นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม

นายวชิระ พุทธิแจ่ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม (สหสาขาวิชา) สหสาขาวิชาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INNOVATIVE SHAFTLESS SMALL SCALE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE FOR ELECTRICITY GENERATION FROM INDUSTRIAL EXHAUST AIR SYSTEM

Mr. Wachira Puttichaem

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy in Technopreneurship and Innovation Management
Inter-Department of Technopreneurship and Innovation Management
GRADUATE SCHOOL
Chulalongkorn University
Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม
โดย	นายวชิระ พุทธิแจ่ม
สาขาวิชา	ธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พักตร์ผจง วัฒนสินธุ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

.... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฉัพพรรณรัตน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.พักตร์ผจง วัฒนสินธุ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงหทัย เพ็ญตระกูล)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไปรมา อิศรเสนา ณ อยุธยา)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.เวชพงศ์ ชุติชูเดช)

วชิระ พุทธิแจ่ม : นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม. (INNOVATIVE SHAFTLESS SMALL SCALE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE FOR ELECTRICITY GENERATION FROM INDUSTRIAL EXHAUST AIR SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.พักตร์ผจง วัฒนสินธุ์,รศ. ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

ลมระบายที่ถูกปล่อยทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมเป็นแหล่งพลังงานลมที่มีศักยภาพสูงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการไหลของลมสม่ำเสมอ มีความเร็วลมสูง แต่การผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากพบว่าเกิดผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศเมื่อนำกังหันลมแบบดั้งเดิมไปใช้ ผู้วิจัยได้สร้างนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ งานวิจัยนี้มี*วัตถุประสงค์*เพื่อศึกษาและสร้างต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม ศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์จากมุมมองลูกค้า และประเมินความสามารถในการลงทุนเชิงพาณิชย์

งานวิจัยนี้มี 5 ขั้นตอน คือ *ขั้นตอนแรก* ทำการศึกษาทฤษฎี งานวิจัย สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องเพื่อหาช่องว่างในการวิจัย นำสนอแนวคิดสร้างสรรค์แบบอเนกนัย แล้วเลือกแบบที่มีความเป็นไปได้มาทำม็อคอัพเพื่อพิสูจน์แนวคิด ผลการศึกษาพบว่าต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนได้ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป *ขั้นตอนที่สอง* ทำการออกแบบและสร้างต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ศึกษาการไหลของลมระบายผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาโดยโปรแกรมสร้างแบบจำลองการไหลและการทดสอบจากต้นแบบจริงในห้องปฏิบัติการ ศึกษาผลกระทบต่อระบบลมระบายเมื่อติดตั้งใช้งานและความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมของแกนยึดใบพัดที่ต่างกัน พบว่าในเชิงเทคนิคต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีมุมของแกนยึดใบพัดตั้งแต่ 105 ถึง 150 องศา สามารถหมุนได้ที่ความเร็วรอบในช่วง 25 ถึง 275 รอบต่อนาที เมื่อความเร็วลมตั้งแต่ 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและมีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยที่ลมระบายสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสู่ภายนอกได้ โดยไม่ทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพการระบายลม *ขั้นตอนที่สาม* ทำการออกแบบและปรับปรุงต้นแบบสำหรับการทดสอบภาคสนาม พบว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งและใช้งานในพื้นที่ที่จำกัดได้ โดยไม่มีผลกระทบเชิงลบต่อระบบลมระบายเช่นเดียวกับผลในห้องปฏิบัติงานและทราบถึงแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นและมีความคุ้มค่ามากขึ้นในมุมมองของผู้บริโภคต่อไป *ขั้นตอนที่สี่* ทำการศึกษาการยอมรับนวัตกรรมด้วยแบบสอบถาม โดยการสำรวจกลุ่มเป้าหมายจำนวน 322 คน พบว่าผู้ประเมินเห็นคุณค่าของนวัตกรรม มีการยอมรับเทคโนโลยีในระดับสูง และมีความสนใจอย่างมากที่จะนำกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้งาน *ขั้นตอนสุดท้าย* จัดทำแผนการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ โดยการจัดตั้งธุรกิจแบบสตาร์ทอัพดำเนินการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม ใช้เงินทุนเริ่มต้น 100 ล้านบาท จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงิน ธุรกิจนี้มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ โดยมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.17 ปี อัตราผลการตอบแทนการลงทุนคือ ร้อยละ 16.1 มูลค่าปัจจุบันในการลงทุนเของโครงการนี้เป็นบวก โครงการนี้มีความเป็นไปได้ในการทำธุรกิจ

สาขาวิชา	ธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม (สหสาขาวิชา)	ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา	2565	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ....

5887820820 : MAJOR TECHNOPRENEURSHIP AND INNOVATION MANAGEMENT

KEYWORD: Electricity generating from the exhausted air, Renewable Energy, Shaftless Horizontal-axis Wind Turbine

Wachira Puttichaem : INNOVATIVE SHAFTLESS SMALL SCALE HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE FOR ELECTRICITY GENERATION FROM INDUSTRIAL EXHAUST AIR SYSTEM. Advisor: Assoc. Prof. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Pakpachong Vadhanasindhu, Ph.D.,Assoc. Prof. YUTTANANT BOONYONGMANEERAT, Ph.D.

The industrial exhaust air, which is consistent and high-speed wind, is a high potential wind resource for generating electricity. However, it is not widely used because of the negative impacts on the ventilation system observed when the conventional wind turbine was employed. Thus, the author innovated the shaftless horizontal-axis wind turbine (SHWT) to solve these limitations. The objectives of this research are to demonstrate the SHWT for electricity generation from the industrial exhaust air system, evaluate technology acceptable from a customer viewpoint, and evaluate the capability for commercialization.

This research consists of 5 steps. *The first step* is to review the related theories, research papers, and patents to identify the research gaps. Then, come up with a divergence idea and select a feasible design to make a mockup for concept proof. The result showed that the SHWT started rotating at 5 m/s wind speed. *The second* is to design and fabricate the prototype SHWT to study airflow characteristics through the SHWT with a flow simulation program and visualization testing in the laboratory, the effect on the exhaust air system, and the performance of the prototype SHWT at different turbine blade holder angle. It was found that the SHWT which the range of blade holder angle from 105 to 150 degrees could rotate s in the range of 25 to 275 rpm at 4 m/s wind speeds onward. It proved to be able to generate electricity and have a potential to improve for a better performance. The exhaust air could flow through the SHWT to the environment without negative impacts on the ventilation system. *The third step* is to modify the prototype SHWT and evaluate it in the field test. It was found that the SHWT could install in a limited area without a negative impact on the ventilation system. Moreover, the direction for further product development is known to achieve better product performance and cost/benefit for the customers. *The fourth step* is to conduct technology acceptance measurement with questionnaires by surveying the target group of 322 persons. It was found that the assessors had a high level of technology acceptance and were interested in using the product. *The final step* is to provide a commercialization plan. A commercialization plan can be carried out in the form of establishing a start-up business to produce the SHWT. The initial investment will be 100 million baht. Based on the financial feasibility analysis, the payback period is 3.37 years, the Internal Rate of Return (IRR) is 16.1% at the end of 5 years, and a positive Net Present Value (NPV). This business is feasible.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Technopreneurship and Innovation Management	Student's Signature ....
Academic Year:	2022	Advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ดุษฎีนิพนธ์หัวข้อนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการสำเร็จการศึกษาระดับดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถสำเร็จลุล่วงโดยได้รับความกรุณาจากคณาจารย์ที่ปรึกษา คณะกรรมการและผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รศ.ดร.พักตร์ผจง วัฒนสินธุ์ รศ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาเสียสละทุ่มเทกำลังกายกำลังใจ ถ่ายทอดความรู้ ให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจงานวิจัยด้วยความเหนื่อยยากและเป็นกำลังใจตลอดช่วงเวลาในการทำวิจัย กราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล รศ.ดร.ดวงหทัย เพ็ญตระกูล รศ.ดร.ไปรมา อิศรเสนา ณ อยุธยา และรศ.ดร.เวชพงศ์ ชุติชูเดช ที่กรุณาสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขเพื่อให้ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ดุษฎีนิพนธ์นี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ตั้งไว้ในการศึกษาครบถ้วน ระหว่างเส้นทางของการทำวิจัย เป็นอีกหนึ่งเส้นทางที่พิสูจน์ตัวเองทั้งกายและจิตใจ เรียนรู้ชีวิต เรียนรู้คน รักษาสมดุลกับคนรอบข้างทุกคนที่เป็นที่รักในชีวิตในแต่ละสถานการณ์ที่ผ่านเข้ามา ขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่เป็นส่วนหนึ่งในชีวิตที่ทำให้ได้ก้าวเดินไปข้างหน้ามาถึงจุดนี้ คุณพ่อวิญญู คุณแม่สมบุญ พุทธิแจ่ม ผู้มอบชีวิตและให้ความรักลูกคนนี้มาตลอด คุณย่ายวง พุทธิแจ่มที่เลี้ยงดูหลานคนนี้และคอยเฝ้าดูแลจากบนสวรรค์ ภรรยาและลูกสาวที่น่ารักที่อยู่เคียงข้างในทุกช่วงเวลา น้องสาวและหลานๆ ของลุงและพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจเสมอมา ทุกคนเป็นแหล่งพลังงานทางจิตใจอย่างที่มิอาจหาที่ไหนได้ ที่ทำให้ชีวิตมีความมุ่งมั่นพยายามเดินก้าวไปข้างหน้าต่อไปได้

ผู้วิจัยขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษาหลักสูตรดุษฎีบัณฑิต “100 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” และทุน 90 ปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับทำวิจัย ขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาทั้งในขั้นอนุบาล ประถมศึกษา มัธยมศึกษา ปริญญาตรี และปริญญาโท ขอบคุณคุณวสันต์ จันทร์หยวก ที่สอนและแนะนำการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์การไหลเบื้องต้นสำหรับวิเคราะห์การไหลของอากาศจากพัดลมผ่านกังหันแบบไร้เพลา คุณบรรจง ขยันกิจที่สอนการทำกังหันและแนะนำแนวทางการออกแบบขดลวดและแม่เหล็ก ขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของสาขาวิชาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม ขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามที่กรุณาให้ข้อมูลงานวิจัยทุกท่าน ขอบคุณบริษัทสวารอฟสกี้ แมนูแฟคเจอริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่ในการทดสอบภาคสนามตลอดจนทีมงานที่ช่วยติดตั้งเพื่อทดสอบผล เพื่อน CUTIP 7 CUTIP 9 และพี่น้อง CUTIP ที่คอยช่วยเหลือเกื้อกูลกันและให้กำลังใจกันและกันเสมอมา คุณงามความดีทั้งหมดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมา

วชิระ พุทธิแจ่ม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.......... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... ง

กิตติกรรมประกาศ.......... จ

สารบัญ.......... ฉ

สารบัญตาราง.......... ฏ

สารบัญรูป.......... ณ

บทที่ 1 บทนำ.......... 20

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.......... 20

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.......... 21

1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.......... 21

1.4 ขอบเขตของการวิจัย.......... 22

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย.......... 23

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.......... 23

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.......... 23

บทที่ 2 การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 25

2.1 ความรู้ที่เกี่ยวข้อง.......... 25

2.1.1 พลังงานลม.......... 25

2.1.2 ประวัติของการใช้พลังงานลม (History of Wind Power).......... 25

2.1.3 หลักการทำงานของกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า.......... 28

2.1.4 ประเภทของกังหันลม.......... 29

2.1.5 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน.......... 31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.6 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า 32
2.1.7 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศ 33
2.1.8 พัดลมระบายอากาศ 37
2.2.9 มาตรฐานการระบายอากาศภายในอาคาร 40
2.2.10 ลักษณะของลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม 41
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 45
2.2.1 พลังงานลมและกำลังลม (Wind Energy and Power) 45
2.2.2 ข้อจำกัดของเบทซ์ (Betz Limit) (Ragheb, 2011) 46
2.2.3 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ 48
2.2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) 49
2.2.5 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 49
2.2.6 วัสดุของแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnetic Materials) 50
2.2.7 การออกแบบใบพัด 51
2.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ 51
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบาย 55
2.5 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 58
2.6 กังหันแบบไร้เพลาที่มีอยู่ในปัจจุบัน 66
2.7 การศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ 67
2.8 ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels: TRL) 68
2.9 มาตรฐานการทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก 69
2.9.1 การทดสอบกังหันลมขนาดเล็กและการรับรอง 69
2.9.2 มาตรฐานของ IEC ที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมขนาดเล็ก 71
2.9.3 เครื่องหมาย CE 72
2.10 ช่องว่างงานวิจัย (Research Gap) 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย 74

3.1 การวิจัยระยะที่ 1 การวิจัยและทดลองเพื่อศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา 75

3.1.1 การออกแบบและสร้างกังหันลม 75

3.1.2 การออกแบบใบพัดกังหันลม 76

3.1.3 การออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร 77

3.1.4 การออกแบบขดลวด 78

3.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมเพื่อหาค่าการปรับตั้งใบพัดกังหันลมที่เหมาะสม ... 79

3.1.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) 79

3.1.7 การศึกษาลักษณะของลมระบายที่ไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 82

3.1.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 84

3.2 การวิจัยระยะที่ 2: การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรม 84

3.3 การวิจัยระยะที่ 3: การวิจัยธุรกิจเพื่อศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ 85

3.4 กรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual Framework) 86

บทที่ 4 ผลการวิจัย 89

4.1 การเสนอแนวคิด (Idea Generation) 89

4.2 หลักการทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 92

4.3 การพิสูจน์แนวคิดเบื้องต้นก่อนการผลิตต้นแบบ 93

4.3.1 การสร้างต้นแบบเบื้องต้นอย่างง่าย (Mockup) 93

4.3.2. ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ออกแบบด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ SOLIDWORK 2018 94

4.3.3 การศึกษาการไหลของลมระบายผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเบื้องต้นด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation 95

4.4 แนวคิดในการออกแบบ (Concept design) ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 97

4.5 การสร้างต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 98

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.6 การทดสอบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการ 99
4.6.1 การศึกษาลักษณะโปรไฟล์ความเร็วลมของลมที่ออกจากพัดลมระบาย 99
4.6.2 การศึกษาการไหลของลมระบายผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 101
4.6.3 การศึกษาตัวแปรต้นของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 103
4.6.4 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 127
4.7 การทดสอบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในภาคสนาม 129
4.8 การประเมินการยอมรับนวัตกรรม 132
4.8.1 ผลการทดสอบการใช้งานและการยอมรับ 132
4.8.2 การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถาม 133
4.8.3 การวิเคราะห์การยอมรับนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 135
4.8.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทน 138
4.9 สรุปผลการพัฒนานวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 139
บทที่ 5 การนำนวัตกรรมไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ 140
5.1 การวิเคราะห์การแข่งขันในอุตสาหกรรม (Five Forces Analysis) 140
5.2 การประเมินตลาด (Market assessment) 142
5.3 การวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคทางธุรกิจ (SWOT) 143
5.4 การใช้ประโยชน์ทางเทคโนโลยี (Technology exploitation) 145
5.5 การวางแผนธุรกิจโรงงานผลิตและจัดจำหน่ายในประเทศไทยและส่งออกไปต่างประเทศ ... 147
5.5.1 แนวคิดความเป็นมาของธุรกิจ 147
5.5.2 วิสัยทัศน์ 148
5.5.3 พันธกิจ 148
5.5.4 เป้าหมายในการดำเนินธุรกิจ 148

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.6 แผนการตลาด 148
5.6.1 การกำหนดส่วนแบ่งตลาด กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย และตำแหน่งผลิตภัณฑ์........ 148
5.6.2 การวิเคราะห์ส่วนประสมทางการตลาด 4P (Marketing Mix) 153
5.7 แผนการปฏิบัติงาน (Operation Plan) 157
5.7.1 แผนการผลิต 157
5.8 แผนการเงินและการลงทุน 159
5.8.1 การประมาณการลงทุน 160
5.8.2 การประมาณการต้นทุนขายสินค้าและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 161
5.9 ความเป็นไปได้ทางการเงิน (Financial Feasibility) 166
5.10 การวางแผนป้องกันความเสี่ยง 169
บทที่ 6 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย 171
6.1 สรุปผลการทำงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์........ 171
6.2 การนำนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ 174
6.2.1 รายละเอียดของเทคโนโลยี 174
6.2.2 การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่า (Value chain analysis)........ 175
6.2.3 การมีส่วนร่วมของสถาบันการศึกษา ภาครัฐ และองค์กรวิชาชีพในการพัฒนาห่วงโซ่คุณค่าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 177
6.3 ประโยชน์ของการวิจัยและพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา........ 178
6.3.1 ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจ........ 178
6.3.2 ผลประโยชน์ทางด้านสังคม........ 178
6.3.3 ผลประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม........ 179
6.4 แนวทางการปรับปรุงและต่อยอดงานวิจัยในอนาคต........ 179
6.4.1 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ... 179

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.4.2 การพัฒนากระบวนการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา......179

6.4.3 การกำหนดมาตรฐานมุมแกนยึดใบพัดสำหรับใบพัดของพัดลมระบายแต่ละประเภท180

บรรณานุกรม......181

ภาคผนวก......192

ภาคผนวก ก ขั้นตอนการสร้างตัวทดสอบความเป็นไปได้ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม......193

ภาคผนวก ข ประมวลขั้นตอนการสร้างตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม......194

ภาคผนวก ค ประมวลขั้นตอนการสร้างโรเตอร์และชุดแม่เหล็กสำหรับตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม......195

ภาคผนวก ง การศึกษาลักษณะการไหลของอากาศที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ และผ่านกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนใบพัดค่าต่าง ๆ..196

ภาคผนวก จ แบบสอบถาม......203

ภาคผนวก ฉ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศไทย......212

ภาคผนวก ช สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครอง PCT กับ WIPO......213

ภาคผนวก ซ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศสหรัฐอเมริกา......214

ภาคผนวก ฌ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศจีน......215

ภาคผนวก ญ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศอินเดีย......216

ภาคผนวก ฎ สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศออสเตรเลีย......217

ภาคผนวก ฏ รางวัลบทความยอดเยี่ยม (Best Paper Award) ที่ได้รับจากที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ......218

ประวัติผู้เขียน......219

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมแต่ละประเภท 30
ตารางที่ 2.2 การจำแนกกังหันลมแบบแกนนอนตามขนาดผ่านศูนย์กลางใบพัดและขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 33
ตารางที่ 2.3 ศักยภาพพลังงานลมจากธรรมชาติของประเทศไทยจำแนกตามช่วงความเร็วลม 34
ตารางที่ 2.4 พัดลมระบบระบายอากาศที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม.. 38
ตารางที่ 3.1 วิธีดำเนินการวิจัยและผลลัพธ์ที่คาดหวัง... 74
ตารางที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยและกำลังที่โหลดความต้านทานที่ต่างกัน ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที 78
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการที่นำมาพิจารณาสำหรับการออกแบบการทดลอง . 80
ตารางที่ 3.4 การประเมินจุดคุ้มทุนในมุมมองผู้ซื้อเปรียบเทียบกังหันลมแบบปัจจุบันและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากัน..................................... 86
ตารางที่ 3.5 แบบจำลองธุรกิจ 88
ตารางที่ 4.1 แนวคิดของกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย....................................... 90
ตารางที่ 4.2 การประเมินความเป็นไปได้ของแนวคิดสำหรับการประดิษฐ์กังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย 91
ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา... 99
ตารางที่ 4.4 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านพัดลมระบาย กรณีที่พัดลมระบายมีการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม และพัดลมระบายแบบติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีมุมแกนยึดใบพัดต่างกัน 103
ตารางที่ 4.5 ผลกระทบของจำนวนแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 104

ตารางที่ 4.6 ผลกระทบของจำนวนใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 107

ตารางที่ 4.7 ผลกระทบของมุมแกนยึดใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 110

ตารางที่ 4.8 ผลกระทบของชนิดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 112

ตารางที่ 4.9 ผลกระทบของความหนาแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 115

ตารางที่ 4.10 ผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 117

ตารางที่ 4.11 ผลกระทบของจำนวนขดลวดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 119

ตารางที่ 4.12 ผลกระทบของทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดทองแดงและจำนวนเฟสต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที 122

ตารางที่ 4.13 สรุปแนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 125

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบกังหันแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม 131

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบประเมินการยอมรับนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม 133

ตารางที่ 4.16 อธิบายค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม 134

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.17 การแบ่งค่าคะแนนและระดับการยอมรับนวัตกรรม 135

ตารางที่ 4.18 การยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ประโยชน์ (Perceive of Usefulness) 136

ตารางที่ 4.19 การยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน (Perceive of Use) 137

ตารางที่ 4.20 การยอมรับนวัตกรรม ด้านความสนใจในการใช้งาน (Intention to Use) 137

ตารางที่ 4.21 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทน 138

ตารางที่ 5.1 สถานการณ์คุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 141

ตารางที่ 5.2 บริษัทผู้ผลิตกังหันลมรายใหญ่ 10 อันดับแรกของโลก (VizBibe, 2022) 146

ตารางที่ 5.3 ราคาผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 155

ตารางที่ 5.4 กำลังการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแต่ละรุ่นต่อปี 159

ตารางที่ 5.5 ประมาณการการลงทุน 160

ตารางที่ 5.6 ค่าจ้างบุคลากร 162

ตารางที่ 5.7 ประมาณการต้นทุนขายสินค้าในช่วงเวลา 5 ปี 163

ตารางที่ 5.8 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี 163

ตารางที่ 5.9 ราคาขายกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแต่ละรุ่นในปีที่ 1 164

ตารางที่ 5.10 ประมาณการรายได้จากการขายสินค้าในช่วงเวลา 5 ปี 165

ตารางที่ 5.11 ประมาณการรายได้จากการบริการออกแบบโครงการในช่วงเวลา 5 ปี 165

ตารางที่ 5.12 ประมาณการผลการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี ในสถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ (Base case scenario) 166

ตารางที่ 5.13 ประมาณการผลการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี ในสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด 167

ตารางที่ 5.14 ความสามารถทางการเงินและการลงทุน 168

ตารางที่ 5.15 การวางแผนป้องกันความเสี่ยง 169

ตารางที่ 6.1 สถานการณ์ขอคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 171

ตารางที่ 6.2 สรุปความเป็นไปได้ทางการเงิน 173

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.3 รายละเอียดของเทคโนโลยี... 175

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การเกิดลม........ 25
รูปที่ 2.2 วิวัฒนาการการใช้พลังงานลม........ 28
รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของกังหันลม........ 28
รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนหมุนแนวนอน (HAWT)........ 29
รูปที่ 2.5 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (VAWT)........ 29
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน........ 31
รูปที่ 2.7 แสดงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย........ 34
รูปที่ 2.8 พัดลมระบายในโรงเรือนปศุสัตว์แบบระบบปิด........ 36
รูปที่ 2.9 พัดลมระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม........ 36
รูปที่ 2.10 พัดลมระบายในโรงเรือนเพาะปลูกพืชแบบปิด........ 36
รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการออกแบบพัดลมที่กำลังการใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากัน........ 37
รูปที่ 2.12 ตำแหน่งในการวัดเพื่อศึกษาความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ........ 41
รูปที่ 2.13 เครื่องวัดความเร็วลม ANEMOMETER รุ่น DT-619/CEM........ 41
รูปที่ 2.14 ผลการวัดความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ ตามระยะห่างตามแนวแกนและแนวรัศมี........ 42
รูปที่ 2.15 การไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (Stream Tube) ที่พิจารณาให้เป็นรูปปิด (Enclosure) ของส่วนหมุน........ 47
รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานแม่เหล็กจำแนกตามวัสดุ........ 51
รูปที่ 2.17 ขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ BAH Model........ 52
รูปที่ 2.18 Stage-Gate Model........ 52
รูปที่ 2.19 กระบวนการการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่........ 53
รูปที่ 2.20 กังหันลมแกนตั้งที่ติดตั้งกับระบบลมระบายของ Chong และคณะ........ 55

รูปที่ 2.21 การเสริมแผ่นเหล็กเจนเนอเรเตอร์ 56

รูปที่ 2.22 กังหันลมขนาดเล็กแบบใบพัดหมุน Swirl (Zakaria, 2015) 56

รูปที่ 2.23 ใบพัดกังหันที่สามารถปรับความยาวใบพัดความความเร็วลม (Hossain, 2015) 57

รูปที่ 2.24 การออกแบบใบพัดรับลมแบบในแกนและนอกแกน (Varola, 2011) 57

รูปที่ 2.25 Wind amplifier (Sevvel, 2014) 58

รูปที่ 2.26 โปรแกรม AcclaimIP.com สำหรับช่วยในการสืบค้นและวิเคราะห์สิทธิบัตร 59

รูปที่ 2.27 จำนวนสิทธิบัตรทั่วโลกที่ได้รับการรับรองจำแนกตามรายปี 60

รูปที่ 2.28 จำนวนสิทธิบัตรที่ได้รับการรับรองจำแนกตามประเทศที่ขอรับรองสิทธิ์ 61

รูปที่ 2.29 จำนวนสิทธิบัตรของประเทศไทยที่ได้รับการรับรองจำแนกตามรายปี 62

รูปที่ 2.30 Shaftless Energy Conversion Device, US3867655 63

รูปที่ 2.31 Marine Propulsor, US5078628 63

รูปที่ 2.32 Energy Conversion Systems and Methods, US9359991B2 63

รูปที่ 2.33 Shaftless Vertical Axis Wind Turbine, US2009/0220342 A1 64

รูปที่ 2.34 Shaftless Generator, US2016/0329788 A1 64

รูปที่ 2.35 Driver for A Turbine Generator Aided by Magnetic Levitation, US9627941B1 64

รูปที่ 2.36 Louvered Horizontal Wind Turbine, US7323791B2 65

รูปที่ 2.37 Shaftless propeller, EP1739007A1 65

รูปที่ 2.38 กังหันผลิตไฟฟ้าจากคลื่นน้ำในทะเลแบบไร้เพลา 66

รูปที่ 2.39 ใบพัดเรือความเร็วสูงแบบไร้เพลา 66

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 75

รูปที่ 3.2 แนวคิดตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย 76

รูปที่ 3.3 ใบพัดกังหันลมที่ใช้ในการวิจัย 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.4 การติดตั้งใบพัด แม่เหล็กแรงดึงสูงและขดลวดเข้ากับฐานยึด 78

รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมสำหรับวัดประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา 79

รูปที่ 3.6 เครื่องสร้างควันสำหรับศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 83

รูปที่ 3.7 น้ำยาสำหรับสร้างควันเพื่อศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา.. 83

รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องสร้างควันเข้ากับชุดศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการ 84

รูปที่ 3.9 กรอบแนวคิดการวิจัย 87

รูปที่ 3.10 แบบจำลองทฤษฎีของกรอบแนวคิดการวิจัย 87

รูปที่ 4.1 การทำงานแบบไร้เพลาของรถปั่นแยกกากมันสำปะหลัง 91

รูปที่ 4.2 รูปทรงแบบกรวยที่อากาศหรือลมสามารถไหลผ่านได้ 92

รูปที่ 4.3 หลักการทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 92

รูปที่ 4.4 Mockup ที่ใช้ทดสอบความเป็นไปได้ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 93

รูปที่ 4.5 ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 94

รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบของชุดโรเตอร์ของกันหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 95

รูปที่ 4.7 ลักษณะการไหลของอากาศที่ผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมที่ได้จากการการสร้างแบบจำลองการไหล 96

รูปที่ 4.8 ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 98

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดความเร็วลมและความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบาย 100

รูปที่ 4.10 ผลกระทบของจำนวนแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 105

รูปที่ 4.11 การปรับปรุงใบพัดต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ 106

รูปที่ 4.12 ผลกระทบของจำนวนใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน 108

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.13 ผลกระทบของมุมแกนยึดใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน 111

รูปที่ 4.14 ผลกระทบของชนิดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน 113

รูปที่ 4.15 ผลกระทบของความหนาแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศ และกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน 116

รูปที่ 4.16 ผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลม 118

รูปที่ 4.17 ผลกระทบของจำนวนของลวดทองแดงต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน 120

รูปที่ 4.18 ผลกระทบของทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดและจำนวนเฟสต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน 123

รูปที่ 4.19 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 127

รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์กำลังของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 128

รูปที่ 4.21 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 129

รูปที่ 4.22 พัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งอยู่ในห้องหล่อชิ้นงาน (Casting Room) อาคาร SMT5 ชั้น 1 129

รูปที่ 4.23 พัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งภายในห้องน้ำหน้าโรงอาหารอาคาร SMT5 130

รูปที่ 4.24 การประมวลผลความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามในส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ 134

รูปที่ 4.25 การประมวลผลความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามในส่วนการยอมรับนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 135

รูปที่ 6.1 การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม 176

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ โดยเฉพาะแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละภาคส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ในอนาคตอาจเกิดสภาวะวิกฤติด้านพลังงานมากขึ้นเนื่องจากแหล่งพลังงานฟอสซิลที่มีอยู่นั้นมีจำกัด ตลอดจนค่าครองชีพที่สูงขึ้นและปัญหาโลกร้อน จึงทำให้หน่วยงานภาครัฐและเอกชนพยายามศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ขึ้นมาเพื่อผลิตพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนในรูปแบบต่าง ๆ จากแหล่งทรัพยากรที่มีอยู่ เช่น แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ไฮโดรเจน ก๊าซชีวภาพ และความร้อนจากใต้พิภพ เป็นต้น โดยพลังงานลมก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้มีความคุ้มค่ามากที่สุด ซึ่งแหล่งพลังงานลมที่มีอยู่ในปัจจุบันมีทั้งลมจากธรรมชาติและลมที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น ลมระบายที่ถูกปล่อยทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้าและที่พักอาศัย เป็นต้น ทรัพยากรลมดังกล่าวสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าได้แบบไม่รู้จักหมดสิ้น นับว่าเป็นพลังงานทางเลือกที่คุ้มค่าที่ประเทศไทยควรพัฒนาเพื่อลดการนำเข้าไฟฟ้าและเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานของประเทศอย่างยั่งยืน

เนื่องจากประเทศไทยไม่ได้อยู่ในภูมิภาคที่มีกระแสลมแรง ความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยจัดอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำ คือ ต่ำกว่า 4 เมตรต่อวินาที จึงมีการติดตั้งกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าเฉพาะในบางพื้นที่ที่มีศักยภาพเท่านั้น เช่น แนวเขตชายฝั่ง บริเวณเกาะต่าง ๆ ในอ่าวไทยและทางภาคใต้ของประเทศ หรือพื้นที่เขตอนุรักษ์ที่ได้รับการอนุมัติจากรัฐ เป็นต้น โดยกังหันลมขนาดใหญ่ที่ส่วนมากนำเข้าจากต่างประเทศจะทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ ไม่คุ้มทุนสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมธรรมชาติ แต่ลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมนั้นมีความเร็วลมคงที่และมีความแน่นอนในส่วนของเวลาการเปิดใช้งาน จึงเป็นแหล่งทรัพยากรที่มีศักยภาพสูงในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ด้วยลักษณะการไหลของลมระบายที่มีความเฉพาะ แตกต่างจากลมจากธรรมชาติ การนำกังหันลมที่มีในปัจจุบันมาใช้อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบลมระบายลดลงและต้นทุนพลังงานเพิ่มขึ้น

ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา (Shaftless Small Scale Horizontal Axis Wind Turbine) ในรูปแบบและแนวทางใหม่ที่เหมาะสมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด คุ้มค่ากับการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลงทุน สะดวกในการติดตั้งและซ่อมบำรุง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อันจะเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ยั่งยืน สร้างประโยชน์ในเชิงเศรษฐกิจและความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ค้นคว้าหาแนวทางใหม่ในการสร้างต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาที่มีความคุ้มค่าในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศไทย

2. เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้ในอนาคต

3. เพื่อศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า และประเมินความสามารถในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาในการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ ทางด้านการตลาด การผลิต และการเงิน

1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยจะเป็นรูปแบบการวิจัยและพัฒนา โดยทำการแบ่งการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การวิจัยทดลอง ทำการดำเนินการวิจัยทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิค โดยการนำเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา มาทดสอบการผลิตไฟฟ้าและผลกระทบต่ออุปกรณ์ต้นกำเนิดลมระบาย โดยใช้พัดลมอุตสาหกรรมเป็นแหล่งจ่ายพลังงานลม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ศึกษาทฤษฎี งานวิจัย สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องและปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ

2) ออกแบบตัวต้นแบบและออกแบบการทดลอง

3) สร้างตัวต้นแบบ

4) สอบเทียบเครื่องมือวัด เพื่อความถูกต้องในการวัดค่าต่างๆ

5) ทำการศึกษานำร่อง ทดสอบการทำงานก่อนทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล

6) ปรับปรุงแก้ไขตัวต้นแบบเพื่อให้สมบูรณ์

7) ทดลองเพื่อหาค่าของปัจจัยที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

8) ทดสอบตัวต้นแบบ ปรับปรุงแก้ไขและทำการทดสอบซ้ำในห้องปฏิบัติการ

9) ทดสอบการใช้งานในพื้นที่จริง

10) รวบรวม วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้และสรุป

CHULALONGKORN UNIVERSITY

11) เขียนงานวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ดำเนินการตามกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) สำรวจความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

2) พัฒนาแนวคิดผลิตภัณฑ์

3) สังเคราะห์แนวคิดนวัตกรรม

4) คัดสรรแนวคิดนวัตกรรม

5) ทดสอบแนวคิดนวัตกรรม

6) ออกแบบแนวคิดผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

3. การศึกษาความเป็นไปได้ทางธุรกิจ ศึกษาแนวทางในการพัฒนานวัตกรรมเชิงพาณิชย์ โดยศึกษาความเป็นไปได้ทางการตลาดผ่านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในมุมมองของลูกค้า และการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินจากข้อมูลประมาณการตัวเลขทางการเงิน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. การดำเนินการวิจัยทดลอง ทำการออกแบบและพัฒนาตัวต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดไม่เกิน 100 ซม.) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายในภาคอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในประเทศไทย ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษา ออกแบบ สร้างตัวต้นแบบ วัดและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากต้นแบบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น อัตราเร็วของใบพัดกังหันลมที่ใช้ผลิตไฟฟ้าสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Current) ความต่างศักย์ก่อกำเนิดเหนี่ยวนำและกำลังไฟฟ้า (Electrical Power) ที่ผลิตได้ในอัตราความเร็วลมต่างๆ ของใบพัดกังหันลม จากนั้นหาประสิทธิภาพของกังหันลมเพื่อหาค่าการปรับตั้งของปัจจัยที่สำคัญให้เหมาะสม แล้วนำไปทดสอบในภาคสนาม

2. แหล่งพลังงานลมที่ใช้สำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการมาจากพัดลมอุตสาหกรรมที่สามารถปรับระดับความเร็วลมได้

3. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ มีขอบเขตในการพัฒนาเฉพาะในระดับการออกแบบแนวคิดผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ซึ่งไม่รวมถึงการออกแบบในระดับการผลิตในภาคอุตสาหกรรม

4. การศึกษาความเป็นไปได้เชิงธุรกิจ ทำการศึกษาใน 3 ประเด็นหลัก คือ การศึกษาความเป็นไปได้ทางการตลาดผ่านการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในมุมมองของลูกค้า ความเป็นไปได้ทางการผลิต และการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงิน จากข้อมูลประมาณการตัวเลขทางการเงินภายใต้สมมติฐานที่กำหนด

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

เนื่องจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมต้องใช้พัดลมในการขับเคลื่อนมวลอากาศให้ออกจากพื้นที่หนึ่งไปสู่อีกพื้นที่หนึ่งเพื่อให้ได้สภาวะอากาศตามที่มาตรฐานกำหนด การออกแบบและสร้างนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาเพื่อผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม จะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ ความคุ้มค่าในการนำไปใช้งาน ความสะดวกในการติดตั้งและซ่อมบำรุงในพื้นที่ที่จำกัด ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม มลภาวะทางเสียง และไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต้นกำเนิดลม โดยใช้ทรัพยากรและวัตถุดิบที่เหมาะสมในการสร้างตัวผลิตภัณฑ์

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

1. นวัตกรรม หมายถึง สิ่งใหม่ วิธีการใหม่ หรือความคิดใหม่ที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน โดยอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือเปลี่ยนแปลงอย่างสิ้นเชิง ที่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้และมีการยอมรับอย่างแพร่หลาย

2. กังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา (Shaftless Small Horizontal Axis Wind Turbine, SSHAWT) หมายถึงอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถรับและแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้โดยไม่ใช้แกนเพลาในการหมุนใบพัดตามแนวแกนเพื่อผลิตไฟฟ้า

3. ลมระบายอุตสาหกรรม หมายถึง ลมจากระบบระบายอากาศที่เกิดจากการนำอากาศที่ปนเปื้อนสารมลพิษต่างๆ ออกจากพื้นที่ทำงานเพื่อให้คุณภาพอากาศภายในมีความปลอดภัยตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์พัดลมในระบบเพื่อเคลื่อนที่มวลอากาศจากห้องที่ควบคุมไปสู่บรรยากาศภายนอก

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Generator) หมายถึงอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการหมุนขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร

5. พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) หมายถึง พลังงานจากแหล่งที่สามารถนำกลับมาใช้ได้โดยไม่มีวันหมด ทั้งจากภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรม อาคารสำนักงานและที่อยู่อาศัย เป็นต้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเชิงวิชาการ (Academic Contribution) สร้างองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้แหล่งทรัพยากรลมระบายอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับเชิงพาณิชย์ (Business Contribution) สามารถนำแหล่งทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศมาผลิตกระแสไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์

สูงสุด คุ้มค่าและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน โดยใช้นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ลดการนำเข้าพลังงานไฟฟ้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังสามารถส่งออกเทคโนโลยีไปยังต่างประเทศ สร้างความมั่งคั่งให้ประเทศในฐานะผู้สร้างสรรค์และผลิตเทคโนโลยีสำหรับพลังงานลมที่มีประสิทธิภาพสูง ที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของเทคโนโลยีสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมที่มีอยู่ในปัจจุบันได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

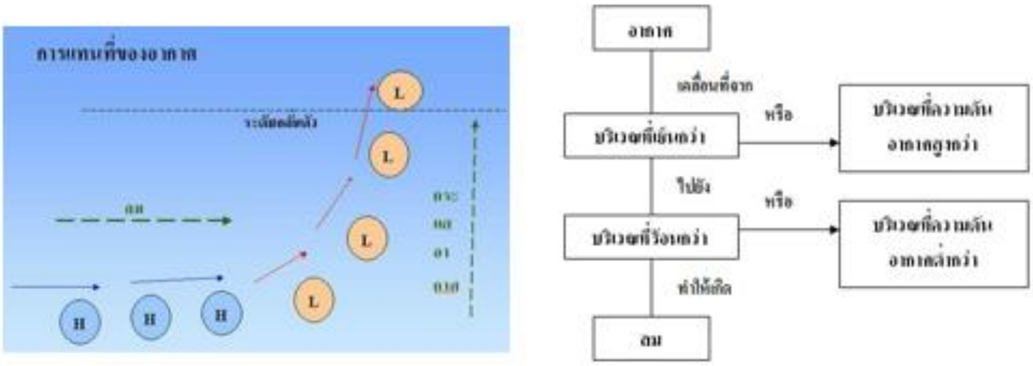
บทที่ 2
การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนานวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายในภาคอุตสาหกรรมครั้งนี้ ต้องอาศัยความรู้ ความเข้าใจในเรื่องของทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับนวัตกรรม พลังงานลม กังหันลม การออกแบบใบพัดกังหัน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า การออกแบบการทดลอง ตลอดจนงานวิจัยและสิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้อง โดยการค้นคว้าจากตำรา เอกสาร บทความ วารสารทางวิชาการ ฐานข้อมูลสิทธิบัตร อินเทอร์เน็ต เป็นต้น ดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 พลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนและสะอาด ที่มีต้นกำเนิดมาการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก เนื่องจากแต่ละตำแหน่งบนพื้นโลกได้รับปริมาณความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความกดอากาศในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งอากาศในส่วนที่มีอุณหภูมิสูง จะมีความกดอากาศลดลงจึงเบาและลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน ขณะเดียวกันอากาศที่เย็นกว่าจะมีน้ำหนักมากกว่าจึงเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ก่อให้เกิดกระแสลมพัดผ่านกระจายอยู่ทั่วไปในชั้นบรรยากาศ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดลม
ที่มา: rmutphysics

2.1.2 ประวัติของการใช้พลังงานลม (History of Wind Power)

การประยุกต์ใช้พลังงานจากลม เริ่มจากการค้นพบบันทึกเกี่ยวกับโรงสีข้าวพลังงานลม (windmills) โดยใช้ระบบเครื่องโม่ในแกนตั้ง ซึ่งเป็นเครื่องโม่แบบง่าย ๆ นิยมใช้กันในพื้นที่ภูเขาสูงโดยชาวแอฟแกน (Afghan) เพื่อการสีเมล็ดข้าวเปลือกในช่วงศตวรรษที่ 7 ก่อนคริสต์กาล ส่วนโรงสี

ข้าวพลังงานลมแบบแกนหมุนแนวนอนพบครั้งแรกแถบเปอร์เซีย ทิเบตและจีน ประมาณคริสตศักราชที่ 1000 โรงสีข้าวพลังงานลมชนิดแกนหมุนในแนวนอนได้แพร่หลายไปจนถึงประเทศแถบเมดิเตอร์เรเนียนและประเทศยุโรปตอนกลาง โรงสีข้าวแบบแกนหมุนแนวนอนพบครั้งแรกในประเทศอังกฤษประมาณปี ค.ศ. 1150 พบในฝรั่งเศสปี ค.ศ. 1180 พบในเบลเยียม ปี ค.ศ. 1190 พบในเยอรมันปี ค.ศ. 1222 และ พบในเดนมาร์กปี ค.ศ. 1259 การพัฒนาและแพร่หลายอย่างรวดเร็วของโรงสีข้าวแบบแกนหมุนแนวนอนมาจากอิทธิพลของนักรบครูเซด

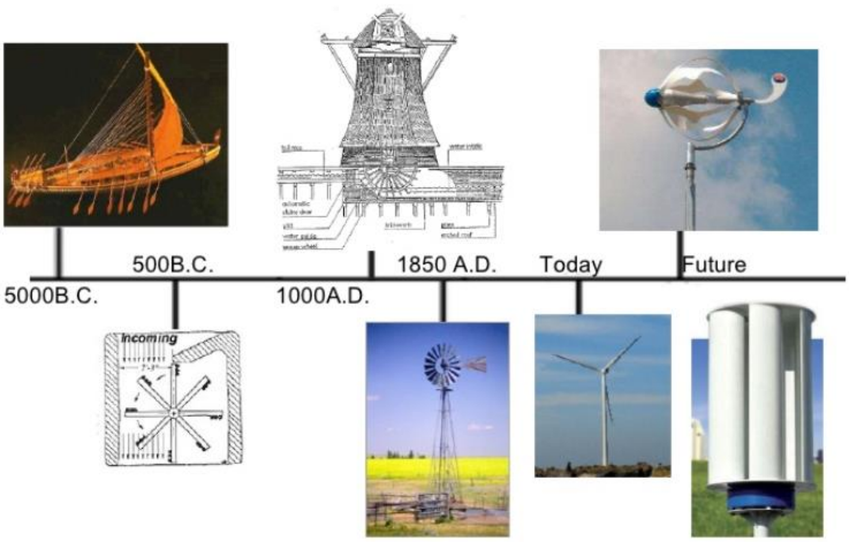
ในยุโรปโรงสีข้าวพลังงานลมได้รับการพัฒนาสมรรถนะอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะระหว่างช่วงศตวรรษที่ 12 และ ศตวรรษที่ 19 ในปี ค.ศ. 1800 ในประเทศฝรั่งเศสมีโรงสีข้าวพลังงานลมแบบยุโรปใช้งานประมาณ 20,000เครื่อง ในประเทศเนเธอร์แลนด์พลังงานในอุตสาหกรรมในช่วงเวลานั้นมาจากพลังงานลมถึงร้อยละ 90 ในช่วงปลายศตวรรษที่19 โรงสีข้าวพลังงานลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนหมุน 25 เมตร ตัวอาคารมีความสูงถึง 30 เมตร ซึ่งในช่วงเวลานั้นการใช้พลังงานลมไม่ได้มีเพียงแค่การสีข้าว แต่ยังมีการประยุกต์ใช้สำหรับการสูบน้ำอีกด้วย ต่อมาในยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมโรงสีข้าวพลังงานลมเริ่มมีการใช้งานลดลง อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ.1904 การใช้พลังงานจากลมยังมีอัตราส่วนถึงร้อยละ 11 ของพลังงานในภาคอุตสาหกรรมของประเทศในช่วงเวลาเดียวกับที่โรงสีข้าวพลังงานลมในยุโรปเริ่มเสื่อมความนิยม เทคโนโลยีนี้กลับได้รับการเผยแพร่ในทวีปอเมริกาเหนือโดยผู้ที่ไปตั้งถิ่นฐานใหม่ มีการใช้กังหันลมสูบน้ำขนาดเล็กสำหรับงานปศุสัตว์ซึ่งได้รับความนิยมมาก กังหันลมชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันในนามกังหันลมแบบอเมริกัน (American windmill) ซึ่งใช้ระบบการทำงานแบบควบคุมตัวอย่างสมบูรณ์ (fully self-regulated) โดยสามารถปรับความเร็วของแกนหมุนได้เมื่อความเร็วลมสูง ในขณะที่โรงสีข้าวพลังงานลมของยุโรปสามารถบิดตัวใบพัดออกจากทิศทางลมได้หรือสามารถม้วนใบพัดเก็บได้หากความเร็วลมสูงจนเกินไปเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวโรงสีข้าว ความนิยมของกังหันลมแบบอเมริกันเพิ่มขึ้นสูงมากระหว่างปี ค.ศ. 1920 – 1930 มีกังหันลมประมาณ 600,000 ตัวถูกติดตั้งเพื่อใช้งาน ในปัจจุบันกังหันลมแบบอเมริกันหลายแบบยังคงถูกนำมาใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ทางการเกษตรและกิจกรรมต่างๆ ทั่วโลก

สำหรับประเทศไทยผู้เชี่ยวชาญทางด้านพลังงานลม ได้ประเมินการใช้งานกังหันลมแบบใบพัดที่ทำด้วยไม้ซึ่งใช้ในนาข้าวมีจำนวนอยู่ประมาณ 2,000 ตัว และกังหันลมแบบเสื่อลำแพนหรือแบบผ้าใบซึ่งใช้ในนาเกลือหรือนากุ้งมีจำนวนอยู่ประมาณ 3,000 ตัว ต่อมาได้พบว่าจำนวนกังหันลมดังกล่าวลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพัฒนาพื้นที่เกษตรกรรมให้เป็นพื้นที่อุตสาหกรรม ในปี พ.ศ 2531 มีการสำรวจจำนวนกังหันลมเฉพาะในบริเวณ 20 ตารางกิโลเมตร ของจังหวัดสมุทรสาครและสมุทรสงคราม พบว่ามีกังหันลมเหลืออยู่เพียง 667 ตัว กังหันลมดังกล่าวถือได้ว่าเป็นชนิดดั้งเดิมจากภูมิปัญญาชาวบ้าน แต่สามารถใช้แทนพลังงานไฟฟ้าเพื่อการสูบน้ำได้เป็นอย่างดี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2546. ออน-ไลน์)

ในปี ค.ศ. 1891 Dane Poul LaCour วิศวกรชาวเดนมาร์กเป็นคนแรกที่สร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้าขึ้น เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาระหว่างช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 และ 2 โดยใช้เพื่อทดแทนการขาดแคลนพลังงานในขณะนั้น บริษัท F.L. Smidth ของเดนมาร์กถือได้ว่าเป็นผู้ริเริ่มกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสมัยใหม่ในปี ค.ศ. 1941-1942 กังหันลมของบริษัทนี้เป็นกังหันลมแบบสมัยใหม่ตัวแรกที่ใช้แพนอากาศ (airfoils) ซึ่งใช้ความรู้ขั้นสูงทางด้านอากาศพลศาสตร์ในเวลานั้น ในช่วงเวลาเดียวกัน Palmer Putnam ชาวอเมริกันได้สร้างกังหันลมขนาดใหญ่ให้กับบริษัท Morgan Smith โดยกังหันลมที่สร้างขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 53 เมตร ซึ่งมีความแตกต่างจากกังหันลมของเดนมาร์กทั้งในเรื่องของขนาดและหลักการออกแบบ กังหันลมของเดนมาร์กมีหลักการอยู่บนพื้นฐานของการหมุนโดยลมส่วนบน (upwind rotor) กับการควบคุมผ่านตัวล่อ (stall regulation) ทำงานที่ความเร็วลมต่ำ ส่วนกังหันลมของ Putnam ออกแบบอยู่บนพื้นฐานของการหมุนโดยลมส่วนล่าง (downwind rotor) กับการควบคุมโดยการปรับใบพัด (variable pitch regulation) อย่างไรก็ตามกังหันลมของ Putnam ก็ไม่ประสบความสำเร็จและถูกรื้อออกใน ปี ค.ศ. 1945

หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงปี ค.ศ. 1956 – 1967 Johannes Juul ชาวเดนมาร์กได้พัฒนาและออกแบบกังหันลมใหม่เพิ่มเติมและทำการติดตั้งที่เมืองเกดเซอร์ (Gedser) ประเทศเดนมาร์กสามารถผลิตไฟฟ้าได้กว่า 2.2 ล้านหน่วย และในเวลาเดียวกันนี้ Hutter ชาวเยอรมันก็ได้พัฒนากังหันลมรูปแบบใหม่ออกมาโดยกังหันลมประกอบด้วยใบกังหันมีลักษณะเรียวยาวทำจากไฟเบอร์กลาส 2 ใบ กังหันลมชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูง

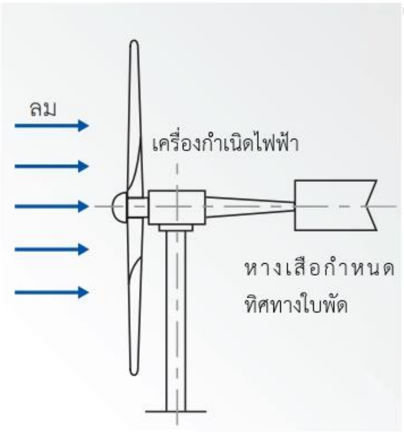
อย่างไรก็ตามแม้ว่ากังหันลมของ Juul และ Hutter จะประสบความสำเร็จในตอนแรก แต่ความสนใจในกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ก็ลดลงหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 มีเพียงกังหันลมขนาดเล็กสำหรับผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกล หรือสำหรับการประจุแบตเตอรี่เท่านั้นที่ยังได้รับความสนใจ ต่อมาหลังเกิดปัญหาวิกฤตการณ์น้ำมันในปี ค.ศ. 1973 ทำให้ความสนใจในพลังงานลมได้กลับมาอีกครั้ง จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีการสนับสนุนเงินทุนเพื่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับพลังงานลมเป็นอย่างมากโดยเฉพาะในประเทศเยอรมัน สหรัฐอเมริกา และสวีเดน ซึ่งได้ใช้เงินนี้ในการพัฒนาต้นแบบกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ในระดับเมกะวัตต์ อย่างไรก็ตามกังหันลมต้นแบบหลาย ๆ แบบ ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควรทั้งที่ผ่านมาเป็นเวลานาน สาเหตุมาจากปัญหาทางเทคนิคหลาย ๆ ประการ เช่น กลไกการบิดของใบพัด เป็นต้น ภาพรวมของวิวัฒนาการการใช้พลังงานลมแสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 วิวัฒนาการการใช้พลังงานลม

2.1.3 หลักการทำงานของกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า

หลักการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าคือ เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหัน พลังงานจลน์ที่เกิดจากลมจะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุนและได้เป็นพลังงานกลออกมา พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมไฟฟ้า และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบต่อไป ดังรูปที่ 2.3 โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบควบคุม และสถานที่ติดตั้งกังหันลม



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของกังหันลม

2.1.4 ประเภทของกังหันลม

Jamieson (2011) ได้จำแนกประเภทของกังหันลมตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุนออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบแกนนอนหรือแกนตั้งรายละเอียดดังต่อไปนี้ (Jamieson, 2011)

1) กังหันลมแกนหมุนแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) หมายถึงกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของกระแสลม เช่น กังหันลมพรอเพลเลอร์ หรือกังหันลมใบเสื่อลำแพน เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.4

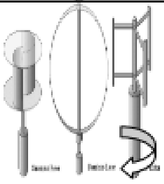
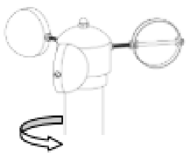
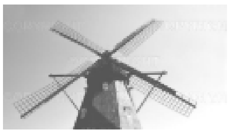
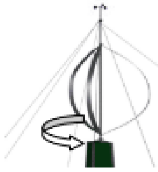
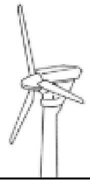
รูปที่ 2.4 กังหันลมแกนหมุนแนวนอน (HAWT)

2) กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) หมายถึงกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลมและตั้งฉากกับพื้นผิวโลก เช่น กังหันลมแดร์เรียส (Darrius) หรือกังหันลมซาโวเนียส (Savonius) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.5 กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (VAWT)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมแต่ละประเภท

Ref No.	Design	Orientation	Use	Propulsion	* Peak Efficiency	Diagram
1	Savonius rotor	VAWT	Historic Persian windmill to modern day ventilation	Drag	16%	
2	Cup	VAWT	Modern day cup anemometer	Drag	8%	
3	American farm windmill	HAWT	18th century to present day, farm use for Pumping water, grinding wheat, generating electricity	Lift	31%	
4	Dutch Windmill	HAWT	16th Century, used for grinding wheat.	Lift	27%	
5	Darrieus Rotor (egg beater)	VAWT	20th century, electricity generation	Lift	40%	
6	Modern Wind Turbine	HAWT	20th century, electricity generation	Lift	Blade Qty / efficiency 1 / 43% 2 / 47% 3 / 50%	

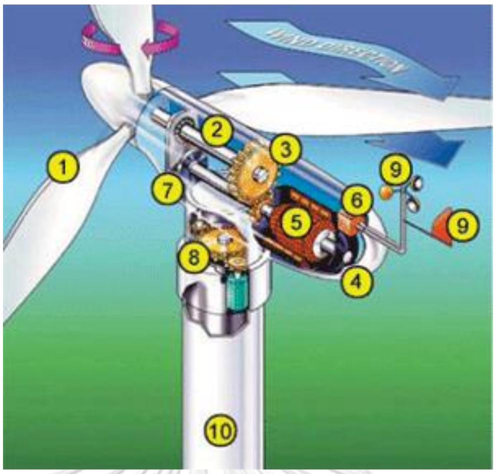
* Peak efficiency is dependent upon design, values quoted are maximum efficiencies of designs in operation to date [1].

ที่มา: Hau, E. (2006) Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed.; Springer: Berlin, Germany.

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของกำลังกังหันลมโดย Hau (2006) ดังตารางที่ 2.1 พบว่า กังหันลมแบบแกนนอนแบบสมัยใหม่ (Modern Wind Turbine) ที่มี 3 ใบพัด ให้ประสิทธิภาพสูงสุดคือร้อยละ 50 จะเห็นได้ว่ากังหันลมแกนนอนมีศักยภาพที่เหมาะสำหรับการพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอีก ผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะพัฒนากังหันลมแบบแกนนอนเพื่อให้เหมาะสมกับการนำทรัพยากรลมระบายอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในประเทศไทยมาผลิตไฟฟ้า

2.1.5 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน

กังหันลมแกนนอนสำหรับผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบแสดงดังนี้



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน

1. ใบพัด เป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล ซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน

2. เพลาแกนหมุน ซึ่งรับแรงจากแกนหมุนใบพัดและส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3. ห้องส่งกำลัง ซึ่งเป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุน ระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4. ห้องเครื่อง ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่าง ๆ ของกังหันลม เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม

5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

6. ระบบควบคุมไฟฟ้า ซึ่งใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานและจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

7. ระบบเบรก เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลมเกินความสามารถของกังหันที่จะรับได้ และใช้ในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา

8. แกนคอหมุนรับทิศทางลม เป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์กับหางเสือรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

9. เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม ซึ่งเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่น ๆ ได้ถูกต้อง

10. เสากังหันลม เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน

ในส่วนของกังหันลมขนาดเล็กนั้น Kishore (2013) ได้อธิบายว่าประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ 1) แกนหมุนกังหัน (Wind Turbine Rotor) ซึ่งรวมถึงใบพัด (Turbine blade) และดุมใบพัด (hub) 2) ระบบส่งกำลัง (Transmission System) ที่รวมแกนเพลา ลูกปืน และเฟืองทด และ 3) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator) (Kishore, 2013)

2.1.6 ขนาดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

เนื่องจากการที่ไม่มีการนิยามการตั้งชื่อที่ชัดเจนสำหรับแยกความแตกต่างระหว่างกังหันลมขนาดใหญ่และขนาดเล็ก Kishore (2013) จึงได้นิยามระบบการตั้งชื่อกังหันลมในงานวิจัยของเขาตามขนาดของโรเตอร์ของกังหันลมไว้ดังนี้ (Kishore, 2013)

1) กังหันลมขนาดจิ๋ว (Micro-scale wind turbine, μSWT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เซนติเมตร
2) กังหันลมขนาดเล็ก (Small-scale wind turbine, SSWT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดอยู่ระหว่าง 10-100 เซนติเมตร
3) กังหันลมขนาดกลาง (Mid-scale wind turbine, MSWT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดอยู่ระหว่าง 1-5 เมตร
4) กังหันลมขนาดใหญ่ (Large-scale wind turbine, LSWT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดมากกว่า 5 เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นอกจากนี้ Tummala และคณะ (2016) ได้จำแนกกังหันลมแบบแกนนอนตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (Rotor diameter) พื้นที่กวาดของใบพัด (Swept Area) และขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า (Power rating) ดังตารางที่ 2.2 (Tummala, 2016)

ตารางที่ 2.2 การจำแนกกังหันลมแบบแกนนอนตามขนาดผ่านศูนย์กลางใบพัดและขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า

		เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (เมตร)		พื้นที่กวาดของใบพัด (ตารางเมตร)		ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	
Small scale	Micro	0.50	1.25	0.20	1.20	0.004	0.25
	Mini	1.25	3.00	1.20	7.10	0.25	1.40
	Household	3	10	7	79	1.4	16
Small commercial		10	20	79	314	25	100
Medium commercial		20	50	314	1963	100	1000
Large commercial		50	100	1963	7854	1000	3000

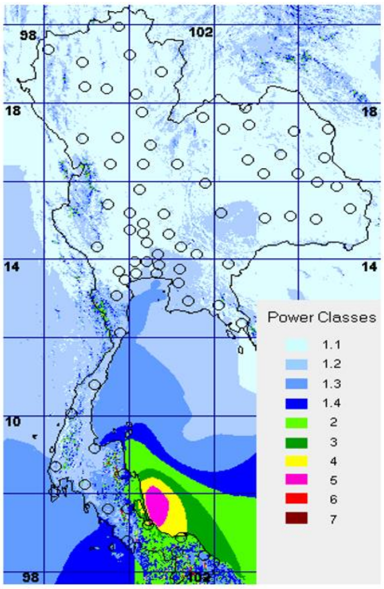
สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการวิจัยในส่วนของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กสำหรับผลิตไฟฟ้า เนื่องจากมีความเหมาะสมในการติดตั้งในพื้นที่ลมระบายที่มีอยู่ในประเทศไทย

2.1.7 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศ

2.1.7.1 แหล่งทรัพยากรลมจากธรรมชาติ (Natural Wind)

ลมจากธรรมชาติเกิดจากการที่อากาศเคลื่อนที่ไปแทนที่ของอากาศ ในทิศทางในแนวราบ เนื่องจากอากาศในบริเวณที่ร้อนจะลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่อากาศบริเวณใกล้เคียงที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ เมื่อมีการเคลื่อนไหวของอากาศที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงและแตกต่างกันของความกดอากาศ อากาศบริเวณที่มีความกดอากาศสูงจะเคลื่อนที่เข้ามายังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ มวลอากาศที่เคลื่อนที่เราเรียกว่า “ลม” จึงกล่าวโดยสรุปได้ว่าลมเกิดจากการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความกดอากาศสูงไปยังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ ซึ่งการเคลื่อนที่ของลมจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความกดอากาศสูงและความกดอากาศต่ำ ถ้ามีความแตกต่างกันน้อยลมที่เกิดขึ้นจะเป็นลมเอื่อย แต่ถ้ามีความแตกต่างกันมากจะกลายเป็นพายุได้ ดังนั้นการเกิดลม เป็นปรากฏการณ์ที่อากาศร้อนลอยตัวสูงขึ้นและอากาศเย็นเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.7 แสดงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย
ที่มารูป: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2546.

ตารางที่ 2.3 ศักยภาพพลังงานลมจากธรรมชาติของประเทศไทยจำแนกตามช่วงความเร็วลม

Average wind speed and characteristic	Poor (<6m/s)	Fair (6-7m/s)	Good (7-8m/s)	Very Good (8-9m/s)	Excellent (>9m/s)
Land area (sq. km.)	477,157	37,337	748	13	0
% of Total land area	92.6	7.2	0.2	0	0
MW potential	NA	149,348	2,992	52	0

Note: For large wind turbines only. Potential MW assumes an average wind turbine density of 4MW per square kilometre and no exclusion for parks, urban or inaccessible areas. Wind speeds are for 65m height in the predominant land cover with no obstructions.

ที่มา: Major (2008)

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยดังรูปที่ 2.7 และข้อมูลศักยภาพพลังงานลมจากธรรมชาติของประเทศไทยจำแนกตามช่วงความเร็วลมดังตารางที่ 2.3 (Chancham, 2014) (Major, 2008) หากเทียบกับประเทศในยุโรปแล้วถือว่ามีศักยภาพต่ำมาก ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นความเร็วลมในระดับประมาณ 6 เมตรต่อวินาทีถือว่ายังไม่เหมาะกับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ระดับเมกะวัตต์ (Chingulpitak, 2014) เพราะกังหันลมขนาดดังกล่าวต้องการความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 12–15 เมตรต่อวินาที ดังนั้นทางเลือกที่เหมาะสมของประเทศไทยหากจะส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากลมในการผลิตไฟฟ้า ควรจะเป็นระบบขนาดเล็กในช่วงพิกัดกำลังระดับกิโลวัตต์จะมีความเหมาะสมมากกว่า

2.1.7.2 แหล่งทรัพยากรลมที่มนุษย์สร้างขึ้น (Non-natural Wind หรือ Man-made Wind)

แหล่งทรัพยากรลมที่มนุษย์สร้างขึ้นในประเทศไทยมี 2 แหล่งคือ ลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม อาคาร สำนักงาน และที่อยู่อาศัย และลมจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ในการเดินทางและภาคขนส่ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม อาคาร สำนักงาน และที่อยู่อาศัย เป็นลมจากระบบระบายอากาศที่เกิดจากการนำอากาศที่ปนเปื้อนออกจากพื้นที่ทำงาน เพื่อให้คุณภาพอากาศภายในมีความปลอดภัยตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยการติดตั้งอุปกรณ์พัดลมในระบบเพื่อเคลื่อนที่มวลอากาศจากห้องที่ควบคุมไปสู่บรรยากาศภายนอก สำหรับประเทศไทยการใช้พัดลมระบายอากาศพบมากในภาคอุตสาหกรรมเกษตรและปศุสัตว์ และภาคอุตสาหกรรมการผลิต ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 2.8-2.10 เนื่องจากต้นทุนการติดตั้งที่ไม่แพงและสามารถใช้งานได้จริง เป็นต้น ซึ่งพัดลมระบายของเครื่องทำความเย็นมีความเร็วลมประมาณ 6 เมตรต่อวินาที พัดลมอุตสาหกรรมมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 8-18 เมตรต่อวินาที

2) ลมจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในการเดินทางและภาคขนส่ง มีความเร็วลมอยู่ในช่วง 10–30 เมตรต่อวินาที แต่มีข้อจำกัดด้านการนำไปใช้งานเนื่องจากแรงต้านที่จะเกิดขึ้นกับยานพาหนะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่มากขึ้น จึงยังไม่มีการพัฒนาและนำกังหันลมไปติดตั้งกับยานพาหนะในการใช้งานจริง

ในส่วนของลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมนั้น ศิขัณฑ์ (2554) ได้อธิบายถึงหลักการทำงานของโรงเรือนระบบปิดแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยการระเหยน้ำ (Evaporative cooling system; EVAP system) ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนโดยการเพิ่มความชื้น โดยมีการพ่นน้ำผ่านทางแผ่นรังผึ้ง (Cooling pads) ซึ่งอยู่ทางด้านหนึ่งของโรงเรือน อากาศร้อนจากภายนอกถูกดูดผ่านทางแผ่นรังผึ้งโดยพัดลม ซึ่งอยู่ทางด้านตรงกันข้ามกับแผ่นรังผึ้งอีกด้านหนึ่งของโรงเรือน ในปัจจุบันฟาร์มมีการใช้โรงเรือนระบบปิดกับสัตว์ทุกชนิด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 นิ้ว จำนวน 8 เครื่องพัดลมจะเปิดทำงาน 1 เครื่องอยู่ตลอดเวลา และพัดลมที่เหลือจะทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิกำหนดไว้ โดยที่พัดลมทุกตัวจะทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 82 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 27.8 องศาเซลเซียส (ศิขัณฑ์ พงษพิพัฒน์, 2554) นั่นหมายความว่าพัดลมระบายของโรงเรือนระบบปิดจะทำงานมากกว่า 12 ชั่วโมงในแต่ละวันเนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยสูงสุดอยู่ที่ 39.1 องศาเซลเซียส และต่ำสุดอยู่ที่ 18.3 องศาเซลเซียส (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2559)

รูปที่ 2.8 พัดลมระบายในโรงเรือนปศุสัตว์แบบระบบปิด

ที่มารูป: https://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=wildbirds&month=01-2013&date=18&group=7&gblog=13

https://sites.google.com/site/phakhwlaychysuwrrnsingh/withi-kar-leiyng-ki-phanthu-khi

http://oknation.nationtv.tv/mblog/entry.php?id=1023297

รูปที่ 2.9 พัดลมระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม

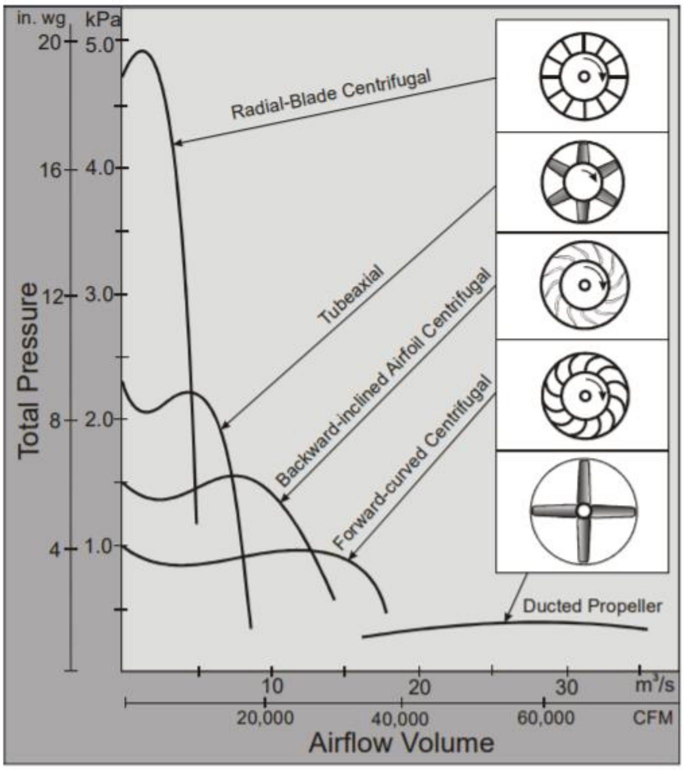
ที่มารูป: http://www.ac-control.net/gallerys/124127/ระบบระบายอากาศ.html

รูปที่ 2.10 พัดลมระบายในโรงเรือนเพาะปลูกพืชแบบปิด

ที่มารูป: https://www.thairath.co.th/content/486290

2.1.8 พัดลมระบายอากาศ

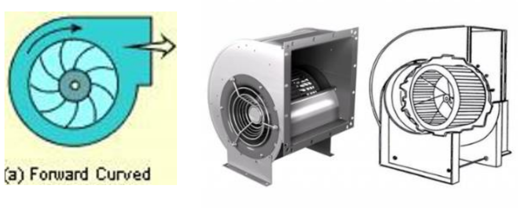
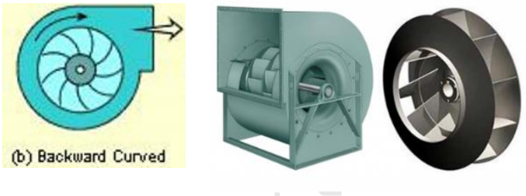
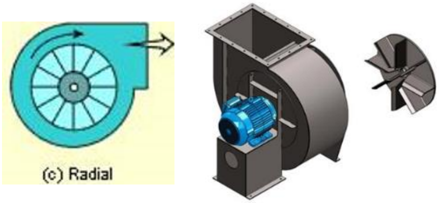
พัดลมระบายอากาศในโรงงานอุตสาหกรรมถูกนำมาติดตั้งเข้ากับระบบ เพื่อลดอุณหภูมิภายในห้อง เพิ่มระบบการหมุนเวียนของอากาศ ทำให้อากาศสดชื่น หรือติดตั้งในพื้นที่ที่ต้องการเพิ่มระบบการหมุนเวียนของอากาศด้วยค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด โดยการถ่ายเทอากาศร้อนหรืออากาศเสียภายในห้องออกสู่ภายนอกห้อง ซึ่งเหมาะสำหรับพื้นที่ที่ต้องการเพิ่มระบบการหมุนเวียนของอากาศ พัดลมระบายอากาศแต่ละประเภทมีปริมาตรการไหลของอากาศ (Airflow Volume) และแรงดัน (Pressure) ที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.11



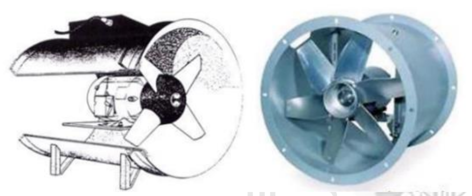
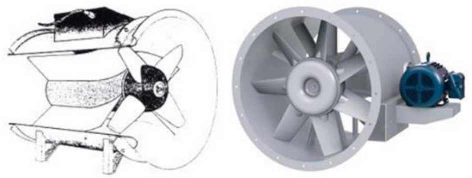
รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบการออกแบบพัดลมที่กำลังการใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากัน

พัดลมระบบระบายอากาศที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมี 2 ประเภทคือ พัดลมแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Fans) และพัดลมไหลตามแกน (Axial Fan) ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.4 การออกแบบกังหันลมต้องคำนึงถึงประเภทของพัดลมที่จะนำไปติดตั้ง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบเพื่อนำไปใช้งานกับพัดลมแบบใบพัด (Propeller Fan) ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งภาคอุตสาหกรรมการผลิตและอุตสาหกรรมเกษตรในประเทศไทย

ตารางที่ 2.4 พัดลมระบบระบายอากาศที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ประเภทพัดลมระบบระบายอากาศที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม		จำนวนใบพัด	ความเร็วลม	ลักษณะเฉพาะ
พัดลมแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Fan)	แบบใบพัดโค้งหน้า (Forward Curved Blade Fans) 	20-60 ใบ	5-18 m/s	ใบพัดโค้งไปข้างหน้า ในทิศทางเดียวกับการหมุน ชุดใบพัดจะมีลักษณะคล้ายกับกรงกระรอก (Squirrel Cage) เพลาใบพัดจะมีขนาดเล็กหมุนด้วยความ เร็วรอบที่สูงกว่าพัดลมชนิดใบพัดตรง
	แบบใบพัดโค้งหลัง (Backward Curved Blade Fans) 	10-50 ใบ	5-18 m/s	ใบพัดเอียงไปข้างหลังในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการหมุนของใบพัด เป็นพัดลมที่มีความเร็วรอบสูง ควบคุมความดันและปริมาณลมได้ง่าย
	แบบใบพัดตรง (Straight Blade หรือ Radial Fans) 	6-20 ใบ	5-18 m/s	ใบพัดจะอยู่ในระนาบรัศมีจากเพลา หมุนด้วยความเร็วรอบอย่างน้อยประมาณ 500-3,000 รอบต่อนาที

ตารางที่ 2.4 พัดลมระบบระบายอากาศที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (ต่อ)

ประเภทพัดลมระบบระบายอากาศที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม		จำนวนใบพัด	ความเร็วลม	ลักษณะเฉพาะ
พัดลมไหลตามแกน (Axial Fan)	พัดลมแบบใบพัด (Propeller Fan)	4-6 ใบ	9–18 m/s	เป็นชนิดที่ใช้ส่งลมแบบไม่มีท่อลม ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของลมน้อย
	พัดลมแบบลมหมุนเป็นเกลียว (Tube Axial Fans) 	6 ใบ	5–18 m/s	พัฒนามาจากพัดลมชนิดแรก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการติดตั้ง Propeller Fan ลงในท่อสั้น ๆ ทำให้อากาศที่ทางเข้าและออกของพัดลมเกิดการผันผวนน้อยลง
	พัดลมที่ให้ลมพัดในแนวเส้นตรง (Vane Axial Fans) 	6 ใบ	5–18 m/s	มีแผ่นครีบเพื่อใช้ในการบังคับการไหลของอากาศที่ถูกขับเคลื่อน ติดตั้งอยู่ภายในตัวเรือนของพัดลม บริเวณท่อทางออกบริเวณด้านหลังชุดใบพัด เพื่อช่วยให้การไหลของอากาศที่ถูกขับเคลื่อนมีทิศทางเป็นเส้นตรงมากที่สุดเพื่อช่วยลดลักษณะการไหลของอากาศปั่นป่วนและลดพลังงานสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศปั่นป่วนภายในระบบให้น้อยลง

ที่มารูป: http://www.thailandindustry.com/onlinemag/view2.php?id=1522&section=37&issues=82

2.2.9 มาตรฐานการระบายอากาศภายในอาคาร

การกำหนดอัตราการระบายอากาศภายในอาคารมีวิธีกำหนดได้หลายแบบ เช่น การระบุอัตราการระบายอากาศเป็นปริมาตรต่อนาที ต่อคน การระบุอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง เป็นต้น โดยกฎกระทรวงฉบับที่ 33 ภายใต้พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 กำหนดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศสำหรับอาคารที่มีระบบปรับภาวะอากาศ ดังตารางที่ 2.5 (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559)

ตารางที่ 2.5 อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง ภายใต้พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522

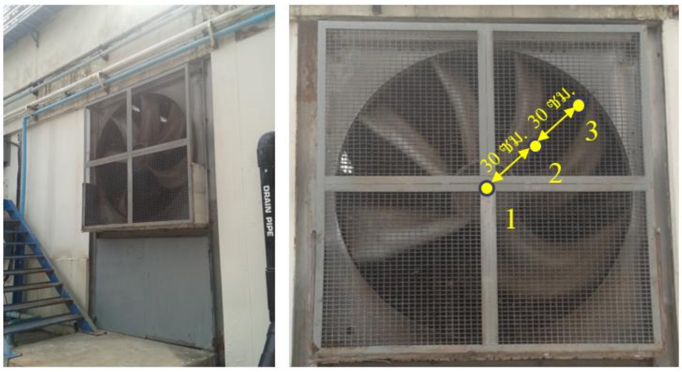
ลำดับ	สถานที่	ลบ.ม/ชม./ตร.ม.
1	ห้างสรรพสินค้า	2
2	โรงงาน	2
3	สำนักงาน	2
4	สถานอาบ อบ นวด	2
5	ชั้นติดต่อธุระกับธนาคาร	2
6	ห้องพักโรงแรม/อาคารชุด	2
7	ห้องปฏิบัติการ	2
8	ร้านตัดผม	3
9	สถานโบว์ลิ่ง	4
10	โรงมหรสพ	4
11	ห้องเรียน	4
12	สถานบริหารร่างกาย	5
13	ร้านเสริมสวย	5
14	ห้องประชุม	6
15	ห้องน้ำ/ห้องส้วม	6
16	ไนต์คลับ/บาร์	10
17	ห้องครัว	30
18	โรงพยาบาล	-
	18.1) ห้องคนไข้	2
	18.2) ห้องผ่าตัด/ห้องคลอด	8
	18.3) ห้อง ไอ ซี ยู	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

การออกแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายจึงจำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้าจากลมระบายโดยยังคงทำให้ระบบระบายอากาศเป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กำหนด

2.2.10 ลักษณะของลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม

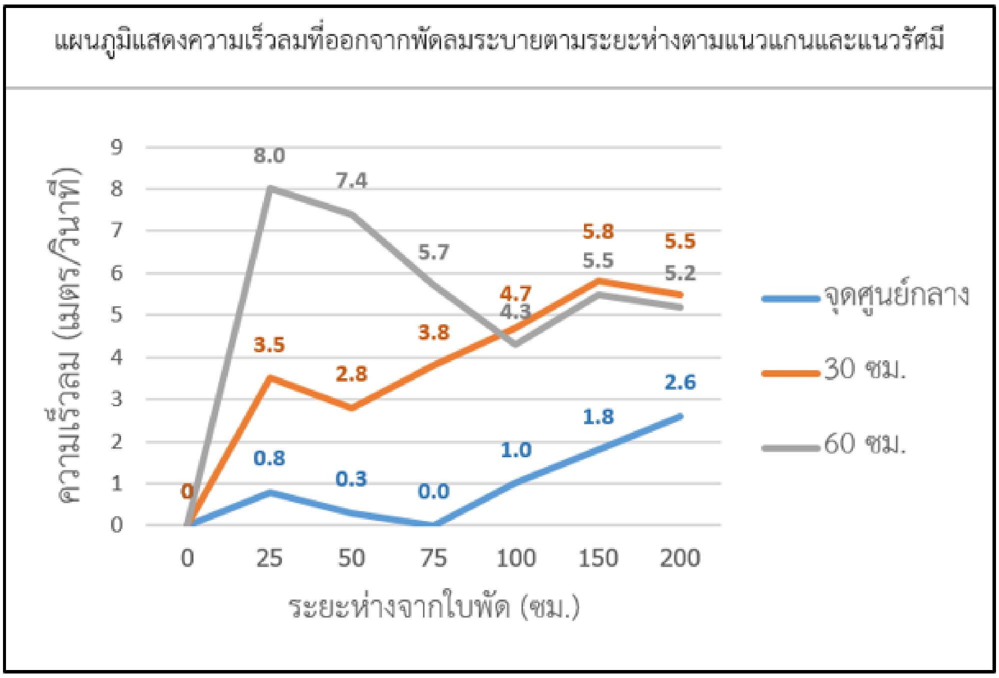
จากการศึกษาลักษณะของลมระบายที่ออกจากพัดลมระบายอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 เซนติเมตร ที่ใช้สำหรับระบายอากาศจากห้องคอมเพรสเซอร์สำหรับอัดอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตสู่บรรยากาศภายนอกอาคารของ บริษัทเวสเทิร์นดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด โดยทำการวัดความเร็วลมตามระยะห่างที่กำหนดตามแนวแกนและตามแนวรัศมีของใบพัด ดังรูปที่ 2.12 ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม ANEMOMETER รุ่น DT-619/CEM ดังรูปที่ 2.13 พบว่าความเร็วลมระบายสูงสุดคือ 8 เมตรต่อวินาทีที่ระยะห่างตามแนวแกน 25 เซนติเมตรและระยะห่างตามแนวรัศมี 60 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลางใบพัด รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.14 และความเร็วลมลดลงเมื่อมีระยะห่างจากใบพัดมากขึ้น ในขณะที่จุดกึ่งกลางของพัดลมนั้น ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะห่างตามแนวแกนเพิ่มขึ้น แต่ที่มีความเร็วต่ำคือ 2.6 เมตรต่อวินาทีที่ระยะห่างตามแนวแกนเท่ากับ 200 เซนติเมตร



รูปที่ 2.12 ตำแหน่งในการวัดเพื่อศึกษาความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.13 เครื่องวัดความเร็วลม ANEMOMETER รุ่น DT-619/CEM



รูปที่ 2.14 ผลการวัดความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ
ตามระยะห่างตามแนวแกนและแนวรัศมี

จากข้อมูลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าลมระบายมีลักษณะการไหลที่แตกต่างจากลมธรรมชาติ และมีศักยภาพสูงในการผลิตไฟฟ้า แต่การนำกังหันลมแบบดั้งเดิมมาใช้มีข้อจำกัดในส่วนของพื้นที่ในการติดตั้งและซ่อมบำรุง จึงจำเป็นที่ต้องมีการออกแบบกังหันลมให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงสุด มีเสถียรภาพ สะดวกและยืดหยุ่นในการใช้งาน โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการระบายอากาศให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กำหนด และทำให้อุปกรณ์ต้นกำเนิดลมสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

จากข้อมูลจำนวนโรงงานในภาคอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในประเทศไทยดังตารางที่ 2.6 มีจำนวนโรงงานทั้งหมดถึง 138,083 โรงงาน แต่ละโรงงานก็จะมีพัดลมระบายอากาศติดตั้งในระบบระบายอากาศอยู่แล้ว นับว่าเป็นแหล่งทรัพยากรลมที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตได้

ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นโอกาสในการสร้างนวัตกรรมกังหันลมสำหรับลมระบายเพื่อแก้ข้อจำกัดเชิงเทคนิคและปัญหาต่าง ๆ ของกังหันลมแบบดั้งเดิม และสามารถนำลมระบายที่ถูกปล่อยทิ้งและไม่เคยนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับพลังงานหมุนเวียนในการผลิตไฟฟ้าอย่างยั่งยืนต่อไป

ตารางที่ 2.6 สถิติสะสมจำนวนโรงงานที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ (เปิดดำเนินการ) ตาม พ.ร.บ.โรงงาน พ.ศ. 2535 จำแนกรายหมวดอุตสาหกรรมที่สำคัญ ตามจำพวก ณ สิ้นปี 2559 (ศูนย์สารสนเทศโรงงานอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560)

หมวดอุตสาหกรรมที่สำคัญ	จำนวน (โรงงาน)
1. ผลิตภัณฑ์จากพืช (Basic agro-Industry)	43,764
2. อุตสาหกรรมอาหาร (Food)	8,739
3. อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม (Beverage)	751
4. สิ่งทอ (Textile)	2,657
5. อุตสาหกรรมเครื่องแต่งกายยกเว้นรองเท้า (Wearing Apparel)	2,228
6. ผลิตหนังสัตว์และผลิตภัณฑ์จากหนังสัตว์ (Leather products & Footwear)	1,014
7. แปรรูปไม้และผลิตภัณฑ์จากไม้ (Wood & Wood products)	6,067
8. เครื่องเรือนหรือเครื่องตบแต่งในอาคารจากไม้ แก้ว ยาง หรืออโลหะอื่น (Furniture & Fixture)	3,972
9. ผลิตกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ (Paper & Paper products)	1,306
10. การพิมพ์ การเย็บเล่ม ทำปกหรือการทำแม่พิมพ์ (Printing, Publishing , Allied products)	2,548
11. เคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เคมี (Chemical & Chemical products)	3,390
12. ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม (Petroleum products)	1,307
13. ยางและผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber products)	1,658
14. ผลิตภัณฑ์พลาสติก (Plastic products)	6,173
15. ผลิตภัณฑ์อโลหะ (Non-metal products)	7,520
16. ผลิตโลหะขั้นมูลฐาน (Basic metal products)	1,112
17. ผลิตภัณฑ์โลหะ (Fabricated products)	12,552
18. ผลิตเครื่องจักร และเครื่องกล (Machinery)	5,326
19. ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ (Electrical Machinery and Supplies)	2,808
20. ผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ รวมทั้งการซ่อมยานพาหนะและอุปกรณ์ (Transport Equipment)	9,982
21. การผลิตอื่นๆ (Other Manufacturing Industries)	13,209
รวมทั้งสิ้น	138,083

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.7 กำลังลมที่คำนวณได้จากแหล่งลมระบายอุตสาหกรรมที่มีในประเทศไทย

แหล่งกำเนิดลมระบาย	จำนวนหน่วย	จำนวนพัดลมระบายต่อหน่วย	จำนวนพัดลมระบายทั้งหมด	ความเร็วลมเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด (เมตร)	ค่าประมาณการกำลังลม (คำนวณที่ประสิทธิภาพ 40%), หน่วย : วัตต์
ลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมการเกษตร: โรงเรือนปศุสัตว์แบบระบบปิด						
ฟาร์มมาตรฐานไก่ไข่	3,179	8	25,432	8	1.2	3,609,472
ฟาร์มมาตรฐานไก่เนื้อ	12,998	8	103,984	8	1.2	14,758,075
ฟาร์มมาตรฐานสุกร	3,357	8	26,856	8	1.2	3,811.575
ฟาร์มมาตรฐานสถานที่ฟักไข่สัตว์ปีก	60	8	480	8	1.2	68,125
ลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมการผลิต	138,083	10	1,380,830	8	1.5	306,212,861
ลมระบายจากระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน คอนเดนซิ่งยูนิต	15,926,871	1	15,926,871	5	0.5	95,810,083
					ค่าประมาณการกำลังลมรวม	**424,270,191**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากข้อมูลเชิงสถิติของแหล่งกำเนิดลมระบายที่มีอยู่ในภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทย เมื่อนำมาคำนวณหาค่าประมาณการกำลังลม ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.7 พบว่ามีค่าประมาณการกำลังลมรวมทั้งหมด 424 เมกะวัตต์ ซึ่งหากมีการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมที่เหมาะสมมาใช้ ก็จะสามารถเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูงอีกแหล่งหนึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 พลังงานลมและกำลังลม (Wind Energy and Power)

พลังงานจลน์ของกระแสอากาศที่มีมวล m และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (*V*) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad (2.1)$$

พิจารณาส่วนหมุน (Rotor) ของกังหันลมที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง (Cross Sectional Area) พลังงานจลน์ของกระแสอากาศที่กังหันลมสามารถนำไปเปลี่ยนรูปได้แสดงดังสมการที่ 2.2

$$E = \frac{1}{2}\rho_a v V^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V คือ ปริมาตรของก้อนมวลอากาศ (Air Parcel) ที่พัดผ่านส่วนหมุน (ลูกบาศก์เมตร)

ก้อนมวลอากาศที่พัดผ่านส่วนหมุนต่อหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งมีพื้นที่ภาคตัดขวางเท่ากับพื้นที่ภาคตัดขวางของส่วนหมุน (A_T) ดังนั้นพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา (E/t) หรือกำลัง (Power) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$P = \frac{1}{2}\rho_a A_T V^3 \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกำลังของกระแสลมได้แก่ ความหนาแน่นอากาศ พื้นที่ส่วนหมุนของกังหันลมและความเร็วลม โดยที่อิทธิพลของลมค่อนข้างส่งผลกระทบที่สำคัญต่อกำลังลมเนื่องจากมีค่ายกกำลังสาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปัจจัยอย่างเช่นอุณหภูมิ (Temperature) ความกดอากาศ (Atmospheric Pressure) ระดับความสูง (Elevation) และองค์ประกอบของอากาศ (Air Constituents) จะส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของอากาศ เมื่อพิจารณาอากาศแห้ง (Dry Air) ซึ่งพิจารณาให้เป็นแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas) และจากกฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas Law) แสดงดังสมการที่ 2.4

$$pV_G = nRT \tag{2.4}$$

เมื่อ	p	คือ	ความกดอากาศ (ปาสคาล)
	V_G	คือ	ปริมาตรของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตร)
	n	คือ	จำนวนกิโลโมลของแก๊ส (โมล)
	R	คือ	ค่าคงที่สากลของแก๊ส (Universal Gas Constant)
	T	คือ	อุณหภูมิ (เคลวิน)

ความหนาแน่นของอากาศซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของ 1 kmole/m^3 แสดงดังสมการที่ 2.5

$$\rho_a = \frac{m}{V_G} \tag{2.5}$$

จากสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 เราสามารถเขียนสมการความหนาแน่นได้เป็น

$$\rho_a = \frac{mp}{RT} \tag{2.6}$$

ถ้าเราทราบระดับความสูง (z) และอุณหภูมิ (T) ณ สถานีวัดความเร็วลม เราสามารถคำนวณหาความหนาแน่นอากาศได้ดังสมการที่ 2.7

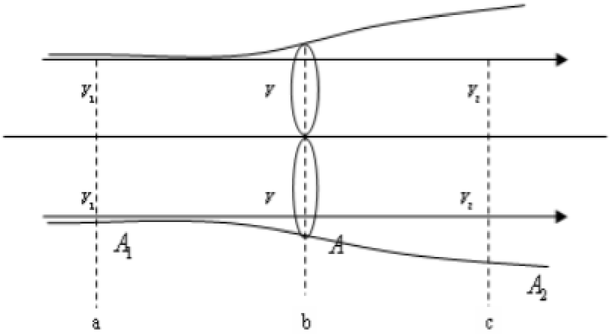
$$\rho_a = \frac{353.049}{T} e^{\left(-0.034\frac{z}{T}\right)} \tag{2.7}$$

ความหนาแน่นของอากาศมีค่าลดลงเมื่อความสูงและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่แล้วความหนาแน่นอากาศมักจะพิจารณาให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.2.2 ข้อจำกัดของเบทซ์ (Betz Limit) (Ragheb, 2011)

กำลังลมเป็นปริมาณพลังงานต่อหน่วยเวลาที่อยู่ในกระแสอากาศ มีเพียงปริมาณกำลังบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (Useful Energy) โดยกำลังที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปได้จะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนหมุนของกังหัน ลักษณะการไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (Stream Tube) ที่พิจารณาให้เป็นรูปปิด (Enclosure) ของส่วนหมุนแสดงดังภาพที่ 2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.15 การไหลผ่านหลอดกระแสอากาศ (Stream Tube) ที่พิจารณาให้เป็นรูปปิด (Enclosure) ของส่วนหมุน

เมื่อพิจารณาให้การไหลของอากาศเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) เนื่องจากความเร็วลมโดยปกติมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น เส้นกระแส (Streamline) มักจะพุ่งออกเมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านส่วนหมุนของกังหัน เนื่องจากกระแสลมมีความเร็วลดลง เมื่อพิจารณาทฤษฎีโมเมนตัมพื้นฐานที่ว่าความดันจะมีค่าคงที่ และภายใต้สมมติฐานที่ว่าอิทธิพลดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากใบกังหันลมมีจำนวนไม่จำกัด (Infinite Number of Thin Blades) ทำให้เกิดแรงที่เท่ากันต่อกระแสการไหลของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยสำหรับส่วนหมุนจริง

อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) มีค่าคงที่สำหรับกระแสอากาศที่ต้นสาย (Upstream) ส่วนหมุนและปลายสาย (Downstream) คำนวณได้จากสมการที่ 2.8

Mass Flow Rate, $m = \rho A_0 V_0 = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2$ (2.8)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรง F ที่กระทำต่อส่วนหมุนเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม แสดงดังสมการ 2.9

CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$F = m(V_0 - V_2) \quad (2.9)$$

กำลังที่ส่วนหมุนดึงไปใช้เท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ แสดงดังสมการ 2.10

$$W = m[\left(\frac{1}{2}\right) V_0^2 - \left(\frac{1}{2}\right) V_2^2] \quad (2.10)$$

ที่ส่วนหมุน แรงที่ทำให้เกิดงาน ณ อัตราเร็วลม V_1 สามารถหาค่าได้ดังสมการ 2.11

$$W = FV_1 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.9-2.11 สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$V_1 = (1/2)(V_0 + V_2) \quad (2.12)$$

ปัจจัยความเร็วลมที่ปลายสาย b เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วลมที่ต้นสายและที่ปลายสาย ดังสมการที่ 2.13

$$b = \frac{V_2}{V_0} \tag{2.13}$$

จากสมการที่ 2.8 สมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.11 จะได้ว่า

$$\frac{F}{A_1} = (1/2)\rho V_0^2(1-b^2) \tag{2.14}$$

และใช้สมการที่ 2.11 และสมการที่ 2.12

$$\frac{W}{A_1} = (1/2)\rho V_0^3 \times (\frac{1}{2})(1-b^2)(1+b) \tag{2.15}$$

สัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (Coefficient of Performance, C_p) มีนิยามให้เป็นสัดส่วนของพลังงานที่ถูกนำไปใช้โดยกังหันลมต่อพลังงานรวมของกระแสลมที่ไหลผ่านพื้นที่กวาดของกังหันในกรณีที่ไม่มีกังหันวางอยู่ ดังนั้น

$$C_p = \frac{W}{W_1} \tag{2.16}$$

เมื่อ $$W_1 = 1/2\rho A_1 V_0^3 \tag{2.17}$$

ทำให้ได้ $$C_p = 1/2(1-b^2)(1+b) \tag{2.18}$$

ทำการอนุพันธ์ C_p เทียบกับ *b* และแสดงให้เห็นว่า C_p มีค่ามากที่สุดเมื่อ *b* = 1/ 3 ทำให้ได้ $C_p = \frac{16}{27}$ หรือ 59% ซึ่งเป็นข้อจำกัดของเบทซ์ (Betz) ที่เบทซ์ (Betz) ได้นำเสนอข้อจำกัดดังกล่าวในปี ค.ศ. 1919 และสามารถใช้ได้กับกังหันลมทุกชนิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio: TSR หรือ λ) คือ อัตราส่วนความเร็ว ณ ปลายใบพัดเมื่อเทียบกับความเร็วลมต้นทางหรือกระแสอากาศอิสระ (free stream หรือ free air) ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ไม่มีการรบกวนจากกังหัน ดังสมการที่ 2.19

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_w} \tag{2.19}$$

เมื่อ λ = อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio)

Ω = ความเร็วเชิงมุม (Rotational velocity), (rad/s)

r = รัศมีใบพัด (Radius), เมตร

V_w = ความเร็วลม (Wind speed), เมตรต่อวินาที

โดยที่ค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัด เป็นตัวแปรที่สำคัญมากตัวหนึ่งในการวิเคราะห์กังหันลม เนื่องจากจะมีผลทำให้มุมปะทะ (α) และค่าสัมประสิทธิ์กำลังงาน (C_p) เปลี่ยนแปลงไป

2.2.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการทำงานเมื่อมีสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดหรือขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็กก็จะได้ไฟฟ้าออกมา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือ ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็กเรียกกว่า ฟิลด์ (Field) และส่วนที่สร้างแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าอาเมเจอร์ (Armature) ค่าความต่างศักย์ก่อกำเนิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับจำนวนรอบของขดลวด พื้นที่หน้าตัดของขดลวดและความเข้มสนามแม่เหล็ก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้โดยการปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและเพิ่มความเร็ว แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับการเพิ่มแรงดันโดยการเพิ่มความเร็วไม่สามารถที่จะทำได้ เพราะจะทำให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงไป สามารถทำได้เพียงการปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่านั้น ซึ่งสามารถนำความต่างศักย์ก่อกำเนิดเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันได้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการใช้งานกังหันลมในพื้นที่ที่มีความเร็วลมคงที่และความเร็วที่เปลี่ยนแปลง (Khaligh, 2011) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรช่วยให้สามารถแปลงพลังงานไดรฟ์ได้โดยตรง ดังนั้นระบบเหล่านี้จึงไม่แพงและต้องการการบำรุงรักษาน้อย ความเร็วที่ต่ำกว่าที่กำหนดโดยเพลากังหันคือความเร็วในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2.5 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Alnasir และ Kazerani (2013) ได้จำแนกประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) Synchronous Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ในย่านไม่กว้างนัก โดยการควบคุมปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหลักจากขดลวดกระตุ้น มักมีโครงสร้างขนาดใหญ่พิกัดกำลังไฟฟ้าค่อนข้างสูง และการควบคุมค่อนข้างซับซ้อน จึงไม่นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม โดยเฉพาะกรณีที่พิกัดกำลังไฟฟ้าไม่สูงนัก

2) Asynchronous Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีหลายขนาดให้เลือกใช้ แต่การควบคุมแรงดันขาออกค่อนข้างซับซ้อน ตัวอย่างเช่น DFIG (Double Fed Induction Generator) ซึ่งเหมาะสมกับงานผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังลมที่มีพิกัดกำลังขนาดใหญ่ แต่ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบควบคุมค่อนข้างสูง

3) Permanent Magnet Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้การดูแลรักษาง่ายและควบคุมการทำงานได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากปัจจุบันอุปกรณ์แม่เหล็กถาวรชนิด NdFeB (Neodymium Ferrite Bead) ที่มีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กสูงมีอายุการใช้งานไม่น้อยกว่า 30 ปี ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่รอบการทำงานต่ำมีขนาดเล็กและเบาลงมาก อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงมาก จึงนิยมประยุกต์ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในงานผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมขนาดเล็กและขนาดกลางทั่วไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่รอบการทำงานต่ำ เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนทำให้การดูแลรักษาง่าย และควบคุมการทำงานได้ง่ายและมีขนาดเล็ก เบาและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

สมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรมีดังนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและความถี่

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \tag{2.20}$$

เมื่อ f_e คือ ความถี่ทางไฟฟ้า หน่วย เฮิรทซ์ (Hz)

n_m คือ ความเร็วรอบทางกลของสนามแม่เหล็กหมุน หน่วย รอบต่อนาที

P คือ จำนวนขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2) การคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้า

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ให้กำเนิดบนขดลวดอาร์เมเจอร์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\mathrm{E_{av}} = B \bullet l \bullet v \tag{2.21}$$

$\mathrm{E_{av}}$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ย หน่วย โวลท์

B คือ ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก หน่วย เทสลา (T หรือ wb/m^2)

l *l* คือ ความยาวตัวนำ หน่วย เมตร

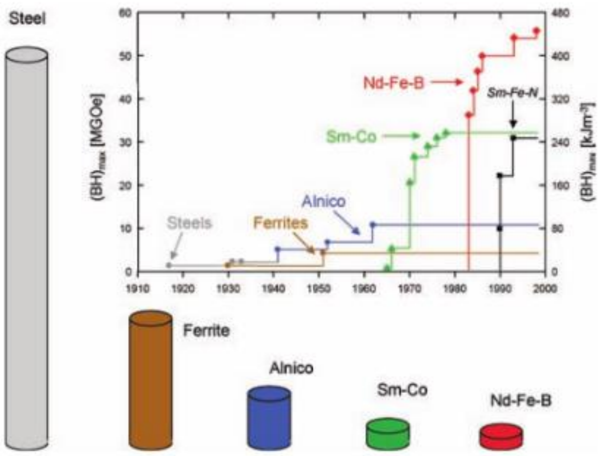
v *v* คือ อัตราความเร็วในการเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็ก หน่วย เมตรต่อวินาที

2.2.6 วัสดุของแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnetic Materials)

ในส่วนของแม่เหล็กที่ใช้สำหรับกังหันลมขนาดเล็ก Daim (2012) ได้ระบุในแผนที่นำทางเทคโนโลยีสำหรับพลังงานลมว่า อนาคตแม่เหล็กนีโอไดเมียม (Neodymium magnet, Nd-Fe-B) จะถูกนำมาใช้มากขึ้น (Daim, 2012) เนื่องจากมีค่าสนามแม่เหล็กจะสูงกว่าแม่เหล็กเฟอไรต์ (Ferrite

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

magnet) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรแบบทั่วไปคือ ถึง 5-8 เท่า (Gutfleisch, 2000) ดังรูปที่ 2.16 แต่มีราคาสูงกว่า การนำมาใช้งานต้องคำนึงถึงต้นทุนและประสิทธิภาพของกังหันในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อให้คุ้มค่าในการใช้งาน



รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานแม่เหล็กจำแนกตามวัสดุ

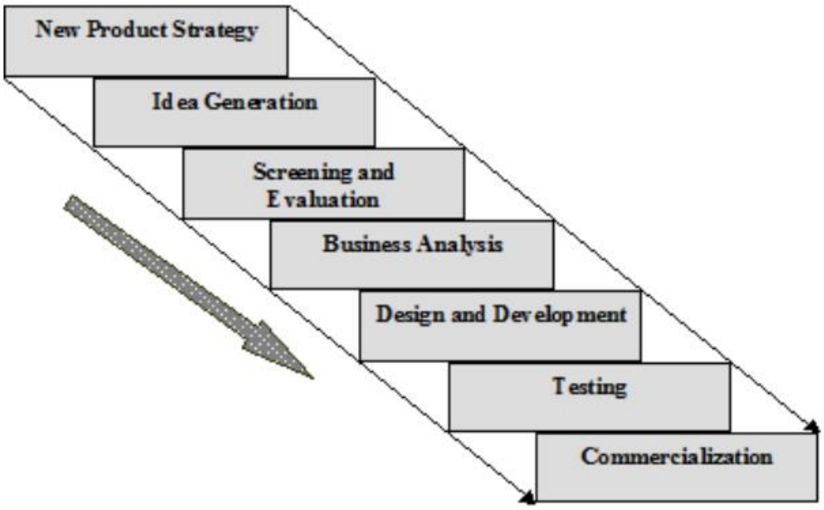
2.2.7 การออกแบบใบพัด

ใบพัดกังหันนับว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุด ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดพลังงานกลที่เพลาของกังหัน จำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิด (Torque) สูง ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยส่วนใหญ่ใช้กับงานที่ต้องการความเร็วรอบสูง เช่น การผลิตไฟฟ้า รูปหน้าตัดของใบกังหันอาจมีตั้งแต่ลักษณะแพนอากาศ (Airfoil) หรือลักษณะคล้ายปีกเครื่องบิน เป็นแผ่นโค้งและเป็นแผ่นราบตรง วัสดุที่ใช้ทำใบกังหันควรจะเป็นวัสดุเบาและแข็งแรง เช่น อลูมิเนียมอัลลอยด์ แผ่นเหล็ก ไม้ หรือไฟเบอร์กลาส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ออกแบบ (Schubel, 2012)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่

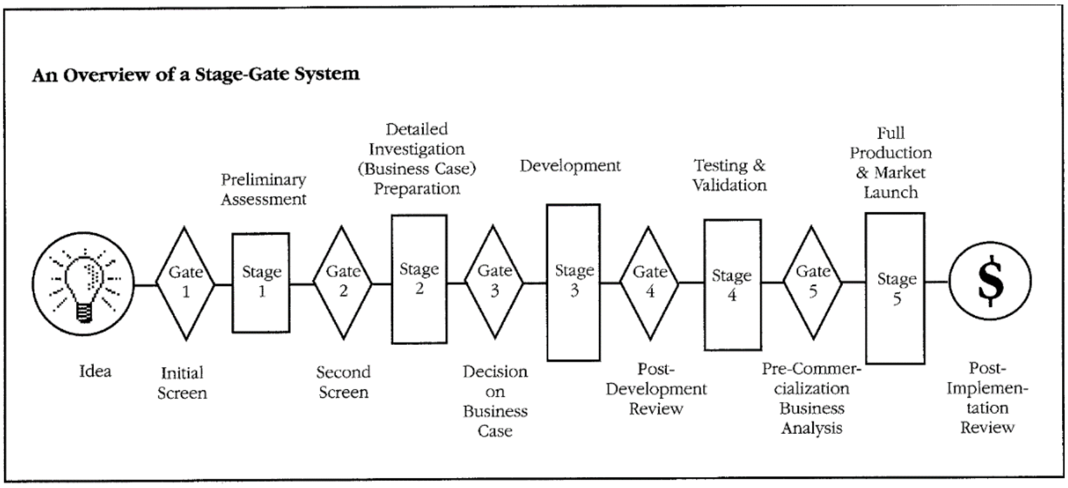
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นกระบวนการในการเปลี่ยนโอกาสทางตลาดให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ที่พร้อมจะขายได้ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่มีอยู่ด้วยกันหลายโมเดล โมเดลที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายคือ โมเดลที่พัฒนาขึ้นโดย Booz, Allen และ Hamilton (1982) เรียกว่า BAH Model ซึ่งเป็นพื้นฐานของโมเดลอื่น ๆ ที่ตามมา โดยจะประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ 7 ขั้นตอน คือ กลยุทธ์ผลิตภัณฑ์ใหม่ การสร้างสรรค์ความคิด การคัดกรองและประเมินความคิด การวิเคราะห์เชิงธุรกิจ การออกแบบและพัฒนา การทดสอบ และ การนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ BAH Model

ที่มา : (Allen & Hamilton, 1982)

Robert Cooper (1990) เป็นผู้บุกเบิกงานวิจัยทางด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่สำหรับสินค้าอุปโภคและบริโภคโดยได้พัฒนาเป็นโมเดลเรียกว่า Stage-Gate Model ซึ่งได้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง โมเดลนี้จะแบ่งขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่เริ่มจากการสร้างสรรค์ความคิดไปจนถึงการนำออกสู่ตลาดเป็น 5 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนจะมี Gate หรือประตูที่จะทำหน้าที่พิจารณาตัดสินใจว่าจะเดินหน้าต่อไปยังขั้นตอนต่อไปหรือจะยุติลงเสียแต่เนิ่น ๆ ดังรูปที่ 2.18



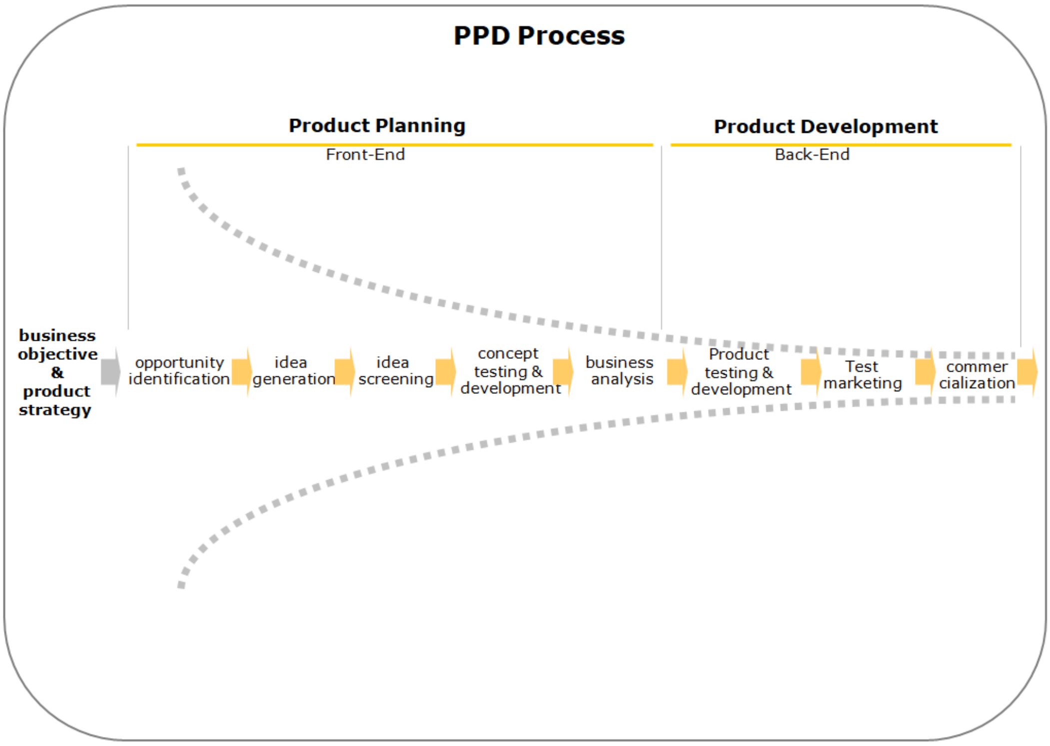
รูปที่ 2.18 Stage-Gate Model

ที่มา : (Cooper, 1990)

นอกจากนี้ ยังมีนักวิชาการอื่น ๆ ได้พัฒนาแบบจำลองการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมาอีกในหลาย ๆ สาขา เช่น Tushman (1977), Kotler (1980), Cooper & Kleinschmidt (1986) เป็นต้น

ไปรมา (2553) ได้ทำการเปรียบเทียบโมเดลการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ของนักวิชาการหลายท่านในสาขาการบริหาร สาขาการออกแบบอุตสาหกรรม และสาขาการตลาด แล้วทำการบูรณาการเป็นโมเดลใหม่ที่มีความชัดเจนดังรูปที่ 2.19 โดยประกอบด้วย 8 ขั้นตอนดังนี้

1) การค้นหาโอกาส
2) การสร้างสรรค์ความคิด
3) การคัดกรองความคิด
4) การทดสอบและพัฒนาแนวคิด
5) การวิเคราะเชิงธุรกิจ
6) การทดสอบและพัฒนาผลิตภัณฑ์
7) การทดสอบการตลาด
8) การนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.19 กระบวนการการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่

ที่มา : (ไปรมา, 2010)

กระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นกระบวนการหนึ่งที่ช่วยสร้างนวัตกรรมควบคู่ไปกับการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ การกำหนดทิศทางและการเลือกกลยุทธ์นั้นเป็นหัวใจสำคัญทางธุรกิจ กลยุทธ์ในการวางแผนพัฒนาผลิตภัณฑ์ (strategic product planning) จึงมีบทบาทสำคัญอย่างมากและเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขององค์กรเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามเป้าหมายทางธุรกิจขององค์กร การวางแผนพัฒนาผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ การวางแผนผลิตภัณฑ์ (product planning) และการพัฒนาผลิตภัณฑ์ (product development) โดยการวางแผนนั้นอาจมีระยะเริ่มต้น (phase zero) เป็นระยะเวลาก่อนโครงการได้รับการอนุมัติ ซึ่งมักพบปัญหาอันสับสน รูปแบบในการพัฒนานั้นไม่ตายตัว มีความคลุมเครือไม่แน่ชัดซึ่งเรียกว่าช่วงต้นอันสับสน (fuzzy front-end) (ไปรมา, 2010)

การวางแผนผลิตภัณฑ์นั้นจะเริ่มจาก การสำรวจโอกาส (opportunity identification) การสร้างสรรค์ความคิด (idea generation) การคัดกรองความคิด (idea screening) การพัฒนาและทดสอบแนวคิด (concept testing and development) และการวิเคราะห์ทางธุรกิจ (business analysis) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การสำรวจโอกาสเป็นการสำรวจข้อมูลทั้งภายในและภายนอกองค์กรในการสร้างนวัตกรรม โดยการศึกษาภายนอกนั้นจะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับความต้องการของลูกค้า ข้อมูลคู่แข่ง และแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่อความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย สาหรับการศึกษาภายในนั้น จะเน้นที่การสำรวจเทคโนโลยีและความสามารถหลักขององค์กรเกี่ยวกับขีดความสามารถขององค์กร

การสร้างสรรค์ความคิด มีเป้าหมายเพื่อสำรวจทางเลือก และสร้างความคิดทางเลือกใหม่จำนวนมาก โดยอาจใช้การสร้างสรรค์ความคิดแบบเอนกนัย (idea divergence) เพื่อให้เกิดความคิดจำนวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การคัดกรองความคิด เป็นการการคัดกรองความคิดที่เหมาะสม มีเป้าหมายเพื่อลดปริมาณตัวเลือกลง เพื่อทำให้ความคิดมีคุณภาพสูงมากขึ้น โดยใช้เกณฑ์ในการคัดกรองความคิดที่เหมาะสม เช่น ลำดับความสำคัญ คุณประโยชน์สำหรับผู้ใช้ ความเหมาะสมทางธุรกิจ และความเหมาะสมทางเทคโนโลยี

การพัฒนาและทดสอบแนวคิด เป็นการพัฒนาแนวคิด (concept) ขึ้นมาจากความคิด (idea) ที่คัดกรองไว้แล้ว มีเป้าหมายเพื่อ ระบุตำแหน่งแนวคิด (concept positioning) เมื่อเปรียบเทียบคู่แข่งและทางเลือกอื่น ๆ ในตลาด ตลอดจนประเมินแนวคิด (concept evaluation) โดยทดสอบกับผู้ใช้

การวิเคราะห์ทางธุรกิจ เป็นการศึกษาความเป็นไปได้และประเมินศักยภาพทางธุรกิจ ความคุ้มทุนและผลกำไร โดยการจัดทำนั้นจะสามารถวิเคราะห์ข้อมูลทางธุรกิจจนทำให้หาค่าผลตอบแทนการลงทุน (Return on Investment, ROI) ได้

หลังจากทำการวิเคราะห์เชิงธุรกิจจนเห็นความเป็นไปได้ทางธุรกิจแล้ว จึงเริ่มเข้าสู่ช่วงหลัง (Backend) ของกระบวนการคือ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Product development) ซึ่งจะประกอบด้วยการพัฒนาและทดสอบผลิตภัณฑ์ การทดสอบตลาด ไปจนถึงการใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป (Bhuiyan, 2011)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบาย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนานวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายในภาคอุตสาหกรรม พบเพียงงานวิจัยของ Chong และคณะ (2013, 2014) และของ สามารถ โสภาและคณะ (2556) เท่านั้น

โดยที่งานวิจัยของ Chong และคณะ (2013, 2014) ได้นำเสนอแนวคิดในการสร้างต้นแบบกังหันลมแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) เพื่อติดตั้งเหนือพัดลมระบายของ cooling tower ดังรูป 2.20 โดยมีจุดเด่นคือสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ แต่ยังคงมีข้อจำกัดคือประสิทธิภาพของพัดลมระบายลดลงและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการออกแบบใบพัดยังไม่เหมาะสมและใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีจำหน่ายทั่วไป (Chong et al S., 2014)

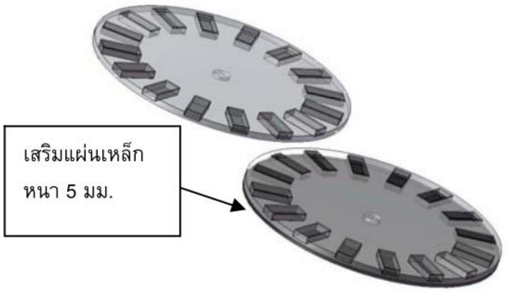
รูปที่ 2.20 กังหันลมแกนตั้งที่ติดตั้งกับระบบลมระบายของ Chong และคณะ

ในส่วนงานวิจัยของสามารถ โสภาและคณะ (2556) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมโดยใช้อากาศที่ระบายออกจากอาคาร โดยอากาศที่ถูกระบายออกจากอาคารด้วยโบลวเวอร์ส่งลมผ่านทางปล่องลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.23 เมตร และใช้กังหันลมชนิดแกนแนวนอนแบบ 3 ใบพัด ขนาด 200 วัตต์ 24 โวลต์ (AC) เส้นผ่านศูนย์กลางกังหันเท่ากับ 2.14 เมตร ในการทดสอบ โดยการทดลองทำการติดตั้งกังหันลมห่างจากปล่องระบายอากาศที่ระยะ 2 3 และ 4 เมตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าที่ระยะ 2 เมตร ลมที่ออกจากปล่องระบายอากาศมีความเร็วลมเฉลี่ย 5.76 เมตรต่อวินาที สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 78.86 วัตต์ และประสิทธิภาพของกังหันลมเท่ากับร้อยละ 18.72 ซึ่งคิดเป็นพลังงานที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เท่ากับร้อยละ 7.17 (สามารถ

โสภา, 2556) แต่ด้วยระยะในการติดตั้งกังหันลมที่ระยะ 2 เมตร อาจไม่เหมาะสมกับการติดตั้งกับอุปกรณ์ลมระบายที่อยู่ในพื้นที่ที่จำกัดของในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งผู้วิจัยจะหาแนวทางออกแบบนวัตกรรมกังหันเพื่อให้สามารถตอบโจทย์ทั้งในส่วนประสิทธิภาพและรูปแบบที่เหมาะสมในการติดตั้งที่ได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานต่อไป

ในส่วนของการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันลมให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นนั้น ได้มีผู้ศึกษาและนำเสนอหลากหลายวิธี แต่ยังอยู่บนพื้นฐานการพัฒนากับกังหันลมแบบมีแกนเพลาที่ใช้อยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

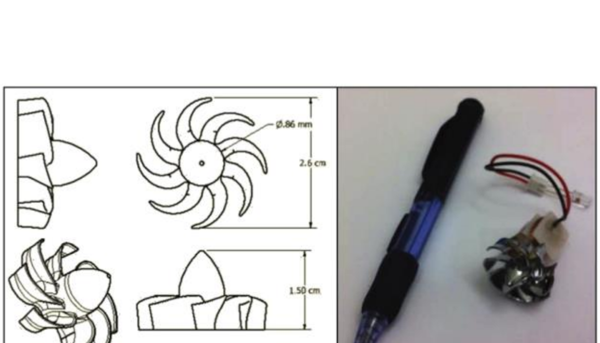
อัศวิน ปศุศฤธากร (2551) ได้ศึกษาอิทธิพลของแผ่นเสริมแรงแม่เหล็กต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร พบว่าเมื่อทำการเสริมแผ่นเหล็กหนา 5 มิลลิเมตรที่ด้านหลังของชุดแม่เหล็กถาวรทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น 2 เท่า แต่การเสริมแผ่นเหล็กต้องใช้แรงบิดมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีแผ่นเหล็กเสริมประมาณ 3-4 เท่า (อัศวิน ปศุศฤทธากร, 2551) ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเสริมแผ่นเหล็กเจนเนอเรเตอร์

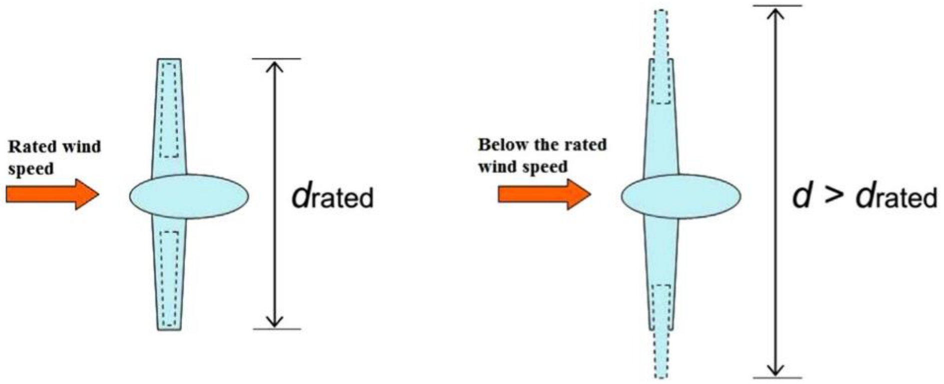
Zakaria (2015) ได้ทำการศึกษาโดยทำการทดลองและสร้างแบบจำลองในการวัดประสิทธิภาพของกังหันลมขนาดเล็กระดับเซนติเมตรที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งปัจจัยที่พิจารณาคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดและจำนวนรอบในการหมุน ใบพัดกังหันเป็นแบบหมุน (Swirl) ผลที่ได้พบว่ามุมที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าคือช่วง +/- 30 องศา แต่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียง 6 มิลลิวัตต์เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานจริงได้ (Zakaria, 2015)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



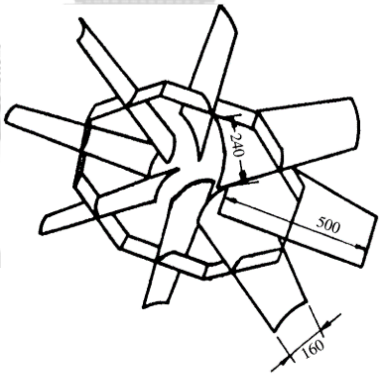
รูปที่ 2.22 กังหันลมขนาดเล็กแบบใบพัดหมุน Swirl (Zakaria, 2015)

Hossain (2015) ได้นำเสนอใบพัดกังหันลมที่สามารถปรับความยาวใบพัดความความเร็วลม เพื่อลดแรงต้านอากาศ และใช้กับเทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับกังหันลมในอนาคต ดังรูปที่ 2.23 แต่ยังไม่มีการพิสูจน์ประสิทธิภาพจริง เป็นเพียงการนำเสนอแนวความคิดเท่านั้น



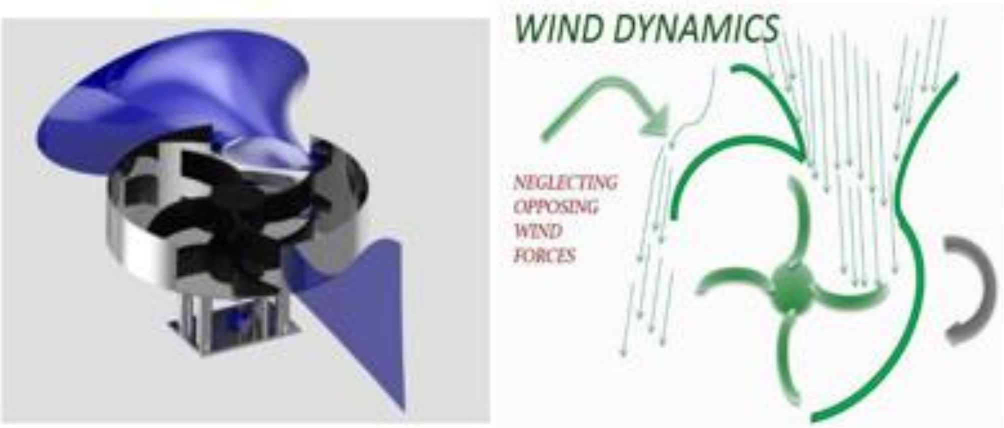
รูปที่ 2.23 ใบพัดกังหันที่สามารถปรับความยาวใบพัดความความเร็วลม (Hossain, 2015)

Varola (2011) ได้นำเสนอการออกแบบใบพัดรับลมแบบในแกนและนอกแกน ดังรูปที่ 2.24 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลม การปรับตำแหน่งและมุมของใบพัดให้เหมาะสมสามารถเพิ่มความเร็วลมในการหมุนเพิ่มขึ้นร้อยละ 32 แต่ไม่ได้มีการทดสอบความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.24 การออกแบบใบพัดรับลมแบบในแกนและนอกแกน (Varola, 2011)

Sevvel (2014) ได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้ง โดยติดตั้งชุดบังคับทิศทางลมไม่ให้เกิดการต้านใบพัดของลม ดังรูปที่ 2.25 การศึกษาพบว่ากังหันลมสามารถเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที เมื่อนำไปทดสอบการผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 74 จาก 11.13 วัตต์ เป็น 30.50 วัตต์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าดังกล่าวยังไม่คุ้มค่าในการผลิตไฟฟ้าหากมีการนำไปใช้จริง

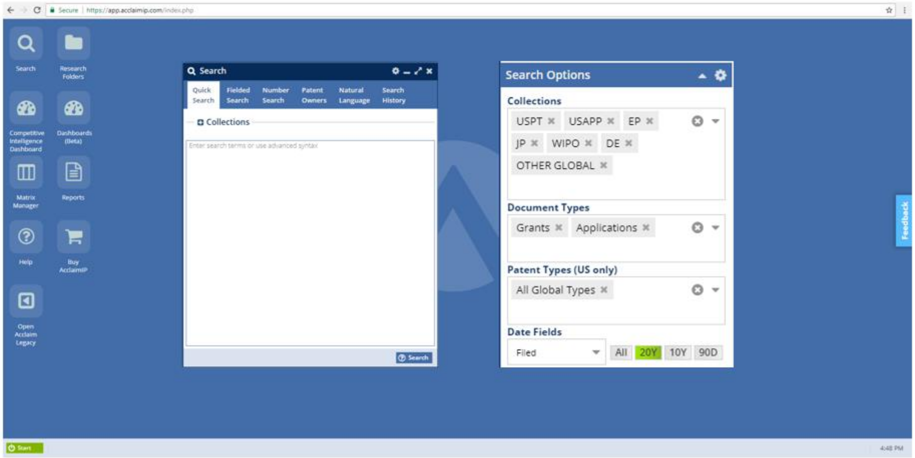


รูปที่ 2.25 Wind amplifier (Sevvel, 2014)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่ากังหันลมแกนนอนขนาดเล็กที่มีอยู่ในปัจจุบันหากจะนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม พบว่าจะมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่ำ มีขนาดที่ต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก และส่งผลกระทบต่อพลังงานที่ต้องจ่ายให้กับระบบระบายลมเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการระบายลมเท่าเดิม เนื่องจากการขวางกระแสลมระบายของใบพัดกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม เมื่อใบพัดหมุนที่ความเร็วสูงขึ้น ดังนั้นหากต้องการพัฒนานวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายในภาคอุตสาหกรรม จะต้องพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูง ต้นทุนต่ำ มีความน่าเชื่อถือและความพร้อมในการใช้งาน

2.5 สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

จากการสืบค้นสิทธิบัตรการประดิษฐ์โดยใช้โปรแกรมที่ช่วยในการสืบค้นสิทธิบัตร AcclaimIP.com ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งเป็นระบบที่สามารถสืบค้นสิทธิบัตรและวิเคราะห์ภาพรวมสิทธิบัตรตามคำสำคัญที่ใช้ในการสืบค้น แล้วนำเสนอผลในรูปแบบแผนภาพและข้อมูลเชิงสถิติ มีความสะดวกรวดเร็วในการหาข้อมูลในการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรม



รูปที่ 2.26 โปรแกรม AcclaimIP.com สำหรับช่วยในการสืบค้นและวิเคราะห์สิทธิบัตร

ซึ่งในการสืบค้นสิทธิบัตรเพื่ออ้างอิงในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสืบค้นจากฐานข้อมูลสิทธิบัตรดังนี้ United States Patent and Trademark Office (USPTO) European Patent Office (EPO) Japan Patent Office (JPO) World Intellectual Property Organization (WIPO) German Patent Office (DE) และระบบสืบข้อมูลสิทธิบัตรออนไลน์ กรมทรัพย์สินทางปัญญา ในการสืบค้นสิทธิบัตรได้ใช้คำสำคัญ (Keyword) ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยดังนี้

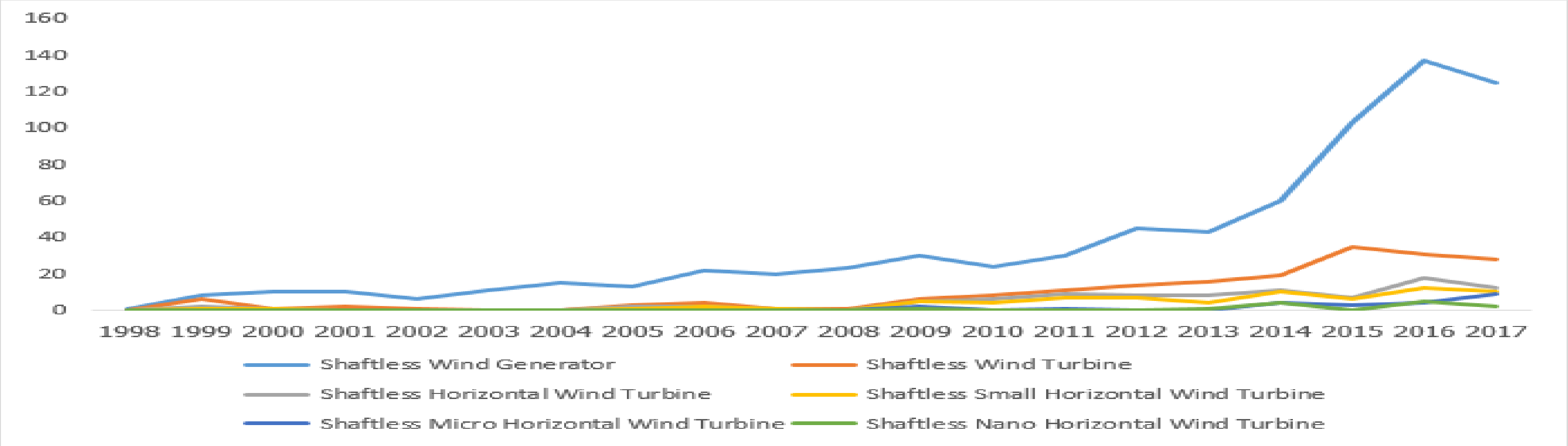
1) คำสำคัญสำหรับการสืบค้นสิทธิบัตรบนฐานข้อมูลนานาชาติ

- Shaftless Wind Generator
- Shaftless Wind Turbine
- Shaftless Horizontal Wind Turbine
- Shaftless Small Horizontal Wind Turbine
- Shaftless Micro Horizontal Wind Turbine
- Shaftless Nano Horizontal Wind Turbine

2) คำสำคัญสำหรับการสืบค้นสิทธิบัตรบนฐานข้อมูลในประเทศไทย

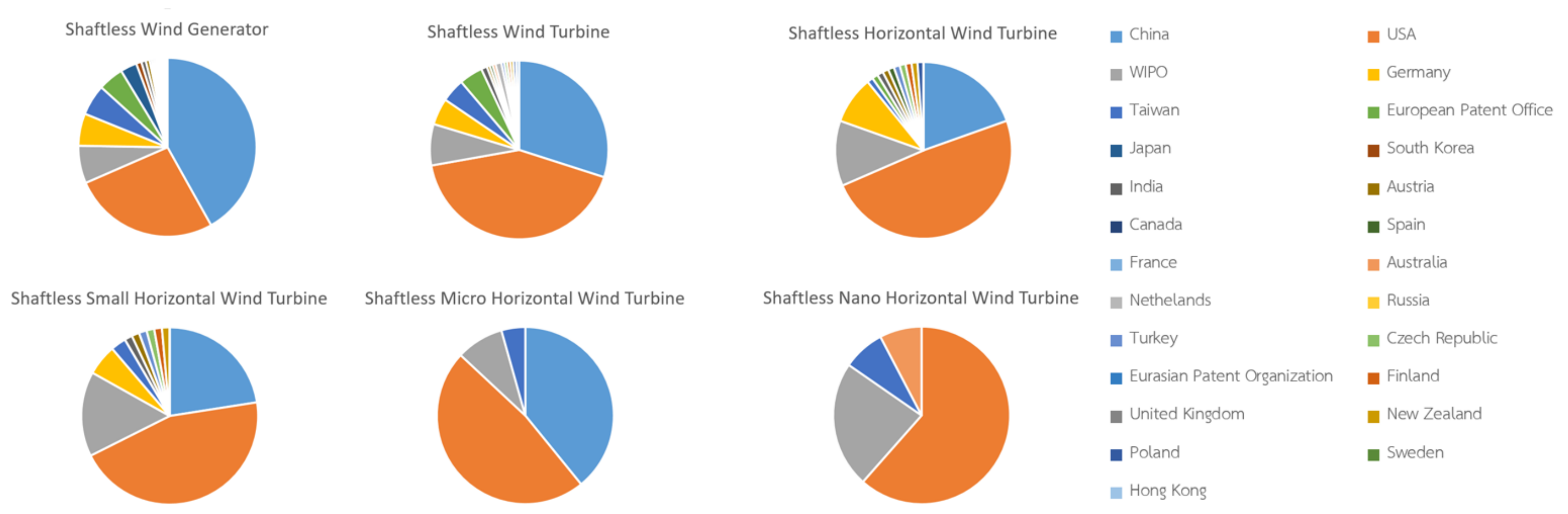
- กังหันลม
- กังหันลมผลิตไฟฟ้า
- กังหันลมแกนนอน
- กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน
- กังหันลมแบบแกนนอนไร้เพลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



คำสำคัญ (Keyword)	จำนวนสิทธิบัตรที่ตีพิมพ์จำแนกตามรายปี (Patent by Publication Date)																				
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	รวม
Shaftless Wind Generator	1	8	10	10	6	11	15	13	22	20	23	30	24	30	45	43	60	103	137	125	736
Shaftless Wind Turbine	-	6	1	2	1	-	-	3	4	1	1	6	8	11	14	16	19	35	31	28	187
Shaftless Horizontal Wind Turbine	-	2	1	-	-	-	-	2	2	1	-	5	6	9	8	8	11	7	18	12	92
Shaftless Small Horizontal Wind Turbine	-	1	1	-	-	-	-	1	2	1	-	5	4	7	7	4	10	6	12	10	71
Shaftless Micro Horizontal Wind Turbine	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	1	-	-	4	3	4	9	23
Shaftless Nano Horizontal Wind Turbine	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	4	-	5	2	13

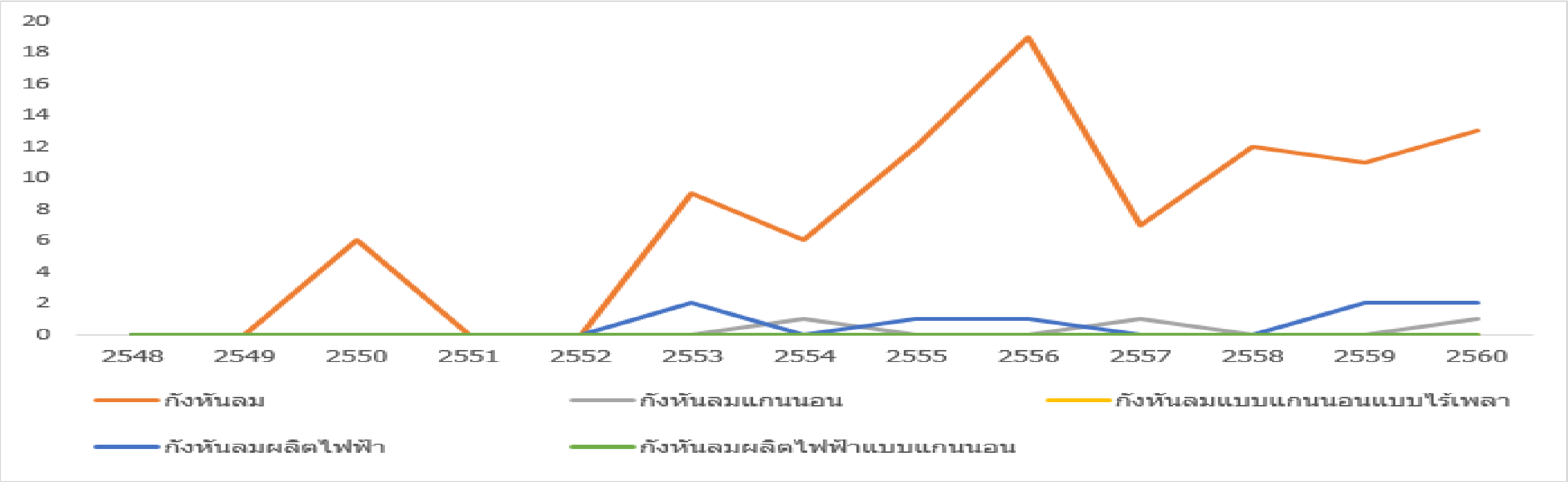
รูปที่ 2.27 จำนวนสิทธิบัตรทั่วโลกที่ได้รับการรับรองจำแนกตามรายปี
(ที่มา: สืบค้นจาก AcclaimIP.com วันที่ 2 พ.ย. 2560)



คำสำคัญ (Keyword)	จำนวนสิทธิบัตรที่ตีพิมพ์จำแนกตามประเทศที่ขอรับรองสิทธิ (Patenting Countries of Issuance)																								รวม
	China	USA	WIPO	Germany	Taiwan	European Patent Office	Japan	South Korea	India	Austria	Canada	Spain	France	Australia	Nethelands	Russia	Turkey	Czech Republic	Eurasian Patent Organization	Finland	United Kingdom	New Zealand	Poland	Sweden	Hong Kong	
	CN	US	WO	DE	TW	EP	JP	KR	IN	AT	CA	ES	FR	AU	NL	RU	TR	CZ	EA	FI	GB	NZ	PL	SE	HK	
Shaftless Wind Generator	308	196	50	43	41	34	22	7	6	5	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	-	736
Shaftless Wind Turbine	56	79	14	9	8	8	-	-	2	1	-	1		1	2	-	1	1	-	1	-	1	1	-	1	187
Shaftless Horizontal Wind Turbine	18	45	11	8	1	1	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	1	1	-	1	-	1	1	-	-	92
Shaftless Small Horizontal Wind Turbine	16	32	11	4	2	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	-	1	-	-	-	71
Shaftless Micro Horizontal Wind Turbine	9	11	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
Shaftless Nano Horizontal Wind Turbine	-	8	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13

รูปที่ 2.28 จำนวนสิทธิบัตรที่ได้รับการรับรองจำแนกตามประเทศที่ขอรับรองสิทธิ์

(ที่มา: สืบค้นจาก AcclaimIP.com วันที่ 2 พ.ย. 2560)

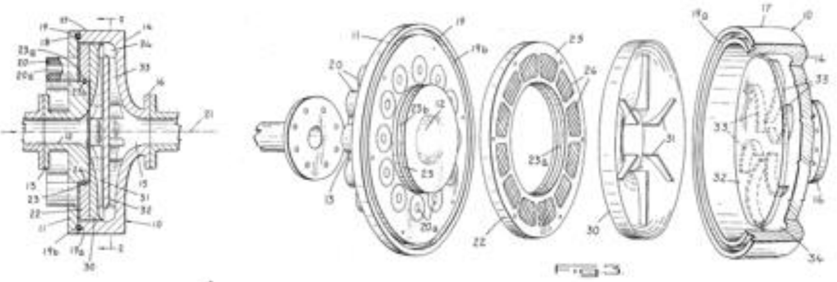


คำสำคัญ (Keyword)	จำนวนสิทธิบัตรที่ตีพิมพ์จำแนกตามรายปี (Patent by Publication Date)													
	2548	2549	2550	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	รวม
กังหันลม	-	-	6	-	-	9	6	12	19	7	12	11	13	95
กังหันลมผลิตไฟฟ้า	-	-	-	-	-	2	-	1	1	-	-	2	2	8
กังหันลมแกนนอน	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	3
กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
กังหันลมแบบแกนนอนแบบไร้เพลา	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

รูปที่ 2.29 จำนวนสิทธิบัตรของประเทศไทยที่ได้รับการรับรองจำแนกตามรายปี

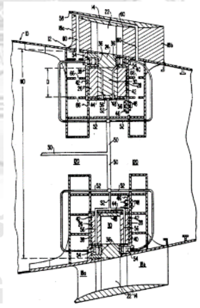
(ที่มา: ระบบสืบข้อมูลสิทธิบัตรออนไลน์ กรมทัพย์สินทางปัญญา http://patentsearch.ipthailand.go.th/DIP2013/simplesearch.php สืบค้น วันที่ 19 พ.ย. 2560)

จากผลจากการสืบค้นข้อมูลสิทธิบัตรผ่านฐานข้อมูลด้านสิทธิบัตรต่างๆ และระบบสืบข้อมูลสิทธิบัตรออนไลน์ กรมทรัพย์สินทางปัญญา ณ วันที่ 19 พ.ย. 2560 ผลการสืบค้นสิทธิบัตรแสดงดังรูปที่ 2.27-2.29 ซึ่งไม่ปรากฏว่ามีผู้ยื่นขอจดสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์และสิทธิบัตรการออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม พบเพียงแนวคิดของอุปกรณ์ไร้เพลาดังรูปที่ 2.30-2.37 แนวความคิดของผู้วิจัยเป็นสิ่งใหม่ที่ยังไม่มีการยื่นจดคุ้มครองสิทธิบัตรมาก่อนทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งเป็นโอกาสที่สามารถยื่นขอจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์เพื่อคุ้มครองสิทธิ์และทำประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้



รูปที่ 2.30 Shaftless Energy Conversion Device, US3867655

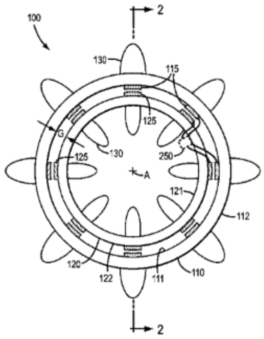
ที่มา: (Stengel, 1975)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

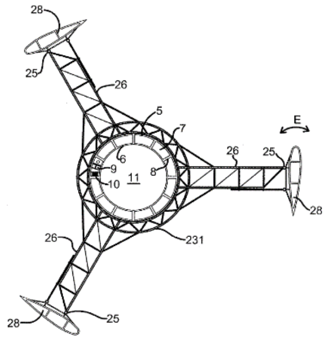
รูปที่ 2.31 Marine Propulsor, US5078628

ที่มา: (Chester A. Garis, 1992)



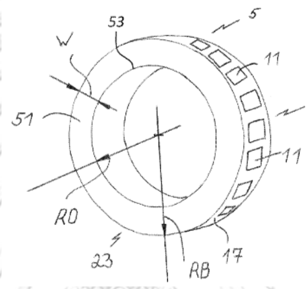
รูปที่ 2.32 Energy Conversion Systems and Methods, US9359991B2

ที่มา: (Kent Davey, 2016)



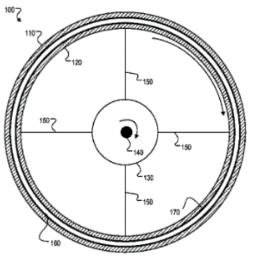
รูปที่ 2.33 Shaftless Vertical Axis Wind Turbine, US2009/0220342 A1

ที่มา: (Wu, 2009)



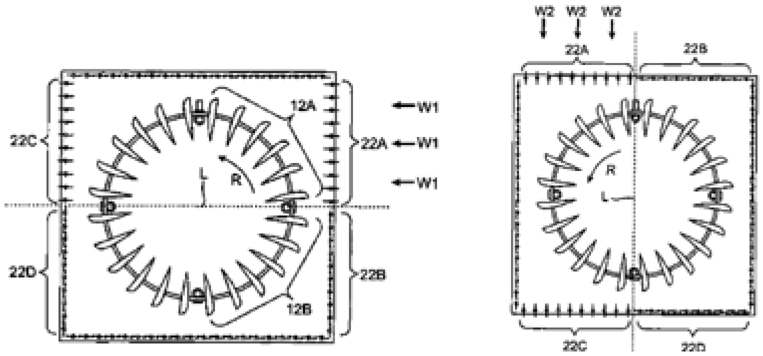
รูปที่ 2.34 Shaftless Generator, US2016/0329788 A1

ที่มา: (Ostroukhov, 2016)



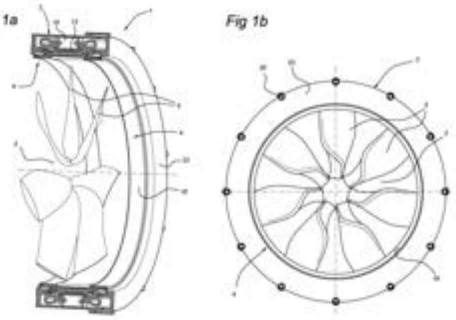
รูปที่ 2.35 Driver for A Turbine Generator Aided by Magnetic Levitation, US9627941B1

ที่มา: (Wojdylo, 2017)



รูปที่ 2.36 Louvered Horizontal Wind Turbine, US7323791B2

ที่มา: (Jonnson, 2008)



รูปที่ 2.37 Shaftless propeller, EP1739007A1

ที่มา: (Theodorus, 2007)

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าสิทธิบัตรที่ได้สืบค้นจะไม่ปรากฏการประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่สามารถที่จะนำแนวคิดที่ใช้สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันลมของสิทธิบัตรเหล่านั้นมาต่อยอดได้ เช่น การใช้แม่เหล็กแบบ Magnetic Levitation เพื่อลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากเพลาจากแนวคิดของ Wojdylo (2017) ดังรูปที่ 2.35 การควบคุมทิศทางการไหลของลมเข้าสู่ใบพัดและทางออกของลมสู่บรรยากาศภายนอกจากแนวคิดของ Jonnson (2008) เพื่อลดแรงต้านของลมที่เกิดกับใบพัดที่มุมในการรับลมยังไม่ถูกตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.36 และลักษณะการออกแบบใบพัดเรือความเร็วสูงแบบไร้เพลาของ Theodorus (2007) ดังรูปที่ 2.37 เป็นต้น

2.6 กังหันแบบไร้เพลาที่มีอยู่ในปัจจุบัน

จากการสืบค้นข้อมูลพบว่ารูปแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่มีการพัฒนาออกมาใช้งานก่อนหน้านี้เลย สิ่งประดิษฐ์ที่มีความใกล้เคียงที่พบจะใช้กับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากคลื่นน้ำในทะเลลึก ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ดังรูปที่ 2.38 หลักการออกแบบและการทำงานจะแตกต่างออกไปตามลักษณะของของไหลที่ทำให้ใบพัดหมุน นอกจากนี้พบว่า Barbarelli (2014) Beran (2013) Yan (2017) และ Hassan (2012) ได้เสนอแนวคิดใบพัดแบบไร้เพลาไปใช้กับใบพัดของเรือความเร็วสูงดังรูปที่ 2.39 ลักษณะการออกแบบใบพัดจะตั้งฉากกับชุดฐานยึดรอบนอก หากนำมาใช้กับลมระบายจะทำให้ประสิทธิภาพของการระบายอากาศลดลง ไม่เป็นตามมาตรฐาน งานวิจัยของผู้วิจัยจะพิจารณาข้อจำกัดทางเทคนิคส่วนนี้ เพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

รูปที่ 2.38 กังหันผลิตไฟฟ้าจากคลื่นน้ำในทะเลแบบไร้เพลา

ที่มา: http://www.openhydro.com/

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.39 ใบพัดเรือความเร็วสูงแบบไร้เพลา

ที่มา: http://www.brunvoll.no, https://www.schottel.de

2.7 การศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์

การศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวางแผนการนำนวัตกรรมไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืน โดยพิจารณาสภาพแวดล้อมภายนอกและภายในอุตสาหกรรม ประเมินโอกาสข้อจำกัด จุดเด่นและจุดอ่อนของธุรกิจที่จะก่อตั้งขึ้น พร้อมทั้งวางแผนธุรกิจ แผนการตลาด การผลิต การบริหาร การลงทุนและศึกษาความเป็นไปได้ด้านการเงิน โดยใช้เครื่องมือดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์การแข่งขันในอุตสาหกรรม (Five Forces Analysis) คือเครื่องมือวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและปัจจัยการแข่งขันของธุรกิจ 5 ประการ รวมถึง คู่แข่งรายใหม่ ลูกค้า สินค้าทดแทน ผู้จัดหาวัตถุดิบ และ การแข่งขันภายในอุตสาหกรรม ธุรกิจสามารถนำเครื่องมือนี้มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างธุรกิจและอุตสาหกรรม เพื่อหากลยุทธ์รับมือที่เหมาะสมที่สุด

2) การประเมินตลาด (Market assessment) คือ การวิเคราะห์ข้อมูลตลาดเพื่อสนับสนุนการประเมินโอกาสทางการตลาด ในด้านอุปสงค์ อุปทาน สภาวะการแข่งขัน ศักยภาพของตลาดกลุ่มเป้าหมาย กฎระเบียบหรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้สามารถทราบถึงอุปสรรคหรือข้อจำกัดในตลาดต่าง ๆ ด้วย

3) การวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคทางธุรกิจ (SWOT) หรือ การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและศักยภาพเป็นเครื่องมือในการประเมินสถานการณ์สำหรับการประกอบธุรกิจ ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารรู้ถึงจุดแข็งและจุดอ่อนจากสภาพแวดล้อมภายใน มองเห็นโอกาสและอุปสรรคจากสภาพแวดล้อมภายนอก ตลอดจนผลกระทบต่อการประกอบธุรกิจทุกประเภท

4) การใช้ประโยชน์ทางเทคโนโลยี (Technology exploitation) เป็นการวิเคราะห์หรือตัดสินใจว่าจะนำเทคโนโลยีไปแสวงหาประโยชน์ในทางใดที่จะทำให้เกิดมูลค่าสูงสุด โดยจะต้องนำห่วงโซ่คุณค่ามาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นการแสวงหาประโยชน์ย้อนกลับหรือก้าวไปข้างหน้าของห่วงโซ่คุณค่า

5) แผนการตลาด (Market Plan) การวิเคราะห์ในการวางแผนการตลาดโดยใช้การวิเคราะห์ STP เป็นกลยุทธ์ในการกำหนดส่วนแบ่งตลาด เลือกกลุ่มเป้าหมายและกำหนดตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ กลยุทธ์นี้จะเป็นตัวกำหนดทิศทางในการสร้างกลยุทธ์การตลาดอื่น ๆ เพื่อทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างตรงจุดมากที่สุด

6) แผนการปฏิบัติงาน (Operation Plan) เป็นแผนที่กำหนดเป้าหมายในการทำงานในแต่ละปี มีโอกาสบรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้ เป็นสิ่งที่ยืนยันว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้นั้นมีความเป็นไปได้เพราะมีแผนงานรองรับที่ชัดเจน

7) แผนการเงินและการลงทุน (Financial Plan & Investment Plan) เป็นแผนการกำหนดการใช้จ่ายเงินต่างๆ ให้สอดคล้องกับแผนงานที่จัดทำขึ้น และระบุถึงแหล่งที่มาของเงินและการใช้ไปของเงินในกิจกรรมต่าง ๆ

8) ความเป็นไปได้ทางการเงิน (Financial Feasibility) คือการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินที่จะต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น การลงทุนจะก่อให้เกิดผลตอบแทนในการทำธุรกิจ (Internal Rate of Return: IRR) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) และพิจารณามูลค่าปัจจุบันในการลงทุน (Net Present Value: NPV) มีความเหมาะสมหรือไม่ทั้งในสถานการณ์ที่เป็นไปได้และสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด

9) แผนป้องกันความเสี่ยง (Risk Management Plan) เป็นเครื่องมือทางกลยุทธ์ที่สำคัญตามหลักการกำกับดูแลกิจการที่ดี ที่จะช่วยให้การบริหารงานและการตัดสินใจด้านต่าง ๆ เช่น การวางแผน การกำหนดกลยุทธ์ การติดตามควบคุมและวัดผลการปฏิบัติงาน ตลอดจนการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ อย่างเหมาะสม มีประสิทธิภาพมากขึ้นและลดการสูญเสียที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่องค์กร

2.8 ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels: TRL)

การประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการงานวิจัยและพัฒนา ให้ทราบถึงความพร้อมของเทคโนโลยีตามบริบทการใช้งาน เริ่มพัฒนาโดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1974 และกำหนดอย่างเป็นทางการในปี ค.ศ.1989 เพื่อใช้ประเมินความพร้อมของเทคโนโลยีการบิน และมีการใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา ซึ่งมีทั้งหมด 9 ระดับ โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วงหลักคือ

1) TRL ระดับที่ 1-3 เป็นช่วงงานวิจัยพื้นฐาน (Basic research)
2) TRL ระดับที่ 4-7 เป็นช่วงพัฒนาต้นแบบ (Prototype development)
3) TRL ระดับที่ 8-9 เป็นช่วงการผลิตหรือการใช้งานต่อเนื่อง (Product on shelf)

โดยรายละเอียดระดับขั้นของ TRL แต่ละระดับมีดังนี้

ระดับที่ 1 เป็นขั้นการศึกษาหลักการพื้นฐานและงานที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อน (Basic principles observed and reported)

ระดับที่ 2 เป็นขั้นนำเสนอแนวคิดและหรือการประยุกต์สูตร (Technology concept and/or application formulated)

ระดับที่ 3 เป็นขั้นการพิสูจน์หรือตรวจสอบแนวคิดโดยการวิเคราะห์หรือทำการทดลอง (Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of concept)

ระดับที่ 4 เป็นขั้นที่พิสูจน์ถึงปัจจัยที่สำคัญโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Component and/or breadboard validation in laboratory environment)

ระดับที่ 5 เป็นขั้นที่พิสูจน์ถึงองค์ประกอบที่สำคัญโดยการทดสอบในสภาวะเลียนแบบใกล้เคียงสภาวะจริง แล้วได้ผลตามที่คาดหวัง (Component and/or breadboard validation in relevant environment)

ระดับที่ 6 เป็นขั้นที่พิสูจน์การทดสอบในสภาวะเลียนแบบใกล้เคียงสภาวะจริง (System/ subsystem model or prototype demonstration in an operational environment)

ระดับที่ 7 เป็นขั้นที่พิสูจน์ต้นแบบที่พัฒนาขั้นสุดท้ายในสภาวะการทำงานจริง (System prototype demonstration in an operational environment)

ระดับที่ 8 เป็นขั้นที่เป็นผลิตภัณฑ์จริงที่ได้รับการยอมรับโดยผ่านการทดสอบและพิสูจน์จากผู้ใช้งานจริง (Actual system completed and flight qualified through test and demonstration)

ระดับที่ 9 เป็นขั้นที่มีการนำไปใช้งานจริงอย่างแพร่หลาย (Actual system flight proven through successful mission operations)

2.9 มาตรฐานการทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก

เนื่องจากกังหันลมขนาดเล็กมีศักยภาพสูงในการใช้งานสำหรับพื้นที่ห่างไกลและสำหรับการเชื่อมต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้า ทำให้หลายประเทศมีโครงการส่งเสริมให้มีการพัฒนากังหันลมขนาดเล็กอย่างต่อเนื่อง เช่น สหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร อิตาลี โปรตุเกส และญี่ปุ่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการพัฒนากังหันลมขนาดเล็กให้มีความน่าเชื่อถือยังคงเป็นความท้าทาย ดังนั้นเพื่อให้งานวิจัยเป็นที่ยอมรับในระดับสากล จึงต้องมีการศึกษามาตรฐานการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กและการรับรองให้เข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้ โดยมาตรฐานการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กและการรับรอง มีดังนี้

2.9.1 การทดสอบกังหันลมขนาดเล็กและการรับรอง

ปัจจุบันมีหน่วยงานที่กำหนดมาตรฐานสำหรับการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กและการรับรองที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งตัวอย่างองค์กรที่กำหนดมาตรฐานการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กมีดังนี้

International Electromechanical Committee (IEC)

American Wind Energy Association (AWEA)

British Wind Energy Association (BWEA)

National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy

American Clean Power Association (ACPA)

International Renewable Energy Agency (IREA)

Small Wind Certification Council (SWCC)

Small Wind Association of Testers (SWAT)

International Energy Agency (IEA)

การกำหนดมาตรฐานการทดสอบเพื่อใช้อ้างอิงและผลการทดสอบที่ได้เป็นที่ยอมรับในระดับสากลจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งทั้งหมดอยู่ในกระบวนการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เข้ากับข้อกำหนดกังหันลมขนาดเล็ก เนื่องจากมาตรฐานในปัจจุบันไม่สามารถควบคุมคุณภาพของตลาดได้ในภาคส่วนนี้ จึงเป็นที่ชัดเจนว่าการพัฒนากังหันลมขนาดเล็กทุกชนิดควรเชื่อมโยงกับข้อกำหนดมาตรฐานและมีการรับรองด้วยบุคคลที่สาม นอกจากนี้ข้อมูลในการทำงานของกังหันควรที่จะเปิดเผยต่อสาธารณะด้วยความโปร่งใสเช่นกัน ตัวอย่างมาตรฐานการทดสอบและแบบแผนการรับรองกังหันลมขนาดเล็กที่ใช้กันในแต่ละประเทศแสดงดังตารางที่ 2.8-2.9

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างมาตรฐานการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กที่ใช้กันในแต่ละประเทศ

ประเทศ	มาตรฐานการทดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก
International Electromechanical Committee (IEC)	IEC61400-2
สหรัฐอเมริกา	- AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard (AWEA 9.1-2009 Small Wind Turbine Standard) - ACP 101-1, 2021 The Small Wind Turbine Standard
แคนาดา	Canadian Wind Turbine Codes and Standards
สหราชอาณาจักร	RenewableUK Small Wind Turbine Standard (formerly BWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard)
เนเธอร์แลนด์	Regeling Groencertificaten Elektriciteitswet
ญี่ปุ่น	JSWTA Standard (JSWTA 0001:2013. Revised 2013.06.01)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.9 แบบแผนการรับรองกังหันลมขนาดเล็กที่ใช้กันในแต่ละประเทศ

ประเทศ	บริการออกใบรับรองกังหันลมขนาดเล็ก
สหรัฐอเมริกา	Small Wind Certification Council (SWCC)
สหราชอาณาจักร	Microgeneration Certification Scheme (MCS)
เนเธอร์แลนด์	CertiQ
เดนมาร์ค	Danish testing & certification association for wind energy DTU
หน่วยงานอิสระ	DEWI-OCC Offshore and Certification Centre
หน่วยงานอิสระ	GL
หน่วยงานอิสระ	TÜV

2.9.2 มาตรฐานของ IEC ที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมขนาดเล็ก

1) IEC 61400-2: 2006, Ed 2: ข้อกำหนดการออกแบบสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก (Design requirements for small wind turbines) มีขอบเขตการใช้งานสำหรับกังหันขนาดเล็กที่มีพื้นที่กวาดของใบพัด (Swept rotor area) ไม่เกิน 200 ตารางเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 เมตร กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 65 กิโลวัตต์ หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V_{AC}) น้อยกว่า 1000 โวลต์หรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_{DC}) น้อยกว่า1500 โวลต์ ซึ่งรายละเอียดของข้อกำหนดการออกแบบสำหรับกังหันลมขนาดเล็กจะต้องมีเนื้อหาสำคัญที่เกี่ยวข้องดังนี้

- วิธีการออกแบบ ที่ต้องระบุถึง สมการโหลดแบบง่าย
- การสร้างแบบจำลอง Aeroelastic
- การตรวจสอบสมมติฐานการออกแบบ (Verification of Design Assumptions)
- การทดสอบการรับแรงทางกล (Mechanical loads testing)
- การทดสอบใบมีดแบบคงที่ (Static blade test)
- การทดสอบความปลอดภัยและการทำงาน (Safety and Function Test) ถูกระบุไว้ในภาคผนวก D (Annex D)
- การทดสอบความทนทานในการใช้งาน (Duration Test) ถูกระบุไว้ในภาคผนวกE (Annex E)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) IEC 61400-11: 2006 Ed 2.1 เทคนิคการวัดเสียงรบกวน (Acoustic noise measurement techniques) มีข้อกำหนดอยู่ 2 เทคนิคคือ เทคนิคทั่วไปและเทคนิคอื่น ๆ สำหรับกังหันลมขนาดเล็กที่ระบุไว้ในภาคผนวก F ซึ่งการวัดเสียงรบกวนอนุญาตให้ใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเท่านั้น ห้ามใช้วิธีผสมกัน

3) IEC 61400-12-1: 2005 Ed 1 การวัดประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Power Performance measurements of electricity produced wind turbines) เป็นวิธีการที่จะรับประกันความสม่ำเสมอ ความถูกต้อง และความสามารถในการทำซ้ำในการวัดและวิเคราะห์สมรรถนะกำลังไฟฟ้าของกังหันลม ขั้นตอนการกำหนดลักษณะสมรรถนะกำลังของกังหันลมขนาดเล็กในภาคผนวก H

4) IEC 61400-14: 2005 Ed 1 การเปิดเผยระดับเสียงที่ชัดเจนและค่าโทนเสียง (Declaration of apparent sound level and tonality values)

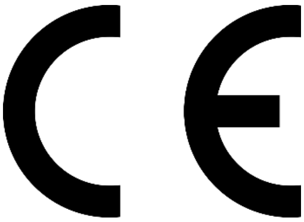
5) IEC 61400-21: 2008 Ed 2: การวัดและประเมินลักษณะคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกังหันลมแบบต่อเชื่อมสายส่ง (Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines)

6) IEC 61400-22 2010 Ed 1: การทดสอบและการรับรองความสอดคล้อง (Conformity testing and certification)

7) IEC 61400-23: 2001 Ed 1: การทดสอบโครงสร้างใบพัดอย่างเต็มรูปแบบ (Full scale structural testing of rotor blades)

2.9.3 เครื่องหมาย CE

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตที่ใดก็ได้ในโลกและจะจำหน่ายในสหภาพยุโรปต้องผ่านการดำเนินการเพื่อขอรับรองด้วยเครื่องหมาย CE ดังรูปที่ 2.40 เครื่องหมาย CE เป็นเครื่องหมายที่ระบุว่าผลิตภัณฑ์ได้รับการประเมินโดยผู้ผลิตและถือว่าเป็นไปตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัย สุขภาพ และการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของสหภาพยุโรป



รูปที่ 2.40 เครื่องหมาย CE

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในส่วนของกังหันลมขนาดเล็กนั้น การขอเครื่องหมาย CE จะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่เพิ่มเติมจากปกติอีก 3 รายการ คือ

- 2006/42/EC machinery directive
- 2006/95/EC low voltage directive
- 2004/108/EC electromagnetic compatibility EMC

2.10 ช่องว่างงานวิจัย (Research Gap)

จากการทบทวนทฤษฎี งานวิจัย สิทธิบัตรและข้อมูลจากแหล่งอื่น ๆ ในการนำลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมมาผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่าเมื่อนำกังหันลมขนาดเล็กที่มีอยู่ในปัจจุบันมาติดตั้งเข้ากับระบบลมระบาย ทำให้ส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ต้นกำเนิดลมระบาย เนื่องจากเมื่อกังหันหมุนด้วยความเร็วสูงทำให้ใบพัดมีลักษณะหมุนขวางทิศทางลมระบายที่จะออกสู่ภายนอก การติดตั้งให้ไม่กระทบกับระบบลมระบายต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมาก ซึ่งไม่เหมาะสมกับการติดตั้งกับอุปกรณ์ลมระบายที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในพื้นที่ที่จำกัด การพัฒนาต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาในรูปแบบและแนวทางใหม่ให้เหมาะสมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด คุ้มค่ากับการลงทุน สะดวกในการติดตั้งและซ่อมบำรุง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อสร้างประโยชน์ในเชิงเศรษฐกิจและความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

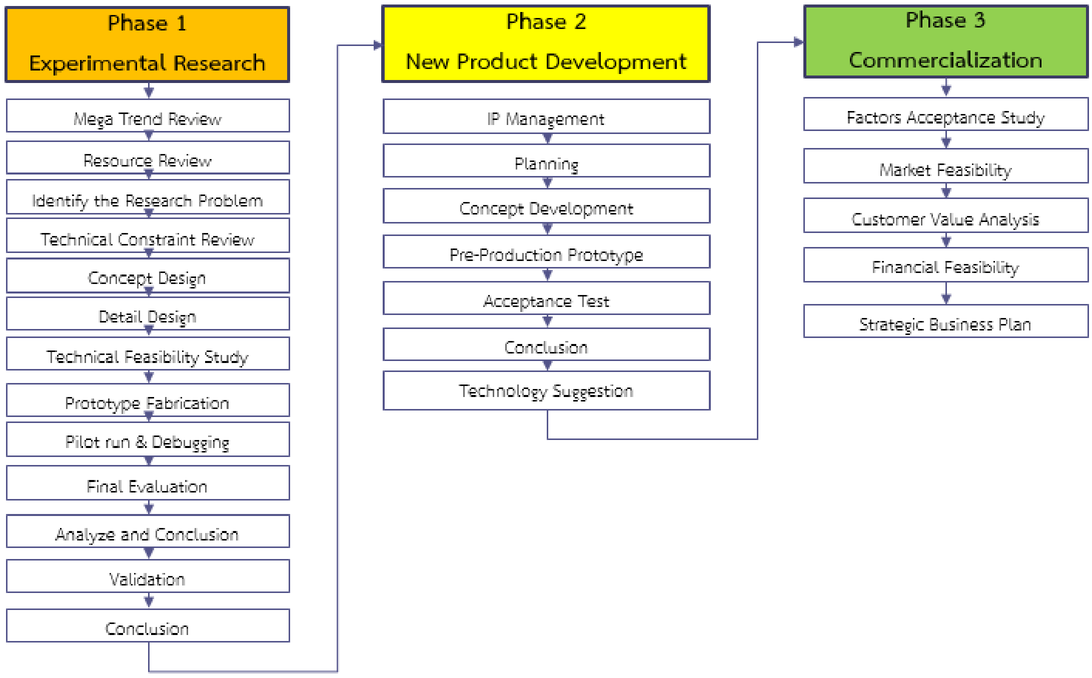
บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยเรื่องนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายในภาคอุตสาหกรรมนี้เป็นการวิจัยเชิงผสมผสานระหว่างการวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยทางพาณิชยศาสตร์ ผู้วิจัยดำเนินการวิจัยโดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 3 ระยะเพื่อตอบวัตถุประสงค์ของการวิจัยทั้ง 3 ข้อ ในบทที่ 1 โดยในแต่ละระยะมีวิธีดำเนินการวิจัยและผลลัพธ์ที่คาดหวัง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีดำเนินการวิจัยและผลลัพธ์ที่คาดหวัง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย	วิธีดำเนินการวิจัย	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง
1. เพื่อศึกษา ค้นคว้าแนวทางใหม่ในการสร้างต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาที่มีความคุ้มค่าในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศไทย	1. การวิจัยระยะที่ 1 1.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัย ที่เกี่ยวข้องและปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ 1.2 สังเคราะห์ ระบุข้อจำกัดของระบบกังหันลมที่ใช้ในปัจจุบัน 1.3 ออกแบบและสร้างตัวต้นแบบ 1.4 ทดสอบและปรับปรุงตัวต้นแบบ	แนวคิด (Concept) ของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกได้ในอนาคต	2. การวิจัยระยะที่ 2 2.1 ยื่นจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์เพื่อคุ้มครองสิทธิ์ในการคิดค้น 2.2 วางแผนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ 2.3 ออกแบบแนวคิดผลิตภัณฑ์ต้นแบบ 2.4 สร้างตัวต้นแบบ (Conceptual Prototype) 2.5 ทดสอบตลาดเพื่อหาอัตราการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรม 2.6 นำเสนอแผนพัฒนาในระยะยาว	ต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย
3. เพื่อศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าและประเมินความสามารถในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์	3. การวิจัยระยะที่ 3 3.1 ทดสอบความยอมรับของตลาด 3.2 วิเคราะห์ความเป็นได้ทางการตลาด การลงทุนในการผลิต และความเป็นไปได้ทางการเงิน	แผนธุรกิจในการนำต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายที่พัฒนาขึ้นไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์

ขั้นตอนในการทำวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ การวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) การพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ (New product development) และการทำประโยชน์เชิงพาณิชย์ (Commercialization) ดังรูปที่ 3.1



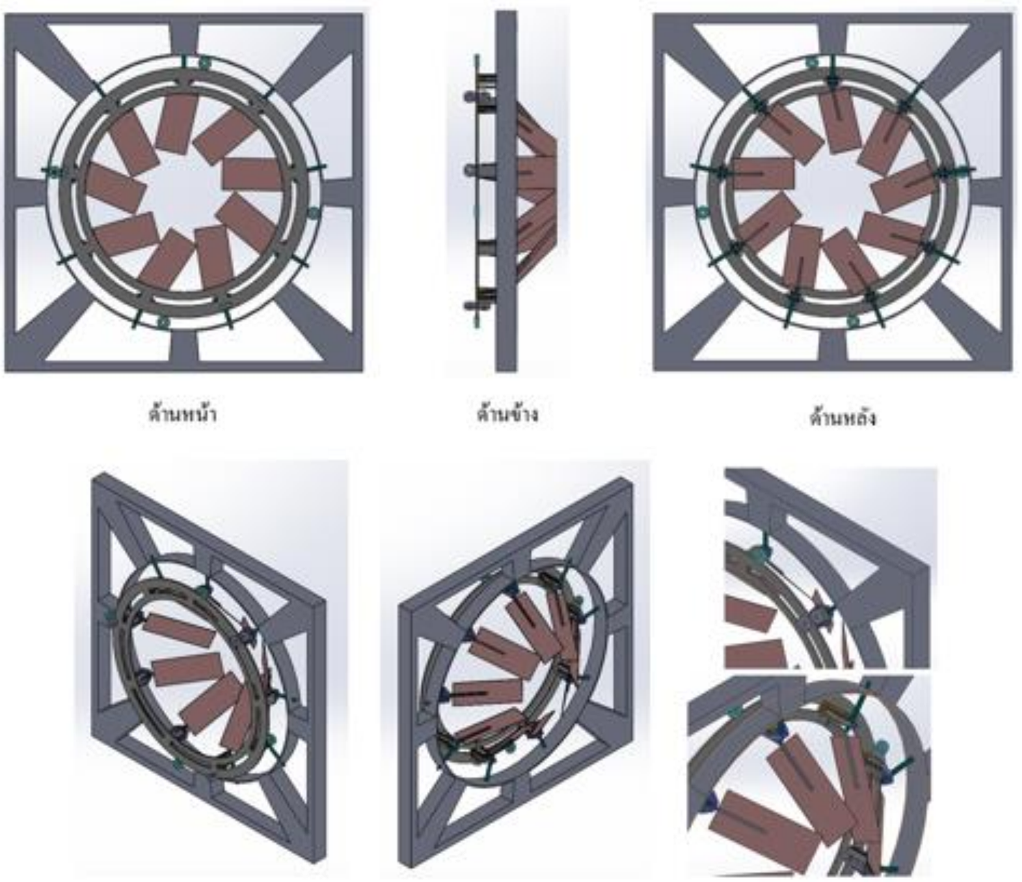
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การวิจัยระยะที่ 1 การวิจัยและทดลองเพื่อศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา

การวิจัยพื้นฐาน (Basic Research) ในรูปแบบการวิจัยทดลอง (Experimental Research) ถูกนำมาใช้เพื่อให้เกิดความเข้าใจในความรู้พื้นฐานสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาและการหาประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษาและทดลองให้ได้องค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรมต่อไป โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การออกแบบและสร้างกังหันลม

การออกแบบโครงสร้างกังหันลม ได้ทำการศึกษารายละเอียดจากข้อมูลพื้นฐานตามสภาพการปฏิบัติงานและคำนึงถึงสภาพความเป็นจริงให้มากที่สุดอย่างมีเหตุผลในเชิงวิทยาศาสตร์ ที่สามารถพิสูจน์ได้และสามารถใช้งานได้ มีความสะดวกในการติดตั้งและเคลื่อนย้าย รวมทั้งสามารถเป็นฐานความคิดในการพัฒนาต่อยอดไปในอนาคตได้ แนวคิดต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายแสดงดังรูปที่ 3.2

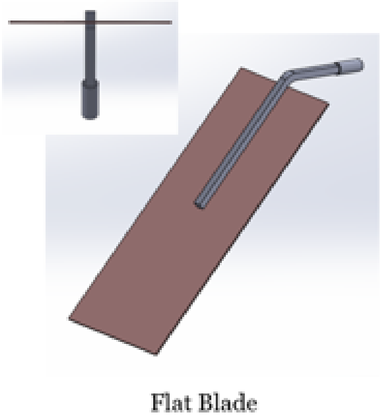


รูปที่ 3.2 แนวคิดตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา
เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1.2 การออกแบบใบพัดกังหันลม

ใบพัดสำหรับต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นใบพัดแบบผิวเรียบ (Flat blade) โดยเลือกใช้แผ่นอะคริลิกที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย กระบวนการผลิตและขึ้นรูปไม่ซับซ้อน โดยตัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและประกอบเข้ากับแกนยึดใบพัดที่มีการปรับมุมเพื่อให้สามารถรับลมระบายได้ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ใบพัดกังหันลมที่ใช้ในการวิจัย

3.1.3 การออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

การออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร ได้ทำการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร โดยใช้ทฤษฎีของ Hugh Piggott และคำนึงถึงเหตุผลในเชิงทฤษฎีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถพิสูจน์ได้หรือแสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าได้จริงและสะดวกในการติดตั้งเคลื่อนย้าย แรงดันไฟฟาเฉลี่ยเมื่อไมมีโหลดที่เกิดขึ้นในขดลวดอารเมเจอร์ สามารถคำนวนได้จากสมการที่ 3.1

$$E_{avg} = \frac{ABPNZ}{60} \tag{3.1}$$

โดยที่ E_{avg} คือ แรงดันไฟฟาเฉลี่ยเมื่อไมมีโหลดที่เกิดขึ้นในขดลวดอารเมเจอร หนวย โวลต

A คือ พื้นที่หนาตัดแมเหล็กถาวร หนวย ตารางเมตร

B คือ ความหนาแนนฟลั๊กแมเหล็ก หนวย เทสลา (มีคาเทากับ 0.4 ของแมเหล็กที่นำมาใช)

P คือ จำนวนขั้วแมเหล็กที่นำมาใช หนวย โพล

N คือ จำนวนรอบของการหมุนของโรเตอร หนวย รอบตอนาที

Z คือ จำนวนรอบของขดลวด (คูณดวยจำนวนขดลวดที่ตออนุกรมกัน) หน่วย รอบ

แรงดันไฟฟาสูงสุด (Peak voltage) สามารถหาได ซึ่งจะมีคาสูงกวาแรงดันไฟฟาเฉลี่ยประมาณ 50 % กล่าวคือแรงดันไฟฟาสูงสุด 1 เฟส คือ ถาขดลวดถูกจัดเปนแบบ 3 เฟส ซึ่งโดยทั่วไปจะตอแบบสตาร (Y) ก็จะมีแรงดันไฟฟาสูงขึ้นอีกเปน 1.732 เทาของแรงดันสูงสุด 1 เฟส

จากสมการที่ 3.1 สามารถที่จะหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยและกำลังที่โหลดความต้านทานที่ต่างกันได้ ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที ดังตารางที่ 3.2

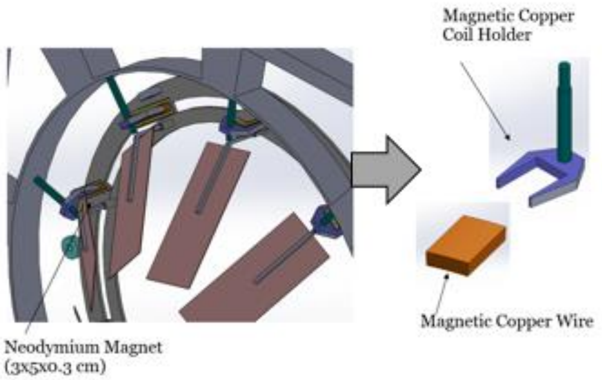
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.2 แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยและกำลังที่โหลดความต้านทานที่ต่างกัน ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที

Edc (V)	R (Ohm)	I (A)	P (watt)
123.64	No Load	0	0
123.64	10	12.36	1528.80
123.64	20	6.18	764.40
123.64	30	4.12	509.60
123.64	40	3.09	382.20
123.64	50	2.47	305.76

3.1.4 การออกแบบขดลวด

การออกแบบขดลวดใช้หลักการพันขดลวดทองแดงมาตรฐานแบบแกนอากาศ ขนาด 3x5x1 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดแกนอากาศเท่ากับขนาดของแม่เหล็กเพื่อให้เกิดแรงแม่เหล็กที่อยู่ระหว่างแม่เหล็กและขดลวดให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยทำการพันขดลวดพันจำนวน 80 รอบโดยใช้ขดลวดทองแดงเบอร์ 20 การวางแม่เหล็กวางแบบขั้วเหนือสลับขั้วใต้วางไปเรื่อย ๆ รอบวงแผ่นโลหะด้านนอกของใบพัด ส่วนการต่อขดลวดเป็นแบบสตาร์ (Y) 3 เฟส การติดตั้งใบพัด แม่เหล็กแรงดึงสูงและขดลวดเข้ากับฐานยึด แสดงดังรูปที่ 3.4

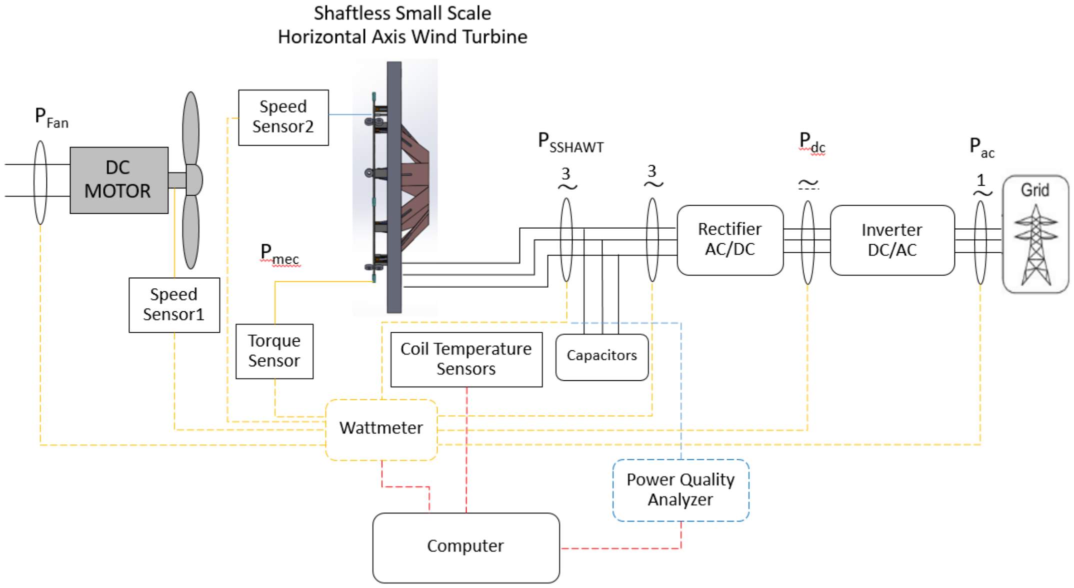


รูปที่ 3.4 การติดตั้งใบพัด แม่เหล็กแรงดึงสูงและขดลวดเข้ากับฐานยึด

3.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมเพื่อหาค่าการปรับตั้งใบพัดกังหันลมที่เหมาะสม

1) ไดอะแกรมสำหรับวัดประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา

การติดตั้งกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย เข้ากับอุปกรณ์ต้นกำเนิดลมและอุปกรณ์สำหรับวัดปัจจัยออกที่สำคัญของกระบวนการ ตามไดอะแกรมดังรูปที่ 3.5 เพื่อหาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาต่อไป



รูปที่ 3.5 ไดอะแกรมสำหรับวัดประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา

2) เครื่องมือวัดค่าของตัวแปรตามที่สำคัญของกระบวนการ

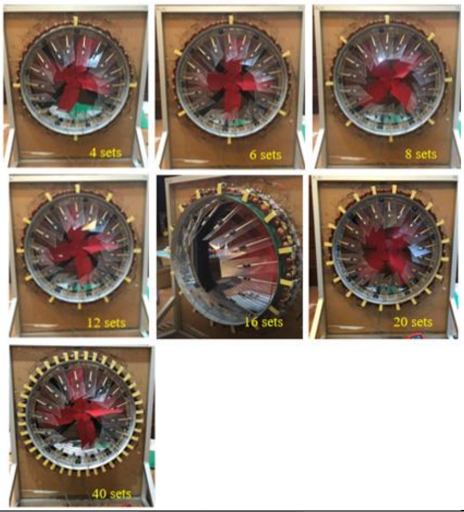
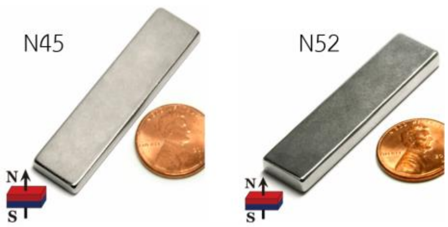
เครื่องมือในการวัดค่าของตัวแปรตามที่สำคัญของกระบวนการประกอบด้วยดิจิตัลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วการหมุนของใบพัด (Laser Tachometer) ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดต่อเข้ากับกังหันลมแกนนนอนแบบไร้เพลาและพัดลมระบายอากาศ ซึ่งอุปกรณ์ในการวัดทั้งหมดต้องทำการทดสอบการเทียบวัดตามมาตรฐานก่อนเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องสำหรับการนำไปวิเคราะห์

3.1.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

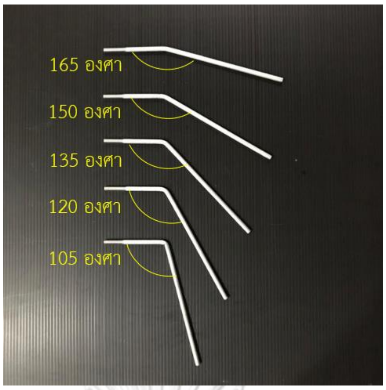
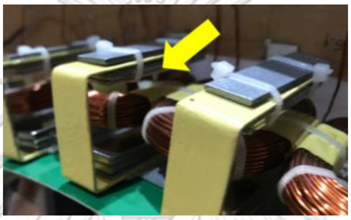
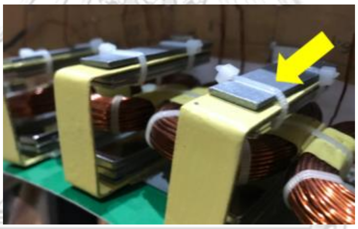
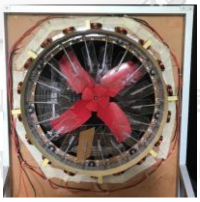
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ก็คือการสร้างต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาที่มีความคุ้มค่าในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทำการหาตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการและสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป ตัวแปรต้นและตัวแปรตามของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายมีรายละเอียดดังนี้

1) ตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการ (Key Process Input Variables, KPIVs) ตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการที่นำมาพิจารณาในการปรับค่าในการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายแสดงดังตารางที่ 3.3

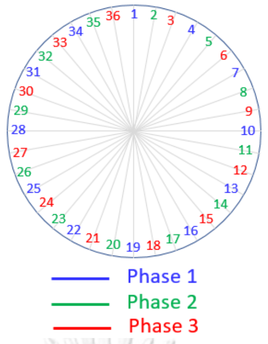
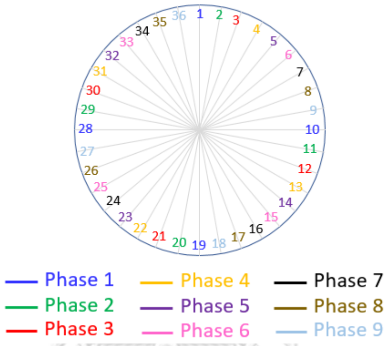
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการที่นำมาพิจารณาสำหรับการออกแบบการทดลอง

ตัวแปรต้น	รูปแสดงตัวแปรต้น	ระดับของตัวแปร
จำนวนชุดแม่เหล็ก (แกนยึดสีเหลือง)		4, 6, 8, 12, 16, 20, 40 ชุด
จำนวนใบพัด		9 ใบพัด, 18 ใบพัด
ชนิดแม่เหล็ก	แม่เหล็กนีโอดีเมียม (Neodymium Block Magnet) ขนาด 2”x1/2”x1/8” 	เกรด N45, เกรด N52

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการที่นำมาพิจารณาสำหรับการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ตัวแปรต้น	รูปแสดงตัวแปรต้น	ระดับของตัวแปร
มุมของแกนยึดใบพัด		105 องศา, 120 องศา, 135 องศา, 150 องศา, 165 องศา
ความหนาของแม่เหล็กชิ้นบน		0 มม., 1 มม., 2 มม., 3 มม.
ความหนาแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบน		0 มม., 1มม., 2 มม.
จำนวนของลวด		9 ขด, 18 ขด, 36 ขด
ทิศทางการเชื่อมต่อขดลวด		ตามเข็มนาฬิกา, ทวนเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต้นที่สำคัญของกระบวนการที่นำมาพิจารณาสำหรับการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ตัวแปรต้น	รูปแสดงตัวแปรต้น	ระดับของตัวแปร
จำนวนเฟสของขดลวด	36 Coils, 3 Phases  36 Coils, 9 Phases  	3 เฟส, 9 เฟส

2) ตัวแปรตามที่สำคัญของกระบวนการ (Key Process Output Variables, KPOVs)

ตัวแปรตามที่สำคัญของกระบวนการที่นำมาพิจารณาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม มีดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ของพัดลมระบายใช้
2. ความเร็วในการหมุนของชุดใบพัด
3. กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา
4. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลา
5. ความเร็วลมที่เข้าพัดลมระบายอากาศ
6. ความเร็วลมที่ออกจากกังหันลม

3.1.7 การศึกษาลักษณะของลมระบายที่ไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

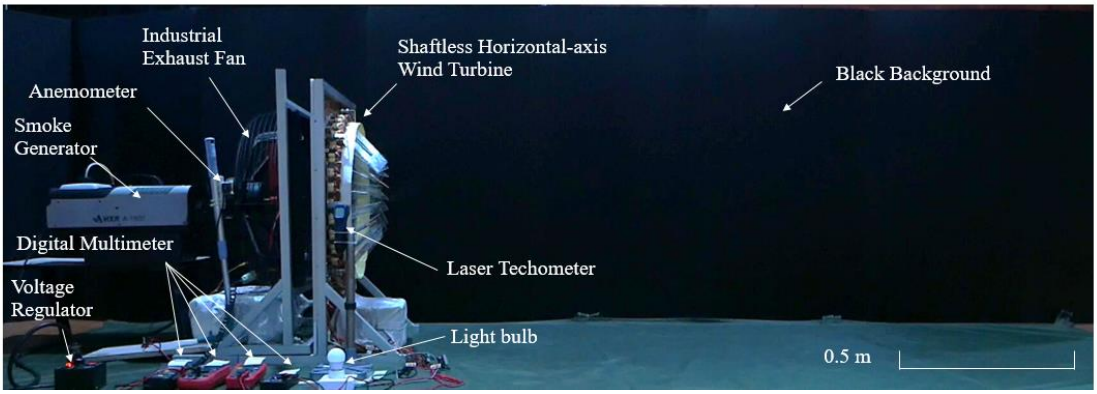
ลักษณะของลมระบายที่ไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นตัวแปรตามอีกตัวแปรหนึ่งที่นำมาพิจารณาผลกระทบของการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย การทดสอบกังหันโดยทั่วไปจะเป็นรูปแบบการทดสอบกังหันในอุโมงค์ลมและมีการปล่อยควัน

สีเพื่อให้สามารถมองเห็นเส้นการไหลของอากาศได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำในห้องทดลองปฏิบัติการแบบปิดเพื่อลดผลกระทบของการไหลของอากาศจากภายนอก โดยประยุกต์ใช้เครื่องสร้างควัน (smoke generator) ยี่ห้อ A HXR รุ่น A-1500 ดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.6 เครื่องสร้างควันสำหรับศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

น้ำยาสร้างควันที่ใช้เป็นสารละลายปลอดสารพิษแบบน้ำ (Non-toxic water base solution) ดังรูปที่ 3.7 เพื่อสร้างควัน โดยทำการติดตั้งด้านหลังพัดลมระบายอากาศแนวเดียวกันกับแกนกลางของมอเตอร์ มีฉากหลังเป็นสีดำเพื่อให้เห็นลักษณะการไหลของควันผ่านกังหันได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 3.8 ทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหวด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิตอล Panasonic รุ่น Lumix และตัดเฟรมของภาพที่วินาทีที่ 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 ตามลำดับ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการไหลของอากาศในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบที่มีเฉพาะพัดลมระบายอากาศ แบบที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมที่มีแกนเพลา และแบบที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ค่ามุมของแกนใบพัด 105 120 135 150 และ 165 องศา ตามลำดับ

รูปที่ 3.7 น้ำยาสำหรับสร้างควันเพื่อศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา



รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องสร้างควันเข้ากับชุดศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการ

3.1.8 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาทำการวิเคราะห์เพื่อระบุตัวแปรต้นที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย และได้ค่าของตัวแปรต้นที่สำคัญที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปทดสอบการใช้งานจริง

3.2 การวิจัยระยะที่ 2: การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรม

เป็นการวิจัยประยุกต์ (Applied Research) ในรูปแบบการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจและนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสิ่งที่มีอยู่ให้ดีขึ้น โดยนำความรู้จากการวิจัยทดลองในส่วนที่ 1 มาพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยใช้กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่เพื่อศึกษาแนวทางในการพัฒนากังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขอบเขตการศึกษาวิจัยและพัฒนาจะเป็นการสร้างแนวคิดต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมต่อไป โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการและทดสอบใช้ในภาคสนาม โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ดำเนินการยื่นจดสิทธิบัตรการประดิษฐ์เพื่อคุ้มครองสิทธิ์ในการคิดค้นกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม

2) การวางแผนสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ด้วยการสำรวจความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์

3) การพัฒนาแนวคิดผลิตภัณฑ์ โดยการสำรวจโอกาสและกำหนดเป้าหมายในการสร้างนวัตกรรม วิเคราะห์ข้อมูล สังเคราะห์แนวคิดนวัตกรรม การคัดสรรคแนวคิดนวัตกรรม ทดสอบแนวคิดนวัตกรรม และพัฒนาแนวคิดให้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ

4) การออกแบบแนวคิดผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Conceptual Prototype)

5) การทดสอบตลาดเพื่อหาอัตราการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรม

6) การวางแผนพัฒนาในอนาคตระยะยาว

3.3 การวิจัยระยะที่ 3: การวิจัยธุรกิจเพื่อศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์

การวิจัยระยะที่ 3 ทำการวิจัยธุรกิจ (Business Research) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ของนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม แนวทางการพัฒนานวัตกรรม โดยพิจารณาตลาด อุปสงค์และอุปทานในตลาด แนวโน้มตลาดและการแข่งขัน ตลอดจนกำหนดกลยุทธ์และรูปแบบการดำเนินธุรกิจที่เหมาะสม

ขอบเขตการศึกษาความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์มีดังนี้

1) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรม
2) ศึกษาความเป็นไปได้ทางการตลาดผ่านทางการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในมุมมองของลูกค้า
3) ศึกษาความเป็นไปได้ด้านการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเพื่อทราบต้นทุนการผลิต
4) ศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงิน การลงทุน ผลตอบแทนการลงทุน มูลค่าปัจจุบันของโครงการและระยะเวลาการคืนทุน
5) จากการประเมินความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์เบื้องต้น

จากการประเมินจุดคุ้มทุนในมุมมองผู้ซื้อเบื้องต้น โดยทำการเปรียบเทียบกังหันลมแบบปัจจุบันและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันดังตารางที่ 3.4 พบว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและมีจุดคุ้มทุนที่อยู่ในช่วง 1.70–3.49 ปี ซึ่งเร็วกว่ากว่ากังหันลมแบบปัจจุบันที่จุดคุ้มทุนที่ในช่วง 4–7 ปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

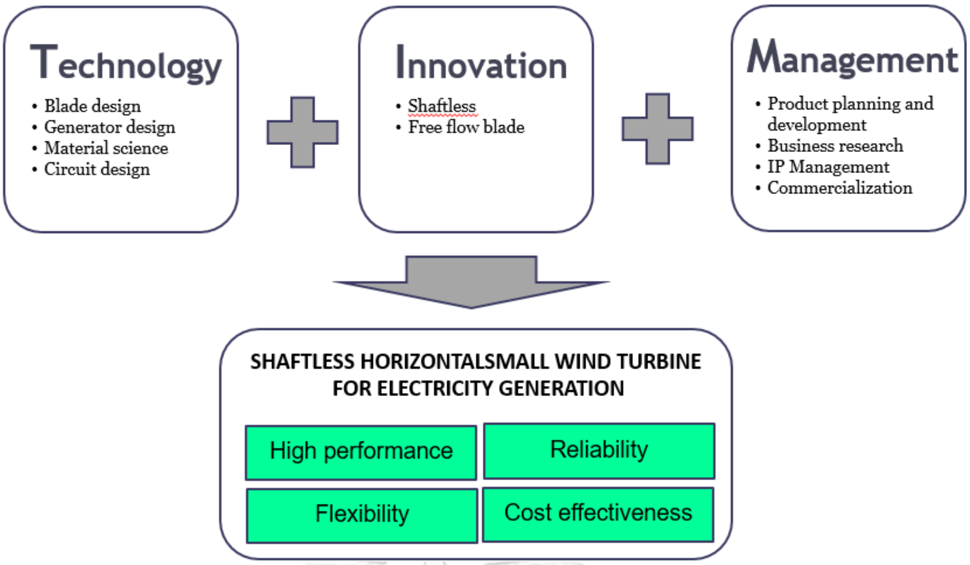
ตารางที่ 3.4 การประเมินจุดคุ้มทุนในมุมมองผู้ซื้อเปรียบเทียบกังหันลมแบบปัจจุบันและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากัน

ความเร็วลมระบาย	5 เมตรต่อวินาที				8 เมตรต่อวินาที			
ประเภทกังหันลมแกนนอน	แบบดั้งเดิม		แบบไร้เพลา		แบบดั้งเดิม		แบบไร้เพลา	
สภาวะการใช้ไฟฟ้า	Off peak	Peak	Off peak	Peak	Off peak	Peak	Off peak	Peak
ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (บาท/kWhr)	2.4	4.59	2.4	4.59	2.4	4.59	2.4	4.59
หน่วยไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ kWhr/ปี	205	205	615	615	840	840	2,519	2,519
ค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ (บาท/ปี)	492.00	940.95	1,476.00	2,822.85	1,007.62	2,743.81	3,022.85	5,781.20
รวมค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ (บาท/ปี)	1,432.95		4,298.85		3,751.42		8,804.04	
ต้นทุนอุปกรณ์ (บาท)	15,000		15,000		15,000		15,000	
จุดคุ้มทุนในการลงทุนติดตั้ง, ROI (ปี)	10.47		3.49		4.00		1.70	

3.4 กรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual Framework)

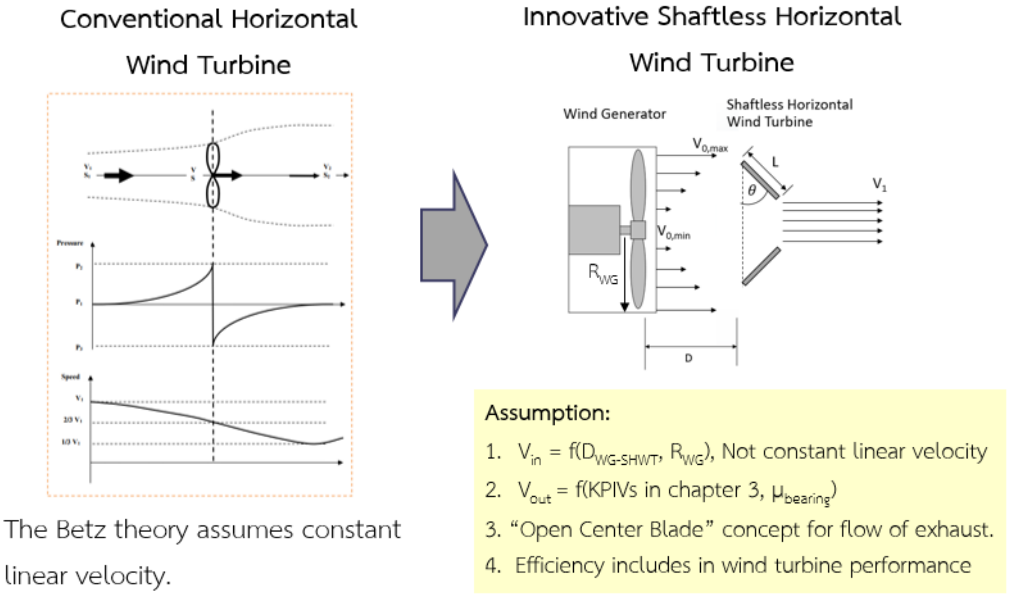
กรอบแนวคิดการวิจัยเป็นการบูรณาการผสมผสานระหว่างการพัฒนาเทคโนโลยี (Technology) ด้านการออกแบบใบพัด เครื่องกำเนิดไฟฟ้า วัสดุศาสตร์และการออกแบบวงจร การสร้างนวัตกรรม (Innovation) ที่ไม่เคยมีมาก่อน และมีการนำกลยุทธ์การจัดการ (Management) เช่น การวางแผนและพัฒนาผลิตภัณฑ์ การวิจัยธุรกิจ การจัดการทรัพย์สินทางปัญญา และการทำประโยชน์เชิงพาณิชย์มาใช้ เพื่อให้เกิดนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม ที่มีประสิทธิภาพสูง ทนทานในการใช้งาน ติดตั้งสะดวกในพื้นที่ที่จำกัดและมีราคาที่คุ้มค่าและเป็นที่ยอมรับในการใช้งานแพร่หลายต่อไป โดยกรอบแนวคิดการวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.9 กรอบแนวคิดการวิจัย

นอกเหนือจากการสร้างนวัตกรรมใหม่แล้ว การสร้างทฤษฎีและองค์ความรู้ใหม่เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient) ของกังหันลม โดยการทำให้ลมสามารถไหลผ่านช่องระบายตรงกลางใบพัดของกังหันไปได้ในขณะที่ใบพัดกังหันหมุนที่ความเร็วสูง แนวคิดกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาดังกล่าวจะทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้อย่างคุ้มค่ามากขึ้น การเปรียบเทียบทฤษฎีระหว่างกังหันลมแบบดั้งเดิมที่อ้างอิงจาก Betz theory กับกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองทฤษฎีของกรอบแนวคิดการวิจัย

โดยแบบจำลองธุรกิจที่ใช้ในการดำเนินการจะแบ่งออกเป็นช่วง ๆ คือช่วงแนวคิด ช่วงพัฒนา และช่วงการทำประโยชน์เชิงพาณิชย์ โดยจะทำการพิจารณาทั้งในทางด้านเทคนิค ด้านการตลาดและด้านธุรกิจ เพื่อให้สามารถพัฒนาต่อยอดงานวิจัยจากระดับการทดสอบแนวคิดตัวต้นแบบในห้องปฏิบัติการไปสู่การสร้างผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายออกสู่ตลาดให้เป็นที่ยอมรับในระดับสากลได้ รายละเอียดกิจกรรมในแต่ละช่วงและแต่ละด้านแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แบบจำลองธุรกิจ

	ด้านเทคนิค (TECHNICAL)	ด้านการตลาด (MARKET)	ด้านธุรกิจ (BUSINESS)
ช่วงแนวคิด (CONCEPT PHASE)			
Stage 1 INVESTIGATION	TECHNICAL ANALYSIS	MARKET ASSESSMENT	VENTURE ASSESSMENT
ช่วงพัฒนา (DEVELOPMENT PHASE)			
Stage 2 FEASIBILITY	TECHNICAL FEASIBILITY	MARKET STUDY	ECONOMIC FEASIBILITY
Stage 3 DEVELOPMENT	ENGINEERING PROTOTYPE	STRATEGIC MARKET PLAN	STRATEGIC BUSINESS PLAN
Stage 4 INTRODUCTION	PRE-PRODUCTION PROTOTYPE	MARKET VALIDATION	BUSINESS START-UP
ช่วงการทำประโยชน์เชิงพาณิชย์ (COMMERCIAL PHASE)			
Stage 5 GROWTH	PRODUCTION	SALES AND DISTRIBUTION	BUSINESS GROWTH
Stage 6 MATURITY	PRODUCTION SUPPORT	MARKET DIVERSIFICATION	BUSINESS MATURITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการวิจัย

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิจัยที่ได้จากการดำเนินตามระเบียบวิธีวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย การเสนอแนวคิด การพัฒนาตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ การพัฒนาตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมเพื่อทดสอบในภาคสนาม และการประเมินการยอมรับนวัตกรรมและหาปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้พลังงานทดแทนโดยแบบสอบถาม มีรายละเอียดดังนี้

4.1 การเสนอแนวคิด (Idea Generation)

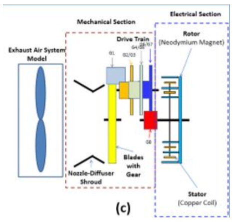
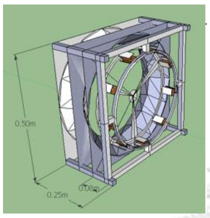
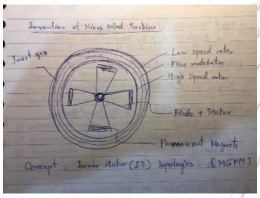
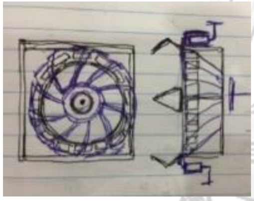
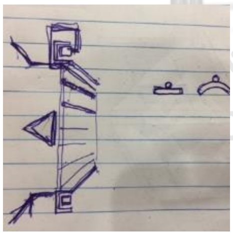
การเสนอแนวคิดของตัวต้นแบบกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย ใช้รูปแบบการคิดเชิงสร้างสรรค์แบบอเนกนัย (Divergent Thinking) คือ การคิดที่เปิดกว้าง ไม่ตัดสินถูกผิด เพื่อให้ได้มาซึ่งแนวคิดที่หลากหลายเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีและการผลิตต่อไป โดยแนวคิดที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

หลังจากได้แนวคิดในหลายรูปแบบมาแล้ว จึงทำการประเมินความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยีและการผลิต เพื่อหาแนวคิดที่มีความเป็นได้มากที่สุดที่สามารถนำมาผลิตเพื่อใช้งานได้จริง โดยปัจจัยที่นำมาพิจารณามีดังต่อไปนี้

1. ความใหม่ของแนวคิด
2. ความเป็นไปได้ในการหมุนของใบพัด
3. ความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้า
4. การไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศที่มีอยู่เดิม
5. ความเป็นไปได้ในการผลิต
6. ต้นทุนในการผลิต
7. ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

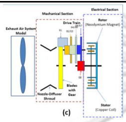
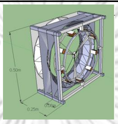
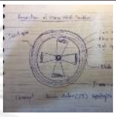
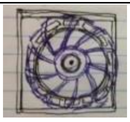
ตารางที่ 4.1 แนวคิดของกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย

แนวคิดที่	รูปภาพ	รายละเอียดแนวคิด
1		เป็นกังหันแกนนอนแบบมีเพลากลางประกอบด้วยท่อควบคุมการไหลและเพิ่มความเร็วและแรงดันของลมแบบ Nozzle-Diffuser ใบพัดที่มีเฟืองเกียร์ทดรอบอยู่รอบแนวรัศมี เพื่อให้แม่เหล็กที่ยึดกับโรเตอร์หมุนตัดขดลวดได้เร็วขึ้น
2		เป็นกังหันลมแกนนอนแบบมีเพลากลาง โดยชุดขดลวดที่ยึดติดกับโครงของใบพัด จะหมุนตัดผ่านแม่เหล็กที่ยึดติดกับโครงของกังหัน ด้านหน้าของกังหันมีท่อดักลมแบบ Nozzle เพื่อเพิ่มความเร็วลมก่อนเข้าใบพัด
3		เป็นกังหันลมแกนนอนแบบมีเพลา โดยแม่เหล็กจะถูกยึดติดกับปลายของใบพัด ขดลวดที่ยึดกับโครงรูปวงแหวนจะถูกจัดเรียงตามแนวรัศมีของใบพัด
4		เป็นกังหันแกนนอนแบบมีเพลา ที่ชุดใบพัดและแม่เหล็กถูกประกอบเข้ากับโครงของโรเตอร์ และมีวงล้อประคองโครงของโรเตอร์ให้หมุนตัดขดลวดที่ถูกยึดกับโครงของกังหัน ใบพัดทำมุมเอียงเพื่อเปิดช่องให้ลมระบายสามารถไหลผ่านได้
5		เป็นกังหันแกนนอนแบบไร้เพลา ที่ชุดใบพัด แม่เหล็กและลูกล้อควบคุมการหมุนถูกประกอบเข้ากับโครงของโรเตอร์ และขดลวดถูกยึดกับโครงของกังหัน ใบพัดทำมุมเอียงเพื่อเปิดช่องให้ลมระบายสามารถไหลผ่านได้

ลักษณะการประเมินเป็นแบบลิเคิร์ทสเกล 5 ระดับ (Likert-type scale) ใช้ระดับการวัดข้อมูลแบบอันตรภาคชั้น (Interval scale) โดยที่ระดับ 1 หมายถึงมีความเป็นไปได้น้อย ระดับ 5 หมายถึงมีความเป็นไปได้มาก จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลที่ได้จากการประเมินแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าแนวคิดสำหรับการประดิษฐ์กังหันสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมที่มีความเป็นไปได้สูงที่สุดจากคะแนนที่ประเมินได้คือแนวคิดที่ 5 มีคะแนนรวมเท่ากับ 33 ที่มีการทำงานแบบไร้แกนเพลาแนวคิดดังกล่าวเกิดจากการสังเกตสิ่งรอบข้างในชีวิตทำให้เกิดแนวความคิดที่ออกจากกรอบเดิมแบบฉับพลัน ณ ขณะเวลาหนึ่ง โดยเป็น

การผสมผสานหลักการทำงานแบบไร้เพลาของรถปั่นแยกกากมันสำปะหลังดังรูปที่ 4.1 และไฟประดับงานวัดรูปโคนที่เป็นรูปทรงที่อากาศหรือลมสามารถไหลผ่านได้ ดังรูปที่ 4.2 เข้าด้วยกัน ทำให้อากาศจากระบบลมระบายสามารถไหลผ่านออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้โดยส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของระบบลมระบายน้อยที่สุด และเป็นแนวคิดที่มีความใหม่ ที่ไม่เคยมีใครทำมาก่อนเพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดของกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายได้

ตารางที่ 4.2 การประเมินความเป็นไปได้ของแนวคิดสำหรับการประดิษฐ์กังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบาย

	แนวคิดที่ 1	**แนวคิดที่ 2**	**แนวคิดที่3**	**แนวคิดที่ 4**	**แนวคิดที่ 5**
					
ความใหม่ของแนวคิด	3	3	4	3	5
ความเป็นไปได้ในการหมุนของใบพัด	5	5	5	5	5
ความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้า	5	5	5	5	5
การไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศที่มีอยู่เดิม	2	2	2	2	5
ความเป็นไปได้ในการผลิต	4	4	4	4	4
ต้นทุนในการผลิต	2	4	4	4	4
ความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์	2	2	2	2	5
คะแนนรวมที่ประเมินได้	**23**	**23**	**26**	**25**	**33**

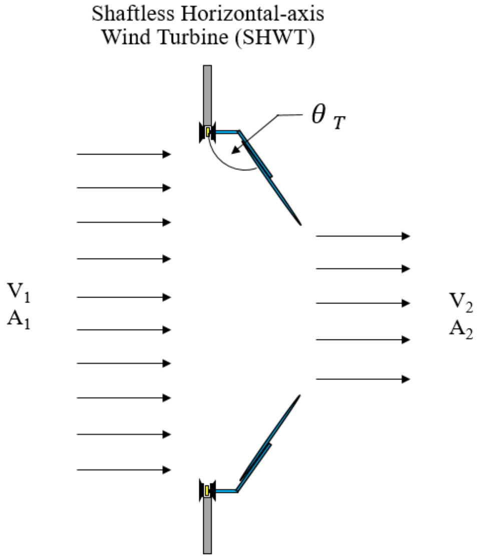
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.1 การทำงานแบบไร้เพลาของรถปั่นแยกกากมันสำปะหลัง

รูปที่ 4.2 รูปทรงแบบกรวยที่อากาศหรือลมสามารถไหลผ่านได้

4.2 หลักการทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

การทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบาย คือ ชุดโรเตอร์ (Rotor) ที่ถูกประกอบกับชุดสเตเตอร์ (Stator) ด้วยลูกล้อควบคุมการหมุน มีการเคลื่อนที่โดยการหมุนเมื่อลมจากระบบระบายไหลผ่านใบพัดที่มีมุมป้านค่าใด ๆ ที่ทำให้เกิดช่องตรงกลางของกังหัน จะทำหน้าที่รับลมเพื่อให้ชุดโรเตอร์หมุน แม่เหล็กที่ติดอยู่กับโครงของโรเตอร์จะเคลื่อนตัดผ่านขดลวดที่ยึดกับโครงของสเตเตอร์เพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยที่ลมที่ระบบระบายอากาศปล่อยออกมาจะสามารถไหลผ่านกังหันแกนนอนออกสู่ระบบภายนอกได้ ดังรูปที่ 4.3

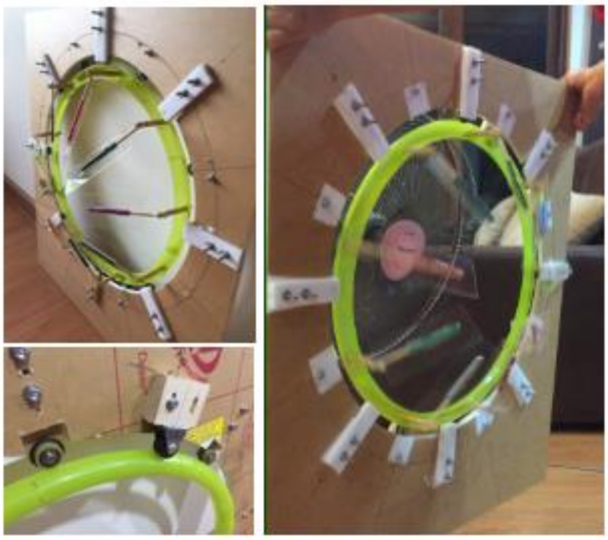


รูปที่ 4.3 หลักการทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบาย อุตสาหกรรม

4.3 การพิสูจน์แนวคิดเบื้องต้นก่อนการผลิตต้นแบบ

4.3.1 การสร้างต้นแบบเบื้องต้นอย่างง่าย (Mockup)

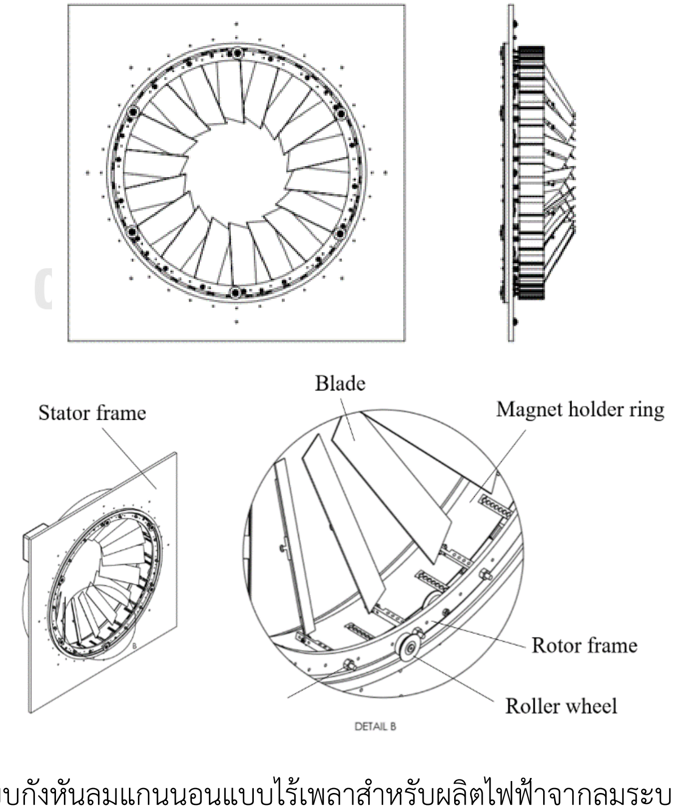
ภายหลังจากได้แนวคิดที่มีคะแนนความเป็นไปได้สูงสุดจากการประเมินแล้ว จึงสร้างตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาอย่างง่าย เพื่อพิสูจน์แนวคิดเบื้องต้นว่ามีความเป็นไปได้จากวัสดุที่หาได้ง่าย ๆ เช่น ตะกร้าพลาสติก แท่งไม้ แผ่นอะคริลิค ลูกล้อ น๊อตและสกรู เป็นต้น ซึ่งตัว Mockup ที่สร้างขึ้นเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนได้ที่ความเร็วรอบประมาณ 40 รอบต่อนาที จากการทดสอบการหมุนกับพัดลมทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 นิ้ว ในที่ระดับความเร็วการหมุนระดับ 3 ซึ่งมีความเร็วลมประมาณ 5 เมตรต่อวินาที ในสภาวะที่โหลดของโรเตอร์มีเฉพาะน้ำหนักของโครงและใบพัดเท่านั้น กรณีที่การใช้งานจริงจะมีน้ำหนักของแม่เหล็กเพิ่มเข้ามา ในขั้นตอนการออกแบบถัดไปจึงต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงของโครงโรเตอร์และชุดใบพัด ความเสถียรในการหมุน ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขดลวดและจำนวนแม่เหล็กเพื่อให้ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาคุ้มค่ากับต้นทุนที่จ่ายไป การเสื่อมสภาพแรงดึงดูดของแม่เหล็กภายใต้สภาวะการใช้งานจริงผ่านช่วงเวลาต่าง ๆ ระดับความดังของเสียงที่เกิดขึ้นในขณะที่กังหันลมทำงาน ความปลอดภัยของระบบเมื่อนำไปใช้งานในพื้นที่จริง และความยากง่ายในการซ่อมบำรุงรักษา เป็นต้น



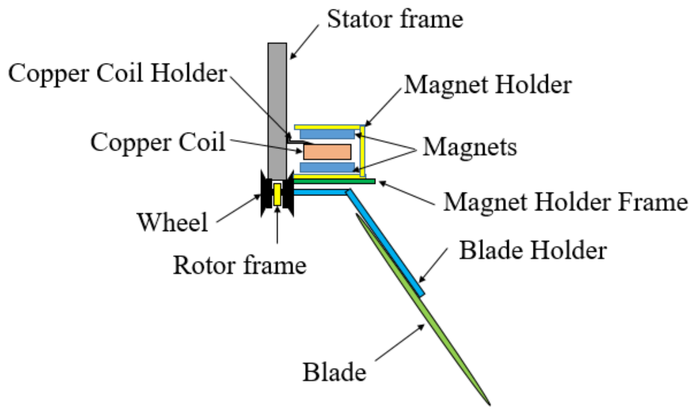
รูปที่ 4.4 Mockup ที่ใช้ทดสอบความเป็นไปได้ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา
สำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

4.3.2. ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ออกแบบด้วยโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ SOLIDWORK 2018

กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีความมุ่งหมายในการประดิษฐ์เพื่อเปลี่ยนพลังงานจากกระแสการไหลของของไหลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยประกอบด้วยส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) ซึ่งส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ ชุดขดลวดจำนวนหนึ่ง ที่ติดตั้งตามแนวรัศมีวงกลมของโครงของส่วนไม่เคลื่อนที่และเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแบบสตาร์ 3 เฟส โดยที่ส่วนที่เคลื่อนที่ของกังหันแบบไร้เพลามีลักษณะพิเศษคือชุดใบพัดถูกออกแบบด้วยกระบวนการทางวิศวกรรมให้มีมุมบิด มุมเอียงและความยาวใบพัดที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดช่องเปิดตรงกลาง เพื่อทำให้กระแสการไหลของของไหลสามารถไหลผ่านระบายออกจากระบบได้ และของไหลที่ไหลผ่านชุดใบพัดทำให้ชุดเคลื่อนที่หมุนด้วยความเร็วสูง ทำให้ชุดแม่เหล็กแรงดึงสูงติดที่ติดกับโครงของส่วนที่เคลื่อนที่วิ่งตัดกับขดลวดที่ติดตั้งกับโครงของส่วนที่ไม่เคลื่อนที่เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้ โดยชุดลูกล้อที่ยึดกับโครงของส่วนที่เคลื่อนที่เป็นตัวควบคุมการหมุนให้ส่วนที่เคลื่อนที่หมุนอยู่ในโครงของส่วนไม่เคลื่อนที่ ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมออกแบบโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORK 2018 ดังรูปที่ 4.5 และ ส่วนประกอบของชุดโรเตอร์ของกันหันลมแบบไร้เพลาแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.6 ส่วนประกอบของชุดโรเตอร์ของกันหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

4.3.3 การศึกษาการไหลของลมระบายผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเบื้องต้นด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation

การศึกษาการไหลของอากาศที่ระบายออกจากระบบผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีวัตถุประสงค์เพื่อเข้าใจลักษณะของการไหลของอากาศผ่านกังหันลมเบื้องต้น ว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ลมระบายสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาออกสู่ภายนอกได้หรือไม่ โดยใช้โปรแกรม SOLIDWORK 2018 ในการออกแบบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมแบบ 3 มิติ และใช้โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation สร้างแบบจำลองเพื่อประเมินการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ก่อนการผลิตตัวต้นแบบจริง สำหรับการสร้างแบบจำลองนี้ ได้ทำการตั้งค่าที่กำหนดในโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation เพื่อสร้างแบบจำลองการไหลดังนี้

- Computational domain
  - Type: 3D simulation
- Size and Conditions
  - Global Mesh Setting
  - Typesร: Automatic
  - Level of initial mesh = 3
- Local Mesh 1
  - Characteristic Number of Cells Across Channels = 5
  - Maximum Channel Refinement Level = 3
  - Small Solid Refinement Level = 3

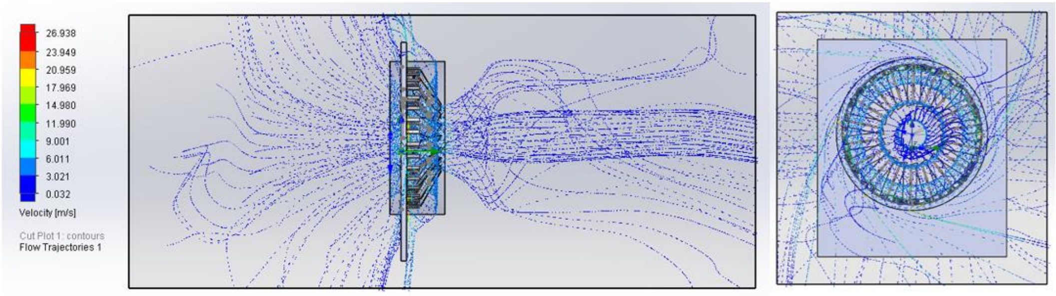
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- Curvature Level = 0

- ส่วนการหมุน (Rotating Region)
    - ความเร็วการหมุนเชิงมุม (Angular Velocity, ω) = -1000 rpm
- ขอบเขตการประมวลผล (Computational Domain)
    - พิกัดขนาดของระบบในการสร้างแบบจำลอง (Size and Conditions)
        - X = -500 mm, 500 mm
        - Y = -500 mm, 500 mm
        - Z = - 1000 mm, 10000 mm

ผลของแบบจำลองที่ได้จากการประมวลโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation แสดงเส้นกระแสการไหล (Flow streamlines) ของอนุภาคในการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา พบว่าลมระบายสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาออกสู่ภายนอกได้ ดังรูปที่ 4.7 โดยที่ความเร็วของอากาศที่เข้าและระบายออกผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 4 เมตรต่อวินาที โดยพิจารณาจากแถบสีบอกระดับความเร็วลม ลักษณะของการไหลของอากาศจะเป็นลำพุ่งออกจากตรงกลางของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสู่ภายนอก แต่อากาศส่วนหนึ่งมีการฟุ้งกระจายออกไปด้านข้าง ซึ่งอาจเกิดจากการกำหนดสมมติฐานของแต่ละปัจจัยอาจไม่ครอบคลุม ถูกต้องทั้งหมด เนื่องจากความใหม่ของระบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา การศึกษาแบบจำลองการไหลนี้เป็นการทำให้เห็นภาพรวมโดยคร่าว ๆ ของระบบเท่านั้น จึงต้องพิจารณาสร้างต้นแบบเพื่อศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่เกิดขึ้นจริง เพื่อพิสูจน์แนวคิดของการออกแบบให้เป็นที่ยอมรับต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.7 ลักษณะการไหลของอากาศที่ผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้า
จากลมระบายอุตสาหกรรมที่ได้จากการการสร้างแบบจำลองการไหล

ผลของแบบจำลองเบื้องต้นจากโปรแกรม SOLIDWORKS Flow Simulation แสดงให้เห็นว่าลมระบายสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาได้ จึงสามารถตัดสินใจดำเนินการสร้างตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อศึกษาและทดสอบในห้องปฏิบัติการในขั้นต่อไปได้

4.4 แนวคิดในการออกแบบ (Concept design) ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

กังหันลมแกนนอนที่มีอยู่ในปัจจุบันมีส่วนประกอบหลักคือใบพัด เพลา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเสา ซึ่งกังหันลมแกนนอนมีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยที่ใบพัดซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนเป็นส่วนที่ปะทะกับลม เมื่อแรงลมทำให้ใบพัดเคลื่อนที่แบบหมุนเปลี่ยนเป็นพลังงานกลเพื่อส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน เพลาแกนหมุนซึ่งรับแรงจากแกนหมุนใบพัดจะส่งผ่านระบบกำลังเพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

กังหันลมแกนนอนที่มีอยู่ในปัจจุบันถูกออกแบบมาเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมที่เกิดจากธรรมชาติที่มีความเร็วลมสูง แต่ในบางประเทศที่มีความเร็วลมจากธรรมชาติต่ำและมีลมพัดไม่ต่อเนื่องจึงไม่คุ้มค่าหากตัดสินใจนำมาใช้งาน กรณีที่นำกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมมาติดตั้งขวางทิศทางลมที่ถูกปล่อยออกจากระบบลมระบายเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งเพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ที่กระแสลมที่ระบายทิ้งไหลย้อนกลับไปยังพัดลมของระบบลมระบาย การติดตั้งในระยะใกล้ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศไม่เป็นไปตามมาตรฐานการระบายอากาศและพัดลมระบายทำงานหนักขึ้น ทำให้ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าของพัดลมระบายเพิ่มขึ้น กังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมจึงต้องการระยะห่างในการติดตั้งจากระบบกำเนิดลมระบายอย่างน้อย 2 เมตร ซึ่งไม่เหมาะที่จะติดตั้งในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด นอกจากนี้ด้วยลักษณะของกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเมื่อเทียบกับขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพบว่า ใบพัดจะมีสัดส่วนใหญ่กว่ามากเพื่อให้เกิดแรงบิดขับแกนเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุน ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จึงถูกจำกัดด้วยขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สามารถผลิตออกมาได้เทียบกับต้นทุนของกังหันลมแกนนอนที่มีอยู่ในปัจจุบัน พบว่าไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ทำให้การนำมาใช้งานสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจึงไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย

ในส่วนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลานั้นประกอบด้วยส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) โดยส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ ชุดขดลวดจำนวนหนึ่ง ที่ติดตั้งตามแนวรัศมีวงกลมของโครงของส่วนไม่เคลื่อนที่และเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแบบสตาร์ 3 เฟส โดยที่กังหันแกนนอนแบบไร้เพลามีลักษณะพิเศษคือใบพัดมีทำมุมบิด มุมเอียงและมีความยาวใบพัดช่วงระยะหนึ่งที่ทำให้เกิดช่องเปิดตรงกลางทำให้กระแสการไหลของของไหลสามารถไหลผ่านเพื่อระบายออกจากระบบได้ ของไหลที่ไหลผ่านชุดใบพัดทำให้ชุดเคลื่อนที่หมุนและแม่เหล็กติดอยู่วิ่งตัดกับขดลวดที่ติดตั้งกับโครงของส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ โดยมีชุดลูกล้อที่ยึดกับโครงของส่วนที่เคลื่อนที่

เป็นตัวควบคุมการหมุนให้ชุดเคลื่อนที่หมุนอยู่ในโครงของส่วนไม่เคลื่อนที่ เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ได้ โดยความมุ่งหมายในการประดิษฐ์คือเปลี่ยนพลังงานจากกระแสการไหลของของไหลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างของไหลที่สามารถนำกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้ได้ เช่น ลมจากธรรมชาติ ลมทิ้งจากระบบระบายอากาศที่มีพัดลมเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการระบายจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง หรือของเหลวที่ถูกระบายทิ้งผ่านระบบท่อโดยอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกลหรือจากแรงโน้มถ่วง เป็นต้น กรณีนำกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้ผลิตไฟฟ้าจากลมทิ้งจากระบบลมระบายที่มีความเร็วการไหลแบบคงที่และไหลเป็นเวลาต่อเนื่องนั้น ของไหลสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปได้โดยไม่มีการไหลย้อนกลับไปยังอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลของของไหล กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดได้ โดยประสิทธิภาพการระบายของไหลออกจากระบบยังคงเป็นไปตามมาตรฐานการระบายที่ออกแบบไว้ และต้นทุนพลังงานของอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลไม่แตกต่างจากระบบที่ไม่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

โดยข้อจำกัดในการออกแบบกังหันแกนนอนแบบไร้เพลานั้นคือการที่จะต้องพิจารณาเลือกวัสดุที่จะทำมาใช้ให้เหมาะสมและมีความทนทานในสภาวะการใช้งานจริง เพื่อที่จะทำให้ต้นทุนในการผลิตกระแสไฟฟ้ามีความคุ้มค่า ตลอดจนมีผลกระทบต่อระบบระบายอากาศที่นำกังหันลมไปติดตั้งน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดการยอมรับอย่างแพร่หลายจากผู้ใช้งาน

4.5 การสร้างต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

ภายหลังจากพิสูจน์แนวคิดเบื้องต้นและทำการออกแบบแบบ 3 มิติ ของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORK 2018 แล้ว จึงทำการสร้างตัวต้นแบบจริงสำหรับสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 4.8 และรายละเอียดส่วนประกอบของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแสดงดังตารางที่ 4.3

รูปที่ 4.8 ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.3 ส่วนประกอบของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

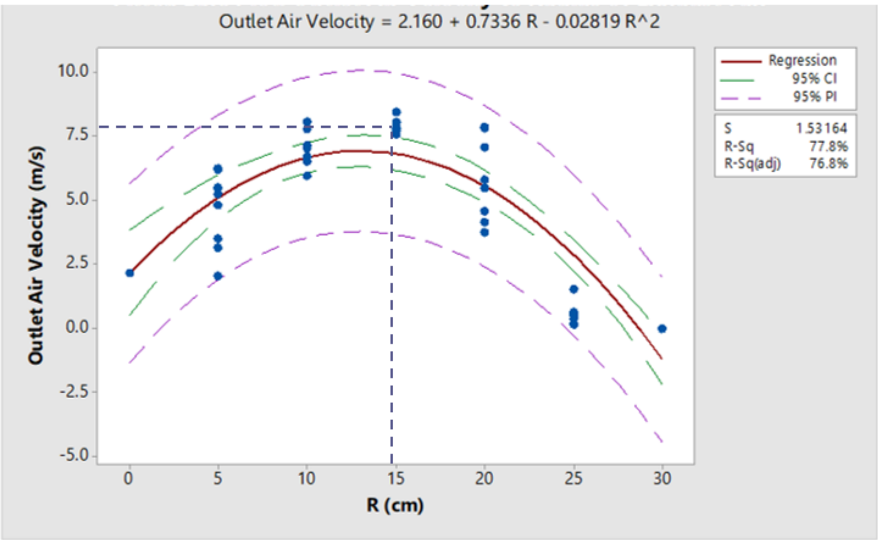
ส่วนประกอบหลัก	ส่วนประกอบย่อย	รายละเอียด
ชุดสเตเตอร์ (Stator)	โครงสเตเตอร์	แผ่นอะคริลิก ขนาด 60x70x1 เซนติเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 เซนติเมตร
	ขดลวดทองแดง	เส้นลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตรพันแบบแกนอากาศ ขนาด 5x6x1 เซนติเมตร
	ขายึดโครงสเตเตอร์	โครงอลูมิเนียม
ชุดโรเตอร์ (Rotor)	โครงโรเตอร์	วงแหวนเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร เสริมโครงด้วยวงแหวนอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร
	ใบพัด	แผ่นอะคริลิกขนาด 6x15x0.1 เซนติเมตร
	แม่เหล็ก	แม่เหล็กนีโอไดเมียม (NdFeB) ขนาด 1.25x5x0.3 เซนติเมตร
	ลูกล้อ	ลูกล้อยางแกนพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร มีลูกปืนประกบ

4.6 การทดสอบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการมีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์การทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาว่าสามารถหมุนและผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมได้จริงหรือไม่ และระบุปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันและระบบลมระบาย เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่ 2 คือ เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้ในอนาคต

4.6.1 การศึกษาลักษณะโปรไฟล์ความเร็วลมของลมที่ออกจากพัดลมระบาย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจลักษณะโปรไฟล์ความเร็วของลมที่ออกจากพัดลมระบาย โดยได้เลือกพัดลมอุตสาหกรรมยี่ห้อ SPE Industrial Exhaust Fan รุ่น FCD504 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงเรือนปศุสัตว์ มาทำการทดสอบกับกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการ โดยใช้อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Anemometer) รุ่น DT-619 ที่สามารถวัดช่วงวัดความเร็วลม 0.40-30 เมตรต่อวินาที มีความแม่นยำในการวัด ±3% ซึ่งมีความน่าเชื่อถือในการวัด วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามระยะห่างที่กำหนดตามแนวแกนและตามแนวรัศมีของใบพัด จุดละ 6 ค่า ผลการวัดพบว่าความเร็วลมในแต่ละตำแหน่งของพัดลมระบายมีความเร็วลมที่ต่างกัน ความเร็วลมระบายสูงสุดของพัดลมระบายรุ่นนี้อยู่ในตำแหน่งรัศมีที่ 10-15 เซนติเมตร ความเร็วลมอยู่ในช่วง 6-8 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดความเร็วลมและความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบาย

จากรูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมของลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ตำแหน่งรัศมีที่ต่างกันเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\text{Outlet Air Velocity} = 2.160 + 0.7336R - 0.02819R^2 \qquad (4.1)$$

โดยที่ R คือรัศมีของพัดลม หน่วย เซนติเมตร

สมการดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจพหุคูณ (Coefficient of Multiple Determination) หรือ R Square ซึ่งเป็นค่าที่แสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระทั้งหมดในสมการที่มีต่อตัวแปรตาม หรือตัวแปรอิสระทั้งหมดที่อยู่ในสมการสามารถอธิบายการผันแปรตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด โดยอธิบายว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามอยู่ร้อยละ R Square x 100 ส่วนที่เหลือจะเป็นอิทธิพลจากตัวแปรอื่นที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ ตัวแปรอิสระทั้งหมดสามารถทำนายตัวแปรตามได้ร้อยละ R Square x 100

ค่า R-Sq (adj) คือ ค่า R Square ที่ปรับแก้แล้ว จะพิจารณาใช้ค่านี้แทน R Square เมื่อข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์สมการถดถอยมีค่าน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง หรือในกรณีที่ค่า R Square มีค่าสูงมากกว่าค่า R-Sq (adj) มาก ควรใช้ R-Sq (adj) แทน และในกรณีที่เป็นงานวิจัยแบบ Pure science โมเดลที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรที่ส่งผลต่อกันได้ดี ควรที่จะมีค่า R-Sq (adj) มากกว่า 60% ซึ่งสมการความสัมพันธ์ความเร็วลมของลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ตำแหน่งรัศมีที่ต่างกัน จากผลการทดลองนี้มีค่า R-Sq (adj.) เท่ากับ 76.8% ซึ่งนี้มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ในการพยาการณ์ในการออกแบบได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สิ่งที่มีคุณสมบัติเป็นค่า R-Squared ที่ดี จะขึ้นอยู่กับบริบทของแต่ละสาขา เช่น สังคมศาสตร์ ค่า R-Squared ที่ค่อนข้างต่ำ เช่น 0.5 ก็อาจถือว่าความสัมพันธ์สูงเป็นที่ยอมรับ ในขณะที่สาขาอื่น ๆ มาตรฐานสำหรับการอ่านค่า R-Squared ที่ดีอาจสูงกว่ามาก เช่น 0.9 หรือสูงกว่า ในด้านการเงินค่า R-Squared ที่สูงกว่า 0.7 โดยทั่วไปจะถูกมองว่าแสดงความสัมพันธ์ในระดับสูง ในขณะที่การวัดที่ต่ำกว่า 0.4 จะแสดงความสัมพันธ์ที่ต่ำ อย่างไรก็ตามก็ไม่ถือว่าเป็นกฎตายตัว เพราะจะขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ที่เฉพาะเจาะจงเป็นกรณีไป (Fernando, 2021)

4.6.2 การศึกษาการไหลของลมระบายผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

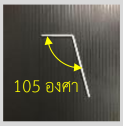
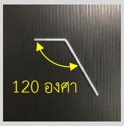
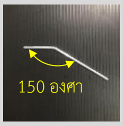
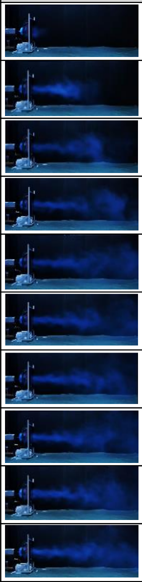
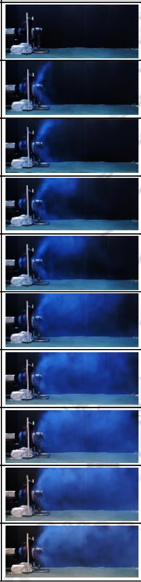
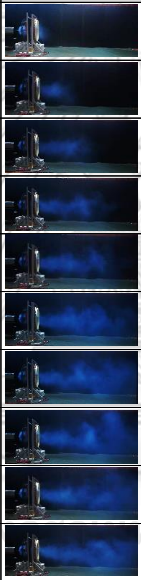
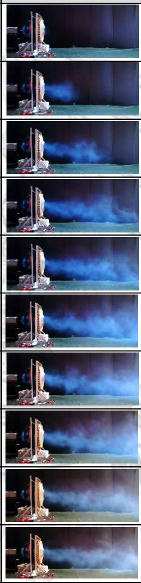
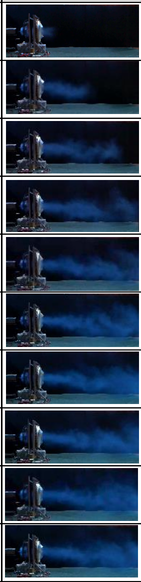
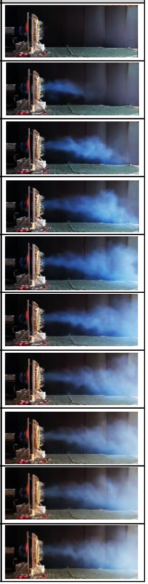
การไหลของลมระบายที่ไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเนื่องจากอากาศไม่มีสี เพื่อให้สามารถมองเห็นลักษณะของการไหลด้วยตาเปล่าจึงได้ทำการประยุกต์การทดสอบการมองเห็นการไหลของอากาศที่ Trinder & Jabbal (2013) และ Shamsuddin & Kamaruddin (2020) ทำการวิจัย โดยใช้เครื่องสร้างควันเพื่อให้สามารถมองเห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของลมระบายในเงื่อนไขการทดลองที่ต่างกัน โดยการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบ 3 กรณีคือ 1) การไหลของลมระบายที่ออกจากพัดลมระบายโดยไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ใดเข้าไป 2) การไหลของลมระบายที่ออกจากพัดลมระบายที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม และ 3) การไหลของลมระบายที่ออกจากพัดลมระบายที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ที่มีการปรับค่ามุมของแกนยึดใบพัดเป็น 105 120 135 150 และ 165 องศา ตามลำดับ โดยทำการติดตั้งเครื่องสร้างควันไว้ที่ด้านหลังพัดลมระบาย แล้วทำการบันทึกภาพการเคลื่อนไหวของลมระบายด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิตอล Panasonic Lumix เลนส์ 12-35 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งบนขาตั้งกล้องในตำแหน่งมุมมองด้านข้างของพัดลมระบายและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา แล้วนำมาตัดเฟรมของภาพที่วินาทีที่ 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 2.0 3.0 4.0 และ 5.0 ตามลำดับ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของการไหลของอากาศในช่วงเวลาต่าง ๆ

ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 พบว่าลมระบายที่ออกจากพัดลมระบายอากาศเมื่อติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีมุมของแกนใบพัด 105 120 135 150 และ 165 องศา ออกสู่ภายนอกได้ โดยที่การไหลของลมระบายมีลักษณะพุ่งเป็นลำตรงออกไปด้านหลังของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีลักษณะการไหลใกล้เคียงกับลมระบายที่ออกจากพัดลมระบายอากาศแบบไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ในขณะที่การไหลของลมระบายที่ไหลออกจากพัดลมระบายที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมมีลักษณะที่แตกต่างออกไป คือลมระบายไม่สามารถไหลผ่านใบพัดของกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมที่กำลังหมุนด้วยความเร็วสูงไปได้ โดยที่ลมระบายพยายามที่จะไหลออกตามช่องว่างตรงปลายใบพัดของกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม ดังรูปการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมที่แสดงในตารางที่

4.4 ในช่วงวินาทีที่ 0.4 ถึงวินาทีที่ 0.8 และเกิดการหมุนวนของอากาศ ฟุ้งกระจายกลับมาด้านหลังใบพัดกังหันแบบดั้งเดิมตลอดเวลา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการระบายลมจากพัดลมระบายอากาศสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกระหว่างกรณีที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกรณีที่ติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยพิจารณาจากเวลาที่ลมระบายใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ในการทดลองนี้ใช้ระยะทางจากพัดลมระบายอากาศไปยังจุดสุดขอบเฟรมของภาพด้านขวามือเป็นระยะอ้างอิง ซึ่งเป็นระยะประมาณ 2.5 เมตร เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของควันที่ออกจากพัดลมระบายอากาศที่แสดงให้เห็นมวลอากาศที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ ผลที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือเวลาที่ลมระบายใช้ในการเคลื่อนที่ของพัดลมระบายอากาศแบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ใช้เวลาประมาณ 1.0 วินาที กรณีที่พัดลมระบายอากาศมีการติดตั้งกังหันลมแบบดั้งเดิมใช้เวลาประมาณ 3.0 วินาที และกรณีที่พัดลมระบายอากาศมีการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีมุมแกนยึดใบพัดเท่ากับ 120 135 150 และ 160 องศาใช้เวลาประมาณ 0.8 วินาที ส่วนที่มุมแกนยึดใบพัดเท่ากับ 105 องศา ใช้เวลาประมาณ 2.0 วินาที จะเห็นได้ว่าอัตราการระบายลมระบายจากพัดลมระบายอากาศสู่ภายนอกเมื่อติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีมุมของแกนยึดใบพัดที่เหมาะสมจะสามารถระบายอากาศสู่ภายนอกได้เร็วกว่าพัดลมระบายอากาศแบบไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ หรือติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมเข้าไป เพราะกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำหน้าที่เสมือนพัดลมดูดอากาศที่ช่วยขับอากาศออกไปยังทางออก ทำให้มวลอากาศของลมระบายสามารถเคลื่อนที่ไปทางออกโดยไม่มีการหมุนวนกลับเข้ามาขวางทางลมระบายที่ระบายออก ส่งผลให้ประสิทธิภาพการระบายอากาศมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเนื่องจากแรงต้านอากาศที่พัดลมระบายอากาศต้องขับดันออกไปลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านพัดลมระบาย กรณีที่พัดลมระบายมีการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม และพัดลมระบายแบบติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีมุมแกนยึดใบพัดต่างกัน

เวลา	Industrial Exhaust Fan	Conventional Horizontal-axis Wind Turbine	Shaftless Horizontal-axis Wind Turbine (SHWT)				
			มุมของแกนยึดใบพัด (Blade Holder Angle, BHA)				
							
0.2 วินาที							
0.4 วินาที							
0.6 วินาที							
0.8 วินาที							
1.0 วินาที							
2.0 วินาที							
3.0 วินาที							
4.0 วินาที							
5.0 วินาที							
6.0 วินาที							

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6.3 การศึกษาตัวแปรต้นของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

การศึกษาในส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจถึงผลของตัวแปรต้นต่าง ๆ ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา และได้แนวทางที่ถูกต้องในการปรับปรุงและพัฒนาความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจากลมระบาย โดยที่ตัวแปรต้นที่พิจารณาในการศึกษานี้มีทั้งหมด 9 ตัวแปร คือ จำนวนชุดแม่เหล็ก จำนวนใบพัด มุมแกนยึดใบพัด ชนิดแม่เหล็ก ความหนาของแม่เหล็กชิ้นบน ความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบน จำนวนขดลวดทองแดง ทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดทองแดงและจำนวนเฟส ซึ่งผลการศึกษาของแต่ละตัวแปรมีดังนี้

4.6.3.1 จำนวนชุดแม่เหล็ก

การศึกษาผลกระทบของจำนวนชุดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ทำการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนจำนวนชุดแม่เหล็กที่ติดตั้งเข้ากับโครงโรเตอร์ที่ทำจากเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ที่ถูกดัดและเชื่อมเป็นวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร จำนวนชุดแม่เหล็กคือ 4 6 8 12 16 20 และ 40 ชุดตามลำดับ มีการกำหนดค่าตัวแปรต้นอื่นที่เกี่ยวข้องให้เป็นค่าคงที่คือ จำนวนใบพัด 18 ใบพัด ที่มุมแกนยึดใบพัดเท่ากับ 135 องศา จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ 36 ขด การเชื่อมต่อขดลวดแบบสตาร์ (Y) จำนวน 3 เฟสและทิศทางการเชื่อมต่อเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมเฉลี่ยที่ออกจากพัดลมระบายขณะที่มอเตอร์พัดลมทำงานเต็มกำลัง วัดได้ที่ 8.5 เมตรต่อวินาที

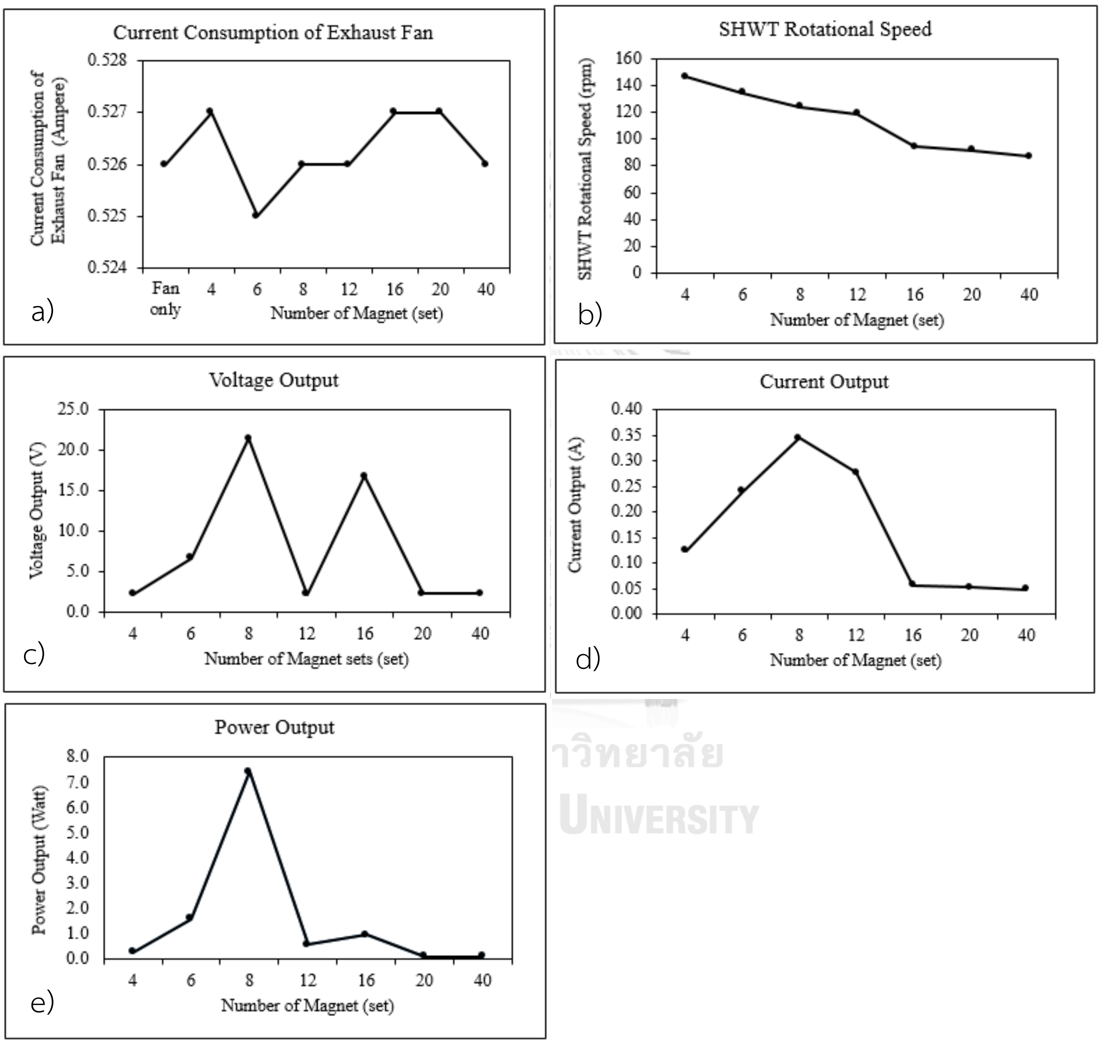
ตารางที่ 4.5 ผลกระทบของจำนวนแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**				
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา					
แม่เหล็ก 4 ชุด	0.527	147	2.17	0.124	0.3
แม่เหล็ก 6 ชุด	0.525	134	6.70	0.240	1.6
แม่เหล็ก 8 ชุด	0.526	124	21.50	0.345	7.4
แม่เหล็ก 12 ชุด	0.526	119	2.13	0.277	0.6
แม่เหล็ก 16 ชุด	0.527	94	16.84	0.057	1.0
แม่เหล็ก 20 ชุด	0.527	92	2.26	0.053	0.1
แม่เหล็ก 40 ชุด	0.526	87	2.24	0.048	0.1

ผลการทดสอบพบว่าจำนวนชุดแม่เหล็กที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้ขณะทำงานเต็มกำลัง ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่า 0.526 +/- 0.001 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อจำนวนขั้วแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนชุดแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น ความเร็วรอบสูงสุดคือ 147 รอบต่อนาทีที่จำนวนแม่เหล็ก 4 ชุด กรณีที่จำนวนชุดแม่เหล็ก 40 ชุด น้ำหนักรวมของโรเตอร์อยู่ที่ประมาณ 5 กิโลกรัม แต่กังหันลมแกน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นอนแบบไร้เพลายังสามารถหมุนได้ที่ความเร็วรอบ 87 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้า กระไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อจำนวนชุดแม่เหล็กต่างกัน มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ที่จำนวนชุดแม่เหล็ก 8 ชุด ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 21.5 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 0.345 แอมแปร์ และกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 7.4 วัตต์ ดังตารางที่ 4.5



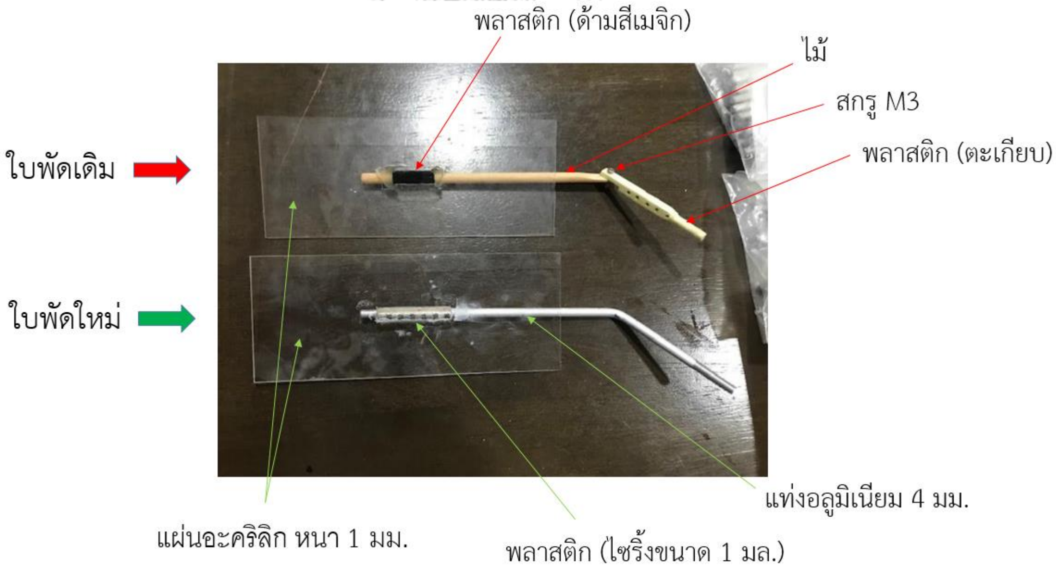
รูปที่ 4.10 ผลกระทบของจำนวนแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วรอบของกังหัน c) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้
d) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากรูปที่ 4.10 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชุดแม่เหล็กกับจำนวนขดลวดเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้ขนาดขดลวดและขนาดเส้นลวดก็เป็นอีกตัวแปรที่ต้องพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสม เพื่อปรับปรุงกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมได้มากขึ้นและมีความคุ้มค่าในการใช้งาน ตัวแปรต้นดังกล่าวจะถูกพิจารณาในการทดสอบหัวข้อถัดไป

4.6.3.2 จำนวนใบพัด

เนื่องจากในระหว่างการศึกษาผลกระทบของจำนวนชุดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาพบว่าใบพัดมีการสั่นมากในขณะที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนและเกิดความเสียหายขณะทดสอบเนื่องจากความเร็วรอบการหมุนที่สูง จึงต้องทำการเปลี่ยนใบพัดอยู่บ่อยครั้ง ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้ จึงทำการสร้างแกนใบพัดใหม่จากเดิมที่ใช้แท่งพลาสติกและแท่งไม้ยึดเข้ากันด้วยสกรู เพื่อให้สามารถปรับมุมได้มาเป็นแท่งอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และดัดมุมแกนยึดใบพัดตามค่ามุมที่จะทำการทดลอง ดังรูปที่ 4.11 ผลที่ได้คือแกนยึดใบพัดมีความแข็งแรงมากขึ้นและการสั่นของใบพัดในระหว่างกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น โดยใบพัดแบบใหม่ได้ใช้ตั้งแต่การทดลองนี้เป็นต้นไป



รูปที่ 4.11 การปรับปรุงใบพัดต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาผลกระทบของจำนวนใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำการทดสอบโดยติดตั้งใบพัดที่มุมแกนยึดใบพัดเท่ากับ 135 องศา โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนใบพัดเป็น 3 ระดับ คือ 3 ใบพัด 9 ใบพัดและ 18 ใบพัดตามลำดับ ใบพัดยึดเข้า

กับโครงเสริมความแข็งแรงของโรเตอร์ที่ทำจากอะคริลิก มีลักษณะเป็นวงแหวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 49 เซนติเมตร ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8 ชุด จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ 36 ขด เชื่อมต่อแบบต่อแบบสตาร์ (Y) 3 เฟส และทิศทางการทวนเข็มนาฬิกา กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบพบว่าที่จำนวน 3 ใบพัด กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่สามารถหมุนได้ จึงทำการทดสอบต่อเฉพาะกลุ่ม 9 ใบพัดและ 18 ใบพัด ผลการทดสอบพบว่าจำนวนใบพัดที่ติดตั้งมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลังเล็กน้อย แต่ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.526 +/- 0.01 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพิ่มแบบเชิงเส้นเมื่อจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่กวาดลมของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพิ่มขึ้นตามจำนวนใบพัดที่เพิ่มขึ้น ความเร็วการหมุนสูงสุดคือ 124 รอบต่อนาทีที่จำนวน 18 ใบพัด ส่วนที่จำนวน 9 ใบพัด กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลายังสามารถหมุนได้ที่ความเร็ว 45 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้า กระไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนใบพัดเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงเท่ากับ 10.9 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 0.113 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.236 วัตต์ ที่จำนวน 18 ใบพัด ดังตารางที่ 4.6

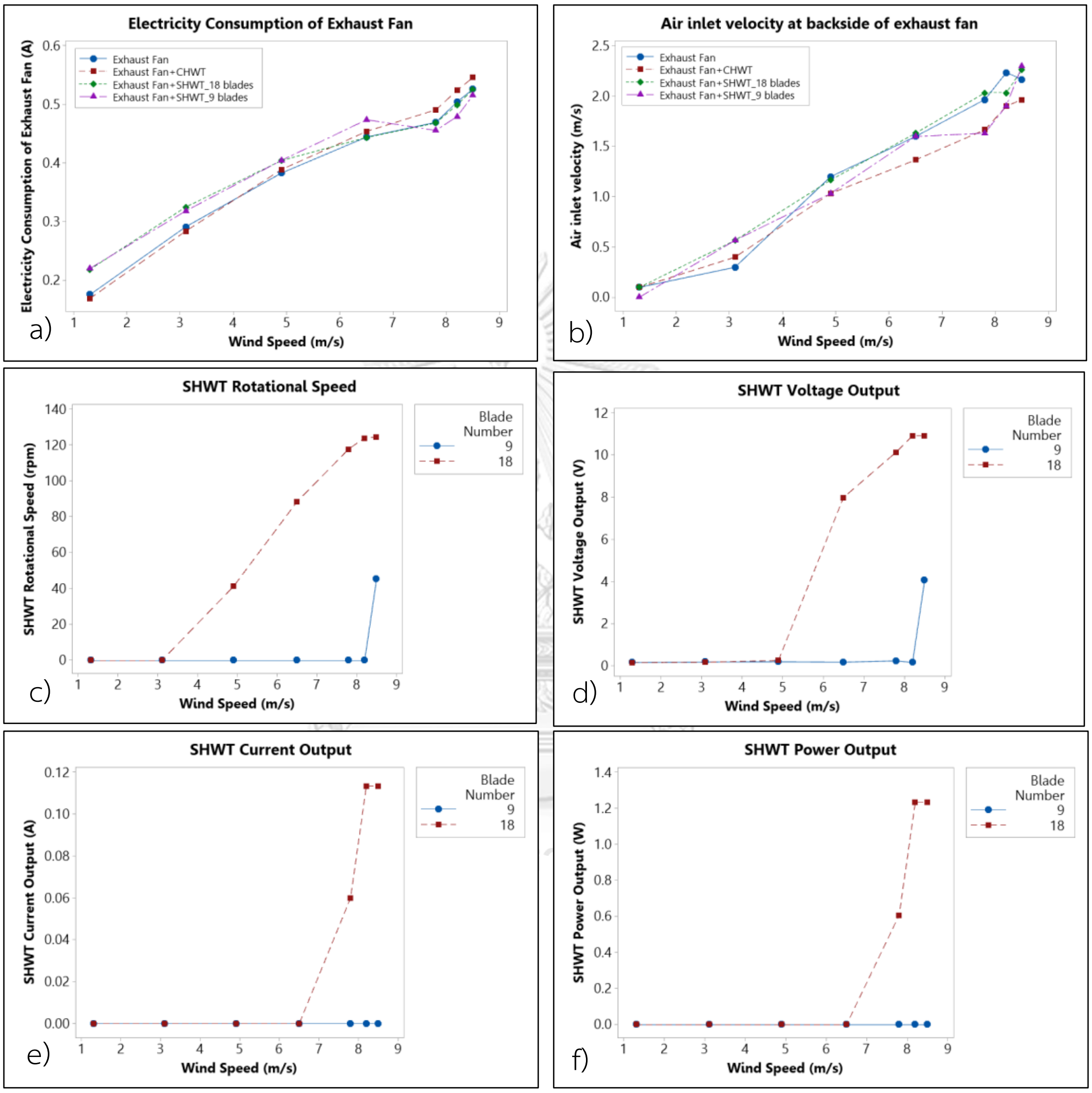
ตารางที่ 4.6 ผลกระทบของจำนวนใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)**	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิต (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526		-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
9 ใบพัด	0.516	2.3	45	4.090	0	0
18 ใบพัด	0.526	2.3	124	10.903	0.113	1.236

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.12 พบว่าจำนวนใบพัดที่เพิ่มขึ้นทำให้กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนได้เร็วขึ้นและผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ประมาณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.9% โดยที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีจำนวน 18 ใบพัด มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าจำนวน 9 ใบพัด โดยเริ่มหมุนได้ที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที เริ่มจ่ายแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เริ่มผลิตกระแสและมีกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วลม 6.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.12 ผลกระทบของจำนวนใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

4.6.3.3 มุมแกนยึดใบพัด

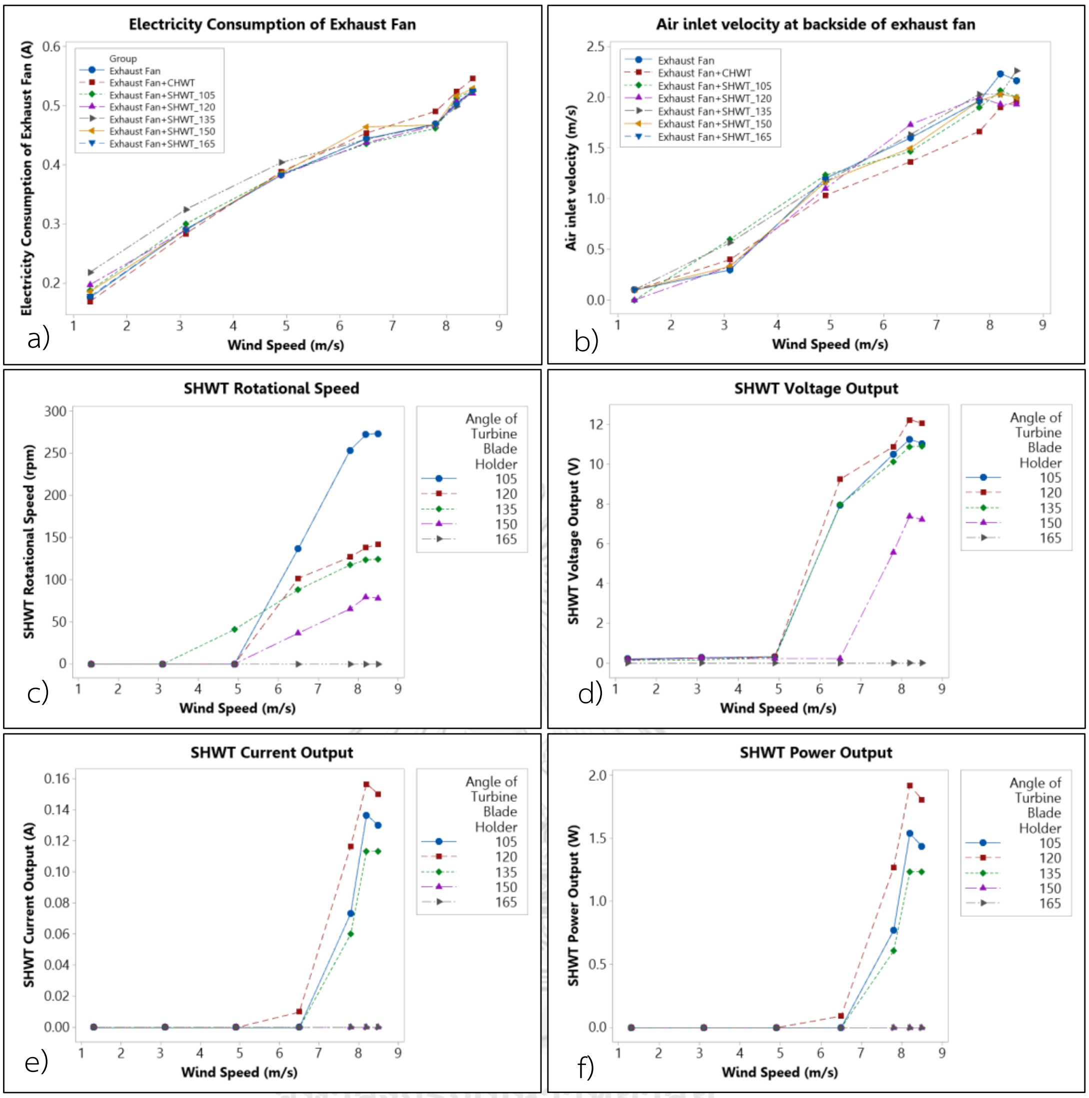
การศึกษาผลกระทบของมุมแกนยึดใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนมุมแกนยึดใบพัดให้เป็น 105 120 135 150 และ 165 องศาตามลำดับ ใบพัดยึดเข้ากับโครงของโรเตอร์ที่ทำจากอะคริลิก มีลักษณะเป็นวงแหวน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 49 เซนติเมตร ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8 ชุด จำนวนใบพัด 18 ใบ จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ 36 ขด เชื่อมต่อแบบสตาร์ (Y) 3 เฟสและทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบพบว่ามุมแกนยึดใบพัดไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลัง ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 +/- 0.01 แอมแปร์ แต่กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลังแบบติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมมีค่าสูงกว่าพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ประมาณ 3.8% ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อมุมแกนยึดใบพัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่กวาดลมของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาลดลงตามมุมแกนยึดใบพัดที่เพิ่มขึ้น กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนได้เมื่อมุมแกนยึดใบพัดตั้งแต่ 105-150 องศา ซึ่งความเร็วรอบการหมุนสูงสุดคือ 270 รอบต่อนาทีที่มุมแกนยึดใบพัด 105 องศา และต่ำสุดที่ 78 รอบต่อนาทีที่มุมแกนยึดใบพัด 150 องศา แต่ที่มุมแกนยึดใบพัด 165 องศากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่สามารถหมุนได้ ความสัมพันธ์ระหว่างมุมแกนยึดใบพัดและตัวแปรตามคือ ค่าแรงดันไฟฟ้า กระไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ได้เท่ากับ 12.057 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดที่ได้เท่ากับ 0.150 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.809 วัตต์ ที่มุมแกนยึดใบพัด 120 องศา ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลกระทบของมุมแกนยึดใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)**	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526	2.2	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม	0.546	1.9	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
แกนใบพัด 105 องศา	0.526	2.0	273	11.050	0.130	1.437
แกนใบพัด 120 องศา	0.521	2.0	142	12.057	0.150	1.809
แกนใบพัด 135 องศา	0.526	2.3	124	10.903	0.113	1.236
แกนใบพัด 150 องศา	0.530	2.3	78	7.233	0	0
แกนใบพัด 165 องศา	0.526	2.2	0	0	0	0

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.13 พบว่ามุมแกนยึดใบพัดของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนยึดใบพัด 120 องศา มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศรุ่นที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มหมุน จ่ายแรงดัน ผลิตกระแสไฟฟ้าและมีกำลังไฟฟ้าออกมาที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของมุมแกนยึดใบพัดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6.3.4 ชนิดแม่เหล็ก

การศึกษาผลกระทบของชนิดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำการทดสอบ โดยติดตั้งแม่เหล็กนีโอไดเมียม (Neodymium Magnet) ซึ่งเป็นแม่เหล็กที่มีจำหน่ายทั่วไปและมีค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแม่เหล็กถาวรชนิดอื่น โดยทำการเลือกใช้แม่เหล็กขนาด 12.5x50x3 มิลลิเมตร โดยการปรับเปลี่ยนค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กต่างกัน 2 ระดับ คือ เกรด N52 มีค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก 14,400 Gauss ซึ่งเป็นชนิดที่มีค่าการ

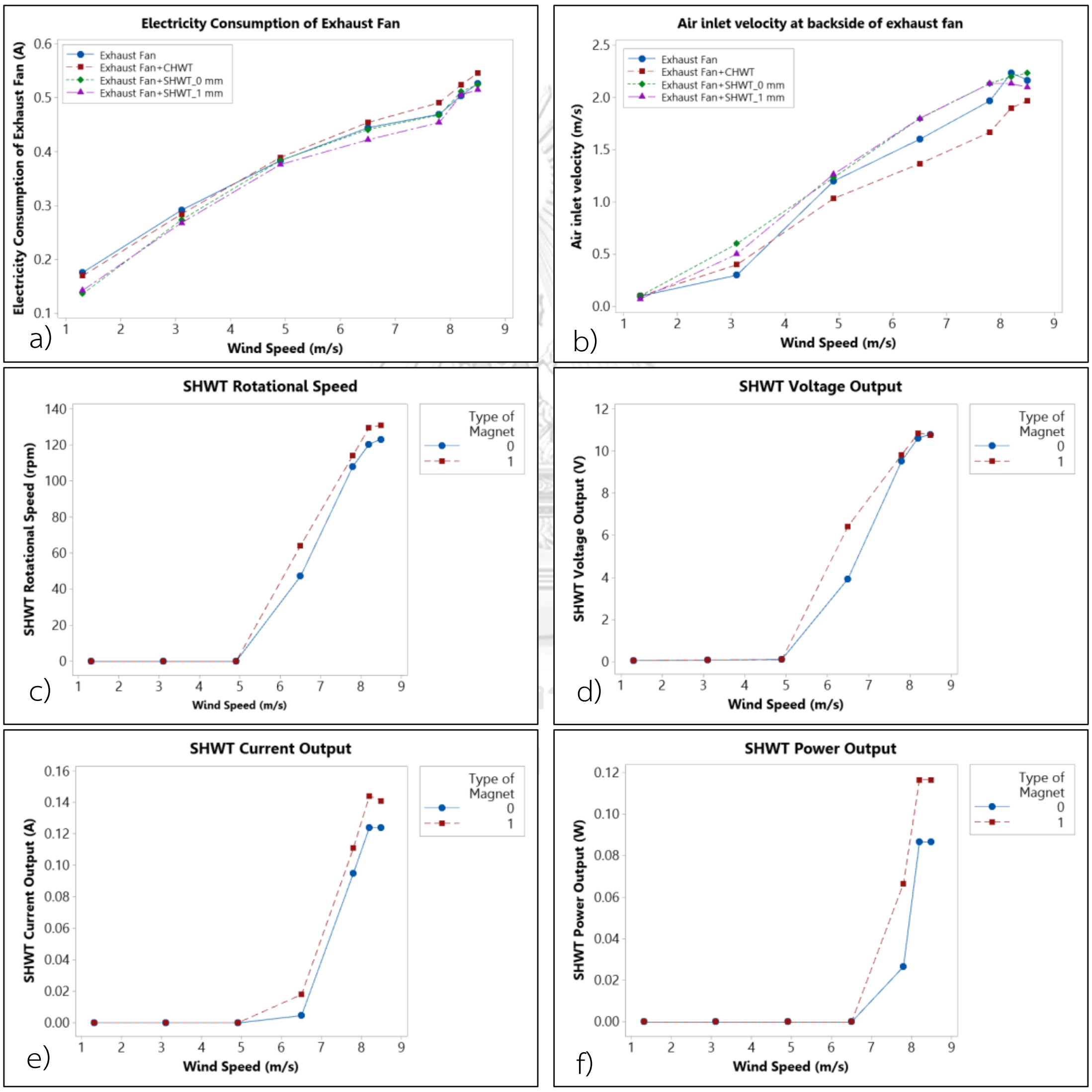
เหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงที่สุดของแม่เหล็กนีโอไดเมียมที่มีอยู่ในปัจจุบันและเกรด N45 มีค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก 13,500 Gauss ซึ่งเป็นชนิดที่มีค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงรองลงมาจากเกรด N52 แต่ราคาถูกกว่า โดยที่แม่เหล็กจะถูกติดกับตัวยึดแม่เหล็กที่ทำจากเหล็กมีลักษณะเป็นรูปตัว C และยึดติดเข้ากับโครงโรเตอร์ด้วยกาว ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8 ชุด จำนวนใบพัด 18 ใบ จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ 36 ขด เชื่อมต่อแบบสตาร์ (Y) 3 เฟสและทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร และความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที

ผลการทดสอบพบว่าชนิดของแม่เหล็กมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลังเล็กน้อย ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 +/- 0.01 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นเมื่อใช้แม่เหล็กที่มีค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กสูงกว่า เนื่องจากแรงผลักของแม่เหล็กระหว่างการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพิ่มขึ้นตามค่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กที่สูงขึ้น ความเร็วรอบของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อใช้แม่เหล็กเกรด N45 คือ 123 รอบต่อนาที ความเร็วรอบเมื่อใช้แม่เหล็กเกรด N52 ที่ 131 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้า กระไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อเปลี่ยนชนิดแม่เหล็กมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ได้เท่ากับ 10.763 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดที่ได้เท่ากับ 0.117 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.256 วัตต์ เมื่อใช้แม่เหล็กเกรด N52 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลกระทบของชนิดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)**	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526	2.2	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
แม่เหล็กเกรด N45	0.524	2.2	123	10.480	0.087	0.908
แม่เหล็กเกรด N52	0.515	2.1	131	10.763	0.117	1.256

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.14 พบว่าชนิดของแม่เหล็กมีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ใช้แม่เหล็กเกรด N52 มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศรุ่นที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเริ่มหมุนและจ่ายแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ผลิตกระแสไฟฟ้าและมีกำลังไฟฟ้าออกมาที่ความเร็วลม 6.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป



รูปที่ 4.14 ผลกระทบของชนิดแม่เหล็กต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

4.6.3.5 ความหนาของแม่เหล็กชิ้นบน

การศึกษาผลกระทบของความหนาของแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนแม่เหล็กชิ้นบนให้เป็นแบบไม่มีแม่เหล็ก และมีแม่เหล็กหนา 1 2 และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยแม่เหล็กถูกติดกับตัวยึดแม่เหล็กที่ทำจากแผ่นเหล็กพับให้มีลักษณะเป็นตัว C และยึดติดเข้ากับโครงโรเตอร์ ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8 ชุด จำนวนใบพัด 18 ใบ จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ 36 ขด เชื่อมต่อแบบต่อแบบสตาร์ (Y) 3 เฟสและทิศทางการเชื่อมต่อเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที

ผลการทดสอบพบว่าความหนาของแม่เหล็กมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลังเล็กน้อย ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 +/- 0.01 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาลดลงแบบเชิงเส้นเมื่อความหนาของแม่เหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นตามความหนาของแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น กรณีที่ไม่มีแม่เหล็กชิ้นบนอยู่เลย ความเร็วรอบสูงสุดคือ 161 รอบต่อนาที และเมื่อแม่เหล็กหนา 3 มิลลิเมตร กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนที่ความเร็วรอบ 111 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น แต่กระไฟฟ้าที่ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อความหนาแม่เหล็กเปลี่ยนเป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงเท่ากับ 10.937 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 0.137 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.495 วัตต์ ที่ความหนาแม่เหล็ก 3 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4.9

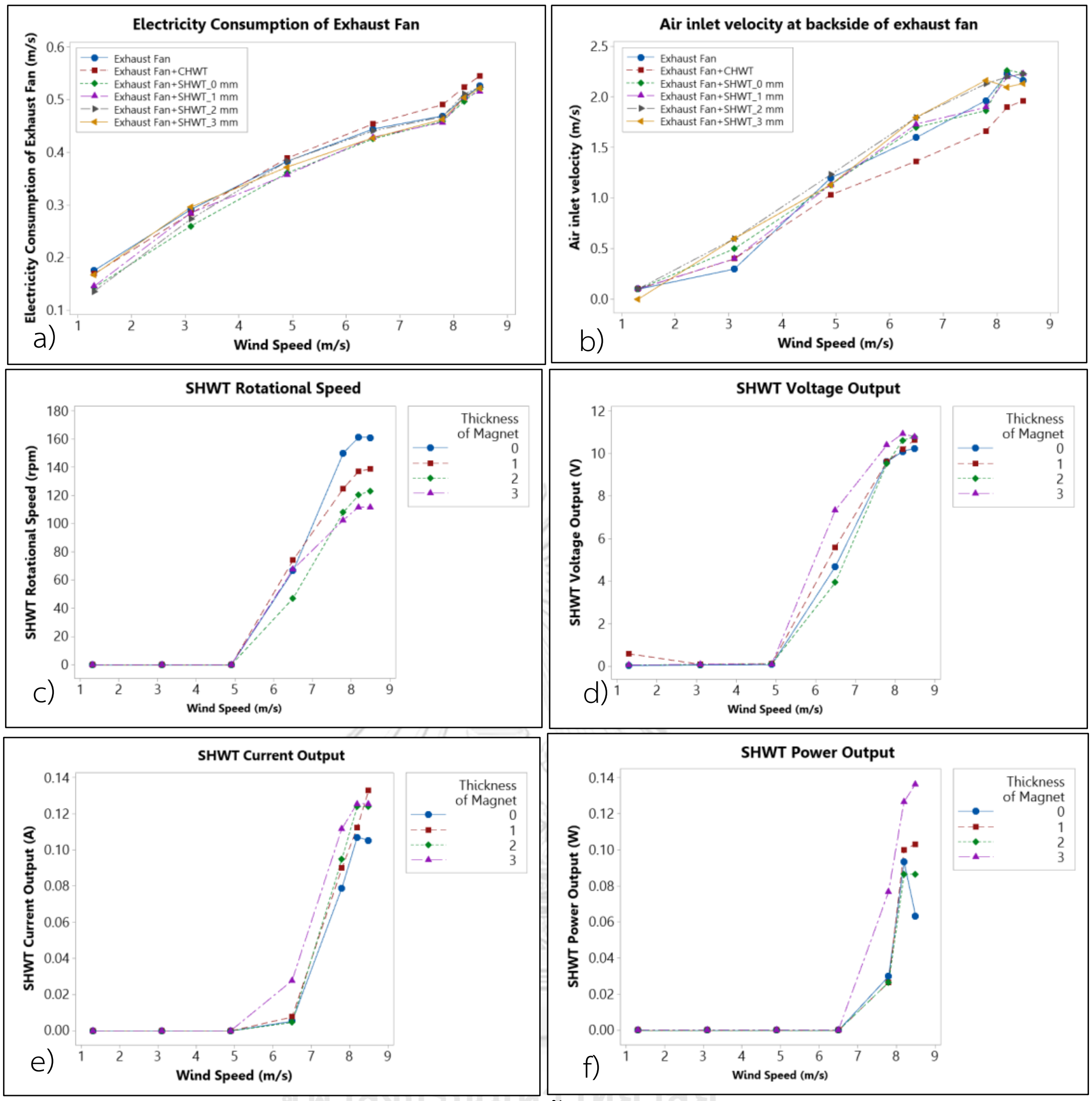
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.9 ผลกระทบของความหนาแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)**	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526	2.2	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
ไม่มีแม่เหล็ก	0.520	2.2	161	10.200	0.063	0.646
แม่เหล็กหนา 1 มม.	0.516	2.2	139	10.647	0.103	1.100
แม่เหล็กหนา 2 มม.	0.524	2.2	123	10.790	0.087	0.935
แม่เหล็กหนา 3 มม.	0.522	2.1	111	10.937	0.137	1.495

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.15 พบว่าความหนาของแม่เหล็กชิ้นบนไม่มีผลต่อต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศ แต่มีผลกับการทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีแม่เหล็กชิ้นบนมีความหนา 3 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศรุ่นที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเริ่มหมุนและจ่ายแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ผลิตกระแสไฟฟ้าและมีกำลังไฟฟ้าออกมาที่ความเร็วลม 6.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.15 ผลกระทบของความหนาแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศ

และกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6.3.6 ความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบน

การศึกษาผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบน 3 ระดับ คือแบบไม่มีแผ่นเหล็ก แบบมีแผ่นเหล็กหนา 1 และ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ แผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนถูกติดกับตัวยึดแม่เหล็กที่ทำจากเหล็กมีลักษณะเป็นตัว C และยึดติดเข้ากับโครงโรเตอร์ ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8

ชุด จำนวนใบพัด 18 ใบ จำนวนขดลวดที่สเตเตอร์ 36 ขด เชื่อมต่อแบบต่อแบบสตาร์ (Y) 3 เฟสและทิศทางการเชื่อมต่อเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกา กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที ผลการทดสอบพบว่าแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลังเล็กน้อย ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกับกรณีที่พัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 +/- 0.01 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่มีความแตกต่างเมื่อความหนาของแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก ที่แผ่นเหล็กหนา 2 มิลลิเมตรกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนที่ความเร็วรอบ 109 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับการเพิ่มขึ้นของความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบน ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 10.937 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 0.137 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.495 วัตต์ ที่ความหนาแม่เหล็ก 3 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4.10

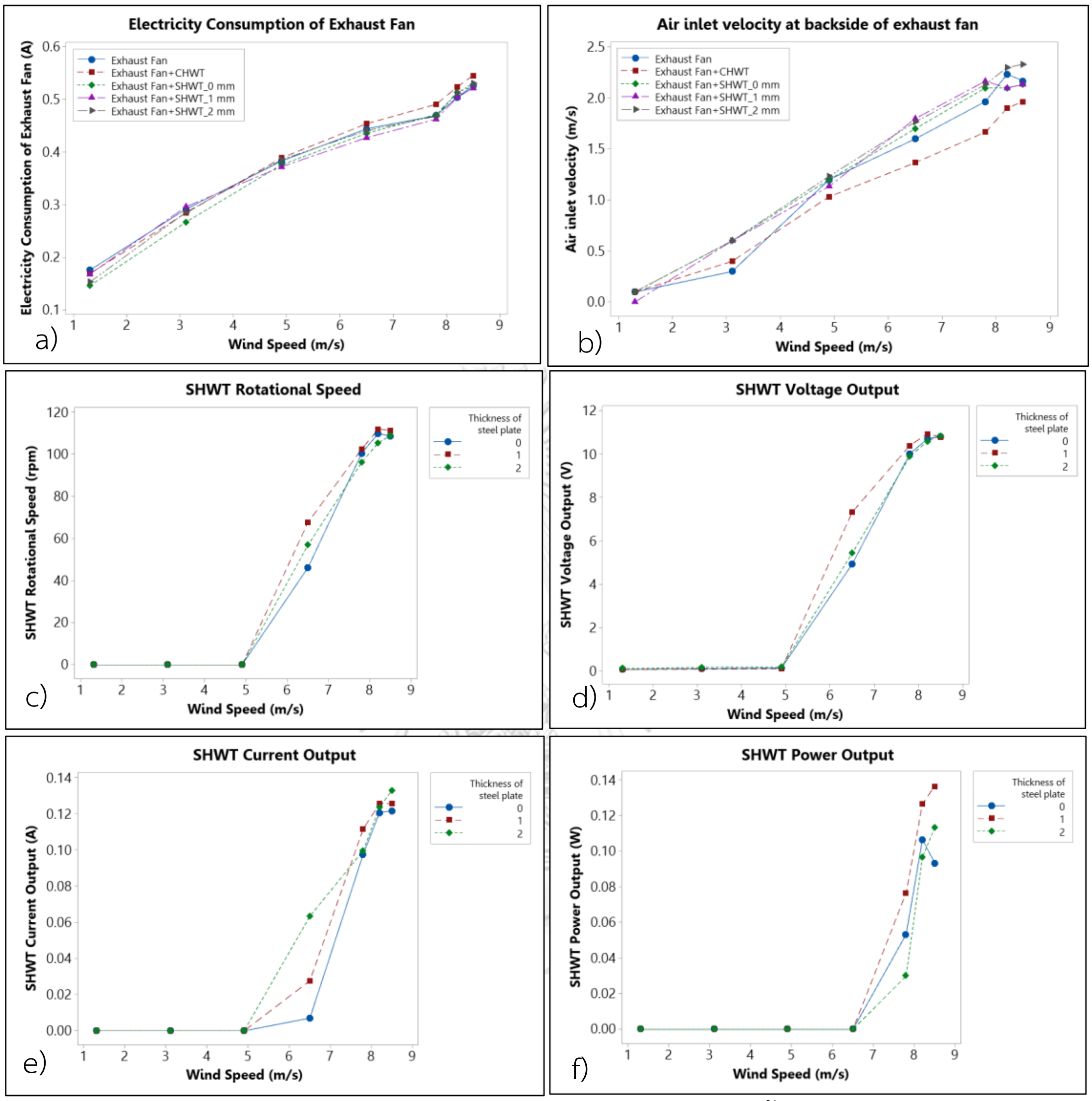
ตารางที่ 4.10 ผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)**	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526	2.2	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
ไม่มีแผ่นเหล็กรอง	0.523	2.1	109	10.583	0.122	1.291
แผ่นเหล็กหนา 1 มม.	0.522	2.1	111	10.780	0.126	1.358
แผ่นเหล็กหนา 2 มม.	0.531	2.3	109	10.847	0.133	1.442

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.16 พบว่าความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนมีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่แผ่นเหล็กมีความหนา 2 มิลลิเมตร มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศรุ่นที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มหมุนและจ่ายแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ผลิตกระแสไฟฟ้าและมีกำลังไฟฟ้าออกมาที่ความเร็วลม 6.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของความหนาของแผ่นเหล็กสำหรับรองแม่เหล็กชิ้นบนต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

4.6.3.7 จำนวนขดลวดทองแดง

การศึกษาผลกระทบของจำนวนขดลวดทองแดงต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำการทดสอบโดยการปรับเปลี่ยนจำนวนขดลวดทองแดง 3 ระดับ คือ 9 ขด 18 ขด และ 36 ขดตามลำดับ ขดลวดทองแดงถูกยึดติดกับโครงสเตเตอร์ เชื่อมต่อแบบต่อแบบ Y 3 เฟสและทิศทางการเชื่อมต่อเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8 ชุด จำนวนใบพัด 18 ใบ กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที

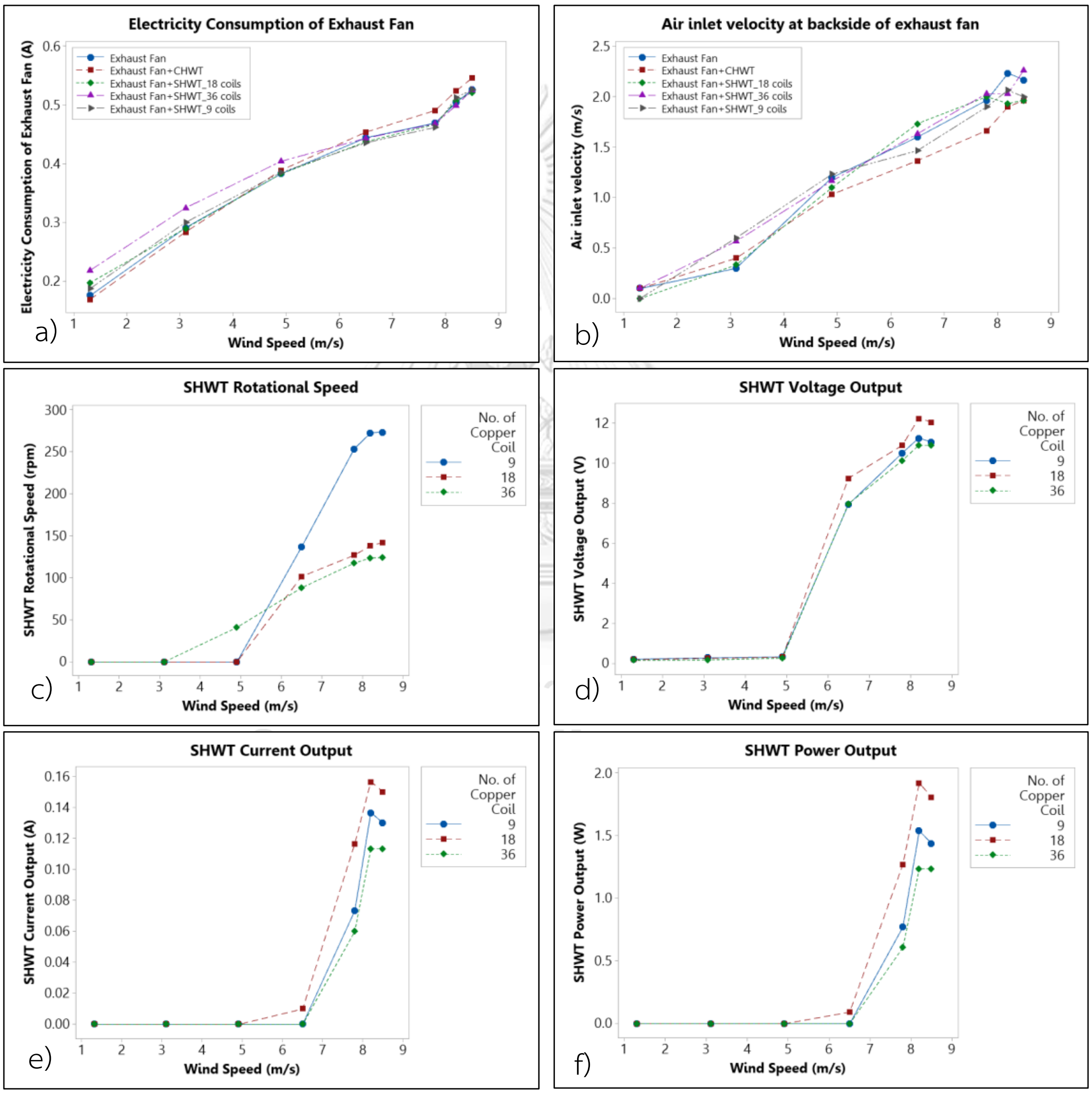
ผลการทดสอบพบว่าจำนวนขดลวดทองแดงไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลัง ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 +/- 0.01 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนขดลวดทองแดงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทองแดงกับแม่เหล็กมีพื้นที่มากขึ้น ที่จำนวนขดลวดทองแดง 9 ขด กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนที่ความเร็วรอบสูงสุดที่ 273 รอบต่อนาที จำนวนขดลวดทองแดง 18 ขด กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนที่ความเร็วรอบ 142 รอบต่อนาที และจำนวนขดลวดทองแดง 36 ขด กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนที่ความเร็วรอบ 78 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้า กระไฟฟ้าที่ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นเมื่อเมื่อจำนวนขดลวดทองแดงเปลี่ยน ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงเท่ากับ 12.057 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 0.150 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.809 วัตต์ ที่จำนวนขดลวดทองแดง 18 ขด ดังตารางที่ 4.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.11 ผลกระทบของจำนวนขดลวดต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรตาม**					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	**ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)**	**ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)**	**แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)**	**กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)**	**กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)**
พัดลมระบายอากาศ	0.526	2.2	-	-	-	-
พัดลมระบายอากาศแบบติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
ขดลวด 9 ขด	0.526	2.0	273	11.050	0.130	1.437
ขดลวด 18 ขด	0.521	2.0	142	12.057	0.150	1.809
ขดลวด 36 ขด	0.530	2.1	78	7.233	0	0

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.17 พบว่าจำนวนขดลวดทองแดงมีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่จำนวนขดลวดทองแดง 18 ขด มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศรุ่นที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มหมุนและจ่ายแรงดัน ผลิตกระแสไฟฟ้าและมีกำลังไฟฟ้าออกมาที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของจำนวนของลวดทองแดงต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

4.6.3.8 ทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดทองแดงและจำนวนเฟส

การศึกษาผลกระทบของทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดทองแดงและจำนวนเฟสต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา ทำการทดสอบโดยทำการปรับเปลี่ยนเชื่อมต่อขดลวดให้เป็นไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ ขดลวดทองแดงถูกยึดติดกับโครงสเตเตอร์ เชื่อมต่อแบบต่อแบบสตาร์ (Y) 3 เฟส (จำนวน 12 ขดต่อเฟส) และ 9 เฟส (จำนวน 4 ขดต่อเฟส) ที่มีการเชื่อมต่อขดลวดแบบตามเข็มนาฬิกามและทวนเข็มนาฬิกาตามลำดับ ส่วนตัวแปรคงที่ก็คือจำนวนชุดแม่เหล็กที่ 8 ชุด จำนวนใบพัด 18 ใบ กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาถูกติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่ระยะห่าง 5 เซนติเมตร ความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายที่ทำงานเต็มกำลังคือ 8.5 เมตรต่อวินาที

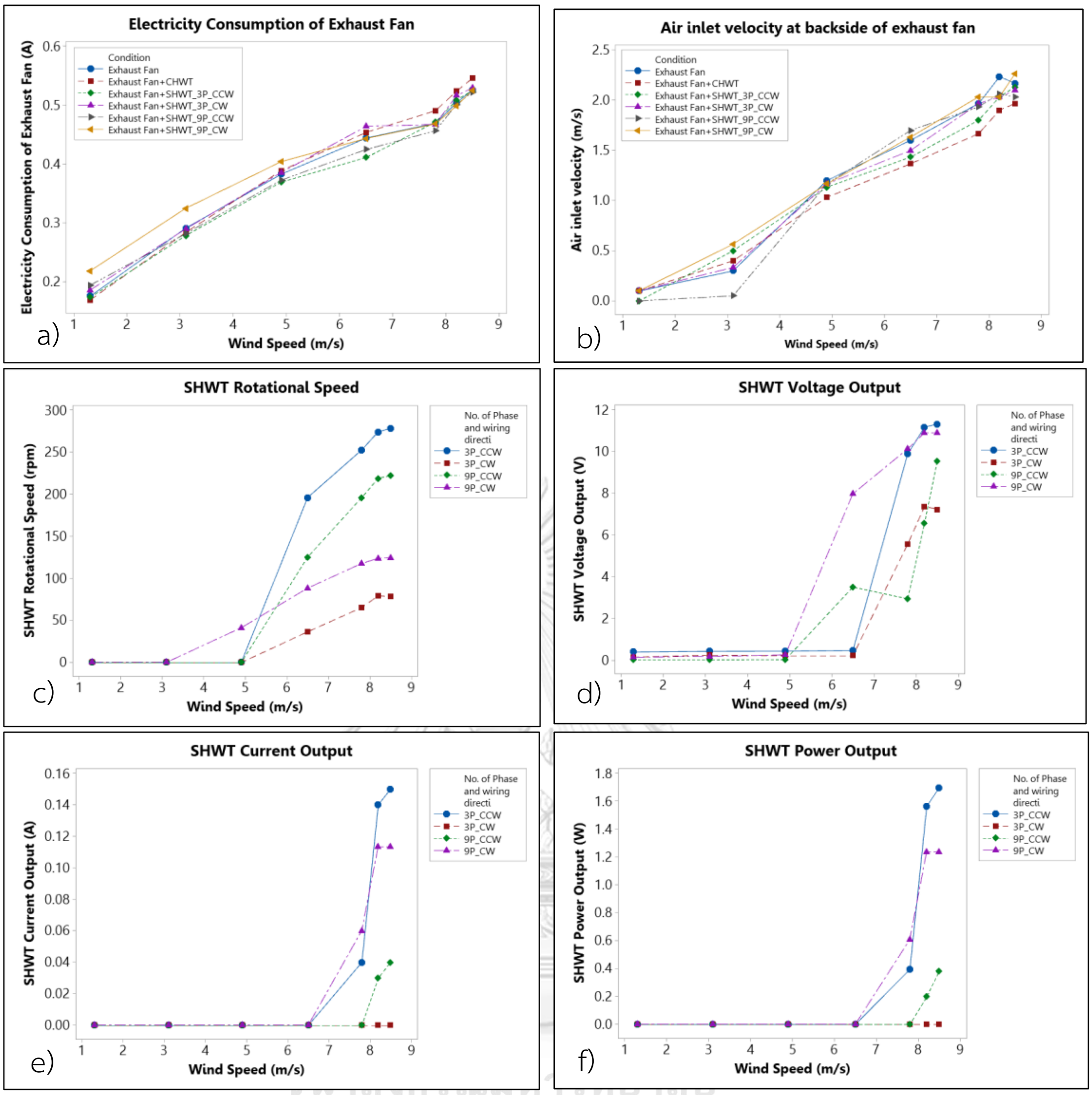
ผลการทดสอบพบว่าทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดและจำนวนเฟสไม่มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์พัดลมระบายใช้งานขณะทำงานเต็มกำลัง ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันกับพัดลมระบายอากาศที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ใด ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.52 +/- 0.01 แอมแปร์ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาขึ้นอยู่กับจำนวนขดลวดทองแดงต่อเฟสและทิศทางการเชื่อมต่อขดลวด เมื่อการเชื่อมต่อขดลวดเป็นแบบตามเข็มนาฬิกา ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมจะมากกว่าแบบตามเข็มนาฬิกา ทั้งแบบ 3 เฟสและ 9 เฟส เนื่องจากการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทองแดงกับแม่เหล็กระหว่างการหมุนน้อยกว่า ที่จำนวนขดลวดทองแดง 9 ขด แต่เมื่อทำการเปรียบทียบจำนวนเฟสระหว่าง 3 เฟสและ 9 เฟส ที่มีการเชื่อมต่อแบบเดียวกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลากับจำนวนเฟสที่เพิ่มขึ้นกลับเป็นไปในทิศทางตรงข้ามกัน คือ ความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อเชื่อมต่อแบบตามเข็มนาฬิกาของขดลวดแบบ 3 เฟสจะน้อยกว่า 9 เฟส ประมาณร้อยละ 59 แต่ในขณะที่การเชื่อมต่อแบบทวนเข็มนาฬิกาความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อเชื่อมขดลวดแบบ 3 เฟสจะมากกว่ากว่า 9 เฟส ประมาณร้อยละ 25 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาหมุนที่ความเร็วรอบสูงสุดที่ 278 รอบต่อนาทีที่การเชื่อมต่อขดลวดเป็นแบบ 3 เฟสและตามเข็มนาฬิกา แนวโน้มของแรงดันไฟฟ้ากระไฟฟ้าที่ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา มีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับความเร็วรอบในการหมุนของกังหันแกนนอนแบบไร้เพลา ค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงเท่ากับ 11.313 โวลต์ กระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 0.150 แอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.697 วัตต์ที่การเชื่อมต่อขดลวดเป็นแบบ 3 เฟสและตามเข็มนาฬิกา ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลกระทบของทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดทองแดงและจำนวนเฟสต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เมื่อพัดลมระบายอากาศทำงานเต็มกำลังที่ความเร็วลม 8.5 เมตรต่อวินาที

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม					
	กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ (แอมแปร์)	ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)	ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)
พัดลมระบายอากาศ	0.526	2.2	-	-	-	-
กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา						
3 เฟสแบบตามเข็ม	0.530	2.1	78	7.233	0	0
3 เฟสแบบทวนเข็ม	0.525	2.1	278	11.313	0.150	1.697
9 เฟสแบบตามเข็ม	0.526	2.3	124	10.903	0.113	1.236
9 เฟสแบบทวนเข็ม	0.523	2.0	222	9.543	0.040	0.382

ผลการทดสอบโดยการปรับความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายตั้งแต่ 1-8.5 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 4.18 พบว่าทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดทองแดงและจำนวนเฟสมีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา โดยที่ทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดแบบ 3 เฟสแบบทวนเข็มนาฬิกา มีความเหมาะสมในการใช้งานสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพัดลมระบายอากาศรุ่นที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป เริ่มจ่ายแรงดันที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ผลิตกระแสไฟฟ้าและมีกำลังไฟฟ้าออกมาที่ความเร็วลม 6.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของทิศทางการเชื่อมต่อขดลวดและจำนวนเฟสต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ความเร็วลมระบายต่างกัน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

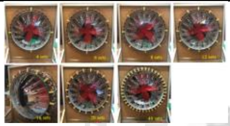
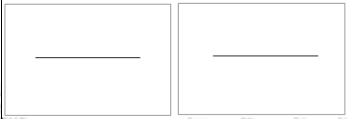
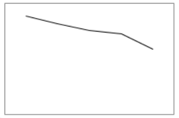
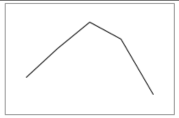
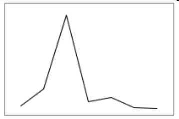
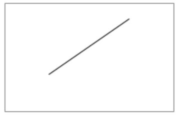
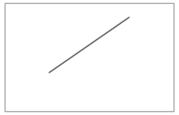
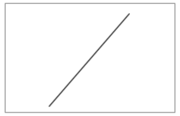
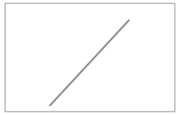
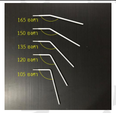
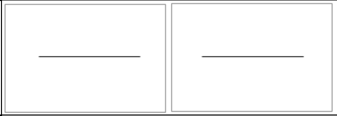
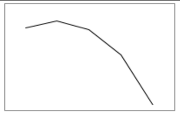
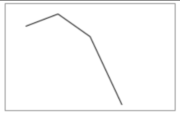
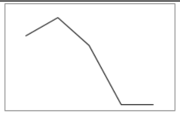
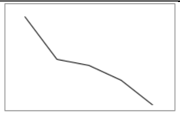
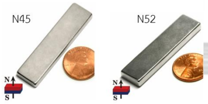
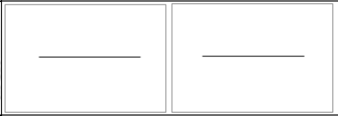
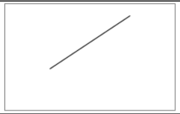
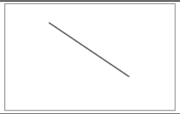
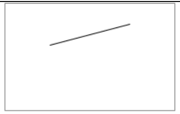
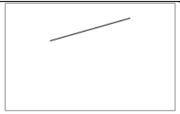
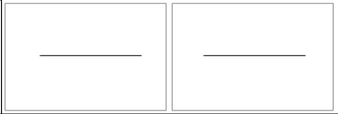
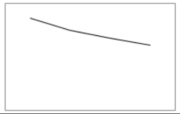
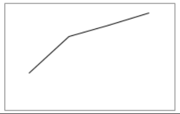
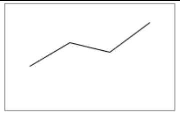
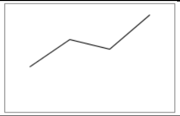
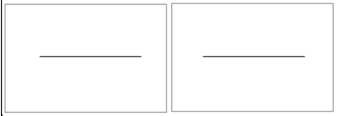
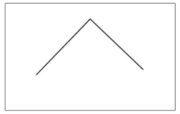
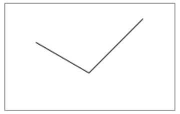
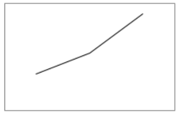
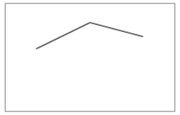
a) กระแสไฟฟ้าที่พัดลมระบายอากาศใช้ b) ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม c) ความเร็วรอบของกังหัน d) แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ e) กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ f) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมได้ และลมระบายสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาออกสู่ภายนอกได้ โดยไม่ทำให้พัดลมระบายอากาศใช้กระแสไฟฟ้าในการทำงานเพิ่มขึ้นเมื่อทำการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเข้าไป

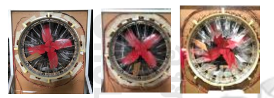
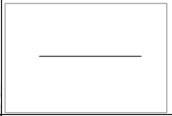
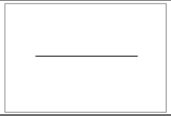
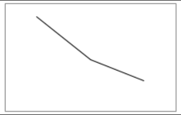
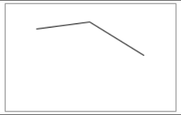
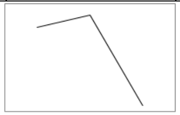
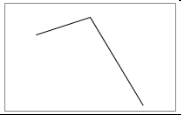
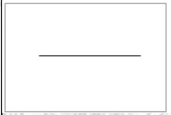
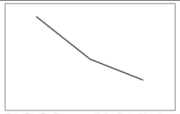
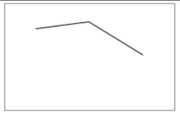
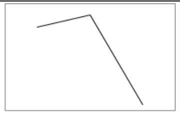
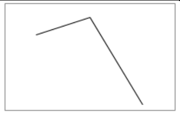
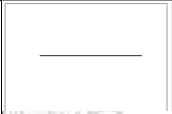
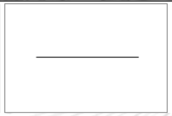
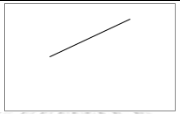
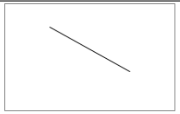
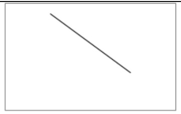
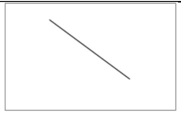
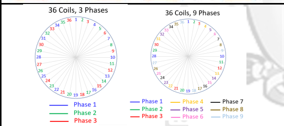
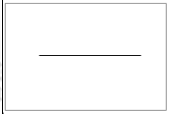
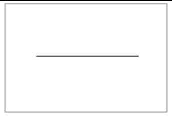
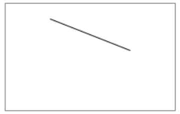
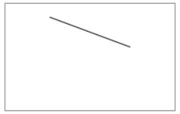
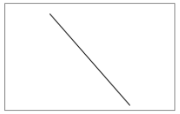
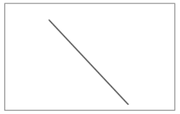
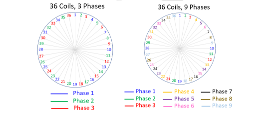
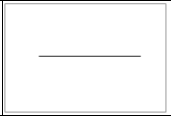
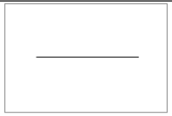
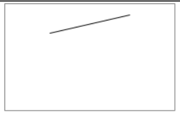
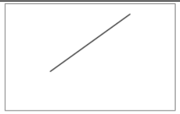
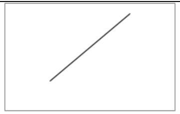
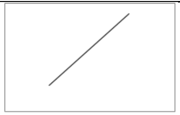
ตัวแปรต้นสำคัญที่มีผลต่อตัวแปรตามของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาและระบบลมระบาย ที่ได้จากการศึกษานี้คือ จำนวนชุดแม่เหล็ก จำนวนใบพัด มุมแกนยึดใบพัดชนิดแม่เหล็ก ความหนาของแม่เหล็กชิ้นบน ความหนาของแผ่นเหล็ก จำนวนขดลวด ทิศทางเชื่อมต่อขดลวด และจำนวนเฟสของขดลวด โดยที่แนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นแต่ละตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น ดังตารางที่ 4.13 ซึ่งในการพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อใช้งานจริงจำเป็นต้องออกแบบและเลือกค่าของตัวแปรต้นแต่ละตัวให้เหมาะสม โดยมีแนวทางการพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระไฟฟ้าจากระบบลมระบายให้มีกำลังการผลิตไฟฟ้าออกมาให้ได้สูงสุด มีความคุ้มค่าในการลงทุน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัยในการใช้งาน และสามารถติดตั้งและบำรุงรักษาง่าย เพื่อให้เป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.13 สรุปแนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

ตัวแปรต้น	ระดับของตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม					
			กระแสไฟฟ้าที่พัดลมใช้ (แอมแปร์)	ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)	ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิต (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)
จำนวนขั้วแม่เหล็ก	4, 6, 8, 12, 16, 20, 40 ชุด							
จำนวนใบพัด	9 ใบพัด, 18 ใบพัด							
มุมแกนยึดใบพัด	105, 120, 135, 150, 165 องศา							
ชนิดแม่เหล็ก	เกรด N45, เกรด N52							
ความหนาของแม่เหล็กชิ้นบน	ไม่มี, 1 มม., 2 มม., 3 มม.							
ความหนาของแผ่นเหล็ก	ไม่มี, 1 มม., 2 มม.							

ตารางที่ 4.13 สรุปแนวโน้มความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อการทำงานของพัดลมระบายอากาศและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา (ต่อ)

ตัวแปรต้น	ระดับของตัวแปรต้น		ตัวแปรตาม					
			กระแสไฟฟ้าที่พัดลมใช้ (แอมแปร์)	ความเร็วลมที่เข้าหลังพัดลม (เมตร/วินาที)	ความเร็วรอบของกังหัน (รอบ/นาที)	แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ (โวลต์)	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (แอมแปร์)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ (วัตต์)
จำนวนขดลวด	9 ขด, 18 ขด, 36 ขด							
ทิศทางเชื่อมต่อขดลวด (3 เฟส)	ตามเข็มนาฬิกา, ทวนเข็มนาฬิกา							
ทิศทางเชื่อมต่อขดลวด (9 เฟส)	ตามเข็มนาฬิกา, ทวนเข็มนาฬิกา							
จำนวนขดลวดต่อเฟส (CW)	4 ขด, 12 ขด							
จำนวนขดลวดต่อเฟส (CCW)	4 ขด, 12 ขด							

4.6.4 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

สัมประสิทธิ์กำลังคืออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ (P_{out}) กับพลังงานลมที่เข้ากังหันลม (P_{in}) เป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพทางเทคนิคของกังหันลม ดังสมการที่ 4.2

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{4.2}$$

โดยที่พลังงานลมที่เข้ากังหันลม (P_{in}) กำลังลมทั้งหมดเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอากาศ พื้นที่กวาดลมของกังหัน และปริมาตรของความเร็วลมค่าใดค่าหนึ่ง คำนวณได้จากสมการที่ 4.3

$$P_{in} = \frac{1}{2}\ \rho A V^3 \tag{4.3}$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ (Air density) หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

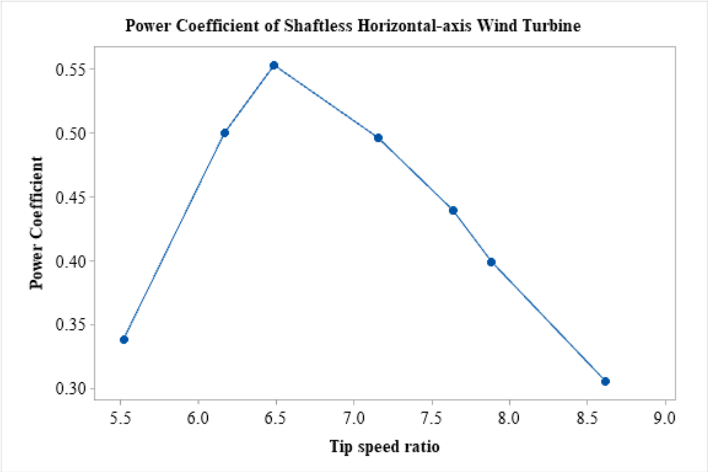
A คือ พื้นที่กวาดลมของใบพัดกังหัน (Blade swept area) หน่วย ตารางเมตร

V คือ ความเร็วลม (Wind speed) หน่วย เมตรต่อวินาที

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลัง คือ จำนวนใบพัด ตำแหน่งมุมใบพัด และอัตราส่วนความเร็วขอบต่อความเร็วลม (Tip speed ratio; λ) หากต้องการกำลังจากกังหันลมให้มีค่าสูงสุด ต้องทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) มีค่าสูงสุด

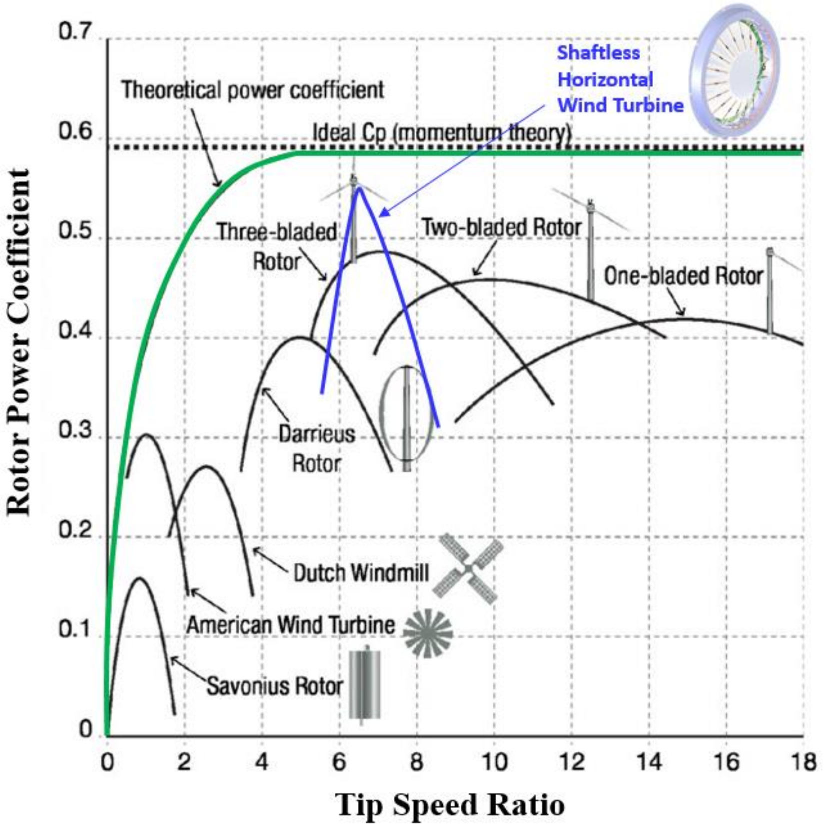
จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้จริง และทำการคำนวณพลังงานลมที่เข้ากังหันลมจากสมการที่ 4.2 พบว่าต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาทำงานอยู่ในช่วงอัตราส่วนความเร็วขอบต่อความเร็วลมที่ 5.5-8.6 มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่ร้อยละ 55.2 ดังรูปที่ 4.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

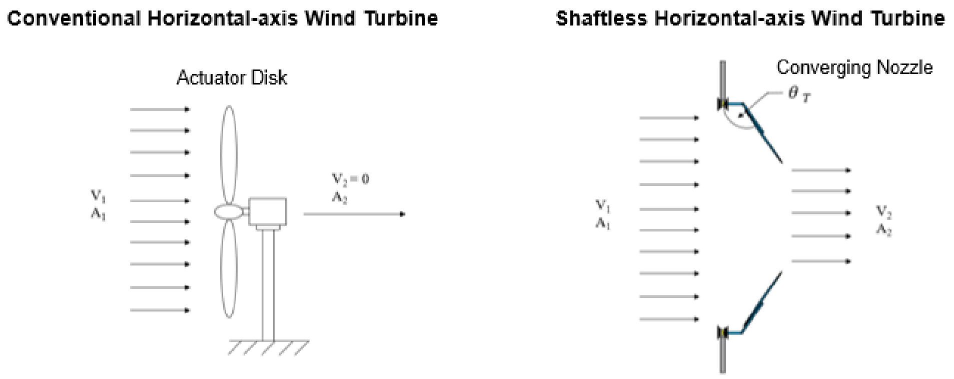


รูปที่ 4.19 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

Betz's Limit คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดตามทฤษฎีที่กังหันลมสามารถทำได้ ปัจจัยนี้เกิดจากพลังงานจลน์ที่พิจารณาจากความแตกต่างของแรงดันอากาศจากด้านหน้าและด้านหลังของกังหันลม ทำให้กังหันลมแบบทั่วไปไม่สามารถจับพลังงานจลน์ของลมได้มากกว่าร้อยละ 59.3 เมื่อนำสัมประสิทธิ์กำลังของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับกังหันลมชนิดอื่นที่มีอยู่ก่อนหน้า พบว่าต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีศักยภาพในการพัฒนาสัมประสิทธิ์กำลังให้มีค่าสูงกว่ากังหันชนิดอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.20 เนื่องจากลมสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนได้ ทำให้ความเร็วลมด้านหลังกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลายังคงมีอยู่ เมื่อเทียบกับกังหันลมแบบดั้งเดิมที่ความเร็วลมด้านหลังกังหันลมมีค่าน้อยมากใกล้เคียงศูนย์ เนื่องจากลมไม่สามารถไหลผ่านใบพัดกังหันที่หมุนด้วยความเร็วสูงได้ ดังรูปที่ 4.21 จึงมีความเป็นไปได้ที่สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจะเข้าใกล้หรือสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดในอุดมคติตามทฤษฎี โดยการปรับปรุงและพัฒนาตัวแปรต้นต่าง ๆ ให้กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมผลิตได้ให้มีค่ามากขึ้น เช่น การหาค่าที่เหมาะสมมากที่สุดระหว่างจำนวนขดลวดและแม่เหล็ก การปรับตำแหน่งมุมใบพัด เป็นต้น ซึ่งเป็นหัวข้อวิจัยที่จะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์กำลังของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา
เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมชนิดอื่น



รูปที่ 4.21 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

4.7 การทดสอบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในภาคสนาม

การทดสอบภาคสนามของต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสวารอฟสกี้ แมนูแฟคเจอริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด เลขที่ 200 หมู่ 1 นิคมอุตสาหกรรมไฮเทค (เขตปลอดอากร) ต.บ้านเลน อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13160 ให้เข้าทดสอบตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในพื้นที่บริษัท ซึ่งบริษัทมีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศจำนวนมากทั้งในส่วนพื้นที่การผลิตและพื้นที่สนับสนุนต่าง ๆ เป็นต้น การทดสอบได้ทำการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา 2 จุด จุดแรกคือพัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งอยู่ในห้องหล่อชิ้นงาน (Casting Room) อาคาร SMT5 ชั้น 1 ดังรูปที่ 4.22 ส่วนจุดที่สองคือพัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งภายในห้องน้ำหน้าโรงอาหารอาคาร SMT5 ดังรูปที่ 4.23

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.22 พัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งอยู่ในห้องหล่อชิ้นงาน (Casting Room) อาคาร SMT5 ชั้น 1

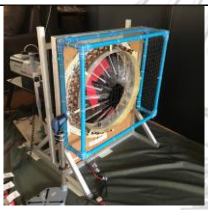
รูปที่ 4.23 พัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งภายในห้องน้ำหน้าโรงอาหารอาคาร SMT5

ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งกับพัดลมระบายอากาศในสถานที่จริงได้ในพื้นที่ที่จำกัด โดยได้ทำการสร้างและติดตั้งตะแกรงครอบกังหันลมไว้เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานด้านความปลอดภัย ซึ่งได้มีการตรวจสอบและยอมรับจากฝ่ายความปลอดภัยของบริษัทว่าเหมาะสมและปลอดภัยสำหรับการใช้งานในพื้นที่จริง

การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนามทั้ง 2 จุด แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่ใช้ขณะทำงานแบบติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาของจุดที่ 1 และจุดที่ 2 น้อยกว่าแบบที่ไม่ติดตั้งร้อยละ 0.48 และร้อยละ 0.81 ตามลำดับ ซึ่งไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลมระบายอากาศที่ใช้ขณะทำงานแบบติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาน้อยกว่าแบบไม่ติดตั้งร้อยละ 0.76 เกิดจากลักษณะของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเมื่อหมุนด้วยความเร็วจะคล้ายกรวยปลายเปิดแบบ Nozzle ทำให้การไหลของลมระบายเป็นแบบลำพุ่งออกไปด้านหน้า แรงต้านของอากาศที่หมุนวนด้านหลังกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจึงน้อยกว่า ทำให้มอเตอร์พัดลมระบายอากาศใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลงในการผลักมวลอากาศออกสู่ภายนอก

ในการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเข้ากับพัดลมระบายอากาศที่จุดที่ 1 ในห้องหล่อชิ้นงาน อาคาร SMT5 พบว่า กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่สามารถหมุนได้เนื่องจากลมระบายที่ออกจากใบพัดลักษณะดังกล่าวพุ่งออกเป็นมุมป้านและความเร็วลมระบายที่ไหลเข้าสู่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาอยู่ที่ 3-4 เมตรต่อวินาทีเท่านั้น แม้ความเร็วรอบของพัดลมจะสูงถึง 1450 รอบต่อนาทีก็ตาม ทำให้ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ สำหรับการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเข้ากับพัดลมระบายอากาศจุดที่สองที่ห้องน้ำหน้าโรงอาหารอาคาร SMT5 ที่มีความเร็วลมในช่วง 8-9 เมตรต่อวินาทีพบว่า กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนได้ด้วยความเร็ว 180 รอบต่อนาที แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้เท่ากับ 8.8 โวลต์ และไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อต่อหลอดไฟ LED ขนาด 3 วัตต์เท่ากับศูนย์ ทำให้สถานะของหลอดไฟ LED ติดแบบกระพริบเท่านั้น

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบกังหันแบบไร้เพลาในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

การทดสอบ	**การทดสอบในห้องปฏิบัติการ**	**การทดสอบภาคสนาม ณ บริษัท สวารอฟสกี้ แมนูแฟคเจอริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด**	
		พัดลมระบายอากาศห้องหล่อชิ้นงาน อาคาร SMT5	**พัดลมระบายอากาศห้องน้ำหน้าโรงอาหาร อาคาร SMT5**
รุ่นของพัดลม	SPE Industrial Exhaust Fan, Model No.: FCD504, Rotational Speed: 1350 rpm, Wind Flow: 4800m^3/h	Mitsubishi, Model No.: SP-QR, Rotational Speed: 1450 rpm	Panasonic Ventilating Fan, Model No.: FV-45GS4, Rotational Speed: 1410 rpm, Wind Flow: 5400m^3/h
เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	50 เซนติเมตร	60 เซนติเมตร	46 เซนติเมตร
ลักษณะใบพัด			
การติดตั้ง			
ความเร็วลมที่ออกจากใบพัดลมที่ระยะ 5 ซม.	8-9 เมตรต่อวินาที	3-4 เมตรต่อวินาที	8-9 เมตรต่อวินาที
กระแสไฟฟ้าที่พัดลมใช้ขณะทำงานแบบไม่ติดตั้งกังหัน	0.527 แอมแปร์	2.31 แอมแปร์	1.24 แอมแปร์
กระแสไฟฟ้าที่พัดลมใช้ขณะทำงานแบบติดตั้งกังหัน	0.523 แอมแปร์	2.31 แอมแปร์	1.24 แอมแปร์
%กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการทำงานที่ลดลง	0.76%	0.43%	0.81%
ความเร็วรอบของกังหันลมแบบไร้เพลา	293 รอบต่อนาที	กันหันแบบไร้เพลาไม่สามารถหมุนได้	180 รอบต่อนาที
แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากกังหัน (V_{dc})	12.03 โวลท์	กันหันแบบไร้เพลาไม่สามารถหมุนได้	8.8 โวลท์
กระแสไฟฟ้าที่ออกจากกังหัน (I_{dc})	0.16 มิลลิแอมแปร์	กันหันแบบไร้เพลาไม่สามารถหมุนได้	0.00 มิลลิแอมแปร์
สถานะหลอดไฟ LED ขนาด 3W	ไฟติดสว่างตลอดเวลา	ไม่ติด	ไฟติดแบบกระพริบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การที่การหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในการทดสอบภาคสนามในจุดที่สองช้ากว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะใบพัดของพัดลมระบายอากาศแตกต่างกัน ปัจจัยดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อทิศทางการไหลของลมระบายที่ไหลออกมา มุมของแกนยึดใบพัดที่ถูกตั้งค่าเพื่อให้เหมาะกับพัดลมระบายอากาศที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ทำให้มีแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาจนทำให้หลอดไฟ LED ติดจึงไม่ใช่ค่าที่ดีที่สุดของพัดลมระบายอากาศที่ติดตั้งในการทดสอบภาคสนามจุดที่สอง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่ตั้งค่ามุมของแกนยึดใบพัดให้เป็นมุมเดียวเพื่อไปใช้งานกับพัดลมระบายอากาศที่จำหน่ายอยู่ในตลาดทั้งหมด ซึ่งใบพัดมีลักษณะแตกต่างกันออกไปได้ การออกแบบและผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง จำเป็นต้องมีการปรับมุมแกนยึดใบพัดให้เหมาะสมกับพัดลมระบายอากาศแต่ละชนิดที่มีลักษณะการไหลของอากาศและความเร็วลมที่ออกจากใบพัดที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนสำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุดและลดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศให้น้อยที่สุด

นอกจากนี้การหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขดลวดและขนาดแม่เหล็กให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้กำลังสูงสุด และการแก้ปัญหาการเสื่อมของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กนีโอไดเมียมในกรณีที่ติดตั้งใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส โดยการพัฒนาวัสดุเคลือบผิวแม่เหล็กนีโอไดเมียมให้มีความทนทานต่อการใช้งานเป็นระยะเวลานาน ตลอดจนการศึกษาผลกระทบของลมธรรมชาติที่ไหลเข้าสู่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาขณะทำงานในพื้นที่เปิดก็เป็นสิ่งที่จะต้องดำเนินการ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับในการใช้งานอย่างแพร่หลายต่อไป

4.8 การประเมินการยอมรับนวัตกรรม

การประเมินผลการยอมรับนวัตกรรมเป็นการตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ในข้อที่ 3) คือ เพื่อศึกษาการยอมรับนวัตกรรมและความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ โดยผู้วิจัยได้นำนวัตกรรม มาทำการประเมินผลการยอมรับนวัตกรรมและเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model, TAM) คิดค้นโดย Davis, Bagozzi และ Warshaw (1989) ซึ่งพิจารณาการยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ประโยชน์ ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน และด้านความสนใจในการใช้งาน นอกจากนี้ยังได้เสนอแผนการนำนวัตกรรมไปใช้เชิงพาณิชย์ในภาคธุรกิจ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.8.1 ผลการทดสอบการใช้งานและการยอมรับ

การวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของกลุ่มตัวอย่างด้วยความถี่ ค่าร้อยละ ของกลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มผู้ใช้งานเป้าหมายซึ่งได้แก่ กลุ่มผู้ที่มีระบบลมระบาย จำนวนทั้งสิ้น 322 คน แสดงในตารางที่ 4.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบประเมินการยอมรับนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม

ข้อมูลทั่วไป	ความถี่	ร้อยละ
เพศ (n=322)		
ชาย	218	68.3%
หญิง	97	30.5%
ไม่ต้องการระบุ	4	1.3%
การศึกษา (n=322)		
ต่ำกว่าปริญญาตรี	25	7.7%
ปริญญาตรี	117	37.2%
สูงกว่าปริญญาตรี	177	55.1%
ประเภทกลุ่มตัวอย่าง (n=322)		
บ้าน ห้องพัก ที่พักอาศัย	252	62.7%
สถานประกอบการโรงงาน	86	21.4%
อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้า	38	9.5%
โรงเรือนเกษตรหรือปศุสัตว์ระบบปิด	26	6.5%

จากข้อมูลพื้นฐานของกลุ่มตัวอย่าง พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ เป็นกลุ่มบ้าน ห้องพัก ที่พักอาศัย คิดเป็นร้อยละ 62.7 ส่วนกลุ่มลูกค้าเป้าหมายแรกที่จะนำกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้คือสถานประกอบการโรงงานคิดเป็นร้อยละ 21.4 และโรงเรือนเกษตรหรือปศุสัตว์ระบบปิดคิดเป็นร้อยละ 6.5 ซึ่งข้อมูลในแต่ละกลุ่มลูกค้าสามารถศึกษาในรายละเอียดจากผลการตอบแบบสอบถามเพื่อให้สามารถพัฒนาให้ตอบสนองความต้องการลูกค้าได้อย่างเหมาะสม

4.8.2 การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถาม

นำแบบสอบถามไปทดลองเก็บข้อมูลกับกลุ่มตัวอย่าง เพื่อวัดค่าความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์งานวิจัย โดยวิธีของครอนบาค (Cronbach method) หรือวิธีคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา (α coefficient หรือ Alpha coefficient) เพื่อวิเคราะห์คุณภาพความเที่ยง (Reliability) ก่อนนำไปเป็นเครื่องมือเพื่อเก็บข้อมูลวิจัย ใช้สูตรในการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟา ดังนี้

$$\alpha = \frac{n}{n-1}\left[1 - \frac{\sum S_i^2}{S_t^2}\right] \tag{5.1}$$

α แทน ความเที่ยง

n แทน จำนวนข้อในแบบสอบถาม

$\sum S_i^2$ แทน ผลรวมความแปรปรวนแต่ละข้อ

S_t^2 แทน ความแปรปรวนเครื่องมือทั้งฉบับ

ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาที่คำนวณได้จากสมการ 5.1 มีค่าระหว่าง 0-1 ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบสอบถามมีความเชื่อมั่นสูง และถ้าสัมประสิทธิ์แอลฟามีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าแบบสอบถามมีความเชื่อมั่นต่ำมาก หรือ ไม่มีเลย การกำหนดการแปรผลความเที่ยงเพื่อแสดงความเชื่อมั่น แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 อธิบายค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม

ค่าความเที่ยง (α)	**ความหมายการแปลผล**
0.00–0.20	มีความเชื่อมั่นต่ำมากหรือไม่มีเลย
0.21–0.40	มีความเชื่อมั่นต่ำ
0.41–0.70	มีความเชื่อมั่นปานกลาง
0.71–1.00	มีความเชื่อมั่นสูง

หลังจากแทนค่าและคำนวณตามสมการข้างต้นจะได้ตัวเลขที่แสดงค่าความเที่ยงที่สามารถอธิบายถึงความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ ดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 โดยความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามงานวิจัยนี้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม SPSS ได้ค่าความเที่ยงที่ 0.89 และ 0.92 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ที่ค่าความเที่ยง (α) มากกว่า 0.70 ขึ้นไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Reliability Statistics

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
.886	.891	8

รูปที่ 4.24 การประมวลผลความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามในส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทน

Reliability Statistics

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
.922	.923	11

รูปที่ 4.25 การประมวลผลความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามในส่วนการยอมรับนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

4.8.3 การวิเคราะห์การยอมรับนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์การยอมรับนวัตกรรมและการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ของจำนวนกลุ่มตัวอย่าง (n) โดยใช้สถิติค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D) โดยคะแนนเฉลี่ยระดับการยอมรับนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมสามารถแบ่งตามพิสัยของค่าเฉลี่ยและความหมาย ได้ดังตารางที่ 4.17 รายละเอียดการวิเคราะห์การยอมรับนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมแต่ละส่วนแสดงดังนี้

ตารางที่ 4.17 การแบ่งค่าคะแนนและระดับการยอมรับนวัตกรรม

ค่าคะแนน	**ระดับการยอมรับนวัตกรรม**
1.00-1.80	น้อย
1.81-2.60	ค่อนข้างน้อย
2.61-3.40	ปานกลาง
3.41-4.20	ค่อนข้างมาก
4.21-5.00	มาก

1) การยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ประโยชน์ (Perceive of Usefulness)

จากตารางที่ 4.18 พบว่าการยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ประโยชน์มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก มีค่าเท่ากับ 4.34 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.75 ถ้าพิจารณาเป็นรายประเด็น พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็นที่ว่า “โดยรวมแล้วท่านคิดว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีประโยชน์ที่จะนำไปใช้งาน” มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.60 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.62 โดยผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็น “กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีศักยภาพที่จะพัฒนา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันแกนนอนในปัจจุบันเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากัน” มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 4.26 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.80

ตารางที่ 4.18 การยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ประโยชน์ (Perceive of Usefulness)

ด้านการรับรู้ประโยชน์ (Perceive of Usefulness)	n	Mean	S.D.	ระดับการประเมิน
1) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมธรรมชาติหรือลมทิ้งจากระบบลมระบายที่มีความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปได้	322	4.43	0.69	มาก
2) กังหันแบบไร้เพลาสามารถประยุกต์ใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากการไหลของของไหลอื่น ๆ เช่น ระบบน้ำทิ้ง ก๊าซที่ปล่อยทิ้ง เป็นต้น	322	4.51	0.72	มาก
3) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งกับเข้าอุปกรณ์กำเนิดลมของของระบบลมระบายในระยะใกล้ (ระยะ 5 มิลลิเมตรขึ้นไป) โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลมระบายลดลง	322	4.30	0.85	มาก
4) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งเข้ากับระบบลมระบายได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน	322	4.48	0.74	มาก
5) ในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการติดตั้ง กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งต่อกันเป็นลำดับเพื่อนำลมระบายมาใช้ในให้เกิดประโยชน์สูงสุด	322	4.45	0.78	มาก
6) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีศักยภาพที่จะพัฒนาให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันแกนนอนในปัจจุบันเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากัน	322	4.26	0.80	มาก
7) โดยรวมแล้วท่านคิดว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีประโยชน์ที่จะนำไปใช้งาน	322	4.60	0.62	มาก

2) การยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน (Perceive of Use)

จากตารางที่ 4.19 พบว่าการยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก มีค่าเท่ากับ 4.34 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรานเท่ากับ 0.75 ถ้าพิจารณาเป็นรายประเด็น พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็นที่ว่า “กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

สามารถติดตั้งในพื้นที่จำกัด” มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.45 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.72 โดยผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็น “กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาง่ายต่อการซ่อมบำรุง” มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 4.20 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.82

ตารางที่ 4.19 การยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน (Perceive of Use)

ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน (Perceive of Use)	n	Mean	S.D.	**ระดับการประเมิน**
1) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งในพื้นที่จำกัด	322	4.45	0.72	มาก
2) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาง่ายต่อการติดตั้ง	322	4.30	0.76	มาก
3) กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาง่ายต่อการซ่อมบำรุง	322	4.20	0.82	มาก
4) โดยรวมแล้วท่านคิดว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีความสะดวกในใช้งาน	322	4.42	0.70	มาก

3) การยอมรับนวัตกรรม ด้านความสนใจในการใช้งาน (Intention to Use)

จากตารางที่ 4.20 พบว่าการยอมรับนวัตกรรม ด้านความสนใจในการใช้งาน มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก มีค่าเท่ากับ 4.22 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.88 ถ้าพิจารณาเป็นรายประเด็น พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็นที่ว่า “มีความสนใจ อยากได้รายละเอียดเพิ่มเติม” มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.35 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.83 โดยผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็น “มีความสนใจ อยากซื้อไว้ใช้งานในอนาคตอันใกล้” มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 3.97 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.20 การยอมรับนวัตกรรม ด้านความสนใจในการใช้งาน (Intention to Use)

ด้านความสนใจในการใช้งาน (Intention to Use)	n	Mean	S.D.	**ระดับการประเมิน**
1) มีความสนใจ อยากได้รายละเอียดเพิ่มเติม	322	4.35	0.83	มาก
2) มีความสนใจ อยากทดลองใช้งาน	322	4.29	0.86	มาก
3) มีความสนใจ อยากซื้อไว้ใช้งานในอนาคตอันใกล้	322	3.97	1.00	ค่อนข้างมาก
4) มีความสนใจ ตั้งใจจะแนะนำให้ผู้ที่รู้จักศึกษาและมีไว้ใช้งาน	322	4.28	0.83	มาก

4.8.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทน

จากตารางที่ 4.21 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทนที่ระบุในแบบสอบถามมีผลต่อการตัดสินใจมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมาก มีค่าเท่ากับ 4.52 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.73 ถ้าพิจารณาเป็นรายประเด็น พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็นที่ว่า “เทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม” มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.71 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.54 โดยผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นกับประเด็น “ความสะดวกสบายในการติดตั้ง” มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 4.40 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.80 ซึ่งปัจจัยสำคัญดังกล่าวสามารถนำมาประกอบการวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้ตอบสนองความต้องการของกลุ่มลูกค้าเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนต่อไป

ตารางที่ 4.21 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทน

ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ ในการเลือกใช้พลังงานทดแทน	**Mean**	**S.D.**	**ระดับการประเมิน**
1) ความคุ้มค่าในการติดตั้ง	4.47	0.79	มาก
2) ความสะดวกสบายในการติดตั้ง	4.40	0.80	มาก
3) ความสะดวกสบายในการบำรุงรักษา	4.48	0.78	มาก
4) ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย	4.43	0.76	มาก
5) เทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	4.71	0.54	มาก
6) ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง กลิ่น	4.70	0.60	มาก
7) ไม่มีผลกระทบต่อภูมิทัศน์ บดบังทัศนวิสัย	4.53	0.74	มาก
8) เป็นเทคโนโลยีที่ออกแบบและผลิตโดยคนไทย	4.44	0.84	มาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.9 สรุปผลการพัฒนานวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิจัยที่ได้จากการดำเนินตามระเบียบวิธีวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย การเสนอแนวคิด การพัฒนาตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม และการประเมินการยอมรับนวัตกรรมและหาปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้พลังงานทดแทนโดยแบบสอบถาม

จากการเสนอแนวคิดและพัฒนาต้นแบบกังหันลม สามารถพิสูจน์ได้ว่าในเชิงเทคนิคกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงที่ความเร็วลมตั้งแต่ 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป และผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรมได้ โดยไม่ส่งผลกระทบเชิงลบให้กับระบบลมระบายที่มีอยู่เดิม สามารถระบุตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา คือ จำนวนชุดแม่เหล็ก จำนวนใบพัด มุมแกนยึดใบพัดชนิดแม่เหล็ก ความหนาของแม่เหล็กชิ้นบน ความหนาของแผ่นเหล็ก จำนวนขดลวด ทิศทางเชื่อมต่อขดลวด และจำนวนเฟสของขดลวด เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่พบของตัวต้นแบบนี้คือกระแสไฟฟ้าที่ผลิตออกมาได้ยังอยู่ในระดับต่ำ ไม่คุ้มค่าสำหรับการนำไปใช้งานจริงในมุมมองของผู้บริโภค แต่อย่างไรก็ตามกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลายังคงมีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและมีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น นอกจากนี้พบว่าการศึกษาสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจะต้องมีการตั้งสมมุติฐานการวิเคราะห์ให้ถูกต้องและครบถ้วนตามหลักวิชาการ เพื่อให้เป็นที่ยอมรับในระดับสากล

การทดสอบต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าภาคสนาม พบว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งในพื้นที่จริงได้และมีความปลอดภัยในการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามจะต้องพัฒนาออกแบบใบพัดให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลของลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศที่มีความแตกต่างเนื่องจากลักษณะใบพัดของพัดลมระบายอากาศที่มีจำหน่ายในตลาดมีความแตกต่างกัน

ในส่วนการประเมินผลการยอมรับนวัตกรรม ด้านการรับรู้ประโยชน์ ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในการใช้งาน และด้านความสนใจในการใช้งานพบว่ากลุ่มลูกค้าเป้าหมายให้การยอมรับนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาอยู่ในระดับมากในทุก ๆ ด้าน นอกจากนี้สามารถทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้พลังงานทดแทนของกลุ่มลูกค้าเป้าหมายในแต่ละกลุ่ม ทำให้ได้แนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อตอบสนองความต้องการลูกค้าต่อไป

บทที่ 5
การนำนวัตกรรมไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์

เนื่องจากการดำเนินธุรกิจในปัจจุบันมีการแข่งขันที่สูงมาก การพัฒนานวัตกรรมใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อนและต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายและได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายมีความท้าทายและความเสี่ยงสูง จึงจำเป็นต้องศึกษาและวิเคราะห์มุมมองทางธุรกิจให้ครบถ้วนเพื่อเตรียมการให้สามารถดำเนินธุรกิจได้อย่างมั่นคงและยั่งยืน ในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวางแผนการนำนวัตกรรมไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ โดยพิจารณาสภาพแวดล้อมภายนอกและภายในอุตสาหกรรม ประเมินโอกาสข้อจำกัด จุดเด่นและจุดอ่อนของธุรกิจที่จะก่อตั้งขึ้น พร้อมทั้งวางแผนธุรกิจ แผนการตลาด การผลิต การบริหาร การลงทุนและศึกษาความเป็นไปได้ด้านการเงิน และการจัดการความเสี่ยง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การวิเคราะห์การแข่งขันในอุตสาหกรรม (Five Forces Analysis)

การวิเคราะห์การแข่งขันในอุตสาหกรรม (Five Forces Analysis) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและปัจจัยการแข่งขันของธุรกิจ 5 ประการ คือ การแข่งขันของคู่แข่งในปัจจุบัน อำนาจต่อรองของผู้ผลิตวัตถุดิบ อำนาจต่อรองของผู้ซื้อ ภัยคุกคามจากคู่แข่งใหม่ในอุตสาหกรรม และภัยคุกคามจากสินค้าทดแทน เพื่อหากลยุทธ์รับมือในการแข่งขันในอุตสาหกรรมที่เหมาะสมที่สุด โดยรายละเอียดการวิเคราะห์มีดังนี้

1) การแข่งขันของคู่แข่งในปัจจุบัน (Rivalry among current competitors)

- จำนวนลูกค้าเป้าหมายที่จะใช้ผลิตภัณฑ์นวัตกรรมนี้มีเป็นจำนวนมาก
- ในปัจจุบันยังไม่มีคู่แข่งในอุตสาหกรรมเนื่องจากการผลิตไฟฟ้าจากระบบลมระบายยังเป็นนวัตกรรมที่ใช้เทคโนโลยีที่ใหม่
- ความสามารถในการผลิตลอกเลียนแบบของคู่แข่งในอุตสาหกรรมสูงหลังจากผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาด ดังนั้นการแข่งขันของคู่แข่งในปัจจุบันจะอยู่ระดับปานกลางในช่วงแรก แต่แนวโน้มจะสูงขึ้นต่อไปในอนาคต

2) อำนาจต่อรองของผู้ผลิตวัตถุดิบ (Bargaining power of suppliers)

- อำนาจการต่อรองของผู้ผลิตวัตถุดิบสูง เนื่องจากผู้ผลิตแม่เหล็กนีโอไดเมียมซึ่งเป็นแม่เหล็กที่มีค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าแม่เหล็กถาวรทั่วไปเมื่อเทียบกับขนาดที่เท่ากัน มีจำนวนน้อยรายที่มีคุณภาพและส่วนใหญ่อยู่ต่างประเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) อำนาจต่อรองของผู้ซื้อ (Bargaining power of customers)

- ในประเทศไทยยังไม่มีผู้ประกอบการผลิตใด ๆ นำเทคโนโลยีนี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจัดจำหน่ายจึงทำให้ลูกค้าไม่สามารถมีอำนาจต่อรองราคาได้

4) ภัยคุกคามจากคู่แข่งใหม่ในอุตสาหกรรม (Threat of new entrants)

- เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ทำให้ต้องมีการให้ข้อมูลที่มากเพียงพอแก่ผู้บริโภค
- อาจจะมีเทคโนโลยีที่ดีกว่ามาทดแทนในโอกาสต่อไปหลังจากสินค้าออกสู่ตลาดได้ระยะหนึ่ง

5) ภัยคุกคามจากสินค้าทดแทน (Threat of substitute products or services)

- ระบบแผงโซล่าร์เซลล์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ซึ่งมีการจำหน่ายอย่างแพร่หลาย มีราคาลดลงและการเข้าถึงได้ง่ายกว่า
- ต้นทุนการปรับเปลี่ยนไปใช้สินค้าอื่น (Switching Cost) ต่ำ ดังนั้นภัยคุกคามจากสินค้าทดแทนค่อนข้างสูง

โดยสรุปแล้วการแข่งขันในอุตสาหกรรมนี้อยู่ในระดับปานกลางในช่วงแรก แต่จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในอนาคต เมื่อมีผู้ผลิตสินค้าเลียนแบบ แต่ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการยื่นขอคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์ไว้แล้วในกลุ่มประเทศเป้าหมายหลักคือ ไทย สหรัฐอเมริกา จีน อินเดียและออสเตรเลีย ซึ่งมีอายุการคุ้มครอง 20 ปี โดยสถานะการคุ้มครองสิทธิบัตรประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา แสดงดังตารางที่ 5.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.1 สถานการณ์คุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

ประเทศที่ขอรับความคุ้มครอง	**หมายเลขคำขอ** (Application No.)	**วันที่ยื่นขอรับความคุ้มครอง**	**หมายเลขประกาศ** (Publication No.)	**วันที่ประกาศ**
ไทย	1901007703	11.12.2019	TH1901007703A	03.05.2021
ประเทศสมาชิก PCT	PCT/TH2020/000081	09.12.2020	WO2021/118475 A1	17.06.2021
สหรัฐอเมริกา	17/776973	13.05.2022	US20220393548A1	18.12.2022
จีน	202080077436.4	27.05.2022	CN114651125A	21.06.2022
อินเดีย	202217030995	30.05.2022	202217030995	30.05.2022
ออสเตรเลีย	2020402475	08.07.2022	AU2020402475A1	28.07.2022

5.2 การประเมินตลาด (Market assessment)

การวิเคราะห์ข้อมูลตลาดมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการประเมินโอกาสทางการตลาด ในด้านอุปสงค์ อุปทาน สภาวะการแข่งขัน ศักยภาพของตลาดกลุ่มเป้าหมาย กฎระเบียบหรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้สามารถทราบถึงอุปสรรคหรือข้อจำกัดในตลาดต่าง ๆ ด้วย

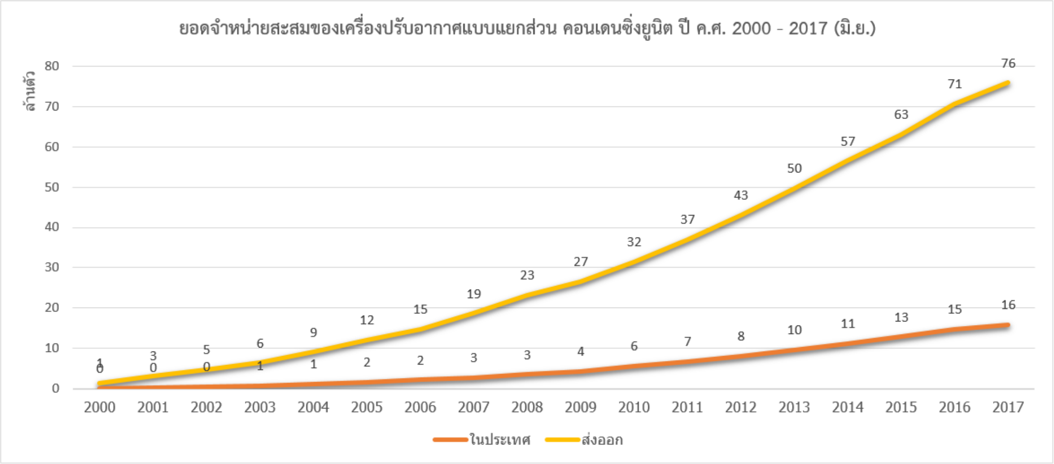
จากการประเมินตลาดของพลังงานทดแทนโดยพิจารณาจากข้อมูล Renewable Energy Market Outlook – 2030 โดยเว็บไซต์ alliedmarketresearch.com ที่คาดการณ์ว่ามูลค่าในตลาดพลังงานทดแทนทั่วโลกในปี 2030 จะเพิ่มขึ้นถึง 1,978 พันล้านเหรียญสหรัฐ จากที่ในปี 2021 มูลค่าตลาดอยู่ที่ 882 พันล้านเหรียญสหรัฐ คิดเป็นอัตราเติบโตร้อยละ 8.4 ซึ่งทางภูมิภาคเอเชียอย่างจีนและอินเดียนับเป็นภูมิภาคแห่งโอกาสของพลังงานทดแทนที่คาดว่าตลาดจะเติบโตอย่างรวดเร็ว ด้วยปัจจัยการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การพัฒนาอุตสาหกรรม และนโยบายเอื้อต่อภาคอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน ซึ่งในภาพรวมของธุรกิจไม่เพียงแต่กลุ่มผู้ผลิตพลังงานทดแทนเท่านั้น ยังรวมไปถึงผู้ผลิตอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน โครงสร้างพื้นฐาน เครื่องมือต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทดแทนด้วย ซึ่งเป็นโอกาสของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่จะเข้าสู่ตลาดพลังงานทดแทนเนื่องจากความใหม่ที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของกังหันลมแบบดั้งเดิมในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมที่ไม่เคยถูกนำมาใช้ก่อนหน้านี้

จากข้อมูลจำนวนโรงงานในภาคอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในประเทศไทย ตามสถิติสะสมจำนวนโรงงานที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ (เปิดดำเนินการ) ตาม พ.ร.บ.โรงงาน พ.ศ. 2535 จำแนกรายหมวดอุตสาหกรรมที่สำคัญ ตามจำพวก ณ สิ้นปี 2559 (ศูนย์สารสนเทศโรงงานอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560) มีจำนวนโรงงานทั้งหมดถึง 138,083 โรงงาน

จากสถิติสะสมจำนวนฟาร์มมาตรฐานแบบระบบปิดตามจำพวก ปี 2560 (สำนักพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าปศุสัตว์ กรมปศุสัตว์, 2559) พบว่ามีจำนวนโรงเรือนแบบระบบปิดสำหรับฟาร์มมาตรฐานไก่ไข่ ฟาร์มมาตรฐานไก่เนื้อ ฟาร์มมาตรฐานสุกร ฟาร์มมาตรฐานสถานที่ฟักไข่สัตว์ปีกรวมทั้งสิ้น 19,594 โรงเรือน ซึ่งโรงงานและโรงเรือนดังกล่าวก็มีการใช้พัดลมระบายอากาศที่มีความเร็วสูงมีในระบบจำนวนมาก เป็นแหล่งทรัพยากรลมที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตได้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นโอกาศที่จะนำเสนอผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายให้กับกลุ่มเป้าหมายนี้ได้

นอกจากนี้หากพิจารณายอดจำหน่ายสะสมของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน คอนเดนซิ่งยูนิตที่ใช้กันในที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน ดังรูปที่ 5.1 พบว่ามียอดจำหน่ายสะสมตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000-2017 ถึงระดับ 76 ล้านเครื่อง ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นอีกแหล่งทรัพยากรลมระบายหนึ่งที่สามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เป็นตลาดที่ใหญ่ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเช่นกัน

รูปที่ 5.1 เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน คอนเดนซิ่งยูนิตที่ใช้ในที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน



รูปที่ 5.2 ยอดจำหน่ายสะสมของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน คอนเดนซิ่งยูนิต ปี 2000-2017

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, (2560). การรายงานสถิติอุตสาหกรรม. [ออนไลน์] http://www.oie.go.th/academic/statistics 15 กันยายน 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3 การวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคทางธุรกิจ (SWOT)

การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบและประเมินสถานการณ์ทำให้ทราบถึงจุดแข็งและจุดอ่อนจากสภาพแวดล้อมภายในและมองเห็นถึงโอกาสและอุปสรรคจากสภาพแวดล้อมภายนอกเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินธุรกิจในอนาคต โดยจะใช้ SWOT Analysis ในการวิเคราะห์ถึงสภาพแวดล้อมขององค์กรในปัจจุบัน แสดงดังนี้

1) จุดแข็ง (Strengths)

- ผู้วิจัยเป็นเจ้าของแนวคิดสิ่งประดิษฐ์นี้
- ได้รับความคุ้มครองสิทธิบัตรในกลุ่มประเทศเป้าหมายหลักคือไทย สหรัฐอเมริกา จีน อินเดียและออสเตรเลีย
- ผลิตภัณฑ์ติดตั้งง่ายและไม่เปลืองพื้นที่

- ผลิตภัณฑ์ได้พัฒนาขึ้นจากคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการทำงานด้านพลังงานทางเลือกและจากความต้องการของกลุ่มเป้าหมายโดยตรง

2) จุดอ่อน (Weakness)

- เป็นของใหม่ที่ยังไม่เป็นที่รู้จักคุ้นเคยของผู้ใช้มาก่อน
- ต้นทุนของอุปกรณ์แปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (grid inverter) สเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าคืนให้กับระบบของการไฟฟ้าได้ มีราคาสูงมาก
- หากดำเนินการในลักษณะบริษัทจัดตั้งใหม่ทำให้ยังไม่มีความมั่นคงทางการเงิน การพัฒนาเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าทำให้ถูกลอกเลียนแบบได้
- มีอำนาจการต่อรองกับผู้ผลิตชิ้นส่วนน้อย เนื่องจากอำนาจการสั่งซื้อที่จำกัด

3) โอกาส (Opportunities)

- การเติบโตของพลังงานทางเลือกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง
- การนำกลับมาใช้ของแหล่งพลังงานลมระบายที่ไม่เคยใช้ให้เกิดประโยชน์มาก่อน
- สร้างรายได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากแหล่งต่าง ๆ
- คู่แข่งขันยังมีจำกัด
- การเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็วของราคาพลังงานชนิดอื่น ๆ
- ความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยี
- การที่รัฐบาลต่าง ๆ เห็นความสำคัญและมีนโยบายสนับสนุนเงินทุนให้ภาคอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสะอาด
- ข้อตกลง Paris Agreement ภายใต้ United Nation Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) เพื่อที่จะจัดการกับปัญหาก๊าซเรือนกระจก มีเป้าหมายที่จะบรรลุปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2050

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) อุปสรรค (Threats)

- ความเชื่อมั่นต่อการลงทุนในเทคโนโลยี
- ความสามารถในการผลิตลอกเลียนแบบของคู่แข่งในอุตสาหกรรมสูง
- ความผันผวนของเศรษฐกิจที่ทำให้กลุ่มลูกค้าเป้าหมายชะลอการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์

- กลุ่มเป้าหมายยังมีความรู้จำกัดในการผลิตไฟฟ้าจากระบบลมระบาย

5.4 การใช้ประโยชน์ทางเทคโนโลยี (Technology exploitation)

การใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีเป็นการวิเคราะห์หรือตัดสินใจว่าจะนำเทคโนโลยีไปแสวงหาประโยชน์ในทางใดที่จะเกิดมูลค่าสูงสุด โดยจะต้องนำห่วงโซ่คุณค่ามาใช้ในการวิเคราะห์ ไม่ว่าจะเป็นการแสวงหาประโยชน์ย้อนกลับหรือก้าวไปข้างหน้าของห่วงโซ่คุณค่า

จากห่วงโซ่แห่งคุณค่าที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถจำแนกเส้นทางที่จะนำเทคโนโลยีเพื่อแสวงหาประโยชน์ได้หลายทาง ดังนี้

1) การอนุญาตให้ใช้สิทธิ์แบบไม่เด็ดขาด (Non-exclusive licensing)

- ค่าเปิดเผยเทคโนโลยี (Upfront fee) ผู้ขอใช้สิทธิ์ชำระให้กับผู้ทรงสิทธิ์ก่อนอนุญาตให้ใช้สิทธิ์
- ค่าตอบแทนการใช้สิทธิ (Royalty fee) คิดเป็นร้อยละ 5 จากรายได้ ตามค่ามัธยฐานของอุตสาหกรรมธุรกิจพลังงานและสิ่งแวดล้อม (Smith and Parr, 2005) โดยพิจารณาจากผลประโยชน์และความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตเป็นสำคัญ
- กลุ่มเป้าหมายคือ บริษัทผู้ผลิตกังหันลมรายใหญ่ต่าง ๆ หรือบริษัทอื่น ๆ ที่สนใจเทคโนโลยีกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมไปผลิตเพื่อจำหน่าย
- ข้อดีคือ ผู้อนุญาตยังมีสิทธิที่จะอนุญาตให้บุคคลอื่นใช้สิทธิได้อีก และผู้อนุญาตสามารถใช้สิทธินั้นได้อีกด้วย เป็นการควบคุมไม่ให้เกิดการผูกขาดทางการค้าขึ้น และผู้ที่สนใจรายอื่นสามารถนำแนวคิดกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปผลิตเพื่อให้เกิดการใช้งานที่แพร่หลายรวดเร็วมากขึ้น และสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีกังหันลมแบบเดิม
- ข้อด้อยคือ การเจรจาต่อรองและการทำสัญญาระหว่างผู้ขอใช้สิทธิ์หลายรายจะต้องมีทีมงานด้านกฎหมายที่มีประสบการณ์เข้ามาช่วยเพื่อให้มีความรัดกุม เพื่อหลีกเลี่ยงการฟ้องร้องจากผู้ขอใช้สิทธิ์

2) การพัฒนาเป็นผู้ประกอบการใหม่ (New entrepreneur) ที่ดำเนินธุรกิจในลักษณะโรงงานผลิตและจัดจำหน่ายในประเทศไทยและส่งออกไปยังต่างประเทศ

- กลุ่มลูกค้าเป้าหมายหลักในช่วงแรกคือ กลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมและฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิดที่ใช้พัดลมระบายอากาศจำนวนมากและมีการเปิดใช้งาน 7-24 ชั่วโมงต่อวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- ข้อดีคือ สามารถสร้างการจ้างงานบุคลากรภายในประเทศเพื่อสนับสนุนการผลิตให้บรรลุตามยอดจำหน่ายประมาณการ และสร้างชื่อเสียงให้กับประเทศในฐานะบริษัทผู้คิดค้นและผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลารายแรกของโลก
- ข้อด้อยคือ ข้อจำกัดทางการเงินในการลงทุน กรณีที่ยอดสั่งซื้อผลิตภัณฑ์มีมากกว่าตัวเลขคาดการเป็นจำนวนมากนั้น การขยายกำลังการผลิตจะต้องใช้งบประมาณและบุคลากรเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว จึงจำเป็นที่จะต้องวางแผน ประเมินความเสี่ยงและหาแหล่งทุนเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดได้

3) การเป็นผู้ประกอบการใหม่ (New entrepreneur) ที่ดำเนินธุรกิจในรูปแบบการร่วมทุน (Joint Venture) กับโรงงานผู้ผลิตกังหันลมรายใหญ่อันดับต้น ๆ ของโลกที่มีศักยภาพในการผลิตและเทคโนโลยีในการผลิตระดับอุตสาหกรรมอยู่แล้ว และมีแนวทางในการดำเนินธุรกิจไปในทิศทางเดียวกัน โดยกลุ่มบริษัทเป้าหมายที่จะร่วมทุนแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 บริษัทผู้ผลิตกังหันลมรายใหญ่ 10 อันดับแรกของโลก (VizBibe, 2022)

อันดับ	**บริษัท**	**ที่ตั้งสำนักงานใหญ่**	**การผลิตโดยรวม (Gigawatts)**
1	Vestas	Aarhus, Denmark	9.60
2	Siemens Gamesa	Biscay, Spain	8.79
3	Goldwind	Beijing, China	8.25
4	GE	Boston, U.S.	7.37
5	Envision	Shanghai, China	5.78
6	MingYang	Zhongshan, China	4.50
7	Windey	Zheijiang, China	2.06
8	Nordex	Hamburg, Germany	1.96
9	Shanghai Electric	Shanghai, China	1.71
10	CSIC	Chonggin, China	1.46

- ข้อดีคือ บริษัทผู้ผลิตกังหันลมรายใหญ่เหล่านี้มีทรัพยากรและเทคโนโลยีที่พร้อม สามารถต่อยอดทำการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อออกสู่ตลาดได้อย่างรวดเร็ว
- ข้อด้อยคือ การที่เป็นบริษัทผู้ประกอบการใหม่ซึ่งมีอำนาจการต่อรองน้อยกว่า การทำสัญญาร่วมทุนจะต้องพิจารณาโดยละเอียดถึงความเหมาะสม เพื่อให้เกิดประโยชน์ร่วมกันสูงสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการศึกษาวิจัยนี้มีความเห็นว่าวิธีการนำเทคโนโลยีไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ที่เหมาะสมคือการเป็นผู้ประกอบการใหม่ (New entrepreneur) ที่ก่อตั้งธุรกิจในลักษณะโรงงานผู้ผลิตและจัดจำหน่ายในประเทศไทยและส่งออกไปต่างประเทศ เพื่อเป็นการสร้างการจ้างงานในประเทศเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์นวัตกรรมที่คิดค้นโดยคนไทย ในฐานะผู้ที่ยื่นขอรับความคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้ารายแรกสามารถสร้างชื่อเสียงและรายได้ให้กับประเทศต่อไป

5.5 การวางแผนธุรกิจโรงงานผลิตและจัดจำหน่ายในประเทศไทยและส่งออกไปต่างประเทศ

จากการเห็นโอกาสในการดำเนินธุรกิจโดยการเป็นผู้ประกอบการใหม่ (New entrepreneur) ที่ก่อตั้งและดำเนินธุรกิจในลักษณะโรงงานผู้ผลิตและจัดจำหน่ายกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมในประเทศไทยและส่งออกไปต่างประเทศ การวางแผนธุรกิจที่ดีจะทำให้สามารถสร้างความได้เปรียบและดำเนินธุรกิจให้มีกำไรอย่างมั่นคงยั่งยืนในสภาวะที่การแข่งขันทางธุรกิจที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 แนวคิดความเป็นมาของธุรกิจ

พลังงานนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ โดยเฉพาะแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละภาคส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ซึ่งในอนาคตอาจเกิดสภาวะวิกฤติด้านพลังงานมากขึ้นเนื่องจากแหล่งพลังงานฟอสซิลที่มีอยู่นั้นมีจำกัด ตลอดจนค่าครองชีพที่สูงขึ้นและปัญหาโลกร้อน จึงทำให้หน่วยงานภาครัฐและเอกชนพยายามศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ขึ้นมาเพื่อผลิตพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียนที่เป็นพลังงานสะอาดในรูปแบบต่าง ๆ จากแหล่งทรัพยากรที่มีอยู่ เช่น แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ไฮโดรเจน ก๊าซชีวภาพ และความร้อนจากใต้พิภพ เป็นต้น โดยลมระบายที่ถูกปล่อยทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้า และที่พักอาศัย ก็เป็นอีกแหล่งทรัพยากรหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงเนื่องจากมีความเร็วลมคงที่และมีความแน่นอนในส่วนของเวลาในการเปิดใช้งาน แต่ยังไม่มีเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพราะการนำกังหันลมแบบดั้งเดิมที่มีในปัจจุบันมาใช้ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลมระบายลดลงและต้นทุนพลังงานเพิ่มขึ้น ทำให้ไม่มีการนำแหล่งทรัพยากรลมระบายมาใช้ประโยชน์เลย

การที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา พัฒนาและพิสูจน์ว่าต้นแบบกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาเป็นนวัตกรรมที่เหมาะสมและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายจากภาคอุตสาหกรรม และการที่แหล่งทรัพยากรลมระบายที่ไม่เคยนำมาใช้ประโยชน์มีเป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นว่านวัตกรรมดังกล่าวสามารถต่อยอดพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ ที่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายได้

5.5.2 วิสัยทัศน์

เป็นผู้พัฒนาผลิตภัณฑ์และบริการที่เป็นนวัตกรรมใหม่ที่สร้างผลกำไร ให้คุณค่าเชิงกลยุทธ์แก่ลูกค้าและสร้างบริษัทที่สามารถดึงดูด คัดเลือกและรักษาพนักงานที่มีความสามารถช่วยกันทำงานเพื่อสร้างสรรค์ให้โลกดีขึ้น

5.5.3 พันธกิจ

1) สร้างมูลค่าสูงสุดให้กับลูกค้าด้วยสินค้าคุณภาพและบริการหลังการขายที่ประทับใจ

2) พัฒนาแนวทางที่สร้างผลกระทบเชิงบวกเพื่อโลกที่ดีขึ้น

5.5.4 เป้าหมายในการดำเนินธุรกิจ

ระยะสั้น (1-5 ปี)

- อัตราการเติบโตของยอดขายเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 6% ต่อปี
- มีพันธมิตรเชิงกลยุทธ์เป็นผู้ผลิตหรือผู้ผลิตวัตถุดิบกังหันชั้นนำอย่างน้อยหนึ่งรายขึ้นไป

ระยะยาว (6-10 ปี)

- รักษายอดขายคงที่และมีกำไรอย่างต่อเนื่อง
- พัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ประยุกต์แนวคิดกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปสำหรับการใช้งานในด้านอื่น ๆ

5.6 แผนการตลาด

ในการทำธุรกิจจำเป็นต้องมีแผนการตลาดที่ดี เพื่อที่จะหาทางนำธุรกิจเข้าไปหากลุ่มลูกค้าให้ได้มากที่สุด โดยจะต้องมีความชัดเจนการในการตั้งเป้าหมายสำหรับกับกลยุทธ์การตลาด เพื่อทำให้บุคลากรในองค์กรสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้องและชัดเจนมากขึ้น ซึ่งสามารถวัดผลการปฏิบัติการได้ตลอดเวลา ทำให้สามารถนำมาพัฒนา ปรับปรุง เพื่อให้พร้อมกับการแข่งขันอยู่เสมอ โดยนำเครื่องมือในการวิเคราะห์ตลาด เช่น การกำหนดส่วนแบ่งตลาด กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย และตำแหน่งผลิตภัณฑ์ (STP) และการวิเคราะห์ส่วนประสมทางการตลาด 4P (Marketing Mix) มาใช้เพื่อวางแผนการตลาด โดยมีรายละเอียดดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.6.1 การกำหนดส่วนแบ่งตลาด กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย และตำแหน่งผลิตภัณฑ์

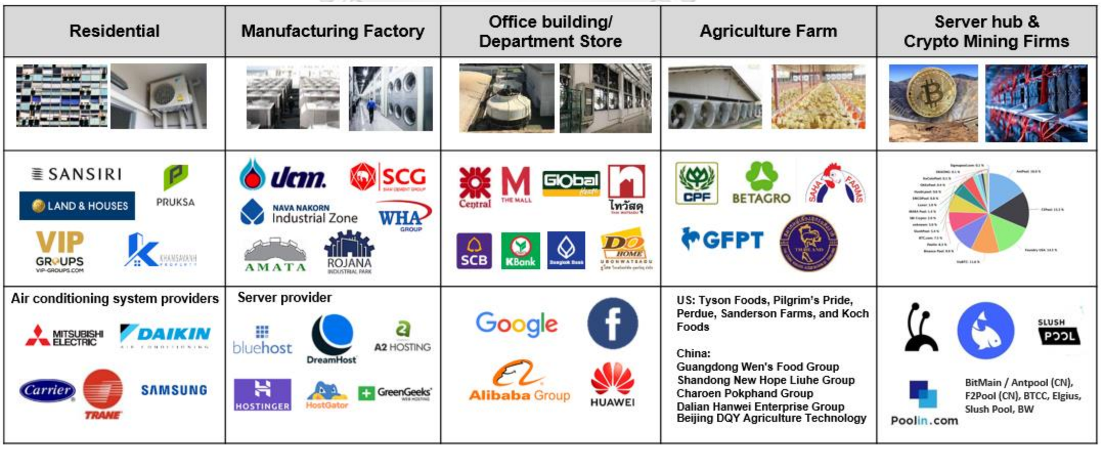
การวิเคราะห์ในการวางแผนการตลาดโดยใช้การกำหนดส่วนแบ่งตลาด (Segment) กลุ่มลูกค้าเป้าหมาย (Target) และตำแหน่งผลิตภัณฑ์ (Position) หรือที่เรียกโดยย่อว่าการวิเคราะห์ STP เป็นกลยุทธ์ในการกำหนดทิศทางในการสร้างกลยุทธ์การตลาดอื่น ๆ เพื่อทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างตรงจุดมากที่สุด รายละเอียดการวิเคราะห์แต่ละส่วนมีดังนี้

1) การแบ่งส่วนการตลาด (Segmentation)

ตลาดของผลิตภัณฑ์ใหม่นี้สามารถแบ่งส่วนตลาดออกเป็น 5 ส่วนคือ

- ที่พักอาศัย (Residential) ที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบคอนเดนซิ่งยูนิต
- โรงงานอุตสาหกรรมการผลิต (Manufacturing Factory) ที่มีการติดตั้งพัดลมอุตสาหกรรมเพื่อระบายอากาศและระบบปรับอากาศขนาดใหญ่
- อาคารสำนักงานและห้างสรรพสินค้า (Office Building, Department Store) ที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศขนาดใหญ่
- ฟาร์มการเกษตร (Agriculture Farm) ที่มีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาดใหญ่ในโรงเรือนระบบปิด
- ผู้ให้บริการการจัดเก็บข้อมูลและการทำเหมืองขุดบิตคอย (Server Hub, Crypto Mining Firm) ที่มีการติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาดใหญ่เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะระบบทำงาน

โดยตัวอย่างกลุ่มลูกค้าเป้าหมายที่จำแนกเป็นกลุ่มลูกค้าในประเทศและต่างประเทศของแต่ละส่วนตลาดแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างกลุ่มลูกค้าเป้าหมายของแต่ละส่วนตลาด

2) การเลือกกลุ่มตลาดเป้าหมาย (Targeting)

กลุ่มตลาดเป้าหมายของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบาย จะมุ่งเน้นไปที่กลุ่มตลาดโรงงานอุตสาหกรรมการผลิต (Manufacturing Factory) และกลุ่มตลาดฟาร์ม

การเกษตรสมัยใหม่ (Modern Agriculture Farm) ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตและฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิดต่าง ๆ ที่มีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศที่มีความเร็วลมสูงเป็นจำนวนมาก แต่ไม่เคยถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์มาก่อน โดยในประเทศไทยและทั่วโลกมีโรงงานลักษณะนี้เป็นจำนวนมาก

สามารถประเมินกลุ่มเป้าหมายพิจารณาจากข้อมูลจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตและฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิดต่าง ๆ จากศูนย์สารสนเทศโรงงานอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมปศุสัตว์ โดยใช้ TAM SAM SOM Model ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตลาดรวมสำหรับผลิตภัณฑ์และการบริการ (Total Available Market, TAM) เป็นตลาดรวมที่จะสามารถตอบสนองกับผลิตภัณฑ์หรือบริการ เป็นสิ่งที่บอกถึงรายได้สูงสุดที่สามารถทำได้ในระยะยาวหากครองตลาดได้ถึงร้อยละ 100 คำนวณจากจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตทุกประเภท ได้แก่

- ผลิตภัณฑ์จากพืช (Basic agro-Industry)
- อุตสาหกรรมอาหาร (Food)
- อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม (Beverage)
- สิ่งทอ (Textile)
- อุตสาหกรรมเครื่องแต่งกายยกเว้นรองเท้า (Wearing Apparel)
- ผลิตหนังสัตว์และผลิตภัณฑ์จากหนังสัตว์ (Leather products & Footwear)
- แปรรูปไม้และผลิตภัณฑ์จากไม้ (Wood & Wood products)
- เครื่องเรือนหรือเครื่องตกแต่งในอาคารที่ทำจากไม้ แก้ว ยาง หรืออโลหะอื่น (Furniture & Fixture)
- ผลิตกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ (Paper & Paper products)
- การพิมพ์ การเย็บเล่ม ทำปกหรือการทำแม่พิมพ์ (Printing , Publishing , Allied products)
- เคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เคมี (Chemical & Chemical products)
- ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม (Petroleum products)
- ยางและผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber products)
- ผลิตภัณฑ์พลาสติก (Plastic products)
- ผลิตภัณฑ์อโลหะ (Non-metal products)
- ผลิตโลหะขั้นมูลฐาน (Basic metal products)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ผลิตภัณฑ์โลหะ (Fabricated products)
- ผลิตเครื่องจักรและเครื่องกล (Machinery)
- ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ (Electrical Machinery and Supplies)
- ผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ รวมทั้งการซ่อมยานพาหนะและอุปกรณ์ (Transport Equipment)
- การผลิตอื่น ๆ (Other Manufacturing Industries)

โดยจำนวนโรงงานทั่วประเทศไทยมีจำนวนรวม 72,504 โรงงาน ในปี 2564 (ที่มา ศูนย์ข้อมูลธุรกิจอุตสาหกรรม ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมโรงงานอุตสาหกรรม) และฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิดทั่วประเทศไทย

ตลาดที่ตั้งเป้าหมาย (Serviceable Available Market, SAM) เป็นตลาดที่จะสามารถครองได้สำหรับผลิตภัณฑ์และการบริการทั้งของเราและคู่แข่ง คำนวณจากจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตทุกประเภท ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ จำนวนรวม 55,948 โรงงาน ในปี 2564 (ที่มา ศูนย์ข้อมูลธุรกิจอุตสาหกรรม ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมโรงงานอุตสาหกรรม) และฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิดในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้

ตลาดที่ตั้งเป้าว่าขายได้จริง (Serviceable Obtainable Market, SOM) เป็นส่วนที่ผลิตภัณฑ์และการบริการของเราสามารถครองได้หลังจากผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดรวมถึงกำลังการผลิต คำนวณจากจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตที่มีเงินลงทุนรวมมากกว่า 2 แสนล้านบาท ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ ประกอบด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- ผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ รวมทั้งการซ่อมยานพาหนะและอุปกรณ์ (Transport Equipment)
- อุตสาหกรรมอาหาร (Food)
- เคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เคมี (Chemical & Chemical products)
- ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ (Electrical Machinery and Supplies)
- ผลิตภัณฑ์โลหะ (Fabricated products)
- ยางและผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber products)
- ผลิตภัณฑ์พลาสติก (Plastic products)
- ผลิตเครื่องจักร และเครื่องกล (Machinery)

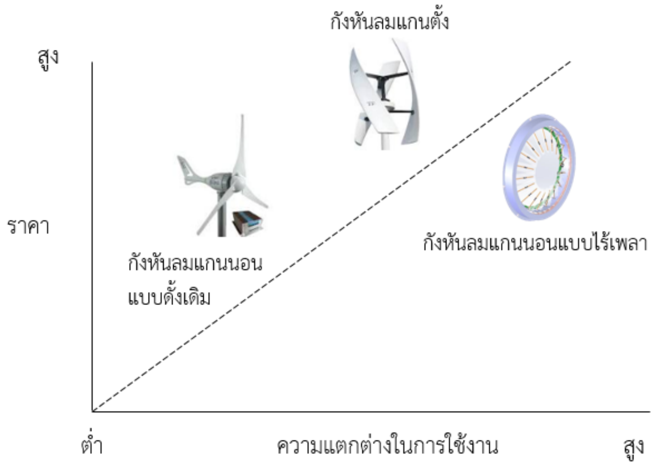
- ผลิตภัณฑ์อโลหะ (Non-metal products)
- ผลิตโลหะขั้นมูลฐาน (Basic metal products)
- ผลิตภัณฑ์จากพืช (Basic agro-Industry)
- ผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม (Petroleum products)

โดยจำนวนโรงงานมีจำนวนรวม 48,890 โรงงาน ในปี 2564 (ที่มา ศูนย์ข้อมูลธุรกิจอุตสาหกรรม, ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กรมโรงงานอุตสาหกรรม) และฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิด ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา สมุทรปราการ ชลบุรี ระยอง นครปฐม นครราชสีมา เป็นต้น

3) การกำหนดจุดยืนของผลิตภัณฑ์ (Positioning)

การกำหนดจุดยืนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาพิจารณาในส่วนของราคาและความแตกต่างในการใช้งานเปรียบเทียบกับกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันคือกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกังหันลมแกนตั้ง แนวคิดการนำแหล่งทรัพยากรลมระบายที่ถูกปล่อยทิ้งมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นแนวคิดที่ถูกนำเสนอมาก่อนแล้ว แต่ข้อจำกัดของกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกังหันลมแกนตั้งเมื่อนำมาติดตั้งใช้งานเข้ากับพัดลมระบายอากาศในระยะประชิดคือ การหมุนของใบพัดที่ความเร็วสูงทำให้เกิดลักษณะที่ใบพัดขวางทางลมที่ระบายออกจากระบบและส่งผลให้มอเตอร์ของพัดลมระบายอากาศใช้กระแสไฟฟ้าในการทำงานมากขึ้น ในกรณีที่จะนำมาการติดตั้งและไม่ให้กระทบกับระบบระบายอากาศต้องทำการติดตั้งให้มีระยะห่างจากพัดลมระบายอากาศอย่างน้อย 1-2 เมตร ซึ่งไม่เหมาะสำหรับบริเวณที่มีพื้นที่จำกัด ทำให้กังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกังหันลมแกนตั้งสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย การที่กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งเข้ากับพัดลมระบายอากาศในพื้นที่ที่จำกัดได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบลมระบายจึงเป็นการสร้างความแตกต่างในการใช้งานสูงกว่ากังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและกังหันลมแกนตั้ง ในส่วนของราคากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถผลิตและจำหน่ายในราคาที่ใกล้เคียงกับกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและถูกกว่ากังหันลมแนวตั้งได้เนื่องจากการผลิตโครงสร้างและใบพัดไม่มีความซับซ้อนไม่มากนัก สามารถใช้วัตถุดิบในประเทศได้ โดยการเปรียบเทียบจุดยืนของผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจึงเน้นการสร้างความแตกต่างในการใช้งานผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 5.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



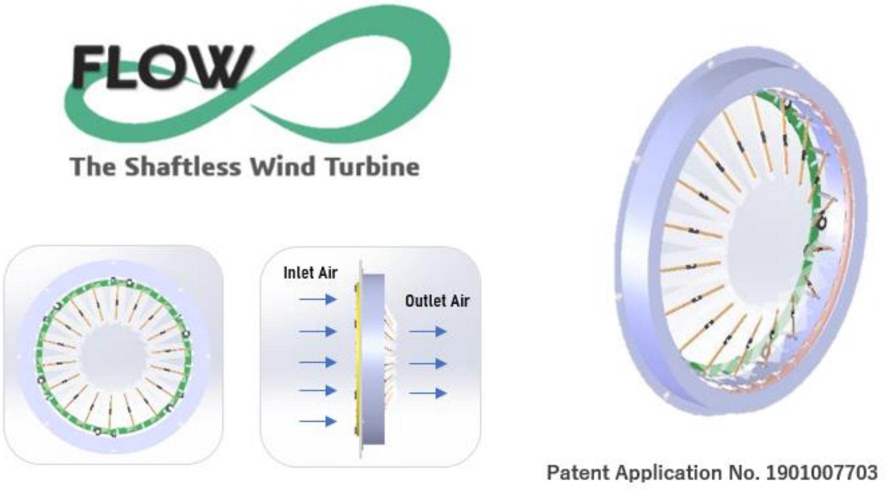
รูปที่ 5.4 จุดยืนของผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

5.6.2 การวิเคราะห์ส่วนประสมทางการตลาด 4P (Marketing Mix)

การวิเคราะห์ส่วนประสมทางการตลาด 4P มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนการตลาดที่เหมาะสมกับสินค้าที่มีอยู่หรือกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 4 ส่วนด้วยกันคือ ผลิตภัณฑ์ (Product) ราคา (Price) การส่งเสริมการขาย (Promotion) และช่องทางจัดจำหน่าย (Place) การกำหนดกลยุทธ์การตลาด 4P ให้ไปในทิศทางเดียวกันจะทำให้ธุรกิจสามารถเข้าถึงความต้องการของกลุ่มลูกค้าและบรรลุวัตถุประสงค์ทางการตลาดได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลิตภัณฑ์ (Product)

นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น ลมธรรมชาติ ลมทิ้งจากระบบระบายอากาศที่มีพัดลมเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการระบายอากาศจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งที่มีความเร็วตั้งแต่ 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ของเหลวหรือก๊าซใด ๆ ที่ถูกระบายทิ้งผ่านระบบท่อโดยอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกลหรือจากแรงโน้มถ่วง ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ลักษณะของต้นแบบผลิตภัณฑ์และกำลังไฟฟ้าเป้าหมายที่ผลิตได้ของแต่ละรุ่นแสดงดังรูปที่ 5.5 ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุด (Max Power) ในแต่ละรุ่นเป็นกำลังไฟฟ้าเป้าหมายที่กำหนดไว้สำหรับผลิตภัณฑ์จริงที่จะผลิตออกมาจำหน่ายในอนาคต



Product Type	Model	Rotor Diameter	Max Power
Standard	SWT-S050	0.5 m	300 W
	SWT-S100	1.0 m	1000 W
	SWT-S150	1.5 m	1700 W
Customized	SWT-CXXX	› 1.5 m	› 1700 W

- ☑ High-efficiency wind turbine
- ☑ Cost-effective solution
- ☑ Low cut-in wind speed (4 m/s)
- ☑ Need only small space for installation (5 mm distance away from wind sources)
- ☑ Easy for installation & maintenance

รูปที่ 5.5 ต้นแบบผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลของของไหล เช่น พัดลมระบายอากาศได้ในระยะประชิดทั้งแนวตั้งและแนวนอน ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งสามารถติดตั้งในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดได้ กรณีที่นำกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้ผลิตไฟฟ้าจากลมทิ้งจากระบบลมระบายหรือของเหลวหรือก๊าซใด ๆ ที่ถูกระบายทิ้งผ่านระบบท่อโดยอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกลหรือจากแรงโน้มถ่วงที่มีความเร็วการไหลแบบคงที่และไหลเป็นเวลาต่อเนื่องนั้น ของไหลสามารถไหลผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปได้โดยไม่มีการไหลย้อนกลับไปยังอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลของของไหล โดยไม่ส่งผลกระทบเชิงลบให้กับระบบระบายอากาศและต้นทุนพลังงานของอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลไม่แตกต่างจากระบบที่ไม่มีการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

รูปที่ 5.6 ลักษณะการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเข้ากับอุปกรณ์ต้นกำเนิดลมระบาย

2) ราคา (Price)

ราคาผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มีค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดแตกต่างกัน โดยพิจารณาจากต้นทุนในการวิจัยและพัฒนากระบวนการ ตลอดจนเครื่องมืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องและวัตถุดิบต่าง ๆ เพื่อให้ลูกค้ามีความคุ้มค่าในการนำไปใช้งาน โดยจำแนกเป็นประเภทผลิตภัณฑ์แบบมาตรฐานและแบบสั่งทำเฉพาะเพื่อให้เหมาะสมกับระบบลมระบายที่ลูกค้ามีอยู่ รายละเอียดราคาแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ราคาผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

ประเภทผลิตภัณฑ์	**รุ่น**	**ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด**	**กำลังการผลิตไฟฟ้าเป้าหมาย**	**ราคาขายต่อหน่วย**
มาตรฐาน (Standard)	SWT-S050	0.5 เมตร	0.3 kWh	20,000 บาท
	SWT-S100	1.0 เมตร	1.0 kWh	45,000 บาท
	SWT-S150	1.5 เมตร	1.7 kWh	100,000 บาท
แบบสั่งทำเฉพาะ (Customize)	SWT-C0XX	มากกว่า 1.0 เมตร	มากกว่า 1.0 kWh	ขึ้นอยู่กับขนาดที่ลูกค้าต้องการ

3) การส่งเสริมการจำหน่าย (Promotion)

การส่งเสริมการจำหน่ายเป็นกิจกรรมที่มีวัตถุประสงค์เพื่อดึงดูดลูกค้าใหม่ รักษาฐานลูกค้าเก่า เพิ่มรายได้จากการขาย โดยประโยชน์ของการส่งเสริมการจำหน่ายทำให้ลูกค้าเพิ่มการจดจำและมีส่วนร่วมกับสินค้า ดึงดูดลูกค้าใหม่และขยายฐานลูกค้า กระตุ้นการตัดสินใจซื้อสินค้า สร้างความภักดีของลูกค้าให้ใช้สินค้าซ้ำ และรวบรวมข้อมูลลูกค้าและข้อมูลเชิงลึกสำหรับกลยุทธ์ทางการตลาดในอนาคตต่อไป การส่งเสริมการจำหน่ายจะต้องมีการกำหนดกลยุทธ์ที่เหมาะสมกับรูปแบบการดำเนินธุรกิจเพื่อให้บรรลุเป้าหมายที่ต้องการ โดยจะเน้นไปที่กลุ่มเป้าหมาย 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มผู้ลูกค้า กลุ่มคนกลาง และกลุ่มพนักงานขาย ดังนี้

- กลุ่มผู้บริโภคเป็นกลุ่มที่ต้องให้ความใส่ใจมากที่สุด เนื่องจากทุกการขายจะเน้นไปสู่ผู้บริโภคคนสุดท้าย (ultimate consumer) โดยการส่งเสริมการจำหน่ายในกลุ่มบริโภคมีกิจกรรมดังนี้ การการจัดบูธแสดงสินค้าสาธิตวิธีใช้ต่อหน้าลูกค้า โดยจัดที่ศูนย์ประชุมนิทรรศการ งานโรงแรมหรืออีเวนต์ต่าง ๆ เพื่อให้ลูกค้าหรือผู้ที่กำลังสนใจจำนวนมากได้เห็นสินค้าจริง การมีทีมงานให้คำแนะนำในการเลือกใช้กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาให้เหมาะสมกับการใช้งานของลูกค้า การมีส่วนลดในการติดตั้งและมีบริการหลังการขาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และการบริจาคเพื่อการกุศล ซึ่งเป็นการใช้กลยุทธ์ดึง (Pull strategy) เพื่อจูงใจให้เกิดการซื้อจำนวนมากขึ้น ตัดสินใจซื้อได้รวดเร็วหรือเกิดความต้องการที่จะทดลองใช้สินค้า

- กลุ่มคนกลางเป็นกลุ่มคนที่ติดต่อระหว่างผู้ลูกค้าและพนักงานขาย การใช้กลยุทธ์ส่งเสริมการขายแบบกลยุทธ์ผลัก (Push strategy) โดยการกำหนดนโยบายในการจะให้รางวัล แถมสินค้า การให้โควตา การให้เครดิตแก่ผู้จัดจำหน่ายสำหรับผู้ที่สามารถซื้อผลิตภัณฑ์และกระตุ้นการซื้อให้กับผู้บริโภค นำผลิตภัณฑ์ออกจัดจำหน่ายได้มากที่สุด เป็นต้น จะทำให้พ่อค้าคนกลาง (Middleman) ผู้จัดจำหน่าย (Distributor) หรือผู้ขาย (Dealer) ซื้อและเก็บผลิตภัณฑ์ไว้เพื่อการจำหน่ายในปริมาณที่มากขึ้น
- กลุ่มพนักงานขายเป็นกลุ่มที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากลุ่มผู้บริโภค เพราะกลุ่มที่คอยให้ข้อมูลเกี่ยวกับสินค้า รายละเอียด ตัวแทนนำเสนอแบรนด์มากที่สุด การส่งเสริมการขายที่มุ่งเน้นกลุ่มนี้ เพื่อโน้มน้าวให้กลุ่มเป้าหมายกลายมาเป็นลูกค้าถือว่าเป็นการใช้กลยุทธ์ผลัก (Push strategy) โดยมีการให้รางวัล โบนัส แก่พนักงานที่ทำยอดขายได้ดี เพื่อเป็นการสร้างแรงจูงใจกระตุ้นทำยอดขายมากขึ้น ขยายฐานลูกค้าหรือหาผู้จัดจำหน่ายเพิ่มเติมให้กับบริษัท

4) ช่องทางการจัดจำหน่าย (Place)

กลยุทธ์ในการเข้าถึงตลาดเป้าหมาย โดยผ่านกลยุทธ์การตลาดโดยการเปิดตัวสินค้าให้กับกลุ่มเป้าหมายนั้น จะต้องมีกลยุทธ์ในการขายเพื่อดึงดูดให้กลุ่มเป้าหมายสนใจที่จะมาซื้อสินค้าและเล็งเห็นถึงประโยชน์และความสำคัญของสินค้า โดยมุ่งเน้นการนำเสนอคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์และความคุ้มค่าในการติดตั้งอุปกรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน โดยเลือกที่จะจัดแสดงผลิตภัณฑ์ในงานแสดงเทคโนโลยีและนวัตกรรมต่าง ๆ และนำเสนอรายละเอียดและแนะนำการออกแบบและติดตั้งกับกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย 3 ระดับ คือ

- การทำธุรกิจระหว่างองค์กรกับลูกค้ารายย่อย (Business to Customer, B2C) โดยการเปิดจำหน่ายสินค้าในรูปแบบร้านค้าออนไลน์และเว็บไซต์ของบริษัท
- การทำธุรกิจระหว่างองค์กรกับองค์กร (Business to Business, B2B) โดยบริษัทขายสินค้าหรือบริการให้กับอีกบริษัทหนึ่ง เพื่อส่งมอบสินค้าให้เจ้าของธุรกิจนำไปใช้ประโยชน์ต่อโดยเฉพาะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- การทำธุรกิจระหว่างองค์กรกับภาครัฐ (Business to Government, B2G) โดยการลงทะเบียนผลิตภัณฑ์ของบริษัทเข้าสู่ระบบบัญชีนวัตกรรมไทย เพื่อให้หน่วยงานภาครัฐสามารถนำไปใช้ประกอบการบริหารจัดการงบประมาณและหรือจัดซื้อจัดจ้างได้

5.7 แผนการปฏิบัติงาน (Operation Plan)

แผนการปฏิบัติงานเป็นแผนที่ถ่ายทอดแผนกลยุทธ์ลงสู่ภาคปฏิบัติเพื่อให้เกิดการดำเนินงานจริงตามเป้าหมายของธุรกิจที่กำหนดไว้ ประกอบไปด้วย แผนการผลิตและแผนการบริหาร มีรายละเอียดดังนี้

5.7.1 แผนการผลิต

การผลิตให้ได้ในปริมาณตามที่ลูกค้าต้องการเป็นวัตถุประสงค์หลักที่สำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งของการบริหารการผลิต ซึ่งการที่จะสามารถผลิตได้ตามปริมาณที่กำหนดไว้ซึ่งต้องอาศัย เงินทุน แรงงาน วัตถุดิบ ตลอดจนเครื่องจักรอุปกรณ์ต่าง ๆ แต่เนื่องจากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงต้องวางแผนใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยคำนึงถึงผลลัพธ์ต่อองค์การในระยะสั้นควบคู่กับระยะยาว และใช้ปัจจัยเชิงปริมาณเป็นหลักในการพิจารณาประกอบกับปัจจัยเชิงคุณภาพให้มีกำลังการผลิตที่เหมาะสม ไม่เกิดปัญหาการผลิตได้น้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าเพราะกำลังการผลิตน้อยเกินไป และไม่เกิดปัญหาเครื่องจักรมากเกินไปจนกลายเป็นความสูญเปล่าเพราะกำลังการผลิตมากเกินไป

การวางแผนการผลิตจึงเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญในการผลักดันให้ธุรกิจก้าวไปสู่ความสำเร็จในการสร้างรายรับเพิ่มขึ้นได้ โดยกระบวนการวางแผนการผลิต ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1) จัดทำแผนความต้องการของลูกค้า (Customer Requirement Planning)

แผนความต้องการของลูกค้าเป็นขั้นตอนแรกของการวางแผนกการผลิต ข้อมูลความต้องการของลูกค้าอาจจะได้มาจากหลายทาง เช่น จากลูกค้าโดยตรง ข้อมูลความต้องการของลูกค้าจากการพยากรณ์ เป็นต้น

2) จัดทำแผนความต้องการวัสดุ (Material Requirement Planning)

แผนความต้องการวัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อจัดเตรียมจัดหาวัสดุ ชิ้นส่วน วัสดุกึ่งสำเร็จรูปให้เพียงพอต่อความต้องการในการผลิต ซึ่งสามารถประมาณการได้จากประมาณการความต้องการของลูกค้า รายการวัสดุที่จะต้องใช้จะถูกกำหนดไว้ในบัญชีรายการวัสดุ (Bill Of Material, BOM) ซึ่งจะระบุชนิดของวัสดุและชิ้นส่วน ปริมาณการใช้ต่อหน่วย รวมถึงข้อมูลที่จำเป็นอื่น ๆ เช่น ระยะเวลาในการจัดส่งจากผู้ผลิตสินค้า (Supplier) ในกรณีที่มีการสั่งซื้อจากภายนอก กำลังการผลิตภายในสำหรับกรณีที่ชิ้นส่วนเอง ซึ่งข้อมูลทั้งหมดต้องระบุให้มีความชัดเจนทั้งด้านปริมาณและระยะเวลาส่งมอบ

3) การวางแผนการผลิต

หลังจากที่ได้แผนความต้องการของลูกค้าและมีการเตรียมการวัสดุให้เพียงพอแล้ว ก็จะดำเนินการวางแผนการผลิต ซึ่งมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

3.1) การวางแผนกระบวนการ (Process Planning)

การวางแผนกระบวนการเริ่มต้นด้วยการพิจารณาภาพรวมของการผลิตเพื่อจัดลำดับความสำคัญของกระบวนการทำงานให้เสร็จไปตามลำดับ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นจุดเริ่มต้นในการช่วยย่นระยะเวลาการผลิตได้ดี หากทีมวางแผนกำหนดกระบวนการ และลำดับในการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2) การวางแผนเครื่องจักร (Machine Planning)

เนื่องจากการการทำงานเพื่อให้ได้ผลผลิตทันเวลา เครื่องจักรอาจถูกใช้งานอย่างหนัก ไม่มีการหยุดพักผลิต ด้วยเหตุนี้อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตของเครื่องจักรลดลงได้ อาจส่งผลทำให้การผลิตหยุดชะงักและล่าช้าไม่เป็นไปตามแผนได้ การวางแผนตรวจเช็กสภาพของเครื่องจักรให้มีความพร้อมอยู่เสมอก่อนเริ่มการผลิตในแต่ละครั้งจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว

3.3) วางแผนด้านแรงงาน (Man Planning)

ดำเนินการกำหนดเวลาการทำงานและการพักที่ชัดเจน เป็นไปตามกฎหมายด้านแรงงานและมีการมอบหมายงานที่เหมาะสมต่อความสามารถของพนักงาน ตลอดจนจัดอบรมเพื่อพัฒนาศักยภาพของพนักงานอยู่เสมอ

3.4) การวางแผนการจัดเก็บ (Store Planning)

การวางแผนการจัดเก็บมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมวัสดุคงคลังให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมพียงพอต่อการใช้งานและไม่สูงเกินไปภายใต้ระดับที่กำหนด ซึ่งการวางแผนการจัดเก็บนี้รวมถึงการวางแผนการจัดเก็บสินค้าในระหว่างผลิต สินค้ากึ่งสำเร็จรูปและสินค้าสำเร็จรูปด้วย

4) การติดตาม ประเมินผล และปรับแผนให้มีประสิทธิภาพ

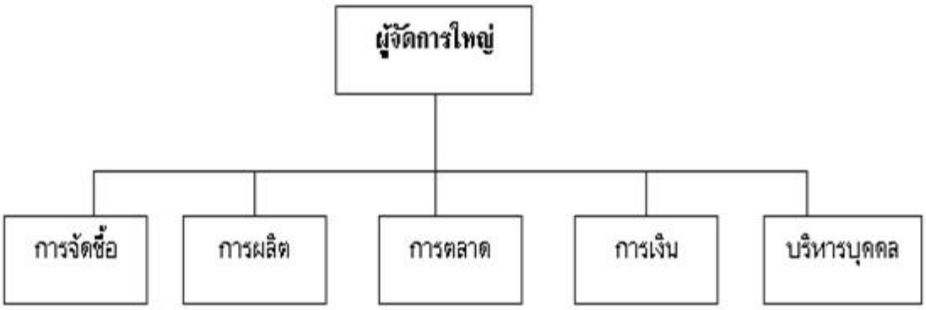
การติดตาม ประเมินผล และปรับแผนให้มีประสิทธิภาพ โดยทำการตรวจสอบและประเมินคุณภาพของการผลิตอยู่เสมอ รวมถึงการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มการผลิตจนกระทั่งงานเสร็จสิ้น เพื่อนำมาปรับแก้การวางแผนการผลิตในอนาคต จะทำให้บรรลุเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจากนี้การตรวจสอบสินค้าก่อนส่งมอบแก่ลูกค้าเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อเสริมสร้างคุณภาพที่ดีและความน่าไว้วางใจของโรงงานในการผลิตสินค้า จึงเป็นส่วนหนึ่งที่ระบุอยู่ในแผนการผลิตเช่นกัน ซึ่งการประมาณการกำลังการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแต่ละรุ่นต่อปีแสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 กำลังการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแต่ละรุ่นต่อปี

รุ่น	**กำลังการผลิตสูงสุดต่อปี (ชุด)**
SWT-S050	9,000
SWT-S100	4,000
SWT-S150	2,000
รวมทั้งสิ้น	15,000

แผนบริหารเป็นส่วนสำคัญเพื่อขับเคลื่อนองค์กรให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน จึงมีการจัดโครงสร้างองค์การแบ่งตามหน้าที่ (Functional Organization Structure) ที่กำหนดหน้าที่ความรับผิดชอบของแต่ละแผนกและความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งงานต่าง ๆ ภายในโครงสร้าง ซึ่งผลดีก่อให้เกิดการได้คนมีความสามารถทำงานในแผนกนั้น ๆ ทั้งยังฝึกบุคคลในแผนกให้มีความเชี่ยวชาญกับหน้าที่ของงานนั้น ๆ อย่างลึกซึ้ง และสามารถประสานงานกันได้ตลอดเวลา โดยฝ่ายบริหารระดับสูงนั้นก็สนับสนุนในการกำหนดนโยบายไว้กว้าง ๆ โดยโครงสร้างองค์การประกอบด้วยฝ่ายจัดซื้อ ฝ่ายผลิต ฝ่ายการตลาด ฝ่ายการเงิน และฝ่ายบุคคล ดังรูปที่ 5.7 อย่างไรก็ตามรูปแบบโครงสร้างองค์การสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมกับสถานการณ์ของธุรกิจในแต่ละช่วงเวลาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการบริหารสูงสุด



รูปที่ 5.7 โครงสร้างองค์การ

5.8 แผนการเงินและการลงทุน

แผนการเงินและการลงทุนเป็นส่วนที่อธิบายแผนในรูปของตัวเลขโดยรวบรวมข้อมูลจากแผนการตลาด แผนการผลิต รวมถึงกลยุทธ์ต่าง ๆ เพื่อนำมาซึ่งกำไรของธุรกิจ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดอีกส่วนหนึ่งของแผนธุรกิจเนื่องจากผู้ลงทุนหรือผู้ให้กู้จะพิจารณาจากผลลัพธ์ในแผนการเงินนี้เพื่อประกอบการตัดสินใจในการลงทุนหรือให้กู้ โดยรายละเอียดการจัดการทางการเงินเพื่อวางแผนด้าน

การลงทุนและการจัดหาเงินทุน รวมไปถึงการประมาณการผลตอบแทนจากการลงทุนสำหรับธุรกิจผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์แสดงดังนี้

5.8.1 การประมาณการลงทุน

จากการก่อตั้งบริษัทในช่วงแรก งบประมาณการลงทุนในเรื่องค่าใช้จ่าย คิดเป็นจำนวนเงินทั้งหมด 100,000,000 บาท โดยการลงทุนสัดส่วนของเจ้าของและการกู้ยืมจากสถาบันการเงิน คิดเป็นอัตราส่วน 50:50 โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.5 โดยระยะเวลาในการคิดค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักรพิจารณาที่อายุการใช้งานขั้นต่ำที่ 5 ปี

สำหรับรายละเอียดการกู้ยืมระยะยาวจากสถาบันการเงิน มีดังนี้

ประเภทและวงเงินกู้ : เงินกู้ยืมสำหรับธุรกิจจากสถาบันการเงิน

วัตถุประสงค์ของการกู้ : ใช้สำหรับการลงทุนเริ่มต้นกิจการ

จำนวนเงินกู้ : 50,000,000 บาท

อัตราดอกเบี้ย : MRR (Minimum Retail Rate) ร้อยละ 8.5

(อ้างอิงข้อมูลจากธนาคารแห่งประเทศไทย ณ วันที่ 1 กรกฎาคม 2566)

ระยะเวลาการกู้ : 5 ปี

ตารางที่ 5.5 ประมาณการการลงทุน

รายการ	**ระยะเวลา (ปี)**	**ส่วนของเจ้าของ (บาท)**	**เงินกู้ยืม (บาท)**	**มูลค่าสินทรัพย์ (บาท)**	**ค่าเสื่อมต่อปี (บาท)**
เงินทุนหมุนเวียน		50,000,000	-	-	-
เครื่องจักร - เครื่องประกอบใบพัดและแม่เหล็ก - เครื่องตั้งศูนย์กังหัน - เครื่อง CNC - สายพานการผลิต	5	-	50,000,000	50,000,000	10,000,000
รวม		**50,000,000**	**50,000,000**	**50,000,000**	**5,000,000**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.8.2 การประมาณการต้นทุนขายสินค้าและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

การประมาณการต้นทุนขายสินค้าและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ทำการกำหนดในช่วงการก่อตั้งบริษัท โดยการประมาณการค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะได้ในแต่ละกิจกรรมของผลิตภัณฑ์และการให้บริการ แต่ละปีตามภาวะเศรษฐกิจ มีรายละเอียดดังนี้

1. ต้นทุนการขายอุปกรณ์ โดยคิดต้นทุนกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาต่อหน่วยในปีที่ 1 ของแต่ละรุ่นผลิตภัณฑ์ดังนี้
   - กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลารุ่น SWT-S050 ราคา 13,000 บาทต่อหน่วย
   - กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลารุ่น SWT-S100 ราคา 29,000 บาทต่อหน่วย
   - กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลารุ่น SWT-S150 ราคา 65,000 บาทต่อหน่วย

   ทั้งนี้ในปีที่ 2-10 มีต้นทุนปรับเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ 5 ต่อปี
2. ค่าอุปกรณ์ในการดำเนินการ ประกอบด้วย ค่าเครื่องจักร อุปกรณ์สำนักงาน เป็นเงินประมาณ 50,000,000 บาท ในปีแรก
3. ค่าดูแล ปรับปรุง พัฒนาระบบและโปรแกรมออนไลน์ ในปีที่ 1 เป็นเงิน 400,000 บาท ในปีที่ 2-5 เป็นเงิน 150,000 บาทต่อปี
4. ค่าจ้างบุคลากร ในปีที่ 1 เป็นเงินรวม 18,348,000บาท ในปีที่ 2-10 มีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5 ต่อปีรายละเอียดการประมาณการค่าจ้างบุคลากร แสดงดังตารางที่ 5.6
5. ค่าเงินตอบแทนการขาย (Commission) ของพนักงานขายคิดเป็นร้อยละ 3 ของรายได้จากการขายของพนักงานขายทั้งหมดต่อปีในแต่ละปี
6. ค่าการตลาดและการสื่อสารคิดเป็นร้อยละ 5 ของรายได้ทั้งหมดในแต่ละปี ในปีที่ 1 คิดเป็น 14,000,000 บาท มีรายละเอียดดังนี้
   - การจัดแสดงสินค้าและการบริการกลุ่มลูกค้าอุตสาหกรรม จำนวน 3 ครั้งต่อปี ค่าใช้จ่ายครั้งละประมาณ 2,000,000 บาท รวมเป็นเงิน 6,000,000 บาท
   - การจัดแสดงสินค้าและการบริการกลุ่มลูกค้าฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิด จำนวน 3 ครั้งต่อปี ค่าใช้จ่ายครั้งละประมาณ 2,000,000 บาท รวมเป็นเงิน 6,000,000 บาท
   - เอกสารและอุปกรณ์ในการนำเสนอสินค้าและการบริการ ค่าใช้จ่ายประมาณ 1,000,000 บาท
   - สื่อโฆษณาประชาสัมพันธ์บนโซเชียลมีเดีย ค่าใช้จ่ายประมาณ 1,000,000 บาท
7. ค่าเช่าพื้นที่สำนักงานและโรงงาน ในปีที่ 1 เป็นเงิน 2,400,000 บาท ในปีที่ 2-5 มีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5 ต่อปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. ค่าวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตในปีที่ 1 เป็นเงิน 6,300,000 บาท ในปีที่ 2-5 มีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5 ต่อปี
9. ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด ได้แก่ ค่าใช้จ่ายที่อาจจะเกิดขึ้นโดยไม่ได้ตั้งงบประมาณไว้ล่วงหน้า ค่าธรรมเนียมธนาคาร ค่าธรรมเนียมในการดำเนินงานกับหน่วยงานราชการ ในปีที่ 1 เป็นเงิน 1,000,000 บาท ในปีที่ 2-5 มีอัตราเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5 ต่อปี

รายละเอียดการประมาณการต้นทุนขายสินค้าในช่วงเวลา 5 ปี แสดงดังตารางที่ 5.7 และประมาณการค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี แสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.6 ค่าจ้างบุคลากร

ตำแหน่ง	**เงินเดือนต่อเดือน (บาท)**	**จำนวน (คน)**	**เงินเดือนต่อปี (บาท)**
กรรมการผู้จัดการ	150,000.00	1	1,800,000.00
เลขานุการกรรมการผู้จัดการ	22,000.00	1	264,000.00
ผู้จัดการฝ่ายการขายและการตลาด	50,000.00	1	600,000.00
พนักงานขายออนไลน์	22,000.00	3	792,000.00
พนักงานขายผู้แทนจำหน่าย	22,000.00	3	792,000.00
ผู้จัดการฝ่ายการผลิต	50,000.00	1	600,000.00
วิศวกร	35,000.00	4	1,680,000.00
ช่างเทคนิค	18,000.00	5	1,080,000.00
พนักงานผลิต	15,000.00	30	5,400,000.00
พนักงานตรวจสอบคุณภาพ	15,000.00	5	900,000.00
ผู้จัดการฝ่ายการเงิน	50,000.00	1	600,000.00
พนักงานบัญชี	22,000.00	2	528,000.00
พนักงานการเงิน	22,000.00	2	528,000.00
ผู้จัดการฝ่ายจัดซื้อ	50,000.00	1	600,000.00
พนักงานฝ่ายจัดซื้อ	22,000.00	3	792,000.00
ผู้จัดการฝ่ายบริหารบุคคล	50,000.00	1	600,000.00
พนักงานฝ่ายบริหารบุคคล	22,000.00	3	792,000.00
		รวมทั้งสิ้น (บาท)	**18,348,000.00**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.7 ประมาณการต้นทุนขายสินค้าในช่วงเวลา 5 ปี

รายการ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
จำนวนขาย SWT-S050 ต่อปี (ชุด)	4,500	4,770	5,057	5,361	5,683
ต้นทุนต่อหน่วย (บาท)	13,000.00	13,650.00	14,332.50	15,049.13	15,801.58
ต้นทุนขายสินค้า SWT-S050 (บาท)	58,500,000.00	65,110,500.00	72,479,452.50	80,678,359.13	89,800,386.24
จำนวนขาย SWT-S100 ต่อปี (ชุด)	2,000	2,120	2,247	2,382	2,525
ต้นทุนต่อหน่วย (บาท)	29,000.00	30,450.00	31,972.50	33,571.13	35,249.68
ต้นทุนขายสินค้าSWT-S100 (บาท)	58,000,000.00	64,554,000.00	71,848,602.00	79,967,494.03	89,003,820.85
จำนวนขาย SWT-S150 ต่อปี (ชุด)	1,000	1,060	1,124	1,191	1,262
ต้นทุนต่อหน่วย (บาท)	65,000.00	68,250.00	71,662.50	75,245.63	79,007.91
ต้นทุนขายสินค้าSWT-S150 (บาท)	65,000,000.00	72,345,000.00	80,519,985.00	89,618,743.31	99,745,661.30
ต้นทุนขายสินค้ารวมต่อปี (บาท)	**181,500,000.00**	**202,009,500.00**	**224,848,039.50**	**250,264,596.46**	**278,549,868.39**
การเปลี่ยนแปลงต่อปี		11.3%	11.3%	11.3%	11.3%

ตารางที่ 5.8 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี

รายการ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
ค่าดูแล ปรับปรุง พัฒนาระบบและโปรแกรมออนไลน์	400,000	150,000	150,000	150,000	150,000
ค่าจ้างบุคลากร	18,348,000.00	19,265,400.00	20,228,670.00	21,240,103.50	22,302,108.68
ค่า Commission พนักงานขาย	8,427,000.00	8,941,080.00	9,958,396.50	10,564,668.02	11,763,932.39
ค่าการตลาดและการสื่อสาร	14,000,000.00	14,840,000.00	16,517,760.00	17,509,434.60	19,488,375.56
ค่าเช่าพื้นที่สำนักงานและโรงงาน	2,400,000.00	2,520,000.00	2,646,000.00	2,778,300.00	2,917,215.00
งบวิจัยและพัฒนา	6,300,000.00	6,615,000.00	6,945,750.00	7,293,037.50	7,657,689.38
ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด	1,000,000.00	1,050,000.00	1,102,500.00	1,157,625.00	1,215,506.00
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวมต่อปี (บาท)	**50,875,000.00**	**53,381,480.00**	**57,549,076.50**	**60,693,168.62**	**65,494,827.00**
การเปลี่ยนแปลงต่อปี		+4.9%	+7.8%	+5.5%	+7.9%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.8.3 การประมาณการรายได้จากการขายสินค้าและการบริการออกแบบโครงการ

การกำหนดในช่วงการก่อตั้งบริษัท โดยการประมาณการรายได้ที่คาดว่าจะได้ในแต่ละกิจกรรมของผลิตภัณฑ์และการให้บริการ อัตราการเติบโต หรือผลตอบแทนที่เพิ่มขึ้นแต่ละปีตามภาวะเศรษฐกิจ ดังนี้

1) รายได้จากการขายสินค้าอุปกรณ์ โดยคิดราคาต่อหน่วย โดยการการตั้งราคาบวกจากต้นทุน (Cost-Plus Pricing) ดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ราคาขายกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาแต่ละรุ่นในปีที่ 1

รุ่น	**ราคาขายต่อหน่วยในปีที่ 1 (บาท)**	**ต้นทุนต่อหน่วยในปีที่ 1 (บาท)**	**กำไรคิดเป็นร้อยละจากต้นทุนของสินค้า**	**ในปีที่ 2-5 ปริมาณจัดจำหน่ายเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ**
SWT-S050	20,000	13,000	53.8	6
SWT-S100	45,000	29,000	55.5	6
SWT-S150	100,000	65,000	53.8	6

ในส่วนของราคาขายในปีถัด ๆ ไปจะพิจารณาจากต้นทุนในการผลิตและวัตถุดิบตามความเหมาะสมกับสภาวะเศรษฐกิจ ซึ่งจะทำการประเมินและพิจารณาการปรับราคาขายทุก ๆ 2 ปี เพื่อให้ราคาขายยังอยู่ในช่วงที่คุ้มค่าสำหรับผู้ซื้อ รายละเอียดการประมาณการรายได้จากการขายสินค้าในช่วงเวลา 5 ปีแสดงดังตารางที่ 5.10

2) รายได้จากการบริการออกแบบ โดยคิดราคาต่อโครงการ ในปีที่ 1 มีเป้าหมายจำนวน 6 แห่ง ทั้งนี้มีการสรรหาโครงการเพิ่มเติมในปีที่ 2-5 มากกว่าปีก่อนหน้าปีละ 2 โครงการ โดยราคาการออกแบบต่อโครงการคิดเป็น 150,000 บาท ในปีที่ 2-5 มีการปรับเพิ่มราคาการออกแบบเฉลี่ยร้อยละ 3 ต่อปี รายละเอียดการประมาณการรายได้จากการบริการออกแบบโครงการในช่วงเวลา 5 ปี แสดงดังตารางที่ 5.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.10 ประมาณการรายได้จากการขายสินค้าในช่วงเวลา 5 ปี

รายการ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
จำนวนขาย SWT-S050 ต่อปี (ชุด)	4,500	4,770	5,057	5,361	5,683
ราคาขายต่อหน่วย (บาท)	20,000.00	20,000.00	21,000.00	21,000.00	22,050.00
รายได้จากการขายสินค้า SWT-S050 ต่อปี (บาท)	**90,000,000.00**	**95,400,000.00**	**106,197,000.00**	**112,581,000.00**	**125,310,150.00**
จำนวนขาย SWT-S100 ต่อปี (ชุด)	2,000	2,120	2,247	2,382	2,525
ราคาขายต่อหน่วย (บาท)	45,000.00	45,000.00	47,250.00	47,250.00	49,612.50
รายได้จากการขายสินค้า SWT-S100 ต่อปี (บาท)	**90,000,000.00**	**95,400,000.00**	**106,180,200.00**	**112,551,012.00**	**125,269,276.36**
จำนวนขาย SWT-S150 ต่อปี (ชุด)	1,000	1,060	1,124	1,191	1,262
ราคาขายต่อหน่วย (บาท)	100,000.00	100,000.00	105,000.00	105,000.00	110,250.00
รายได้จากการขายสินค้า S WT-S150 ต่อปี (บาท)	**100,000,000.00**	**106,000,000.00**	**117,978,000.00**	**125,056,680.00**	**139,188,084.84**
รายได้จากการขายสินค้ารวมต่อปี (บาท)	**280,000,000.00**	**296,800,000.00**	**330,355,200.00**	**350,188,692.00**	**389,767,511.20**
การเปลี่ยนแปลงต่อปี		+6.0%	+11.3%	+6.0%	+11.3%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.11 ประมาณการรายได้จากการบริการออกแบบโครงการในช่วงเวลา 5 ปี

รายการ	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
ราคาการบริการออกแบบต่อโครงการ (บาท)	150,000	154,500	159,135	163,909	168,826
จำนวนการบริการออกแบบ (โครงการ)	6	8	10	12	14
รายได้จากการบริการออกแบบโครงการ (บาท)	**900,000.00**	**1,236,000.00**	**1,591,350.00**	**1,966,908.60**	**2,363,568.50**
การเปลี่ยนแปลงต่อปี		+37.3%	+28.8%	+23.6%	+20.2%

5.9 ความเป็นไปได้ทางการเงิน (Financial Feasibility)

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงผลตอบแทนในการทำธุรกิจ (Internal Rate of Return: IRR) ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) และมูลค่าปัจจุบันในการลงทุน (Net Present Value: NPV) โดยพิจารณาจากการประมาณต้นทุนและรายได้ของ 2 สถานการณ์คือ สถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ (Base case scenario) และสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst case scenario) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) สถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ (Base case scenario)

สถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้เป็นสถานการณ์ที่มีการดำเนินธุรกิจปกติทำการพิจารณาจากสมมติฐานที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.8 การวางแผนการลงทุน โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของสถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ แสดงดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ประมาณการผลการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี ในสถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ (Base case scenario)

รายการ (บาท)	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
รายได้จากการขายสินค้า	280,000,000.00	296,800,000.00	330,355,200.00	350,188,692.00	389,767,511.20
รายได้จากการบริการออกแบบโครงการ	900,000.00	1,236,000.00	1,591,350.00	1,966,908.60	2,363,568.50
รายได้รวมทั้งหมด	280,900,000.00	298,036,000.00	331,946,550.00	352,155,600.60	392,131,079.70
ต้นทุนขายสินค้ารวมต่อปี	181,500,000.00	202,009,500.00	224,848,039.50	250,264,596.46	278,549,868.39
กำไรก่อนค่าใช้จ่าย	**99,400,000.00**	**96,026,500.00**	**107,098,510.50**	**101,891,004.14**	**113,581,211.30**
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวมต่อปี	50,875,000.00	53,381,480.00	57,549,076.50	60,693,168.62	65,494,827.00
กำไรขั้นต้น	**48,525,000.00**	**42,645,020.00**	**49,549,434.00**	**41,197,835.53**	**48,086,384.30**
ค่าเสื่อมราคา (เครื่องจักร/อุปกรณ์สำนักงาน)	5,000,000.00	5,000,000.00	5,000,000.00	5,000,000.00	5,000,000.00
ค่าชำระดอกเบี้ยสินเชื่อระยะยาว	8,500,000.00	8,500,000.00	8,500,000.00	8,500,000.00	8,500,000.00
กำไรก่อนหักภาษีเงินได้นิติบุคคล	**35,025,000.00**	**29,145,020.00**	**36,049,434.00**	**27,697,835.53**	**34,586,384.30**
ค่าชำระภาษีเงินได้นิติบุคคล (SMEs)	8,705,000.00	7,529,004.00	8,909,886.80	7,239,567.11	8,617,276.86
กำไรสุทธิ	**26,320,000.00**	**21,616,016.00**	**27,139,547.20**	**20,458,268.42**	**25,969,107.44**
กำไรสะสม		**47,936,016.00**	**75,075,563.20**	**95,533,831.62**	**121,502,939.06**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst case scenario) ทำการพิจารณาจากสมมติฐานปริมาณการขายแต่ละรายการสินค้าลดลงร้อยละ 5 จากกรณีที่มีความเป็นไปได้ (Base case scenario) เนื่องจากสภาวะทางเศรษฐกิจและแนวโน้มของตลาดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด แสดงดังตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ประมาณการผลการดำเนินการในช่วงเวลา 5 ปี ในสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด

(Worst case scenario) **รายการ (บาท)**	**ปีที่ 1**	**ปีที่ 2**	**ปีที่ 3**	**ปีที่ 4**	**ปีที่ 5**
รายได้จากการขายสินค้า	252,000,000.00	267,120,000.00	297,319,680.00	315,169,822.80	350,790,760.08
รายได้จากการบริการออกแบบโครงการ	450,000.00	618,000.00	795,675.00	983,454.30	1,181,784.25
รายได้รวมทั้งหมด	252,450,000.00	267,738,000.00	298,115,355.00	316,153,277.10	351,972,544.33
ต้นทุนขายสินค้ารวมต่อปี	163,350,000.00	181,808,550.00	202,363,235.55	225,238,136.81	250,694,881.55
กำไรก่อนค่าใช้จ่าย	**89,100,000.00**	**85,929,450.00**	**95,752,119.45**	**90,915,140.29**	**101,277,662.77**
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวมต่อปี	48,644,000.00	51,365,940.00	55,749,023.40	59,213,656.67	64,223,582.22
กำไรขั้นต้น	**40,456,000.00**	**34,563,510.00**	**40,003,096.05**	**31,701,483.62**	**37,054,080.55**
ค่าเสื่อมราคา (เครื่องจักร/อุปกรณ์สำนักงาน)	5,000,000.00	5,000,000.00	5,000,000.00	5,000,000.00	5,000,000.00
ค่าชำระดอกเบี้ยสินเชื่อระยะยาว	8,500,000.00	8,500,000.00	8,500,000.00	8,500,000.00	8,500,000.00
กำไรก่อนหักภาษีเงินได้นิติบุคคล	**26,956,000.00**	**21,063,510.00**	**26,503,096.05**	**18,201,483.62**	**23,554,080.55**
ค่าชำระภาษีเงินได้นิติบุคคล (SMEs)	7,091,200.00	5,912,702.00	7,000,619.21	5,340,296.72	6,410,816.11
กำไรสุทธิ	**19,864,800.00**	**15,150,808.00**	**19,502,476.84**	**12,861,186.90**	**17,143,264.44**
กำไรสะสม		**35,015,608.00**	**54,518,084.84**	**67,379,271.74**	**84,522,536.18**

ตารางที่ 5.14 ความสามารถทางการเงินและการลงทุน

	สถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ (Based Case Scenario)	สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst Case Scenario)
เงินทุนเริ่มต้น	100,000,000 บาท	100,000,000 บาท
สัดส่วนการลงทุน	ส่วนของเจ้าของร้อยละ 50 และ สถาบันการเงินร้อยละ 50	ส่วนของเจ้าของร้อยละ 50 และ สถาบันการเงินร้อยละ 50
ความสามารถในการทำกำไร	เริ่มมีกำไรขั้นต้นในปีที่ 1	เริ่มมีกำไรขั้นต้นในปีที่ 5
ระยะเวลาการคืนทุน (Payback period)	ปีที่ 3.2	ปีที่ 4.1
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ณ สิ้นปีที่ 5 อัตราส่วนลดในการคำนวณ ร้อยละ 10	23,109,056 บาท	-5,172,507 บาท
อัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR) ณ สิ้นปีที่ 5	ร้อยละ 16.1	ร้อยละ 6.7

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของธุรกิจผลิตและจำหน่ายกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายโดยพิจารณาจากสมมุติฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ แสดงดังตารางที่ 5.14 พบว่าในกรณีที่บริษัทที่จัดตั้งดำเนินธุรกิจในสถานการณ์มีความเป็นไปได้ (Based Case Scenario) สามารถเริ่มมีกำไรขั้นต้นในปีที่ 1 ระยะเวลาการคืนทุน 3.2 ปี ผลตอบแทนในการลงทุน (IRR) เท่ากับร้อยละ 16.1 และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ณ สิ้นปีที่ 5 เท่ากับ 23,109,056 บาท สามารถสรุปได้ว่าธุรกิจนี้มีความเป็นไปได้ในการลงทุนในสถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้เนื่องจากมูลค่าปัจจุบัน (NPV) เป็นบวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากรณีสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst Case Scenario) พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ณ สิ้นปีที่ 5 เท่ากับ -5,172,507 บาท ซึ่งติดลบ จึงจำเป็นต้องเตรียมการในการป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในทุก ๆ บริบท เพื่อให้ธุรกิจสามารถดำเนินต่อไปได้และมีกำไรอย่างยั่งยืน

5.10 การวางแผนป้องกันความเสี่ยง

การวางแผนป้องกันความเสี่ยงจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการบริหารจัดการให้โอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงลดลง หรือผลกระทบของความเสียหายจากเหตุการณ์ความเสี่ยงลดลง หรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อให้สามารถดำเนินธุรกิจต่อไปได้ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.15 การวางแผนป้องกันความเสี่ยง

ลำดับที่	ลักษณะความเสี่ยง	แนวทางป้องกันความเสี่ยง
1	การมีผู้แข่งขันที่แข็งแกร่งในอนาคต	• ศึกษาการปรับรูปแบบธุรกิจให้มีความยืดหยุ่น • มุ่งเน้นการให้บริการที่ครบวงจร • สร้างเสริมการมีคู่ค้าที่แข็งแกร่ง • สร้างความสัมพันธ์ที่ดีกับลูกค้า
2	การมีนวัตกรรมที่ดีกว่า	• ติดตามเทคโนโลยีที่จะเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมในอนาคต • ศึกษาและพัฒนากังหันแบบไร้เพลาอยู่เสมอ โดยเลือกเทคโนโลยีที่มีความทันสมัย
3	พฤติกรรมของกลุ่มลูกค้าเป้าหมายเปลี่ยนไป	• มีการประเมินพฤติกรรมลูกค้าและตลาดเป็นระยะ • ปรับการจัดทำผลิตภัณฑ์และบริการให้ ทันต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมที่จะเกิดขึ้นในอนาคต
4	ความเสี่ยงจาก Supplier ที่จะไม่ส่งสินค้า	• จัดทำสัญญาการซื้อ-ขาย ที่มีข้อผูกพันในเรื่องความรับผิดชอบในการจัดส่ง • ชิ้นส่วนที่สำคัญมาก ๆ ต้องจัดเตรียมสำรองไว้ • แสวงหา Supplier ที่มีคุณภาพเชื่อถือได้ และหาสำรองไว้หลายแหล่ง
5	ความเสี่ยงจากการฟ้องร้องจากการใช้ผลิตภัณฑ์	• ใช้บริการจ้างนักกฎหมาย ที่เชี่ยวชาญด้านธุรกิจ ให้พิจารณาการจัดทำเงื่อนไขการขาย • ระบุข้อความในสัญญาเพื่อป้องกันการถูกฟ้องร้องกรณีที่ไม่ได้เกิดจากอุปกรณ์ให้ชัดเจน • คู่มือการใช้งานต้องระบุให้ผู้ใช้อ่านคู่มือให้ชัดเจนก่อนใช้งาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ลักษณะความเสี่ยง	แนวทางป้องกันความเสี่ยง
6	ความเสี่ยงจากการเกิดโรคอุบัติใหม่ที่ไม่สามารถรักษาได้ที่ส่งผลต่อการผลิต	• จัดทำแผนฉุกเฉินในการคัดแยกผู้ป่วยและการควบคุมการแพร่กระจายของโรค • กำหนดแนวทางการปฏิบัติเพื่อหลีกเลี่ยงการติดเชื้อและเป็นพาหะ • จัดทำประกันภัยทางธุรกิจ
7	ความเสี่ยงจากการเกิดภัยพิบัติรุนแรง	• จัดทำแผนฉุกเฉินในการอพยพ • จัดทำแผนการเงินสำรองเพื่อทำให้องค์กรสามารถอยู่รอดได้ • จัดทำประกันภัยทางธุรกิจ
8	ความเสี่ยงจากการที่พนักงานนำข้อมูล ความลับทางการค้าของบริษัทรั่วไหล	• จัดหาระบบตรวจสอบการนำข้อมูลของบริษัทออกนอกบริษัท • จัดอบรมจริยธรรมในการทำงาน • สร้างสิ่งแวดล้อมให้พนักงานรู้สึกว่าเป็นหุ้นส่วนขององค์กร • จัดสายด่วนจริยธรรมเพื่อให้ผู้ที่ทราบว่ามีการลักลอบนำข้อมูลออกจากบริษัทได้แจ้งเพื่อดำเนินการสอบสวนและป้องกัน
9	ความเสี่ยงจากการทุจริต ฉ้อโกงในองค์กร	• จัดหาระบบตรวจสอบการการทุจริต • จัดอบรมจริยธรรมในการทำงาน • สร้างสิ่งแวดล้อมให้พนักงานรู้สึกว่าเป็นหุ้นส่วนขององค์กร • จัดสายด่วนจริยธรรมเพื่อให้ผู้ที่ทราบว่ามีการทุจริต ฉ้อโกงในองค์กรได้แจ้งเพื่อดำเนินการสอบสวนและป้องกัน • กำหนดนโยบายและสวัสดิการที่เป็นธรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม สามารถอภิปรายและสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการทำงานวิจัยตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1) วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 เพื่อศึกษาค้นคว้าหาแนวทางใหม่ในการสร้างต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาที่มีความคุ้มค่าในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศไทย

การพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 โดยทำการศึกษาทฤษฎี งานวิจัย สิทธิบัตรและสิ่งประดิษฐ์ที่มีก่อนหน้าในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายและการขอคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญสำหรับหาช่องว่างของการวิจัยจากฐานข้อมูลต่าง ๆ เพื่อออกแบบและพัฒนาตัวต้นแบบในการศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคโนโลยี (Feasibility Study) ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม โดยการทำแบบจำลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาและทำ Mockup จากวัสดุที่หาได้อย่างง่าย ผลการศึกษาพบว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนได้ที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปและลมระบายจากพัดลมระบายสามารถไหลผ่านกังหันแบบไร้เพลาออกสู่ภายนอกได้ นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาเป็นสิ่งใหม่ที่ได้พิสูจน์และตรวจสอบแล้วว่าไม่เคยมีมาก่อน ได้ดำเนินการยื่นขอคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์แล้วดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 6.1 สถานการณ์ขอคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

ประเทศ	หมายเลขประกาศ	วันที่ประกาศ
ไทย	TH1901007703A	03.05.2021
ประเทศสมาชิก PCT	WO2021/118475 A1	17.06.2021
สหรัฐอเมริกา	US20220393548A1	18.12.2022
จีน	CN114651125A	21.06.2022
อินเดีย	202217030995	30.05.2022
ออสเตรเลีย	AU2020402475A1	28.07.2022

2) วัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากทรัพยากรลมที่มีอยู่ในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้ในอนาคต

การพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 โดยทำการออกแบบและพัฒนาตัวต้นแบบสำหรับห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาและพัดลมของระบบลมระบาย พบว่าที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาทีกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมของแกนยึดใบพัด 105-150 องศา สามารถหมุนได้ในช่วง 160-300 รอบต่อนาที และทำการปรับปรุงตัวต้นแบบสำหรับการทดสอบภาคสนามในพื้นที่ใช้งานจริงและทราบถึงแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบ พบว่าสามารถติดตั้งในพื้นที่จำกัดได้ มีความเร็วรอบในการหมุน 160 รอบต่อนาทีที่ความเร็วลม 7 เมตรต่อวินาที แม้ในการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามจะได้ผลของกำลังไฟฟ้าที่ได้ไม่สูงมาก เนื่องจากขนาดขดลวดทองแดงและขนาดของแม่เหล็กที่เลือกใช้ในการทดสอบยังไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด แต่การที่ต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถหมุนด้วยความเร็วรอบการหมุนที่สูงที่ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ทำให้มีศักยภาพสูงในที่จะพัฒนาให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในจุดที่คุ้มค่ากับการลงทุนต่อไป จากการทดสอบห้องปฏิบัติการและภาคสนามที่ให้ผลการทดสอบออกมาต่างกันในส่วนของความเร็วรอบการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาและกำลังไฟฟ้าที่ได้ เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะใบพัดของพัดลมระบายอากาศ ดังนั้นกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์จึงไม่สามารถที่จะตั้งค่ามุมของแกนยึดใบพัดค่า ๆ เดียวเพื่อไปใช้งานกับพัดลมระบายอากาศทั้งหมดที่ใบพัดมีลักษณะต่างกันได้ การผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจำเป็นต้องปรับมุมแกนยึดใบพัดให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลของอากาศและความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศแต่ละชนิด เพื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนสำหรับผลิตกำลังไฟฟ้าให้ได้สูงสุดและลดผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบระบายอากาศ

องค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาได้ทำการเสนอผลงานการวิจัยต่อที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The International Conference on Sustainable Energy and Green Technology (SEGT 2019) เมื่อวันที่ 11 ธ.ค. 2562 โดยได้รับรางวัลบทความยอดเยี่ยม (Best Paper Award) และบทความวิจัยได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร International Journal of Energy Research ซึ่งเป็นวารสารทางวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูล SCOPUS ที่ Journal Quartile Score (Q) อยู่ระดับ Q1 ค่า Impact Factor เท่ากับ 3.29 (2019-2020) เมื่อวันที่ 23 พ.ย. 2563 บทความจากงานวิจัยทั้ง 2 ฉบับเป็นที่ยอมรับ โดยได้มีการอ้างอิงจากงานวิจัยอื่นแล้ว 3 ครั้ง (ข้อมูล ณ วันที่ 20 ก.ค. 2566)

3) วัตถุประสงค์ข้อที่ 3 เพื่อศึกษาการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า และประเมินความสามารถในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาในการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ ทางด้านการตลาด การผลิตและการเงิน

การพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมบรรลุวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 โดยส่วนแรกได้ทำการศึกษาการยอมรับนวัตกรรมด้วยแบบสอบถามโดยใช้ Google form โดยการสำรวจกลุ่มลูกค้าเป้าหมายจำนวน 322 คน พบว่าผู้ประเมินมีการยอมรับเทคโนโลยีในระดับมาก มีความสนใจและเห็นคุณค่าของนวัตกรรมที่จะนำไปใช้ ในส่วนของการนำนวัตกรรมไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ ได้วิเคราะห์การแข่งขันในอุตสาหกรรม (Five Forces Analysis) การวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคทางธุรกิจ (SWOT) การใช้ประโยชน์ทางเทคโนโลยี (Technology exploitation) พร้อมทั้งดำเนินการวางแผนธุรกิจ แผนการตลาด การผลิต การบริหาร การลงทุนและศึกษาความเป็นไปได้ด้านการเงิน ผลการศึกษาพบว่าเมื่อพิจารณาแผนการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ให้เป็นแบบการจัดตั้งธุรกิจแบบสตาร์ทอัพดำเนินการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าธุรกิจนี้มีความเป็นไปได้ในการลงทุนจากการประเมินในกรณีที่มีความเป็นไปได้ (Based Case Scenario) โดยมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.17 ปี อัตราผลการตอบแทนการลงทุน คือ ร้อยละ 16.1 มูลค่าปัจจุบันในการลงทุน ณ สิ้นปีที่ 5 เท่ากับ 23,109,056 บาท รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สรุปความเป็นไปได้ทางการเงิน

กรณีศึกษา	**ความเป็นไปได้ทางการเงิน**		
	ผลตอบแทนในการทำธุรกิจ (Internal Rate of Return: IRR)	**ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)**	**มูลค่าปัจจุบันในการลงทุน (Net Present Value: NPV)**
สถานการณ์ที่มีความเป็นไปได้ (Based Case Scenario)	16.1%	3.2 ปี	23,109,056 บาท
สถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุด (Worst Case Scenario)	6.7%	4.1 ปี	-5,172,507 บาท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2 การนำนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์

นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นจากการที่ผู้วิจัยเล็งเห็นศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งทรัพยากรลมระบายที่มีอยู่มากมายและไม่เคยถูกนำมาใช้ประโยชน์มาก่อน เนื่องจากข้อจำกัดของกังหันลมแบบดั้งเดิมที่เมื่อนำมาติดตั้งเข้ากับระบบลมระบายจะส่งผลกระทบเชิงลบต่อประสิทธิภาพการระบายอากาศของระบบและมีต้นทุนพลังงานเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาและพัฒนาต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาซึ่งเป็นแนวคิดใหม่ที่มีจุดเริ่มต้นจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสู่การผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อการนำมาใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ได้ โดยการนำนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์อย่างยั่งยืนนั้นจะต้องพิจารณาและประเมินองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องให้ครบถ้วน โดยรายละเอียดของเทคโนโลยี การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่า ตลอดจนถึงการมีส่วนร่วมของสถาบันการศึกษา ภาครัฐ และองค์กรวิชาชีพในการพัฒนาห่วงโซ่คุณค่าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม สามารถพิจารณาได้ดังนี้

6.2.1 รายละเอียดของเทคโนโลยี

เทคโนโลยีกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นเทคโนโลยีที่อยู่ในระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Levels, TRL) ในช่วงพัฒนาต้นแบบ คือระดับที่ 7 ซึ่งเป็นขั้นที่ได้พิสูจน์การทดสอบในสภาวะการทำงานในพื้นที่จริง คือ การทดสอบภาคสนาม ณ บริษัทสวารอฟสกี้ แมนูแฟคเจอริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด แต่ต้องมีการปรับปรุงกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น เพื่อก้าวข้ามเป็นระดับที่ 8 ต่อไป ในส่วนของลักษณะหรือคุณสมบัติ ประโยชน์และศักยภาพ ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ แสดงดังตารางที่ 6.2

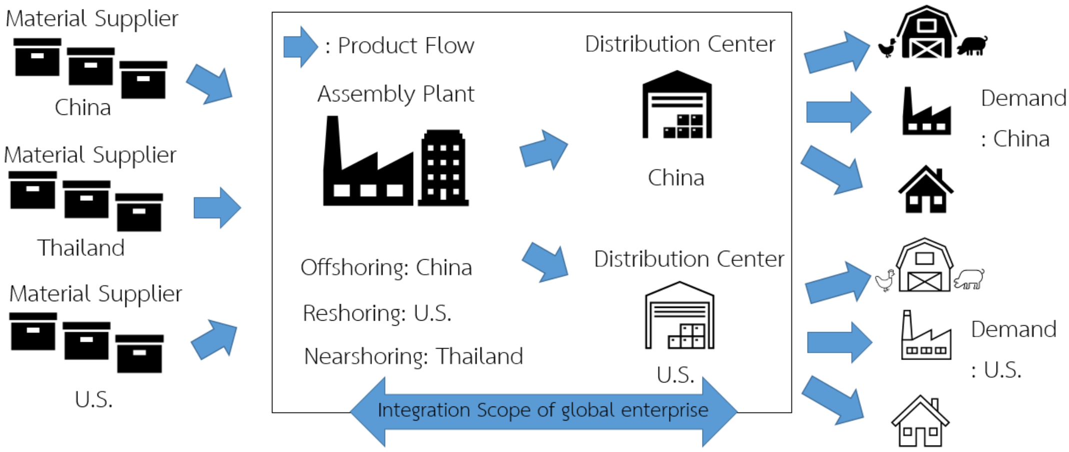
ตารางที่ 6.3 รายละเอียดของเทคโนโลยี

เทคโนโลยี	รายละเอียด
ลักษณะหรือคุณสมบัติ	นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม
ประโยชน์และศักยภาพ	สามารถเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความเร็วตั้งแต่ 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป เช่น ลมจากธรรมชาติ ลมทิ้งจากระบบระบายอากาศที่มีพัดลมเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการระบายจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง ของเหลวหรือก๊าซใด ๆ ที่ถูกระบายทิ้งผ่านระบบท่อโดยอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกลหรือจากแรงโน้มถ่วง ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้
ข้อได้เปรียบ	ผู้วิจัยได้ทำการยื่นขอรับการคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์กับกรมทรัพย์สินทางปัญญาหมายเลขคำขอเลขที่ 1901007703 เมื่อวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2562 และได้ดำเนินการขอรับความคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์ในประเทศเป้าหมายหลักคือไทย อเมริกา จีน อินเดียและออสเตรเลียแล้ว
ความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์	การที่โลกและประเทศไทยให้ความสำคัญและมีความต้องการพลังงานหมุนเวียนมากขึ้นเพื่อก้าวสู่เป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกสุทธิให้เป็นศูนย์ (Carbon Neutrality) โดยโอกาสทางธุรกิจการลงทุนจะมุ่งสู่เทคโนโลยีกลุ่มพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทางเลือกมากขึ้น วัตถุประสงค์มุ่งลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และใช้ทรัพยากรด้วยความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.2.2 การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่า (Value chain analysis)

การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่ามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาพรวมของการใช้งาน ต่อยอดไปสู่ภาคธุรกิจในเชิงของการสร้างมูลค่าเพิ่ม (Value added) ให้กับสินค้าหรือบริการ ในแต่ละขั้นตอนกระบวนการสร้างคุณค่าให้กับสินค้าหรือบริการนั้นเป็นการพัฒนาโดยหลายเทคโนโลยี โดยสามารถแบ่งขอบเขตของการสร้างคุณค่าจากเทคโนโลยีในแต่ละช่วงกิจกรรมได้ โดยการศึกษาห่วงโซ่คุณค่าใช้ประกอบการวิเคราะห์ความเชื่อมโยง สถานการณ์ด้านอุปสงค์ อุปทาน และแนวโน้มของอุตสาหกรรมและภาคธุรกิจที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความสามารถเพิ่มมูลค่าจากเทคโนโลยีอีกด้วย



รูปที่ 6.1 การวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา
สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 6.1 แสดงการวิเคราะห์ห่วงโซ่คุณค่าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

1. ขั้นต้นน้ำ (Upstream stage) คือผู้สนับสนุนวัตถุดิบหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ (Supplier) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา
2. ขั้นกลางน้ำ (Middle-stream stage) คือผู้ผลิตทำหน้าที่ประกอบวัตถุดิบและชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ได้รับมาจาก Supplier แล้วทำการทดสอบ ตรวจสอบคุณภาพ และบรรจุเพื่อส่งจำหน่ายให้ผู้ใช้งานกลุ่มเป้าหมายต่อไป
3. ขั้นปลายน้ำ (Downstream stage) หรือผู้ใช้งาน ได้แก่ ผู้ประกอบการต่าง ๆ ที่มีแหล่งทรัพยากรลมระบายในพื้นที่และต้องการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาหมุนเวียนใช้ในระบบเพื่อลดต้นทุนการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หากพิจารณาความเป็นไปได้ในการพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมในประเทศไทยอยู่ในส่วนของกิจกรรมในขั้นกลางน้ำ (Middle-stream stage) หรือกลุ่มประกอบ เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญหากสามารถจัดการและบริหารให้เกิดประสิทธิผลได้นั้นจะสามารถส่งมอบคุณค่าในขั้นตอนต่อไปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสังคมได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

6.2.3 การมีส่วนร่วมของสถาบันการศึกษา ภาครัฐ และองค์กรวิชาชีพในการพัฒนาห่วงโซ่คุณค่าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

เทคโนโลยีกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อน ซึ่งคิดค้นและพัฒนาโดยคนไทย การที่เทคโนโลยีดังกล่าวจะก้าวข้ามจากระดับต้นแบบในห้องปฏิบัติการให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับจากตลาด จำเป็นจะต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและได้รับการสนับสนุนจากทุกภาคส่วนอย่างจริงจัง เช่น สถาบันการศึกษา ภาครัฐ และองค์กรวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น เพื่อให้เกิดรูปแบบการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ยั่งยืน ที่สามารถแข่งขันกับสินค้าทดแทนอื่น ๆ ได้ และรูปแบบการพัฒนานี้สามารถนำไปประยุกต์กับผลิตภัณฑ์นวัตกรรมอื่น ๆ ที่มีอยู่ได้ การมีส่วนร่วมของฝ่ายที่เกี่ยวข้องที่นำเสนอโดยผู้วิจัยมีดังนี้

1) สถาบันการศึกษา

การพัฒนาบุคลากรเพื่อป้อนเข้าสู่อุตสาหกรรมการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันในอุตสาหกรรมนี้ของประเทศ เพื่อประโยชน์ในเชิงเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อม สถาบันการศึกษามีส่วนในการสร้างบุคลากรที่มีคุณภาพเพื่อสนับสนุนทั้งด้านการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี กระบวนการผลิตและการบริหารจัดการเพื่อให้ผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นที่รู้จักและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย รวมถึงการต่อยอดแนวความคิดกังหันแบบไร้เพลาไปยังการใช้งานในด้านอื่น ๆ การเชื่อมโยงระหว่างภาคอุตสาหกรรมกับสถาบันการศึกษาเพื่อร่วมกำหนดความรู้และทักษะระดับพื้นฐานไปจนถึงระดับสูงที่จำเป็นต่ออุตสาหกรรมนี้ และร่วมกันสร้างทรัพยากรบุคคลในประเทศที่มีศักยภาพสูงเพื่อป้อนสู่ภาคอุตสาหกรรม จะทำให้มีความได้เปรียบคู่แข่งประเทศอื่น ๆ

2) ภาครัฐ Chulalongkorn University

นโยบายจากภาครัฐเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดทิศทางในการพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายได้ โดยการให้ความสำคัญและส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้นเพื่อก้าวสู่เป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกสุทธิให้เป็นศูนย์ (Carbon Neutrality) เช่น การส่งเสริมการสร้างศูนย์พัฒนาและวิจัยกังหันลมแบบไร้เพลาแห่งแรกของโลกในประเทศไทย การกำหนดมาตรฐานการติดตั้งพัดลมระบายอากาศที่จะต้องติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา การให้สิทธิพิเศษทางภาษีหรือสนับสนุนงบประมาณสำหรับองค์กรหรือบริษัทใด ๆ ทำการติดตั้งกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเข้ากับพัดลมระบายอากาศในภาคอุตสาหกรรม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายไม่เคยถูกใช้ประโยชน์มาก่อน เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการช่วยลดการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่ง

ทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปเช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ตลอดจนลดการนำเข้าไฟฟ้าจากต่างประเทศ ทำให้ประเทศมีความมั่นคงด้านพลังงานมากขึ้น

3) องค์กรวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง

องค์กรวิชาชีพเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดมาตรฐานการพัฒนาบุคลากรและการพัฒนาผลิตภัณฑ์กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา เนื่องจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรมหนึ่งให้เกิดขึ้นและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายไม่สามารถใช้ศาสตร์หรือองค์ความรู้เพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น ผลิตภัณฑ์นวัตกรรมเป็นการผสมผสานองค์ความรู้แบบพหุศาสตร์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าในการลงทุน แนวคิดการสร้างศูนย์พัฒนาและวิจัยกังหันลมแบบไร้เพลาแห่งชาติ โดยการระดมสมองบุคลากรที่มีความสามารถจากองค์กรวิชาชีพที่เกี่ยวข้องมาร่วมกันเป็นส่วนหนึ่งในการร่วมกันพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาให้มีศักยภาพในการก้าวไปสู่กังหันลมที่มีสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient) ในการผลิตไฟฟ้าที่สูงที่สุด เพื่อสร้างชื่อเสียงและสร้างรายได้ให้กับประเทศต่อไป

6.3 ประโยชน์ของการวิจัยและพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

การวิจัยและพัฒนากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม เป็นแนวคิดที่สามารถสร้างประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมดังนี้

6.3.1 ผลประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจ

สามารถนำแหล่งทรัพยากรลมระบายที่มีอยู่ในประเทศมาผลิตไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุดคุ้มค่าลดการนำเข้าไฟฟ้าจากต่างประเทศ จากการเป็นผู้คิดค้นและถือสิทธิ์การประดิษฐ์ผ่านการยื่นขอคุ้มครองสิทธิบัตรการประดิษฐ์ในกลุ่มประเทศลูกค้าเป้าหมายหลัก คือ ไทย อเมริกา จีน อินเดียและออสเตรเลีย ทำให้สามารถส่งออกเทคโนโลยีไปยังต่างประเทศทั้งในรูปแบบผลิตภัณฑ์และการอนุญาตให้ใช้สิทธิ์ สร้างความมั่งคั่งให้ประเทศในฐานะผู้ผลิตเทคโนโลยีสำหรับพลังงานลมที่มีประสิทธิภาพสูงที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดของกังหันลมแบบดั้งเดิมในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายได้

6.3.2 ผลประโยชน์ทางด้านสังคม

การผลิตกังหันลมแบบไร้แกนสามารถสร้างธุรกิจใหม่ที่มีแนวโน้มการเติบโตสูงมากทั้งในประเทศและต่างประเทศ ทำให้มีการจ้างงานบุคคลากรในประเทศเพื่อสนับสนุนการผลิตให้บรรลุตามยอดจำหน่ายประมาณการ ทำให้คนมีความสุข กินดี อยู่ดี สุขภาพจิตดี ซึ่งหากผลประกอบการเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ ด้วยวิสัยทัศน์และจิตสำนึกที่มุ่งหวังจะสร้างองค์กรที่จะเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาประเทศ จึงมีนโยบายที่จะจัดสรรกำไรจากการดำเนินธุรกิจ มาตอบแทนสังคมในรูปแบบการ

สนับสนุนรัฐและชุมชนในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานให้ประชาชนในประเทศมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น มีสุขอนามัยที่ดี และลดปัญหาอาชญากรรม เป็นต้น

6.3.3 ผลประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

เทคโนโลยีกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเป็นนวัตกรรมที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากทรัพยากรลมที่มีอยู่ในธรรมชาติและลมที่มนุษย์สร้างขึ้นเช่น ลมระบายจากภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้าและที่อยู่อาศัย เป็นต้น ซึ่งลมระบายดังกล่าวไม่เคยถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามาก่อนเนื่องจากข้อจำกัดของกังหันลมแบบดั้งเดิม เทคโนโลยีดังกล่าวเป็นเทคโนโลยีสะอาดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ ลดการใช้วัตถุดิบจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ และพลังงานที่ได้สามารถลดสัดส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งอื่น ๆ เช่น น้ำมัน ก๊าซ ถ่านหิน และพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์ เป็นต้น

6.4 แนวทางการปรับปรุงและต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

6.4.1 การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

การพัฒนาต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาจากงานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นในการนำแหล่งทรัพยากรลมระบายที่ยังไม่ถูกนำมาใช้งานเนื่องจากข้อจำกัดทางเทคนิคของกังหันลมแกนนอนแบบตั้งเดิม จากผลการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม สามารถพิสูจน์ได้ว่าแนวคิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรมได้จริงและไม่กระทบต่อประสิทธิภาพการระบายอากาศของระบบที่มีอยู่เดิม อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังอยู่ในระดับที่ไม่สูงนัก จึงจำเป็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตเพื่อให้กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถนำไปใช้งานได้จริงและมีความคุ้มค่าในการลงทุน หัวข้อการวิจัยที่จะต้องทำการศึกษาต่อไป เช่น การหาค่าที่เหมาะสมสำหรับขนาดขดลวดทองแดง แม่เหล็ก และการพิจารณาวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาเพื่อให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากความร้อน สารเคมี และความชื้น เหมาะสมกับการทำงานในสภาวะจริง เป็นต้น

6.4.2 การพัฒนากระบวนการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

การพัฒนากระบวนการผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาในระดับอุตสาหกรรมก็เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งกระบวนการ ตลอดจนอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จะต้องมีการพัฒนาและสร้างขึ้นมาใหม่สำหรับกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาโดยเฉพาะ เช่น เทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงานที่ลดการใช้วัสดุส่วนเกินจากการผลิต เครื่องมือในการปรับสมดุลการหมุนของโรเตอร์ของกังหันเพื่อให้การหมุนเป็นไปแบบราบรื่นและไม่เกิดเสียงรบกวนขณะที่ทำงาน กระบวนการป้องกันการเสื่อมสภาพการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กนีโอไดเมียมภายใต้การทำงานในพื้นที่มีอุณหภูมิสูง เป็นต้น

6.4.3 การกำหนดมาตรฐานมุมแกนยึดใบพัดสำหรับใบพัดของพัดลมระบายแต่ละประเภท

จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนามที่ออกมาแตกต่างกัน โดยเฉพาะความเร็วรอบการหมุนของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาและกำลังไฟฟ้าที่ได้ พบว่าปัจจัยหลักคือการที่ลักษณะใบพัดของพัดลมระบายอากาศแตกต่างกัน ทำให้กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไม่สามารถที่จะตั้งค่ามุมของแกนยึดใบพัดที่ค่า ๆ เดียวเพื่อไปใช้งานกับพัดลมระบายอากาศทั้งหมดที่ใบพัดมีลักษณะต่างกันได้ การศึกษาและกำหนดมาตรฐานมุมแกนยึดใบพัดให้เหมาะสมกับลักษณะการไหลของอากาศและความเร็วลมที่ออกจากพัดลมระบายอากาศแต่ละชนิดที่มีอยู่ในตลาด จะสามารถช่วยให้การผลิตกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาระดับอุตสาหกรรมเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีมาตรฐานในการผลิตที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล เพื่อตอบสนองทรัพยากรที่มีอยู่ของแต่ละกลุ่มลูกค้าได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2559). ออกแบบระบบระบายอากาศในอุตสาหกรรมเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร.

ไปรมา อิศรเสนา ณ อยุธยา. (2553). กลยุทธ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ ‘นวัตกรรมแห่งคุณค่า’. 161-174.

ธนาคารไทยพาณชย์. (2565). พลังงานสะอาด เทรนด์ทางเลือกและธีมการลงทุนรักษ์โลก Available from: https://www.scb.co.th/th/personal-banking/stories/grow-your-wealth/green-energy-friendly-to-earth-investment.html

ศิขัณฑ์ พงษพิพัฒน์. (2554). เทคนิคและการจัดการระบบ Evaporative Cooling สำหรับโรงเรือนเลี้ยงสัตว์. วารสารสัตวบาล, 21 (97), 7-15.

ศูนย์สารสนเทศโรงงานอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2560). สถิติสะสมจำนวนโรงงานที่ได้รับอนุญาตให้ประกอบกิจการ (เปิดดำเนินการ) ตาม พ.ร.บ.โรงงาน พ.ศ. 2535 จำแนกรายหมวดอุตสาหกรรมที่สำคัญ ตามจำพวก ณ สิ้นปี 2559. Available from: http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=spss60

สามารถ โสภา, ศักดิ์ชาย รักการ และ วิทยา พวงสมบัติ. (2556). การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมโดยใช้อากาศที่ระบายออกจากอาคาร. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2556 16-18 ตุลาคม 2556 พัทยา ชลบุรี.

อัศวิน ปศุศฤทธากร, สัมพันธ์ ไชยเทพ และ ธเนศ ไชยชนะ. (2551). อิทธิพลของแผ่นเสริมแรงแม่เหล็กต่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร. รวมบทความวิชาการการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, 3, 99-103.

ภาษาอังกฤษ

Ahmad, F. A., Chong, W. T., Yip, S. Y., Hew, W. P., & Poh, S. C. (2015). Design and experimental analysis of an exhaust air energy recovery wind turbine generator. *Energies*, 8, 6566-6584.

Allen, B., & Hamilton, B. (1982). New products management for the 1980s. Indiana University.

Alnasir, Z., & Kazerani, M. (2013). An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 597-615.

Arribas, Lius. (2012). *Testing and certification for small wind turbines (SWT): challenges and actions to address them.* Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2012/Oct/24/5_Luis_Maria_Arribas.pdf?la=en&hash=A51E2EA6B5B63EACB27E3DAFC16FC28BC5DB3716. (Accessed 26 June 2023).

Arroyo, A., Manana, M., Gomez, C., Fernandez, I., Delgado, F., & Zobaa, A. F. (2013). A methodology for the low-cost optimisation of small wind turbine performance. *Applied Energy*, 104, 1-9.

Avci, E. O., & Abdelfatah, E. (2017). *Shaftless multi blade wind turbine* (W.O. Patent No. WO2017/200504A1). World Intellectual Property Organization.

Barbarelli, S., Florio, G., Amelio, M., Scornaienchi, N. M., Cutrupi, A., & Zupone, G. L. (2014). Design procedure of an innovative turbine with rotors rotating in opposite directions for the exploitation of the tidal currents. *Energy*, 77, 254-264.

Batill, S. M., & Mueller, T. J. (2012). Visualization of transition in the flow over an airfoil using the smoke-wire technique. *AIAA Journal*, 19(3), 340-345.

Beran, V., Sedláček, M., & Marˇs´ık, F. (2013). A new bladeless hydraulic turbine. *Applied Energy*, 104, 978-983.

Berenda, R. M., & Ferenci, J. (1996). *Exhaust air recovery system* (U.S. Patent No. US5512778A). U.S. Patent and Trademark Office.

Bhuiyan, N. (2011). A framework for successful new product development. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(4), 746-770.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

BizVibe (2022). *Global Wind Turbine Industry Factsheet 2022: Top 10 Largest Wind Turbine Manufacturers.* Available from: https://blog.bizvibe.com/blog/energy-and-fuels/top-10-wind-turbine-manufacturers-world (Accessed 8 August 2022).

Chancham, C., Waewsak, J., Chaichana, T., Landry, M., & Gagnon, Y. (2014). Assessment of Onshore Wind Energy Potential Using Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) for Thailand. *Energy Procedia*, 52, 487-496.

Chidanand , Nikhil, M. , Eswara, P. (2023). *Renewable Energy Market by Type (Hydroelectric Power, Wind Power, Bioenergy, Solar Energy, and Geothermal Energy) and End Use (Residential, Commercial, Industrial, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030*. Retrieved from https://www.alliedmarketresearch.com/renewable-energy-market. (Accessed 4 July 2023).

Chingulpitak, S., & Wongwises, S. (2014). Critical review of the current status of wind energy in Thailand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 312-318.

Cho, W., Lee, K., Choy, I., & Back, J. (2017). Development and experimental verification of counter-rotating dual rotor/dual generator wind turbine: Generating, yawing and furling. *Renewable. Energy*, 114, 644-654.

Chong, W. T., Kong, Y. Y., & Fazlizan, A. (2013). *Wind and exhaust air energy recovery system* (W.O. Patent No. WO2013/073930A1). World Intellectual Property Organization.

Chong, W. T., Poh, S. C., Ahmad, F. A., Yip, S. Y., Chang, C. K., & Hew, W. P. (2013). Early development of an energy recovery wind turbine generator for exhaust air system. *Applied Energy*, 112, 568-575.

Chong, W. T., Poh, S. C., Ahmad, F. A., Yip, S. Y., Chang, C. K., & Hew, W. P. (2013). Exhaust air energy recovery system for electrical power generation in future green cities. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing,* 14(6), 1029-1035.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Chong, W. T., Yip, S. Y., Ahmad, F. A., Poh, S. C., Hew, W. P., Tan, E. P., & Lim, T. S. (2014). Design of an exhaust air energy recovery wind turbine generator for energy conservation in commercial buildings. *Renewable Energy*, 67, 252-256.

Cohen, L. J. (2002). *Electricity generation from air conditioning exhaust* (U.S. Patent No. US6365985B1). U.S. Patent and Trademark Office.

Cooper, R. G. (1990). Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products. *Business Horizons*, 44-54.

Corbus, D., Link, H., Butterfield, S., Stork, C., & Newcomb, C. (1999). Certification Testing for Small Wind Turbines. National Renewable Energy Laboratory.

Daim, T. U., Amer, M., & Brenden, R. (2012). Technology Roadmapping for wind energy: case of the Pacific Northwest. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 27-37.

Darmani, A., Arvidsson, N., Hidalgo, A., & Albors J. (2014). What drives the development of renewable energy technologies? Toward a typology for the systemic drivers. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 834–847.

Davey, K., Hansen, N. R., & Power, D. E. III. (2016). *Energy conversion systems and methods* (U.S. Patent No. US9359991B2). U.S. Patent and Trademark Office.

De Zwart, M. J. T., Maat, C. B., van Beek, A., & van Ostayen, R. A. J. (2007). *Shaftless propeller (*European Patent No. EP1739007A1*)*. European Patent Office.

Degefa M. W., & Teferi S. T. (2014). Energy recovery from exhaust air of textile industry. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(4), 82-86.

Department of Economic and Social Affairs, United Nations. *(*2019*)*. THE 17 GOALS. Retrieved from https://sdgs.un.org/goals. (Accessed 10 September 2019).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department of Energy Affairs of Thailand. (2019). Wind resource assessment of Thailand final report. Retrieved from http://www2.dede.go.th/dede/renew/Twm/MAIN.htm (Accessed 10 September 2019).

European Commission (2014). Technology readiness levels (TRL); Part 19 - Commision Decision C. Retrivied from https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf. (Ascessed 23 August 2022).

Fernando, J. (2021). R-Squared Formula, Regression, and Interpretations. Retrieved from https://www.investopedia.com/terms/r/r-squared.asp. (Accessed 22 December 2022).

Hassan, H. F., El-Shafie, A., & Karim, O. A. (2012). Tidal current turbines glance at the past and look into future prospects in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5707-5717.

Garis, C. A. J. (1992). *Marine propulsor* (U.S. Patent No. US5078628A). U.S. Patent and Trademark Office.

Gilbert, J. R. (2014). *Energy recovery system for exhaust energy capture and electrical generation with a generator built into fan* (U.S. Patent No. US8759997B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Goh K. H., & Duan, F. (2013). Performance of a prototype micro wind turbine in the manmade wind field from air conditioner of buildings. *QScience Connect*, 1, 1-7.

Gumilar, L., Monika, D., Afandi, A. N., & Sias, Q. A. (2019). Wind power plant from air conditioning exhaust using L Savonius wind turbine. *AIP Conference Proceedings,* 2097, 030036.

Gutfleisch, O. (2000). Controlling the properties of high energy density permanent magnetic materials by different processing routes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33(17), 157-172.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Hasan, A., Hossain, M. T., Paul, R., & Akter, N. (2013). Producing electrical energy by using wastage wind energy from exhaust fans of industries. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(8), 1184-1187.

Hasegawa, Y. (2010). *Exhaust air energy recovery system* (Japan Patent No. JP2010185445A). Japan Patent Office.

Hemanth, M. H., Abhishek, M., Anitha, D. J., Soujanya, E. M., & Ravindra, M. P. (2018). Generation of electricity from exhausted air. *International Research Journal of Engineering and Technology,* 5(5), 1748-1753.

Hiremath, M., Abhishek, M., Anitha, D. J., Soujanya, E. M, Patil, R. M. (2018). Generation of electricity from exhausted air. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(5), 1748-1753.

Hossain, M. M., Ali, M. H. (2015). Future research directions for the wind turbine generator system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 481-489.

Jamieson, P. (2011). Innovation in Wind Turbine Design (1 ed.). United Kingdom: *John Wiley & Sons, Ltd*.

Jonnson, S. C. (2008). *Louvered horizontal wind turbine* (U.S. Patent No. US7323791B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Kishore, R. A., & Priya, S. J. (2013). Design and experimental verification of a high efficiency small wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 118, 12-19.

Koya, H., Yang, D. W., & Williams, R. E. (2015). *System and methods for wind energy recapture from a non natural wind source* (U.S. PatentNo. US8939724B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Lai, K. M. (2016). *All-directional flow-guide shaftless wind-driven generator* (W.O. Patent No. WO2016/0233351A1). World Intellectual Property Organization.

Mahawili, I. (2012). *Exhaust energy recovery system* (W.O. Patent No. WO2012149347A2). World Intellectual Property Organization.

Major, S., Commins, T., & Noppharatana, A. (2008). Potential of wind power for Thailand: an assessment. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 2(2), 255-266.

Magnusson, M., Rados, K. G., & Voutsinas, S.G. (1996). A study of the flow downstream of a wind turbine using measurements and simulations. *Wind Engineering*, 20(6), 389-403.

McMahon, E. (2018). *Exhaust fan recapture generator* (U.S. Patent No. USD808000S1). U.S. Patent and Trademark Office.

McMahon, E. (2020). *Rooftop exhaust collectors and power generators, and associated systems and methods* (U.S. Patent No. US10670297B2). U.S. Patent and Trademark Office.

Migali, A., Brunno, D., Malgieri, D., Parussini, L., & Santis, M. D. (2018). Fluid dynamics optimization of a shaft-less rim-driven propeller. *Technology and Science for the Ships of the Future: Proceedings of NAV 2018: 19th International Conference on Ship and Maritime Research*, 811-818.

Nardecchia, F., Groppi, D., & Garcia, D. A. (2021). A new concept for a mini ducted wind turbine system. *Renewable Energy*, 175, 610-624.

National Aeronautics and Space Administration (2019). Technology Readiness Level Definitions. Retrieved from https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf. (Accessed 23 August 2022).

Nimje, A. A., & Gandhi, N. M. (2020). Design and development of small wind turbine for power generation through high velocity exhaust air. *Renewable Energy*, 145, 1487-1493.

Oran Avci, E., & Abdelfatah, E. (2017). *Shaftless multi blade wind turbine* (W.O. Patent No. WO2017200504A1). World Intellectual Property Organization.

Ostroukhov, S. (2016). *Shaftless generator* (U.S. Patent No. US20160329788A). U.S. Patent and Trademark Office.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Park, J. H., Chung, M. H., & Park, J. C. (2016). Development of a small wind power system with an integrated exhaust air duct in high-rise residential buildings. *Energy and Buildings*, 122, 202-210.

Parmar, A., Singh, A., Hassan, Md. I., & Fernandez, G. (2020). Power generation from air conditioner (AC) exhaust fan. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 26(6), 6460-6466.

Patel, D. K., Paramanand, M. A. K., Shyamsaran, C. A., Harinam, K. S., & Patel, S. K. (2013). Design of a system for the power production from waste air of exhaust fans at industries & buildings. *The International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2(4), 852-855.

Patnaik, A., & Ali, S. M. (2013). Industrial exhaust fan as source of power. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 1(9), 38-41.

Puttichaem, W. (2021). *Shaftless horizontal axis wind turbine* (W.O. Patent No. WO2021/118475A1). World Intellectual Property Organization.

Puttichaem, W., Boonyongmaneerat, Y., Vadhanasindhu, P., & Putivisutisak, S. (2020). Performance of the prototype shaftless small-scale wind turbine for electricity generating from the industrial exhaust air system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 463, 012140.

Puttichaem, W., Putivisutisak, S., Boonyongmaneerat, Y., & Vadhanasindhud, P. (2022). Early development of a shaftless horizontal axis wind turbine for generating electricity from air discharged from ventilation systems. *International Journal of Energy Research*, 46, 212-222.

Ragheb, M., & Ragheb, A. M. (2011). Wind Turbines Theory - The Betz equation and optimal rotor tip speed ratio. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. InTech. 21-38.

Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 5(12), 3425-3449.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Schuler, B. L. (2014). *Apparatus and methods for electricity generation from the exhaust of condenser of the HVAC system* (U.S. Patent No. US20140356167A1). U.S. Patent and Trademark Office.

Sequi, L. (2020). *Shaftless wind turbine* (U.K. Patent No. GB2581411). Intellectual Property Office of the United Kingdom.

Sevvel, P., & Santhosh, P. (2014). Innovative Multi-directional Wind Turbine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(3), 1237-1240.

Shamsuddin, M. S. M., & Kamaruddin, N. M. (2020). Design and development of small-scale wind tunnel for flow visualization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 920, 012001.

Sivamani, S., Premkumar, T. M., Kumar, D. V., Reddy, V. K. K., Reddy, K. D., & Hariram, V. (2019). Experimental data on analysis of a horizontal axis small wind turbine with blade tip power system using permanent magnetic generator. *Data in Brief*, 23, 103716.

Smith, V. G., & Parr, L. R. (2005). *Intellectual Property: Valuation, Exploition, and Infringement Damages.* John Wiley & Sons, Inc., Fourth Edition.

Small Wind Certificated Council. (2023). *Standards – Small Wind Turbines.* Retrieved from https://smallwindcertification.org/resources/standards. (Accessed 26 June 2023).

Stengel, R. F., Stengel, L. F., & Assel, H. (1975). *Shaftless energy conversion device* (U.S. Patent No. US3867655A). U.S. Patent and Trademark Office.

Sutabutr, T. (2012). Renewable energy R&D trends in Thailand. Retrieved from https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/143/WEBEGRDTwarath.pdf. (Accessed 10 September 2019).

Tabatabaeikia, S., Ghazali, N. N. N., Chong, W. T., Shahizare, B., Izadyar, N., Esmaeilzadeh, A., & Ahmad, F. A. (2016). Computational and experimental optimization of the exhaust air energy recovery wind turbine generator. *Energy Conversion and Management*, 126, 862-874.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

The Science Agriculture. (2022) Top 10 world's biggest checken meat producer. Available from: https://scienceagri.com/top-10-worlds-biggest-chicken-meat-producers/. (Accessed 8 August 2022).

Trinder, M., & Jabbal, M. (2013). Development of a smoke visualization system for wind tunnel laboratory experiments. *International Journal of Mechanical Engineering Education,* 41(1), 27-43.

Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371.

Varol, A., Ilkılıc, C., & Varol, Y. (2011). Increasing the efficiency of wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, 809–815.

Wanga, F., Baia, L., Fletcher, J., Whiteford, J., & Cullen, D. (2008). Development of small domestic wind turbine with scoop and prediction of its annual power output. *Renewable Energy*, 33, 1637–1651.

Wind Turbine Magazine. (2022) How Fast do Wind Turbines Spin? Available from:https://www.windturbinemagazine.com/how-fast-do-wind-turbines-spin/. (Accessed 22 June 2023).

Wojdylo, H. (2017). *Driver for a turbine generator aided by magnetic levitation (*U.S. Patent No. US9627941B1*)*. U.S. Patent and Trademark Office.

Wu, G. Y. S., Wu, T. J., & Wu, C. A. (2009). *Shaftless vertical axis wind turbine* (U.S. Patent No. US20090220342A1). U.S. Patent and Trademark Office.

Xu, W., Li, Y., & Li, G. (2021). High-resolution numerical simulation of the performance of vertical axis wind turbines in urban area: Part I, wind turbines on the side of single building. *Renewable Energy*, 17, 461-474.

Yadav, A. (2016). Effects of temperature on electric current, magnets and electromagnet. *International Journal of Advancements in Technology*, 7(4), 1-4.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Yan, X., Liang, X., Ouyang, W., Liu, Z., Liu, B., & Lan, J. (2017). A review of progress and applications of ship shaft-less rim-driven thrusters. *Ocean Engineering*, 144, 142-156.

Yildiz, F., Dakeev, U., Baltaci, K., & Coogler, K. L. (2015). Energy havesting from air conditioning condensers with the use of Piezo-electric devices. 122nd ASEE Annual Conference & Exposition June 14-17, 2015 Seattle, WA.

Yildiz, F., Dakeev, U., Baltaci, K., & Coogler, K. (2015). Energy harvesting from air conditioning condensers with the use of piezoelectric devices. *122nd ASEE Annual Conference & Exposition*, June 14-17, 2015, 1-13.

Zakaria, M. Y., Pereira, D. A., & Hajj, M. R. (2015). Experimental investigation and performance modeling of centimeter-scale micro-wind turbine energy harvesters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147, 58-65.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

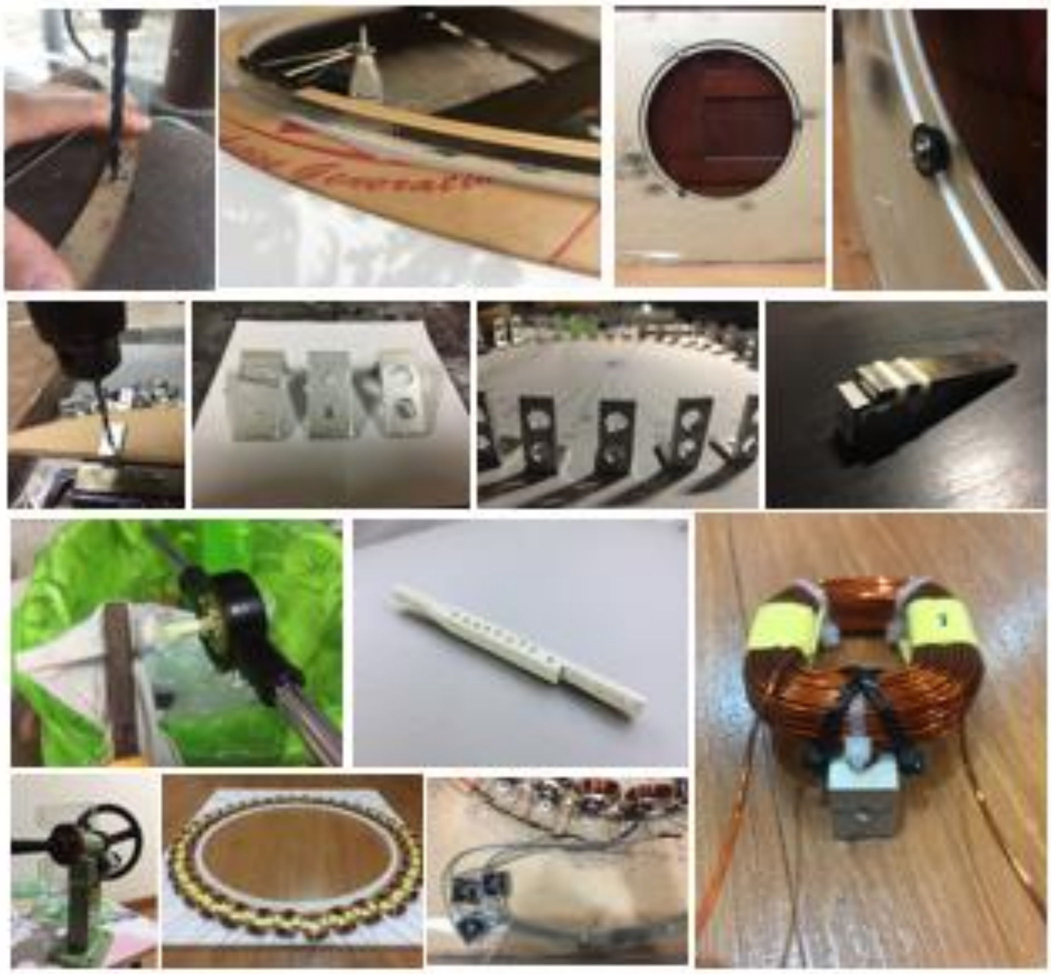
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการสร้างตัวทดสอบความเป็นไปได้ของกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

ภาคผนวก ข

ประมวลขั้นตอนการสร้างตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบาย
อุตสาหกรรม

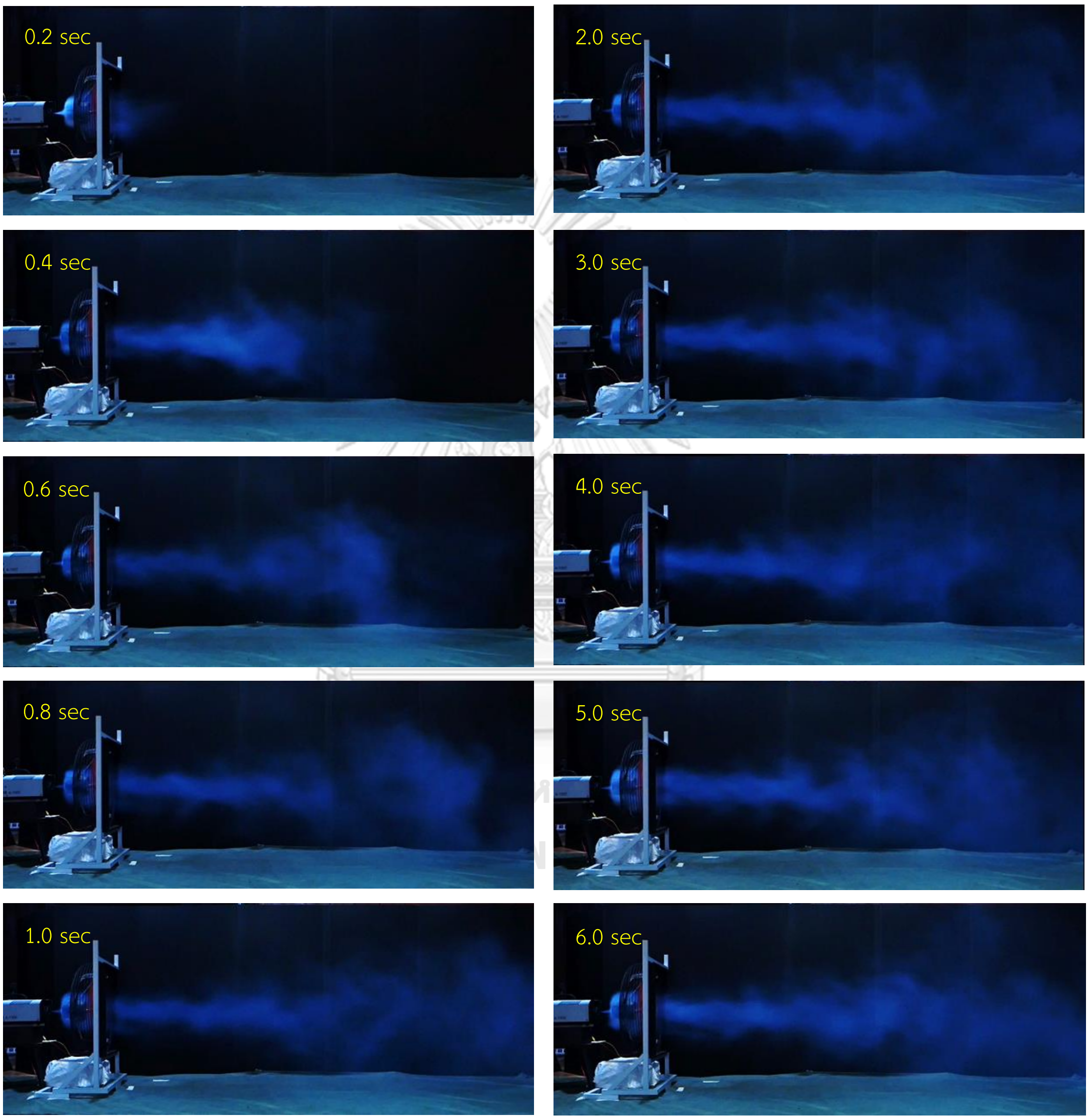


ภาคผนวก ค
ประมวลขั้นตอนการสร้างโรเตอร์และชุดแม่เหล็กสำหรับตัวต้นแบบกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา
สำหรับผลิตไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม

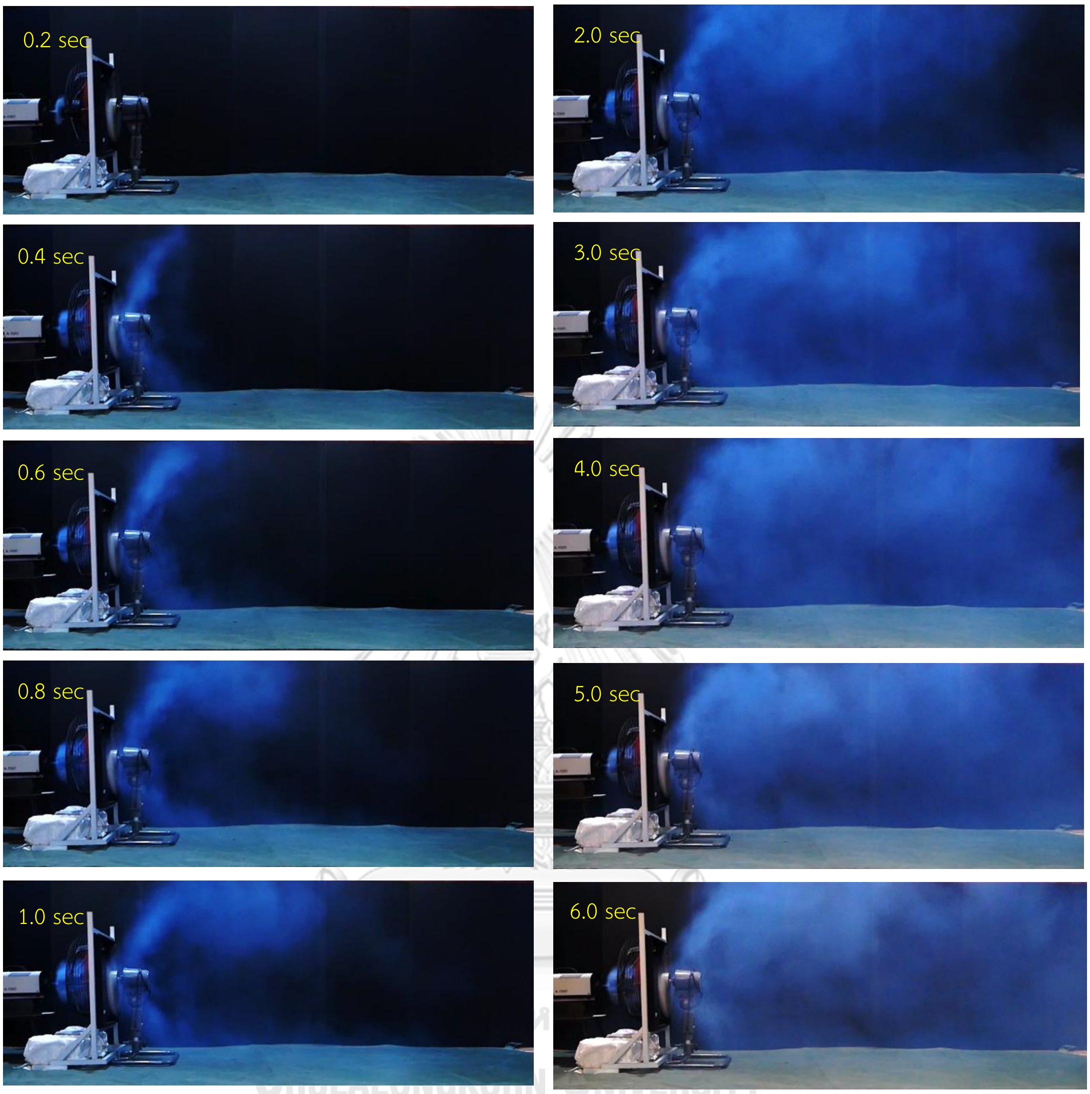
ภาคผนวก ง

การศึกษาลักษณะการไหลของอากาศที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ และผ่านกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิมและผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนใบพัดค่าต่าง ๆ

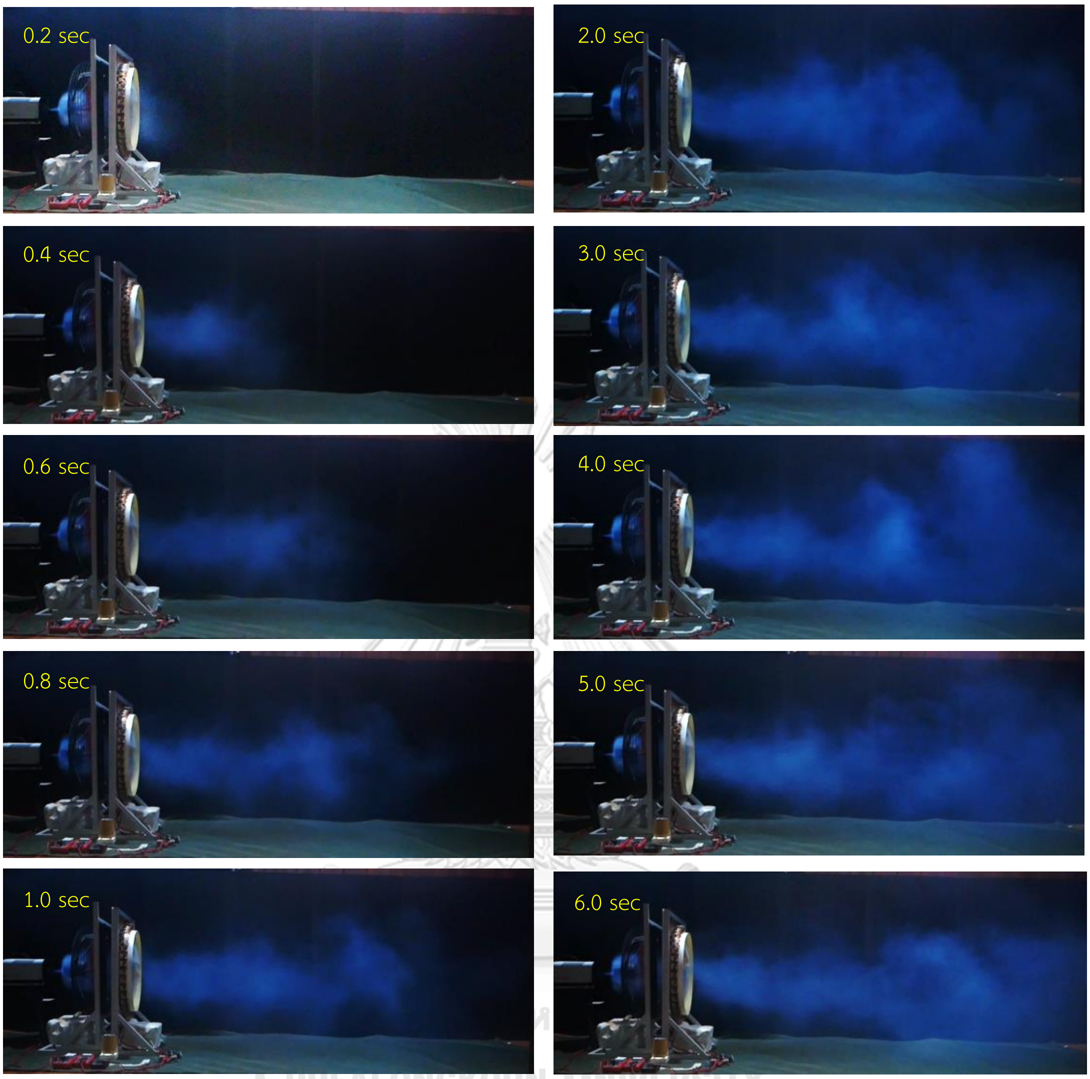
1) ลักษณะการไหลของอากาศที่ออกจากพัดลมระบายอากาศ



2) ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม

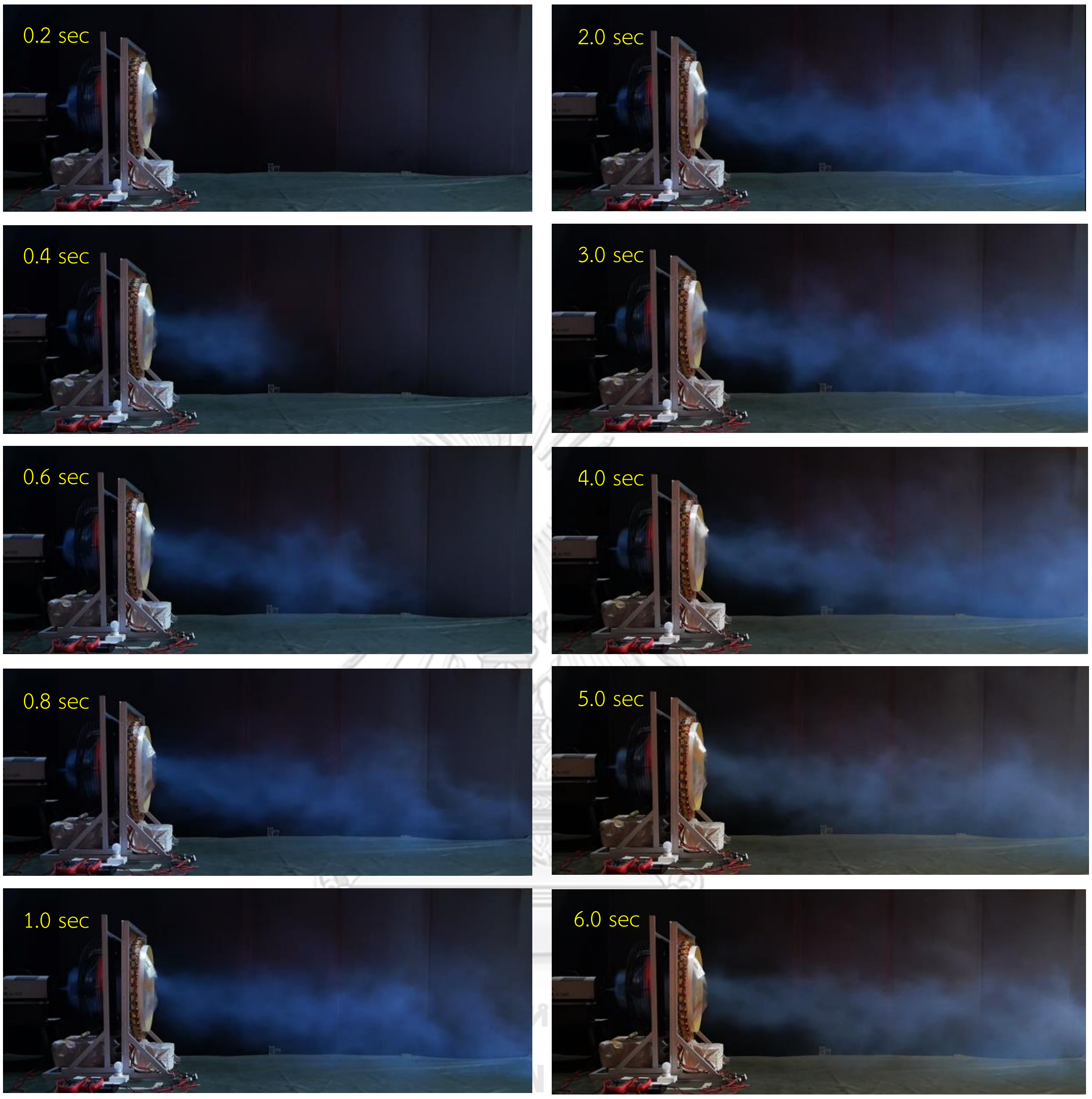


3) ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนยึดใบพัด 105 องศา

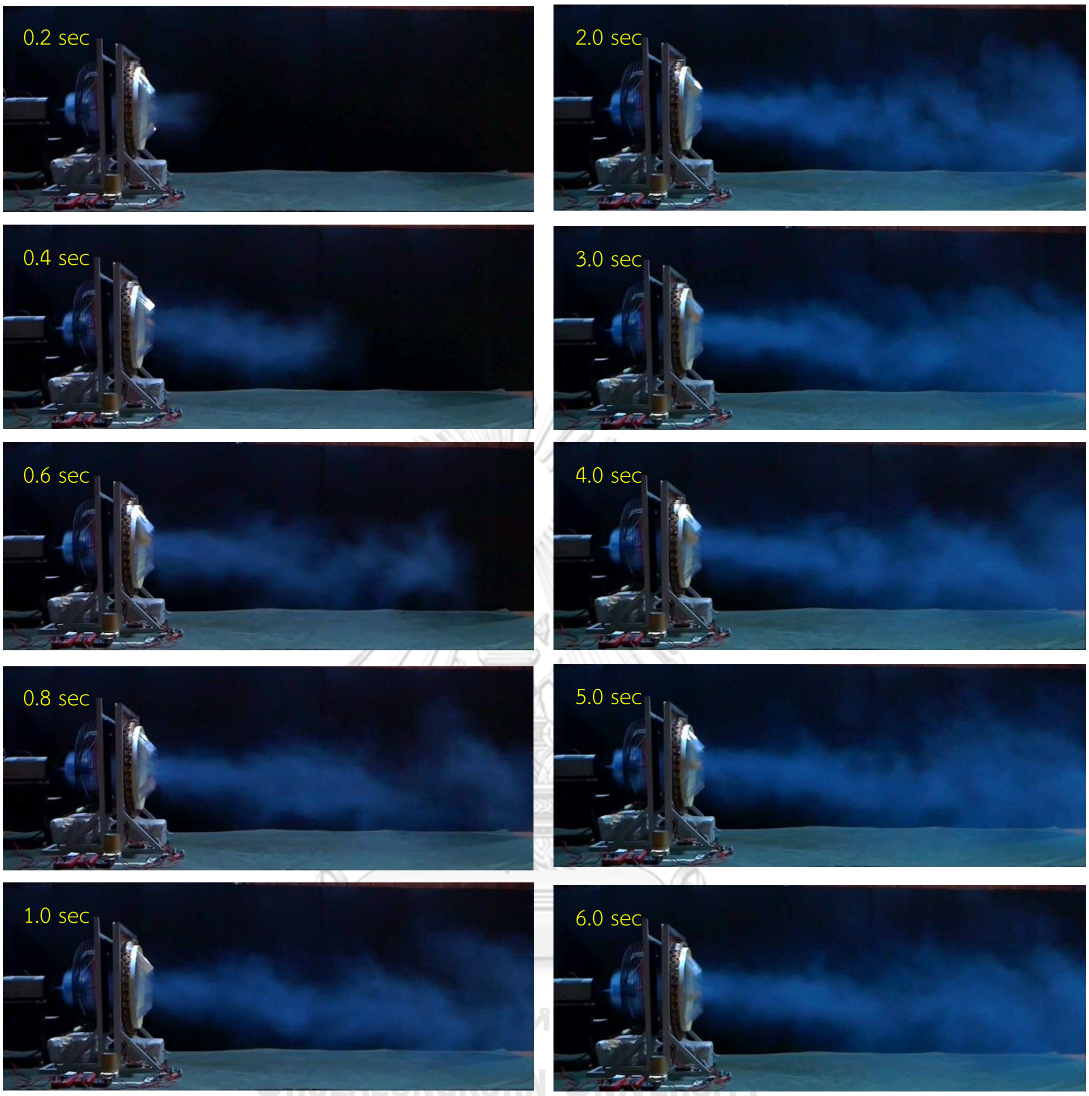


CHULALONGKORN UNIVERSITY

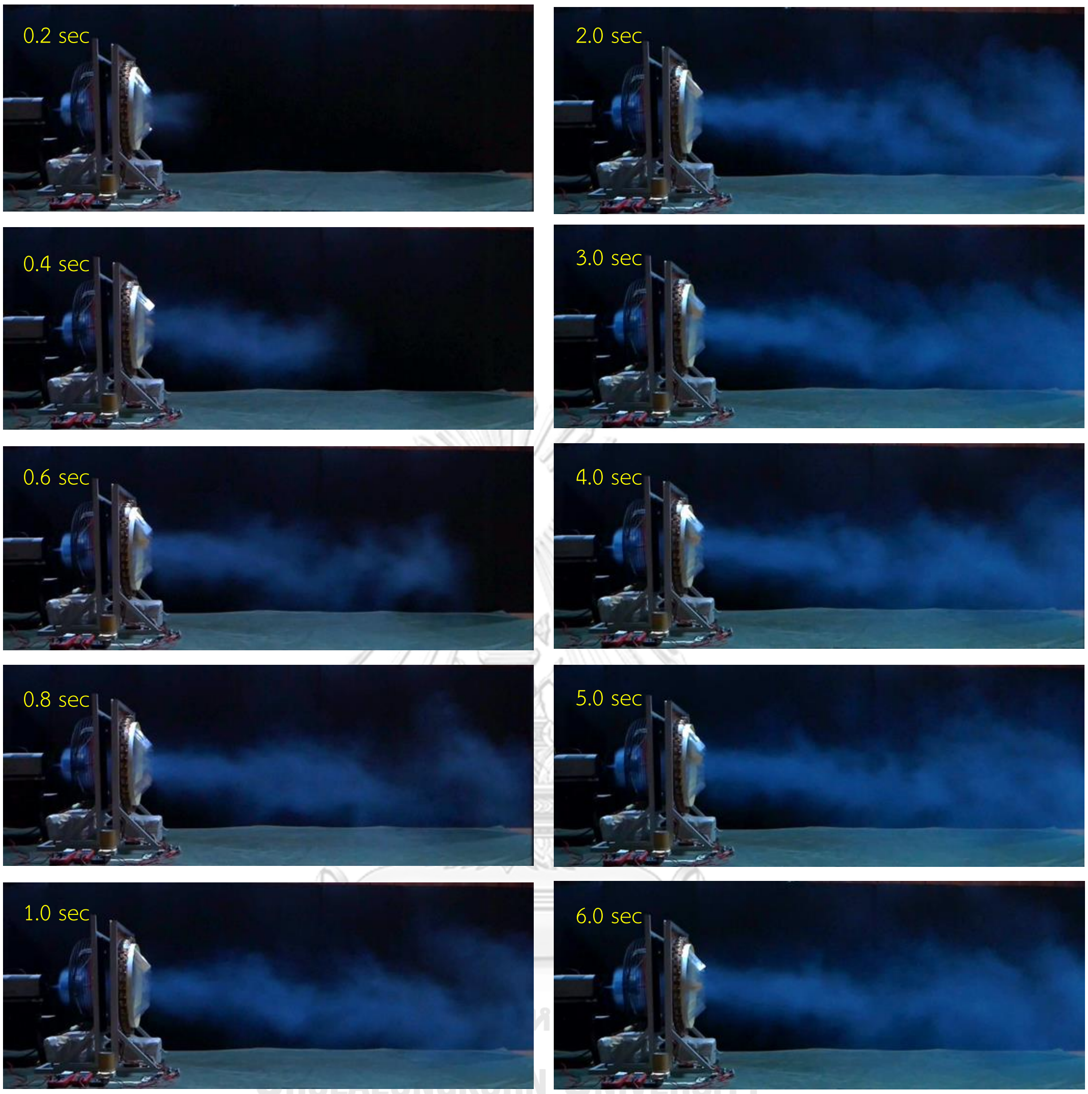
4) ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนยึดใบพัด 120 องศา



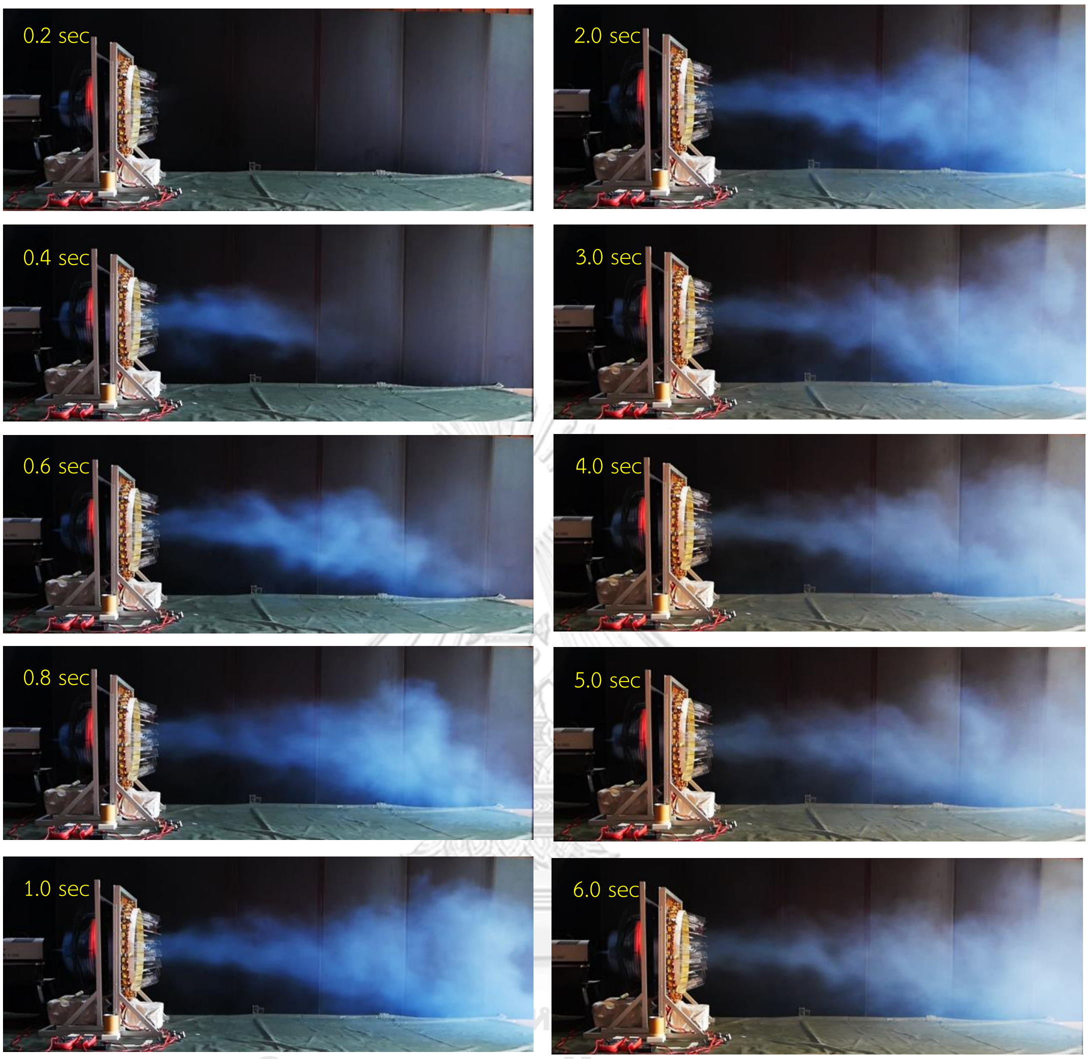
5) ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนยึดใบพัด 135 องศา



6) ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนยึดใบพัด 150 องศา



7) ลักษณะการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาที่มุมแกนยึดใบพัด 165 องศา



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ

แบบสอบถาม

แบบสอบถามเรื่อง "การประเมินการยอมรับผลิตภัณฑ์นวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า"

คำชี้แจง

แบบสอบถามชุดนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยดุษฎีวิทยานิพนธ์ หัวข้อนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมระบายอุตสาหกรรม โดย นายวชิระ พุทธิแจ่ม นิสิตหลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สหสาขาวิชาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจความคิดเห็นและความสนใจในนวัตกรรมกังหันแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาและยื่นจดสิทธิบัตรแล้ว โดยผู้วิจัยจะนำข้อมูลและความเห็นของท่านนำไปวิเคราะห์และสรุปเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนานวัตกรรมสำหรับพลังงานทดแทนที่เหมาะสมและคุ้มค่าต่อไป

ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างยิ่งที่ท่านกรุณาสละเวลาและให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถามและเสนอความคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้

ขอแสดงความนับถือ

นายวชิระ พุทธิแจ่ม (ผู้วิจัย)

นิสิตระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต หลักสูตรสหสาขาธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

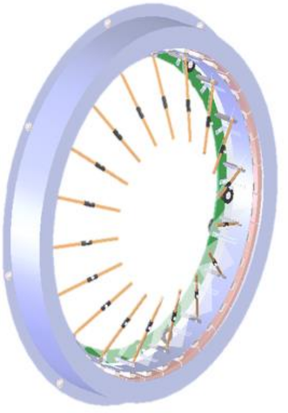
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คุณลักษณะเด่นของนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

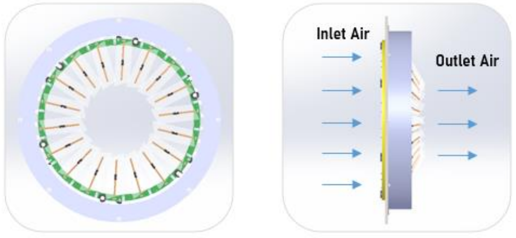
นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความเร็วตั้งแต่ 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป เช่น ลมจากธรรมชาติ ลมทิ้งจากระบบระบายอากาศที่มีพัดลมเป็นอุปกรณ์ต้นกำลังในการระบายจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง ของเหลวหรือก๊าซใด ๆ ที่ถูกระบายทิ้งผ่านระบบท่อโดยอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกลหรือจากแรงโน้มถ่วง ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้

กรณีที่นำกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาไปใช้ผลิตไฟฟ้าจากลมทิ้งจากระบบลมระบายหรือของเหลวหรือก๊าซใด ๆ ที่ถูกระบายทิ้งผ่านระบบท่อโดยอุปกรณ์ต้นกำลังเชิงกลหรือจากแรงโน้มถ่วงที่มีความเร็วการไหลแบบคงที่และไหลเป็นเวลาต่อเนื่องนั้น ของไหลสามารถไหลผ่านกังหันแบบไร้เพลาไปได้โดยไม่มีการไหลย้อนกลับไปยังอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลของของไหล โดยประสิทธิภาพการระบายของไหลออกจากระบบยังคงเป็นไปตามมาตรฐานการระบายที่ออกแบบไว้ และไม่ทำให้ต้นทุนพลังงานของอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งกังหันแบบไร้เพลาเข้ากับระบบ นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ต้นกำเนิดการไหลของของไหลในระยะประชิด ตั้งแต่ 5 มิลลิเมตรขึ้นไปตามทิศทางการไหลของของไหลที่ออกจากอุปกรณ์ต้นกำเนิด เหมาะกับการติดตั้งในพื้นที่ที่จำกัดได้ และมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงเมื่อเทียบกับกังหันแกนนอนแบบดั้งเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดที่เท่ากัน

ผลิตภัณฑ์ต้นแบบนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า



หมายเลขคำขอสิทธิบัตร 1901007703



Product Specification

Product Type	Model	Rotor Diameter	Max Power
Standard	SWT-S050	0.5 m	300 W
	SWT-S100	1.0 m	1000 W
	SWT-S150	1.5 m	1700 W
Customized	SWT-CXXX	› 1.5 m	› 1700 W

เปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศจากระบบลมระบายผ่านกังหัน

กังหันลมแกนนอนแบบดั้งเดิม

กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลา

การนำกังหันแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าไปใช้ในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่สำหรับติดตั้ง

ติดตั้งในแนวแกนนอน

(ทิศทางการไหลของของไหลอยู่ในแกนนอน)

ลมธรรมชาติบนดาดฟ้าอาคาร

ลมระบายจากโรงเรือนเพาะชำ

ลมระบายจากฟาร์มปศุสัตว์ระบบปิด

ลมระบายจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศ

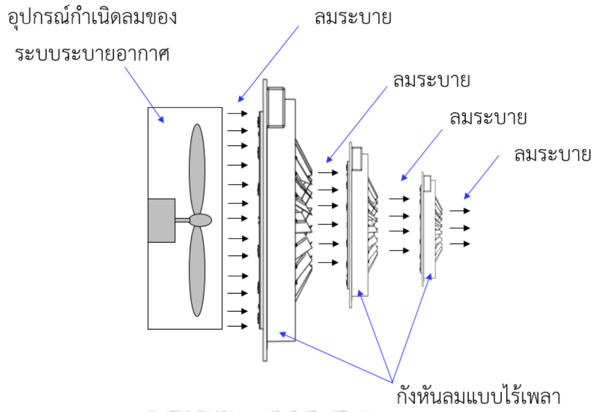
ติดตั้งในแนวแกนตั้ง

(ทิศทางการไหลของของไหลอยู่ในแกนตั้ง)

ลมระบายจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศ

การไหลของน้ำในระบบน้ำทิ้ง

การนำกังหันแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าไปใช้ ในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่สำหรับติดตั้ง



คำอธิบายแบบสอบถาม

แบบสอบถามชุดนี้ใช้สำรวจความเห็นจากกลุ่มตัวอย่าง โดยแบบสอบถามชุดนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การสำรวจความเห็นเกี่ยวกับการยอมรับและการแพร่กระจายนวัตกรรม

ส่วนที่ 2 การสำรวจความเห็นเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้พลังงานทดแทนสำหรับลดต้นทุนด้านพลังงาน

ส่วนที่ 3 การสำรวจความเห็นเกี่ยวกับข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ส่วนที่ 4 ข้อมูลเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ส่วนที่ 1 การสำรวจความเห็นเกี่ยวกับการยอมรับและการแพร่กระจายนวัตกรรม

1. **ด้านการรับรู้ประโยชน์ (Perceive of Usefulness)**

การรับรู้ประโยชน์ (Perceive of Usefulness) 1-ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง 2-ไม่เห็นด้วย 3-ไม่แน่ใจ 4-เห็นด้วย 5-เห็นด้วยอย่างยิ่ง	ระดับความเห็น				
	1	2	3	4	5
1.1 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมธรรมชาติหรือลมทิ้งจากระบบลมระบายที่มีความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไปได้					
1.2 กังหันแบบไร้เพลาสามารถประยุกต์ใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจากการไหลของของไหลอื่น ๆ เช่น ระบบน้ำทิ้ง ก๊าซที่ปล่อยทิ้ง เป็นต้น					
1.3 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งกับเข้าอุปกรณ์กำเนิดลมของของระบบลมระบายในระยะใกล้ (ระยะ 5 มิลลิเมตรขึ้นไป) โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลมระบายลดลง					
1.4 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งเข้ากับระบบลมระบายได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน					
1.5 ในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการติดตั้ง กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งต่อกันเป็นลำดับเพื่อนำลมระบายมาใช้ในให้เกิดประโยชน์สูงสุด					
1.6 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีศักยภาพที่จะพัฒนาให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่ากังหันแกนนอนในปัจจุบันเมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากัน					
1.7 โดยรวมแล้วท่านคิดว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีประโยชน์ที่จะนำไปใช้งาน					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ด้านการรับรู้ถึงความสะดวกในใช้งาน (Perceive of Use)

การรับรู้ถึงความสะดวกในใช้งาน (Perceive of Use) 1-ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง 2-ไม่เห็นด้วย 3-ไม่แน่ใจ 4-เห็นด้วย 5-เห็นด้วยอย่างยิ่ง	ระดับความเห็น				
	1	2	3	4	5
2.1 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสามารถติดตั้งในพื้นที่จำกัด					
2.2 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาง่ายต่อการติดตั้ง					
2.3 กังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาง่ายต่อการซ่อมบำรุง					
2.5 โดยรวมแล้วท่านคิดว่ากังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลามีความสะดวกในใช้งาน					

3. ด้านความสนใจในการใช้งาน (Intention to Use)

ความสนใจในการใช้งาน (Intention to Use) 1-ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง 2-ไม่เห็นด้วย 3-ไม่แน่ใจ 4-เห็นด้วย 5-เห็นด้วยอย่างยิ่ง	ระดับความเห็น				
	1	2	3	4	5
มีความสนใจ อยากได้รายละเอียดเพิ่มเติม					
มีความสนใจ อยากทดลองใช้งาน					
มีความสนใจ อยากซื้อไว้ใช้งานในอนาคตอันใกล้					
มีความสนใจ ตั้งใจจะแนะนำให้ผู้ที่รู้จักศึกษาและมีไว้ใช้งาน					
ไม่สนใจ					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ส่วนที่ 2 การสำรวจความเห็นเกี่ยวกับปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้พลังงานทดแทนสำหรับลดต้นทุนด้านพลังงาน

1) ท่านมีแนวคิดด้านการอนุรักษ์พลังงานโดยใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายหรือไม่

☐ มี ☐ ไม่มี

2) ปัจจุบันท่านมีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนมาใช้หรือไม่

☐ มี ☐ ไม่มี

3) ถ้ามี ท่านผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนใด

☐ พลังงานแสงอาทิตย์

☐ พลังงานลม

☐ พลังงานจากชีวมวล เช่น

☐ พลังงานจากความร้อนที่มีในระบบ

☐ อื่น ๆ โปรดระบุ...

4) ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของท่านในการเลือกใช้พลังงานทดแทนคือ

ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจของท่านในการเลือกใช้พลังงานทดแทน 1-ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง 2-ไม่เห็นด้วย 3-ไม่แน่ใจ 4-เห็นด้วย 5-เห็นด้วยอย่างยิ่ง	ระดับความเห็น				
	1	2	3	4	5
ความคุ้มค่าในการติดตั้ง					
ความสะดวกสบายในการติดตั้ง					
ความสะดวกสบายในการบำรุงรักษา					
ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย					
เทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม					
ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางเสียง กลิ่น					
ไม่มีผลกระทบต่อภูมิทัศน์ บดบังทัศนวิสัย					
เป็นเทคโนโลยีที่ออกแบบและผลิตโดยคนไทย					

5) จุดคุ้มทุน (Return of Investment; ROI) ของนวัตกรรมกังหันลมแกนนอนแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายที่ท่านสามารถยอมรับได้อยู่ที่เท่าใด

☐ น้อยกว่า 1 ปี ☐ ระหว่าง 1-3 ปี ☐ ระหว่าง 3-5 ปี

☐ ระหว่าง 5-7 ปี ☐ ระหว่าง 7-9 ปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ส่วนที่ 3 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นอื่น ๆ

....

....

....

....

....

....

....

....

....

....

ส่วนที่ 4 ข้อมูลผู้ตอบแบบสอบถาม

1. เพศ

☐ ชาย ☐หญิง

2. การศึกษา

☐ ต่ำกว่าปริญญาตรี

☐ ปริญญาตรี

☐ สูงกว่าปริญญาตรี

3. ประเภทของสิ่งก่อสร้างที่มีแหล่งพลังงานลมระบายที่ท่านมีอยู่ (ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ)

☐ อาคาร บ้าน ที่พักอาศัย

☐ สถานประกอบการ/โรงงาน

☐ อาคารสำนักงาน ห้างสรรพสินค้า

☐ โรงเรือนเกษตรหรือปศุสัตว์ระบบปิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. อาคาร สำนักงาน ที่พักอาศัยที่ท่านอยู่มีลมระบายทิ้งออกสู่ภายนอกหรือไม่ ถ้ามีโปรดระบุจำนวนคร่าว ๆ

☐ พัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 ซม. (เช่น พัดลมของคอนเดนซิ่งยูนิตของระบบปรับอากาศขนาดเล็ก พัดลมดูดอากาศ เป็นต้น)

☐ 1 ตัว ☐ 2 ตัว ☐ 3 ตัว ☐ 4 ตัว ☐ 5 ตัว ☐ มากกว่า 5 ตัว

☐ พัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 50–100 ซม. (เช่น พัดลมของคอนเดนซิ่งยูนิตของระบบปรับอากาศขนาดกลาง พัดลมอุตสาหกรรม เป็นต้น)

☐ 1 ตัว ☐ 2 ตัว ☐ 3 ตัว ☐ 4 ตัว ☐ 5 ตัว ☐ มากกว่า 5 ตัว

☐ พัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ซม. (เช่น พัดลมของคอนเดนซิ่งยูนิตของระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ พัดลมระบายอากาศในโรงเรือนระบบปิด เป็นต้น)

☐ 1 ตัว ☐ 2 ตัว ☐ 3 ตัว ☐ 4 ตัว ☐ 5 ตัว ☐ มากกว่า 5 ตัว

5. ระยะเวลาเฉลี่ยต่อวันที่ท่านเปิดใช้งานระบบปรับอากาศหรือระบบระบายอากาศ

☐ 1-4 ชั่วโมง ☐ 4-8 ชั่วโมง ☐ 8-12 ชั่วโมง

☐ 12-16 ชั่วโมง ☐ 16-20 ชั่วโมง ☐ 20-24 ชั่วโมง

6. หากท่านสนใจต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาแจ้งชื่อ-นามสกุลในช่องข้างล่างนี้

   a. ชื่อ
   b. นามสกุล
   c. อีเมล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ฉ

สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศไทย

แบบ สป/สผ/อสป/001-ก
หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า

สำเนา

คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

☑ การประดิษฐ์
☐ การออกแบบผลิตภัณฑ์
☐ อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522 แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535 และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่	
วันรับคำขอ 11 ธ.ค. 2562	เลขที่คำขอ 1901007703
วันยื่นคำขอ 11 ธ.ค. 2562	
สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์ กังหันแบบไร้เพลาสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากกระแสการไหลของของไหล

2. คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่
ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ☐ บุคคลธรรมดา ☐ นิติบุคคล ☑ หน่วยงานรัฐ ☐ มูลนิธิ ☐ อื่นๆ
ชื่อ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ 254 ถนนพญาไท
ตำบล/แขวง วังใหม่ อำเภอ/เขต ปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10330 ประเทศ ไทย
อีเมล
☐ เลขประจำตัวประชาชน ☐ เลขทะเบียนนิติบุคคล ☑ เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0 9 9 4 0 0 0 1 5 9 0 7 2 ☐ เพิ่มเติม (ดังแนบ)
ในกรณีที่กรมฯ สื่อสารกับท่าน ท่านสะดวกใช้ทาง ☐ อีเมลผู้ขอ ☑ อีเมลตัวแทน

3.1 สัญชาติ ไทย
3.2 โทรศัพท์ 02-218-4195-7
3.3 โทรสาร 02-218-4198

ยกเว้นค่าธรรมเนียม
ตามกฎกระทรวง พ.ศ.๒๕๔๗ ว่าด้วยอัตราค่าธรรมเนียมและการยกเว้นค่าธรรมเนียม สำหรับสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร และประกาศคณะกรรมการสิทธิบัตร

4. สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
☐ ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ☑ ผู้รับโอน ☐ ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น

5. ตัวแทน (ถ้ามี)
ชื่อ นายมงคล แก้วมหา
ที่อยู่ สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (อาคารจามจุรี 10) ชั้น 2 ถนนพญาไท
ตำบล/แขวง วังใหม่ อำเภอ/เขต ปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10330 ประเทศ ไทย
อีเมล Mongkol.k@chula.ac.th
เลขประจำตัวประชาชน 3 8 4 0 1 0 0 0 8 4 7 8 5
☑ เพิ่มเติม (ดังแนบ)

5.1 ตัวแทนเลขที่ 1453
5.2 โทรศัพท์ 02-218-4195-7
5.3 โทรสาร 02-218-4198

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ☐ ชื่อและที่อยู่เดียวกันกับผู้ขอ
ชื่อ นายวชิระ พุทธิแจ่ม
ที่อยู่ หลักสูตรธุรกิจเทคโนโลยีและการจัดการนวัตกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท
ตำบล/แขวง วังใหม่ อำเภอ/เขต ปทุมวัน จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10330 ประเทศ ไทย
อีเมล wachira.puttichaem@gmail.com
เลขประจำตัวประชาชน 3 5 1 0 1 0 0 7 9 0 0 6 2
☑ เพิ่มเติม (ดังแนบ)

7. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม
ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร
เลขที่ วันยื่น เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ
☐ คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ☐ ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ☐ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

__หมายเหตุ__ ในกรณีที่ไม่อาจระบุรายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

สำหรับเจ้าหน้าที่

จำแนกประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

☐ กลุ่มวิศวกรรม	☐ กลุ่มเคมี	สิทธิบัตรการออกแบบ	อนุสิทธิบัตร
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมีเทคนิค)	☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1)	☐ อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ไฟฟ้า)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ปิโตรเคมี)	☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2)	☐ อนุสิทธิบัตร (เคมี)
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ฟิสิกส์)	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เทคโนโลยีชีวภาพ)	☐ สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)	
	สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เภสัชภัณฑ์)		

ภาคผนวก ช
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครอง PCT กับ WIPO

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
17 June 2021 (17.06.2021)

WIPO | PCT

(10) International Publication Number
WO 2021/118475 A1

(51) International Patent Classification:
F03D 1/00 (2006.01) ***H02K 1/22*** (2006.01)
H02K 1/12 (2006.01)

(21) International Application Number: PCT/TH2020/000081

(22) International Filing Date: 09 December 2020 (09.12.2020)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:
1901007703 11 December 2019 (11.12.2019) TH

(72) Inventor; and
(71) Applicant: PUTTICHAEM, Wachira [TH/TH]; Technopreneurship and Innovation Management Program, Chulalongkorn University, 254 Chamchuri 10 Floor 10, Soi. Chula 12, Phyathai Road, Bangkok, 10330 (TH).

(74) Agent: KITVACHALASOPHON, Phonlakrit; 189/281 Modi Villa Ratchapruek New, Bangdue, Muang, Prathumtani 12000 (TH).

(81) Designated States *(unless otherwise indicated, for every kind of national protection available)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Designated States *(unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), European (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(54) Title: SHAFTLESS HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE

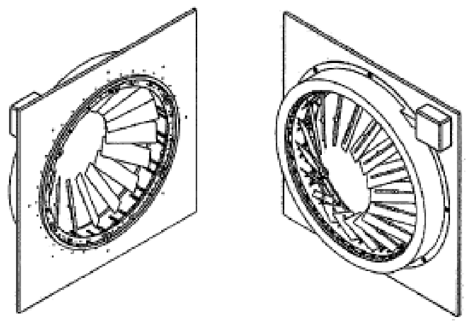


FIG. 1

(57) Abstract: A shaftless horizontal axis wind turbine for generating electricity from the flow of fluid, the major components of which comprise a stator (2) and a rotor(3). The major components of the stator (2) consist of sets of copper coils installed along a circular circumference of a stator frame (4) and electrically connected as the 3-phase circuit of a Star connection circuit. The major components of the rotor (3) consist of at least a set of turbine blades (24), a roller unit (14) and a plurality of magnets (15). The turbine blade (24) has optimized an obtuse angle (θT) of a turbine blade holder (26) and a rotation angle (θR) between the turbine blade holder (26) and the turbine blade (24) to create an open channel in the middle of the shaftless horizontal axis wind turbine, which is shaped like a nozzle without shaft at the center of horizontal axis wind turbine.

WO 2021/118475 A1

(Continued on next page)

ภาคผนวก ซ

สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศสหรัฐอเมริกา

US 20220393548A1

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**

Puttichaem

(10) **Pub. No.: US 2022/0393548 A1**

(43) **Pub. Date: Dec. 8, 2022**

(54) **SHAFTLESS HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE**

(71) Applicant: **Wachira Puttichaem,** Bangkok (TH)

(72) Inventor: **Wachira Puttichaem,** Bangkok (TH)

(21) Appl. No.: **17/776,973**

(22) PCT Filed: **Dec. 9, 2020**

(86) PCT No.: **PCT/TH2020/000081**

§ 371 (c)(1),
(2) Date: **May 13, 2022**

(30) **Foreign Application Priority Data**

Dec. 11, 2019 (TH) 1901007703

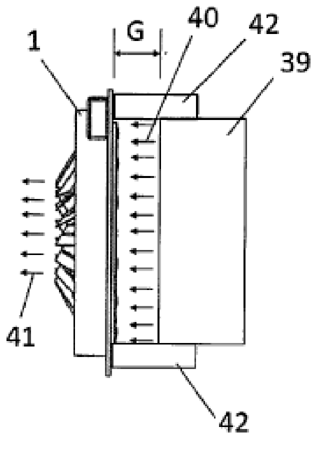
Publication Classification

(51) **Int. Cl.**
H02K 7/18 (2006.01)
H02K 1/16 (2006.01)
H02K 3/32 (2006.01)
F03D 15/00 (2006.01)

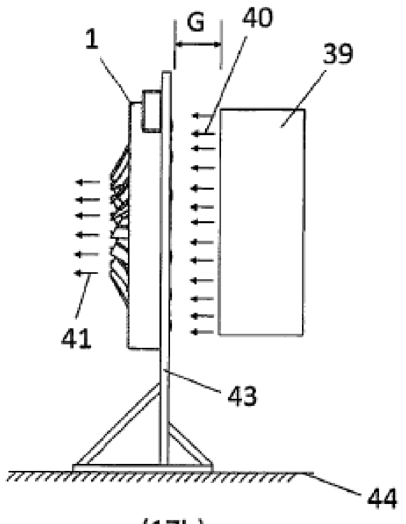
(52) **U.S. Cl.**
CPC ***H02K 7/183*** (2013.01); ***H02K 1/16*** (2013.01); ***H02K 3/32*** (2013.01); ***F03D 15/00*** (2016.05); *F05B 2240/14* (2013.01)

(57) **ABSTRACT**

The invention relates to the shaftless horizontal axis wind turbine for generating electricity from the flow of fluid. The major components of the shaftless horizontal axis wind turbine consist of a stator and a rotor. The major components of the stator consist of a set of copper coils installed along a circular circumference of the stator frame and electrically connected as the Star connection (3-phase) circuit. The major components of the rotor consist of at least a set of the turbine blade, roller, and magnet set. The turbine blade has optimized an obtuse angle (θ_T) of the turbine blade holder and a rotation angle (θ_R) between the turbine blade holder and turbine blade to create the open channel in the middle of the shaftless horizontal axis wind turbine, which is shaped like a nozzle without shaft at the center of horizontal axis wind turbine.



(17a)



(17b)

ภาคผนวก ฌ

สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศจีน

(19) 国家知识产权局

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114651125 A

(43) 申请公布日 2022.06.21

(21) 申请号 202080077436.4

(22) 申请日 2020.12.09

(30) 优先权数据

1901007703 2019.12.11 TH

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.05.06

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/TH2020/000081 2020.12.09

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2021/118475 EN 2021.06.17

(71) 申请人 瓦奇拉・普蒂查姆

地址 泰国曼谷

(72) 发明人 瓦奇拉・普蒂查姆

(74) 专利代理机构 北京汇知杰知识产权代理有限公司 11587

专利代理师 吴焕芳 杨勇

(51) Int.Cl.

F03D 1/00 (2006.01)

H02K 1/12 (2006.01)

H02K 1/22 (2006.01)

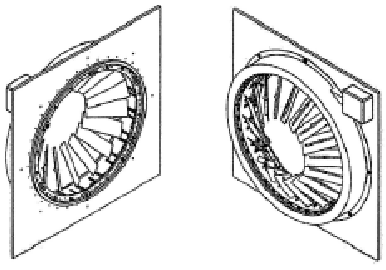
权利要求书3页 说明书5页 附图10页

(54) 发明名称

无轴式水平轴线风力涡轮机

(57) 摘要

用于利用流体的流动发电的无轴式水平轴线风力涡轮机，其主要部件包括定子(2)和转子(3)。定子(2)的主要部件由沿定子框架(4)的圆形周缘安装并电连接为星形连接电路的三相电路的多组铜线圈组成。转子(3)的主要部件由至少一组涡轮机叶片(24)、滚轮单元(14)和多个磁体(15)组成。涡轮机叶片(24)具有优化的涡轮机叶片保持件(26)的钝角(θ_T)和涡轮机叶片保持件(26)与涡轮机叶片(24)之间的旋转角(θ_R)以在无轴式水平轴线风力涡轮机的中部形成形状像喷嘴的敞开通道，而在水平轴线风力涡轮机的中心处没有轴。



CN 114651125 A

ภาคผนวก ญ
สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศอินเดีย

सत्यमेव जयते

Office of the Controller General of Patents, Designs & Trade Marks
Department of Industrial Policy & Promotion,
Ministry of Commerce & Industry,
Government of India

INTELLECTUAL PROPERTY INDIA
PATENTS | DESIGNS | TRADE MARKS
GEOGRAPHICAL INDICATIONS

Application Details

APPLICATION NUMBER	202217030995
APPLICATION TYPE	PCT NATIONAL PHASE APPLICATION
DATE OF FILING	30/05/2022
APPLICANT NAME	**PUTTICHAEM, Wachira**
TITLE OF INVENTION	SHAFTLESS HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE
FIELD OF INVENTION	MECHANICAL ENGINEERING
E-MAIL (As Per Record)	info@anovip.com
ADDITIONAL-EMAIL (As Per Record)	info@anovip.com
E-MAIL (UPDATED Online)	
PCT INTERNATIONAL APPLICATION NUMBER	PCT/TH2020/000081
PCT INTERNATIONAL FILING DATE	09/12/2020
PRIORITY DATE	11/12/2019
REQUEST FOR EXAMINATION DATE	03/05/2023
PUBLICATION DATE (U/S 11A)	16/09/2022

Application Status

APPLICATION STATUS	Application Awaiting Examination

View Documents

Filed → Published → RQ Filed → Under Examination → Disposed

In case of any discrepancy in status, kindly contact ipo-helpdesk@nic.in

ภาคผนวก ฎ

สิทธิบัตรการประดิษฐ์ที่ได้ยื่นขอรับการคุ้มครองในประเทศออสเตรเลีย

Australian Government
IP Australia

14 July 2022

National phase entry for your patent application

P TM D PBR

Delivering a world leading IP system

Phone: 1300 651 010
International: +61 2 6283 2999
www.ipaustralia.gov.au
ABN: 38 113 072 755

Application number 2020402475
Applicant name Wachira Puttichaem

Dear Applicant,

We have received your request for national phase entry for PCT application number PCT/TH2020/000081 and it has entered national phase.

Your standard patent application number is: 2020402475

This application was filed on: 9 December 2020

The national phase entry date is: 8 July 2022

What you need to do now

- **Check your details** – attached to this letter are the details of your application. Please review your details to ensure they are correct.

What you can do

- **Request a preliminary search and opinion** – this is optional and can be requested at any time before the filing of a request for examination. It provides an opinion listing documents disclosing inventions similar to yours as well as an explanation of their relevance.

Your progress

Filed
Application is filed

Examination
Application is being examined

Acceptance
Application is accepted
(enters an opposition period lasting 3 months)

Grant
Patent is granted
(patent is now enforceable)

Continuation/Renewal
Fees required to maintain application/patent
(fees are due annually – please refer to the 'paid to' date in AusPat for your next due date)

Need help?

Talk to Alex, our virtual assistant

For further information on this topic, visit our website.

Make an enquiry or provide feedback on our website.

ภาคผนวก ฏ

รางวัลบทความยอดเยี่ยม (Best Paper Award) ที่ได้รับจากที่ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The International Conference on Sustainable Energy and Green Technology (SEGT 2019) December 11-14, 2019, Bangkok, Thailand

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวชิระ พุทธิแจ่ม
วัน เดือน ปี เกิด	11 พฤศจิกายน 2521
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	• วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี • วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การพัฒนาความสามารถทางการแข่งขันเชิงอุตสาหกรรม) สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	108/3 หมู่ 3 ต.มะเขือแจ้ อ.เมือง จ.ลำพูน
ผลงานตีพิมพ์	• Panaaek Athichalinthorn, Jidsucha Darayen, Wachira Puttichaem, Ratchatee Techapiesancharoenkij, and Boonrat Lohwongwatana, (2017). The Thermal-Aging Effect on the Microstructure Evolution and Shear Strength of the Sn-Rich Au-Sn Soldering between AlTiC and Si Substrate in Microelectronics. Key Engineering Materials, Vol. 751, p3-8. 6p. • Katayut Kamano, Uttapol Smutkupt, Wachira Puttichaem, and Adisak Tokaew, 2011, “Optimal Parameter in Back Sides Pad Slider Bonding”, Engineering Journal CMU Vol.18 (1), 33-38. • Wachira Puttichaem, Woranut Koetsinchai, and Weerachai Kaensup, “Multi-Techniques Approach for Process Improvement of Solder Jet Bonding in Head Gimbals Assembly Manufacturing”, GMSTEC 2010: International Conference for a Sustainable Greater Mekong Sub-region, Bangkok, Thailand, August 2010. • Wachira Puttichaem, Woranut Koetsinchai, and Weerachai Kaensup, “Design and Optimization of Solder Jet Bonding process in HGA manufacturing”, International Conference on Data Storage Technology (DSTCON-2010), May 2010. • Katayut Kamano, Uttapol Smutkupt, Wachira Puttichaem, and Adisak Tokaew, 2010, “Back Side Pad Bonding of Hard Disk Head Slider”, CMU.J.Nat.Sci Special Issue on Manufacturing Technology Vol.10 (1), 29-37. • Wararat Lertkittiwattanakul, Reangroaj Roajanasiri, Adisak Tokaew, Wachira Puttichaem, and Siridech Boonsang, “A 3D Model for A Solder Joint Bridging Effect in HGA Manufacturing: Simulation and Validation”, International Conference on Data Storage Technology (DSTCON-2009), May 2009. • Wachira Puttichaem, Sompong Putivisutisak, Yuttanant Boonyongmaneerat, Pakpachong Vadhanasindhud, “Early development of a shaftless horizontal axis wind turbine for generating electricity from air discharged from ventilation systems”, Int J Energy Res. (2020);1–11. doi: 10.1002/er.6221. • Wachira, Puttichaem, Yuttanant Boonyongmaneerat, Pakpachong Vadhanasindhu, Sompong Putivisutisak, “Performance of the prototype shaftless small scale horizontal wind turbine for electricity generating from industrial exhaust air system”, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 463 (2020) 012140. doi:10.1088/1755-1315/463/1/012140.
รางวัลที่ได้รับ	• Best Paper Award of International Conference on Data Storage Technology (DSTCON-2010), “Design and Optimization of Solder Jet Bonding process in HGA manufacturing”, BITEC Bangna, Bangkok, May 2010. • Best paper Award of International Conference on Sustainable Energy and Green Technology 2019 (SEGT 2019), “Performance of the prototype shaftless small scale horizontal wind turbine for electricity generating from industrial exhaust air system”, Bangkok, Thailand, Dec 2019.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University