังกล่าวมีความสามารถในการพึ่งพาได้ต่ำอันมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนของแหล่งผลิตธรรมชาติที่ไม่สามารถควบคุมได้และความไม่แน่นอนสูง

ในปัจจุบัน ยังไม่มีวิธีการประเมินค่ากำลังผลิตฟิวด์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่เป็นมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ใ้ระบุค่า

กำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน 6 ประเภท ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซชีวภาพ พลังงานขยะ และพลังงานน้ำขนาดเล็ก เท่ากับ 21%, 2%, 36%, 0%, 36% และ 36% ตามลำดับ [1] ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นค่าที่ต่ำมาก ดังนั้นการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนให้ชัดเจนและมีความถูกต้องตามหลักวิชาการจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการส่งเสริมระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในประเทศไทย

## 1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อนำเสนอแนวทางการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทั้ง 6 ประเภท ที่มีความเหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชาการ ได้แก่

- (1) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
- (2) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- (3) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก
- (4) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล
- (5) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ
- (6) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน

2) เพื่อนำเสนอองค์ประกอบที่มีผลต่อการกำหนดค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเพื่อนำไปใช้อ้างอิงในการกำหนดนโยบายด้านพลังงานหมุนเวียน และใช้อ้างอิงในการจัดทำแผนจัดหากำลังไฟฟ้าของประเทศ

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) วิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โดยแบ่งตามประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า 4 ชนิด ได้แก่

- (1) พลังงานลม
- (2) พลังงานแสงอาทิตย์
- (3) พลังงานน้ำขนาดเล็ก
- (4) พลังงานชีวภาพ (ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและขยะ)

2) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองความไม่แน่นอน โดยแยกตามประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า

- 3) พิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในสภาวะอยู่ตัว
- 4) พิจารณาเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าเท่านั้น ไม่คำนึงถึงระบบส่งและระบบจำหน่าย
- 5) พิจารณาสภาวะการทำงานของอุปกรณ์เป็นแบบสองสถานะ
- 6) ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยตามแผนพัฒนา

กำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 (PDP2010)

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

- 1) รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเพลิงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภท
- 2) ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองความไม่แน่นอนของเชิงเพลิงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภท
- 3) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โดยแยกตามประเภทเชิงเพลิง
- 4) ศึกษาแบบจำลองความไม่แน่นอนของความต้องการไฟฟ้า
- 5) ศึกษาแบบจำลองสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 6) ศึกษาทฤษฎีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้
- 7) พัฒนาโปรแกรมเพื่อประเมินค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน
- 8) ทดสอบโปรแกรมดังกล่าวกับระบบทดสอบ
- 9) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) วิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน
- 2) ค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเพื่อนำไปใช้อ้างอิงในการกำหนดนโยบายด้านพลังงานหมุนเวียน และใช้อ้างอิงในการจัดทำแผนจัดหาพลังงานไฟฟ้าของประเทศ

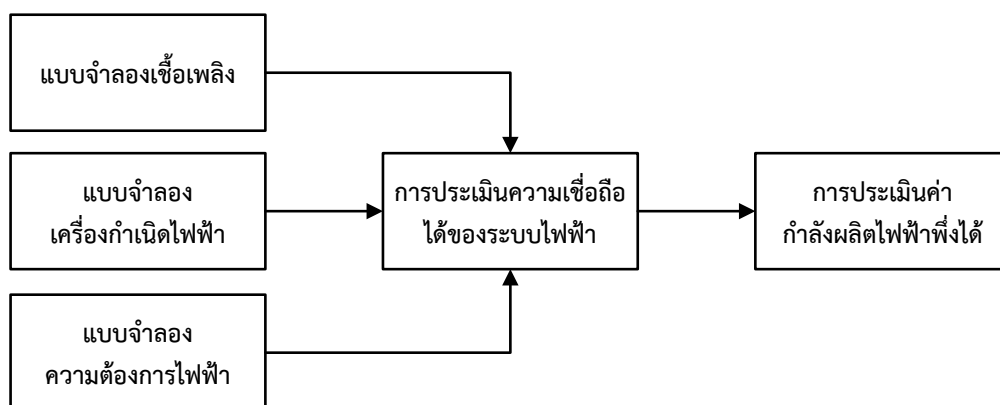
## 1.6 แนวคิดของกำลังผลิตที่พึ่งได้

กำลังผลิตที่พึ่งได้ (Dependable Capacity) ของโรงไฟฟ้ามีความหมายโดยทั่วไป คือ กำลังไฟฟ้าขั้นต่ำที่คาดว่าจะระบบไฟฟ้าที่สนใจจะสามารถผลิตได้ในช่วงระยะเวลาที่กำหนดซึ่งอาจจะ เป็นช่วงเวลาที่มีระบบมีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด เป็นต้น โดยจะพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จริงของโรงไฟฟ้าแต่ละโรง เนื่องจากโรงไฟฟ้าแต่ละโรงไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เต็มกำลังผลิต ติดต่อกันอย่างต่อเนื่องทำให้กำลังผลิตที่พึ่งได้ของโรงไฟฟ้าจะต่ำกว่ากำลังผลิตติดตั้ง (Installed Capacity) ตามประเภทของโรงไฟฟ้าเสมอ เช่น โรงไฟฟ้าพลังน้ำมีกำลังผลิตที่สามารถจ่ายได้ขึ้นกับ ปริมาณน้ำที่มีในแต่ละเดือน [2] เป็นต้น ซึ่งการนิยามและการกำหนดค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ในลักษณะ ดังกล่าว จะเป็นการนิยามโดยอาศัยพื้นฐานของข้อมูลอุปกรณ์และข้อมูลระบบที่เก็บบันทึกไว้เท่านั้น หรือ เรียกว่า Deterministic data

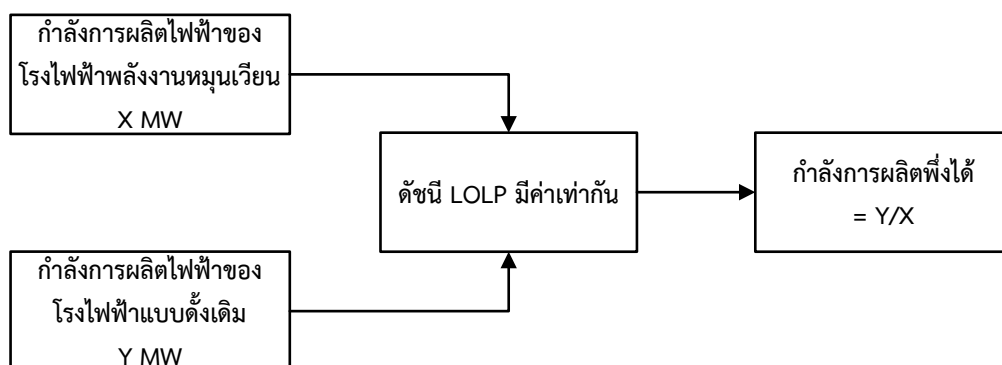
งานวิจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหรือการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิต ไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้นสามารถพิจารณาได้จากบทความเรื่อง “Comparing Capacity Value Estimation Techniques for Photovoltaic Solar Power” [27] ซึ่งเป็นบทความที่ศึกษาถึงวิธีการ คำนวณค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลัง

ผลิตฟิ่งได้เมื่อมีการปรับการจัดเรียงอาเรย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ บทความเรื่อง “Coordinating Wind and Hydro Generation to Increase the Effective Load Carrying Capability” [28] จะเป็นอีกหนึ่งบทความที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการคำนวณค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานลมและพลังงานน้ำ โดยประเมินจากปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานลมและพลังงานน้ำเข้าไปในระบบไฟฟ้า และ บทความเรื่อง “A review of different methodologies used for calculation of wind power capacity credit” [29] เป็นบทความที่ศึกษาและเปรียบเทียบค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม โดยประเมินค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ด้วยวิธีต่างๆ

กำลังผลิตฟิ่งได้ของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนิยามจากพื้นฐานของความน่าจะเป็นโดยใช้ข้อมูลของตัวแปรสุ่มหรือ Stochastic data ในการจำลองพฤติกรรมหรือสร้างแบบจำลองความน่าจะเป็นต่างๆ โดยการประเมินค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแบบจำลองของเชื้อเพลิงสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน เช่น ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแบบจำลองความต้องการไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดนี้ล้วนแล้วแต่มีความไม่แน่นอนแฝงอยู่ด้วย จากนั้นจึงนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าสู่วิธีการประเมินค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ โดยอาศัยการพิจารณาจากระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งวัดจากโอกาสของการเกิดไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้า (Loss of Load Probability; LOLP) ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนต่ออยู่ กับระบบไฟฟ้าที่มี เฉพาะโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์แบบดั้งเดิมต่ออยู่ โดยกำลังการผลิตฟิ่งได้ของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจะถูกกำหนดให้เท่ากับขนาดของโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าทั้งสองมีความเชื่อถือได้ซึ่งวัดจากโอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับเท่ากัน หลักการดังกล่าวสามารถแสดงดังภาพที่ 1.1



(ก) การประเมินค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่พิจารณาจากการเปรียบเทียบระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า



(ข) การเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าที่มีเฉพาะโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์แบบดั้งเดิมต่ออยู่

ภาพที่ 1.1 แนวคิดของวิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่ได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทั้ง 6 ประเภท ได้แก่

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 3) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก
- 4) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล
- 5) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ
- 6) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทย่อมจะมีลักษณะการผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของพลังงานหมุนเวียนและเทคโนโลยีที่ใช้ในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้า ดังนั้นในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทจึงมีองค์ประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วน ดังนี้

- 1) แบบจำลองพลังงานหมุนเวียน
- 2) แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้า

#### 2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเป็นการใช้ประโยชน์จากลมที่พัดผ่านตามพื้นที่ต่างๆซึ่งมีความเร็วแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศนั้น โดยปกติแล้วลมมีความเร็วที่ไม่แน่นอน ดังนั้นในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมจึงแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองความเร็วลมและแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ดังนี้

##### 2.1.1 แบบจำลองความเร็วลม

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างแบบจำลองความเร็วลม ( $v_{k,t}$ ) โดยแบ่งความเร็วลมออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง ( $v_{trend,k}$ ) ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลและส่วนที่ 2 คือความไม่แน่นอนของความเร็วลม ( $v_{noise,t}$ ) ซึ่งส่วนนี้จะเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในช่วงเวลาสั้นๆรอบความเร็วลมในส่วนแรก [3] ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$v_{k,t} = v_{trend,k} + v_{noise,t} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ (2.1) กำหนดให้  $v_{trend,k}$  มีค่าคงที่ในแต่ละชั่วโมงซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละฤดูกาลและค่า  $v_{noise,t}$  เป็นค่าที่เกิดจากกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Process) จากนั้นจึงใช้ Ito's Lemma ซึ่งเป็นทฤษฎีที่สามารถใช้หาอนุพันธ์ของฟังก์ชันในกระบวนการเชิงสุ่มได้กับสมการที่ (2.1) เพื่อหาค่าความเร็วมของช่วงเวลาที่น่าสนใจ

Ito's Lemma เป็นกฎที่ใช้สำหรับแคลคูลัสของกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Process) โดยจะใช้เพื่อหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่เราสนใจได้ โดยกำหนดให้กระบวนการเชิงสุ่ม ( $x_t$ ) มีค่าขึ้นกับเวลาและความไม่แน่นอนที่อธิบายได้ด้วยกระบวนการวีเนอร์ (Weiner Process;  $W_t$ ) ดังสมการอนุพันธ์เชิงสุ่ม (Stochastic differential equation - SDE) ต่อไปนี้

$$dx = a(x, t)dt + b(x, t)dW_t \quad (2.2)$$

เมื่อให้  $f(x, t)$  เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองที่มีค่าต่อเนื่องของ  $x$  และ  $t$  จะได้ว่า

$$df(x, t) \approx \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial t} dx dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} dt^2 \quad (2.3)$$

แทนค่าสมการที่ (2.2) ลงไปในสมการที่ (2.3) จะทำให้สามารถแสดงอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร  $x$  และ  $t$  หรือ  $f(x, t)$  ได้ดังนี้

$$df(x, t) \approx \left( \frac{\partial f}{\partial x} a(x, t) + \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2} b^2(x, t) \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) dt + b(x, t) \frac{\partial f}{\partial x} dW_t \quad (2.4)$$

โดยที่  $f(x, t)$  คือ ฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นกับตัวแปร  $x$  และ  $t$   
 กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ซึ่งอธิบายด้วยการ  
 $W_t$  คือ กระบวนการสุ่มแบบปกติที่มีความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามเวลา  
 $W_t \sim N(0, t)$  นั่นคือ  $W_t = Z\sqrt{t}$

จากสมการที่ (2.2)-(2.4) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (2.1) เพื่อสร้างแบบจำลองความเร็วม โดยสามารถหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$dv_{k,t} = dv_{trend,k} + dv_{noise,t} \quad (2.5)$$

ทั้งนี้เนื่องจาก  $v_{trend,k}$  เป็นค่าคงที่เพราะฉะนั้นพจน์  $dv_{trend,k}$  จึงมีค่าเป็น 0 ส่วน  $dv_{noise,t}$  จะมีค่าตามกระบวนการสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความ

แปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามความเร็วลมและเวลา นั่นคือ  $dv_{noise,t} \sim N(0, \sigma_k^2 v_{k,t}^2 dt)$  สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dv_{noise,t} = 0 + (\sigma_k v_{k,t} \sqrt{dt})Z \quad (2.6)$$

$$dv_{noise,t} = \sigma_k v_{k,t} dW_t \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.5)-(2.7) จะได้ว่า

$$dv_{k,t} = (0)dt + \sigma_k v_{k,t} dW_t \quad (2.8)$$

โดยที่  $dW_t$  คือ กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{dt} Z$   
 $Z$  คือ กระบวนการสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนเท่ากับหนึ่ง นั่นคือ  $Z \sim N(0,1)$

จาก Ito's Lemma ในสมการที่ (2.4) เมื่อ  $a(x,t) = 0$  และ  $b(x,t) = \sigma_k v_{k,t}$  จะสามารถหาอนุพันธ์ของสมการที่ (2.8) ได้ดังนี้

$$df(v_{k,t}, t) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} (\sigma_k v_{k,t})^2 \frac{\partial^2 f}{\partial v_{k,t}^2} dt + \sigma_k v_{k,t} \frac{\partial f}{\partial v_{k,t}} dW_t \quad (2.9)$$

และเมื่อกำหนดให้  $f(v_{k,t}, t) = \ln(v_{k,t})$  จะได้ว่า

$$d \ln(v_{k,t}) = \frac{1}{2} (\sigma_k v_{k,t})^2 \left( \frac{-1}{v_{k,t}^2} \right) dt + (\sigma_k v_{k,t}) \left( \frac{1}{v_{k,t}} \right) dW_t \quad (2.10)$$

$$\int_{v_{k,0}}^{v_{k,t}} d \ln(v_{k,t}) = \int_0^t \left( -\frac{1}{2} \sigma_k^2 dt + \sigma_k dW_t \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{v_{k,t}}{v_{k,0}} = \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_k^2 t + \sigma_k Z \sqrt{t}\right) \quad (2.12)$$

$$v_{k,t} = v_{k,0} \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_k^2 t + \sigma_k Z \sqrt{t}\right) \quad (2.13)$$

และให้  $v_{k,0} = v_{trend,k}$  ของแต่ละชั่วโมงตามฤดูกาล จะได้ว่า

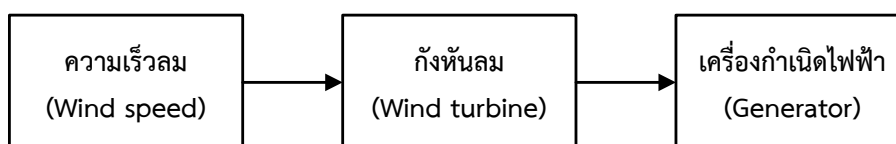
$$v_{k,t} = v_{trend,k} \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_k^2 t + \sigma_k Z \sqrt{t}\right) \quad (2.14)$$

โดยที่  $v_{k,t}$  คือ ความเร็วลม ณ ชั่วโมงที่  $k$  จุดเวลาที่  $t$

$v_{trend,k}$	คือ	ความเร็วลมเฉลี่ยของชั่วโมงที่ $k$ ตามฤดูกาล
$\sigma_k$	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วลม ณ ชั่วโมงที่ $k$ ซึ่งมาจากการประมาณด้วยวิธีความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Least Square Error) จุดเวลาที่พิจารณา เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการสุ่มค่า
$t$	คือ	ความเร็วลมทุก 15 นาที ดังนั้น $t$ จะมีค่าเท่ากับ 1/4, 2/4, 3/4 และ 4/4 ตามลำดับ

## 2.1.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

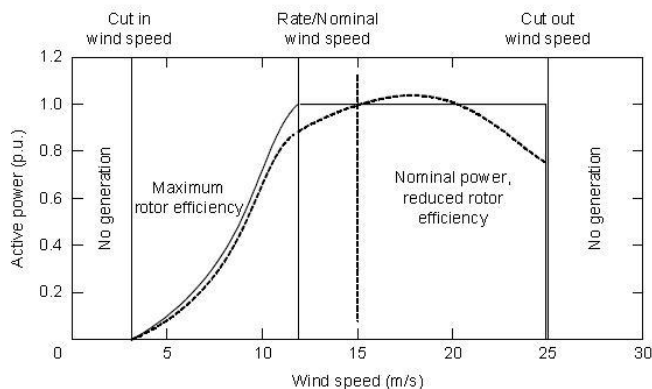
ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมมีหลักการทำงานแสดงดังภาพที่ 2.1 กล่าวคือ เมื่อมีลมพัดผ่านใบพัดของกังหันลม ใบพัดจะทำหน้าที่รับลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล โดยใบพัดจะเชื่อมต่อกับชุดแกนหมุนและเพลาแกนหมุนซึ่งจะเป็นตัวรับแรงจากแกนหมุนใบพัดเพื่อปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงขึ้นกับความเร็วลมเป็นสำคัญ [3], [4]



ภาพที่ 2.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

ระดับความเร็วลมที่พัดผ่านกังหันเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าถูกแบ่งได้เป็น 4 ระดับ มีดังนี้

- 1) ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Wind Speed) คือ ความเร็วลมที่กังหันลมสามารถเริ่มต้นทำงานและผลิตไฟฟ้าได้ โดยปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 2.5-4 เมตรต่อวินาที ซึ่งถ้าความเร็วลมมีค่าน้อยกว่าค่านี้นี้ระบบจะไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้
- 2) ความเร็วลมที่ทำให้กังหันลมทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum rotor efficiency) คือความเร็วลมที่อยู่ในช่วงที่มากกว่าความเร็วเข้าระบบแต่น้อยกว่าความเร็วลมเต็มพิกัด โดยกำลังผลิตที่ได้จากความเร็วลมระดับนี้จะขึ้นกับมุมพิชและอัตราส่วนความเร็วยอด
- 3) ความเร็วลมเต็มพิกัด (Nominal or Rated Wind speed) คือ ความเร็วลมที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้เต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีความเร็วประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที และเป็นระดับความเร็วลมที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง
- 4) ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind speed) คือ ความเร็วลมสูงสุดที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับกังหันลมได้ ระบบจึงต้องหยุดการทำงานที่ความเร็วลมระดับนี้ โดยทั่วไปจะมีค่าตั้งแต่ 25 เมตรต่อวินาที ขึ้นไป



ภาพที่ 2.2 ระดับความเร็วลมกับกำลังผลิตจากกังหันลม

ที่มา: อัญชลี ประภัสสรพิทยา, “การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า”

เนื่องจากในการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้นเป็นการพิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว จึงใช้สมการในการคำนวณกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม [5] ดังสมการที่ (2.15)

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v_{co} < v \\ \left( \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \right) P_r & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (2.15)$$

โดยที่	$P_w$	คือ	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
	$P_r$	คือ	กำลังไฟฟ้าพิกัด (วัตต์)
	$v_{ci}$	คือ	ความเร็วลมเข้าระบบ (เมตรต่อวินาที)
	$v_r$	คือ	ความเร็วลมเต็มพิกัด (เมตรต่อวินาที)
	$v_{co}$	คือ	ความเร็วลมตัดออก (เมตรต่อวินาที)

และสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบได้ดังสมการ

$$P_{e,w} = P_w \times eff_w \quad (2.16)$$

โดยที่	$eff_w$	คือ	ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลัก
--------	---------	-----	--

## 2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้า ดังนั้นในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ จะต้องพิจารณาทั้งความไม่แน่นอนของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กัน และแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

### 2.2.1 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสภาพภูมิอากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วปัจจัยทั้งสองจะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ในวันที่มีความเข้มแสงอาทิตย์มาก อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก็มักจะสูงด้วย เป็นต้น ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจึงไม่เหมาะสมนักที่จะสร้างโดยกำหนดให้ปัจจัยทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน การจำลองสภาวะของทั้งสองปัจจัยดังกล่าวจึงควรสร้างให้มีลักษณะที่มีความสัมพันธ์กันหรือขึ้นต่อกันด้วย แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่แปรตามเวลาจะมีลักษณะคล้ายกันกับแบบจำลองความเร็วลม โดยจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง ( $G_{trend,k}, T_{trend,k}$ ) และส่วนของความไม่แน่นอนของปัจจัยดังกล่าว ( $G_{noise,t}, T_{noise,t}$ ) ซึ่งอธิบายได้ด้วยกระบวนการสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และมีความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามค่าเฉลี่ยของปัจจัยและเวลา โดยสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$G_{k,t} = G_{trend,k} + G_{noise,t} \quad (2.17)$$

$$T_{k,t} = T_{trend,k} + T_{noise,t} \quad (2.18)$$

จากนั้น เมื่อทำการหาอนุพันธ์ของสมการข้างต้นและประยุกต์ใช้ Ito's Lemma เช่นเดียวกับแบบจำลองความเร็วลม จะได้ว่า

$$dG_{noise,t} = 0 + (\sigma_{G,k} G_{k,t} \sqrt{dt}) Z_G \quad (2.19)$$

$$dT_{noise,t} = 0 + (\sigma_{T,k} T_{k,t} \sqrt{dt}) Z_T \quad (2.20)$$

ดังนั้น แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เวลาใดๆ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.21) และ (2.22)

$$G_{k,t} = G_{trend,k} \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_{G,k}^2 t + \sigma_{G,k} Z_G \sqrt{t}\right) \quad (2.21)$$

$$T_{k,t} = T_{trend,k} \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_{T,k}^2 t + \sigma_{T,k} Z_T \sqrt{t}\right) \quad (2.22)$$

โดยที่	$G_{k,t}$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์ ณ ชั่วโมงที่ $k$ จุดเวลาที่ $t$
	$T_{k,t}$	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ณ ชั่วโมงที่ $k$ จุดเวลาที่ $t$
	$G_{trend,k}$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยของชั่วโมงที่ $k$ ตามฤดูกาล
	$T_{trend,k}$	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยของชั่วโมงที่ $k$ ตามฤดูกาล
	$\sigma_{G,k}$	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการประมาณ ด้วยวิธีความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimator; MLE)
	$\sigma_{T,k}$	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งมาจากการประมาณ ด้วยวิธีความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimator; MLE)
	$Z_G$	คือ	ตัวแปรสุ่มของความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมซึ่งจะอธิบายในส่วนตัวต่อไป
	$Z_T$	คือ	ตัวแปรสุ่มของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงอาทิตย์ซึ่งจะอธิบายในส่วนตัวต่อไป
	$i$	คือ	จุดเวลาที่พิจารณา เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการสุ่มค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิทุก 15 นาที ดังนั้น $i$ จะมีค่าเท่ากับ 1/4, 2/4, 3/4 และ 4/4 ตามลำดับ

## 2) แบบจำลองความสัมพันธ์ของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

ในการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่ม 2 ตัวนั้น จำเป็นต้องรู้ถึงโครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองตัวซึ่งโดยทั่วไปสิ่งที่ใช้วัดความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient;  $\rho$ ) โดยถ้า  $\rho$  มีค่าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นน้อย แต่ถ้ามีค่าใกล้  $\pm 1$  แสดงว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันหรือตรงกันข้ามเป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์ดังกล่าวก็บอกได้เพียงระดับและทิศทางของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเท่านั้น [6]

คอปูลา (Copulas) เป็นทฤษฎีใช้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่ม โดยในทางคณิตศาสตร์ คอปูลาเป็นฟังก์ชันการแจกแจงร่วมของตัวแปรสุ่มโดยที่แต่ละตัวแปรสุ่มมีการแจกแจงตามขอบ (Marginal distribution) แบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution) บนช่วง  $[0, 1]$  ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประยุกต์ใช้ทฤษฎีดังกล่าวในการสร้างแบบจำลองสำหรับการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้การประเมินกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ทฤษฎีบทของสกลาร์ (Sklar's Theorem) เป็นทฤษฎีบทสำคัญในหลักการคอปูลา โดยที่ทฤษฎีบทนี้กล่าวว่า  $H$  จะเป็นฟังก์ชันการแจกแจงร่วมของตัวแปรสุ่มก็ต่อเมื่อมีคอปูลา ( $C$ ) ที่ทำให้

$$H(x, y) = C(F(x), G(y)) \quad (2.23)$$

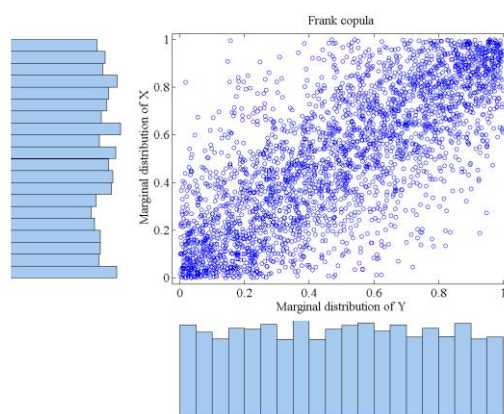
โดยที่  $x, y \in R$  และ  $F(x), G(y)$  เป็นการแจกแจงตามขอบของ  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ [6-9]

คอปูลาที่ใช้อธิบายลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น Gumbel Copula, Clayton Copula และ Frank Copula เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งแต่ละรูปแบบของคอปูลานั้นมีรายละเอียดและลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มที่แตกต่างกันออกไป ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้รูปแบบของคอปูลาเพื่ออธิบายรายละเอียดของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1) Frank Copula แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีรูปแบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปในทิศทางเดียวกันแบบไม่เกาะกลุ่มกันมากนัก สังเกตได้จากภาพที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าการแจกแจงร่วมของตัวแปรสุ่มมีการกระจายในแนวเส้นตรงเท่ากันทั้งบริเวณหัวและหาง

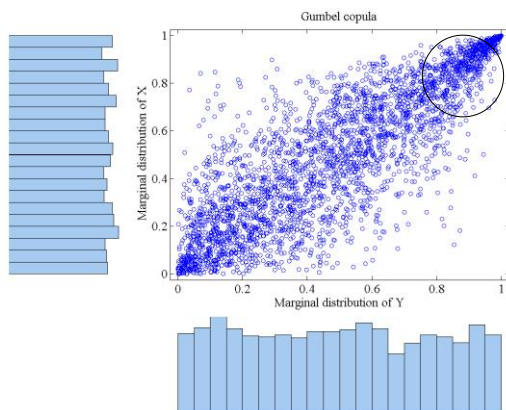
2) Gumbel Copula แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดียวกับ Frank Copula แต่การกระจายตัวของข้อมูลจะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันมากที่บริเวณปลายด้านที่มีค่าสูง (Upper Tail Dependence) กล่าวคือ ในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงอาทิตย์สูง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะมีค่าสูงด้วย แต่ในช่วงเวลาที่ความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำๆ นั้น อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะมีค่าเป็นอย่างไรก็ได้ ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายตัวของข้อมูลดังภาพที่ 2.4

3) Clayton Copula แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันเช่นเดียวกับ Frank Copula และ Gumbel Copula แต่การกระจายตัวของข้อมูลจะมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันมากที่บริเวณปลายด้านที่มีค่าต่ำ (Lower Tail Dependence) กล่าวคือ ในช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะมีค่าต่ำด้วย แต่ในช่วงเวลาที่ความเข้มแสงอาทิตย์สูงๆนั้น อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะมีค่าเป็นอย่างไรก็ได้ ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายตัวของข้อมูลดังภาพที่ 2.5

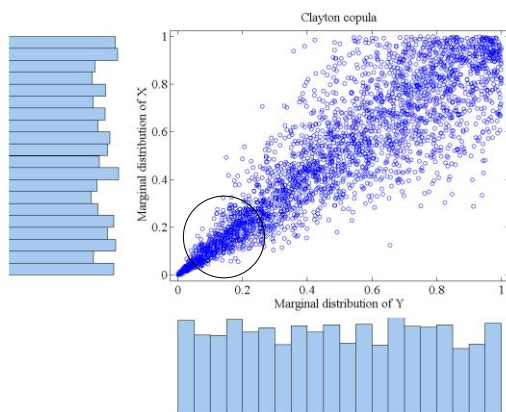


ภาพที่ 2.3 ฟังก์ชันการกระจายสะสมและการแจกแจงตามขอบระหว่างตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$  ที่มีรูปแบบ Frank Copula





ภาพที่ 2.4 ฟังก์ชันการกระจายสะสมและการแจกแจงตามขอบระหว่างตัวแปรสุ่ม X และ Y ที่มีรูปแบบ Gumbel Copula



ภาพที่ 2.5 ฟังก์ชันการกระจายสะสมและการแจกแจงตามขอบระหว่างตัวแปรสุ่ม X และ Y ที่มีรูปแบบ Clayton Copula

กระบวนการในการหาค่าตัวแปรสุ่มที่มีความสัมพันธ์กันอันได้แก่ ตัวแปรสุ่มที่สัมพันธ์กับการหาความเข้มแสงอาทิตย์ ( $Z_G$ ) และตัวแปรสุ่มที่มีความสัมพันธ์กับการหาอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ( $Z_T$ ) ซึ่งทั้งสองตัวแปรต่างก็มีการกระจายตัวแบบปกติมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ใจต้องหาความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มทั้งสองตัวนี้โดยอาศัยทฤษฎีคอปูลา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

กำหนดให้ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เวลาใดๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2.24) และ (2.25)

$$G_{k,t} = G_{trend,k} + G_{noise,t} \tag{2.24}$$

$$T_{k,t} = T_{trend,k} + T_{noise,t} \tag{2.25}$$

โดยที่  $G_{trend,k}$  คือ ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ของชั่วโมงที่  $k$  ตามฤดูกาล  
 $T_{trend,k}$  คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของชั่วโมงที่  $k$  ตามฤดูกาล

จากสมการที่ (2.19) , (2.20), (2.24) และ (2.25) จะได้ว่า

$$G_k - G_{trend,k} \approx \sigma_{G,k} G_{trend,k} \sqrt{t} \times Z_G \quad (2.26)$$

$$T_k - T_{trend,k} \approx \sigma_{T,k} T_{trend,k} \sqrt{t} \times Z_T \quad (2.27)$$

เมื่อให้  $t$  มีค่าเท่ากับระยะเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $\sigma_{G,k}$  และ  $\sigma_{T,k}$  จะสามารถหาได้จากการประมาณค่าความน่าจะเป็นสูงสุด (MLE) ของข้อมูลตามสมการที่ (2.28) และ (2.29) ซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma_{G,k}^2$  และ  $\sigma_{T,k}^2$  ดังนี้

$$(G_k - G_{trend,k})/G_{trend,k} \sim N(0, \sigma_{G,k}^2) \quad (2.28)$$

$$(T_k - T_{trend,k})/T_{trend,k} \sim N(0, \sigma_{T,k}^2) \quad (2.29)$$

จากนั้น ทำการหาค่าการแจกแจงสะสมร่วมของข้อมูลจากสมการที่ (2.28) และ (2.29) เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยรูปแบบคอปูลาที่เหมาะสมกับการแจกแจงของข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถหาได้ ดังนี้

$$H(Z_G, Z_T) = C(\Phi(Z_G), \Phi(Z_T)) \quad (2.30)$$

โดยที่  $\Phi(Z_G) = u$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ของ  $Z_G = (G_k - G_{trend,k})/\sigma_{G,k}G_{trend,k}$   
 $\Phi(Z_T) = v$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ของ  $Z_T = (T_k - T_{trend,k})/\sigma_{T,k}T_{trend,k}$   
 $H(Z_G, Z_T)$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงร่วมระหว่าง  $Z_G$  และ  $Z_T$   
 $C(u, v)$  คือ ฟังก์ชันคอปูลาของตัวแปร  $u$  และ  $v$

เมื่อได้คู่อันดับความสัมพันธ์  $(u, v)$  จากการแทนค่า  $(Z_G, Z_T)$  ลงไปในฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐานแล้ว จะทำการเลือกรูปแบบคอปูลา  $C(u, v)$  ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่มที่เหมาะสมโดยใช้วิธีประมาณค่าความน่าจะเป็นสูงสุด (MLE) ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกล่องเครื่องมือรูปแบบคอปูลาใน MATLAB ชื่อ “copulafit”

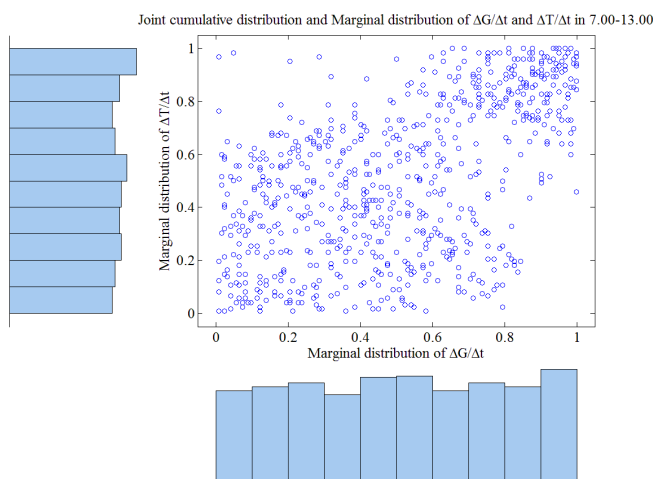
เมื่อได้รูปแบบคอปูลาที่เหมาะสมจากรูปแบบคอปูลามาตรฐานแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการสุ่มตัวแปร  $(Z_G, Z_T)$  ที่มีความสัมพันธ์กันตามรูปแบบคอปูลาที่เลือกไว้กลับมาโดยอาศัยกล่องเครื่องมือรูปแบบคอปูลาใน MATLAB ชื่อ “copularnd” ซึ่งจะให้ค่าตัวแปร  $(u, v)$  ออกมา

ก่อน ส่วนค่าตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  และ  $Z_T$  นั้นสามารถหาได้โดยทำการแปลงผ่านฟังก์ชันผกผันของการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Inverse Standard Normal cdf) ดังสมการต่อไปนี้

$$Z_G = \Phi^{-1}(u) \quad (2.31)$$

$$Z_T = \Phi^{-1}(v) \quad (2.32)$$

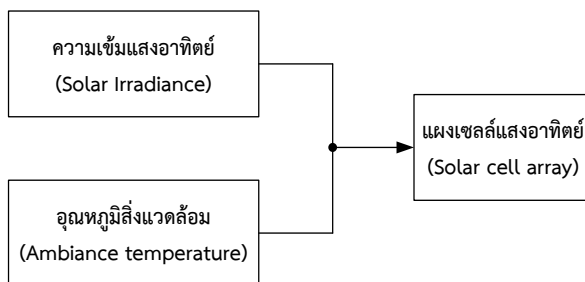
ตัวอย่างการแจกแจงสะสมร่วมของข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายชั่วโมงที่จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อใช้ในการหารูปแบบคอปูลาที่เหมาะสม แสดงได้ดังภาพที่ 2.6



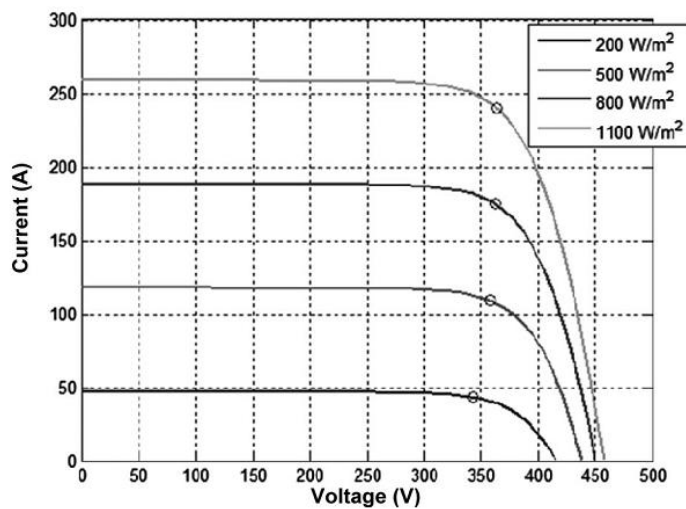
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการแจกแจงสะสมร่วมของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

## 2.2.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

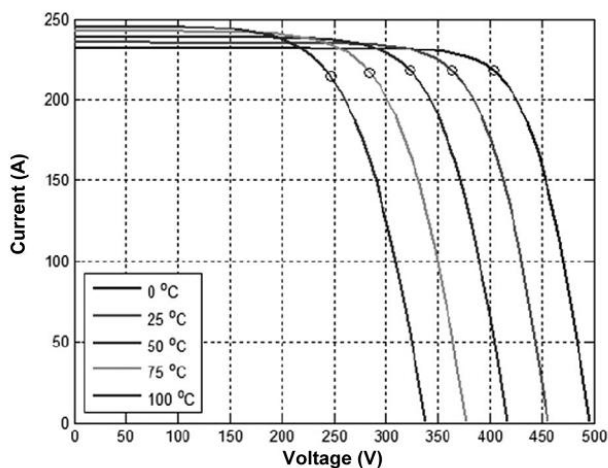
ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีหลักการทำงานโดยทั่วไป คือ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานดังกล่าวให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ก็คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ กล่าวคือ ความเข้มแสงอาทิตย์จะส่งผลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะที่แรงดันที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนปัจจัยสำคัญรองลงมา คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงแต่กระแสไฟฟ้าที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก [10-11] แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.7 และความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงและอุณหภูมิ แสดงได้ดังภาพที่ 2.8 และภาพที่ 2.9 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร กับ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์  
ที่มา: Abir Chatterjee, “Identification of Photovoltaic Source Models”



ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ  
ที่มา: Abir Chatterjee, “Identification of Photovoltaic Source Models”

จากปัจจัยที่ส่งผลกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่กล่าวมาข้างต้น สมการในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังนี้ [12]

$$P_{pv,t} = P_m \frac{G_t}{G_{STC}} (1 - \gamma(T_{cell,t} - T_{STC})) \quad (2.33)$$

โดยที่	$P_m$	คือ	กำลังไฟฟ้าพิกัด (วัตต์)
	$G_t$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์ที่จุดเวลา $t$ ใดๆ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	$G_{STC}$	คือ	ความเข้มแสงที่ STC (Standard Test Condition) มีค่าเท่ากับ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร
	$\gamma$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส <sup>-1</sup> ) มีค่าอยู่ในช่วง -0.005 – 0.003
	$T_{cell}$	คือ	อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ (องศาเซลเซียส)
	$T_{STC}$	คือ	อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ที่ STC มีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

ในส่วนของสมการที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ [13] สามารถแสดงได้ดังนี้

$$T_{cell} = T_{amb} + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) G_t \quad (2.34)$$

โดยที่	$T_{amb}$	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (องศาเซลเซียส) อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดทำงาน ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงเป็น 800 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที (Nominal Operating Cell Temperature) ซึ่งมีค่าเป็น 46 องศาเซลเซียส
	$NOCT$	คือ	

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นก่อนทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักต้องมีการเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อน [5] ซึ่งจะส่งผลให้มีกำลังสูญเสียในคอนเวอร์เตอร์บางส่วนด้วย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสุทธิจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีค่าเท่ากับ

$$P_{e,pv} = P_{pv} \times eff_s \quad (2.35)$$

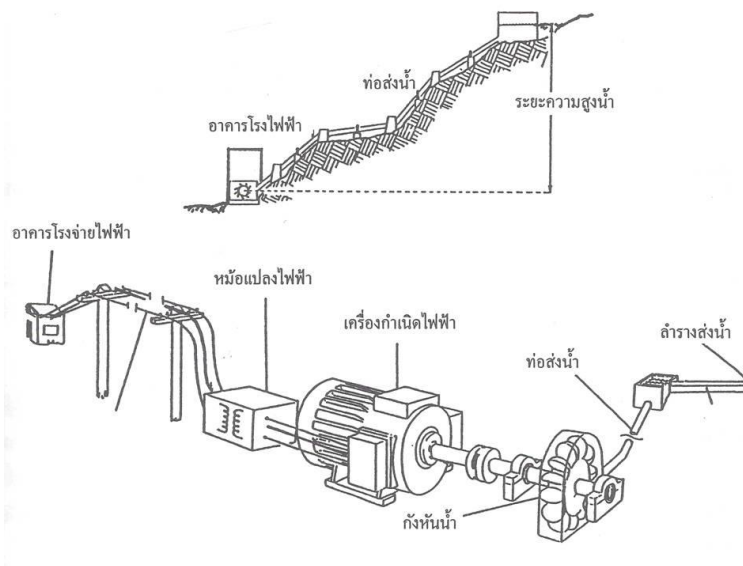
โดยที่	$eff_s$	คือ	ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าหลัก
--------	---------	-----	--

### 2.3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

โดยทั่วไป ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กในประเทศไทยนั้นจะมีกำลังผลิตตั้งแต่ 15 กิโลวัตต์ จนถึง 30 เมกะวัตต์ เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ใช้น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความไม่แน่นอนและในการผลิตไฟฟ้านั้นจะขึ้นกับลักษณะการบังคับน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าเป็นสำคัญ โดยเมื่อแบ่งประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กตามลักษณะการบังคับน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าจะพบว่าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท [14-15] ดังนี้

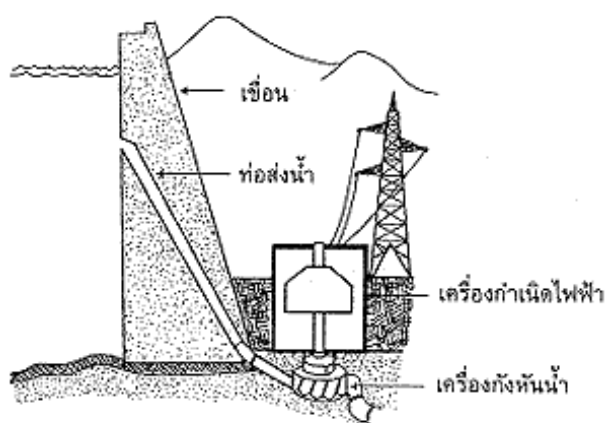
1) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี (Run-of-river Hydro Power Plant)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำลักษณะนี้จะไม่อ่างเก็บน้ำและผลิตไฟฟ้าโดยการใช้ที่ไหลตามธรรมชาติของลำน้ำ ส่วนใหญ่แล้ว ระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้จะติดตั้งอยู่กับเขื่อนผันน้ำชลประทานซึ่งมีน้ำไหลผ่านตลอดปีซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.10 โดยหากน้ำมีอัตราการไหลมากเกินไปที่กั้นน้ำจะรับได้ก็จะต้องทำการปล่อยน้ำทิ้งไปและหากมีอัตราการไหลของน้ำช้ากว่าที่จะทำให้กั้นน้ำขับเคลื่อนได้ก็จะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม



ภาพที่ 2.10 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี  
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

2) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ (Regulating Pond Hydro Power Plant)  
ระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำขนาดเล็กที่สามารถบังคับการไหลของน้ำได้ในช่วงสั้นๆ เช่น ประจำวัน หรือประจำสัปดาห์ การผลิตไฟฟ้าจะสามารถควบคุมให้สอดคล้องกับความต้องการได้ดีกว่าโรงไฟฟ้าแบบแรก แต่อยู่ในช่วงเวลาที่จำกัดตามขนาดของอ่างเก็บน้ำ ดังภาพที่ 2.11



โรงจกัรไฟฟ้าพลังน้ำ

ภาพที่ 2.11 โรงไฟฟ้าพลังน้ำแบบมีอ่างเก็บน้ำ  
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

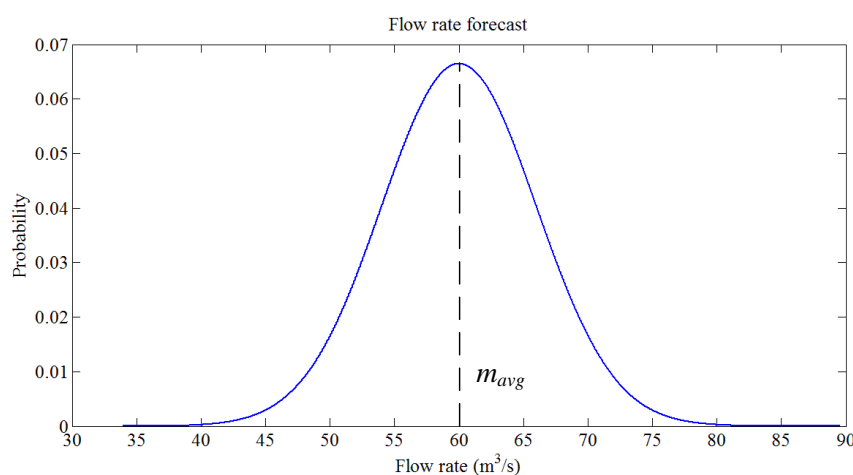
### 3) ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบสูบกลับ (Pumped Storage Hydro Power Plant)

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบนี้มีเครื่องสูบน้ำที่สามารถสูบน้ำที่ปล่อยจากอ่างเก็บน้ำลงมาแล้วนำกลับขึ้นไป เก็บไว้ในอ่างเก็บน้ำเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีก ประโยชน์ของระบบผลิตไฟฟ้าชนิดนี้เกิดจากการแปลงพลังงานที่เหลือใช้ในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ เช่น ในเวลาเที่ยงคืน ไปสะสมไว้ในรูปของการเก็บน้ำในอ่างน้ำเพื่อที่จะสามารถใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกครั้งหนึ่งในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง เช่น เวลาหัวค่ำ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกทำการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปี ซึ่งจะผลิตไฟฟ้าจากน้ำที่ไหลตามธรรมชาติของลำน้ำ ดังนั้นการจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำประเภทนี้จึงแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

#### 2.3.1 แบบจำลองอัตราการไหลของน้ำ

ในการสร้างแบบจำลองอัตราการไหลของน้ำเพื่อประกอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างแบบจำลองอย่างง่ายของอัตราการไหลของน้ำโดยกำหนดให้อัตราการไหลของน้ำมีการกระจายตัวแบบปกติรอบค่าเฉลี่ยค่าหนึ่งและความแปรปรวนขึ้นกับขนาดของค่าเฉลี่ยอัตราการไหลของน้ำ  $m_t \sim N(m_{avg}, \sigma^2)$  โดยตัวอย่างอัตราการไหลของน้ำที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60 ลิตรต่อวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย แสดงได้ดังภาพที่ 2.12



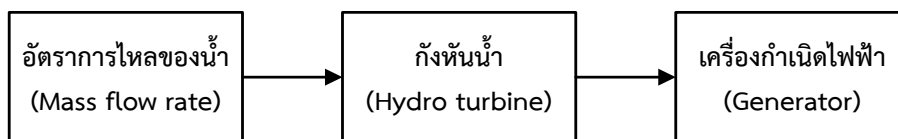
ภาพที่ 2.12 แบบจำลองความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของน้ำ

#### 2.3.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ท่อส่งน้ำ เครื่องกังหันน้ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การผลิตไฟฟ้าจะเริ่มจากการปล่อยน้ำจากเขื่อนผ่านท่อส่งน้ำ โดยน้ำจะไหลจากระดับที่สูงกว่าไปสู่ระดับที่ต่ำกว่าโดยผ่านกังหันน้ำที่อยู่ระหว่างทางไหลของน้ำ ความเร็วของน้ำจะขับ



กังหันน้ำให้หมุน การหมุนของกังหันจะส่งผ่านเพลลาที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

ลักษณะการทำงานและข้อจำกัดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปีนั้น จะมีลักษณะคล้ายกันกับการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม กล่าวคือ ระบบผลิตไฟฟ้าเหล่านี้ จะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อมีลมหรือมีน้ำไหลผ่าน ซึ่งระดับความเร็วลมหรืออัตราการไหลของน้ำ นั้นจะเป็นตัวกำหนดกำลังผลิตที่ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตได้

เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำจึงทำการประยุกต์ใช้สมการคำนวณ กำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าพลังน้ำแบบทั่วไป [16] คือ

$$P_{out} = g \cdot m \cdot H_{net} \cdot \eta_{system} \quad (2.36)$$

โดยที่	$P_{out}$	คือ	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
	$g$	คือ	ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง (9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
	$m$	คือ	อัตราการไหลของน้ำ (ลิตรต่อวินาที)
	$H_{net}$	คือ	ความสูงของหัวน้ำสุทธิ (เมตร)
	$\eta_{system}$	คือ	ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ มีค่าเท่ากับ 68.4%

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ ( $\eta_{system}$ ) ในที่นี้ประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพในส่วนของกังหันน้ำ (Hydro turbine) ระบบขับเคลื่อน (Drive system) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดให้มีค่า เป็น 80% 95% และ 90% ตามลำดับ เพราะฉะนั้นได้ว่าค่า  $\eta_{system}$  มีค่าเท่ากับ  $80\% \times 95\% \times 90\% = 68.4\%$

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปีนั้นความสูงของหัวน้ำสุทธิจะมีค่าคงที่ แต่สิ่งที่มีความไม่แน่นอนคืออัตราการไหลของน้ำ ดังนั้นจึงทำการประยุกต์ใช้สมการที่ (2.36) โดยใช้ค่าพิกัดของเครื่องกังหันน้ำที่มีการใช้จริง ได้แก่ เครื่องกังหันน้ำในโครงการไฟฟ้าพลังน้ำห้วยคัง จ.เชียงใหม่ [17] ที่มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

ประเภทกังหันน้ำ	Cross Flow	
กำลังผลิต	40	กิโลวัตต์
หัวน้ำสุทธิ	90	เมตร
อัตราการไหล	60	ลิตรต่อวินาที

เมื่อนำกังหันน้ำเครื่องนี้เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะพบว่า ที่อัตราการไหลของน้ำเป็น 60 ลิตรต่อวินาที จะผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 37 กิโลวัตต์ ตามสมการที่ (2.36) ซึ่งจะใช้อัตราการไหลของน้ำค่านี้เป็นเกณฑ์ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่อัตราการไหลของน้ำค่าอื่นๆ กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{rated} = g \cdot m_{rated} \cdot H_{net} \cdot \eta_{efficiency} \quad (2.37)$$

$$P_t = g \cdot m_t \cdot H_{net} \cdot \eta_{efficiency} \quad (2.38)$$

นำสมการที่ (2.37) หาดด้วยสมการที่ (2.38) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$P_t = \frac{m_t}{m_{rated}} \cdot P_{rated} \quad (2.39)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.39) มาประกอบกับแบบจำลองอัตราการไหลของน้ำ จะสามารถคำนวณกำลังผลิตที่ได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กแบบมีน้ำไหลผ่านตลอดปีได้ จากนั้นจึงนำไปใช้เพื่อประเมินค่ากำลังผลิตที่ได้ของระบบผลิตไฟฟ้าประเภทดังกล่าวต่อไป

## 2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

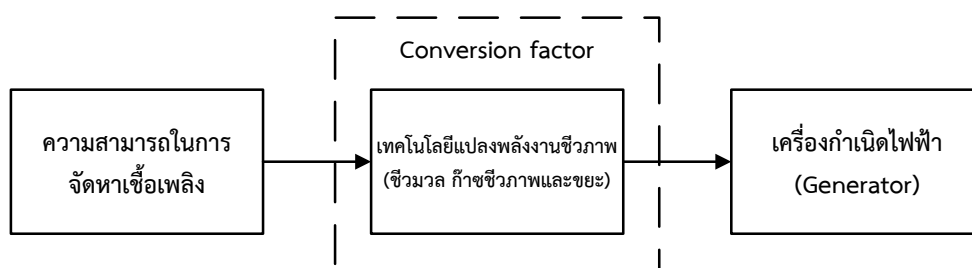
พลังงานชีวมวลถือเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีสัดส่วนสูงที่สุดตามแผนพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (AEDP) โดยแผนดังกล่าวมีเป้าหมายส่งเสริมการผลิตพลังงานชีวมวลที่นำไปใช้ประโยชน์ทั้งในรูปการผลิตไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลในที่นี่แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ชีวมวล ก๊าซชีวมวล และขยะชุมชน ซึ่งกระบวนการและเทคโนโลยีในการนำเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละประเภทไปผลิตไฟฟ้านั้นมีความแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความต้องการเชื้อเพลิงตามแผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียน 25% ใน 10 ปี

ประเภทพลังงาน	เป้าหมาย AEDP ปี 2564 (ktoe)	
	ไฟฟ้า	ความร้อน
ชีวมวล	1,896	8,200
ก๊าซชีวภาพ	270	1,000
พลังงานขยะ	72	35
รวม	2,238	9,235

หมายเหตุ คัดสมมติฐานประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่ 20% และประสิทธิภาพการผลิตความร้อนที่ 90%

ในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวภาพนั้น ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง และความสามารถในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวล/ชีวภาพเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความไม่แน่นอนสูงและส่งผลโดยตรงต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังนั้นการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ และแบบจำลองความสามารถของเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวภาพที่มี ดังแสดงได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ

#### 2.4.1 แบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพนั้นจะผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยปริมาณเชื้อเพลิงที่เข้าสู่ระบบเป็นสำคัญ ซึ่งปริมาณเชื้อเพลิงนี้จะขึ้นกับความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงที่ระบบผลิตไฟฟ้านั้นๆ สามารถจัดหาได้ ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพแต่ละประเภทจะใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป ดังนี้

##### 1) เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นจะเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรซึ่งมีอยู่กระจัดกระจายไปในภูมิภาคต่างๆทั่วประเทศ หรือเป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรซึ่งเศษวัตถุดิบเหลือใช้เหล่านี้ในบางครั้งยังไม่อยู่ในสภาพที่พร้อมนำไปผลิตไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการและเทคโนโลยีต่างๆแปรรูปเพื่อให้พร้อมใช้งาน

ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติ ค่าความร้อนและศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าที่ต่างกัน สำหรับประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรมมีชีวมวลที่ถูกนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าอยู่หลายชนิด [18] ดังแสดงในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติบางอย่างของชีวมวลที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้า ได้แก่

- การกระจายตัวของแหล่งชีวมวล : เนื่องจากการกระจายตัวของพื้นที่เพาะปลูกที่มีอยู่ในประเทศไทย ทำให้การจัดหาชีวมวลเพื่อนำมาผลิตไฟฟ้านั้นทำได้ค่อนข้างยาก จึงถือว่าการจัดหาชีวมวลเพื่อนำไปผลิตไฟฟ้านั้นเป็นความไม่แน่นอนที่เป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้
- ความชื้น : ชีวมวลบางชนิดมีความชื้นสูงมาก เช่น กากมันสำปะหลัง ซึ่งมีความชื้นประมาณ 80-90% จำเป็นต้องนำเข้าสู่กระบวนการเพื่อลดความชื้นก่อนนำไปเผา
- สิ่งเจือปน : ชีวมวลที่จัดหามาได้ในบางครั้งมีสิ่งเจือปนหลายชนิด ทำให้ไม่สามารถใช้ได้ทั้งหมด บางครั้งอาจต้องมีการคัดแยกก่อนนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	วัสดุเหลือใช้	ค่าความร้อน(MJ/kg)
อ้อย	68,807,800	ชานอ้อย	14.40
		ยอดและใบ	11.22
ข้าว	31,974,084	แกลบ	12.45
		ฟางข้าว	10.12
น้ำมันปาล์ม	9,032,635	ทะลายปาล์ม	8.65
		เส้นใย	17.62
		กะลา	18.46
ข้าวโพด	4,488,906	ซัง	15.65
ไม้สวนป่า	8,950,000	เศษไม้	14.98
ยูคาลิปตัส	6,800,000	ไม้พิน	14.98
		เปลือกไม้	12.34

หมายเหตุ 1.ผลผลิตทางการเกษตร จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ปี พ.ศ.2553

2.ค่าความร้อนวัสดุ จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี พ.ศ.2553

จากคุณสมบัติของชีวมวลแต่ละชนิดจะส่งผลให้เทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้เพื่อผลิตไฟฟ้ามีความแตกต่างกันและให้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปด้วย

## 2) เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพโดยปกติแล้วเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกลุ่มจุลินทรีย์ มีองค์ประกอบคือ ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) 65-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) 28-32% และส่วนผสมอื่นๆอีก 2-3% ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการผลิต

ไฟฟ้านั้นเกิดจากการใช้เทคโนโลยีในการเปลี่ยนของเสียให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ [19] ซึ่งแหล่งกำเนิดของเสียนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. กลุ่มปศุสัตว์ ได้แก่ ของเสียหรือน้ำเสียที่มาจากฟาร์มปศุสัตว์ และกิจการที่เกี่ยวข้อง เช่น สุกร โค กระบือ เป็นต้น
2. กลุ่มอุตสาหกรรม ได้แก่ ของเสีย หรือน้ำเสีย ที่มาจากกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม เช่น กลุ่มอุตสาหกรรมแป้ง กลุ่มอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม กลุ่มอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น
3. กลุ่มขยะชุมชน ได้แก่ ของเสีย หรือน้ำเสียที่มาจากชุมชน

หากพิจารณาจากศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งน้ำเสียที่จัดทำโดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ดังตารางที่ 3 จะพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปผลิตไฟฟ้าถึง 530 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี

ตารางที่ 2.3 ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต่างๆ

ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่อแห่ง (ล้าน ลบ.ม./ปี)	ศักยภาพการผลิตไฟฟ้า (MW)	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรวม	
		(ล้าน ลบ.ม./ปี)	ร้อยละ
0-5	0-1.5	139	26.2
5-10	1.5-3.0	136	25.7
10-30	3.0-9.0	255	48.1
รวม		530	100.0

### 3) เชื้อเพลิงขยะชุมชน

ในประเทศไทยและประเทศอื่นทั่วโลก ขยะมีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณขึ้นทุกปี ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง ในการนำขยะมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้านั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติและองค์ประกอบของขยะ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะ จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ [19] ขยะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

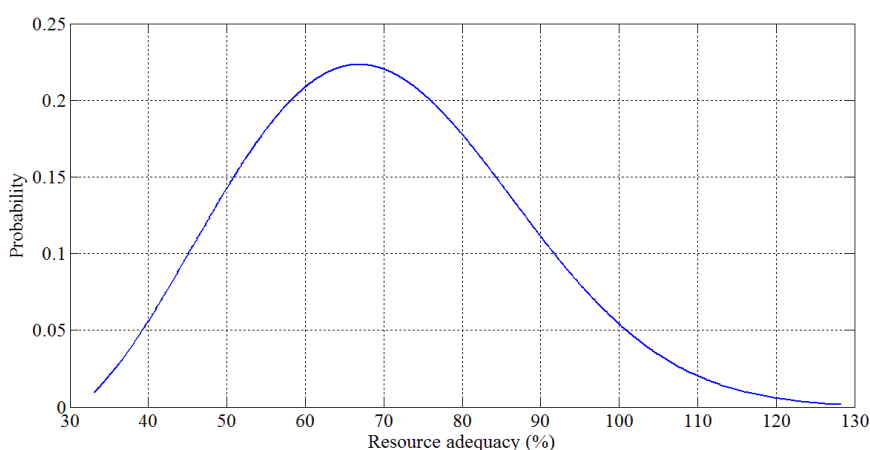
1. ขยะที่เผาไหม้ได้ (Combustible Waste) ได้แก่ ผักผลไม้ เศษอาหาร กระดาษ พลาสติก ผ้า ไม้ ยางและหนัง โดยมีสัดส่วนสูงถึง 94.43%
2. ขยะที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non-Combustible Waste) ได้แก่ แก้ว โลหะ หินและกระเบื้อง ขยะอื่นๆ เพียง 5.57%

จากการประเมินของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) จะพบว่า เทศบาลที่มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากขยะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 323 เมกะวัตต์จากปริมาณขยะ 21,811 ตันต่อวัน โดยมีปริมาณขยะทั้งประเทศมากกว่า 41,000 ตันต่อวัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากขยะเทศบาลต่างๆทั่วประเทศไทย

พื้นที่รวบรวมขยะ	ปริมาณขยะรวม (ตัน/วัน)	ศักยภาพการผลิตไฟฟ้า (MW)
1. กรุงเทพมหานคร	9,350	158
2. เทศบาลที่มีขยะ 501-1,000 ตัน/วัน	2,219	36
3. เทศบาลที่มีขยะ 251-500 ตัน/วัน	3,829	65
4. เทศบาลที่มีขยะ 101-250 ตัน/วัน	4,429	46
5. เทศบาลที่มีขยะน้อยกว่า100 ตัน/วัน	2,074	18
รวมทั้งสิ้น	21,811	323

ปัจจัยของเชื้อเพลิงชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้นเป็นสิ่งที่ส่งผลต่อความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพในที่นี้หมายถึง ปริมาณเชื้อเพลิงชีวภาพที่สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง จะพิจารณาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้านั้นๆและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือฤดูกาล เช่น ถ้าระบบผลิตไฟฟ้ามีความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงเท่ากับ 100% ของกำลังผลิตติดตั้งจะสามารถนำไปผลิตกำลังไฟฟ้าได้เต็มค่าพิกัดของระบบผลิตไฟฟ้านั้นๆ เป็นต้น แต่โดยปกติแล้วระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้จะไม่สามารถจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อผลิตไฟฟ้าได้เต็มค่าพิกัดของโรงไฟฟ้าเนื่องจากการกระจายตัวของแหล่งเชื้อเพลิง หรือมีข้อจำกัดในการรวบรวมเชื้อเพลิงตามพื้นที่ต่างๆ ตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้แบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบไวบูลล์ (Weibull distribution) ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มของการจัดหาเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ยจะทำได้ในง่ายระดับหนึ่งแต่โอกาสในการจัดหาเชื้อเพลิงให้ได้ในปริมาณมากขึ้นจากค่าเฉลี่ยจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.15 ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ

$$f(x_t) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x_t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x_t}{\lambda}\right)^k} ; x_t \geq 0 \quad (2.40)$$

โดยที่  $x_t$  คือ ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง ณ เวลา  $t$   
 $\lambda, k$  คือ พารามิเตอร์ของแบบจำลอง

ซึ่งจากข้อมูลที่มีพบว่าโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงชีวภาพนั้นในปัจจุบันมีความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 60-70

## 2.4.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ

เมื่อได้แบบจำลองความไม่แน่นอนของความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงแล้ว ในส่วนต่อไปจะอธิบายถึงแนวคิดในการสร้างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวภาพ ซึ่งจะขึ้นกับเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีเพื่อนำไปผลิตเป็นไฟฟ้า โดยเชื้อเพลิงชีวภาพแต่ละประเภท ได้แก่ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและขยะ นั้นมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าและแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป ดังนี้

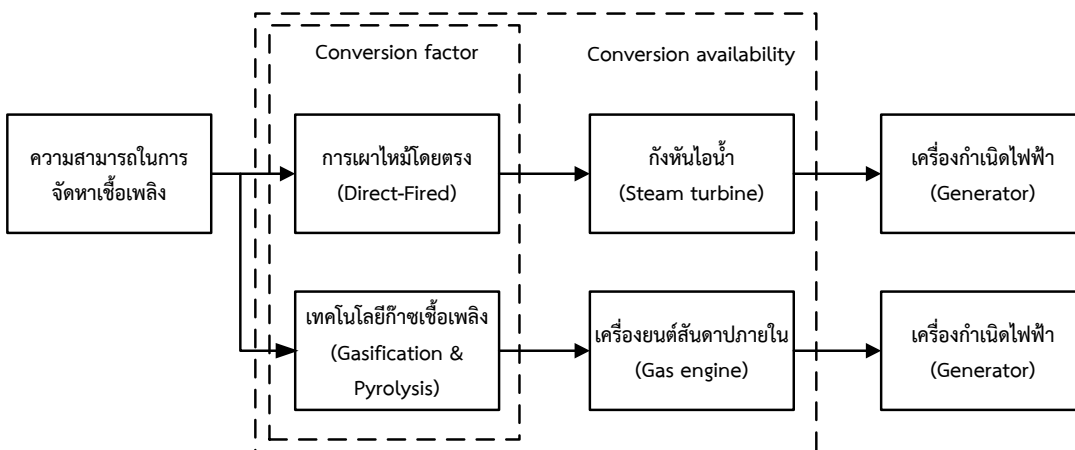
### 2.4.2.1 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย แต่ในประเทศไทยมีใช้เพียงบางเทคโนโลยีเท่านั้น [19-21] การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermo-chemical) เป็นการใช้ความร้อนไปทำลายโครงสร้างทางเคมีของชีวมวลเพื่อให้โครงสร้างทางเคมีของชีวมวลเปลี่ยนแปลงไป แบ่งได้เป็น 2 ระบบ [19] คือ

1.1 การเผาไหม้โดยตรง (Direct-fired) เป็นการนำชีวมวลไปเผาโดยตรงในหม้อไอน้ำ (Boiler) เพื่อถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้กับน้ำในหม้อไอน้ำจนกลายเป็นไอน้ำที่ร้อนจัดและมีความดันสูง จากนั้นไอน้ำเหล่านี้จะถูกนำไปปั่นกังหันไอน้ำ (Steam turbine) ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.16 แต่การผลิตไฟฟ้าด้วยระบบนี้มีข้อจำกัดคือ โรงไฟฟ้าควรมีขนาดใหญ่มากกว่า 5 เมกะวัตต์ขึ้นไป เนื่องจากมีต้นทุนสูง

1.2 เทคโนโลยีก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification & Pyrolysis) เป็นการเผาชีวมวลโดยควบคุมปริมาณอากาศเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จากกระบวนการดังกล่าวจะได้ก๊าซที่มีองค์ประกอบคือ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) ซึ่งมีความร้อนประมาณ 4.5 -5.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะถูกนำไปใช้เดินเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Gas Engine) เพื่อผลิตไฟฟ้า ชีวมวลที่มีความเหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีการนี้ควรมีขนาดใกล้เคียงกันและไม่ควรเล็กมากจนเกินไปเพื่อให้อากาศสามารถผ่านได้ โดยทั่วไป ระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้จะมีกำลังผลิตอยู่ในช่วง 1 - 100 กิโลวัตต์



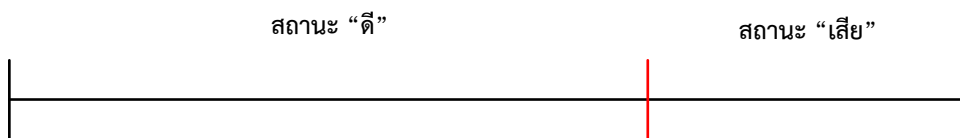
ภาพที่ 2.16 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลโดยใช้กระบวนการความร้อน

2) กระบวนการทางเคมีชีวภาพ (Bio-chemical) เป็นการนำชีวมวลไปเข้าสู่กระบวนการทางเคมีชีวภาพ แต่ในประเทศไทยมีการใช้งานน้อยมาก แบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ

2.1 การย่อยสลาย (Digestion) เป็นการย่อยสลายชีวมวลเพื่อให้ก๊าซชีวภาพ จากนั้นจึงนำไปผลิตไฟฟ้าต่อไป

2.2 การหมัก (Fermentation) เป็นการหมักชีวมวลเพื่อกลายเป็นเอทานอล

จากภาพที่ 2.16 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้ความสามารถในการแปลงพลังงานของระบบ (*Conv. factor*) มีความไม่แน่นอนสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติรอบค่าเฉลี่ยค่าหนึ่ง และในส่วนสุดท้ายก่อนที่จะเชื่อมต่อไปถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะประกอบไปด้วยส่วนของกังหันไอน้ำและเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยจะกำหนดให้อุปกรณ์เหล่านี้มีสถานะการทำงานของส่วนแปลงพลังงาน (*Conv. availability*) ที่อธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แบบจำลองความไม่แน่นอนของสถานะการทำงานของส่วนแปลงพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

จากส่วนประกอบของแบบจำลองดังกล่าว ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ( $C_f$ ) ณ เวลาใดๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$$C_t = x_t \times \text{Conv. factor} \times \text{Conv. availability} \quad (2.41)$$

และคำนวณกำลังผลิตที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ( $P_{biomass,t}$ ) ณ เวลา  $t$  ใดๆ ได้เท่ากับ

$$P_{biomass,t} = C_t \times \text{Installed capacity}_{biomass} \quad (2.42)$$

โดยที่  $\text{Conv. factor}$  คือ ความสามารถในการแปลงเชื้อเพลิง  
 $\text{Conv. availability}$  คือ สถานะการทำงานของส่วนแปลงเชื้อเพลิง

#### 2.4.2.2 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

เทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในประเทศไทยมีอยู่หลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของน้ำเสีย/ของเสีย ซึ่งเทคโนโลยีแต่ละชนิดก็มีประสิทธิภาพและความไม่แน่นอนในการผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน [19], [22] เทคโนโลยีที่ใช้งานในประเทศไทยมีดังนี้

1) ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบยูเอเอสบี (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) หรือระบบชั้นตะกอนอากาศแบบไหลขึ้น จะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แขวนลอยในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยในประเทศไทยมีการใช้เทคโนโลยี UASB ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม

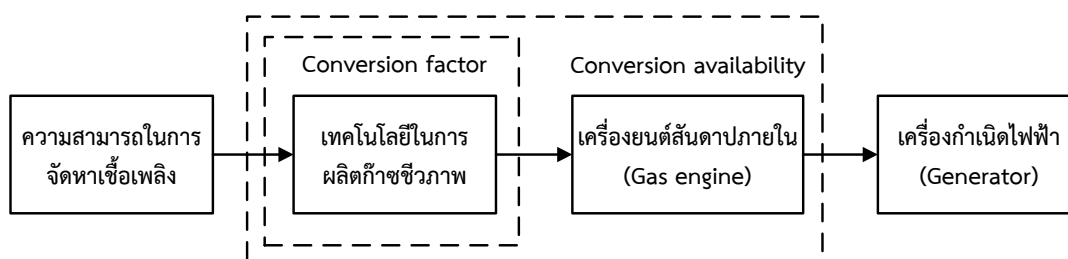
2) ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film or Anaerobic Filter: AF) เป็นถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มซึ่งมีวัสดุตัวกลางที่ใช้ คือ เชือกไนลอน ตาข่าย เป็นต้น เพื่อให้จุลินทรีย์เติบโตโดยยึดเกาะบนผิววัสดุตัวกลาง และมีน้ำเสียไหลอย่างสม่ำเสมอ

3) ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนผสม (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR) เป็นระบบที่ใช้ถังปฏิกรณ์ในอุดมคติ (Ideal Reactor) ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารละลายในถังเท่ากันทุกจุด (Completely Mixed) แต่มีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากอาจมีการกวนผสมของสารไม่ดี

4) ระบบบ่อไร้อากาศแบบคลุมบ่อ (Anaerobic Covered Lagoon) เป็นระบบที่พัฒนามาจากบ่อบำบัดน้ำเสียโดยทำการปิดคลุมพลาสติกที่ปากบ่อเพื่อกักเก็บก๊าซชีวภาพเอาไว้ และใช้หลักการของจุลินทรีย์แขวนลอยในการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพนั้นจะมีลักษณะคล้ายกันกับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล นั่นก็คือ ประกอบไปด้วยส่วนของความไม่แน่นอนของความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง และความสามารถของกระบวนการผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีประสิทธิภาพไม่สูงนักและมีความไม่แน่นอนของส่วนผสมที่ได้

จากการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ด้วย ดังนั้นแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพจึงสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังนี้



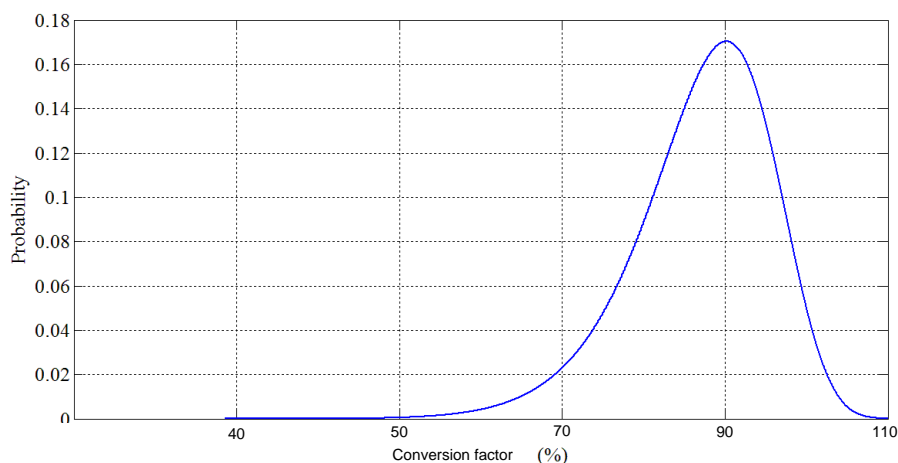
ภาพที่ 2.18 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

จากแบบจำลองในภาพที่ 2.18 ส่วนของการแปลงพลังงานหรือการผลิตก๊าซชีวภาพ (*Conv. factor*) นั้นจะไม่ใช่ค่าคงที่ เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้นั้นจะมีสัดส่วนมีเทนที่ผสมอยู่ไม่แน่นอนซึ่งส่งผลถึงความสามารถในการนำไปผลิตไฟฟ้า โดยค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพเทียบกับสัดส่วนมีเทน [19] แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

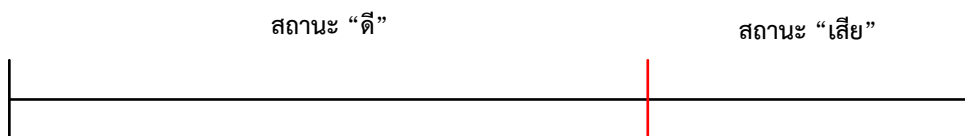
ตารางที่ 2.5 ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพที่เทียบกับสัดส่วนมีเทน

สัดส่วนมีเทน	ค่าความร้อน (MJ/Nm <sup>3</sup> -BG)	ปริมาณการผลิตไฟฟ้าต่อ ก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. (kWh/Nm <sup>3</sup> -BG)
50% CH <sub>4</sub>	17.5	1.689
55% CH <sub>4</sub>	19.3	1.858
60% CH <sub>4</sub>	21.0	2.027

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงกำหนดให้แบบจำลองในส่วนของ *Conv. factor* นี้ อธิบายได้ด้วยปริมาณของสัดส่วนมีเทน และกำหนดให้ค่าสัดส่วน 60%CH<sub>4</sub> มี *Conv. factor* เป็น 100% ส่วนค่าสัดส่วนมีเทนค่าอื่นๆนั้นจะหาเทียบได้กับสัดส่วนมีเทน CH<sub>4</sub> ที่มีในก๊าซชีวภาพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายตัวแบบไวบูลล์ ดังภาพที่ 2.19 จากนั้นเมื่อได้แบบจำลองส่วน *Conv. factor* แล้วจึงนำก๊าซชีวภาพที่ได้เข้าสู่ส่วนแปลงพลังงาน (*Conv. availability*) เพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป โดยค่า *Conv. availability* สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.19 ความสามารถในการแปลงเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 2.20 แบบจำลองความไม่แน่นอนของสถานะการทำงานของส่วนแปลงพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ ( $C_t$ ) เป็นสมการได้  
ดังนี้

$$C_t = x_t \times \text{Conv. factor} \times \text{Conv. availability} \quad (2.43)$$

โดยที่  $x_t$  คือ ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง (ร้อยละเทียบกับกำลังผลิตติดตั้ง)  
 $\text{Conv. factor}$  คือ ความสามารถในการแปลงเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพ (ร้อยละเทียบกับกำลังผลิตติดตั้ง)  
 $\text{Conv. availability}$  คือ สถานะการทำงานของส่วนแปลงเชื้อเพลิง

และสามารถคำนวณกำลังผลิตที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ ณ เวลา  $t$  ใดๆ ได้  
ดังนี้

$$P_{biogas,t} = C_t \times Installed\ capacity_{biogas} \quad (2.44)$$

### 2.4.2.3 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะ

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานขยะนั้นจะมีลักษณะคล้ายกันกับเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล [19], [23] โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

#### 1) เทคโนโลยีความร้อน (Thermal Technology)

1.1 เทคโนโลยีเตาเผาขยะมูลฝอย (Incineration)

1.2 เทคโนโลยีไพโรไลซิส/ก๊าซซิฟิเคชัน (Pyrolysis/Gasification)

1.3 เทคโนโลยีพลาสมาอาร์ค

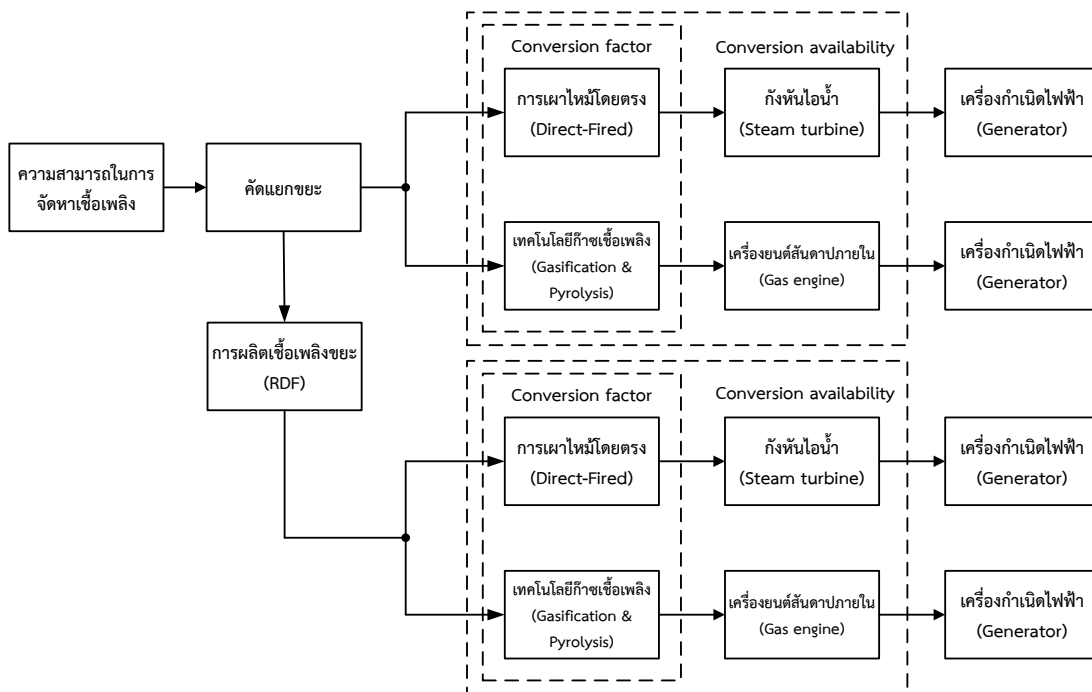
#### 2) เทคโนโลยีชีวภาพ (Biological Technology)

2.1 เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

2.2 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบขยะ (Landfill Gas to Energy)

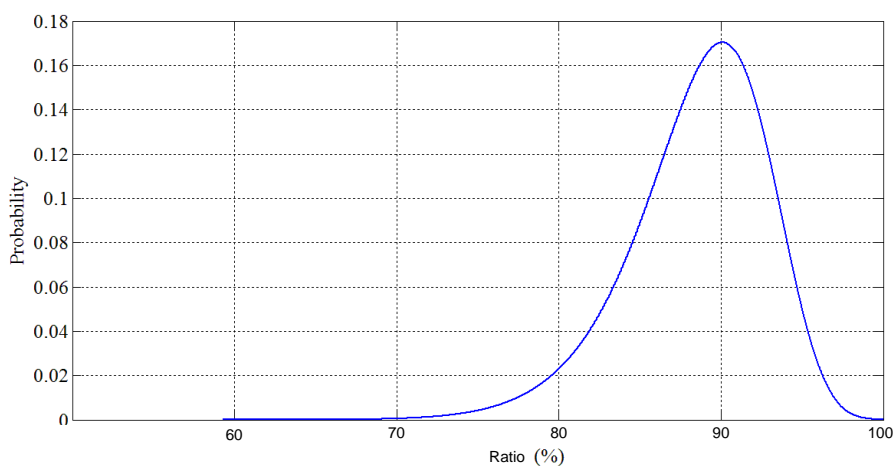
3) เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย เป็นการแปรรูปขยะมูลฝอยโดยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของขยะมูลฝอยเพื่อทำให้กลายเป็นเชื้อเพลิง (Refuse Derived Fuel: RDF)

แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานขยะนั้นเนื่องจากการใช้เทคโนโลยีที่มีลักษณะเหมือนกันกับการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลและก๊าซชีวภาพ นั่นก็คือ การใช้เทคโนโลยีความร้อนโดยการเผาโดยตรงและกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน ดังนั้นแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าในส่วนนี้จึงใช้แบบจำลองเดียวกัน แต่จะเพิ่มในส่วนของกระบวนการคัดแยกขยะและเทคโนโลยีในการผลิต RDF ที่มีความไม่แน่นอน จากนั้นจึงนำไปเข้าสู่กระบวนการทางเคมีความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป



ภาพที่ 2.21 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน

จากแบบจำลอง ในส่วนของการคัดแยกขยะนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ โดยตัวอย่างการคัดแยกขยะที่มีค่าเฉลี่ยของสัดส่วนขยะที่สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้อยู่ที่ 90% ของปริมาณขยะทั้งหมดที่สามารถจัดหาได้ สามารถดังแสดงในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 สัดส่วนของขยะที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ต่อปริมาณขยะทั้งหมดที่สามารถจัดหาได้

การใช้เทคโนโลยีเพื่อผลิต RDF นั้นเป็นการเพิ่มศักยภาพให้กับกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานขยะ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่า *Conv. factor* แต่เนื่องจากการผลิต RDF นั้นมีความไม่แน่นอน ดังนั้นจึงกำหนดให้ แบบจำลองส่วน RDF นั้นมีการกระจายตัวแบบปกติรอบค่าๆหนึ่ง และในส่วนของความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงจะยังคงใช้แบบจำลองเดียวกันกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ โดยสามารถแสดงกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน ( $P_{total}$ ) ได้ดังนี้

$$C_{1,t} = (100\% - RDF_t) \cdot (A_t \cdot x_t) \times Conv.factor_1 \times Conv.availability \quad (2.45)$$

$$C_{2,t} = RDF_t \cdot (A_t \cdot x_t) \times Conv.factor_2 \times Conv.availability \quad (2.46)$$

$$P_{total,t} = C_{1,t} \cdot IC_1 + C_{2,t} \cdot IC_2 \quad (2.47)$$

โดยที่	$C_1$	คือ	ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากกระบวนการความร้อนชีวภาพ (ร้อยละเทียบกับกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้า)
	$C_2$	คือ	ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าจากการใช้เทคโนโลยีเชื้อเพลิงขยะ (ร้อยละเทียบกับกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้า)
	$A_t$	คือ	สัดส่วนขยะที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ (ร้อยละเทียบกับความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง)
	$RDF_t$	คือ	ร้อยละของสัดส่วน RDF ต่อความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง ( $x_t$ ) ซึ่งหาได้จากกระบวนการสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ
	$Conv.factor_1$	คือ	ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของเทคโนโลยีความร้อนกับขยะทั่วไป
	$Conv.factor_2$	คือ	ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของเทคโนโลยีความร้อนกับเชื้อเพลิงขยะ
	$P_{total}$	คือ	กำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะ (วัตต์)
	$IC_1$	คือ	กำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะที่ใช้กระบวนการความร้อน
	$IC_2$	คือ	กำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะที่ใช้เทคโนโลยีเชื้อเพลิงขยะ
	$Conv.availability$	คือ	สถานะการทำงานของส่วนแปลงเชื้อเพลิง

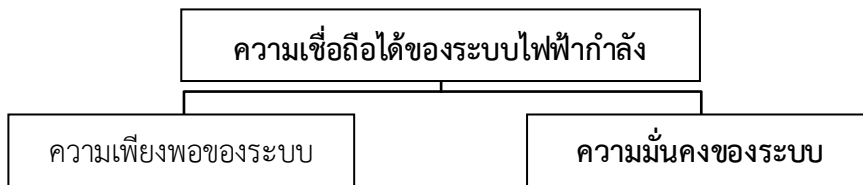
### บทที่ 3

## การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังและหลักการประเมินกำลังผลิตฟังก์ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยทฤษฎีพื้นฐานของการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังและหลักการประเมินค่ากำลังผลิตฟังก์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

### 3.1 การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [24] คือ ความเพียงพอของระบบ (System adequacy) และความมั่นคงของระบบ (System security) ดังแสดงในภาพที่ 3.1

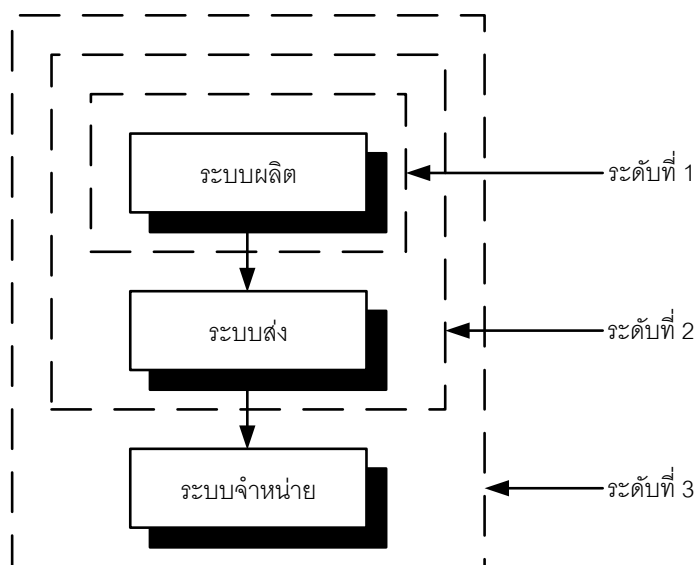


ภาพที่ 3.1 ประเภทของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

ความเพียงพอของระบบ (System adequacy) หมายถึงความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและพลังงานทั้งหมดได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังยังคงทำงานภายในพิกัดและมีระดับแรงดันอยู่ในช่วงที่กำหนด ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state condition)

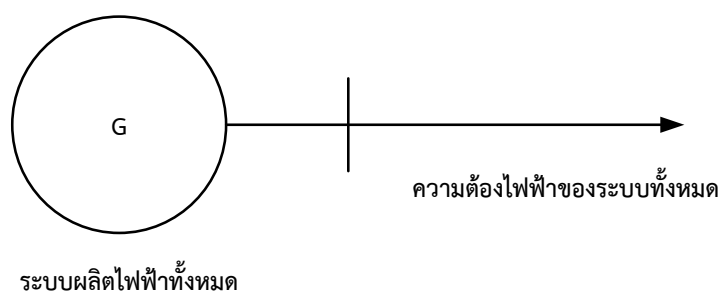
ความมั่นคงของระบบ (System security) หมายถึงความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดซึ่งเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในด้านความมั่นคงของระบบจะทำการวิเคราะห์ในสภาวะพลวัต (Dynamic condition) โดยใช้แบบจำลองพลวัต (Dynamic models)

โดยทั่วไปเราสามารถจำแนกหน้าที่การทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย ดังนั้นในการศึกษาความเชื่อถือได้จึงสามารถแบ่งระดับชั้นในการศึกษาได้ 3 ระดับเช่นกัน ดังในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การแบ่งระดับชั้นในการศึกษาความเชื่อถือได้

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบผลิตไฟฟ้านั้นเป็นการประเมินความสามารถของระบบผลิตไฟฟ้าในระยะยาว ซึ่งจะพิจารณาจากลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าแต่ละประเภท ร่วมกับลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้า เนื่องจากจุดประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ การประเมินค่ากำลังผลิตที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนประเภทต่างๆ ดังนั้นจึงจะไม่พิจารณาผลของระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าในการวิเคราะห์ โดยจะพิจารณาเฉพาะความเชื่อถือได้ของระบบผลิตไฟฟ้าหรือความเชื่อถือได้ในระดับที่ 1 (HL I) เท่านั้น และคิดเสมือนว่าระบบผลิตไฟฟ้าทั้งหมดกับความต้องการไฟฟ้าทั้งหมดเชื่อมต่อกันที่จุดเดียวดังภาพที่ 3.3 [24]



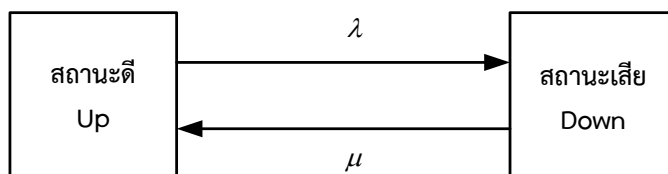
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

### 3.1.1 แบบจำลองสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แบบจำลองการสถานะทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้เป็นส่วนประกอบในแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าทั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนและระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์

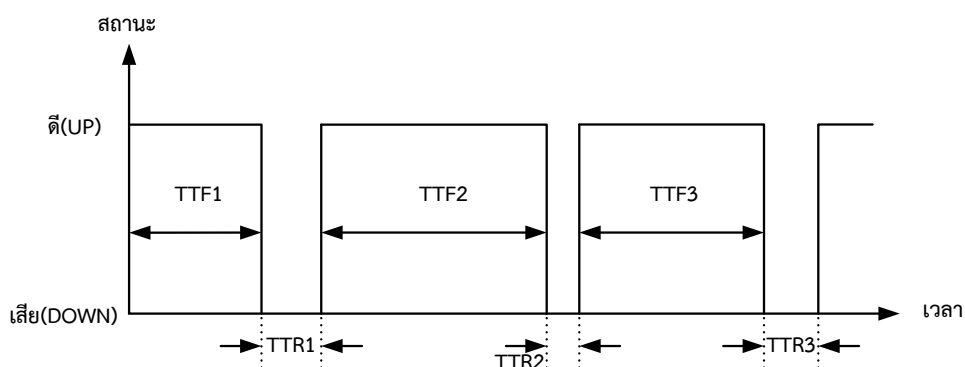


โดยแบบจำลองดังกล่าวจะถูกสร้างจากข้อมูลสถานะการทำงานตลอดอายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นๆ โดยกำหนดให้สถานะการทำงานมี 2 สถานะ คือ “ดี” และ “เสีย” ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.4 และสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาหนึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.4 แบบจำลอง 2 สถานะ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในช่วงเวลาหนึ่ง จะพบว่าลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นจะมีค่าเป็นช่วงคาบเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งประกอบด้วยสถานะการทำงานปกติ “สถานะดี” สลับกับสถานะการทำงานขัดข้อง “สถานะเสีย” จากนั้นจะมีการซ่อมแซมจนสามารถใช้งานได้ดังเดิมเป็น “สถานะดี” ได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 [25]



ภาพที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยที่  $TTF_i$  คือ ระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะ “ดี” ครั้งที่  $i$   
 $TTR_i$  คือ ระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะ “เสีย” ครั้งที่  $i$

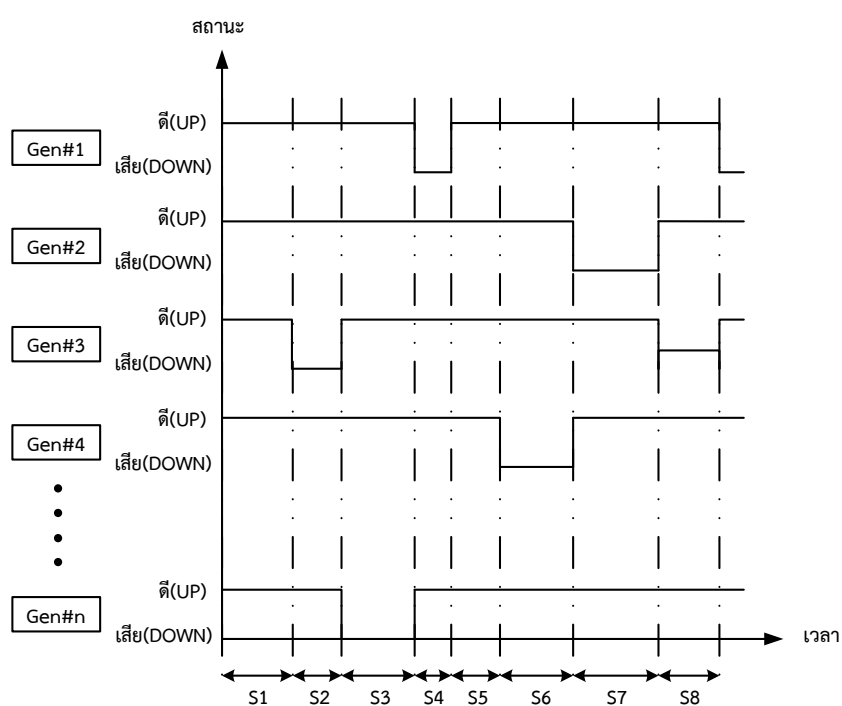
เมื่อพิจารณาการสุ่มสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดภาพที่ 3.5 จะสามารถหาค่าของ  $TTF_i$  และ  $TTR_i$  โดยใช้วิธีการสุ่มแบบ Monte Carlo Simulation ได้ดังนี้

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U) \quad (3.1)$$

$$TTR = r + Z \times (0.1r); \quad r = \frac{1}{\mu} \quad (3.2)$$

โดยที่  $U$  คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution)  
 $Z$  คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution)  
 $\lambda$  คือ อัตราความขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ครั้ง/วัน)  
 $\mu$  คือ อัตราการซ่อมแซมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ครั้ง/วัน)

จากวิธีการสุ่มดังกล่าว เมื่อกำหนดเวลาที่ต้องการ (S) จะสามารถจำลองสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในระบบ ณ เวลานั้นได้ ตัวอย่างผลการสุ่มสถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.6

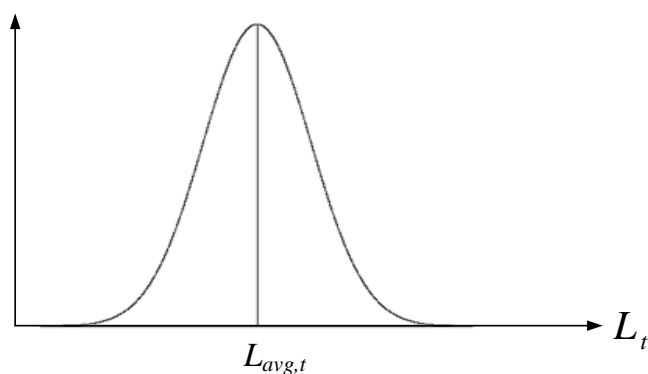


ภาพที่ 3.6 สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดจากการสุ่มตามช่วงเวลา

เมื่อได้สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามช่วงเวลาแล้ว จึงนำมาประกอบกับแบบจำลองความไม่แน่นอนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าแต่ละประเภทได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำขนาดเล็ก พลังงานชีวมวล ก๊าซชีวมวลและขยะ) ร่วมกับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าแต่ละประเภทที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 เพื่อสร้างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าแต่ละประเภทตลอดระยะเวลาที่พิจารณา เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับแบบจำลองความต้องการไฟฟ้าในและการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า จะสามารถทำการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทได้

### 3.1.2 แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า

แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการสร้างแบบจำลองโดยกำหนดให้ความต้องการใช้ไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนที่สามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายตัวแบบปกติ แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นค่าคงที่หรือความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ย ( $L_{avg}$ ) และส่วนที่เป็นความแปรปรวนที่มีค่าขึ้นกับขนาดของความต้องการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย [25] สามารถแสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 3.7 แบบจำลองความไม่แน่นอนของความต้องการใช้ไฟฟ้า

$$L_{t,i} = L_{avg,t} + Z_L \times \alpha \sqrt{L_{avg,t}} \quad (3.3)$$

- โดยที่
- $L_{t,i}$  คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้า ณ ชั่วโมงที่  $t$  จุดเวลาที่  $i$
  - $L_{avg,t}$  คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย ณ ชั่วโมงที่  $t$
  - $Z_L$  คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติ  $Z_L \sim N(0,1)$
  - $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีค่าเท่ากับ 0.6
  - $i$  คือ จุดเวลาที่พิจารณา มีค่าเท่ากับ 1/4 , 2/4 , 3/4 และ 4/4

### 3.1.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

หลักการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาจากระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งวัดจากโอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้าหรือ *Loss of Load Probability (LOLP)* ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนกับระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ โดยกำลังการผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจะถูกกำหนดให้มี

ค่าเท่ากับขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าทั้งสองมีความเชื่อถือได้ซึ่งวัดจาก *LOLP* เท่ากัน

โอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับหรือ *LOLP* เป็นดัชนีที่ใช้ชี้วัดความเชื่อถือของระบบไฟฟ้าโดยมักจะระบุเป็นระยะเวลาที่ยอมให้ระบบไฟฟ้าเกิดไฟฟ้าดับภายใน 1 ปี ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4) สำหรับประเทศไทยนั้น มีการกำหนดค่าระดับความเชื่อถือได้ของระบบผลิตไฟฟ้าโดยกำหนดให้ *LOLP* ต้องมีค่าไม่เกิน 24 ชั่วโมงต่อปี

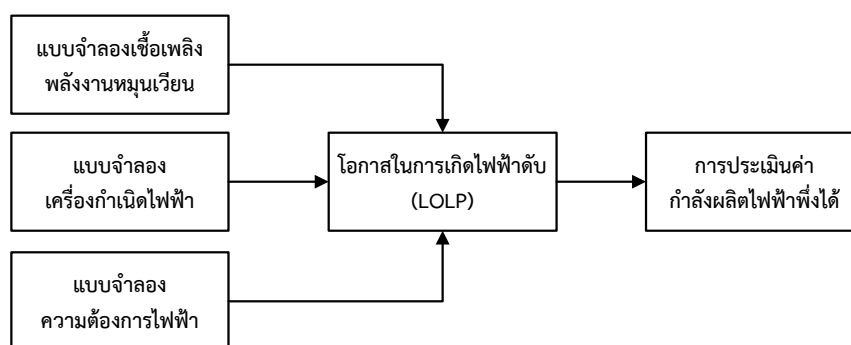
$$LOLP = \frac{\sum_t^T e(P_t < L_t)}{T} \quad (3.4)$$

โดยที่  $e(P_t < L_t)$  คือ ช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์ที่กำลังผลิต ณ เวลานั้น ( $P_t$ ) มีค่าน้อยกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ณ เวลานั้น ( $L_t$ )  
 $T$  คือ จำนวนจุดเวลาทั้งหมดที่พิจารณา

### 3.2 หลักการประเมินกำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

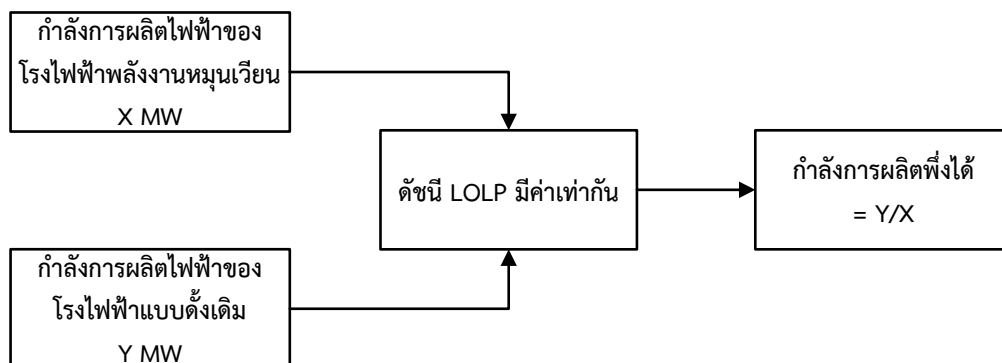
การประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้นจะเริ่มจากการพยากรณ์เชื้อเพลิงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจากแบบจำลองพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไป ได้แก่ ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อัตราการไหลของน้ำ และความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ จากนั้นจึงนำเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการแปลงเชื้อเพลิงเป็นพลังงานไฟฟ้า

การประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจะพิจารณาโดยอาศัยลักษณะการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ประกอบกับลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้า จากนั้นจึงประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้โดยพิจารณาจากระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งวัดจากโอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับหรือ *LOLP* ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนโดยอาศัยดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

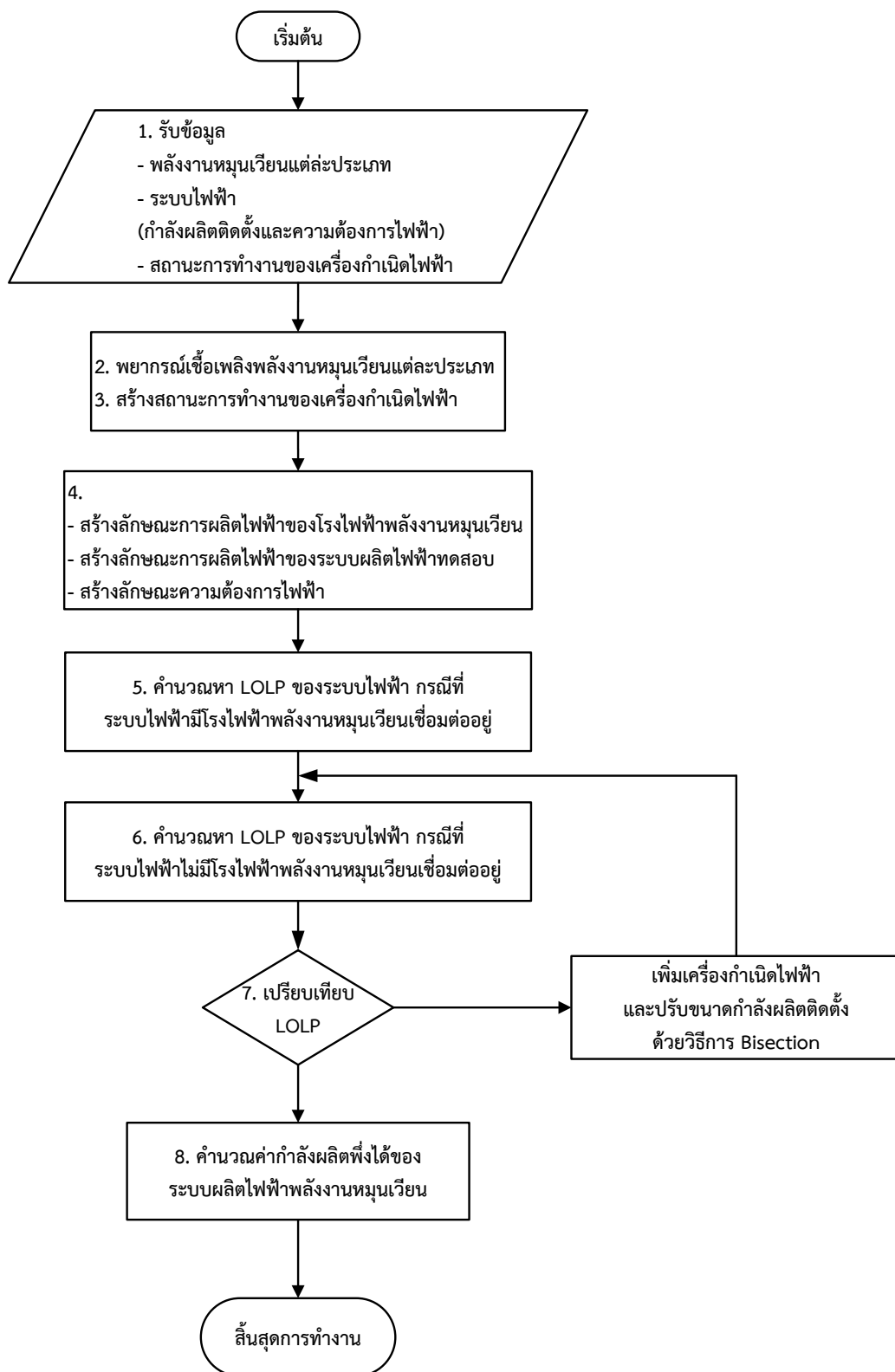
ค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนสามารถหาได้โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์แบบดั้งเดิม และจะถูกกำหนดให้เท่ากับขนาดระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าทั้งสองมีความเชื่อถือได้ซึ่งวัดจากโอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับเท่ากัน หลักการดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองของเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียนอันได้แก่แบบจำลองความเร็วลม แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม แบบจำลองอัตราการไหลของน้ำ และแบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ บนพื้นฐานของข้อมูลจริงในทางปฏิบัติเพียงบางส่วนเท่านั้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองเหล่านี้ได้ถูกสร้างให้มีความสอดคล้องและมีความยืดหยุ่นต่อการประยุกต์ใช้งานแล้ว ดังนั้น หากมีข้อมูลที่มากเพียงพอ วิธีการที่นำเสนอก็สามารถถูกนำไปใช้กำหนดกำลังผลิตพึงได้ที่เหมาะสมของประเทศไทยได้

แผนภาพแสดงขั้นตอนการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แผนผังขั้นตอนการประเมินค่ากำลังผลิตที่ได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

ขั้นตอนการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. รับข้อมูล

- พลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภท
- ระบบผลิตไฟฟ้า (กำลังผลิตติดตั้งและสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า)
- ขนาดความต้องการใช้ไฟฟ้า

2. สร้างลักษณะพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภท (ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพ) จากแบบจำลอง

3. สร้างสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า ทั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนและระบบผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์

4. จากขั้นตอนที่ 2 และ 3

- สร้างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน
- สร้างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์
- สร้างลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้า

5. คำนวณค่า  $LOLP_{RE}$  ของระบบไฟฟ้า ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าทดสอบมีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่ออยู่

6. คำนวณค่า  $LOLP_{CV}$  ของระบบไฟฟ้า ในกรณีที่ระบบไฟฟ้าทดสอบไม่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่ออยู่

7. เปรียบเทียบค่าที่ได้จาก ขั้นตอนที่ 5 และ 6 โดยมีเงื่อนไขการทำซ้ำดังนี้ คือ  $abs(LOLP_{RE} - LOLP_{CV}) \geq 10^{-8}$

- ถ้า  $abs(LOLP_{RE} - LOLP_{CV}) \geq 10^{-8}$  ให้เพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องให้กับระบบไฟฟ้าทดสอบที่ไม่มีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเชื่อมต่ออยู่ และปรับขนาดกำลังผลิตติดตั้งด้วยวิธีการ Bisection จากนั้น เข้าสู่ขั้นตอนที่ 6

- ถ้า  $abs(LOLP_{RE} - LOLP_{CV}) < 10^{-8}$  ให้เข้าสู่ขั้นตอนที่ 8

8. คำนวณค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โดยมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้าทดสอบกับขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

## บทที่ 4

### การทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบวิธีการประเมินค่ากำลังผลิตฟั้งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างแบบจำลองเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียน แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า ที่ได้นำเสนอข้างต้น จากนั้นจึงนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเพื่อประเมินค่ากำลังผลิตไฟฟ้าฟั้งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าต่อไป

#### 4.1 ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบที่ใช้ในการประเมินค่ากำลังผลิตไฟฟ้าฟั้งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้น จะอาศัยข้อมูลของระบบไฟฟ้า 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าและข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยระบบทดสอบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งตามความเหมาะสมของขนาดกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี โดยแยกเป็นพลังงานทดแทนเพื่อการผลิตไฟฟ้า 6 ชนิด ดังนี้

1. พลังงานแสงอาทิตย์
2. พลังงานลม
3. ไฟฟ้าพลังน้ำ
4. ชีวมวล
5. ก๊าซชีวภาพ
6. พลังงานจากขยะชุมชน

จากขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนข้างต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงแบ่งระบบทดสอบเป็น 2 ระบบ ดังนี้

##### 4.1.1 ระบบทดสอบอ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573

ระบบทดสอบนี้จะใช้ในการประเมินค่ากำลังผลิตฟั้งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ (ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและขยะ) โดยระบบทดสอบนี้จะใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้าตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2553-2573 โดยเลือกพิจารณาที่ปี พ.ศ. 2555 และใช้ขนาดความต้องการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมงของปี พ.ศ. 2555 เป็นค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าในการพิจารณา



#### 4.1.1.1 ระบบผลิตไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าอ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2553-2573 ณ ปี พ.ศ. 2555 มีกำลังผลิตติดตั้งรวมทั้งหมด 29,231.44 MW มีรายละเอียดของข้อมูลแสดงในภาคผนวก ก. ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าประเภทต่างๆ ดังนี้

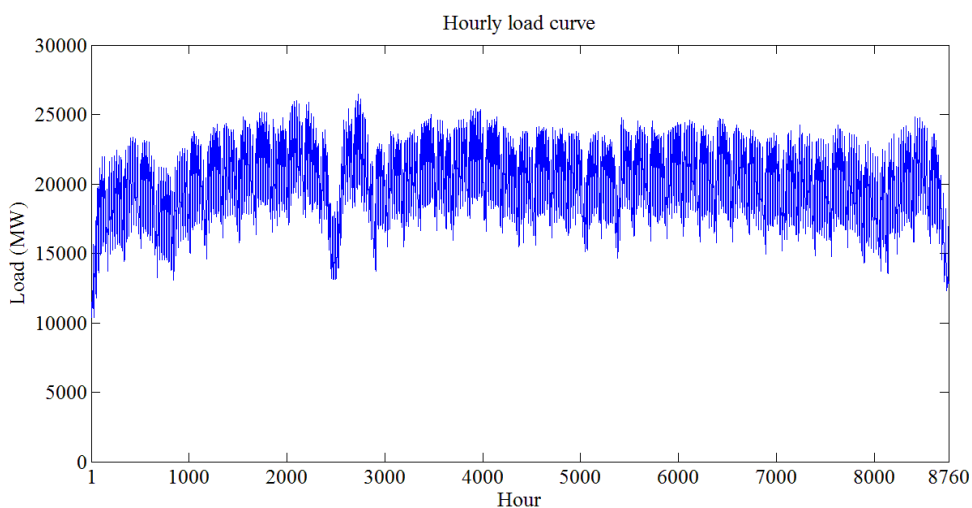
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดข้อมูลโรงไฟฟ้าอ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 ณ ปี พ.ศ. 2555

ประเภทโรงไฟฟ้า	จำนวนโรงไฟฟ้า (โรง)	กำลังผลิตติดตั้งรวม (เมกะวัตต์)
โรงไฟฟ้าพลังน้ำ	17	3,423.74
โรงไฟฟ้าพลังความร้อน	23	7,775.70
โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม	51	17,079.10
โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ	1	4.40
โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวล	8	304.00
การรับซื้อไฟฟ้าจากต่างประเทศ	-	640.00
โรงไฟฟ้าพลังงานลม	1	2.00
โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	1	2.50

#### 4.1.1.2 ความต้องการใช้ไฟฟ้า

ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าตามระบบทดสอบนี้ จะเป็นข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดรายชั่วโมง ในปี พ.ศ. 2555 รวมทั้งสิ้น 8,760 ชั่วโมง ซึ่งมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 26,355 เมกะวัตต์ และมีรายละเอียดของข้อมูลแสดงในภาคผนวก ข.

ในการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมงดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า เพื่อสร้างความไม่แน่นอนให้กับความต้องการใช้ไฟฟ้ารายชั่วโมง และจำลองเหตุการณ์จนครบระยะเวลาที่ทำการประเมินค่ากำลังผลิตได้ ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดรายชั่วโมงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดรายชั่วโมง ปี พ.ศ.2555

## 4.2 สมมติฐานและวิธีการที่ใช้ในการทดสอบ

### 4.2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ

สมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้า มีดังนี้

1) กำหนดให้โรงไฟฟ้าที่มีอยู่จริงในระบบไฟฟ้า (ทั้งโรงไฟฟ้าประเภทเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ และพลังงานหมุนเวียน) ตามระบบทดสอบในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 แต่ละโรงประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง ขนาดเท่ากับกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าและถือว่าโรงไฟฟ้ามีเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าได้ตามพิกัดของโรงไฟฟ้านั้นๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการจำลองเหตุการณ์

2) กำหนดให้โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่ต้องการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้แต่ละโรงประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่อง และมีขนาดเท่ากับกำลังผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้านั้นๆ

3) ไม่คำนึงถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4) รายละเอียดสถานะการทำงานของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทอ้างอิงตาม IEEE Reliability Test System ซึ่งอยู่ในภาคผนวก ง.

### 4.2.2 วิธีการที่ใช้ในการทดสอบ

วิธีการที่ใช้ในการทดสอบการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน มีรายละเอียดดังนี้

1) ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ ตามลำดับ จะใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงโดยมีรายละเอียดตาม ภาคผนวก ค.

2) อัตราการไหลของน้ำสำหรับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กจะใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายวันที่สมมติขึ้น และมีรายละเอียดข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กตามภาคผนวก ค.

3) ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงสำหรับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพจะใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนที่สมมติขึ้น

4) ระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบนี้จะถูกดัดแปลงในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าให้ระบบไฟฟ้ามีค่า LOLP เริ่มต้น ประมาณ 24 ชั่วโมงต่อปี (ที่มา: แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2551 – 2564 หรือ PDP 2007)

5) แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้า จะถูกพยากรณ์ทุกๆ 15 นาที และกรอบระยะเวลาที่พิจารณาทั้งหมดเท่ากับ 100 ปี

6) ค่ากำลังผลิตไฟฟ้าที่พึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทจะถูกประเมินทั้งหมด 2 รูปแบบด้วยกัน คือ ตลอดระยะเวลาที่ทำการพิจารณา (100 ปี) และตามช่วงเวลาที่น่าสนใจ ได้แก่ 14.00-15.00 น., 19.00-20.00 น. และ 22.00-05.00 น. ซึ่งถือเป็นช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของวันครั้งแรก ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของวันครั้งที่สอง และช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ ตามลำดับ

#### 4.2.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

1) กำหนดให้ ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ  $eff_w$  และ  $eff_s$  ตามลำดับ มีค่าเท่ากับ 100%

2) กำหนดให้ รูปแบบความสัมพันธ์ของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ได้จากข้อมูลจริง ในช่วงเวลา 7.00 น. – 13.00 น. เทียบได้กับ รูปแบบมาตรฐาน คือ Gumbel Copula และในช่วงเวลา 14.00 น. – 18.00 น. นั้น จะเทียบได้กับ รูปแบบมาตรฐาน คือ Frank Copula

3) กำหนดให้ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ  $-0.0035 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  และ ค่า NOCT มีค่าเท่ากับ  $46 \text{ }^{\circ}\text{C}$

4) กำหนดให้ แบบจำลองอัตราการไหลของน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50 ลิตรต่อวินาที และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 25% ของค่าเฉลี่ย

5) กำหนดให้ ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ที่มีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) และค่าพารามิเตอร์สเกล (Scale parameter) เท่ากับ 2.48 และ 4.52 ตามลำดับ ซึ่งจะได้ความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 40% ของกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ จากนั้นจึงทำการปรับระดับค่าเฉลี่ยของความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงให้อยู่ในช่วง 60%-70%

6) กำหนดให้ *Conv. factor* ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1% ของค่าเฉลี่ยนี้ สำหรับส่วนของ *Conv. availability* ของเทคโนโลยีการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพนั้น จะกำหนดให้มีอัตราการขัดข้อง (FOR) เท่ากับ 0.1 ครั้งต่อวัน

7) กำหนดให้ *Conv. factor* ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ โดยมีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) และค่าพารามิเตอร์สเกล (Scale parameter) เท่ากับ 25 และ 55 ตามลำดับ ซึ่งจากการแจกแจงดังกล่าวจะได้สัดส่วนปริมาณก๊าซมีเทนต่อก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55% จากนั้นจึงนำไปเทียบกับสัดส่วนก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ออกแบบไว้คือ 55% เพื่อแปลงเป็น *Conv. factor* ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ สำหรับส่วนของ *Conv. availability* ของเทคโนโลยีการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพนั้น จะกำหนดให้มีอัตราการขัดข้อง (FOR) เท่ากับ 0.15 ครั้งต่อวัน

8) กำหนดให้ การคัดแยกขยะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชนสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ ที่มีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape parameter) และค่าพารามิเตอร์สเกล (Scale parameter) เท่ากับ 40 และ 90 ตามลำดับ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) นั้น จะถูกกำหนดให้สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 ในส่วนของค่า *Conv. factor<sub>1</sub>* นั้น จะสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1% ของค่าเฉลี่ยและ *Conv. factor<sub>2</sub>* จะถือว่ามีความค่าเท่ากับ 100% สุดท้าย ในส่วนของ *Conv. availability* ของเทคโนโลยีการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพนั้น จะกำหนดให้มีอัตราการขัดข้อง (FOR) เท่ากับ 0.1 ครั้งต่อวัน เช่นเดียวกับระบบผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวล

#### 4.3 ผลการทดสอบ

ในการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้น จะพิจารณาโดยอาศัยลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนประกอบกับลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้า จากนั้นจึงประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้โดยกำหนดจากระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนี้

- 1) ผลการจำลองพลังงานหมุนเวียน
- 2) ผลการจำลองเทคโนโลยีในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้า
- 3) ผลการจำลองลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน
- 4) ผลการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

### 4.3.1 ผลการจำลองพลังงานหมุนเวียน

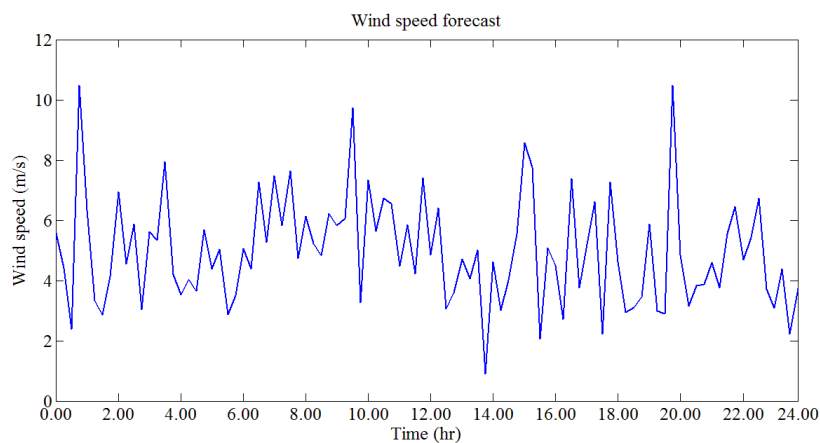
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เชื่อเพลิงพลังงานหมุนเวียนสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแต่ละประเภทจะถูกสร้างด้วยแบบจำลองพลังงานหมุนเวียนที่แตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะเฉพาะของพลังงานหมุนเวียนประเภทนั้นๆ แบบจำลองที่ใช้จำเป็นต้องมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับลักษณะของพลังงานหมุนเวียน อาทิเช่น ความเร็วลมและความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วตลอดเวลา เป็นต้น

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองความเร็วลม แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และแบบจำลองอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จะใช้ข้อมูลรายชั่วโมงในการสร้างลักษณะพลังงานหมุนเวียนดังกล่าว เนื่องจากลมหรือแสงอาทิตย์นั้นมีความไม่แน่นอนและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา นอกจากพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วแล้ว แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมยังมีลักษณะเฉพาะอีกด้วย นั่นก็คือ ปัจจัยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันและสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

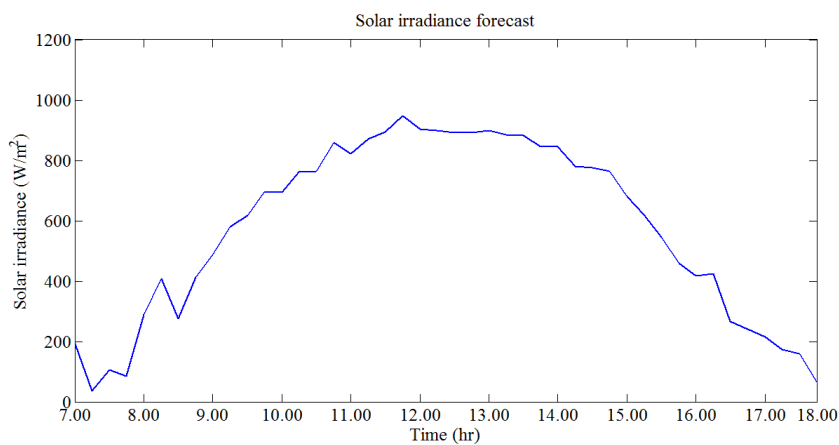
แบบจำลองอัตราการไหลของน้ำสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กจะใช้ข้อมูลรายวันในการสร้างลักษณะอัตราการไหลของน้ำ โดยกำหนดให้ความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติรอบค่าเฉลี่ยค่าหนึ่งและมีความแปรปรวนขึ้นกับค่าเฉลี่ยดังกล่าวเพื่อสะท้อนถึงลักษณะความเป็นจริงของน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและฤดูกาล

แบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพจะถูกสร้างโดยสมมุติฐานที่ว่าเชื้อเพลิงชีวภาพ อันได้แก่ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพและขยะนั้น สามารถจัดหาเพื่อผลิตไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่าค่าๆหนึ่งและจะมีความสามารถดังกล่าวจะลดลงเรื่อยๆเมื่อมีความต้องการเชื้อเพลิงชีวภาพในปริมาณมากๆ ดังนั้นแบบจำลองดังกล่าวจึงถูกกำหนดให้สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์แบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพจะอาศัยข้อมูลรายเดือนในการสร้างลักษณะความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิง

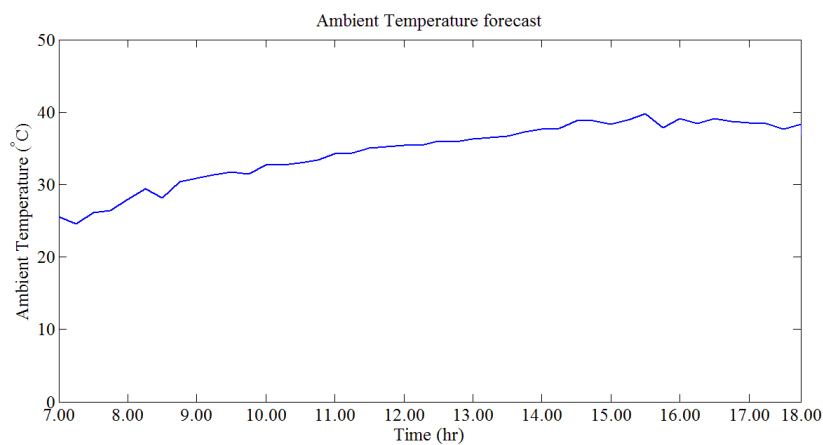
ลักษณะพลังงานหมุนเวียนสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแต่ละประเภทเหล่านี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้าและการประเมินค่ากำลังผลิตที่ได้ของระบบผลิตไฟฟ้าต่อไป โดยลักษณะเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียนแยกตามประเภทเชื้อเพลิงทั้ง 4 ประเภท ที่สร้างจากแบบจำลองพลังงานหมุนเวียนที่ได้นำเสนอสามารถแสดงภาพที่ 4.2 -ภาพที่ 4.6



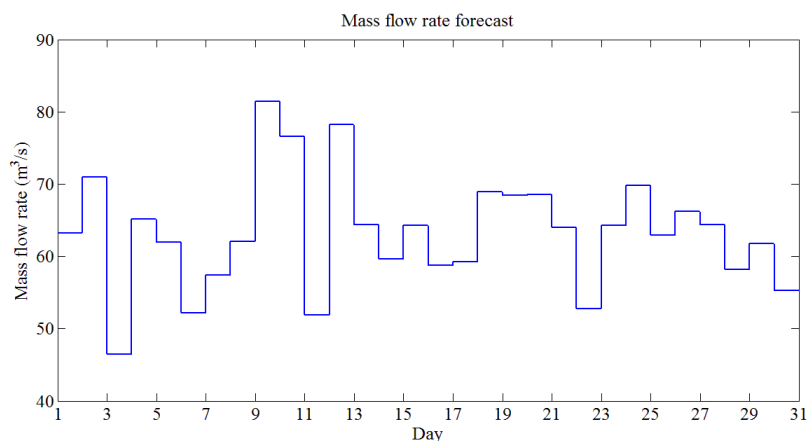
ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างลักษณะความเร็วลมรายชั่วโมงในรอบ 1 วัน



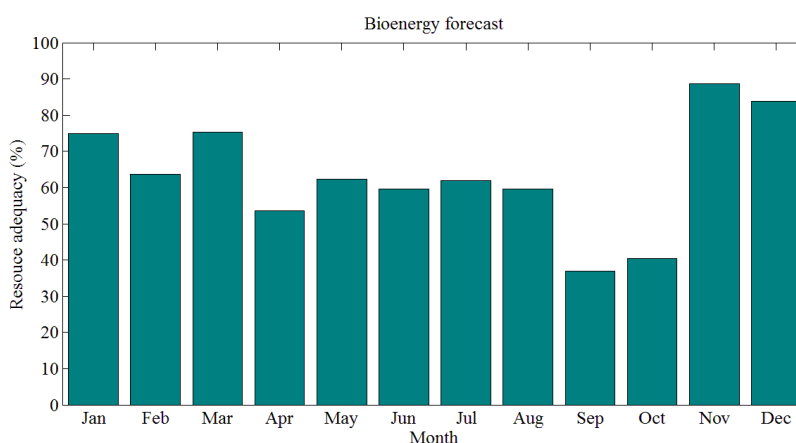
ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างลักษณะความเข้มแสงอาทิตย์รายชั่วโมง ณ ช่วงเวลา 7.00 น.-18.00 น.



ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายชั่วโมงในรอบ 1 วัน ณ ช่วงเวลา 7.00 น.-18.00 น.



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างลักษณะอัตราการไหลของน้ำรายวันในรอบ 1 เดือน



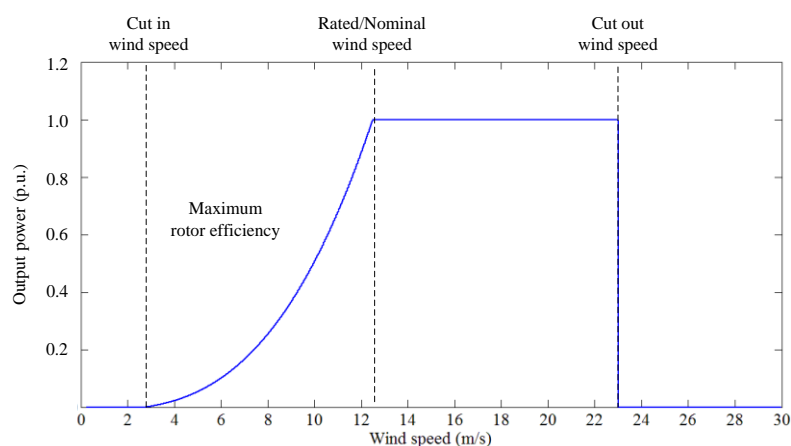
ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างลักษณะความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพรายเดือนในรอบ 1 ปี

### 4.3.2 ผลการจำลองเทคโนโลยีในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้า

ลักษณะการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทจะถูกสร้างโดยอาศัยแบบจำลองที่มีลักษณะแตกต่างกันตามเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียน ด้วยทฤษฎีพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าที่กล่าวมาแล้วพบว่า พลังงานหมุนเวียนส่วนใหญ่ ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานชีวภาพจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลโดยตรงหรือทางอ้อม จากนั้นจึงเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป สำหรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้าทั้งทางตรงและทางอ้อมจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแปลงพลังงานและข้อจำกัดของเทคโนโลยีนั้นๆเป็นสำคัญ

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กจะใช้แบบจำลองในการแปลงพลังงานหมุนเวียนที่มีลักษณะคล้ายกัน นั่นคือ ความเร็วลมและอัตราการไหลของน้ำจะถูกใช้ในการหมุนกังหันเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานกล จากนั้นจึงนำพลังงานกลดังกล่าวเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่อง

กำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้า กระบวนการเช่นนี้เรียกได้ว่าเป็นการนำพลังงานหมุนเวียนมาเปลี่ยนเป็นพลังงานกลโดยตรง ถึงแม้ว่าพลังงานลมและพลังงานน้ำจะสามารถใช้งานได้โดยตรง แต่ข้อจำกัดของการแปลงพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวก็คือ ตัวกังหันลมและกังหันน้ำนั่นเอง เนื่องจากกังหันลมและกังหันน้ำนั้นไม่สามารถทำงานตลอดทุกระดับของความเร็วลมและอัตราการไหลของน้ำ โดยผลการจำลองลักษณะการแปลงพลังงานลมแสดงได้ดังภาพที่ 4.7

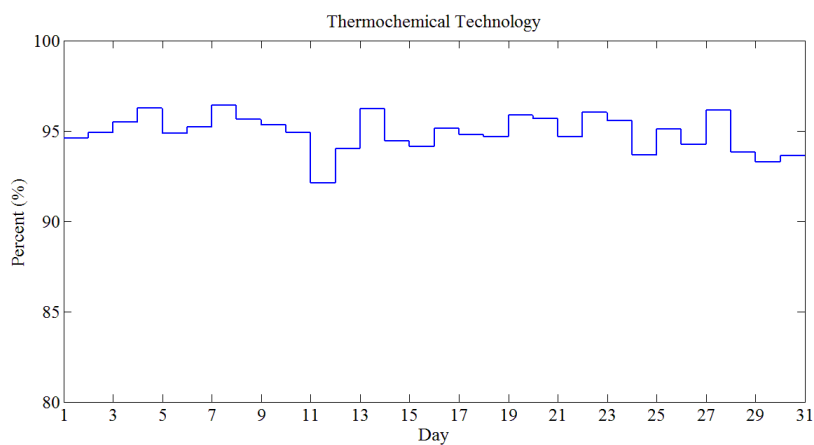


ภาพที่ 4.7 ระดับความเร็วลมกับช่วงการทำงานของกังหันลม

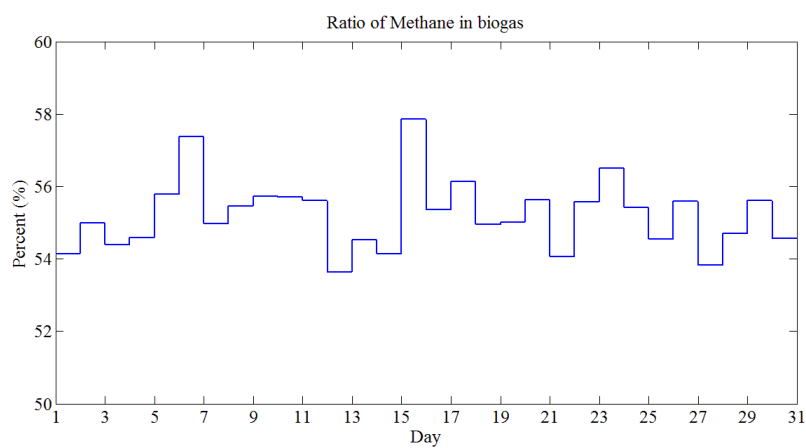
ในส่วนขอระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพ อันได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซธรรมชาติ และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะนั้น แบบจำลองของเทคโนโลยีในการแปลงพลังงานชีวภาพดังกล่าวจะแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานความร้อนและแบบจำลองสถานะการทำงานของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานความร้อนเพื่อผลิตไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้าในลักษณะนี้ถือได้ว่าเป็นการแปลงพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานกลทางอ้อม

แบบจำลองของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานความร้อนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล พลังงานก๊าซธรรมชาติและพลังงานขยะจะถูกสร้างโดยอาศัยแบบจำลองความน่าจะเป็น สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้แปลงเป็นพลังงานความร้อนคือเตาเผาเท่านั้น ดังนั้นจึงถือว่าความไม่แน่นอนของเทคโนโลยีดังกล่าวมีน้อยมากโดยกำหนดให้สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติและมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เฉลี่ยเท่ากับ 95% แต่ในส่วนของการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นจะกำหนดให้สัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีความไม่แน่นอนที่สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงเป็นพลังงานความร้อนของก๊าซชีวภาพนั้นมีความไม่แน่นอนและสำหรับเชื้อเพลิงขยะนั้นเทคโนโลยีที่ใช้แปลงเชื้อเพลิงเป็นพลังงานร้อนจะมีลักษณะคล้ายกันกับเชื้อเพลิงชีวมวลแต่จะมีการเพิ่มเติมในส่วนของเทคโนโลยีการแปลงขยะบางส่วนให้เป็นเชื้อเพลิงขยะ (RDF) เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้และให้พลังงานความร้อนที่สูงขึ้น ผลการจำลองความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ความไม่แน่นอนของสัดส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพและสัดส่วนเชื้อเพลิงขยะจากขยะชุมชนที่จัดหาได้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.9 - ภาพที่ 4.10 ตามลำดับ

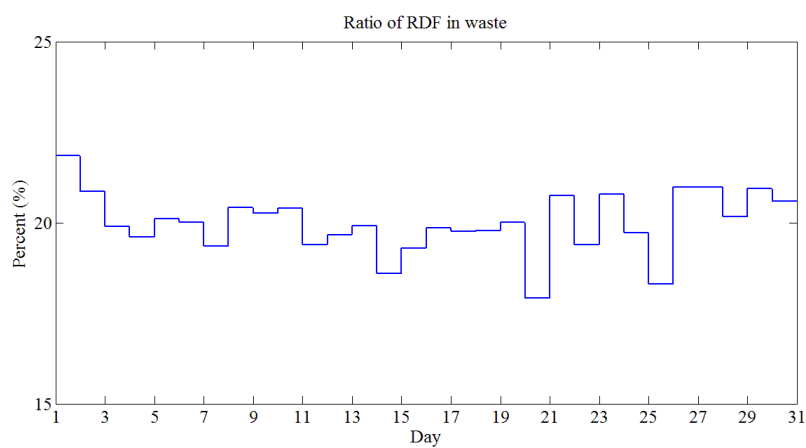




ภาพที่ 4.8 ความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพในการเผาไหม้

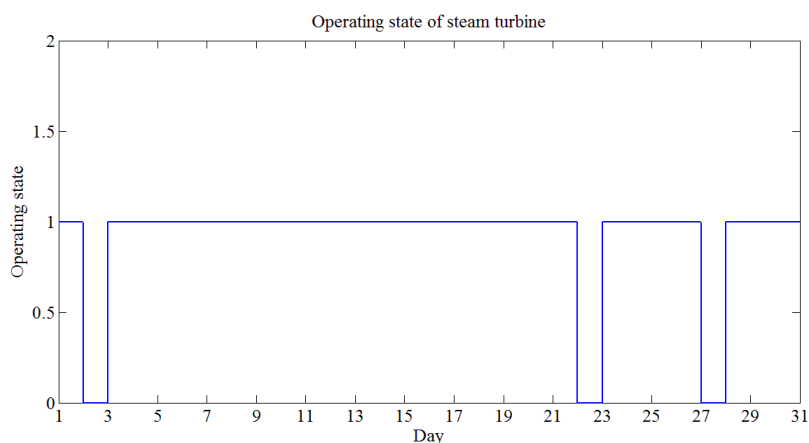


ภาพที่ 4.9 ลักษณะสัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพรายวันในรอบ 1 เดือน

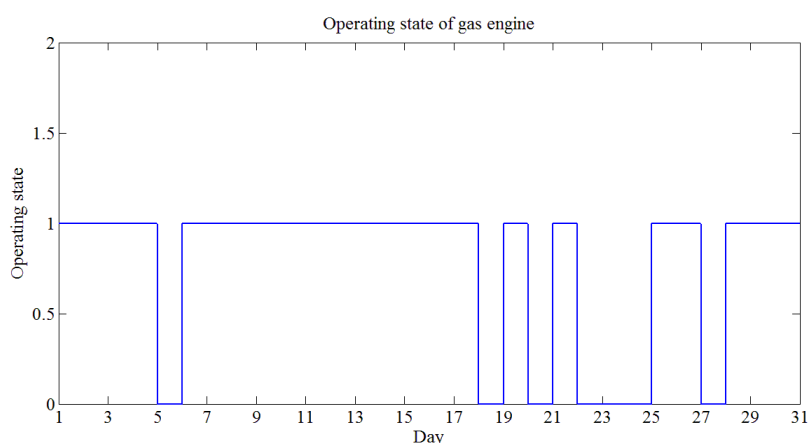


ภาพที่ 4.10 ลักษณะสัดส่วนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ (RDF) รายวันในรอบ 1 เดือน

แบบจำลองสถานะการทำงานของส่วนเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นจะถูกสร้างโดยอาศัยแบบจำลองความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติที่มีมากกว่าเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวมวลและขยะ ดังนั้นแบบจำลองสถานะการทำงานของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติจึงถูกออกแบบให้มีโอกาสเสียมากกว่าเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวมวลและขยะ ตัวอย่างสถานะการทำงานของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพและสถานะการทำงานของเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงชีวมวล/ขยะ แสดงได้ดังภาพที่ 4.11 และภาพที่ 4.12 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.11 สถานะการทำงานของกังหันน้ำรายวันในรอบ 1 เดือน



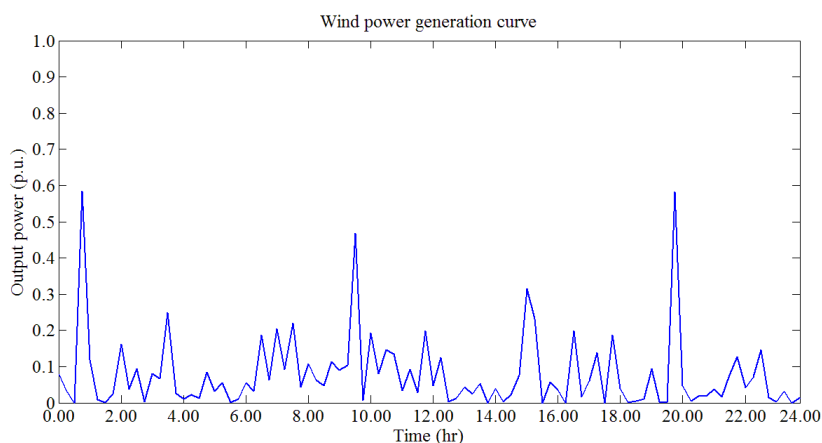
ภาพที่ 4.12 สถานะการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซรายวันในรอบ 1 เดือน

### 4.3.3 ผลการจำลองลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

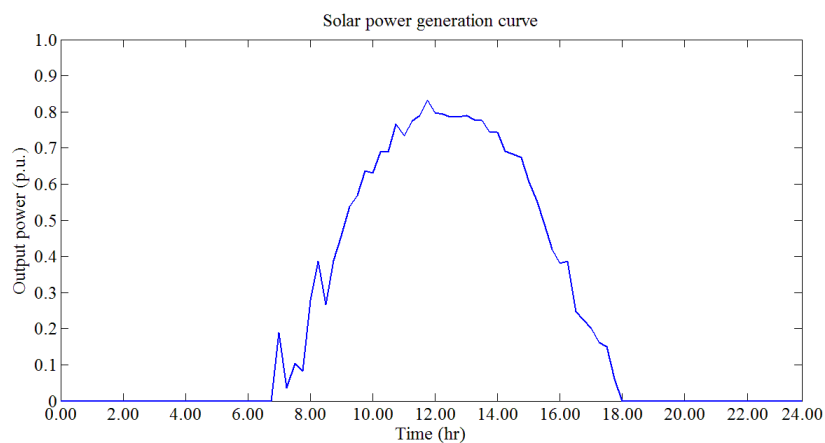
ลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนตลอดช่วงเวลาที่พิจารณาจะถูกสร้างโดยอาศัยแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีความแตกต่างกันไปเช่นเดียวกับ

ลักษณะเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียน กำลังผลิตที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้นจะขึ้นกับเทคโนโลยี กระบวนการและความสามารถในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและพลังงานน้ำใช้ความเร็วลมและอัตราการไหลของน้ำในการหมุนกังหันเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าแต่ก็มีข้อจำกัดคือเมื่อมีความเร็วลมหรืออัตราการไหลของน้ำที่น้อยหรือมากจนเกินไป กังหันจะไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าแต่เมื่อสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถทำงานที่จุดทำงานปกติได้ และในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพที่อาศัยเทคโนโลยีความร้อน เทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพ เทคโนโลยีในการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย จะมีประสิทธิภาพในการทำงานในแต่ละส่วนที่แตกต่างกันออกไป เป็นต้น

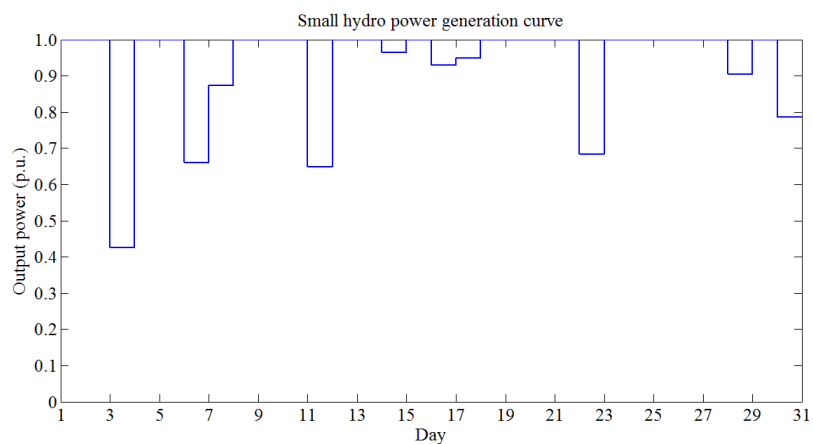
ลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับลักษณะความต้องการใช้ไฟฟ้าและเข้าสู่การประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า อันได้แก่โอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับ (LOLP) เพื่อประเมินค่ากำลังผลิตไฟฟ้าพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภท โดยลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแยกตามประเภทระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทั้ง 6 ประเภท ที่สร้างจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่ได้นำเสนอสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.13 - ภาพที่ 4.18



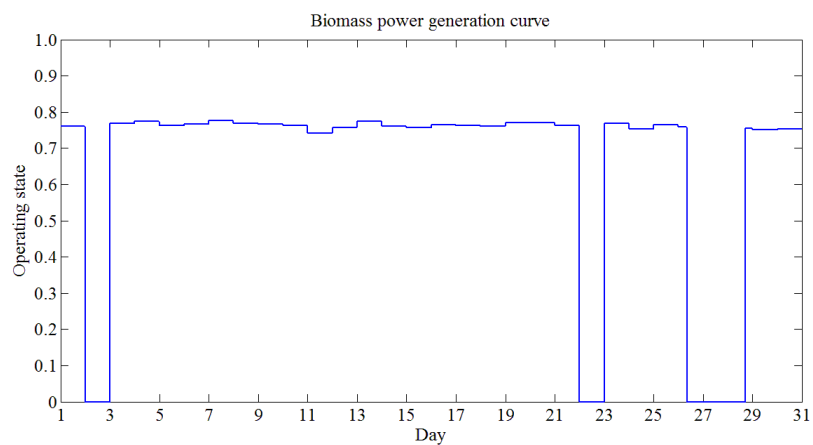
ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมรายชั่วโมง ในรอบ 1 วัน



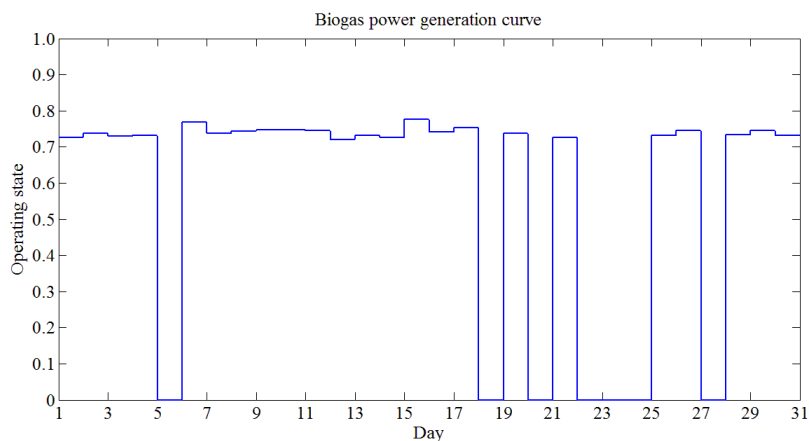
ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายชั่วโมง  
ในรอบ 1 วัน



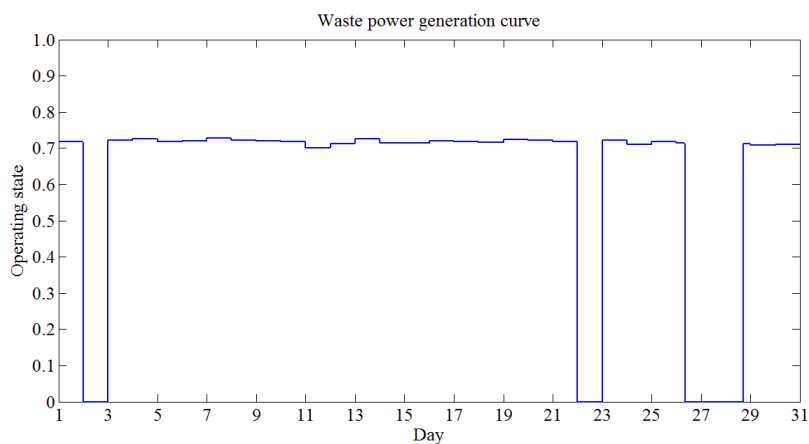
ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กรายวัน  
ในรอบ 1 เดือน



ภาพที่ 4.16 ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลรายวัน  
ในรอบ 1 เดือน



ภาพที่ 4.17 ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพรายวัน  
ในรอบ 1 เดือน



ภาพที่ 4.18 ตัวอย่างลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะรายวัน ในรอบ 1 เดือน

#### 4.3.4 ผลการประเมินค่ากำลังผลิตที่ได้ออกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

ผลการประเมินค่ากำลังผลิตที่ได้ออกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ณ กำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดต่างๆ แยกตามประเภทระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนทั้ง 6 ประเภท คือ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซธรรมชาติ และ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.2 -ตารางที่ 4.7 ตามลำดับดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)			
		All day	14:00-15:00	19:00-20:00	22:00-05:00
100.00	11.57	12.96	12.89	14.06	25.00
200.00	11.57	11.62	9.57	11.72	15.63
300.00	11.57	10.82	10.55	10.34	10.94
400.00	11.57	11.28	10.30	10.16	7.81
500.00	11.57	11.27	10.55	9.77	6.25
600.00	11.57	10.95	10.77	9.18	5.47
700.00	11.57	11.16	10.66	9.28	6.25
800.00	11.57	11.10	10.55	10.35	8.30
900.00	11.57	11.26	10.50	9.96	7.32
1000.00	11.57	11.30	10.93	9.81	6.64

สรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม

- เมื่อพิจารณาที่กรอบระยะเวลา 100 ปี ช่วงเวลา 14.00 น. - 15.00 น. และ ช่วงเวลา 19.00 น. - 20.00 น. พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีแนวโน้มคงที่และมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความต่อเนื่องของพลังงานลมตลอดทุกช่วงเวลา

- เมื่อพิจารณาช่วงเวลา 22.00 น. - 05.00 น. พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเวลาดังกล่าวระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงกว่าในช่วงเวลาอื่นๆ การเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมไม่สามารถทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)			
		All day	14:00-15:00	19:00-20:00	22:00-05:00
100.00	19.19	37.59	51.56	0.00	0.00
200.00	19.19	38.39	45.12	0.00	0.00
300.00	19.19	38.64	47.66	0.00	0.00
400.00	19.19	37.36	46.66	0.00	0.00
500.00	19.19	37.30	46.83	0.00	0.00
600.00	19.19	36.28	45.70	0.00	0.00
700.00	19.19	35.49	46.78	0.00	0.00
800.00	19.19	34.72	46.89	0.00	0.00
900.00	19.19	33.91	45.95	0.00	0.00
1000.00	19.19	33.02	45.67	0.00	0.00

### สรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

- ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถทำงานได้ในช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เท่านั้น คือ 7.00 น. – 18.00 น.

- เมื่อพิจารณาที่กรอบระยะเวลา 100 ปี พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียงช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งทำให้ระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าดีขึ้นในช่วงเวลาที่ผลิตไฟฟ้าได้เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตลอดทุกช่วงเวลาแล้ว ระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจึงดีขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

- เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา 14.00 น. - 15.00 น. พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่นๆและมีแนวโน้มคงที่

ตารางที่ 4.4 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)			
		All day	14:00-15:00	19:00-20:00	22:00-05:00
30	70.85	69.92	71.88	64.45	50.00
60	70.85	69.82	71.88	75.00	75.00
90	70.85	71.29	73.05	67.09	87.50
120	70.85	68.31	67.29	67.19	75.00
150	70.85	68.24	66.99	67.97	87.50
180	70.85	69.30	68.75	71.09	75.00
210	70.85	67.80	68.31	65.09	93.75
240	70.85	68.31	67.19	66.41	93.75
270	70.85	68.59	67.97	69.14	90.63
300	70.85	68.70	70.12	68.55	87.50

### สรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

- เมื่อพิจารณาที่กรอบระยะเวลา 100 ปี ช่วงเวลา 14.00 น. - 15.00 น. และ ช่วงเวลา 19.00 น. - 20.00 น. พบว่าค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำมีแนวโน้มคงที่

- เมื่อพิจารณาช่วงเวลา 22.00 น. - 05.00 น. พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างเห็นได้ชัด มีสาเหตุมาจาก ในช่วงเวลาดังกล่าวระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงในระดับหนึ่ง การเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งสามารถช่วยทำให้ค่ากำลังผลิตพึงได้เพิ่มสูงขึ้นก็จริง แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของน้ำ ทำให้ในบางครั้งการเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กไม่สามารถช่วยให้ค่ากำลังผลิตพึงได้เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)			
		All day	14:00-15:00	19:00-20:00	22:00-05:00
100.00	58.55	62.45	63.67	60.55	67.19
200.00	58.55	63.12	67.38	61.72	33.59
300.00	58.55	62.07	62.50	63.28	25.00
400.00	58.55	61.21	61.23	62.50	56.25
500.00	58.55	60.54	60.55	65.63	46.88
600.00	58.55	59.64	59.50	63.43	39.06
700.00	58.55	58.50	58.59	61.82	34.38
800.00	58.55	58.28	58.62	61.33	43.75
900.00	58.55	57.57	58.40	57.65	56.25
1000.00	58.55	57.91	58.30	58.40	50.00

สรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

- เมื่อพิจารณาที่กรอบระยะเวลา 100 ปี ช่วงเวลา 14.00 น. - 15.00 น. และ ช่วงเวลา 19.00 น. - 20.00 น. พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีแนวโน้มคงที่และมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความต่อเนื่องของพลังงานชีวมวลตลอดทุกช่วงเวลา

- เมื่อพิจารณาช่วงเวลา 22.00 น. - 05.00 น. พบว่า ค่ากำลังผลิตพึงได้มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด มีสาเหตุมาจาก ในช่วงเวลาดังกล่าวระบบไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงในระดับหนึ่ง การเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งเพียงเล็กน้อยไม่สามารถทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นจากระดับความเชื่อถือได้เริ่มต้นมากนัก แต่เมื่อเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งให้มีขนาดสูงมากๆ ระบบไฟฟ้าจึงมีระดับความเชื่อถือได้สูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลกลับมาสูงขึ้น



ตารางที่ 4.6 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)			
		All day	14:00-15:00	19:00-20:00	22:00-05:00
100.00	53.31	55.47	56.25	56.64	67.19
200.00	53.31	54.30	54.69	54.30	50.00
300.00	53.31	53.27	53.03	54.69	50.00
400.00	53.31	53.37	53.71	56.79	50.00
500.00	53.31	52.88	52.34	57.64	43.75
600.00	53.31	52.14	52.64	57.42	38.28
700.00	53.31	50.88	51.86	55.47	34.38
800.00	53.31	50.01	51.81	53.61	37.50
900.00	53.31	49.08	51.37	51.46	56.25
1000.00	53.31	49.02	50.81	49.80	50.00

สรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพ

- ค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพนั้นให้ผลลัพธ์ที่มีลักษณะคล้ายกันกับค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลแต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานก๊าซชีวภาพนั้น มีความไม่แน่นอนของส่วนผลิตก๊าซชีวภาพและสถานะการทำงานที่มีโอกาสอยู่ในสถานะ “เสีย” มากกว่าแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

ตารางที่ 4.7 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน

กำลังผลิตติดตั้ง (MW)	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)			
		All day	14:00-15:00	19:00-20:00	22:00-05:00
100.00	54.12	57.81	57.81	57.81	67.19
200.00	54.12	57.62	59.96	57.03	33.59
300.00	54.12	56.84	57.25	59.38	25.00
400.00	54.12	56.76	56.84	58.91	37.50
500.00	54.12	55.99	55.46	60.16	46.09
600.00	54.12	55.52	55.05	59.57	39.06
700.00	54.12	54.71	54.30	58.11	34.38
800.00	54.12	54.02	55.32	57.23	37.50
900.00	54.12	53.82	54.35	54.74	50.00
1000.00	54.12	52.95	54.06	52.15	50.00

### สรุปค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขยะชุมชน

- ค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขะนั้นให้ผลลัพธ์ที่มีลักษณะคล้ายกันกับค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวลแต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานขะนั้นคล้ายกันกับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวมวล แต่เพิ่มเติมในส่วนของการคัดแยกขะและการผลิตเชื้อเพลิงขะ (RDF) ซึ่งมีความไม่แน่นอน

#### 4.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

จากตารางผลการประเมินค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในหัวข้อที่ 5.3.4 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อทำการทดลองเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเป็นจำนวนเท่าของขนาดกำลังผลิตติดตั้งเริ่มต้น พบว่า ในกรณีพิจารณาที่กรอบระยะเวลา 100 ปี ช่วงเวลา 14.00 น. - 15.00 น. และ ช่วงเวลา 19.00 น. - 20.00 น. กำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่า ใกล้เคียงกับจำนวนเท่าของขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน มีแนวโน้มคงที่

2) เมื่อพิจารณาช่วงเวลา 22.00 น. - 05.00 น. พบว่าค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งไม่สามารถทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้เปลี่ยนแปลงจากระดับความเชื่อถือได้เริ่มต้นมากนัก ส่งผลให้ค่ากำลังผลิตฟิ่งได้มีค่าลดลงอย่างชัดเจน สำหรับในกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กและพลังงานชีวภาพค่ากำลังผลิตฟิ่งได้กลับลดลงและเพิ่มขึ้นได้ เป็นเพราะการเพิ่มขนาดกำลังผลิตติดตั้งให้มีขนาดสูงขึ้นในระดับหนึ่งจะทำให้ระบบไฟฟ้าจะมีระดับความเชื่อถือได้สูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น

3) เนื่องจากพลังงานลมและพลังงานชีวภาพนั้นมีความต่อเนื่องของเชื้อเพลิงและการผลิตไฟฟ้า ส่งผลให้ค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมและพลังงานชีวภาพมีค่าใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้า ส่วนในกรณีของพลังงานน้ำนั้นถือเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีความไม่แน่นอนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่นๆ

4) ในช่วงเวลา 14.00 น. - 15.00 น. พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังผลิตฟิ่งได้กับค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงเวลานี้ ส่วนในช่วงเวลาอื่นๆนั้น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานชีวภาพมีศักยภาพกว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนอื่นๆสังเกตได้จากค่ากำลังผลิตฟิ่งได้ที่สูงกว่าค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้า

5) ค่ากำลังผลิตพึงได้และค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก นั้นมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนประเภทอื่นๆ เนื่องจากแบบจำลองอัตราการไหลของน้ำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกสร้างให้มีความไม่แน่นอนที่สามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าพิกัดของตัวโรงไฟฟ้า ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจึงสามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ค่าใกล้เคียงค่าพิกัดตลอดระยะเวลาที่พิจารณา ส่งผลให้ค่ากำลังผลิตพึงได้และค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้ามีค่าสูงสุด

6) ด้วยหลักการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะไม่สามารถกล่าวได้ว่าค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนกับค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์กันโดยตรง เนื่องจากการหาค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้านั้นพิจารณาเฉพาะกำลังผลิตเฉลี่ยที่ตัวโรงไฟฟ้านั้นๆสามารถผลิตได้ตลอดช่วงเวลาที่สนใจโดยไม่พิจารณาส่วนของความต้องการใช้ไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามจากผลการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ พบว่า ในบางกรณีค่ากำลังผลิตพึงได้กับค่าตัวประกอบโรงไฟฟ้านั้นมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นเป็นเพราะว่า กำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้นจะถูกนำไปเทียบเท่ากับกำลังผลิตจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ ที่ทำให้ระบบไฟฟ้ามีระดับความเชื่อถือได้เท่ากัน ส่งผลให้ในบางกรณีค่าทั้งสองอาจมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.8 เป็นตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน ซึ่งสรุปจากตารางผลการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ในหัวข้อ 4.3.4 โดยทำการเลือกค่ากำลังผลิตพึงได้ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้นๆสามารถพึงได้

ตารางที่ 4.9 เป็นตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าหมุนเวียน โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของกำลังผลิตพึงได้จากทุกขนาดของกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจากตารางผลการประเมินค่ากำลังผลิตพึงได้ในหัวข้อ 4.3.4

ตารางที่ 4.8 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

ประเภท	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)	
		All day	14:00-15:00
ลม	11.57	10.82	9.57
แสงอาทิตย์	19.19	33.02	45.12
พลังน้ำขนาดเล็ก	70.85	67.80	66.99
ชีวมวล	58.55	57.57	58.30
ก๊าซชีวภาพ	53.31	49.02	50.81
ขยะชุมชน	54.12	52.95	54.06

ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปค่ากำลังผลิตพึงได้เฉลี่ยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

ประเภท	Plant Factor (%)	Dependable Capacity Factor (%)	
		All day	14:00-15:00
ลม	11.57	11.37	10.73
แสงอาทิตย์	19.19	36.27	46.88
พลังน้ำขนาดเล็ก	70.85	69.03	69.34
ชีวมวล	58.55	60.13	60.87
ก๊าซชีวภาพ	53.31	52.04	52.85
ขยะชุมชน	54.12	55.60	56.04

## บทที่ 5 สรุป

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาจากการเปรียบเทียบระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแบบจำลองของเชื้อเพลิงสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน เช่น ความเร็วลม ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เป็นต้น แบบจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแบบจำลองความต้องการไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดนี้ล้วนแล้วแต่มีความไม่แน่นอนแฝงอยู่ด้วย จากนั้นจึงนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าสู่วิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ โดยอาศัยการพิจารณาจากระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าซึ่งวัดจากโอกาสของการเกิดไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้า (Loss of Load Probability; LOLP) ทั้งนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนต่ออยู่ กับระบบไฟฟ้าที่มีเฉพาะโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์แบบดั้งเดิมต่ออยู่ โดยกำลังการผลิตที่พึ่งได้ของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนจะถูกกำหนดให้เท่ากับขนาดของโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่ทำให้ระบบไฟฟ้าทั้งสองมีความเชื่อถือได้ซึ่งวัดจากโอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับเท่ากัน

องค์ประกอบที่มีผลต่อการกำหนดค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยส่วนของแบบจำลองความต่อเนื่องของเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียน แบบจำลองเทคโนโลยีในการแปลงเชื้อเพลิงพลังงานหมุนเวียน และ สมรรถนะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้องค์ประกอบดังกล่าวจะถูกสร้างบนพื้นฐานของแบบจำลองความน่าจะเป็นที่มีความไม่แน่นอนแฝงอยู่ด้วยเพื่อให้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับลักษณะการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภท

ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนนั้น มีความไม่แน่นอนที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของพลังงานหมุนเวียนและเทคโนโลยีที่ใช้ในการแปลงพลังงานหมุนเวียนเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีความไม่แน่นอนจะถูกนำไปเทียบกับกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ที่ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีระดับความเชื่อถือได้ที่เท่ากัน ดังนั้น ค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่ประเมินด้วยวิธีการในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวได้ว่า เป็นค่ากำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเมื่อมีการนำระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนเหล่านี้ไปใช้เพื่อจ่ายความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

จากผลการประเมินค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน สรุปได้ว่า ค่ากำลังผลิตที่พึ่งได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก โรงไฟฟ้าชีวมวล โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ และโรงไฟฟ้าขยะ มีค่าเท่ากับ 10.82%, 33.02%, 67.80%, 57.57%, 49.02% และ 52.95% ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบบจำลองพลังงานหมุนเวียนบางประเภท ได้แก่ แบบจำลองความเร็วลม และ แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ถูกสร้างโดยอาศัยคุณสมบัติเฉพาะของพลังงานหมุนเวียนนั้นๆ และอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลจริง แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับแบบจำลองอัตราการไหลของน้ำและแบบจำลองความสามารถในการจัดหาเชื้อเพลิงชีวภาพนั้น แบบจำลองดังกล่าวจะถูกสร้างโดยอาศัยแบบจำลองความน่าจะเป็นซึ่งเป็นเพียงการนำเสนอแบบจำลองของพลังงานหมุนเวียนให้มีความสอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงของพลังงานหมุนเวียนในทางทฤษฎีเท่านั้น ดังนั้นสำหรับการสร้างแบบจำลองพลังงานหมุนเวียนแต่ละประเภทให้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับลักษณะพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่จริงจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลทางสถิติของพลังงานหมุนเวียนที่มีความละเอียดและมากเพียงพอเพื่อนำมาสอบทานกับแบบจำลองอีกครั้งหนึ่ง

2) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนและระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ถูกสร้างโดยอาศัยข้อมูลจาก IEEE Reliability Test System ซึ่งในบางครั้งข้อมูลดังกล่าวอาจมีความล่าช้าและไม่สอดคล้องกับสถานะการทำงานจริงของระบบผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันมากนัก ดังนั้นข้อมูลทางสถิติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความใกล้เคียงกับสถานะการทำงานในปัจจุบันจึงมีความจำเป็นสำหรับการสร้างสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยจะช่วยให้สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความสมจริงมากยิ่งขึ้น

3) วิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อาศัยดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเพียงดัชนีเดียวเท่านั้น ได้แก่ โอกาสในการเกิดไฟฟ้าดับ หรือ LOLP ดังนั้น การเพิ่มดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าดัชนีอื่นๆ เพื่อช่วยในการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ เช่น Loss of Energy Expectation (LOEE) และ Expected Energy Not Supplied (EENS) จะสามารถช่วยปรับปรุงวิธีการประเมินค่ากำลังผลิตที่ทำได้ให้มีผลลัพธ์ที่มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. รายงานการศึกษาระดับสมบูรณ การศึกษาค่ากำลังผลิตไฟฟ้า  
ที่ได้ของโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน, 2554
- [2] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. คำศัพท์พลังงาน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา:  
<http://www.egat.co.th> [15 กันยายน 2555].
- [3] Prapassornpittaya, A., Audomvongseree, K. Determining optimal battery capacity  
of wind generator with power fluctuation consideration. Electrical Engineering  
/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology  
(ECTI-CON) (May 2011): 820-823.
- [4] อัญชลี ประภัสสรพิทยา. การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลมเพื่อ  
ช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [5] Chedid, R., Akiki, H., and Rahman, S. A decision support technique for the design  
of hybrid solar-wind power systems. IEEE Transactions on Energy Conversion  
13 (March 1998): 76-83.
- [6] กรพินธ์ เหลืองสมบูรณ. คอปูลาของตัวแปรสุ่มที่ขึ้นต่อกัน. โครงการปริญญาบัณฑิต, ภาควิชา  
คณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [7] Wilson, A., and Ghahramani, Z. Copula process. Department of Engineering,  
University of Cambridge, 2010.
- [8] P. Embrecht. Copulas: a personal view. Department of Mathematics, ETH Zurich,  
Switzerland, 2009.
- [9] Cherubini, U., Luciano, E., and Vecchiato, W. Copula methods in finance.  
West Sussex: John Wiley & Sons, 2004.
- [10] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2554.  
แหล่งที่มา: <http://www2.egat.co.th/re> [1 กันยายน 2555].
- [11] Chatterjee, A., Keyhani, A., and Kapoor, D. Identification of photovoltaic source  
models. IEEE Transactions on Energy Conversion 26 (September 2011):  
883-889.
- [12] Fuentes, M., and others. Application and validation of algebraic methods to  
predict the behavior of crystalline silicon PV modules in mediterranean  
climates. Solar Energy 81 (November 2007): 1396-1408.
- [13] Machacek, J., Prochazka, Z., and Drapela, J. The temperature dependant  
efficiency of photovoltaic. modules - a long term evaluation of experimental

- measurements. [Online] . 2006. Available from: [www.intechopen.com/download/pdf/9340](http://www.intechopen.com/download/pdf/9340). [2011, September 1].
- [14] ประเสริฐ อินทับ. ขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กระดับหมู่บ้านในเขตภาคเหนือของประเทศไทย. สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2546.
- [15] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. โครงการไฟฟ้าพลังน้ำ. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.efe.or.th/datacenter/banner/banner1365595089.pdf> [1 กันยายน 2555].
- [16] Renewables First. Introduction to run-of-river micro hydropower. [Online]. 2011. Available from: [www.renewablesfirst.co.uk/](http://www.renewablesfirst.co.uk/). [2011, September 1].
- [17] พรรณทิพา สุขธรรม, พิชิต ทวีศรีและเรืองเดช ปั่นเดช. การฟื้นฟูโครงการไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็กมาก กรณีศึกษา โครงการไฟฟ้าพลังน้ำห้วยคัง จังหวัดเชียงใหม่. สาขาวิชาพลังงานทดแทน ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2550.
- [18] คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ศักยภาพของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวลในประเทศไทย. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา : <http://www.ces.kmutt.ac.th> [1 กันยายน 2555].
- [19] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. โอกาสและการลงทุนเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.efe.or.th> [7 กันยายน 2555].
- [20] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ. การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยอาศัยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://www.pt.tsu.ac.th/rdi/ConAll/Poster17/P6.pdf> [20 กันยายน 2555]
- [21] ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. รายงานผลการดำเนินโครงการหมู่บ้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน, 2549.
- [22] อัมพล อวารณ์. สรรคสร้างนวัตกรรมพลังงานชีวภาพจากรุ่นที่ 1 รุ่นที่ 2. ฐานเศรษฐกิจ 29 (มีนาคม-เมษายน 2552): 3.
- [23] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13 (ชลบุรี). เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงขยะ. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: [http://www.reo13.go.th/KM\\_reo13/data\\_know/53-09-15\\_RDF.pdf](http://www.reo13.go.th/KM_reo13/data_know/53-09-15_RDF.pdf) [1 กันยายน 2555]
- [24] กุลยศ อุดมวงศ์เสรี. การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลแบบสุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ และการแบ่งแยกโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [25] Billington, R., and Allan, R.N. Reliability evaluation of power system. London: Pitman, 1984.



- [26] Khambanonda, K., and Audonvongseree, K. Area-based maximum and security concern TRM evaluation by probabilistic approach. Electrical Engineering /Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (May 2009): 226-229.
- [27] Madaeni, S.H., Sioshansi, R., and Denholm, P. Comparison of capacity value methods for photovoltaics in the Western United States. IEEE Journal of Photovoltaics (Jan 2013): 407-415.
- [28] Wangdee, W., Wenyuan, L., and Billington, R. Coordinating wind and hydro generation to increase the effective load carrying capability. Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS) (June 2010): 337-342.
- [29] Soder, L., and Amelin, M. A review of different methodologies used for calculation of wind power capacity credit. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century (July 2008): 1-5.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้า อ้างอิงตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573

ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
1	Bhumibol Dam (1)	779.20	Hydro	Hydro	19.72	0.80
2	Sirikit Dam (1)	500.00	Hydro	Hydro	19.72	0.84
3	Ubol Ratana Dam (1)	25.20	Hydro	Hydro	19.72	0.75
4	Sirindhorn Dam (1)	36.00	Hydro	Hydro	19.72	1.00
5	Chulabhorn Dam (1)	40.00	Hydro	Hydro	19.72	0.98
6	Nam Pung Dam (1)	6.00	Hydro	Hydro	19.72	0.93
7	Srinagarind (1)	720.00	Hydro	Hydro	19.72	0.96
8	Vajiralongkorn Dam (1)	300.00	Hydro	Hydro	19.72	0.88
9	Tha Thung Na Dam (1)	39.00	Hydro	Hydro	19.72	0.97
10	Kaeng Krachan Dam (1)	19.00	Hydro	Hydro	19.72	0.68
11	Bang Lang Dam (1)	72.00	Hydro	Hydro	19.72	0.99
12	Ban Santi Dam (1)	1.28	Hydro	Hydro	19.72	1.00
13	Mae Ngat Dam (1)	9.00	Hydro	Hydro	19.72	0.11
14	Huai Kum Dam (1)	1.06	Hydro	Hydro	19.72	1.00
15	Rajjaprabha Dam (1)	240.00	Hydro	Hydro	19.72	0.66

ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
16	Pak Mun Dam (1)	136.00	Hydro	Hydro	19.72	0.49
17	Lamtakhong Dam (1,2)	500.00	Hydro	Hydro	19.72	1.00
18	South Bangkok (1.1)	316.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
19	South Bangkok (2.1)	562.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
20	South Bangkok (3.1)	710.00	Combine Cycle	NG	80.00	1.00
21	Bang Pakong (1)	525.50	Steam	NG	0.00	1.00
22	Bang Pakong (2)	526.50	Steam	NG	0.00	1.00
23	Bang Pakong (3)	576.00	Steam	NG	50.00	1.00
24	Bang Pakong (4)	576.00	Steam	NG	50.00	1.00
25	Bang Pakong (3.1)	314.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
26	Bang Pakong (4.1)	314.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
27	Bang Pakong (5.1)	710.00	Combine Cycle	NG	80.00	1.00
28	Mae Moh (4)	140.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
29	Mae Moh (5)	140.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
30	Mae Moh (6)	140.00	Steam	Lignite	85.00	1.00

ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
31	Mae Moh (7)	140.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
32	Mae Moh (8)	270.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
33	Mae Moh (9)	270.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
34	Mae Moh (10)	270.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
35	Mae Moh (11)	270.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
36	Mae Moh (12)	270.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
37	Mae Moh (13)	270.00	Steam	Lignite	85.00	1.00
38	Krabi (1)	315.00	Steam	Oil	40.00	1.00
39	Nam Phong (1.1)	325.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
40	Nam Phong (2.1)	325.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
41	Wang Noi (1.1)	612.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
42	Wang Noi (2.1)	612.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
43	Wang Noi (3.1)	686.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
44	Chana (1.1)	710.00	Combine Cycle	NG	80.00	1.00
45	Mae Hong Son (1)	4.40	Gas Turbine	Diesel	20.00	1.00

ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
46	EGAT Solar 2550 (1)	2.00	Solar	Solar	18.00	0.21
47	EGAT Wind 2550 (1)	2.50	Wind	Wind	20.00	0.05
48	Theun Hinboun (Laos) (1)	214.00	Import	Import Hydro	52.00	0.79
49	Houay Ho (Laos) (1)	126.00	Import	Import Hydro	52.00	1.00
50	Thailand-Malaysia HVDC (1)	300.00	HVDC	HVDC	0.00	1.00
51	REGCO (1.1)	294.70	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
52	REGCO (2.1)	287.70	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
53	REGCO (3.1)	289.80	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
54	REGCO (4.1)	302.90	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
55	KEGCO (2)	70.20	Steam	NG	0.00	1.00
56	KEGCO (1.1)	678.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
57	Ratchaburi (1)	720.00	Steam	NG	50.00	1.00
58	Ratchaburi (2)	720.00	Steam	NG	50.00	1.00
59	Ratchaburi (1.1)	685.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
60	Ratchaburi (2.1)	675.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00

ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
61	Ratchaburi (3.1)	681.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
62	TECO (1.1)	700.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
63	IPT (1.1)	700.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
64	GLOW (1.1)	356.50	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
65	GLOW (2.1)	356.50	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
66	EPEC (1.1)	350.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
67	BLCP (1)	673.25	Steam	Bituminous	85.00	1.00
68	BLCP (2)	673.25	Steam	Bituminous	85.00	1.00
69	GPG (1.1)	734.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
70	GPG (2.1)	734.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
71	RGCO power (1.1)	700.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
72	RGCO power (2.1)	700.00	Combine Cycle	NG	70.00	1.00
73	SPP (1)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
74	SPP (2)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
75	SPP (3)	42.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00

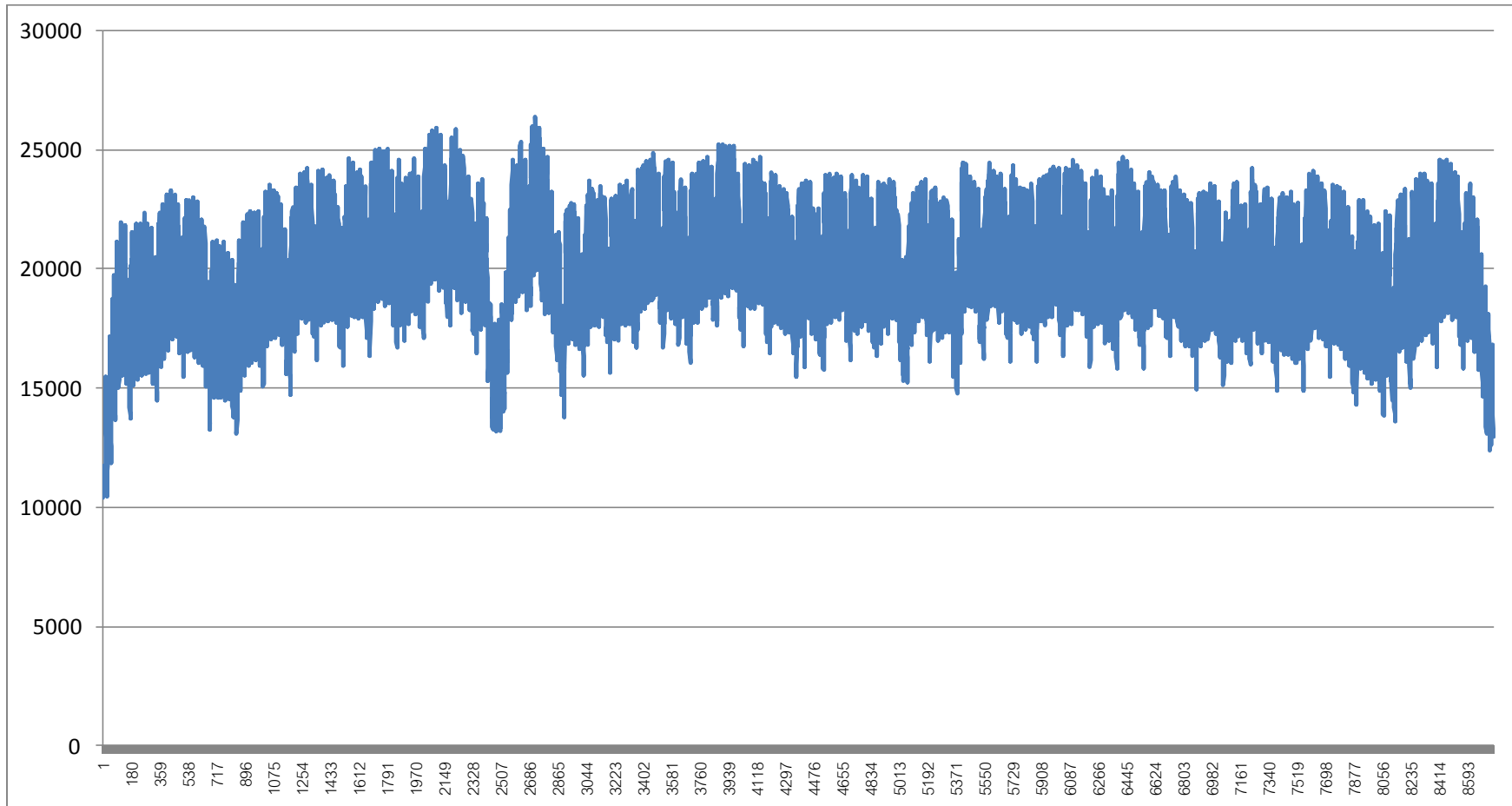


ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
76	SPP (4)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
77	SPP (5)	5.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
78	SPP (6)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
79	SPP (7)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
80	SPP (8)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
81	SPP biomass (3)	8.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
82	SPP (9)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
83	SPP (10)	93.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
84	SPP (11)	17.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
85	SPP (12)	75.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
86	SPP (13)	75.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
87	SPP (14)	41.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
88	SPP biomass (5)	50.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
89	SPP (15)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
90	SPP (16)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00

ID	Gen Name	Capacity (MW)	Gen Type	Fuel Type	Plant Factor%	Derated capacity
91	SPP (17)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
92	SPP (18)	50.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
93	SPP (19)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
94	SPP (20)	40.00	Steam	Bituminous	60.00	1.00
95	SPP (21)	90.00	Steam	Bituminous	60.00	1.00
96	SPP (22)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
97	SPP (23)	90.00	Steam	Bituminous	60.00	1.00
98	SPP (24)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
99	SPP biomass (6)	57.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
100	SPP biomass (7)	5.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
101	SPP biomass (8)	7.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
102	SPP biomass (9)	103.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
103	SPP biomass (10)	11.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36
104	SPP (25)	90.00	Combine Cycle	NG	60.00	1.00
105	SPP biomass (11)	63.00	Biomass	Biomass	74.00	0.36

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ ข.1 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดรายชั่วโมงที่ ณ ปี พ.ศ.2554



ภาคผนวก ค  
ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน

ตารางที่ ค.1 ความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละเดือน ในปี พ.ศ.2548 ที่บริเวณแหลมพรหมเทพ จ.ภูเก็ต

เดือน	ความเร็วลม (m/s)	เดือน	ความเร็วลม (m/s)
มกราคม	6.03	กรกฎาคม	7.38
กุมภาพันธ์	4.80	สิงหาคม	6.39
มีนาคม	5.22	กันยายน	6.48
เมษายน	4.00	ตุลาคม	4.74
พฤษภาคม	5.24	พฤศจิกายน	4.21
มิถุนายน	7.08	ธันวาคม	5.64

ตารางที่ ค.2 ระดับความเร็วลมในการผลิตกำลังไฟฟ้าของกังหันลมรุ่น DeWind D6-1250

ระดับความเร็วลม	ความเร็วลม (m/s)
ความเร็วลมเข้าระบบ (Cut-in Speed)	2.8
ความเร็วลมเต็มพิกัด (Nominal or Rated Wind Speed)	12.5
ความเร็วลมตัดออก (Cut-out Wind Speed)	23

ตารางที่ ค.3 ความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงตามฤดูกาล

ชั่วโมง	ความเร็วลมในแต่ละฤดู (m/s)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
1	5.023097	5.361823	6.114633
2	5.333031	5.107254	6.230987
3	5.021410	5.380161	5.665252
4	5.191660	5.411383	6.046494
5	5.002902	5.040668	6.354089
6	5.235122	5.393733	6.280955
7	5.291449	5.528281	6.035546
8	5.085919	5.365979	6.286418
9	5.652379	5.101217	6.325065
10	4.775389	5.56653	6.429313
11	5.317346	5.255554	6.083991
12	5.075287	5.178833	6.753120

ชั่วโมง	ความเร็วลมในแต่ละฤดู (m/s)		
	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
13	5.273727	5.328746	6.135622
14	5.708895	5.183230	6.521348
15	5.356315	5.382313	6.146731
16	5.289101	5.634856	6.340065
17	5.087979	5.004967	6.417576
18	5.130245	5.495877	5.953362
19	5.069434	5.347554	6.536653
20	5.235235	5.169870	5.987508
21	5.197467	5.354199	6.219599
22	4.733282	5.349153	6.357155
23	5.177131	5.494930	6.298403
24	4.965493	5.367475	6.398169

ตารางที่ ค.4 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงตามฤดูกาล ปี พ.ศ.2550 จ.เชียงใหม่

ฤดูกาล	ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง ( $W/m^2$ )											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
ฤดูร้อน	91.966	266.2377	475.9938	660.5154	791.8056	836.1574	803.9105	693.3704	529.3488	331.858	138.9012	19.5648
ฤดูฝน	140.5029	328.7382	540.3159	681.329	823.7473	857.7142	463.8126	418.2825	383.1536	232.3765	105.1688	37.5272
ฤดูหนาว	40.0182	172.7004	403.3151	599.3716	720.2755	774.918	749.7495	650.5692	479.2418	261.7372	68.7796	0.7149

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงตามฤดูกาล ปี พ.ศ.2550 จ.เชียงใหม่

ฤดูกาล	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมง ( $^{\circ}C$ )											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
ฤดูร้อน	91.966	266.2377	475.9938	660.5154	791.8056	836.1574	803.9105	693.3704	529.3488	331.858	138.9012	19.5648
ฤดูฝน	140.5029	328.7382	540.3159	681.329	823.7473	857.7142	463.8126	418.2825	383.1536	232.3765	105.1688	37.5272
ฤดูหนาว	40.0182	172.7004	403.3151	599.3716	720.2755	774.918	749.7495	650.5692	479.2418	261.7372	68.7796	0.7149



ตารางที่ ค.6 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง เมื่อหาด้วยวิธี MLE

ฤดูกาล	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมง											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
ฤดูร้อน	1.0758	0.4306	0.2473	0.1959	0.1644	0.1557	0.156	0.1539	0.1976	0.3128	0.37	0.7151
ฤดูฝน	0.6244	0.4289	0.2771	0.2657	0.1707	0.2366	0.2365	0.2815	0.4129	0.2047	0.7776	4.3724
ฤดูหนาว	0.4709	0.3463	0.2521	0.138	0.1046	0.0925	0.0764	0.0759	0.079	0.1966	0.5651	0.5651

ตารางที่ ค.7 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมง เมื่อหาด้วยวิธี MLE

ฤดูกาล	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมง											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
ฤดูร้อน	0.1925	0.1707	0.1312	0.1066	0.0966	0.0967	0.0994	0.1059	0.1198	0.1285	0.1252	0.1182
ฤดูฝน	0.0393	0.0489	0.0503	0.0574	0.0637	0.0655	0.0703	0.0751	0.0862	0.085	0.0838	0.0836
ฤดูหนาว	0.1993	0.1765	0.1423	0.1162	0.0879	0.0816	0.0795	0.0769	0.0785	0.0858	0.0918	0.0888

ตารางที่ ค.8 คุณสมบัติเครื่องกังหันน้ำในโครงการไฟฟ้าพลังน้ำห้วยคั่ง จ.เชียงใหม่

Type	Cross Flow
Output	40 kW
Net Head	90 m.
Discharge	60 Lt/sec
Speed	1,500 rpm
Runaway Speed	1,875 rpm

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโครงการไฟฟ้าพลังน้ำห้วยคั่ง จ.เชียงใหม่

Type	Induction Generator
Voltage	400 V
Frequency	50 Hz , 3 Phase
Output	37 kW
Efficiency	90%

ภาคผนวก ง  
IEEE Reliability Test System

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตาม IEEE Reliability Test System

MW	Unit type	FOR	MTTF (Hour)	MTTR (Hour)	Lamda (f/yr)	Mew (f/yr)
12	Oil/Steam	0.02	2940	60	2.9796	146.00
20	Oil/Combustionturbine	0.10	450	50	19.4667	175.20
50	Hydro	0.01	1960	20	4.4694	438.00
76	Coal/Steam	0.02	1960	40	4.4694	219.00
100	Oil/Steam	0.04	1200	50	7.3000	175.20
155	Coal/Steam	0.04	960	40	9.1250	219.00
197	Oil/Steam	0.05	950	50	9.2211	175.20
350	Coal/Steam	0.08	1150	100	7.6174	87.60
400	Nuclear	0.12	1100	150	7.9636	58.40

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทดสอบ

ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
1	Bhumibol Dam (1)	Hydro	779.20	0.12	1100	150	7.964	58.4
2	Sirikit Dam (1)	Hydro	500.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
3	Ubol Ratana Dam (1)	Hydro	25.20	0.12	1100	150	7.964	58.4
4	Sirindhorn Dam (1)	Hydro	36.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
5	Chulabhorn Dam (1)	Hydro	40.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
6	Nam Pung Dam (1)	Hydro	6.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
7	Srinagarind (1)	Hydro	720.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
8	Vajiralongkorn Dam (1)	Hydro	300.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
9	Tha Thung Na Dam (1)	Hydro	39.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
10	Kaeng Krachan Dam (1)	Hydro	19.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
11	Bang Lang Dam (1)	Hydro	72.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
12	Ban Santi Dam (1)	Hydro	1.28	0.12	1100	150	7.964	58.4
13	Mae Ngat Dam (1)	Hydro	9.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
14	Huai Kum Dam (1)	Hydro	1.06	0.12	1100	150	7.964	58.4
15	Rajjaprabha Dam (1)	Hydro	240.00	0.12	1100	150	7.964	58.4

ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
16	Pak Mun Dam (1)	Hydro	136.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
17	Lamtakhong Dam (1,2)	Hydro	500.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
18	South Bangkok (1.1)	Combine Cycle	316.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
19	South Bangkok (2.1)	Combine Cycle	562.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
20	South Bangkok (3.1)	Combine Cycle	710.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
21	Bang Pakong (1)	Steam	525.50	0.08	1150	100	7.617	87.6
22	Bang Pakong (2)	Steam	526.50	0.08	1150	100	7.617	87.6
23	Bang Pakong (3)	Steam	576.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
24	Bang Pakong (4)	Steam	576.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
25	Bang Pakong (3.1)	Combine Cycle	314.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
26	Bang Pakong (4.1)	Combine Cycle	314.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
27	Bang Pakong (5.1)	Combine Cycle	710.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
28	Mae Moh (4)	Steam	140.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
29	Mae Moh (5)	Steam	140.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
30	Mae Moh (6)	Steam	140.00	0.08	1150	100	7.617	87.6

ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
31	Mae Moh (7)	Steam	140.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
32	Mae Moh (8)	Steam	270.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
33	Mae Moh (9)	Steam	270.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
34	Mae Moh (10)	Steam	270.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
35	Mae Moh (11)	Steam	270.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
36	Mae Moh (12)	Steam	270.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
37	Mae Moh (13)	Steam	270.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
38	Krabi (1)	Steam	315.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
39	Nam Phong (1.1)	Combine Cycle	325.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
40	Nam Phong (2.1)	Combine Cycle	325.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
41	Wang Noi (1.1)	Combine Cycle	612.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
42	Wang Noi (2.1)	Combine Cycle	612.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
43	Wang Noi (3.1)	Combine Cycle	686.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
44	Chana (1.1)	Combine Cycle	710.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
45	Mae Hong Son (1)	Gas Turbine	4.40	0.02	2940	60	2.98	146

ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
46	Theun Hinboun (Laos) (1)	Import	214.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
47	Houay Ho (Laos) (1)	Import	126.00	0.12	1100	150	7.964	58.4
48	Thailand-Malaysia HVDC (1)	HVDC	300.00	0.00	Inf	0	0	0
49	REGCO (1.1)	Combine Cycle	294.70	0.08	1150	100	7.617	87.6
50	REGCO (2.1)	Combine Cycle	287.70	0.08	1150	100	7.617	87.6
51	REGCO (3.1)	Combine Cycle	289.80	0.08	1150	100	7.617	87.6
52	REGCO (4.1)	Combine Cycle	302.90	0.08	1150	100	7.617	87.6
53	KEGCO (2)	Steam	70.20	0.08	1150	100	7.617	87.6
54	KEGCO (1.1)	Combine Cycle	678.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
55	Ratchaburi (1)	Steam	720.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
56	Ratchaburi (2)	Steam	720.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
57	Ratchaburi (1.1)	Combine Cycle	685.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
58	Ratchaburi (2.1)	Combine Cycle	675.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
59	Ratchaburi (3.1)	Combine Cycle	681.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
60	TECO (1.1)	Combine Cycle	700.00	0.08	1150	100	7.617	87.6



ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
61	IPT (1.1)	Combine Cycle	700.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
62	GLOW (1.1)	Combine Cycle	356.50	0.08	1150	100	7.617	87.6
63	GLOW (2.1)	Combine Cycle	356.50	0.08	1150	100	7.617	87.6
64	EPEC (1.1)	Combine Cycle	350.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
65	BLCP (1)	Steam	673.25	0.08	1150	100	7.617	87.6
66	BLCP (2)	Steam	673.25	0.08	1150	100	7.617	87.6
67	GPG (1.1)	Combine Cycle	734.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
68	GPG (2.1)	Combine Cycle	734.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
69	RGCO power (1.1)	Combine Cycle	700.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
70	RGCO power (2.1)	Combine Cycle	700.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
71	SPP (1)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
72	SPP (2)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
73	SPP (3)	Combine Cycle	42.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
74	SPP (4)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
75	SPP (5)	Combine Cycle	5.00	0.08	1150	100	7.617	87.6

ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
76	SPP (6)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
77	SPP (7)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
78	SPP (8)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
79	SPP (9)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
80	SPP (10)	Combine Cycle	93.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
81	SPP (11)	Combine Cycle	17.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
82	SPP (12)	Combine Cycle	75.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
83	SPP (13)	Combine Cycle	75.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
84	SPP (14)	Combine Cycle	41.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
85	SPP (15)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
86	SPP (16)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
87	SPP (17)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
88	SPP (18)	Combine Cycle	50.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
89	SPP (19)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
90	SPP (20)	Steam	40.00	0.08	1150	100	7.617	87.6

ID	Gen Name	Unit type	MW	FOR	MTTF (hr)	MTTR (hr)	Lambda (f/yr)	Mew (f/yr)
91	SPP (21)	Steam	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
92	SPP (22)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
93	SPP (23)	Steam	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
94	SPP (24)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6
95	SPP (25)	Combine Cycle	90.00	0.08	1150	100	7.617	87.6

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรบัณฑิต นาคศรีสุข เกิดวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2554 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2554