

การวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพร
มูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

การวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพร
มูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



วัชระ กลั่นควัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพร
มูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

วัชระ กลั่นคูวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริดา นาเทเวศน์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืช สมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์
ชื่อผู้เขียน	นายวัชร กุลันคูวัฒน์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทำการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทั้ง 3 ระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม โดยทำการออกแบบชุดไฟเพาะเลี้ยงสำหรับในร่มและแบบกึ่งในร่มนอกร่ม การเลือกสารทำงานที่เหมาะสมในระบบปรับอากาศสำหรับการเพาะเลี้ยงในร่ม รวมถึงจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการเพาะเลี้ยงในร่ม จากผลการศึกษาพบว่า ห้องปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในร่มมีขนาด $2.4 \text{ m} \times 3.4 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ สามารถติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงได้จำนวน 5 ชุด โดยชุดไฟเพาะเลี้ยงมีขนาด $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงสีม่วงจำนวน 1 lamp ที่กำลังไฟ 300 W_e และไดโอดเปล่งแสงสีขาวจำนวน 2 lamp ที่กำลังไฟ 100 W_e และสารทำงาน R-32 มีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในระบบปรับอากาศขนาดการทำความเย็น ขนาด 3.6 kW สำหรับพืชสมุนไพรมูลค่าสูง เนื่องจากมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างน้อยที่ประมาณ $438.75 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg}$ มีคุณสมบัติการติดไฟต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นประมาณ 7 โดยมีปริมาณน้ำที่ได้จากการควบแน่นของระบบปรับอากาศประมาณ 18 l/d สามารถนำไปใช้เพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงได้ 23 plant สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นระบบรดน้ำอัตโนมัติด้วยระบบน้ำหยด ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณยังสนับสนุนผลการจำลองทางด้านความร้อนด้วยผลอัตราการไหลของอากาศ $0.187 \text{ m}^3/\text{s}$ สำหรับอุณหภูมิภายในห้องเฉลี่ย $25.41 \text{ }^\circ\text{C}$ และความดันตกคร่อมภายในห้องเฉลี่ย 101.322 kPa ด้านผลผลิตช่อดอกแห้งของสมุนไพรมูลค่าสูง พบว่า การปลูกระบบกลางแจ้ง ระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม และระบบปลูกในร่มประมาณ 66.7 g, 55.8 g, และ 46.3 g ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเพาะปลูกในร่ม, กึ่งในร่มนอกร่ม, และกลางแจ้งประมาณ 507.6 kWh, 106.5 kWh, และ 8.22 kWh ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้นทุนต่อผลผลิตช่อดอกแห้งของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกลางแจ้ง,

ระบบปลุกกิ่งในร่มนอกร่ม, และระบบปลุกในร่มมีค่าประมาณ 2,912.49 Baht/kg, 51,791.28 Baht/kg, และ 87,937.59 Baht/kg ตามลำดับ นอกจากนี้ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการประเมินวัฏจักรชีวิตด้วยวิธีการเรซิปของผลกระทบชั้นกลาง 18 ด้าน ที่หน่วยการทำงาน 1 kg_{dry} พบว่า ระบบปลุกในร่มส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด อันเนื่องมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเพาะปลูก ซึ่งมากกว่าระบบปลุกกลางแจ้งและระบบปลุกกิ่งในร่มนอกร่มประมาณ 63×10^3 เท่า และ 40 เท่า ตามลำดับ โดยผลด้านสิ่งแวดล้อมของระบบปลุกในร่มสามารถลดลงได้ด้วยการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1.785 kW_e ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันประมาณ 10.2 kWh/d

คำสำคัญ : พืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์, การประเมินวัฏจักรชีวิต, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, ต้นทุนต่อการผลิต



Title	YIELD, ENERGY, ECONOMIC AND ENVIRONMENT ANALYSIS OF HIGH-VALUE MEDICINAL HERB COMBINED WITH SOLAR POWER GENERATION SYSTEM
Author	Mr. Watchara Klancoowat
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Associate Professor Dr. Nattaporn Chaiyat

ABSTRACT

In this research studies the yield, energy, economic, and environmental analysis of high-value medicinal herb plantation combined with solar power generation system were carried out. Three cultivation models were studied consisting of the outdoor, indoor, and semi-indoor-outdoor systems. The research was achieved by designing of a lighting set for the indoor and outdoor cultivation, suitable working fluid in the air conditioning indoor cultivation, and modelling of a computational fluid dynamic (CFD) for indoor cultivation. From the study results, the indoor cultivation room at a sizing of 2.4 m x 3.4 m x 2.5 m was used to contain five lighting sets at each sizing of 1.0 m x 1.0 m x 2.0 m, which consists of one-violet light emitting diodes (LED) at a power of 300 W_e and two-daylight LEDs at each power of 100 W_e. The result also revealed that R-32 is the suitable working fluid in air conditioning at a cooling capacity of 3.6 kW for indoor cultivation system, because of low carbon dioxide emission at a value of approximately 438.75 kg CO₂ eq/kg, low-flammability property, and coefficient of performance (COP) at a value of approximately 7. In addition, condensed water from air conditioning system at a volume of approximately 18 l/d can be used for cannabis cultivation of 23 plant. It can be developed into an automatic watering system with a drip irrigation system. The CFD simulation result also supports the thermal result in terms of an air flow rate of 0.187 m³/s, an average room temperature of 25.41 °C, and an average

pressure of 101.322 kPa. The yield of the dried high-value medicinal herb for the outdoor, semi-indoor-outdoor, and indoor cultivation systems were approximately 66.7 g, 55.8 g, and 46.3 g, respectively. The electrical power consumption of the indoor, semi-indoor-outdoor, and outdoor cultivation systems were approximately 507.6 kWh, 106.5 kWh, and 8.22 kWh, respectively. For the economic result, a product cost of the dried high-value medicinal herb of the outdoor, indoor, and semi-indoor-outdoor cultivation systems were found to be approximately 2,912.49 Baht/kg, 51,791.28 Baht/kg, and 87,937.59 Baht/kg, respectively. In addition, the environmental impact from a life cycle assessment (LCA) method by using the ReCiPe method of 18 midpoint impacts had on a functional unit of 1 kg_{dry} revealed that the Indoor cultivation system is the most environmental impact from electricity in cultivation process, which was higher than the LCA result of the outdoor and semi-indoor-outdoor cultivation systems of approximately 63×10^3 times and 40 times, respectively. The environmental of the indoor cultivation system result can be reduced by using a solar power generation system of 1.785 kW_e for decreasing a power consumption during daytime of approximately 10.2 kWh/d.

Keywords : High-value medicinal herb, Life cycle assessment, Solar power generation system, Cost of production

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา นาเทเวศน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และอาจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สินธญา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์อุปการณ์ในการทดสอบต่าง ๆ รวมถึงทุนอุดหนุนการวิจัยจาก “โครงการผลิตและพัฒนาศึกษานิเทศก์บัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปีการศึกษา 2562 จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อนึ่ง ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา จนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องและขอมอบความกตัญญูตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านสำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

วัชระ กลั่นสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตการศึกษา	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร	4
พีชแคนนาบิส	4
เทคโนโลยีการผลิตพืชในระบบปลูกในร่ม	5
ไดโอดเปล่งแสง.....	8
ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	9
การประเมินวัฏจักรชีวิต.....	11
ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต	11
การปันส่วน	15
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	16

การตรวจสอบเอกสาร.....	17
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	20
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	33
ผลการออกแบบ สร้าง และติดตั้งของชุดไฟเพาะเลี้ยงของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์	33
ผลการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม	36
ผลการออกแบบ และจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของระบบปรับอากาศที่เหมาะสม สำหรับระบบปลูกในร่ม	40
ผลการสร้าง และติดตั้งระบบรดน้ำอัตโนมัติ	44
ผลการเลือกสายพันธุ์พืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์	48
ผลการทดสอบระบบเพาะปลูกของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์	49
ผลการเพาะเมล็ดพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์.....	49
ผลการเพาะเลี้ยงต้นกล้าพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์	50
ผลการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกกลางแจ้ง.....	52
ผลการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกในร่ม	54
ผลการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม	56
ผลการเก็บเกี่ยวและการตากแห้งผลผลิตพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์	58
ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	60
ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์	62
ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้ง... ..	63
ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูก กลางแจ้ง.....	63
ผลการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	76
ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกในร่ม	76

ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูก ในร่ม.....	77
ผลการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม .	90
ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกกึ่งในร่มนอก ร่ม.....	91
ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูก กึ่งในร่มนอกร่ม.....	92
ผลการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่ม นอกร่ม.....	105
ผลการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ ในระบบเพาะปลูกทั้ง 3 ระบบ	106
ผลการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบปลูกในร่ม	107
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ.....	109
สรุปผล.....	109
ข้อเสนอแนะ.....	112
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก การเผยแพร่บทความวิชาการ	114
บรรณานุกรม.....	151
ประวัติผู้วิจัย.....	154

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018)	2
ตารางที่ 2 รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง	23
ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของสารทำงาน	26
ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทำงานของสารทำงานในระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม	26
ตารางที่ 5 ประเภทกลุ่มผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	31
ตารางที่ 6 รายละเอียดอุปกรณ์ของชุดไฟเพาะเลี้ยงและเครื่องมือตรวจวัด	35
ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม	39
ตารางที่ 8 เงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วลม	41
ตารางที่ 9 คำอธิบายส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ	43
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบของระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม	44
ตารางที่ 11 รายละเอียดของปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง	46
ตารางที่ 12 รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบรดน้ำอัตโนมัติ	47
ตารางที่ 13 คุณสมบัติของสายพันธุ์พืชสมุนไพรมูลค่าสูง	48
ตารางที่ 14 รายละเอียดการควบคุมสถานะแวดล้อมของระบบปลูกในร่ม	54
ตารางที่ 15 รายละเอียดต้นตัวแทนและผลผลิตช่อดอกสดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง	58
ตารางที่ 16 น้ำหนักของผลผลิตช่อดอกก่อนตากแห้งและหลังจากตากแห้ง	60
ตารางที่ 17 การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	60
ตารางที่ 18 การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม	61
ตารางที่ 19 การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม	61

ตารางที่ 20 ผลการประเมินต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 62

ตารางที่ 21 บัญชีรายการข้อมูลของการเพาะพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง 63

ตารางที่ 22 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกในระบบปลูกกลางแจ้ง 66

ตารางที่ 23 บัญชีรายการข้อมูลของการเพาะพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม..... 77

ตารางที่ 24 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกในระบบปลูกในร่ม 80

ตารางที่ 25 บัญชีรายการข้อมูลของการเพาะพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 92

ตารางที่ 26 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม
..... 95

ตารางที่ 27 แสดงการคำนวณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ 108



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ซ่อดอกเพศผู้และซ่อดอกเพศเมียของพืชตระกูลแคณนาบิส.....	5
ภาพที่ 2 ระบบปลุกพืชในร่ม.....	6
ภาพที่ 3 แผนภาพการทำงานของระบบปรับอากาศแบบอัตโนมัติ.....	7
ภาพที่ 4 การทำงานของไดโอดเปล่งแสง.....	8
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนของแสงกับช่วงความยาวคลื่นแสง.....	9
ภาพที่ 6 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	10
ภาพที่ 7 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	11
ภาพที่ 8 กรอบการดำเนินงานการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตตามมาตรฐาน ISO14040	12
ภาพที่ 9 การจำแนกสารเคมีตามประเภทของผลกระทบ.....	13
ภาพที่ 10 โรงเรือนระบบระเหยความเย็น.....	18
ภาพที่ 11 แผนผังขั้นตอนของการดำเนินงาน	20
ภาพที่ 12 แผนภาพชุดไฟเพาะเลี้ยง.....	21
ภาพที่ 13 แผนภาพการตรวจวัดค่าความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสงแต่ละระดับ	22
ภาพที่ 14 ตำแหน่งของจุดตรวจวัดค่าความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง.....	22
ภาพที่ 15 ระบบปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกกลางแจ้ง	23
ภาพที่ 16 ระบบปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกในร่ม.....	24
ภาพที่ 17 แผนผังแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบปรับอากาศ	25
ภาพที่ 18 ภาพสามมิติของห้องเพาะปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงด้วยระบบปลุกในร่ม	27
ภาพที่ 19 ระบบปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกกึ่งในร่มนอกร่ม.....	28
ภาพที่ 20 แผนผังขอบเขตการศึกษาของการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง	30
ภาพที่ 21 ภาพวาดสามมิติของชุดไฟเพาะเลี้ยง	33

ภาพที่ 22 ชุดไฟเพาเซเลียงและระดับความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง	34
ภาพที่ 23 ช่วงความยาวคลื่นแสงจากไดโอดเปล่งแสง	35
ภาพที่ 24 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้	36
ภาพที่ 25 ปริมาณสารทำงานในระบบปรับอากาศ.....	37
ภาพที่ 26 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารทำงานแต่ละชนิด.....	38
ภาพที่ 27 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ	39
ภาพที่ 28 ภาพวาดสามมิติของห้องเพาเซปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงระบบปลูกในร่ม	40
ภาพที่ 29 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 2.7 kW (0.165 m ³ /s).....	41
ภาพที่ 30 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 3.6 kW (0.187 m ³ /s).....	41
ภาพที่ 31 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 4.4 kW (0.197 m ³ /s).....	42
ภาพที่ 32 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 5.3 kW (0.215 m ³ /s).....	42
ภาพที่ 33 ความดันเฉลี่ยภายในห้องเพาเซปลุกของเครื่องปรับอากาศขนาด 3.6 kW	43
ภาพที่ 34 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเพาเซปลุกของเครื่องปรับอากาศขนาด 3.6 kW	43
ภาพที่ 35 แผนผังการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติ.....	45
ภาพที่ 36 ระบบรดน้ำอัตโนมัติแบบหัวหยด	46
ภาพที่ 37 การเพาเซเมล็ดพืชสมุนไพรมูลค่าสูง (ก) ก่อนเพาเซเมล็ด และ (ข) หลังเพาเซเมล็ด	49
ภาพที่ 38 ขั้นตอนการเพาเซเลี้ยงต้นกล้า.....	50
ภาพที่ 39 ต้นกล้าพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ที่ได้จากการคัดเลือก	51
ภาพที่ 40 ต้นกล้าพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์.....	51
ภาพที่ 41 พื้นที่เพาเซปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกลางแจ้ง	52
ภาพที่ 42 ต้นตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกลางแจ้ง	53
ภาพที่ 43 หนองแมลงศัตรูพืชของการเพาเซปลุกระบบปลูกกลางแจ้ง	53
ภาพที่ 44 พื้นที่เพาเซปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกในร่ม.....	55
ภาพที่ 45 ต้นตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกในร่ม.....	56

ภาพที่ 46 พื้นที่เพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม.....	57
ภาพที่ 47 ต้นตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม.....	57
ภาพที่ 48 หนอนแมลงศัตรูพืชของการเพาะปลูกระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม	58
ภาพที่ 49 ผลผลิตช่อดอกสดที่ผ่านการตัดแต่งใบ	59
ภาพที่ 50 กระบวนการตากแห้งผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง	59
ภาพที่ 51 ขอบเขตการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ใน ระบบปลูกกลางแจ้ง	63
ภาพที่ 52 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศตลอดวัฏจักรชีวิตของ การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง.....	67
ภาพที่ 53 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการลดลงของชั้นโอโซนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูก พืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	67
ภาพที่ 54 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดรังสีชนิดก่อกวนไอออนซ์ตลอดวัฏจักรชีวิตของ การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง.....	68
ภาพที่ 55 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดสารออกซิแดนซ์ที่โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	68
ภาพที่ 56 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการก่อตัวของฝุ่นละอองตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูก พืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	69
ภาพที่ 57 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดสารออกซิแดนซ์ที่โฟโตเคมีต่อคุณภาพของ ระบบนิเวศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	69
ภาพที่ 58 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดภาวะฝนกรดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืช สมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	70
ภาพที่ 59 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดตลอดวัฏ จักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง.....	70
ภาพที่ 60 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเลตลอดวัฏ จักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง.....	71

ภาพที่ 61 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	71
ภาพที่ 62 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	72
ภาพที่ 63 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	72
ภาพที่ 64 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	73
ภาพที่ 65 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่ มะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	73
ภาพที่ 66 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการใช้ที่ดินตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพร มูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	74
ภาพที่ 67 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุตลอดวัฏจักรชีวิตของ การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง.....	74
ภาพที่ 68 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการลดลงของทรัพยากรฟอสซิลตลอดวัฏจักรชีวิตของ การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง.....	75
ภาพที่ 69 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืช สมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง	75
ภาพที่ 70 การแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงใน ระบบปลูกกลางแจ้ง	76
ภาพที่ 71 ขอบเขตการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ใน ระบบปลูกในร่ม.....	77
ภาพที่ 72 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศตลอดวัฏจักรชีวิตของ การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	81
ภาพที่ 73 ผลกระทบของการใช้วัตถุบิต่อต้านการลดลงของชั้นโอโซนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูก พืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	82

ภาพที่ 74 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดการเกิดรังสีชนิดก่อกอไอออนซ์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	82
ภาพที่ 75 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดการเกิดสารออกซิแดนซ์โพโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	83
ภาพที่ 76 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการก่อตัวของฝุ่นละอองตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	83
ภาพที่ 77 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดการเกิดสารออกซิแดนซ์โพโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	84
ภาพที่ 78 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดภาวะฝนกรดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	84
ภาพที่ 79 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	85
ภาพที่ 80 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	85
ภาพที่ 81 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบกตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	86
ภาพที่ 82 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	86
ภาพที่ 83 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	87
ภาพที่ 84 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	87
ภาพที่ 85 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	88
ภาพที่ 86 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการใช้ที่ดินตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม.....	88

ภาพที่ 87 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุตลอดวัฏจักรชีวิตของ
การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม..... 89

ภาพที่ 88 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการลดลงของทรัพยากรฟอสซิลตลอดวัฏจักรชีวิตของ
การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม..... 89

ภาพที่ 89 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืช
สมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม..... 90

ภาพที่ 90 การแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงใน
ระบบปลูกในร่ม..... 91

ภาพที่ 91 ขอบเขตการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ใน
ระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 92

ภาพที่ 92 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศตลอดวัฏจักรชีวิตของ
การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 96

ภาพที่ 93 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการลดลงของชั้นโอโซนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูก
พืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 97

ภาพที่ 94 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการเกิดรังสีชนิดก่อกวนไอออนไนซ์ตลอดวัฏจักรชีวิตของ
การปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 97

ภาพที่ 95 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์
ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 98

ภาพที่ 96 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการก่อตัวของฝุ่นละอองตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูก
พืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 98

ภาพที่ 97 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อคุณภาพของ
ระบบนิเวศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 99

ภาพที่ 98 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการเกิดภาวะฝนกรดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืช
สมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 99

ภาพที่ 99 ผลกระทบของการใช้วัตถุบดต่อด้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดตลอดวัฏ
จักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 100

ภาพที่ 100 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 100

ภาพที่ 101 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบกตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 101

ภาพที่ 102 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 101

ภาพที่ 103 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 102

ภาพที่ 104 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 102

ภาพที่ 105 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 103

ภาพที่ 106 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการใช้ที่ดินตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 103

ภาพที่ 107 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 104

ภาพที่ 108 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการลดลงของทรัพยากรฟอสซิลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 104

ภาพที่ 109 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม..... 105

ภาพที่ 110 การแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่ม..... 106

ภาพที่ 111 ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์..... 107

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
CC	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ	kg CO ₂ eq
CDE	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	kg CO ₂ eq/100 y
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ	-
FD	การลดลงของทรัพยากรฟอสซิล	kg oil eq
FE	การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด	kg P eq
FET	การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในน้ำจืด	kg 1,4-DCB eq
H	ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล	m
HT	ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง	kg 1,4-DCB eq
HT	ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง	kg 1,4-DCB eq
h	เอนทัลปี	kJ/kg
Inv	มูลค่าการลงทุน	Baht
IR	การเกิดรังสีชนิดก่อกัมมันตรังสี	kBq Co-60 eq
ITC	ค่าใช้จ่ายตลอดการดำเนินงาน	Baht
LU	การใช้ที่ดิน	m ² a
M	มวล	kg
MD	การลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุ	kg Cu eq
ME	การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล	kg N eq
MET	การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล	kg 1,4-DCB eq
ṁ	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
OD	การลดลงของชั้นโอโซน	kg CFC11 eq
P	ความดัน	kPa
PMF	การก่อกำเนิดของฝุ่นละออง	kg PM _{2.5} eq
POF	การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศ	kg NO _x eq
POF	การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์	kg NO _x eq
PUC	ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิต	Baht/kg
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	kW

RH	ความชื้นสัมพัทธ์	%
S	เอนโทรปี	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
SC	ของเหลวเย็นยิ่ง	$^{\circ}\text{C}$
SH	ไอร้อนยวดยิ่ง	$^{\circ}\text{C}$
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
TA	การเกิดภาวะฝนกรด	$\text{kg SO}_2 \text{ eq}$
TET	การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก	kg 1,4-DCB eq
V	ปริมาตร	m^3
W	กำลังงาน	kW
WU	การใช้ทรัพยากรน้ำ	m^3
ตัวกรีก	ความหมาย	หน่วย
η	ประสิทธิภาพ	%
ω	อัตราส่วนความชื้น	kg_w/kg_a
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
v	ปริมาตรจำเพาะ	m^3/kg
ตัวห้อย	ความหมาย	
a	Air	
AC	Air conditioner	
amb	Ambient	
C	Condenser	
C	Cancer	
Cb	Cannabis	
Cf	Cannabis flower	
Comp	Compressor	
da	Dry air	
db	Dry bulk	
dp	Dew point	
E	Evaporator	
E	Environment	

H	High
H	Human
L	Low
nc	Non-cancer
ref	Refrigerant
s	Isentropic
W	Water



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

ภายใต้ข้อตกลงความร่วมมือระหว่างกรมการแพทย์ องค์การเภสัช และมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ได้จัดตั้งและทำการศึกษาวิจัยการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง เพื่อใช้ในการผลิตเป็นยารักษาโรคด้วยระบบเกษตรอินทรีย์ในระดับอุตสาหกรรมแบบกลางแจ้ง เป็นต้นแบบใช้ทางการแพทย์ในระดับครัวเรือน ผลิตภัณฑ์สมุนไพรธรรมชาติกลายเป็นองค์ประกอบสำคัญในอุตสาหกรรมยา เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของพืชสมุนไพรรูปแบบหนึ่ง คือ การปลูกพืชในระบบโรงเรือนอัจฉริยะซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพและปริมาณสารสำคัญของสมุนไพรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การปลูกพืชสมุนไพรในระบบปลูกในร่ม เป็นการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในโรงเรือน เพื่อแก้ปัญหาเรื่องสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการปลูก ยกกระตือรือร้นการจัดการ ป้องกันการระบาดของโรคและแมลงศัตรูพืช ลดการใช้สารเคมี การควบคุมปริมาณน้ำและการใส่ปุ๋ยที่แม่นยำส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพผลผลิตที่ดีมากขึ้น การเลือกประเภทโรงเรือนจึงมีความสำคัญทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ทิศทางของลม ความสูงของโรงเรือน ระบบควบคุมอุณหภูมิและแสงที่พืชต้องการ การติดตั้งฉนวนกันความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ติดตั้งเครื่องปรับอากาศระบบหมุนเวียนภายใน ระบบเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เพื่อให้พืชดูดซับไปเลี้ยงลำต้นและใบให้เจริญเติบโต ระบบแสงเป็นการเพิ่มระยะเวลาการให้แสงยืดเวลาการเจริญเติบโต ระบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นมีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนระบบทั้งสิ้นเพื่อเป็นการลดต้นทุน เพิ่มความมั่นคงทางด้านพลังงานและส่งเสริมการใช้พลังงานทางเลือกของกระทรวงพลังงานจึงมีแนวทางการนำพลังงานทางเลือกจากแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบโรงเรือน ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (Alternative energy development plant, AEDP2018) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีเป้าหมายสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ. 2580 โดยรับเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในภาคการผลิตไฟฟ้าและความร้อนและลดสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพลงตามการใช้พลังงานในอนาคต

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนจากแผนพัฒนาพลังงาน
ทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018)

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน	AEDP 2015 ปี พ.ศ. 2579	AEDP 2018 ปี พ.ศ. 2580	ผลต่าง
พลังงานแสงอาทิตย์ (MW)	6,000	15,574	9,574
ชีวมวล (MW)	5,570	5,786	216
พลังงานลม (MW)	3,002	2,989	-13
ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย) (MW)	600	928	328
ขยะชุมชน (MW)	500	900	400
ขยะอุตสาหกรรม (MW)	50	75	25
พลังงานน้ำขนาดเล็ก (MW)	376	188	-188
พลังงานน้ำขนาดใหญ่ (กฟผ.) (MW)	2,906	2,918	12
ก๊าซชีวภาพ (พืชพลังงาน) (MW)	680	-	-680
รวม (MW)	19,684	29,358	9,674

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าพลังงานแสงอาทิตย์ตามแผนเดิมในปี พ.ศ. 2579 จะต้องติดตั้งให้
ได้รวม 6,000 MW ซึ่งในแผนใหม่เพิ่มการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างปี พ.ศ. 2561-2580
เป็น 15,574 MW ในปี พ.ศ. 2580

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้ทรัพยากรในทุก ๆ ขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอน
การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง กระบวนการผลิตไปจนถึงการกำจัดซาก ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีการใช้
พลังงานและอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการดำเนินการตามแผนพัฒนาพลังงาน
ทดแทนและพลังงานทางเลือกจึงมีแนวทางในการพัฒนาการปลูกพืชในระบบโรงเรือนร่วมกับระบบ
ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นการพัฒนาต่อยอดการปลูกพืชสมุนไพรในระบบ
โรงเรือนโดยทำการวิเคราะห์ทางด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นแนวทางการ
ผลิตพืชสมุนไพรมูลค่าสูงและใช้ประโยชน์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่า
สูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
2. เพื่อศึกษาการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ด้วยระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบ
ปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

ขอบเขตการศึกษา

1. พืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ คือ พืชตระกูลแคนนาบิส
2. ศึกษาการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบเพาะเลี้ยงพืช
3. ใช้ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting diode, LED) คือ แหล่งกำเนิดแสงสว่างในการเลี้ยงพืชสมุนไพรมูลค่าสูง
4. ระบบปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง ประกอบไปด้วย 3 ระบบ คือ ระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม
5. ความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic photon flux density, PPF) ที่ตกกระทบบนพืชมีค่าไม่น้อยกว่า $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
6. ผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง คือ น้ำหนักมวลแห้งของช่อดอก
7. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง คือ ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิต
8. การประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง คือ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง ด้วยวิธีการ ReCiPe 2016 Midpoint (H) โดยใช้โปรแกรม SimaPro

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
2. ได้ทราบถึงการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ด้วยระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

ในการศึกษางานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหลักอยู่ 6 ทฤษฎี ประกอบไปด้วย พีชตระกูลแคนนาบิส การปลูกพืชในระบบปลูกในร่ม ไดโอดเปล่งแสง ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การประเมินวัฏจักรชีวิต และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พืชแคนนาบิส

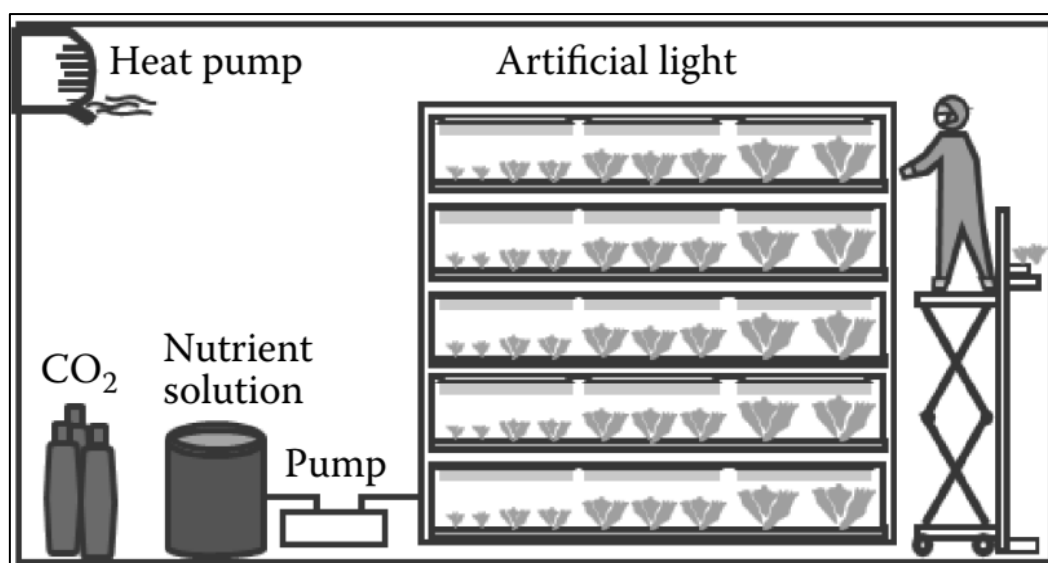
พืชแคนนาบิส (Cannabis) หรือ กัญชา เป็นพืชไม้ล้มลุกชนิดหนึ่งสกุล *Cannabis sativa* L. ในวงศ์ Cannabaceae สายพันธุ์ของพืชแคนนาบิส สามารถแบ่งออกเป็น 3 สายพันธุ์หลัก คือ *Cannabis sativa*, *Cannabis indica* และ *Cannabis ruderalis* โดยพืชชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย กระจายพันธุ์จากบริเวณภูมิภาคเอเชียไปยังแอฟริกาจนถึงตะวันออกกลาง (วรวรรณ, 2563) มีลักษณะใบมนแฉกลึกเข้าไปทางก้านหลายแฉก ลำต้นมีขนาดเล็ก ช่อดอกเพศผู้และช่อดอกเพศเมียอยู่ต่างต้นกัน ซึ่งออกดอกเป็นช่อเล็ก ๆ ตามง่ามของกิ่งและก้าน โดยช่อดอกเพศผู้มีลักษณะดอกเป็นกระเปาะสำหรับเก็บละอองเรณู และช่อดอกเพศเมียมีลักษณะเป็นขนสีขาว เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะสร้างไตรโคม (Trichomes) บริเวณรอบ ๆ ช่อดอก ซึ่งเป็นสารสำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ แสดงดังภาพที่ 1 พืชแคนนาบิสนั้น มีสารสำคัญที่โดดเด่น เรียกว่า สารแคนนาบินอยด์ (Cannabinoid : CB) ซึ่งมีมากกว่า 100 ชนิด และชนิดที่เป็นประโยชน์สำหรับการแพทย์ คือ เตตราไฮโดรแคนนาบินอยด์ (Tetrahydrocannabinol, THC) เป็นสารที่มีผลต่อจิตประสาท และแคนนาบิไดโอด (Cannabidiol, CBD) เป็นสารที่ไม่มีผลต่อจิตประสาท ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการรักษาบางกลุ่มโรคได้ เช่น ลดอาการปวด ลดอาการคลื่นไส้และชักกระตุกของกล้ามเนื้อ อาการของโรคทางกระเพาะปัสสาวะ โรคลมชัก โรคพาร์กินสัน และโรคอัลไซเมอร์ เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถฆ่าเซลล์มะเร็งในสมอง ผิวหนัง และตับอ่อนได้ด้วย (Medthai, 2562)



ภาพที่ 1 ช่อดอกเพศผู้และช่อดอกเพศเมียของพืชตระกูลแคนนาบิส
ที่มา : (Marijuanasubjects, 2019)

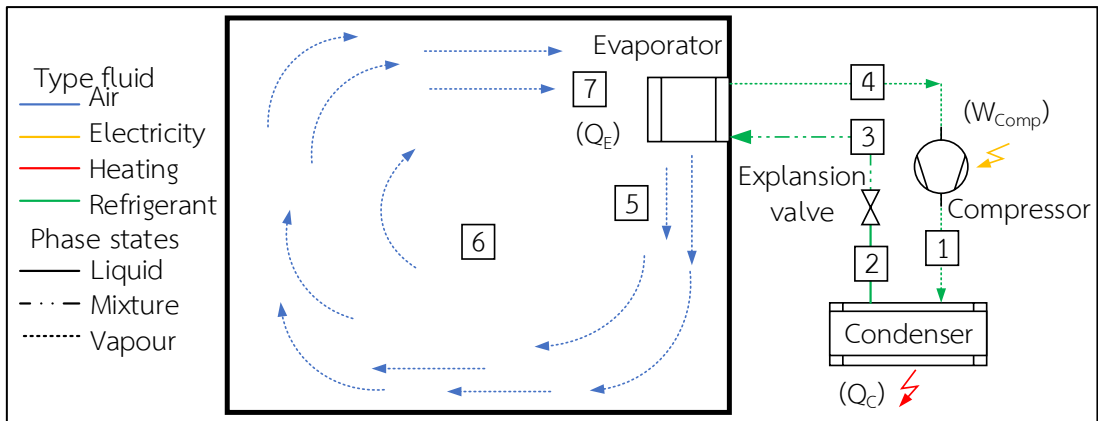
เทคโนโลยีการผลิตพืชในระบบปลูกในร่ม

เทคโนโลยีการผลิตพืชในระบบปลูกในร่ม เป็นรูปแบบการเกษตรภายในโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างที่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชในกลุ่มสมุนไพร เทคโนโลยีนี้สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ช่วงคลื่นแสง ความเข้มแสง อุณหภูมิ ความชื้น แร่ธาตุต่าง ๆ และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่พืชใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งยังช่วยประหยัดการใช้ทรัพยากร น้ำ ปุ๋ย พื้นที่เพาะปลูก และแรงงาน รวมถึงยังสามารถควบคุมปริมาณและคุณภาพผลผลิตได้ตามที่ต้องการ จึงช่วยลดความผันผวนในด้านปริมาณและคุณภาพของผลผลิตได้ดีกว่าการเกษตรแบบดั้งเดิม แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบปลูกพืชในร่ม
ที่มา : (Merrill F. et al., 2016)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชในกลุ่มสมุนไพรที่ต้องควบคุมคุณภาพและลดความผันผวนผลผลิตได้ดีกว่าการเกษตรแบบดั้งเดิม [Kozai, 2013] [Niam et al., 2018] สำหรับการปลูกในร่มมีการนำระบบปรับอากาศมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูก แสดงดังภาพที่ 3 หลักการทำงานของระบบ คือ สารทำงานสถานะไอในจุดที่ 1 มีอุณหภูมิและความดันสูงถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่นด้วยเครื่องอัดไอ จากนั้นสารทำงานสถานะไอที่มีอุณหภูมิสูงกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวและระบายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่เครื่องควบแน่นโดยมีความดันคงที่ในจุดที่ 2 จากนั้นสารทำงานถูกลดความดันด้วยอุปกรณ์ลดความดัน ทำให้สารทำงานมีอุณหภูมิและความดันลดลงเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของผสมในจุดที่ 3 จากนั้นสารทำงานเข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศภายในห้อง ทำให้สารทำงานเดือดกลายเป็นไอในจุดที่ 4 โดยอากาศในจุดที่ 5 มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำ เนื่องจากน้ำในอากาศ (ความชื้น) ถูกควบแน่นที่ผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเกิดเป็นหยดน้ำทำให้อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นลดลง จากนั้นอากาศถูกส่งไปยังพื้นที่เพาะปลูกด้วยพัดลมในจุดที่ 6 เมื่ออากาศผ่านพืชส่งผลให้พืชมีการระเหยน้ำที่ผิวใบ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มสูงขึ้นในจุดที่ 7 จากนั้นอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำงานที่เครื่องระเหยเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบอีกครั้ง



ภาพที่ 3 แผนภาพการทำงานของระบบปรับอากาศแบบอัดไอ

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of performance, COP) ของระบบปรับอากาศแบบอัดไอ สามารถหาได้ดังสมการที่ 1

$$\text{COP} = \frac{Q_E}{W_{\text{Comp}}}$$

สมการที่ 1

โดย COP คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (-)

Q_E คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องระเหย (kW)

W_{Comp} คือ พลังงานที่ป้อนให้เครื่องอัดไอ (kW)

อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องระเหย (Q_E) โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของอากาศชื้น สามารถหาได้ดังสมการที่ 2

$$Q_E = \dot{m}_{da} (h_{a,7} - h_{a,5}) - \dot{m}_w h_{fg,w}$$

สมการที่ 2

โดย \dot{m}_{da} คือ อัตราการไหลของอากาศแห้ง (m/s)

$h_{a,7}$ คือ เอนทัลปีของอากาศชื้นขาเข้าเครื่องระเหย (kJ/kg)

$h_{a,5}$ คือ เอนทัลปีของอากาศชื้นขาออกเครื่องระเหย (kJ/kg)

\dot{m}_w คือ อัตราการไหลของน้ำที่ควบแน่น (kg/s)

$h_{fg,w}$ คือ เอนทัลปีการควบแน่นของน้ำ (kJ/kg)

อัตราการไหลของน้ำที่ควบแน่น (\dot{m}_w) จากการควบแน่นของอากาศชื้นที่ผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเกิดเป็นหยดน้ำ สามารถหาได้ดังสมการที่ 3

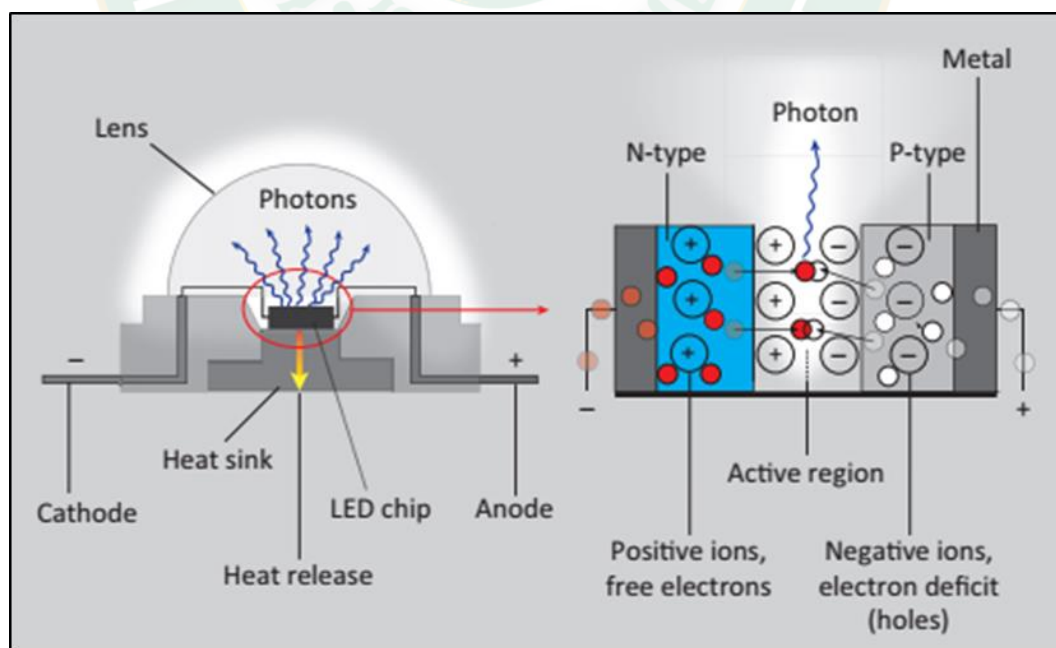
$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da} (\omega_7 - \omega_5)$$

สมการที่ 3

- โดย ω_7 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องระเหย (kg_w/kg_a)
 ω_5 คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศขาออกเครื่องระเหย (kg_w/kg_a)

ไดโอดเปล่งแสง

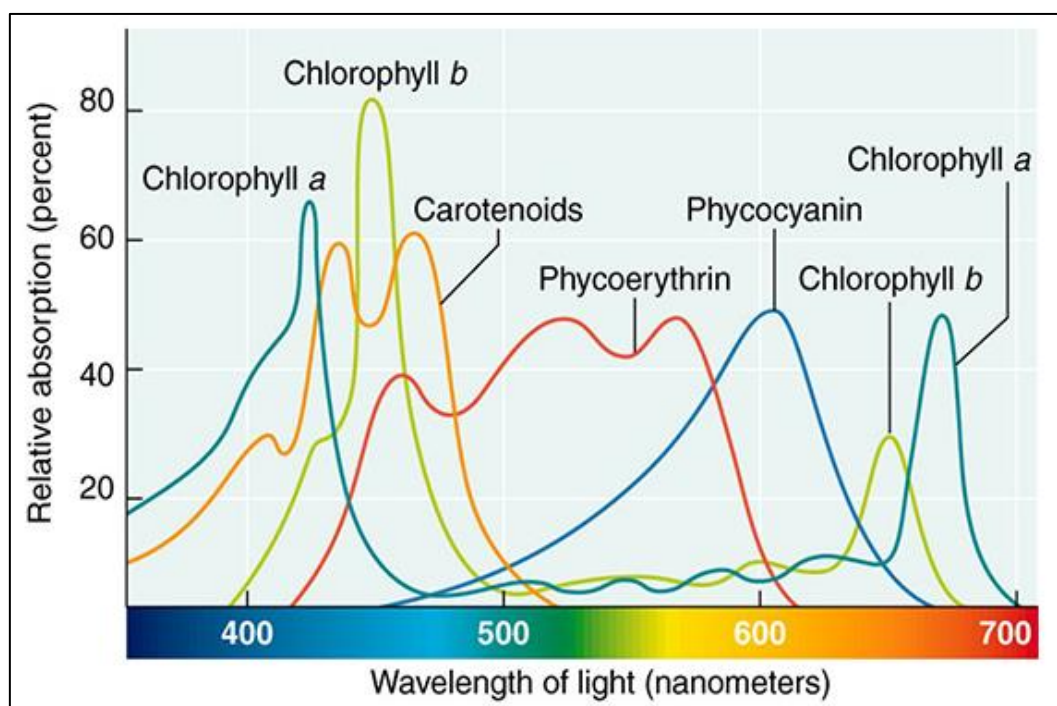
ไดโอดเปล่งแสง (Light-emitting diode, LED) มีโครงสร้างประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type semiconductor) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type semiconductor) ประกบเข้าด้วยกัน มีผิวข้างหนึ่งเรียบคล้ายกระจก เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน ไดโอดเปล่งแสง โดยจ่ายไฟบวกให้ขาแอโนด และจ่ายไฟลบให้ขาแคโทด ทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีพลังงานเพิ่มสูงขึ้นทำให้สามารถวิ่งข้ามรอยต่อจากสารชนิดเอ็น ไปรวมกับโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลส่งผลให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปและจะคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแสง โครงสร้างและการทำงานของไดโอดเปล่งแสง (Schulze S.C., 2014) แสดงดังภาพที่ 4 แสงสีต่าง ๆ ที่เกิดจากรอยต่อพี-เอ็น นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้าง ไดโอดเปล่งแสงทั้งชนิดที่เป็นของเหลวและกึ่งแข็ง เช่น แกลเลียม-ฟอสไฟด์ (Gallium phosphide, GaP) ทำให้เกิดแสงสีแดง แกลเลียม-อาซีนไนด์-ฟอสไฟด์ (Gallium arsenide phosphide, GaAsP) ทำให้เกิดแสงสีเหลืองและเขียว



ภาพที่ 4 การทำงานของไดโอดเปล่งแสง

ที่มา : (Schulze et al., 2014)

แสงที่พืชนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อการเจริญเติบโต สร้างใบ ดอก และผล คือ แสงในช่วงที่มนุษย์มองเห็น (Visible light) ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่น 380-770 nm แต่มีช่วงแสงเฉพาะที่พืชใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthetic active radiation, PAR) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm แสดงดังภาพที่ 5 โดยจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วง 430-480 nm ซึ่งเป็นย่านของแสงสีน้ำเงินและในช่วง 630-680 nm เป็นย่านแสงสีแดงและเป็นช่วงแสงที่มีผลต่อการทำดอกของพืช



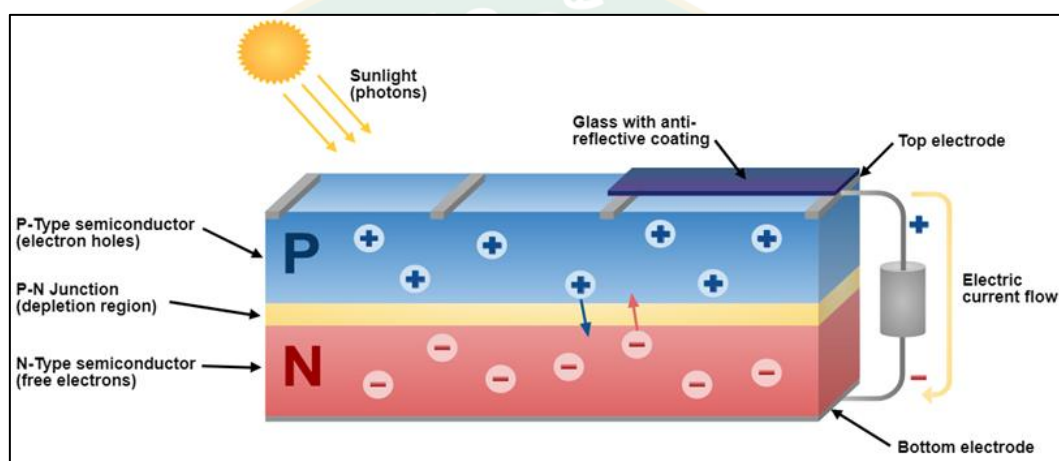
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนของแสงกับช่วงความยาวคลื่นแสง
ที่มา: (SEOS, 2020)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีความสะอาดปราศจากมลพิษ ซึ่งเวลานี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลก ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงสามารถนำมาใช้อย่างไม่หมดสิ้น โดยเฉพาะการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตพลังงานไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริมความมั่นคงให้ระบบไฟฟ้าของประเทศไทยและยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

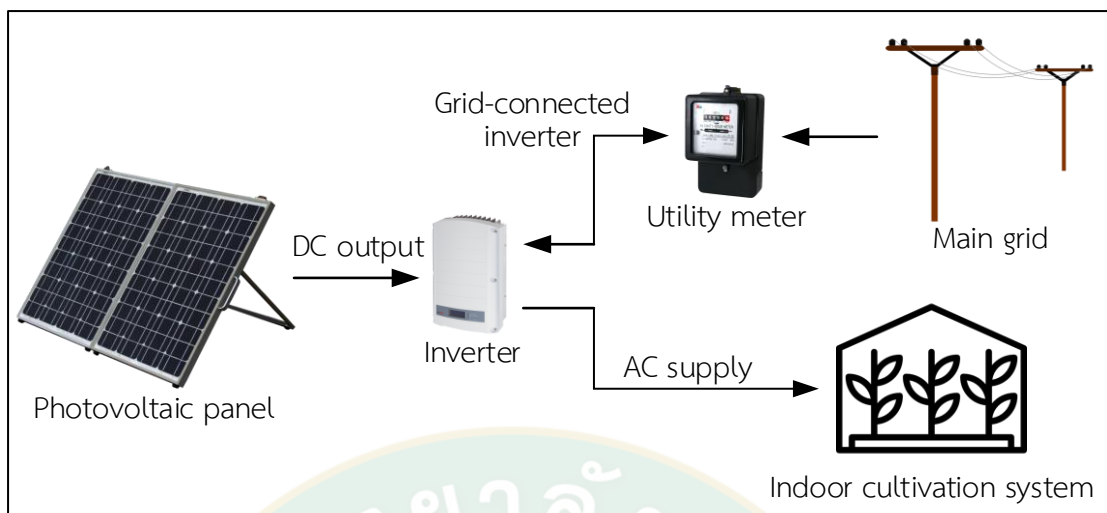
เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์กรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูก และพบมากบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบาง

บริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โปรตอน (Proton) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม (Atom) และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้น เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current electricity, DC) เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 6 เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้า เพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน [กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562]



ภาพที่ 6 กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
ที่มา : (Engineering, 2019)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Grid-connected photovoltaic system) เป็นระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current electricity, AC) เข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยตรง โดยมีหลักการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงเวลากลางวันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้โดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และหากมีกระแสไฟฟ้าเกินต่อความต้องการของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะถูกป้อนเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้า ส่วนในช่วงกลางคืนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ระบบจะนำกระแสไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าโดยตรงแทน แสดงดังภาพที่ 7



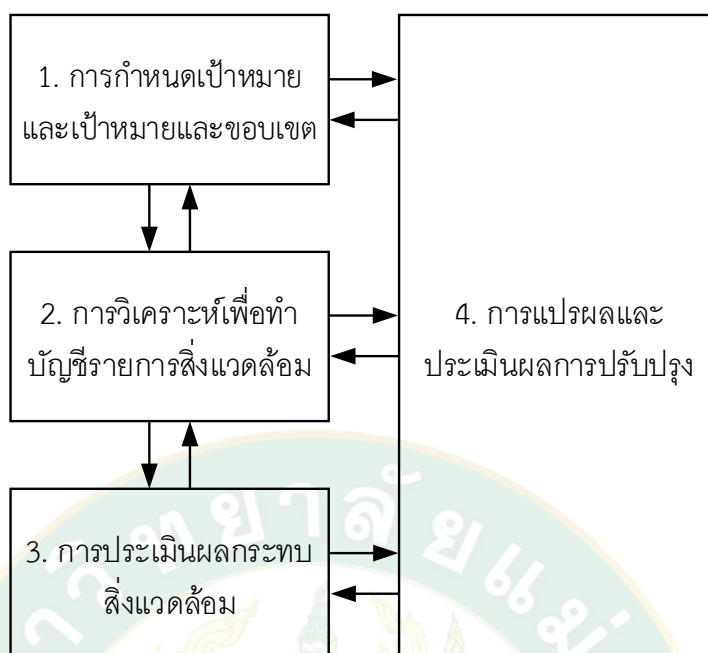
ภาพที่ 7 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดชีวิตของผลิตภัณฑ์ ภายใต้ นิยาม องค์ กรระหว่าง ประเทศว่าด้วย มาตรฐาน (International Organization for Standardization, ISO) ตามอนุกรมสัญญามาตรฐาน ISO 14040 เป็นการระบุการเก็บรวบรวมและ ประเมินค่าของสารขาเข้าและสารขาออก ซึ่งพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการ อาทิเช่น การได้มาซึ่ง วัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้งานผลิตภัณฑ์ และการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้ งานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ โดยระบุถึงปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้จนถึงของเสียที่ปล่อยออกสู่ สิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตตามมาตรฐาน ISO 14040 ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยมีรายละเอียดดังขั้นตอนต่อไปนี้



ภาพที่ 8 กรอบการดำเนินงานการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตตามมาตรฐาน ISO14040

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and scope definition)

การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนนี้เป็นการระบุวัตถุประสงค์ของการศึกษาและลักษณะการนำผลของการศึกษาไปใช้งานรวมถึงขอบเขตในโดยการกำหนดเป้าหมายของการศึกษา (Goal) ขอบเขตการศึกษา (Scope) กำหนดหน่วยหน้าที่ (Functional unit) ของผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตระบบ (System boundaries) โดยผลลัพธ์ที่ได้มากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา

การกำหนดขอบเขตแบบแครเดิล-ทู-เกรฟ (Cradle-to-grave) จะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ (ธรรมชาติ) จนถึงขั้นตอนการทำลายซาก การกำหนดขอบเขตแบบแครเดิล-ทู-เกรฟ ใช้ได้สำหรับผลิตภัณฑ์ที่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบในช่วงการใช้งานได้อย่างชัดเจน

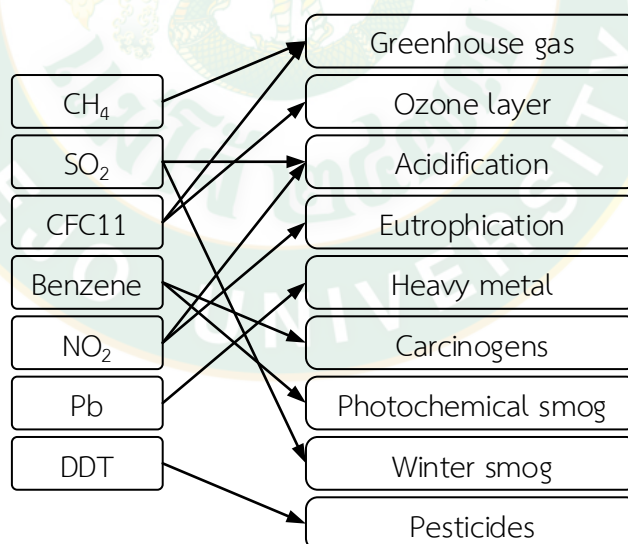
ขั้นตอนที่ 2 การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Inventory analysis)

การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม (Life cycle inventory, LCI) คือ ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดทำฐานข้อมูล เกี่ยวกับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องภายในขอบเขตและเป้าหมายของการศึกษา โดยข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมควรครอบคลุมถึงรายละเอียดของกระบวนการผลิตและแผนผัง (Flow chart) ของกระบวนการผลิต และปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของระบบทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life cycle impact assessment, LCIA)

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เป็นการคำนวณเพื่อแปลงข้อมูลบัญชีรายการที่ได้จากการรวบรวมปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของระบบผลิตภัณฑ์และจากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปของผลกระทบสิ่งแวดล้อม เพื่ออธิบายความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชั้นกลางหรือปลายทางที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงชีวิตโดยตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ การประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์สามารถจำแนกออกได้เป็นขั้นตอนต่าง ๆ หลายขั้นตอน ในที่นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนหลักดังนี้

1. การจำแนกประเภทข้อมูลเป็นกลุ่มของผลกระทบ (Classification) เป็นขั้นตอนการจำแนกผลกระทบข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกที่มีต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ เช่น ก๊าซมีเทน (Methane) ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของสารที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เป็นต้น นอกจากนี้สารเคมีบางตัวก็จัดให้อยู่ในกลุ่มของสารที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากกว่า 1 ประเภท ได้แก่ การจัดให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur dioxide) เป็นสารที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในลักษณะของการก่อให้เกิดความเป็นกรด ทั้งนี้ตัวอย่างผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมของสารชนิดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การจำแนกสารเคมีตามประเภทของผลกระทบ

2. การคำนวณผลกระทบของการกำหนดบทบาทชั้นกลาง (Characterized value of midpoint impact, CFm) เป็นการแสดงค่าผลกระทบที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมหรือเรียกรวมกันทั้งหมดว่า ขนาดกำหนดบทบาท (Characterized value, CV) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$CV_j = CF_j \times x_j \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$CFm_{x,c} = \sum_j CV_j \quad \text{สมการที่ 5}$$

โดย CV_j คือ ขนาดการกำหนดบทบาทของผลกระทบด้านต่าง ๆ ของสาร x (Unit eq)

CF_j คือ ค่าการกำหนดบทบาทของผลกระทบด้านต่าง ๆ ของสาร x (Unit eq)

x_j คือ ปริมาณสาร x ในกระบวนการต่าง ๆ (Unit)

$CFm_{x,c}$ คือ การกำหนดบทบาทที่ศูนย์กลางของผลกระทบด้านต่าง ๆ จากสาร x ของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ (Unit eq)

3. การหาขนาดของผลกระทบ (Normalization value of impact, NP) การเปรียบเทียบค่ากำหนดบทบาทที่ได้ในขั้นตอนที่ผ่านมา กับขนาดค่าของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ในระดับประเทศหรือระดับโลก โดยการเทียบค่าผลกระทบจากขั้นตอนการกำหนดบทบาทมาเทียบกับค่าอ้างอิงผลกระทบ (Normalization reference, NR) การให้น้ำหนัก (Weighting) คือ การให้ความสำคัญของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น โดยนำค่าขนาดศักยภาพผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ได้ในขั้นตอนการหาขนาดของผลกระทบมาคูณด้วยค่าการให้น้ำหนัก (Weighting factor, WF) ที่มีค่าระดับความสำคัญของแต่ละผลกระทบที่แตกต่างกัน โดยค่าน้ำหนัก (Weighting point, WP) ที่กำหนดได้ในขั้นตอนนี้ จะเป็นค่าผลประโยชน์สุดท้ายของการประเมินวัฏจักรชีวิตหรือคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$NP_j = \frac{CFm_{x,c}}{NR_j \cdot t_{Pd}} \quad \text{สมการที่ 6}$$

$$WP_j = WF_j \cdot NP_j \quad \text{สมการที่ 7}$$

$$WF_j = \frac{CFm_{x,c, \text{Reference year}}}{CFm_{x,c, \text{Target year}}} \quad \text{สมการที่ 8}$$

$$I_{m, Pd \text{ Total}} = \sum_j WP_j \quad \text{สมการที่ 9}$$

โดย NP_j คือ ค่าขนาดศักยภาพผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (Person·y)

NR_j คือ ค่าอ้างอิงการกำหนดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม j ที่เกิดจากการกระทำของคนต่อปี (Unit eq/person·y)

t_{Pd}	คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (y)
WP_j	คือ ค่าศักยภาพการให้น้ำหนักผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม j (Pt)
WF_j	คือ ค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม j ที่ตั้งเป้าหมาย (-)
$I_{m,Pd}$	คือ ค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อปริมาณผลผลิตทั้งหมดตลอดอายุการใช้งาน (Pt)

ขั้นตอนที่ 4 การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม (Interpretation and improvement analysis)

การตีความและการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ทำให้ทราบว่า ช่วงชีวิตใดของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ความรุนแรงของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญสูงสุด รวมทั้งแหล่งที่มาของประเด็นปัญหาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบจะนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด ทั้งนี้การตีความและการแปลผลควรทำด้วยความระมัดระวังและอยู่บนพื้นฐานของขอบเขตการศึกษา เป้าหมายวัตถุประสงค์การศึกษาของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ผู้ที่จะนำข้อมูลที่ได้ประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการจัดการสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างดีจึงสามารถเลือกแนวทางการจัดการเพื่อปรับปรุงประเด็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของแต่ละผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การปันส่วน

การปันส่วน เป็นการแบ่งส่วนปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบของผลิตภัณฑ์ โดยการปันส่วนจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดในช่วงเวลาเดียวกัน และมีการใช้ระบบสาธารณูปโภคร่วมกันหลายผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ลักษณะการปันส่วนมีอยู่หลายประเภทแต่ที่นิยมใช้กัน คือ การพิจารณาตามสัดส่วนของมวล ปริมาตร พลังงาน และมูลค่าตามทางเศรษฐศาสตร์ (ราคาขายหรือต้นทุนสุทธิ) และการพิจารณาตามจำนวนของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เป็นต้น การเลือกใช้ประเภทของการปันส่วนควรประมาณให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของข้อมูล และตั้งอยู่บนพื้นฐานของความสัมพันธ์ลักษณะของสารขาเข้าและขาออก การคำนวณสัดส่วนของการปันส่วนของแต่ละผลิตภัณฑ์ แสดงในสมการที่ 10

$$PP_i = \frac{A_i P_i}{\sum_{i=1}^n A_i P_i}$$

สมการที่ 10

โดย	PP_i	คือ สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ i (Unit)
	A_i	คือ ค่าปันส่วนตามประเภทที่พิจารณาของผลิตภัณฑ์ (Unit)
	P_i	คือ ปริมาณหรือจำนวนของผลิตภัณฑ์ (Unit)
	n	คือ จำนวนชนิดของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (Unit)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ใช้วิธีการการวิเคราะห์ทางการเงินของโครงการลงทุน (Financial analysis of investment project) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลประโยชน์ หรือผลตอบแทนของโครงการ เพื่อพิจารณาความเหมาะสมและความคุ้มค่าของโครงการโดยอาศัยหลักเกณฑ์การตัดสินใจในการประเมินโครงการการลงทุน คือ ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิต (Production unit cost, PUC) โดยองค์ประกอบของต้นทุนและผลประโยชน์ของการลงทุนปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment cost) เป็นค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการซื้อ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการลงทุน ซึ่งมีอายุการใช้งานติดต่อกันหลายปี รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของพื้นที่เพาะปลูก

2. ค่าใช้จ่ายตลอดการปลูก (Implantation throughout cost, ITC) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเมื่อมีการดำเนินกิจกรรมการผลิตและค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาตลอดการปลูก

ผลประโยชน์หรือผลตอบแทนในการลงทุนปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง ประกอบด้วย การลดต้นทุนทางไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในการประเมินต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตช่อดอกของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงปริมาณ 1 kg สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$PUC_{Cb} = \frac{Inv_{Cb} + ITC_{Cb}}{M_{Cf}}$$

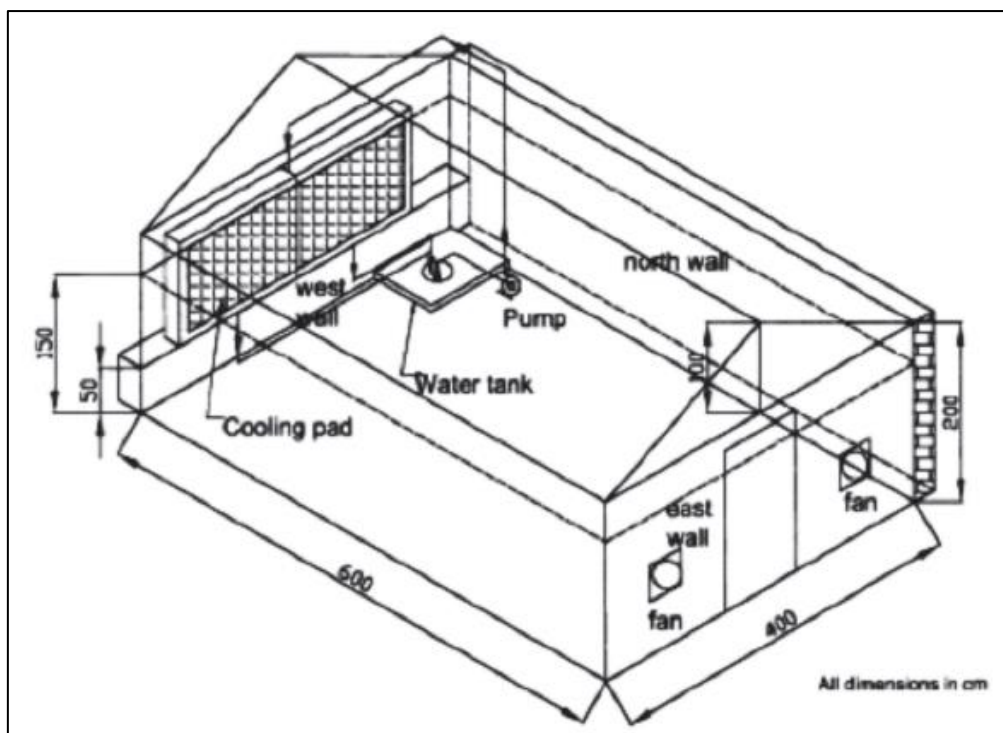
สมการที่ 11

โดย	PUC_{Cb}	คือ ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตช่อดอกของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง (Baht/kg)
	Inv_{Cb}	คือ มูลค่าการลงทุน (Baht)
	ITC_{Cb}	คือ ค่าใช้จ่ายตลอดการปลูก (Baht)
	M_{Cf}	คือ มวลช่อดอกแห้งของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง (kg)

การตรวจสอบเอกสาร

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้านพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ มีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษางานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ธนกร และเสรีพัฒนานนท์ (2557) งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร่ดิน แบบการทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic control, PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุม โดยรับสัญญาณอนาล็อกจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ผ่านอุปกรณ์รับสัญญาณอนาล็อกเพื่อให้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ประมวลผลและใช้ดิจิทัลโวลต์มิเตอร์แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนที่หน้าตู้ควบคุม ระบบควบคุมที่ออกแบบสร้างสามารถทำงานได้ทั้งแบบการควบคุมด้วยมือและแบบอัตโนมัติ ผลการทดสอบพบว่า ระบบควบคุมอัตโนมัติสามารถเริ่มและหยุดการทำงานได้ตามเวลาที่กำหนดและสามารถสั่งให้ระบบการทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำและระบบสเปรย์ละอองน้ำทำงานตามเงื่อนไขอุณหภูมิและเวลาที่กำหนดไว้ เพื่อรักษาให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนไม่เกิน 30 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แนะนำสำหรับการปลูกพืชไร่ดินในโรงเรือน โดยอุณหภูมิภายในโรงเรือนเฉลี่ย 30.45 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในโรงเรือนเฉลี่ย 80.54% ระบบสเปรย์ละอองน้ำทำงานเฉลี่ย 10 min/d ระบบการทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำทำงานเฉลี่ย 6.37 h/d ซึ่งจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอก เป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า น้ำและคนงานได้ แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โรงเรือนระบบประเหยความเย็น

ที่มา : (ธนากร และอติกร, 2557)

Na Lu et al. (2012) รายงานผลการใช้แสงประดิษฐ์จากไดโอดเปล่งแสงเพื่อเพิ่มผลผลิตมะเขือเทศแบบมัดเดี่ยว ที่ปลูกในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นสูง โดยใช้ไดโอดเปล่งแสง 3 ชนิด คือ สีแดง สีขาว และสีน้ำเงินเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยติดตั้งห่างจากต้นมะเขือเทศ 25 cm ทดลองในระยะเวลา 28 d ผลการวิจัยพบว่าผลผลิตสดเพิ่มขึ้น 14% ภายใต้แสงสีขาวและแสงสีแดงตามลำดับ และผลการวัดค่าความหวานและกรดแอสคอร์บิก พบว่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าไดโอดเปล่งแสงสีขาวและสีแดงมีผลต่อผลผลิตของมะเขือเทศ และหากใช้แสงสีขาวผสมกับแสงสีแดงและสีน้ำเงินจะเหมาะสมมากในการเพิ่มผลผลิตสำหรับการปลูกแบบมัดเดี่ยวในสภาพแวดล้อมที่มีความหนาแน่นของพืชสูง

กระแสร และโกมล (2559) ได้ศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรม ได้ทำการศึกษาต้นทุนและผลประโยชน์โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา โดยวิเคราะห์ทางการเงินและความอ่อนไหว พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ 4,843,865 Baht อัตราผลตอบแทนภายในโครงการเท่ากับ 13.47% อัตราผลตอบแทนต่อทุนมีค่าเท่ากับ 1.54 และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 8.63 y การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการ ประกอบด้วย 2 กรณี สำหรับกรณีแรกกำหนดให้เวลาเฉลี่ยในการผลิตเท่ากับ 4 h/d พบว่า โครงการยังมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนโดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 3,304,244 Baht มีอัตรา

ผลตอบแทนภายใน เท่ากับ 11.82% มีอัตราส่วนผลตอบแทนต่อทุน 1.37 และมีระยะเวลาคืนทุน เท่ากับ 9.54 y สำหรับกรณีที่สองนั้นกำหนดให้ต้นทุนในการลงทุนเพิ่มขึ้น 20% ผลการวิเคราะห์ พบว่า การลงทุนมีความคุ้มค่าโดยมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 3,135,660 Baht อัตราผลตอบแทน ภายในเท่ากับ 11.06% อัตราส่วนผลตอบแทนต่อทุนเท่ากับ 1.29 และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 10.03 y

วีระ และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของขยะเชื้อเพลิงประเภทที่ 5 (RDF-5) ที่มีส่วนประกอบของขยะที่ผ่านกระบวนการบำบัดเชิงกลชีวภาพ และกากตะกอนน้ำมันดิบ โดยทำการกำหนดหน่วยการทำงานของขยะเชื้อเพลิงประเภทที่ 5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ยาว 30 mm จำนวน 42.18 ton ที่ผลิตจากขยะชุมชนผสมกากตะกอนน้ำมันดิบสำหรับใช้เชื้อเพลิง ผลิตไฟฟ้า ซึ่งทำการพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การผลิต จนกระทั่งการจัดการเศษซากของเชื้อเพลิงเมื่อหมดอายุ ถูกคำนวณโดยวิธี Eco-indicator 95 เพื่อจัดการความรุนแรง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลพบว่า ขยะเชื้อเพลิงประเภทที่ 5 ที่ผลิตจากการบำบัดขยะมูลฝอยเชิงกลชีวภาพ (Mechanical biological waste treatment, MBT) ผสมกากตะกอนน้ำมันดิบที่อัตราส่วน 80:20 (%w/w) มีความเหมาะสมที่นำมาลงทุนเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนและเป็น ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับระบบจัดการขยะมูลฝอย

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดทำการศึกษาเกี่ยวกับการปลูกพืช สมุนไพรมูลค่าสูงร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้น จึงเป็นที่มาของการศึกษา วิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง ในระบบปลูกในร่ม ระบบปลูกกลางแจ้ง และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่มร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยของการวิเคราะห์พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังภาพที่ 11 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

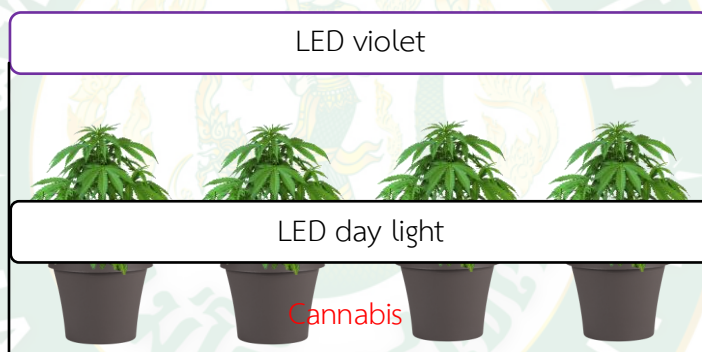


ภาพที่ 11 แผนผังขั้นตอนของการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงการประเมินการใช้พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง

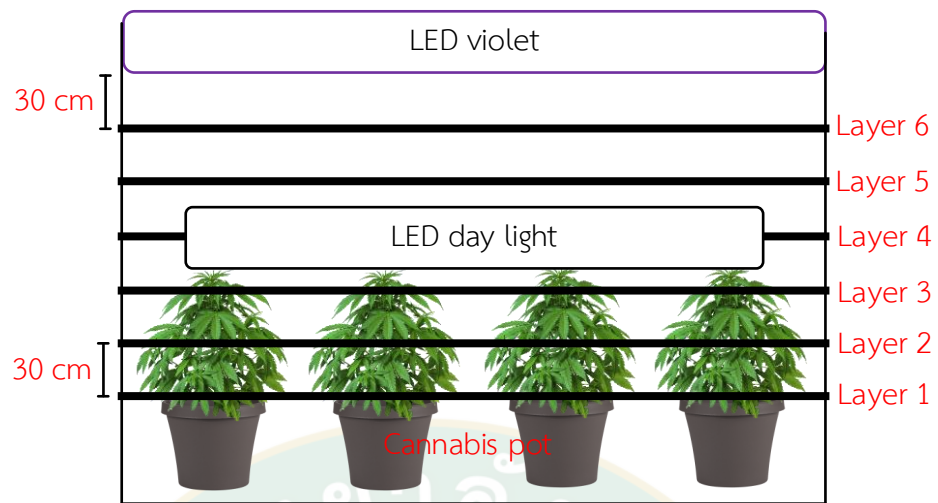
ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาเลือกสายพันธุ์ของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัย และพื้นที่ของงานวิจัยที่ทำการศึกษา โดยเลือกสายพันธุ์ผสมระหว่าง BCN Critical XXL และสายพันธุ์ Gorilla glue

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาออกแบบ สร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงพืชสมุนไพรมูลค่าสูงสำหรับระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม โดยออกแบบชุดไฟเพาะเลี้ยงขนาด 1 m x 1 m x 2 m สำหรับการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงจำนวน 4 plant โดยติดตั้งไดโอดเปล่งแสงสีม่วงที่บริเวณด้านบน และไดโอดเปล่งแสงสีขาวที่บริเวณด้านข้างของชุดไฟเพาะเลี้ยง ซึ่งสามารถปรับระดับได้ตามความสูงของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง แสดงดังภาพที่ 12

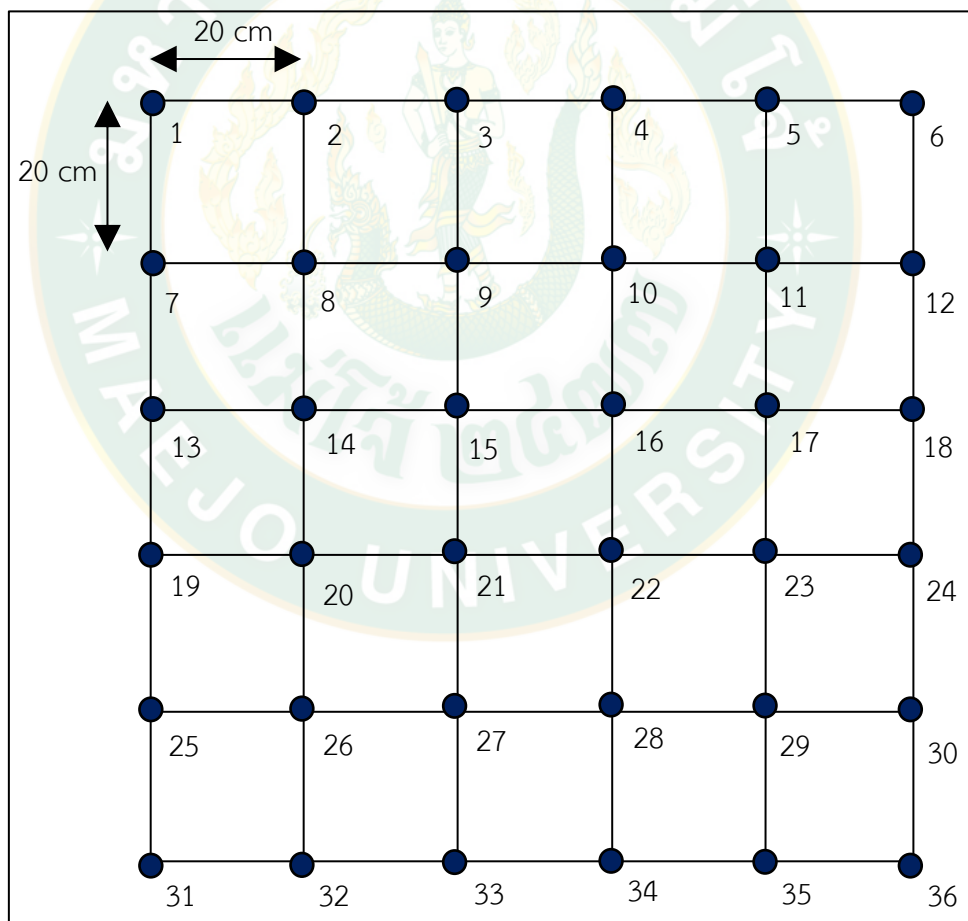


ภาพที่ 12 แผนภาพชุดไฟเพาะเลี้ยง

ขั้นตอนที่ 4 ทำการตรวจวัดค่าความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของใบพืชด้วยเครื่องตรวจวัดสเปกตรัม รุ่น PG100N โดยทำการตรวจวัด 6 ระดับ ซึ่งระยะห่างของระดับที่ตรวจวัดประมาณ 30 cm โดยเริ่มต้นจากระดับของกระถางเพาะปลูกไปถึงระดับของไดโอดเปล่งแสงที่ติดตั้งด้านบนของชุดไฟเพาะเลี้ยง เนื่องจากมีเหมาะสมกับระดับความสูงที่แสงตกกระทบบนพืชสมุนไพรมูลค่าสูง และแต่ละระดับทำการตรวจวัด 36 จุด โดยระยะห่างระหว่างจุดประมาณ 20 cm x 20 cm ซึ่งมีความเหมาะสมกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของชุดไฟเพาะเลี้ยงประมาณ 1 m² แสดงดังภาพที่ 13 ถึง ภาพที่ 14 และรายละเอียดอุปกรณ์ตรวจวัดแสดงดังตารางที่ 3



ภาพที่ 13 แผนภาพการตรวจวัดค่าความหนาแน่นฟิโตนของการสังเคราะห์แสงแต่ละระดับ



ภาพที่ 14 ตำแหน่งของจุดตรวจวัดค่าความหนาแน่นฟิโตนของการสังเคราะห์แสง

ตารางที่ 2 รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง

อุปกรณ์	คุณลักษณะ
1. เครื่องตรวจวัดสเปกตรัม (Spectral PAR meter)	<ul style="list-style-type: none"> • รุ่น UPRtek PG100N • ช่วงความยาวคลื่นแสง 380~780 nm • ช่วงการตรวจวัด <ul style="list-style-type: none"> - ค่าความสว่าง 70~150,000 lx - ค่ารังสี 0.5~1,000 W/m² - PPFD 1~3,000 μmol/m²·s • ภาวะสิ่งแวดล้อมที่ใช้งาน 23 °C ± 3, ≤75%RH • ความแม่นยำในการส่องสว่าง ± 5% • ความแม่นยำสี ± 0.0025

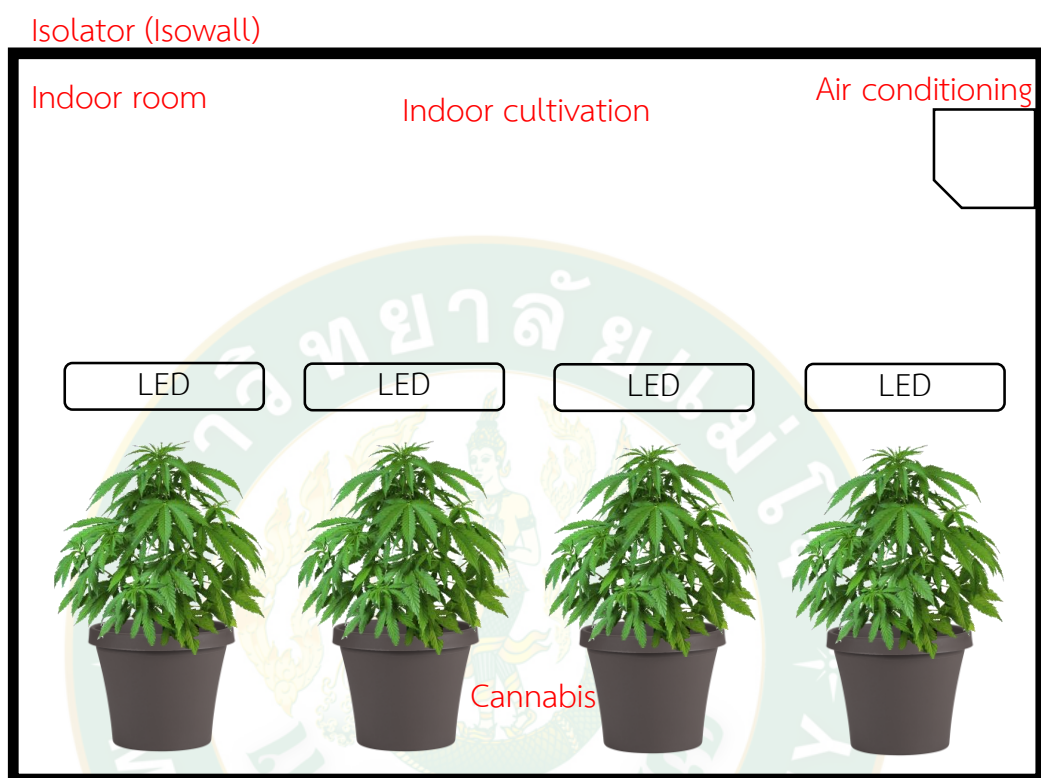


ขั้นตอนที่ 5 ศึกษาการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงด้วยระบบปลูกกลางแจ้ง โดยทำการเลือกพื้นที่ที่มีความปลอดภัยและมีแสงสว่างจากธรรมชาติตลอดทั้งวัน ไม่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อม แสดงดังภาพที่ 15



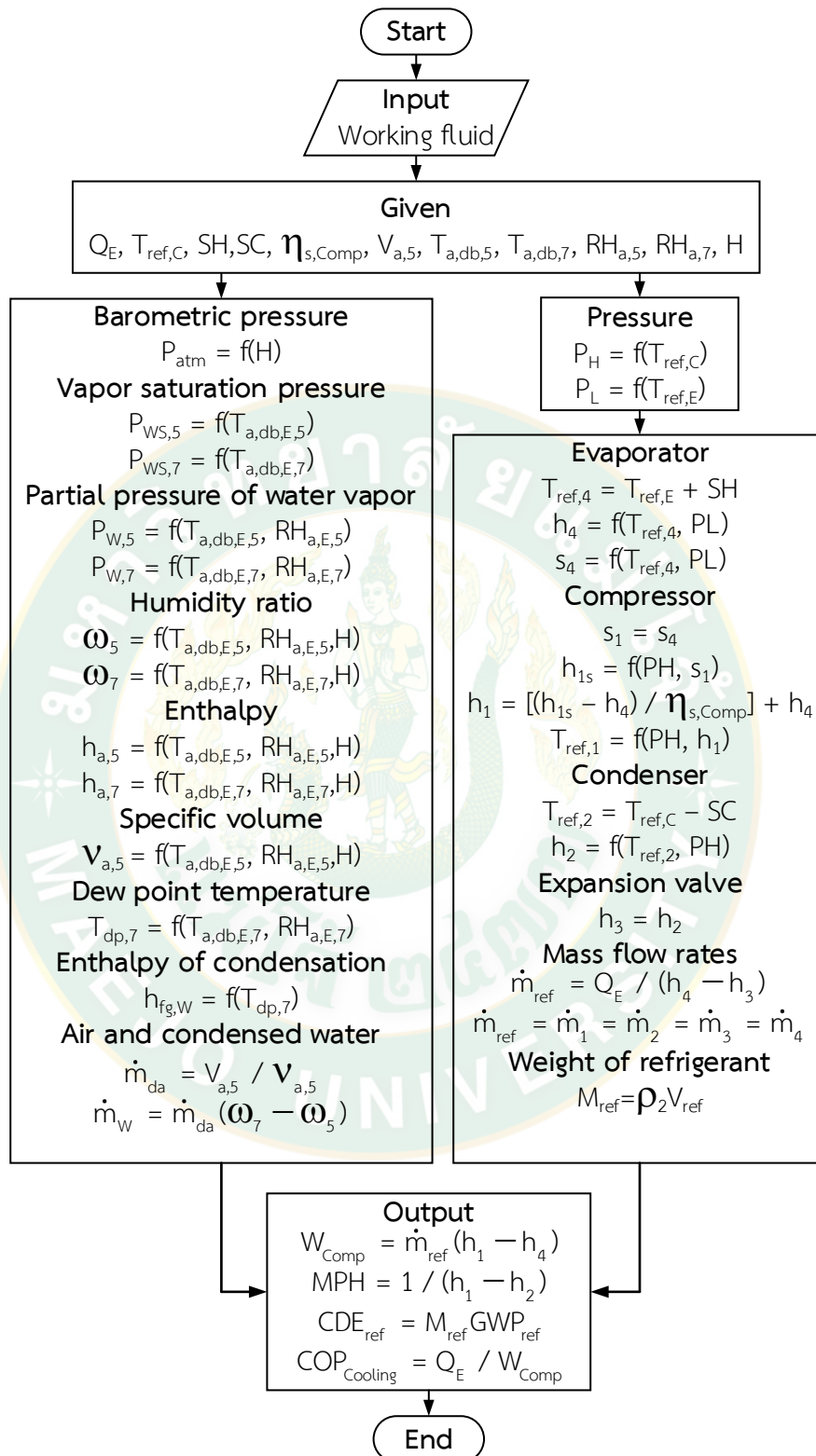
ภาพที่ 15 ระบบปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงด้วยระบบปลูกในร่ม โดยผนังห้องเป็นฉนวนกันความร้อน ใช้ไดโอดเปล่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดแสงสว่างสำหรับการสังเคราะห์ของพืช และนำระบบปรับอากาศเข้ามาใช้การควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในห้อง แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ระบบปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม

ขั้นตอนที่ 7 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายพฤติกรรมการทำงานของสารทำงานในระบบปรับอากาศ แสดงดังภาพที่ 17 โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel, โปรแกรม Psychro logger [Chaiyat, 2019], และโปรแกรม Refprop 9.0 [NIST, 2018] เพื่อเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม โดยเลือกสารทำงาน 3 ชนิด คือ R-32, R-452b, และ R-466a ซึ่งพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพ ประกอบไปด้วย อุณหภูมิวิกฤต, ความดันวิกฤต, กลุ่มความปลอดภัย ผลกระทบด้านการทำลายชั้นโอโซน เท่ากับ 0 และศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนที่มีศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำ แสดงดังตารางที่ 3 และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการจำลองการทำงานของสารทำงานในระบบปรับอากาศที่สภาวะแวดล้อมเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในร่ม แสดงเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองในดังตารางที่ 4 เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ ปริมาณสารทำงานในระบบ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณสารทำงานในระบบ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ



ภาพที่ 17 แผนผังแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบปรับอากาศ

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของสารทำงาน

รายละเอียด	R-32 ¹	R-452b ²	R-466a ³
อุณหภูมิวิกฤติ (°C)	78.11	77.1	83.8
ความดันวิกฤติ (MPa)	5.78	5.22	5.91
กลุ่มความปลอดภัย	A2L	A2L	A1
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (CFC11 eq)	0	0	0
ศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (CO ₂ eq)	675	698	733

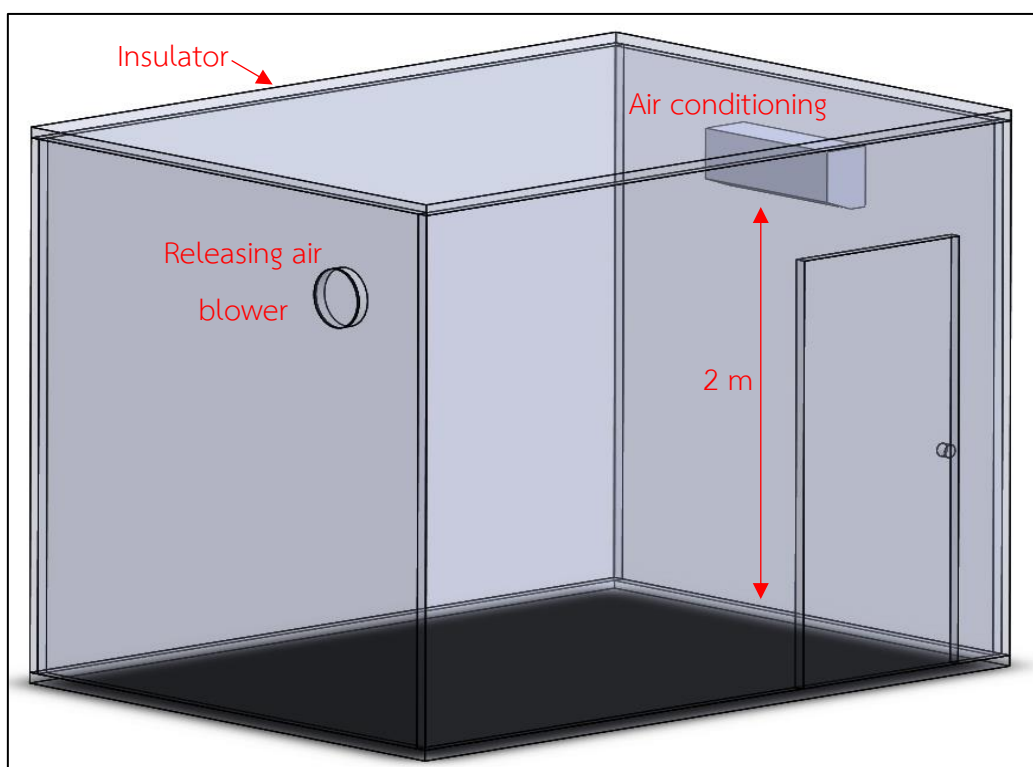
หมายเหตุ ¹อ้างอิงข้อมูลจาก ASHRAE (2009)
²อ้างอิงข้อมูลจาก Honeywell (2020)
³อ้างอิงข้อมูลจาก Atilla and Vedat (2020)

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการทำงานของสารทำงานในระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลุกในร่ม

รายละเอียด	ข้อมูล
ขนาดความสามารถทำความเย็น (kW)	3.517
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศขาออก (m ³ /s)	0.187
ความสูงจากระดับน้ำทะเล (m)	310 ¹
อุณหภูมิของอากาศแห้งขาเข้าเครื่องระเหย (°C)	22-28
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าเครื่องระเหย (%)	55
อุณหภูมิของอากาศแห้งขาออกเครื่องระเหย (°C)	12-22 ¹
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออกเครื่องระเหย (%)	50
อุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องระเหย (°C)	0 ²
อุณหภูมิของสารทำงานที่เครื่องควบแน่น (°C)	50
ค่าไอร้อนยวดยิ่ง (°C)	5 ²
ค่าของเหลวเย็นยิ่ง (°C)	5 ²
ความดันตกคร่อมของสารทำงานในอุปกรณ์ต่าง ๆ (kPa)	0 ¹
ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของเครื่องอัดไอ (%)	80 ¹

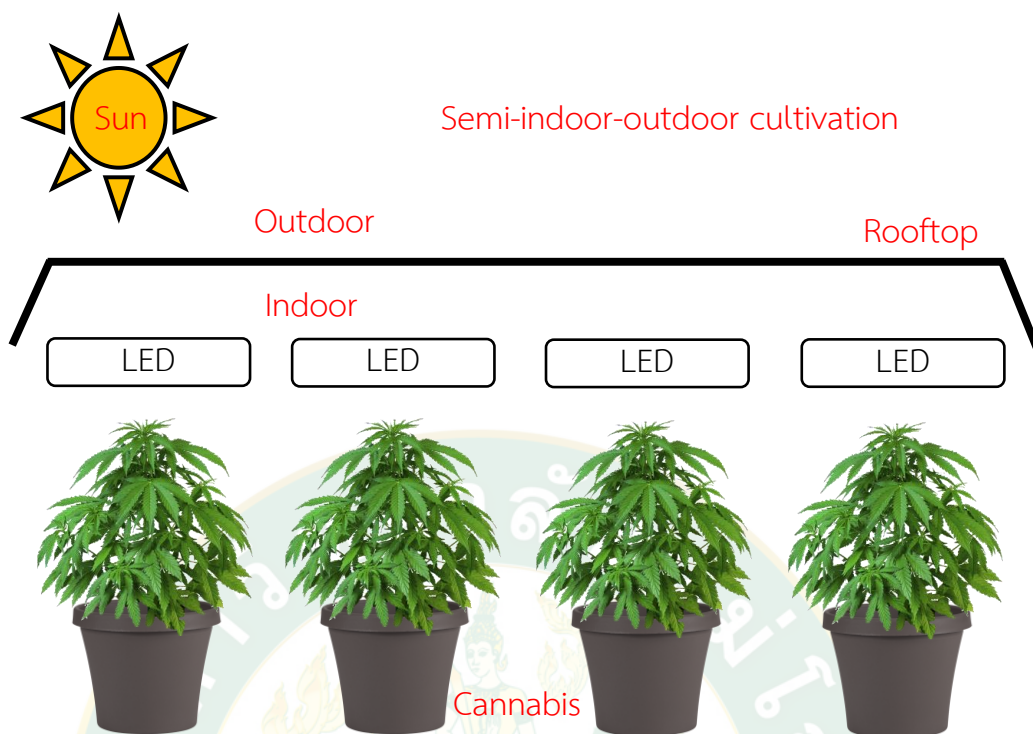
หมายเหตุ ¹อ้างอิงข้อมูลจาก Chaiyat (2019)
²อ้างอิงข้อมูลจาก Jin et al. (2019)

ขั้นตอนที่ 8 ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อเลือกขนาดของระบบปรับอากาศที่เหมาะสมกับห้องปลุกขนาด 2.4 m x 3.4 m x 2.5 m ผนังห้องเป็นฉนวนกันความร้อนขนาดความหนาประมาณ 2 inch ติดตั้งเครื่องปรับอากาศที่ความสูงประมาณ 2 m และติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาด 6 inch ที่กำลังไฟฟ้า 16 W_e โดยเป็นห้องที่มีการก่อสร้างอยู่ก่อนแล้ว แสดงดังภาพที่ 18 เพื่อวิเคราะห์การกระจายลมของระบบปรับอากาศ พร้อมจำลองการติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงภายในห้องปลุก



ภาพที่ 18 ภาพสามมิติของห้องเพาะปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงด้วยระบบปลุกในร่ม

ขั้นตอนที่ 9 ศึกษาการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงด้วยระบบปลุกกึ่งในร่มนอกร่ม เป็นการประยุกต์การใช้แสงสว่างจากธรรมชาติร่วมกับการใช้แสงสว่างจากไดโอดเปล่ง โดยพื้นที่ในการเพาะปลุกอยู่ใต้หลังคาและมีแสงสว่างจากธรรมชาติส่องถึงตลอดทั้งวัน แสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ระบบปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

ขั้นตอนที่ 10 วิธีการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนการเพาะเมล็ด ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า ขั้นตอนการดูแลรักษาช่วงเจริญเติบโต ขั้นตอนการสร้างผลผลิตช่อดอก และขั้นตอนการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการเพาะเมล็ด

การเพาะเมล็ดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง ใช้วิธีการเพาะเมล็ดในกระดาษทิชชูที่เปียกชุ่มด้วยน้ำสะอาดจำนวน 21 seed โดยนำไปใส่ภาชนะบรรจุทึบแสงและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 25 °C เป็นระยะเวลา 3 d

ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า

เมื่อเมล็ดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงมีรากงอกประมาณ 1 cm ทำการย้ายลงในถาดเพาะชำต้นกล้าขนาด 2 inch x 6 inch ที่บรรจุดินพีทมอสประมาณ 240 g/plant ภายใต้ไดโอดเปล่งแสงสีม่วงขนาด 300 W_e ที่ความเข้มแสงประมาณ 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ โดยให้แสง 24 h/d เป็นระยะเวลา 11 d

ขั้นตอนการดูแลรักษาช่วงเจริญเติบโต

หลังจากเพาะเลี้ยงต้นกล้าทำการเลือกต้นกล้าที่มีความแข็งแรงและสมบูรณ์จำนวน 12 plant ทำการย้ายลงในกระถางเพาะปลูกความจุขนาด 12 l ที่บรรจุขุยมะพร้าว 80 g/plant สำหรับรองพื้นหลุม และดินปลูกประมาณ 7 kg/plant จากนั้นนำแยกเพาะปลูกในระบบปลูกกลางแจ้ง

ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม โดยแบ่งออกเป็นการเพาะปลูกจำนวน 4 plant ต่อ 1 ระบบเพาะปลูก เมื่อหลังจากเพาะเลี้ยงผ่านไป 1 month จะทำการให้ปุ๋ยอินทรีย์ ซึ่งประกอบไปด้วย ปุ๋ยมูลวัวแห้งประมาณ 1.5 kg ผสมกับปุ๋ยมูลไส้เดือนประมาณ 1.5 kg ต่อพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 1 plant ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการตัดยอด (Topping) ของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในโหนดที่ 7 ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งสำหรับการเพิ่มผลผลิต สำหรับการให้แสงจากไดโอดเปล่งของระบบปลูกในร่มนั้นให้แสง 18 h/d และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่มให้แสง 6 h/d หลังจากที่ไม่มีแสงแดดจากธรรมชาติ ตลอดระยะเวลาช่วงเจริญเติบโต

ขั้นตอนการสร้างผลผลิตช่อดอก

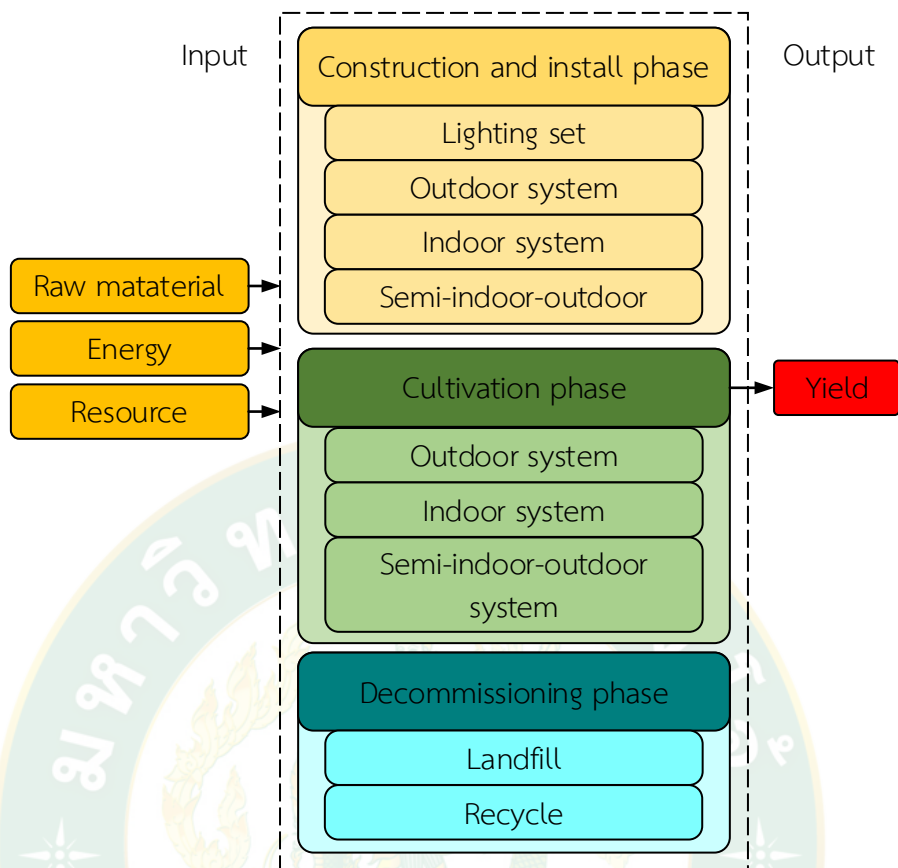
หลังจากพืชสมุนไพรมูลค่าสูงเข้าสู่ช่วงการสร้างผลผลิตช่อดอก ทำการให้ปุ๋ยมูลค่างควาแห้งประมาณ 90 g ผสมกับปุ๋ยมูลไก่แห้งประมาณ 90 g ต่อพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 1 plant ความถี่ในการบำรุงทุก ๆ 15 d โดยการให้แสงจากไดโอดเปล่งของระบบปลูกในร่มนั้นให้แสง 12 h/d และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่มจะไม่มีให้แสงตลอดระยะเวลาช่วงการผลิตช่อดอก

ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวผลผลิต

เมื่อได้ผลผลิตช่อดอกสดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง จะทำการตัดแต่ง (Trimming) ในส่วนของใบที่ไม่มีการผลิตต่อมไตรโคมออก เพื่อลดปัญหาความชื้นส่วนเกินที่ไม่ต้องการและลดระยะเวลาของการตากแห้ง อีกทั้งยังลดปัญหาของการเกิดเชื้อราที่ไม่พึงประสงค์ มาทำการแขวนช่อดอกสดโดยการคว่ำช่อดอกลง และควบคุมอุณหภูมิภายในห้องตากแห้งประมาณ 25 °C ด้วยระบบปรับอากาศ เป็นระยะเวลา 10 d เพื่อให้ความชื้นออกจากผลผลิตมากที่สุด

ขั้นตอนที่ 11 ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งการประเมินออกเป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม โดยใช้หลักการตามอนุกรมมาตรฐาน ISO 14040 มีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดเป้าหมายการศึกษานี้ คือ ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง และมีขอบเขตการศึกษา คือ แบบแกรเดล-ทู-เกรฟ โดยพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การสร้าง การดำเนินงาน ไปจนถึงการกำจัดซาก แสดงดั่งภาพที่ 20 และมีหน่วยการทำงานคือ ผลผลิตช่อดอกแห้ง 1 kg



ภาพที่ 20 แผนผังขอบเขตการศึกษาของการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง

2. วิเคราะห์บัญชีรายการ โดยทำการบันทึกและรวบรวมข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกในกระบวนการต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนต่อไป
3. ประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชั้นกลางของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 3 ระบบ โดยนำข้อมูลปริมาณสารขาเข้าและสารขาออก นำมาวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้วยโปรแกรม SimaPro วิธีการ ReCiPe 2016 Midpoint (H) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง 18 ด้าน จากการเกิดผลกระทบในระยะเวลา 100 y โดยแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประเภทกลุ่มผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

ประเภทผลกระทบ	หน่วย
1. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change, CC)	kg CO ₂ eq
2. การลดลงของชั้นโอโซน (Ozone depletion, OD)	kg CFC11 eq
3. การเกิดรังสีชนิดก่อก่อไอออไนซ์ (Ionising radiation, IR)	kBq Co-60 eq
4. การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ (Photochemical oxidant formation potential: human health, POF _H)	kg NO _x eq
5. การก่อตัวของฝุ่นละออง (Particulate matter formation, PMF)	kg PM _{2.5} eq
6. การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศ (Photochemical oxidant formation: ecosystem quality POF _E)	kg NO _x eq
7. การเกิดภาวะฝนกรด (Terrestrial acidification, TA)	kg SO ₂ eq
8. การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด (Freshwater eutrophication, FE)	kg P eq
9. การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล (Marine eutrophication, ME)	kg N eq
10. การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก (Terrestrial ecotoxicity, TET)	kg 1,4-DCB eq
11. การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (Freshwater ecotoxicity, FET)	kg 1,4-DCB eq
12. การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล (Marine ecotoxicity, MET)	kg 1,4-DCB eq
13. ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง (Human toxicity: cancer, HT _c)	kg 1,4-DCB eq
14. ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง (Human toxicity: non-cancer, HT _{nc})	kg 1,4-DCB eq
15. การใช้ที่ดิน (Land use, LU)	m ² a
16. การลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุ (Mineral resource depletion, MD)	kg Cu eq
17. การลดลงของทรัพยากรฟอสซิล (Fossil resource depletion, FD)	kg oil eq
18. การใช้ทรัพยากรน้ำ (Water use, WU)	m ³

4. แปรผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นการนำข้อมูลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น มาทำการแปรผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทั้ง 3 ระบบ โดยการวิเคราะห์ผลลัพธ์ อภิปรายผล และสรุปผลที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนที่ 12 ประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อลดต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาประเมินการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบปลูกในร่ม

ขั้นตอนที่ 13 วิเคราะห์เปรียบเทียบด้านผลผลิต พลังงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทั้ง 3 ระบบ

ขั้นตอนที่ 14 สรุปผลการศึกษา จัดทำบทความ และวิทยานิพนธ์

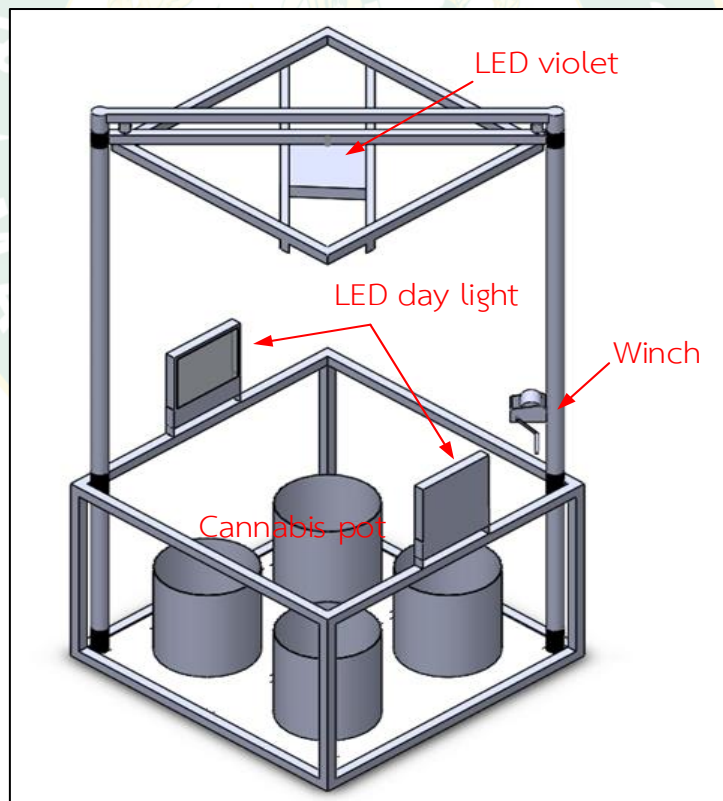


บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์

ในการศึกษาการวิเคราะห์ผลผลิต พลังงาน เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ผลการออกแบบ สร้าง และติดตั้งของชุดไฟเพาะเลี้ยงของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

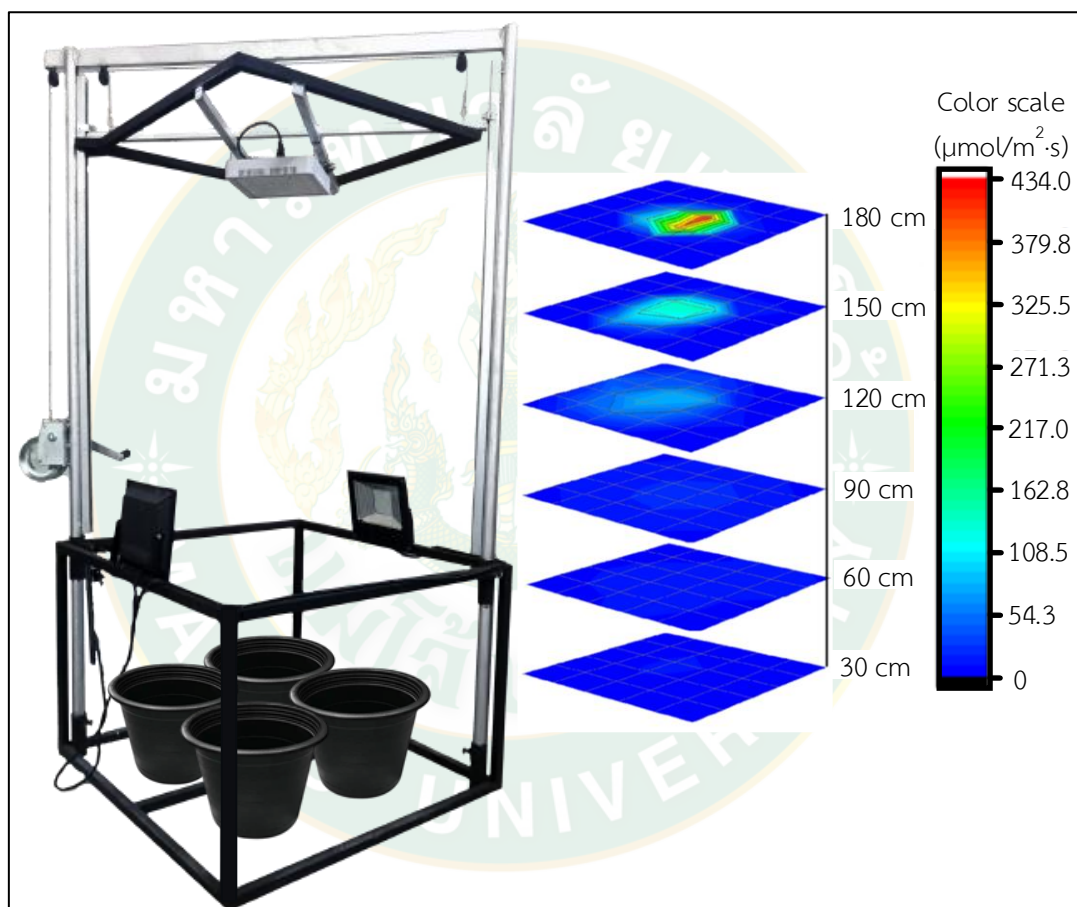
จากผลการออกแบบชุดไฟเพาะเลี้ยงมีขนาดประมาณความกว้าง 1 m ความยาว 1 m และความสูง 2 m โดยติดตั้งไดโอดเปล่งสีม่วงที่ด้านบน 1 lamp และไดโอดเปล่งแสงสีขาวบริเวณด้านข้าง 2 lamp ที่มีความสูงประมาณ 0.6 m ซึ่งออกแบบสำหรับการเพาะเลี้ยงพืชสมุนไพรจำนวน 4 plant ที่ขนาดความจุของกระถางประมาณ 12 l และสามารถปรับระดับตามความสูงของพืชได้ด้วยก้านมือหมุน แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ภาพวาดสามมิติของชุดไฟเพาะเลี้ยง



จะเห็นได้ว่าเมื่อออกแบบชุดไฟเพาะเลี้ยงแล้ว จะทำการสร้างชุดไฟเพาะเลี้ยง โดยโครงจะใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส คานด้านบนใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีคุณสมบัติรองรับน้ำหนักได้ดี

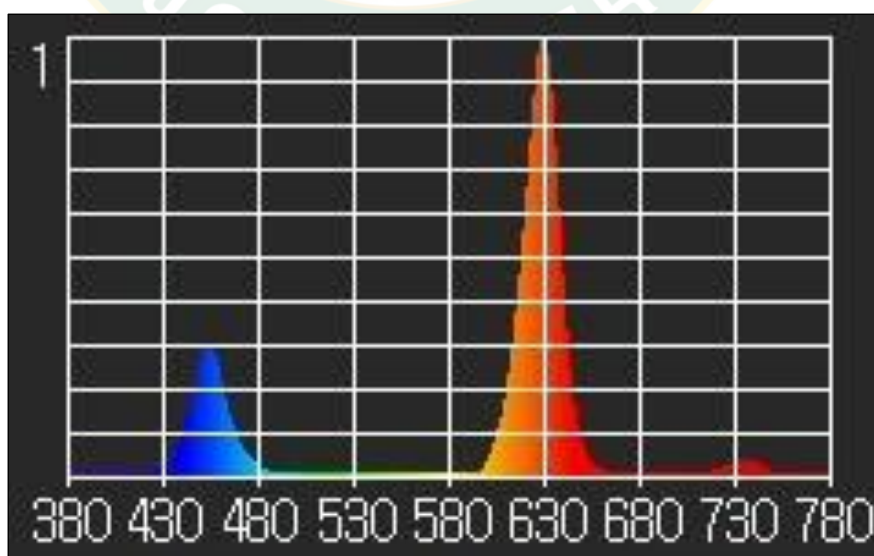
เสาทำจากเหล็กท่อกัลวาไนซ์ จากนั้นนำมาเชื่อมประกอบเข้าด้วยกัน แสดงดังภาพที่ 22 และรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 6 ผลการตรวจวัดความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง 6 ระดับ ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ PG100N พบว่า มีค่าความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสงมากที่สุดประมาณ $433.4 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ และช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงินอยู่ในช่วง 430-480 nm มีความยาวคลื่นแสงมากที่สุดอยู่ที่ 453 nm และความยาวคลื่นแสงสีแดงอยู่ในช่วง 620-670 nm มีความยาวคลื่นแสงมากที่สุดอยู่ที่ 629 nm แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 22 ชุดไฟเพาะเลี้ยงและระดับความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสง

ตารางที่ 6 รายละเอียดอุปกรณ์ของชุดไฟเพาะเลี้ยงและเครื่องมือตรวจวัด

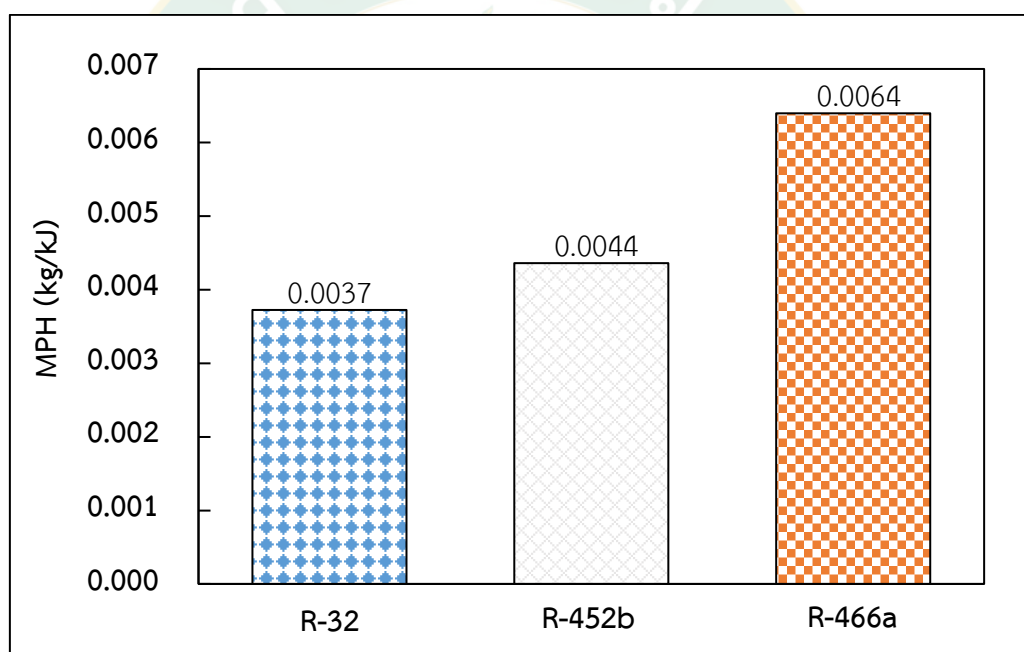
อุปกรณ์	คุณลักษณะ
<p>1. ไดโอดเปล่งแสงสีม่วง (Violet light emitting diode)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> กำลังไฟฟ้า 300 W_e ความถี่ในการทำงาน 50~60 Hz แรงดันไฟฟ้า 85~265 V หลอดแสงสีแดง (620-630nm) จำนวน 84 PCS หลอดแสงสีน้ำเงิน (460-470nm) จำนวน 10 PCS หลอดไฟสีขาว (6000-6500K) จำนวน 2 PCS หลอดแสงยูวี (390-400nm) จำนวน 2 PCS หลอดแสงอินฟราเรด (725-735nm) จำนวน 2 PCS
<p>2. ไดโอดเปล่งแสงสีขาว (D-light light emitting diode)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> กำลังไฟฟ้า 100 W_e แรงดันไฟฟ้า 220 V ค่าความสว่าง 11000 lm อุณหภูมิแวดล้อมที่ใช้งาน -20 °C ถึง 80 °C



ภาพที่ 23 ช่วงความยาวคลื่นแสงจากไดโอดเปล่งแสง

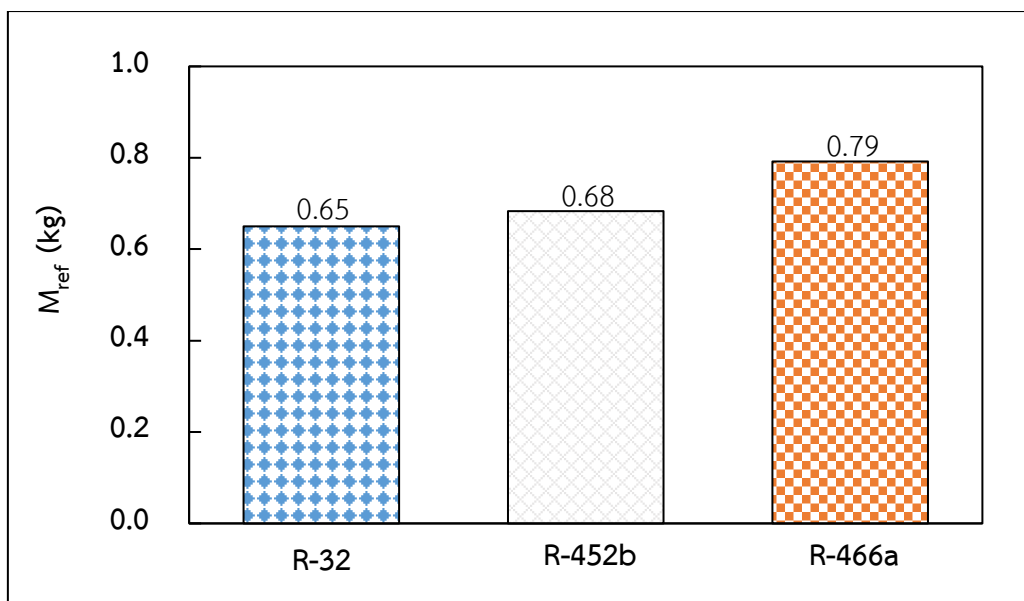
ผลการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลุกในร่ม

จากผลการจำลองเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลุกในร่ม ได้ทำการเลือกสารทำงาน 3 ชนิด คือ R-32, R-452b, และ R-466a พบว่า อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่อหน่วยความร้อนที่ผลิตได้ (Mass flow rate of refrigerant per unit heat output, MPH) จากอัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าสารทำงาน R-466a มีค่ามากที่สุดในระบบอยู่ที่ประมาณ 0.0064 kg/kJ เมื่อเทียบกับสารทำงานชนิดอื่น หากมีค่าที่สูงซึ่งบ่งบอกถึงต้องใช้สารทำงานจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้เครื่องอัดไอน้ำมีส่วนประกอบขนาดใหญ่และงานปั๊มอัดสูง ในขณะที่สารทำงาน R-32 มีค่าน้อยสุดอยู่ที่ประมาณ 0.0037 kg/kJ แสดงดังภาพที่ 24



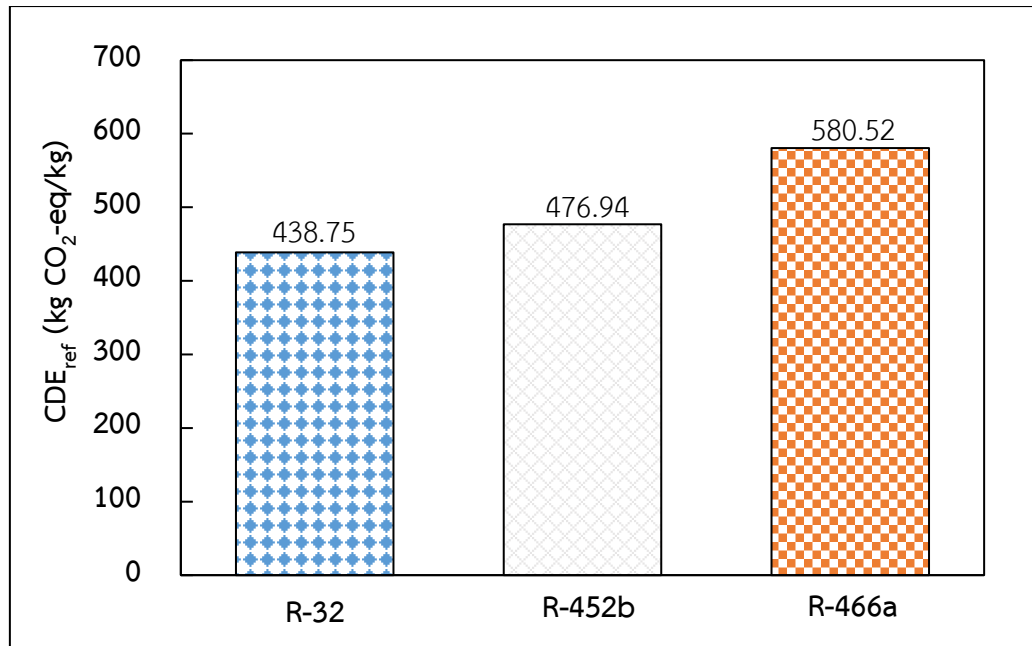
ภาพที่ 24 อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้

ปริมาณของสารทำงาน (Weight of refrigerant, M_{ref}) สำหรับบรรจุในระบบปรับอากาศ โดยความหนาแน่นของสารทำงานแต่ละชนิดที่ทางออกของเครื่องควบแน่นมีความหนาแน่นสูง เนื่องจากมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณสารทำงานในระบบปรับอากาศ จากผลการจำลองพบว่าปริมาณสารทำงาน R-32 มีค่าต่ำสุดประมาณ 0.65 kg ในขณะที่สารทำงาน R-466a มีปริมาณสารมากที่สุดประมาณ 0.79 kg แสดงดังภาพที่ 25



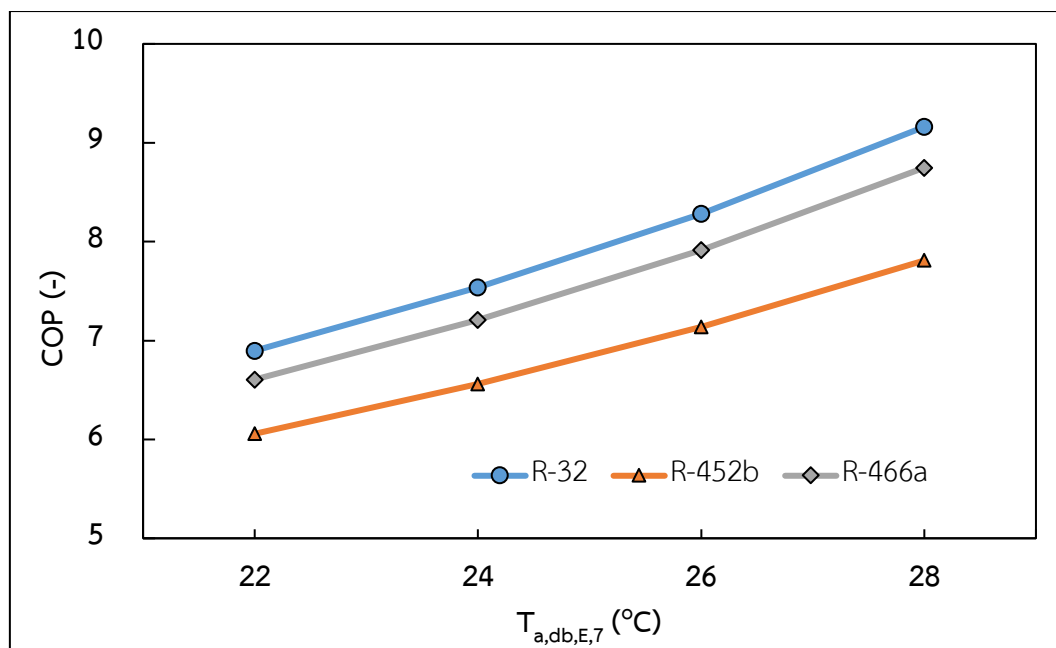
ภาพที่ 25 ปริมาณสารทำงานในระบบปรับอากาศ

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมวลของสารทำงาน (Carbon dioxide emission per mass of refrigerant, CDE_{ref}) ที่มีผลกระทบโดยตรงต่อศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ของสารทำงานแต่ละชนิดในระยะเวลา 100 ปี หากเกิดการรั่วไหลของสารทำงานในระบบตู้สิ่งแฉดล้อม พบว่า สารทำงาน R-32 และ R-452b มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำประมาณ 438.75 kg CO₂ eq/kg และ 476.94 kg CO₂ eq/kg ในขณะที่สารทำงาน R-466a มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงประมาณ 580.52 kg CO₂ eq/kg แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารทำงานแต่ละชนิด

สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) การทำความเย็นของสารทำงาน สำหรับการทำความเย็นที่มีภาระการทำความเย็น 3.517 kW และอุณหภูมิภายในห้องเพาะปลูกอยู่ระหว่าง 22-28 °C พบว่า สภาวะแวดล้อมอุณหภูมิภายในห้อง 24 °C สัมประสิทธิ์สมรรถนะของสารทำงาน R-32, R-452b, และ R-466a มีค่าประมาณ 7.53, 6.56, และ 7.21 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ

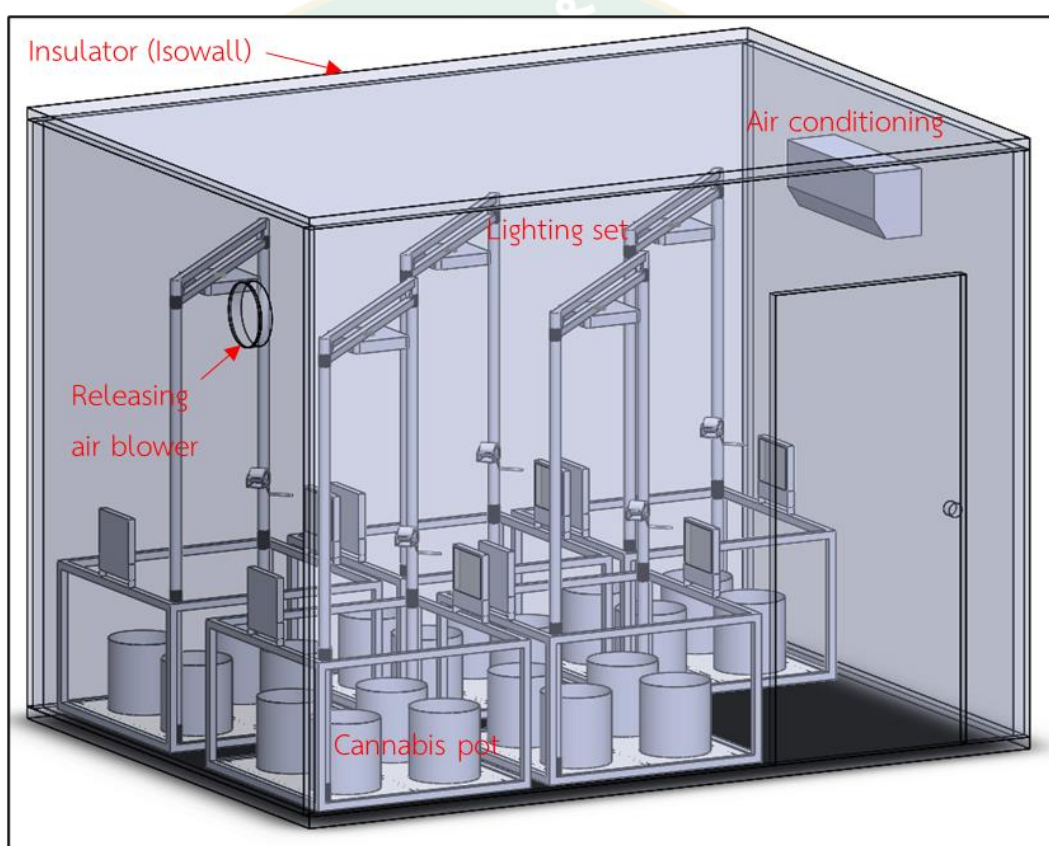
จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบสารทำงานทั้ง 3 ชนิด พบว่า สารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลุกในร่ม คือ สารทำงาน R-32 เนื่องจาก สัมประสิทธิ์สมรรถนะประมาณ 7 และมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 438.75 kg CO₂ eq/kg แสดงดังตารางที่ 7 โดยแสดงผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบของสารทำงานในระบบปรับอากาศ

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลุกในร่ม

รายละเอียด	R-32	R-452b	R-466a
อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงานต่อหน่วยความร้อนที่ผลิตได้ (kg/kJ)	0.0037	0.0044	0.0064
ปริมาณของสารทำงาน (kg)	0.65	0.68	0.79
ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kg CO ₂ eq/kg)	438.75	476.94	580.52
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (-)	7.53	6.56	7.21

ผลการออกแบบ และจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของระบบปรับอากาศที่เหมาะสม สำหรับระบบปลูกในร่ม

จากผลการออกแบบเลือกระบบปรับอากาศที่เหมาะสมสำหรับระบบปลูกในร่ม ได้ทำการออกแบบห้องเพาะปลูกขนาดประมาณ ความกว้าง 2.4 m ความยาว 3.4 m และความสูง 2.5 m โดยใช้ฉนวนกันความร้อนขนาดความหนาประมาณ 2 inch และติดตั้งชุดไฟเพดานขนาดประมาณ ความกว้าง 1 m ความยาว 1 m และความสูง 2 m สำหรับปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงจำนวน 4 plant พบว่า สามารถติดตั้งชุดไฟเพดานได้จำนวน 5 ชุด แสดงดังภาพที่ 28



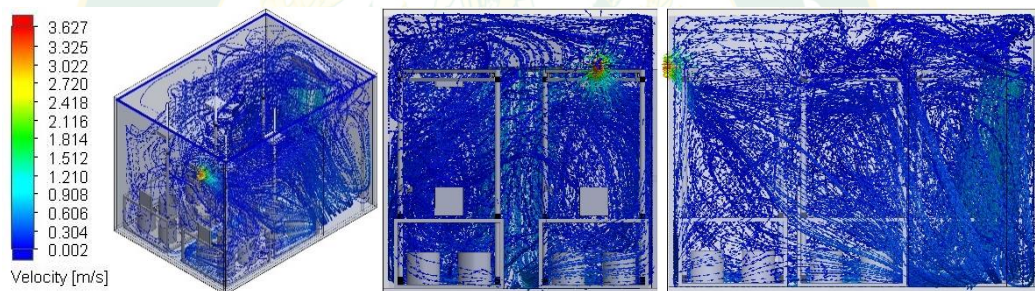
ภาพที่ 28 ภาพวาดสามมิติของห้องเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงระบบปลูกในร่ม

เมื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองห้องเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงระบบปลูกในร่ม ได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดความเร็วลมที่เหมาะสมจากขนาดการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศของผู้ผลิตเครื่องปรับอากาศไดकिन (Daikin, 2020) โดยเงื่อนไขกำหนดในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 8

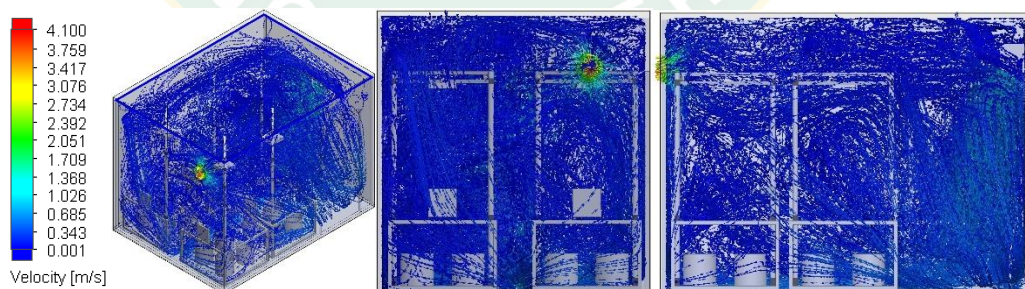
ตารางที่ 8 เงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วลม

ขนาดความสามารถทำความเย็น (kW)	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (m^3/s)
2.7	0.165
3.6	0.187
4.4	0.197
5.3	0.215

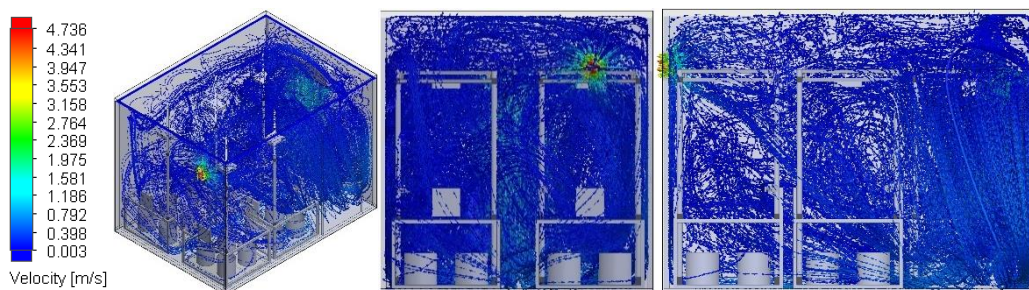
จากการวิเคราะห์ความเร็วมของเครื่องปรับอากาศที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศทั้งหมด 4 ขนาด ประกอบไปด้วย 2.7 kW ($0.165 \text{ m}^3/\text{s}$), 3.6 kW ($0.187 \text{ m}^3/\text{s}$), 4.4 kW ($0.197 \text{ m}^3/\text{s}$), และ 5.3 kW ($0.215 \text{ m}^3/\text{s}$) ซึ่งลักษณะการกระจายลมของแต่ละขนาด แสดงดังภาพที่ 29 ถึง ภาพที่ 32



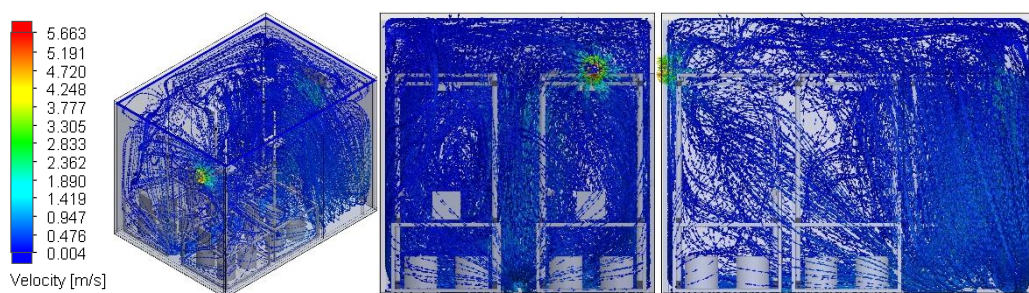
ภาพที่ 29 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 2.7 kW ($0.165 \text{ m}^3/\text{s}$)



ภาพที่ 30 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 3.6 kW ($0.187 \text{ m}^3/\text{s}$)



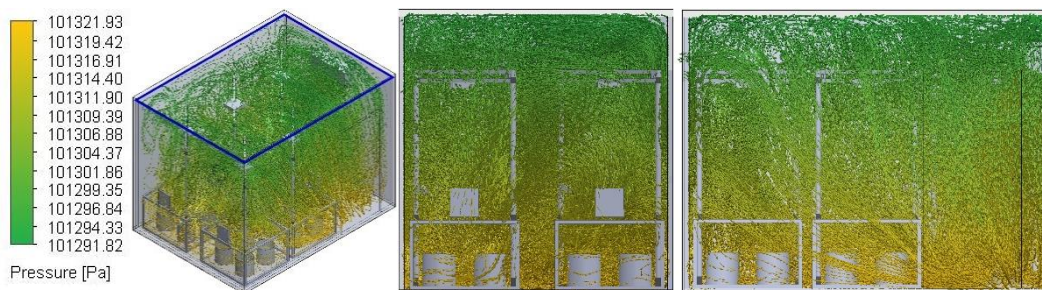
ภาพที่ 31 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 4.4 kW ($0.197 \text{ m}^3/\text{s}$)



ภาพที่ 32 การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ 5.3 kW ($0.215 \text{ m}^3/\text{s}$)

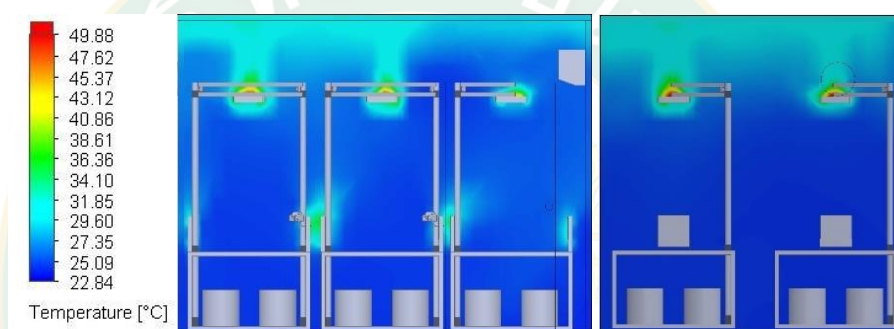
จากผลการจำลองการกระจายลมของเครื่องปรับอากาศทั้ง 4 ขนาด พบว่า การกระจายลมของเครื่องปรับอากาศขนาด 2.7 kW เผยให้เห็นถึงการกระจายลมที่ต่ำและไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งห้อง ในกรณีของเครื่องปรับอากาศขนาด 4.4 kW และ 5.3 kW จะเห็นได้ว่ากระจายลมไม่ทั่วถึงและไม่สม่ำเสมอ ซึ่งการกระจายตัวของลมส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณด้านหลังของห้องเพาะปลุก เป็นผลมาจากขนาดที่เกินของเครื่องปรับอากาศทั้ง 2 รุ่น ส่วนเครื่องปรับอากาศขนาด 3.6 kW จะเห็นได้ว่า มีการกระจายตัวของลมที่สม่ำเสมอและทั่วถึงทั้งห้อง

ดังนั้น ขนาดของเครื่องปรับอากาศที่เหมาะสม คือ เครื่องปรับอากาศขนาด 3.6 kW ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศประมาณ $0.187 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ย 0.19 m/s นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความดันห้องเฉลี่ย 101.322 kPa ดังแสดงในภาพที่ 33 ซึ่งใกล้เคียงกับความดันสิ่งแวดล้อม 101.325 kPa



ภาพที่ 33 ความดันเฉลี่ยภายในห้องเพาะปลุกของเครื่องปรับอากาศขนาด 3.6 kW

และยังพบอีกว่าอุณหภูมิภายในห้องเพาะปลุกเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 25.41 °C ในขณะที่แหล่งความร้อนที่เกิดจากไดโอดเปล่งแสงอยู่ที่ประมาณ 49.25 °C แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องเพาะปลุกของเครื่องปรับอากาศขนาด 3.6 kW

และนำผลการจำลองทางคณิตศาสตร์มาขยายผล โดยทำการเลือกระบบปรับอากาศที่ใช้สารทำความเย็น R-32 ยี่ห้อ Daikin รุ่น Sabai inverter (FTKQ) ดังแสดงรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 9 มาทำการทดสอบที่เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิภายในห้องประมาณ 25 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 30 °C

ตารางที่ 9 คำอธิบายส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ

ส่วนประกอบ	รายละเอียด	
ขนาดความสามารถทำความเย็น (kW)	3.6	
หน่วยภายใน (Fan coil unit)		
รุ่น	FTKQ12SV2S	
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m ³ /s)	High	0.18
	Medium	0.14
	Low	0.11

ส่วนประกอบ	รายละเอียด
ขนาด (H x W x D, mm)	285 x 770 x 223
หน่วยภายนอก (Condensing unit)	
รุ่น	RKQ12SV2S
ประเภทเครื่องอัดไอ	แบบสวิงหุ้มปิด
กำลังไฟฟ้าที่กำหนด (kW _e)	1.2
ขนาด (H x W x D, mm)	550 x 658 x 275

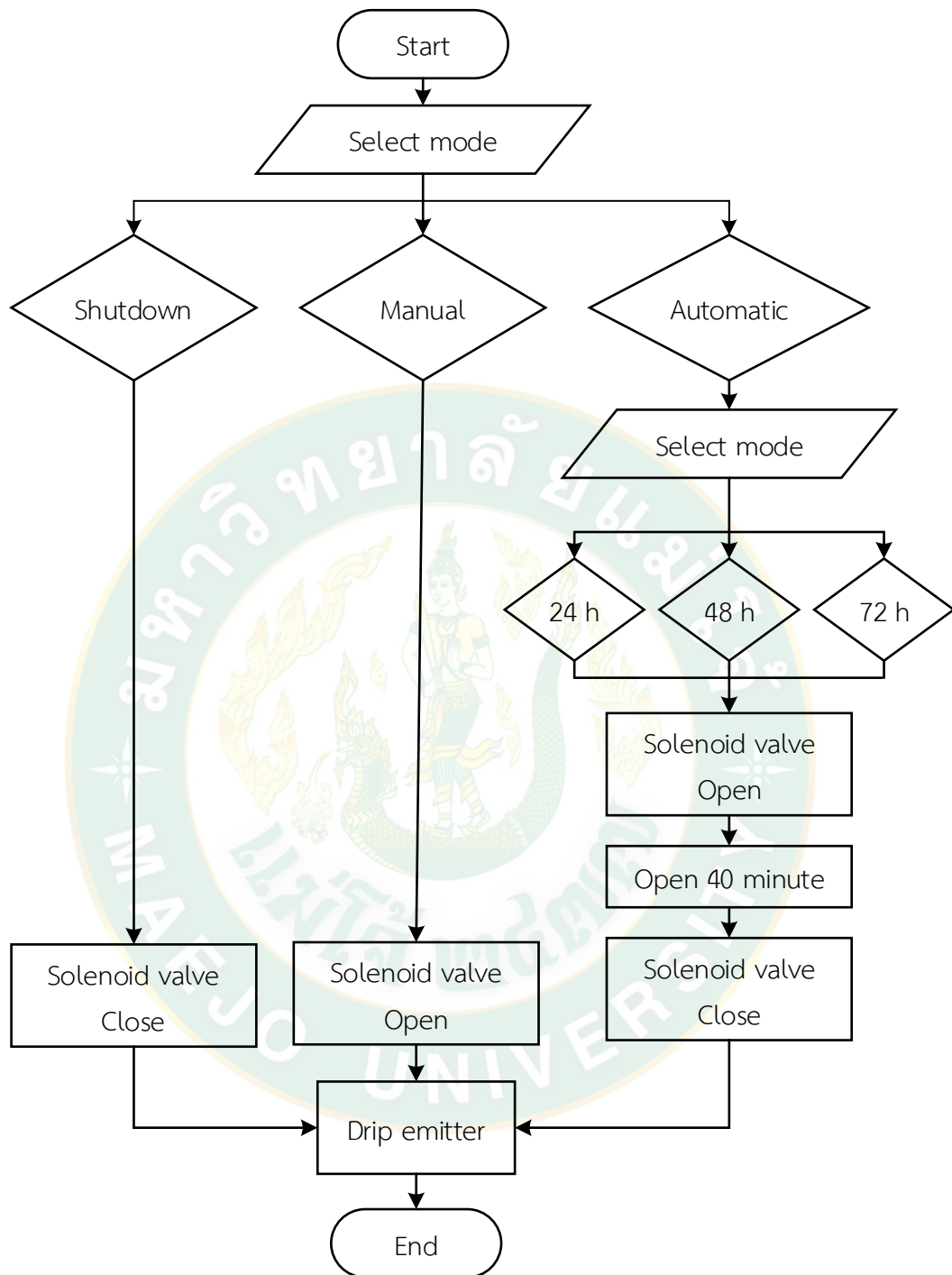
จากผลการทดสอบและเปรียบเทียบการทำงานของระบบปรับอากาศ พบว่า สัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าใกล้เคียงประมาณ 7 โดยคิดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเท่ากับ 70% และประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 60% (Chaiyat, 2019) และยังพบอีกว่าปริมาณน้ำที่ควบแน่นของระบบปรับอากาศที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องประมาณ 55% ประมาณ 18.302 L/d หรือ 0.76 L/h แสดงดังตารางที่ 10 ซึ่งมีผลใกล้เคียงกับผลการจำลองอีกด้วยและยังสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบรดน้ำอัตโนมัติได้อีกด้วย

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบของระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม

รายละเอียด	ผลการจำลอง	ผลการทดสอบ
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (-)	7.36	6.94
ปริมาณน้ำควบแน่น (L/d)	18.742	18.302

ผลการสร้าง และติดตั้งระบบรดน้ำอัตโนมัติ

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ควบแน่นของระบบปรับอากาศ นำมาสร้างระบบรดน้ำอัตโนมัติสำหรับพืชสมุนไพรมูลค่าสูงด้วยระบบน้ำหยด โดยเงื่อนไขการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติประกอบไปด้วย 3 โหมด คือ โหมดคำสั่งรดน้ำด้วยตัวเอง โหมดคำสั่งปิดระบบรดน้ำ และโหมดคำสั่งรดน้ำอัตโนมัติ แบ่งออกเป็น 3 โหมดย่อย ประกอบไปด้วย 24 h, 48 h, และ 72 h เพื่อจ่ายน้ำไปยังพืชสมุนไพรมูลค่าสูง แสดงดังภาพที่ 35



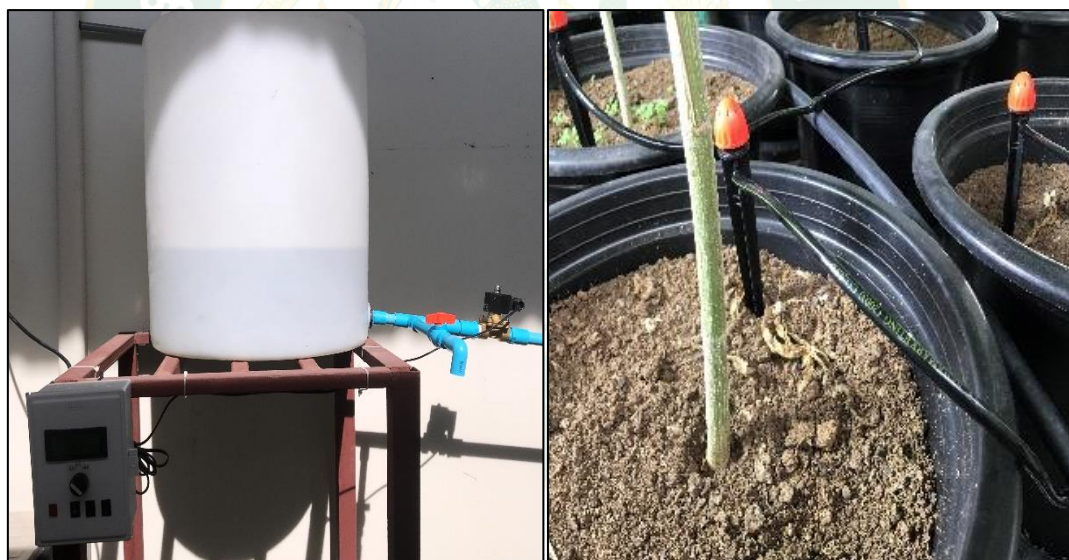
ภาพที่ 35 แผนผังการทำงานของระบบรดน้ำอัตโนมัติ

จากผลประเมินปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับพืชสมุนไพรมูลค่าสูง พบว่า ปริมาณน้ำที่
 ควบคุมประมาณ 18.302 l/d โดยความถี่ของการรดน้ำทุก ๆ 3 d สามารถใช้ในการเพาะปลูกพืช

สมุนไพรมูลค่าสูงได้ประมาณ 23 plant แสดงรายละเอียดในตารางที่ 11 และแสดงดังภาพที่ 36 โดยแสดงรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 12





ตารางที่ 11 รายละเอียดของปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง

รายการ	ข้อมูล
ปริมาตรความจุของกระถาง (m ³)	0.0106
ปริมาตรดินใส่ 90% ของปริมาตรกระถาง (m ³)	0.00954
สัดส่วนปริมาณน้ำต่อกระถางใช้ 25% ของปริมาตรดิน (l)	2.39
ความถี่ในการรดน้ำต่อครั้ง (d)	3
ปริมาณน้ำควบบแน่นต่อวัน (l/d)	18.302
ปริมาณน้ำทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอด 3 d (l)	54.906
จำนวนต้นไม้ที่ประเมินได้ (plant)	23.02
จำนวนต้นไม้ที่เหมาะสม (plant)	23.00



ภาพที่ 36 ระบบรดน้ำอัตโนมัติแบบหัวหยด

ตารางที่ 12 รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบรดน้ำอัตโนมัติ

อุปกรณ์	คุณลักษณะ
1. หัวน้ำหยด (Drip emitter) 	<ul style="list-style-type: none"> • แรงดันน้ำอยู่ที่ 0.1-0.2 MPa • รัศมีการกระจายตัวของน้ำ 0-30 cm • อัตราการไหลของน้ำอยู่ที่ 1-70 L/h • มีรูน้ำออก 8 หลุม
2. วาล์วไฟฟ้า (Solenoid valve) 	<ul style="list-style-type: none"> • รุ่น 2W-200-20 • ขนาด 0.75 inch • แรงดันไฟฟ้า 220 V • ทนแรงดันได้ 0-8 bar
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) 	<ul style="list-style-type: none"> • รุ่น Arduino MEGA 2560 • แรงดัน 5 V • กระแสสูงสุด 40 mA • มีนาฬิกาเข้า 16 ช่อง
4. สวิตช์เลือก (Selector Switch) 	<ul style="list-style-type: none"> • รุ่น XB4BD83 • เลือกได้ 3 ตำแหน่ง

ผลการเลือกสายพันธุ์พืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษายสายพันธุ์ของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ที่มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่เพาะปลูกและระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวผลผลิต จึงได้เลือกศึกษายสายพันธุ์ผสมระหว่างสายพันธุ์ BCN Critical XXL และสายพันธุ์ Gorilla glue โดยแสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 คุณสมบัติของสายพันธุ์พืชสมุนไพรมูลค่าสูง

Detail	BCN Critical XXL ^{1,2}	Gorilla glue ³
Yield of THC (%)	22	27
Yield of CBD (%)	Low	Low
Gene	<i>Indica</i> 50%: <i>Sativa</i> 40%: <i>Ruderalis</i> 10%	<i>Sativa</i> 50%: <i>Indica</i> 50%
Type	Autoflowering	Photoperiod

หมายเหตุ ¹ อ้างอิงจาก Seed-city (2020)

² อ้างอิงจาก Seedtockers (2020)

³ อ้างอิงจาก Zamnesia (2020)

เนื่องจากสายพันธุ์ BCN Critical XXL และ Royal Gorilla เป็นสายพันธุ์ที่มีปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอยด์สูงถึง 20% ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้รักษาในกลุ่มของอาการกล้ามเนื้อหดเกร็ง ลดอาการปวด โรคลมชัก ลดอาการคลื่นไส้อาเจียนจากเคมีบำบัด ยับยั้งการเกิดของเซลล์มะเร็งบางชนิด และเพิ่มความอยากอาหารให้กับผู้ป่วยมะเร็งและเอดส์ โดยสายพันธุ์ BCN Critical XXL มีระยะเวลาในการเพาะปลูกอยู่ที่ประมาณ 4-5 month เนื่องจากได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ที่ผสมพันธุกรรมของ *Ruderalis* ที่มีจุดเด่นในด้านการให้ผลผลิตที่เร็วกว่าสายพันธุ์อื่นเมื่อถึงอายุการผลิตช่อดอก และมีช่วงอายุที่สั้นเหมาะต่อการเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ไม่ใช้ระยะเวลานาน ไม่เหมาะต่อการนำไปโคลนนิ่งหรือซำกิ้ง โดยช่วงแสงไม่มีผลต่อช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต ส่วนสายพันธุ์ Gorilla glue เป็นสายพันธุ์ที่ต้องการช่วงแสงตลอดระยะเวลาการปลูกที่เหมาะสม โดยช่วงแสงจะมีผลต่อช่วงการเจริญเติบโตและการเข้าสู่กระบวนการผลิตช่อดอก

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกสายพันธุ์ผสมระหว่าง BCN Critical XXL และ Gorilla glue มาใช้ในการทดสอบระบบเพาะปลูกทั้ง 3 ระบบ ที่มีจุดเด่นในด้านปริมาณสารเตตราไฮโดรแคนนาบินอยด์ที่สูงสำหรับใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ และสามารถให้ผลผลิตที่ค่อนข้างใช้ระยะเวลาน้อย

ผลการทดสอบระบบเพาะปลูกของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

จากผลการทดสอบระบบเพาะปลูกทั้ง 3 ระบบ ซึ่งประกอบไปด้วย ระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่ม พบว่า ขั้นตอนการเพาะเมล็ด และการเพาะเลี้ยงต้นกล้า เป็นขั้นตอนการเพาะเลี้ยงพืชสมุนไพรในช่วงแรกก่อนนำไปเพาะปลูกตามระบบทั้ง 3 ระบบ และทำการคัดเลือกตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของแต่ละระบบที่มีความสมบูรณ์แข็งแรง เพื่อนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลผลิตที่ได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการเพาะเมล็ดพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

จากผลการเพาะเมล็ดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในขั้นตอนนี้ได้ทำการเพาะเมล็ดทั้งหมด 21 seed พบว่า มีจำนวนของเมล็ดงอก 20 seed จากทั้งหมด 21 seed หรือคิดเป็นอัตราการงอกของเมล็ดเท่ากับ 95.24% จากนั้นนำเมล็ดของพืชสมุนไพรงอกเข้าสู่ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้าต่อไป แสดงดังภาพที่ 37



(ก)

(ข)

ภาพที่ 37 การเพาะเมล็ดพืชสมุนไพรมูลค่าสูง (ก) ก่อนเพาะเมล็ด และ (ข) หลังเพาะเมล็ด

ผลการเพาะเลี้ยงต้นกล้าพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

ในขั้นตอนนี้ได้นำเมล็ดงอกที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมาจำนวน 15 seed ปลูกลงในถุงเพาะชำโดยใช้ดินพีทมอสในการเพาะต้นกล้าประมาณ 240 g/plant เนื่องจากดินพีทมอสเป็นอินทรีย์วัตถุจากธรรมชาติ มีลักษณะโครงสร้างโปร่ง ช่องว่างอากาศสูง สามารถเก็บความชื้นได้ดี มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ปราศจากวัชพืชและเชื้อโรคสาเหตุของโรคพืช จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เพาะปลูกต้นกล้า อีกทั้งช่วยเพิ่มอัตราการงอกและช่วยในการเจริญเติบโตให้ต้นกล้าสมบูรณ์ จากนั้นนำไปเพาะเลี้ยงในห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 25 °C และทำการให้แสงตลอด 24 h/d โดยใช้ไดโอดเปล่งแสงสีม่วงขนาด 300 W_e หลังจากระยะเวลาผ่านไป 4 d พบว่า พืชสมุนไพรมูลค่าสูงมีการเจริญเติบโตและสร้างใบเลี้ยงสำหรับสังเคราะห์แสงช่วงแรก แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงต้นกล้าผ่านไปเป็นระยะเวลา 11 d พบว่า ต้นกล้ามีการเจริญเติบโตสร้างใบแก่พร้อมสำหรับการเจริญเติบโตในขั้นตอนต่อไป และได้คัดเลือกต้นกล้าจำนวน 12 plant ที่มีความสมบูรณ์แข็งแรงและมีความสูงใกล้เคียงกันประมาณ 6 cm แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ต้นกล้าพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ที่ได้จากการคัดเลือก

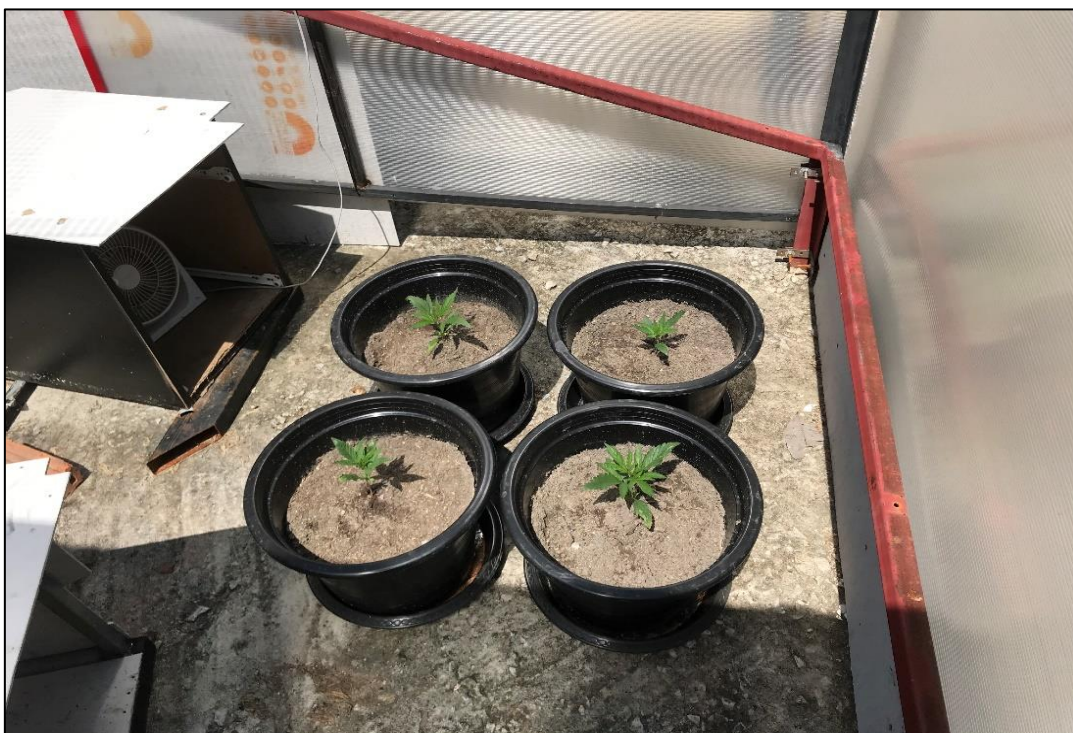
หลังจากนั้นนำต้นกล้าที่ผ่านการคัดเลือกปลูกลงในกระถางขนาด 12 L โดยใช้ขุยมะพร้าวรองก้นกระถางประมาณ 80 g เตรียมดินสำหรับปลูกประมาณ 7 kg/plant แสดงดังภาพที่ 40 และจากนั้นนำไปเพาะปลูกในระบบปลูกลงข้าง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่ม โดยแบ่งออกเป็นการเพาะปลูกในระบบละ 4 plant ในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 40 ต้นกล้าพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

ผลการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกกลางแจ้ง

ได้ทำการออกแบบพื้นที่เพาะปลูกสำหรับระบบปลูกกลางแจ้งที่มีแสงแดดส่องถึงตลอดวัน โดยสร้างผนังห้องด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบโปร่งแสงมีความสูงประมาณ 2.1 m เพื่อป้องกันอันตรายที่มีผลต่อพืชสมุนไพร พร้อมติดตั้งพัดลมระบายอากาศภายในห้อง เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติและลดปัญหาความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่เพาะปลูก แสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 พื้นที่เพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกลางแจ้ง

จากการเพาะปลูกพืชสมุนไพรในระบบปลูกกลางแจ้งและคัดเลือกตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้งที่มีความสมบูรณ์แข็งแรง พบว่า ใช้ระยะเวลาในการเพาะปลูก 130 d ขนาดความสูงของต้นประมาณ 120 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นประมาณ 1.1 cm และผลผลิตช่อดอกสดประมาณ 316 g แสดงดังภาพที่ 42 และยังพบอีกว่ามีหนอนแมลงศัตรูพืชเข้ามาทำลายผลผลิตในระหว่างการเพาะเลี้ยง แสดงดังภาพที่ 43 ซึ่งเป็นข้อเสียของการเพาะปลูกพืชในระบบแบบเปิด รวมถึงความถี่ในการรดน้ำทุก ๆ 1 d เนื่องจากความชื้นในดินค่อนข้างแห้งจึงทำให้ระบบนี้มีการใช้ปริมาณน้ำตลอดการเพาะปลูกประมาณ 79 l/plant



ภาพที่ 42 ต้นตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกล่างแจ้ง



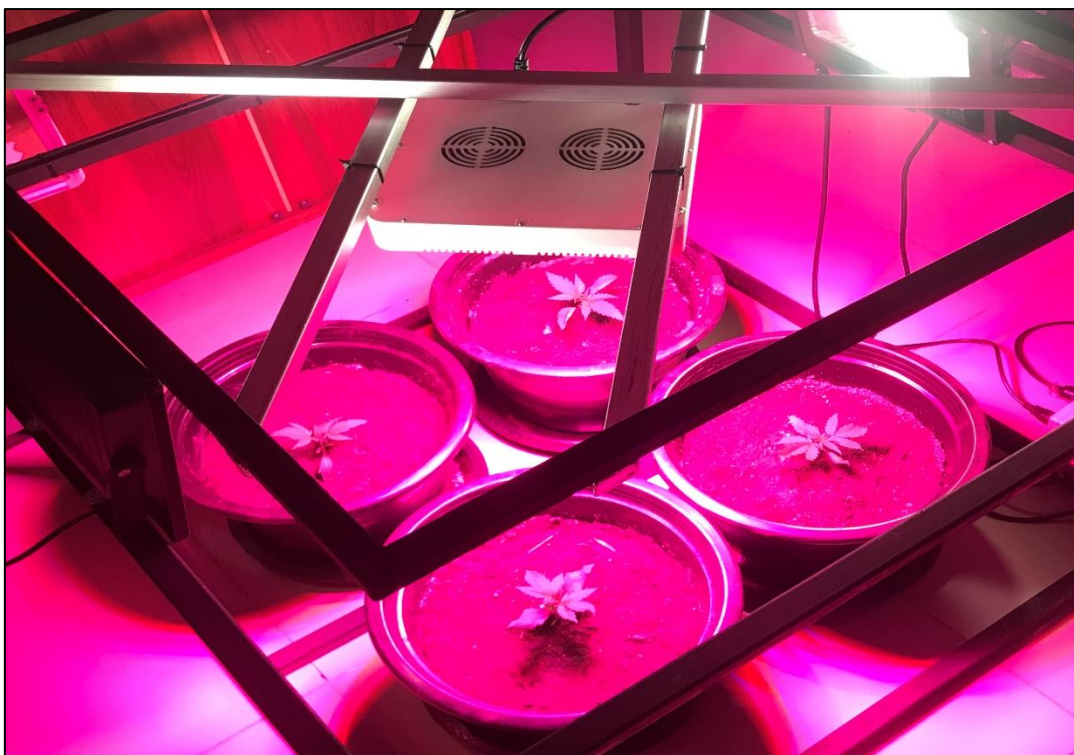
ภาพที่ 43 หนอนแมลงศัตรูพืชของการเพาะปลูกระบบปลูกล่างแจ้ง

ผลการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกในร่ม

ในการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่มได้ทำการควบคุมสภาวะแวดล้อมในช่วงการเจริญเติบโตและช่วงการสร้างผลผลิต โดยแสดงดังตารางที่ 14 โดยให้ระยะห่างระหว่างชุดไฟเพาะเลี้ยงและพืชสมุนไพรมูลค่าสูงประมาณ 30 cm แสดงดังภาพที่ 44

ตารางที่ 14 รายละเอียดการควบคุมสภาวะแวดล้อมของระบบปลูกในร่ม

รายละเอียด	ข้อมูล
ช่วงการเจริญเติบโต	
อุณหภูมิ (°C)	25
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)	50
ค่าความหนาแน่นฟotonของการสังเคราะห์แสง ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	434
ระยะเวลาการให้แสง (h/d)	18
ช่วงการสร้างผลผลิต	
อุณหภูมิ (°C)	22
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)	40
ค่าความหนาแน่นฟotonของการสังเคราะห์แสง ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	434
ระยะเวลาการให้แสง (h/d)	12



ภาพที่ 44 พื้นที่เพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกในร่ม

จากการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม พบว่า มีขนาดความสูงของต้นประมาณ 125 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นประมาณ 1.5 cm และผลผลิตช่อดอกสดประมาณ 250 g โดยใช้ระยะเวลาในการเพาะปลูก 185 d แสดงดังภาพที่ 45 และความถี่ในการรดน้ำต่อครั้งทุก ๆ 4 d เนื่องจากมีการสูญเสียความชื้นในดินค่อนข้างต่ำ โดยใช้ปริมาณน้ำตลอดการเพาะปลูกประมาณ 41.5 l/plant



ภาพที่ 45 ต้นตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกในร่ม

ผลการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม

ได้ทำการเพาะปลูกบริเวณพื้นที่ในร่มและมีแสงแดดจากธรรมชาติร่วมกับการเปิดชุดไฟเพาะเลี้ยง 6 h/d หลังจากเวลา 18.00 น. เพื่อให้พืชสมุนไพรมูลค่าสูงได้เจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยให้ระยะห่างระหว่างชุดไฟเพาะเลี้ยงและพืชสมุนไพรมูลค่าสูงประมาณ 30 cm เช่นเดียวระบบเพาะเลี้ยงแบบในร่ม แสดงดังภาพที่ 46 จากการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบนี้ พบว่า มีขนาดความสูงของต้นประมาณ 167 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นประมาณ 1.4 cm และผลผลิตช่อดอกสดประมาณ 261 g โดยใช้ระยะเวลาในการเพาะปลูก 219 d แสดงดังภาพที่ 47 และ ความถี่ในการรดน้ำต่อครั้งทุก ๆ 3 d ซึ่งมีความเหมาะสมต่อความต้องการของน้ำของพืช โดยปริมาณน้ำที่ใช้ตลอดการเพาะปลูกประมาณ 55.5 l/plant และยังพบอีกว่าในช่วงระยะที่ทำการเพาะปลูกนั้นมีหนอนแมลงศัตรูพืชเข้ามากัดกินผลผลิต แสดงดังภาพที่ 48



ภาพที่ 46 พื้นที่เพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



ภาพที่ 47 ต้นตัวแทนของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงของระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



ภาพที่ 48 หนอนแมลงศัตรูพืชของการเพาะปลูกระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

จากผลการเปรียบเทียบต้นตัวแทนของระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 15 พบว่า ผลผลิตช่อดอกสดของระบบปลูกกลางแจ้งมากที่สุดประมาณ 316 g และระยะเวลาของการปลูกอยู่ที่ 120 d ซึ่งน้อยกว่าระบบปลูกแบบอื่น อาจเพราะสายพันธุ์ของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงนั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช แต่ในทางกลับกันการปลูกแบบกลางแจ้งและกึ่งในร่มนอกร่มก็อาจจะมีแมลงศัตรูพืชเข้ามารบกวนและทำความเสียหายให้กับผลผลิต

ตารางที่ 15 รายละเอียดต้นตัวแทนและผลผลิตช่อดอกสดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง

รายละเอียด	ระบบปลูกกลางแจ้ง	ระบบปลูกในร่ม	ระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม
ความสูง (cm)	120	125	167
เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น (cm)	1.1	1.5	1.4
ระยะเวลาปลูก (d)	120	185	219
ผลผลิตช่อดอกสด (g)	316	250	261

ผลการเก็บเกี่ยวและการตากแห้งผลผลิตพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

เมื่อได้ผลผลิตช่อดอกสดของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง จะทำการตัดแต่ง (Trimming) ในส่วนของใบที่ไม่มีการผลิตต่อมไตรโครมออก เพื่อลดปัญหาความชื้นส่วนเกินที่ไม่ต้องการและลดระยะเวลาของการตากแห้ง อีกทั้งยังลดปัญหาของการเกิดเชื้อราที่ไม่พึงประสงค์อีกด้วย แสดงดังภาพที่ 49



ภาพที่ 49 ผลผลิตช่อดอกสดที่ผ่านการตัดแต่งใบ

ซึ่งในกระบวนการตากแห้งได้ทำการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องประมาณ 25 °C ด้วยระบบปรับอากาศ เป็นระยะเวลา 10 d เพื่อให้ความชื้นออกจากผลผลิตมากที่สุด แสดงดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 กระบวนการตากแห้งผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง

หลังจากผ่านกระบวนการตากแห้งและทำการตัดแต่งนำกิ่งก้านออก พบว่า ผลผลิตช่อดอกแห้งน้ำหนักของผลผลิตช่อดอกแห้งของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทั้ง 3 ระบบ แสดงดังตารางที่ 16 โดยแสดงเป็นน้ำหนักของผลผลิตช่อดอกก่อนตากแห้งและหลังจากตากแห้ง

ตารางที่ 16 น้ำหนักของผลผลิตช่อดอกก่อนตากแห้งและหลังจากตากแห้ง

รายละเอียด	ระบบปลูก กลางแจ้ง	ระบบปลูกในร่ม	ระบบปลูกกึ่งในร่ม นอกร่ม
ผลผลิตช่อดอกสด (g)	316	250	216
ผลผลิตช่อดอกแห้ง (g)	66.7	46.3	55.8
น้ำหนักความชื้นที่สูญเสีย (%)	78.9	81.5	74.2
น้ำหนักมวลแห้งต่อน้ำหนักมวล เปียก (%)	21.1	18.5	25.8

ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผลการประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ แสดงดังตารางที่ 17 ถึง ตารางที่ 19 โดยแสดงการคำนวณมูลค่าการลงทุนของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงจำนวน 1 ต้น

ตารางที่ 17 การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง

รายการ	ปริมาณ
ผลผลิตช่อดอกแห้ง (g)	66.7
ราคาเมล็ดพันธุ์ (Baht)	50
ราคากระถางเพาะปลูก (Baht)	35
ราคาดินปลูก (Baht)	16.3
ราคาปุ๋ยอินทรีย์ระหว่างการดูแลรักษา (Baht)	34.2
พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้ารวม (kWh)	8.22
ค่าพลังงานไฟฟ้า (Baht/kWh) ¹	2.9882
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้า (Baht)	24.56
มูลค่าการลงทุน (Baht)	135.5
ค่าใช้จ่ายตลอดการปลูก (Baht)	58.76

รายการ	ปริมาณ
ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง (Baht/kg)	2,912.49

หมายเหตุ ¹อ้างอิงข้อมูลจาก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2561)

ตารางที่ 18 การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม

รายการ	ปริมาณ
ผลผลิตช่อดอกแห้ง (g)	46.3
ราคาเมล็ดพันธุ์ (Baht)	50
ราคากระถางเพาะปลูก (Baht)	35
ราคาดินปลูก (Baht)	16.3
ราคาชุดไฟเพาะเลี้ยง (Baht)	2,385
ราคาปุ๋ยอินทรีย์ระหว่างการดูแลรักษา (Baht)	68.4
พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้ารวม (kWh)	507.6
ค่าพลังงานไฟฟ้า (Baht/kWh) ¹	2.9882
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้า (Baht)	1,502.8
มูลค่าการลงทุน (Baht)	2,486.3
ค่าใช้จ่ายตลอดการปลูก (Baht)	1,571.2
ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม (Baht/kg)	87,937.59

หมายเหตุ ¹อ้างอิงข้อมูลจาก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2561)

ตารางที่ 19 การคำนวณต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

รายการ	ปริมาณ
ผลผลิตช่อดอกแห้ง (g)	55.8
ราคาเมล็ดพันธุ์ (Baht)	50
ราคากระถางเพาะปลูก (Baht)	35
ราคาดินปลูก (Baht)	16.3
ราคาชุดไฟเพาะเลี้ยง (Baht)	2,385
ราคาปุ๋ยอินทรีย์ระหว่างการดูแลรักษา (Baht)	85.5
พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้ารวม (kWh)	106.47
ค่าพลังงานไฟฟ้า (Baht/kWh) ¹	2.9882
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้า (Baht)	318.15

รายการ	ปริมาณ
มูลค่าการลงทุน (Baht)	2,486.3
ค่าใช้จ่ายตลอดการปลูก (Baht)	403.65
ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม (Baht/kg)	51,791.28

หมายเหตุ ¹อ้างอิงข้อมูลจาก การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (2561)

จากผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิต พบว่า ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของระบบปลูกกลางแจ้งนั้นมีต้นทุนต่ำประมาณ 2,912.49 Baht/kg ซึ่งเป็นข้อดีของการเพาะปลูกในระบบปลูกกลางแจ้ง ส่วนต้นทุนของระบบปลูกในร่มมีต้นทุนสูงอันเนื่องมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงและต้นทุนจากชุดไฟเพาะเลี้ยง ซึ่งมีต้นทุนประมาณ 87,937.59 Baht/kg และต้นทุนของระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่มประมาณ 51,791.28 Baht/kg ซึ่งมีต้นสูงจากชุดไฟเพาะเลี้ยงและการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าระบบปลูกในร่ม แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการประเมินต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูง

รายละเอียด	ระบบปลูก กลางแจ้ง	ระบบปลูก ในร่ม	ระบบปลูกกิ่งในร่ม นอกร่ม
มูลค่าการลงทุน (Baht)	135.5	2,486.3	2,486.3
พลังงานไฟฟ้า (kWh)	8.22	506.7	106.47
ค่าพลังงานไฟฟ้า (Baht/kWh)	2.9882	2.9882	2.9882
มูลค่าตลอดการปลูก (Baht)	58.76	1,571.2	403.65
ผลผลิตช่อดอกแห้ง (g)	66.7	46.3	55.8
ต้นทุนต่อหน่วยผลผลิต (Baht/kg)	2,912.49	87,937.59	51,791.28

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

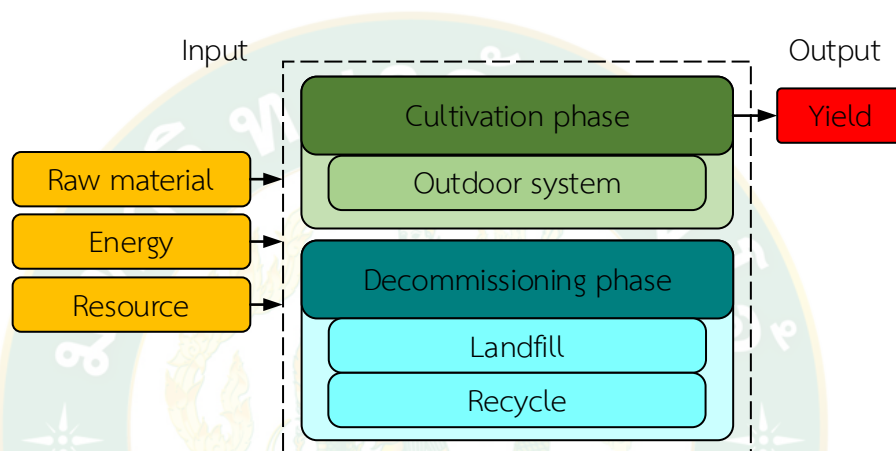
จากผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้ง ระบบปลูกในร่ม และระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม พบว่า ดินพีทมอส ดินปลูก ดินมูลไส้เดือน ปุ๋ยมูลวัวแห้ง ปุ๋ยมูลไก่แห้ง และปุ๋ยมูลค่างควาแห้ง ถือได้ว่าไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ รวมถึงน้ำทิ้งที่ได้จากระบบปรับอากาศซึ่งเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้ง

เป้าหมายของการศึกษา คือ ประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้ง

ขอบเขตการศึกษา คือ แบบแกระเดล-ทู-เกรฟ โดยพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ พลังงาน ทรัพยากร กระบวนการดำเนินงาน และกำจัดซาก แสดงดังภาพที่ 51

หน่วยการทำงาน คือ ผลผลิตช่อดอกแห้ง 1 kg



ภาพที่ 51 ขอบเขตการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้ง

ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้ง

ในการบันทึกข้อมูลรวบรวมปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกลางแจ้งตลอดวัฏจักรชีวิต แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 บัญชีรายการข้อมูลของการเพาะพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นตอนการเพาะเมล็ด			
สารขาเข้า			
กระดาศพืชชู		0.05	g
กล่องพลาสติก	โพลีโพรพิลีน	3.33	g
น้ำสะอาด		2.5	ml

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
เมล็ดพันธุ์		1	seed
สารขาออก			
กระดาษทิชชู		0.05	g
กล่องพลาสติก	โพลีโพรพิลีน	3.33	g
น้ำเสีย		2.5	ml
เมล็ดพันธุ์ออก		1	seed
ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า			
สารขาเข้า			
ดินพีทมอส		240	g
ถุงเพาะชำต้นกล้า	โพลีเอทิลีน	3.5	g
แก้วพลาสติก	พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต	12.25	g
น้ำสะอาด		160	ml
พลังงานไฟฟ้า		5.28	kWh
เมล็ดพันธุ์ออก		1	seed
สารขาออก			
ถุงเพาะชำต้นกล้า	โพลีเอทิลีน	3.5	g
แก้วพลาสติก	พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต	12.25	g
ต้นกล้า		1	plant
ขั้นตอนการดูแลรักษา			
สารขาเข้า			
ต้นกล้า		1	plant
กระถางเพาะปลูก	ไนลอน 66	0.77	kg
ดินปลูก		7	kg
ดินมูลไส้เดือน		1.5	kg
ปุ๋ยมูลวัวแห้ง		1.5	kg
ปุ๋ยมูลไก่แห้ง		450	g
ปุ๋ยมูลค่างควาแห้ง		450	g
น้ำสะอาด		79	l

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวและตากแห้ง			
สารขาเข้า			
ช่อดอกกัญชาสด		316	g
พลังงานไฟฟ้า		2.94	kWh
สารขาออก			
ช่อดอกกัญชาแห้ง		66.7	g
การรีไซเคิล			
พลาสติก	โพลีโพรพิลีน	2.99	g
	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
	ไนลอน 66	0.69	kg
การฝังกลบ			
กระดาษทิชชู		0.05	g
พลาสติกรวม		3.58	g

จากการรวบรวมข้อมูลบัญชีรายการของวัตถุดิบ ทรัพยากร และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ต่อการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 1 plant พบว่า มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้าและขั้นตอนการเก็บเกี่ยวและตากแห้งรวมทั้งหมด 8.22 kWh และมีการใช้วัสดุประเภทพลาสติกรวมทั้งหมด 87.82 g ซึ่งส่วนใหญ่มาจากกระดาษเพาะปลูกประเภทไนลอน 66

ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูก กลางแจ้ง

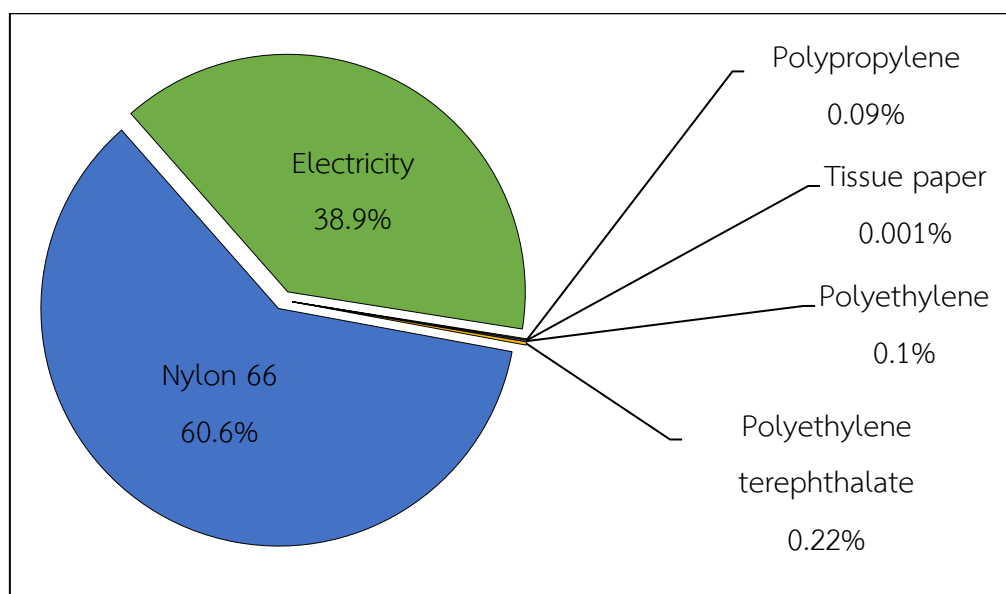
จากผลการวิเคราะห์บัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้งในตารางที่ 21 เมื่อนำมาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชั้นกลางที่เกิดขึ้นทั้ง 18 กลุ่มผลกระทบ แสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกในระบบปลูกกลางแจ้ง

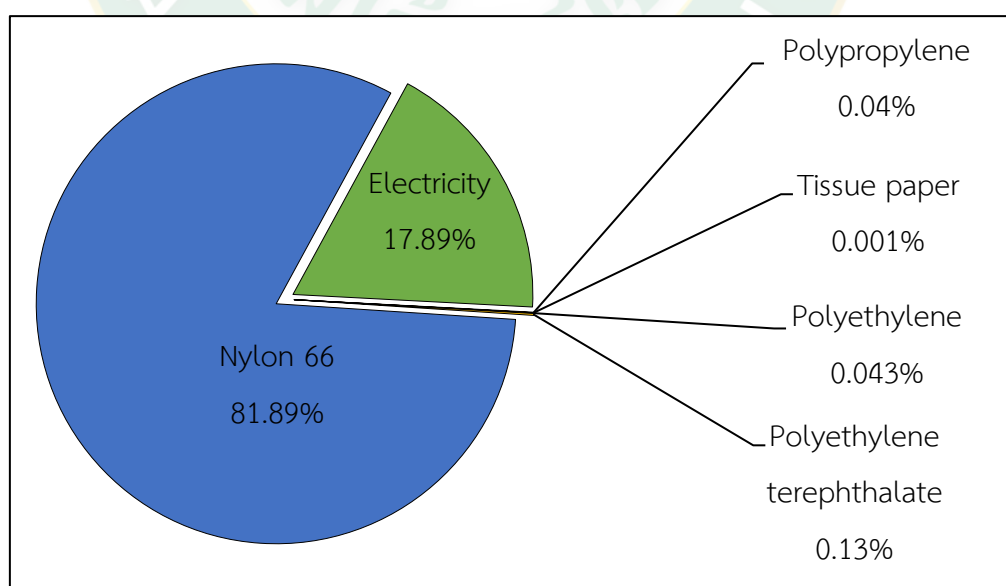
Impact category	Cultivation phase	Harvest phase	Decommissioning phase		Total emission	
			Recycle	Landfill	Lifetime	kg _{dry}
CC	1.02E+01	2.17E+00	-6.86E+00	6.75E-01	6.18E+00	9.22E+01
OD	7.44E-06	6.51E-07	-6.56E-05	6.30E-07	-5.69E-05	-8.49E-04
IR	1.19E-01	5.51E-03	-2.81E-03	5.53E-04	1.22E-01	1.83E+00
POF _H	1.71E-02	2.99E-03	-1.43E-02	1.18E-03	7.01E-03	1.05E-01
PMF	9.99E-03	1.84E-03	-5.47E-03	5.93E-04	6.96E-03	1.04E-01
POF _E	1.76E-02	3.05E-03	-1.49E-02	1.22E-03	7.04E-03	1.05E-01
TA	2.77E-02	4.85E-03	-1.68E-02	1.91E-03	1.77E-02	2.64E-01
FE	2.44E-03	1.36E-03	-1.60E-04	3.73E-05	3.68E-03	5.49E-02
ME	2.09E-03	8.83E-05	-2.21E-04	1.89E-04	2.14E-03	3.20E-02
TET	5.96E+00	2.88E+00	-1.56E+00	1.57E-01	7.44E+00	1.11E+02
FET	2.24E-01	1.42E-01	-1.92E-02	2.29E-03	3.49E-01	5.22E+00
MET	2.88E-01	1.79E-01	-2.67E-02	3.15E-03	4.44E-01	6.62E+00
HT _C	2.66E-01	8.78E-02	-1.08E-01	1.26E-02	2.58E-01	3.85E+00
HT _{nc}	3.75E+00	2.01E+00	-4.24E-01	4.74E-02	5.38E+00	8.03E+01
LU	2.71E-02	8.38E-03	-4.14E-03	5.29E-04	3.19E-02	4.75E-01
MD	5.75E-03	2.41E-03	-7.57E-04	1.76E-04	7.58E-03	1.13E-01
FD	3.07E+00	6.35E-01	-1.75E+00	2.14E-01	2.17E+00	3.24E+01
WU	1.92E-01	8.98E-03	-4.80E-02	1.75E-02	1.70E-01	2.54E+00

จากผลการพิจารณา พบว่า ในขั้นตอนการดูแลรักษาผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้กระถางเพาะปลูกซึ่งเป็นวัสดุประเภทพลาสติกไนลอน 66 จำนวน 0.77 kg โดยส่งผลกระทบต่อทางสิ่งแวดล้อมสูงทางด้านการลดลงของชั้นโอโซน การเกิดรังสีชนิดก่อก่อไอออน การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล และการใช้ทรัพยากรน้ำ ในขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้าและการตากแห้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อทางสิ่งแวดล้อมสูงด้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล และภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง และเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ซึ่งเป็นกระบวนการขั้นสุดท้ายของวัฏจักรชีวิต พบว่า มีวัสดุบางส่วนสามารถแปรรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยคิดเป็นร้อยละ 90 ของวัสดุที่สามารถนำไปแปรรูปใหม่ และในส่วนที่ไม่สามารถกลับมาใช้ใหม่ได้จะถูกนำไปฝังกลบตามหลัก

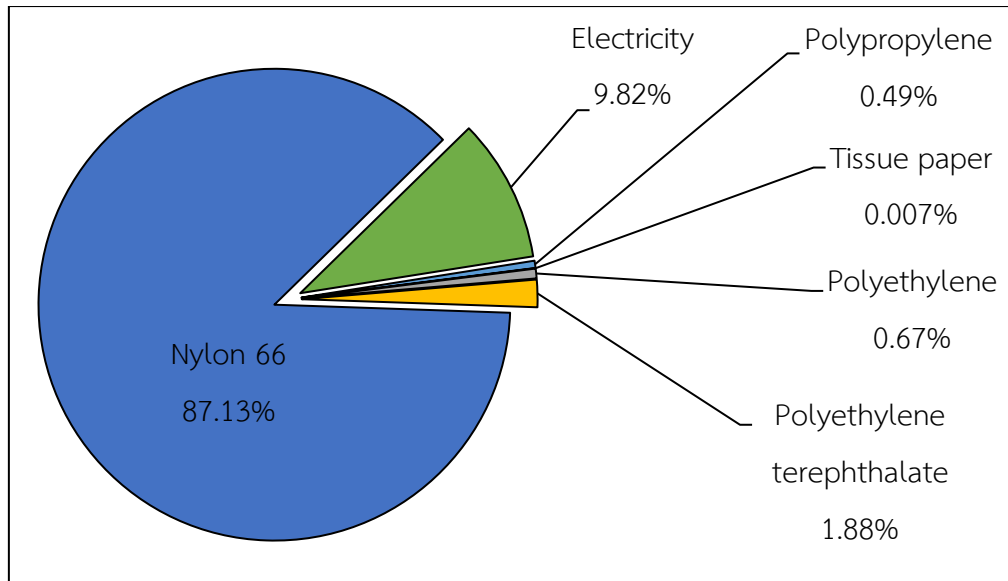
สุขาภิบาลโดยคิดเป็นร้อยละ 10 ของวัสดุที่ถูกใช้งาน ทำให้ผลกระทบด้านต่าง ๆ ลดลง โดยเฉพาะผลกระทบประเภทการลดลงของชั้นโอโซนนั้นมีผลเป็นลบ โดยผลกระทบของการใช้วัสดุดิบแต่ละด้านตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง มีผลแสดงดังภาพที่ 52 ถึงภาพที่ 69



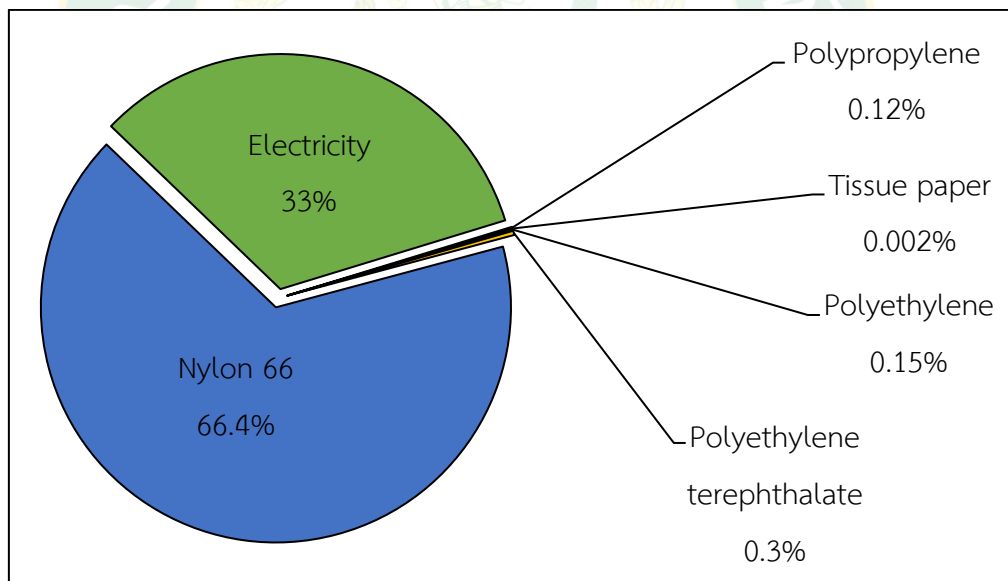
ภาพที่ 52 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



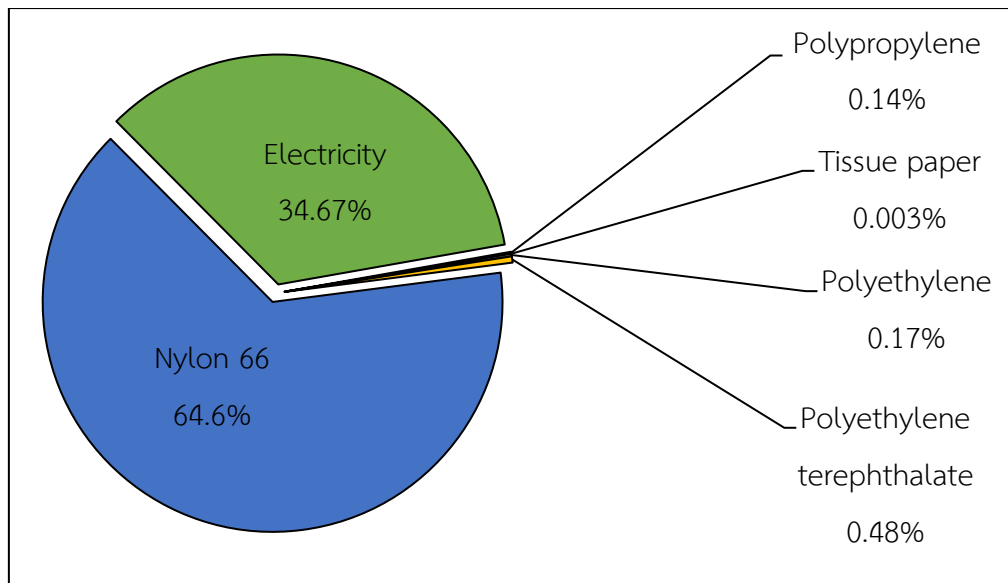
ภาพที่ 53 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อการลดลงของชั้นโอโซนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



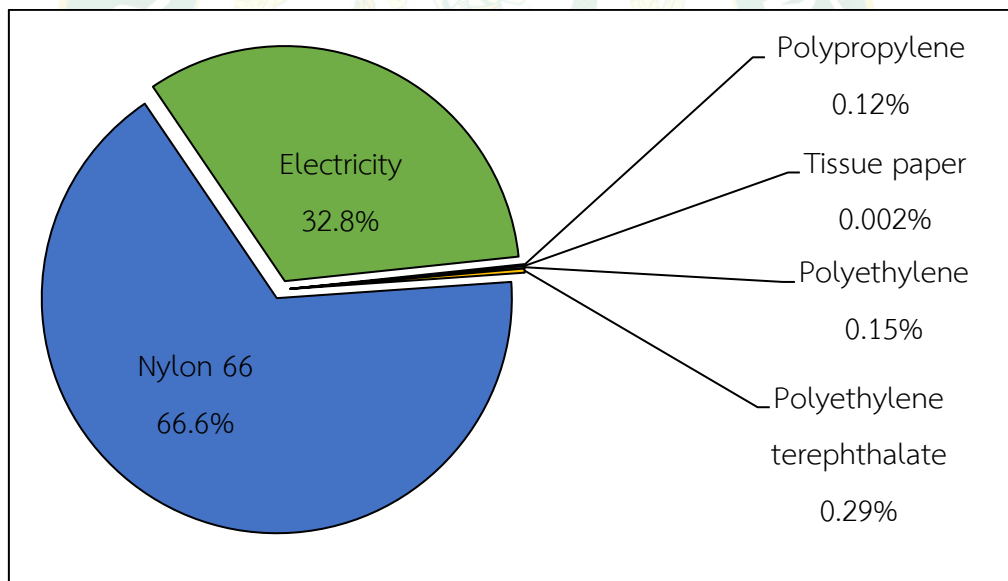
ภาพที่ 54 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดรังสีชนิดก่อไอออนซ์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



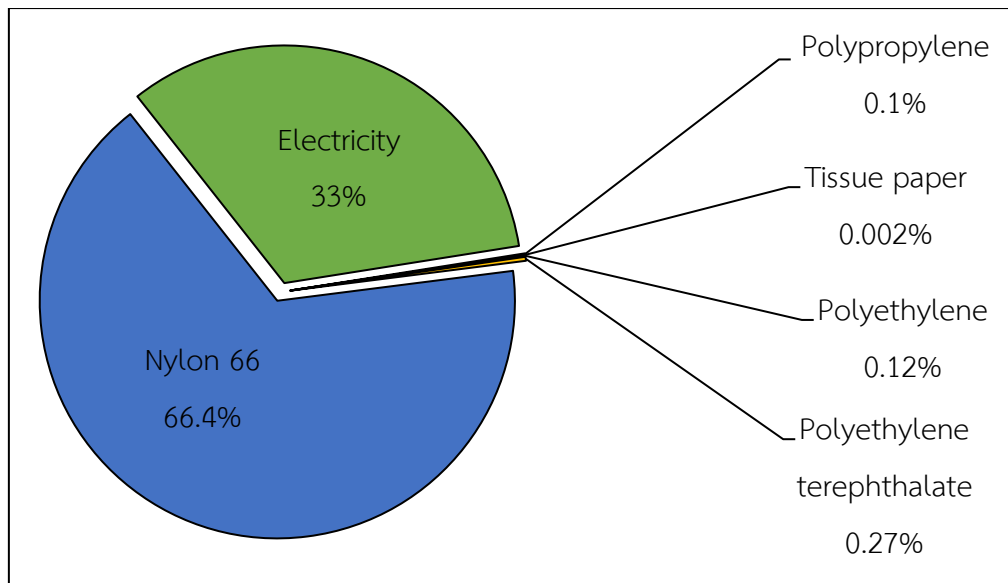
ภาพที่ 55 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดสารออกซิแดนซ์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



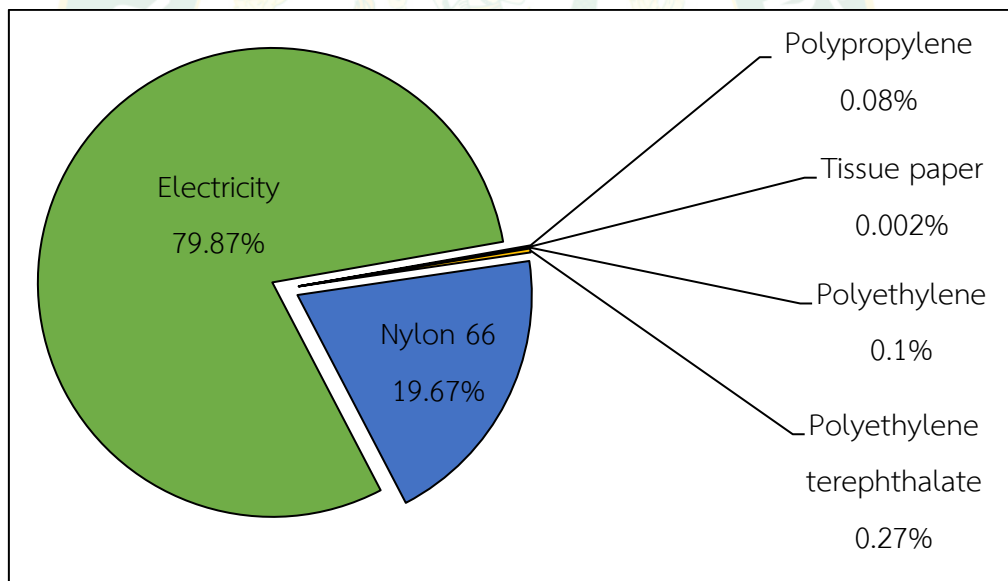
ภาพที่ 56 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการก่อตัวของฝุ่นละอองตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



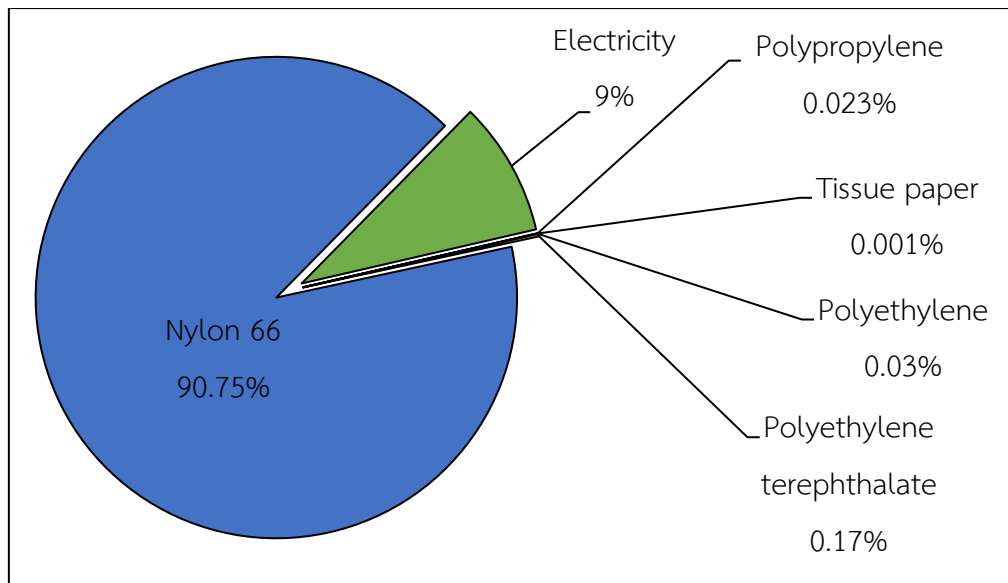
ภาพที่ 57 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเกิดสารออกซิแดนที่โฟโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



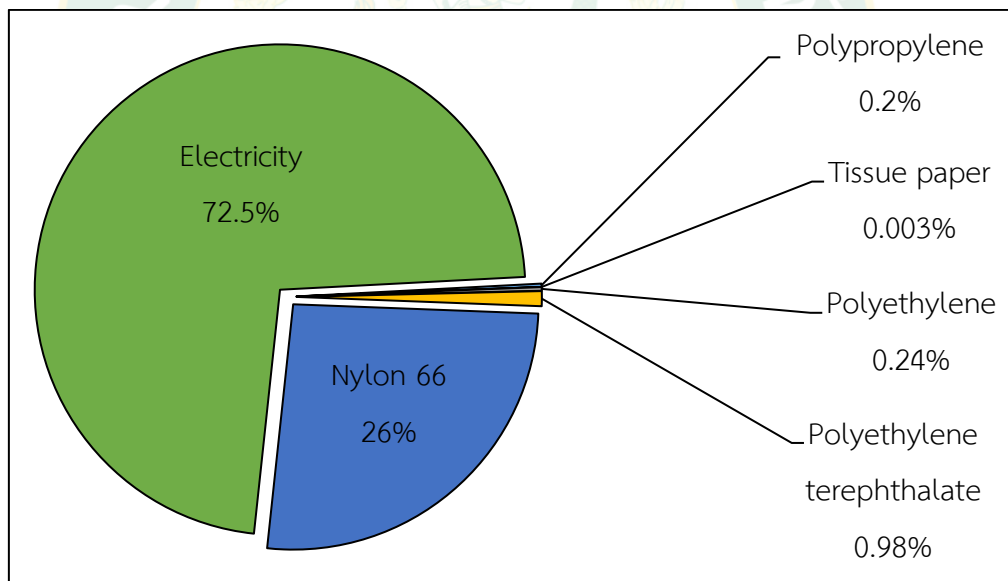
ภาพที่ 58 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะฝนกรดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



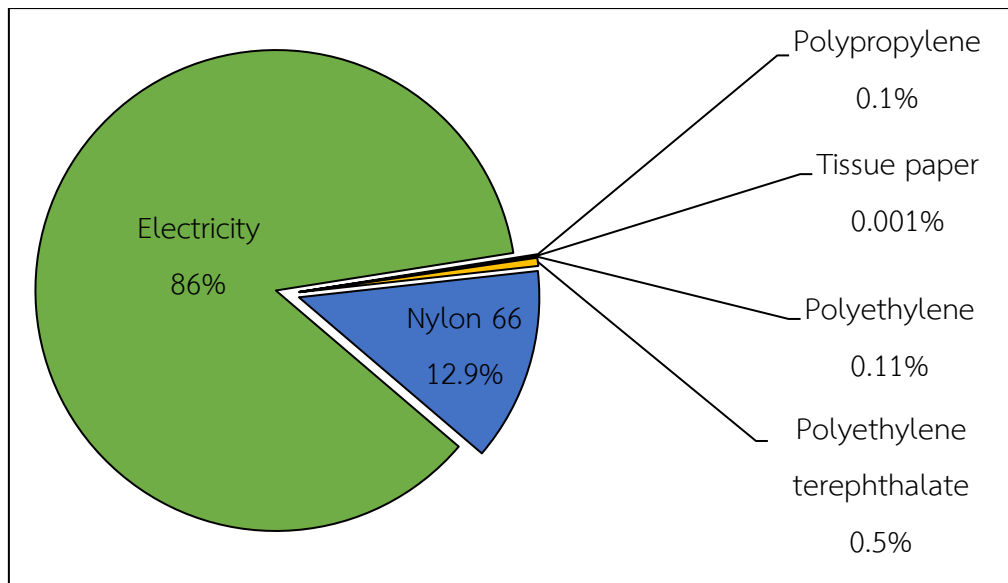
ภาพที่ 59 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



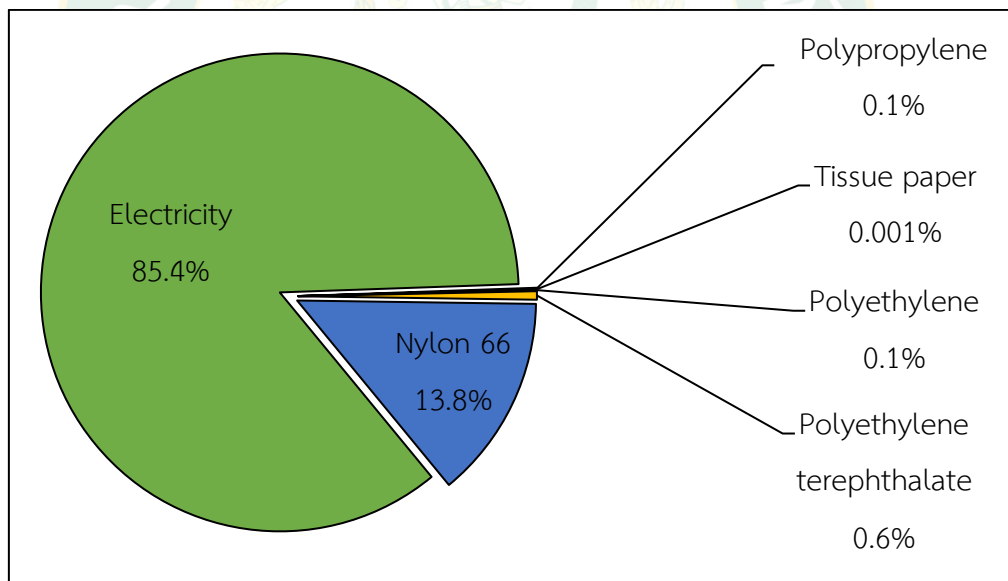
ภาพที่ 60 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเจริญเติบโตผิดปกติของฟิชในน้ำทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



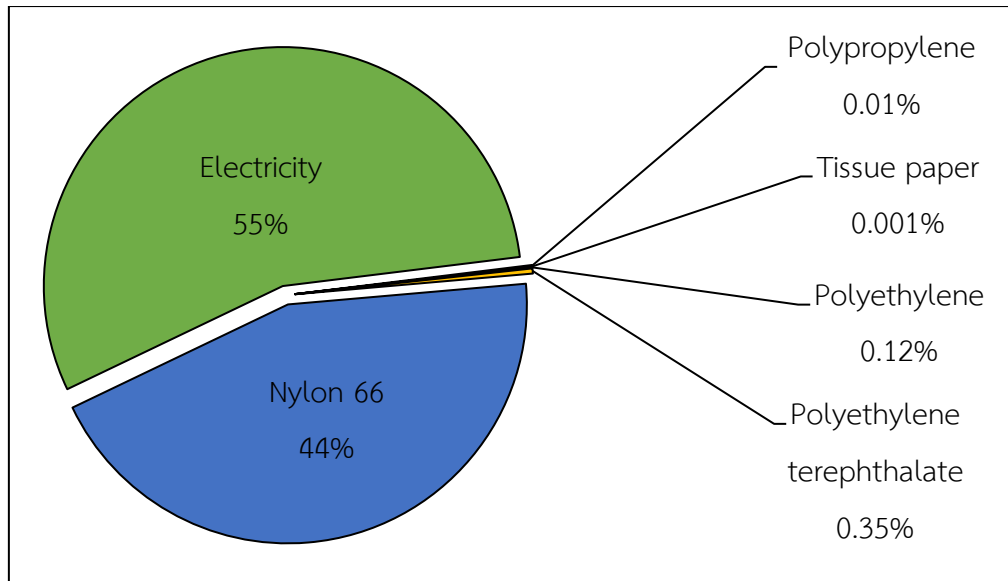
ภาพที่ 61 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบกตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



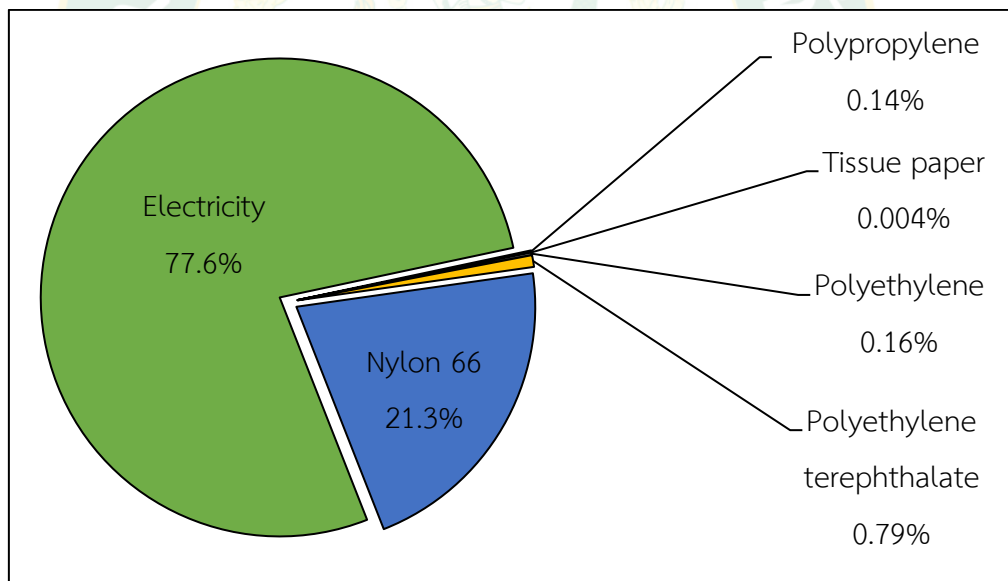
ภาพที่ 62 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน์ในน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



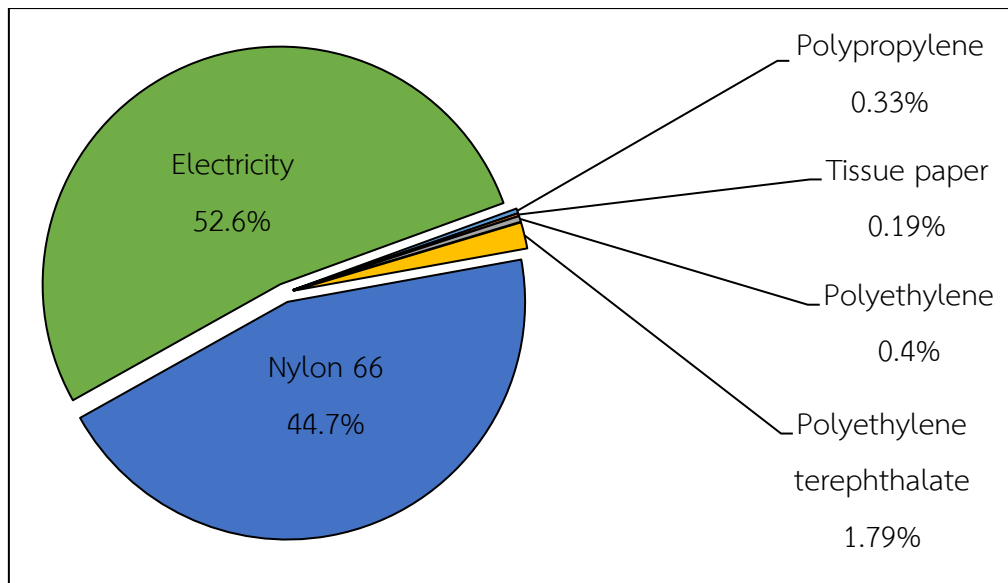
ภาพที่ 63 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



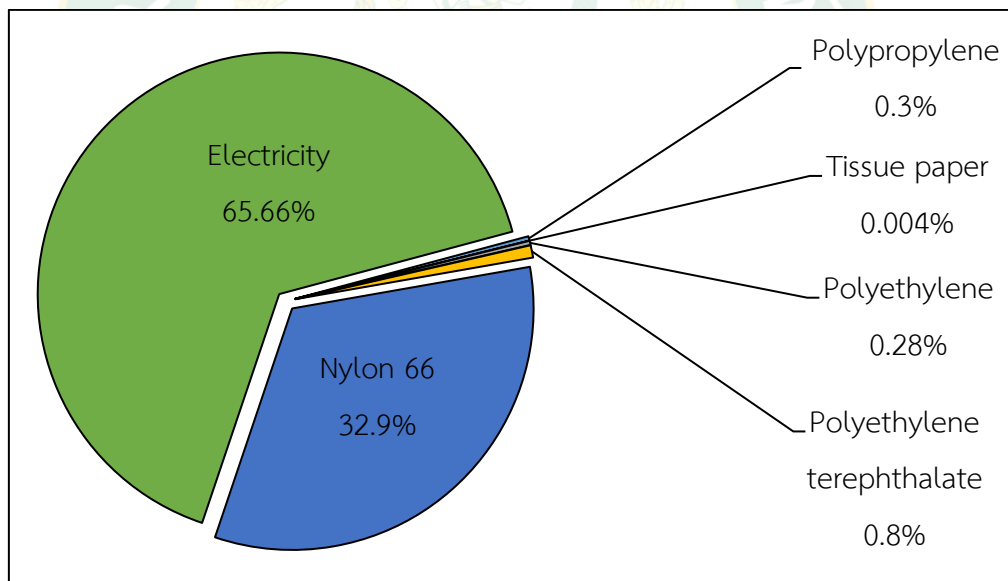
ภาพที่ 64 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



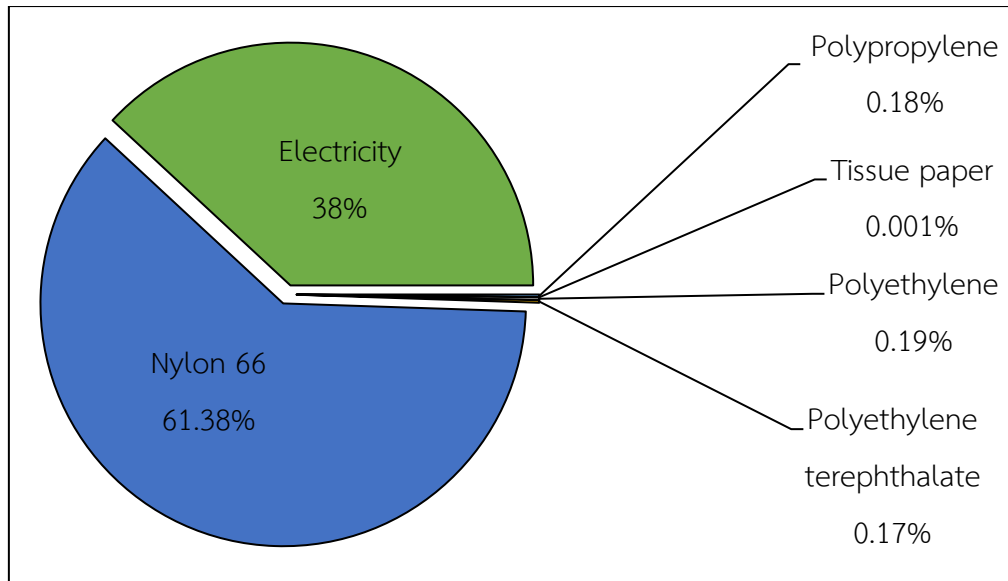
ภาพที่ 65 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่ มะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



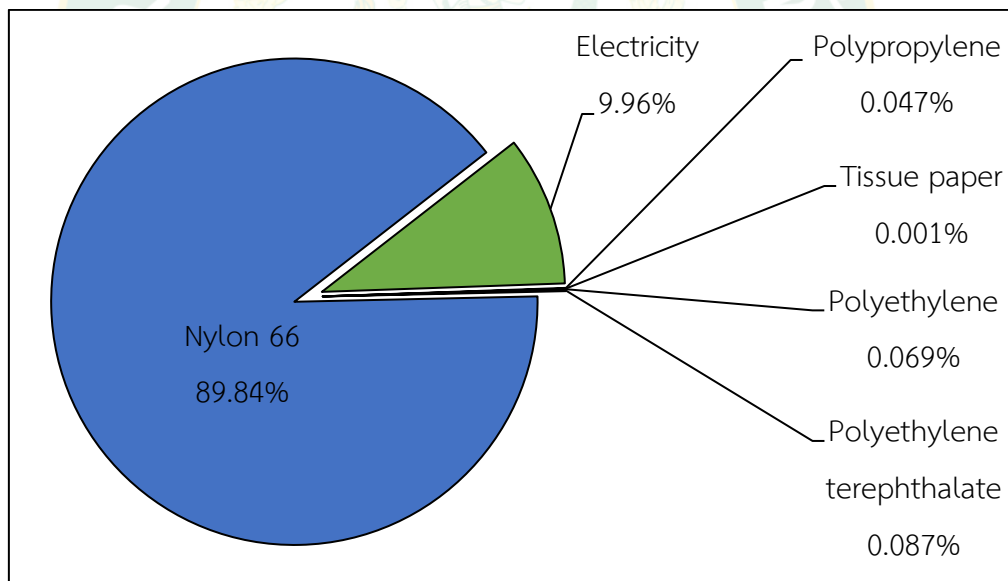
ภาพที่ 66 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อด้านการใช้ที่ดินตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



ภาพที่ 67 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อด้านการลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



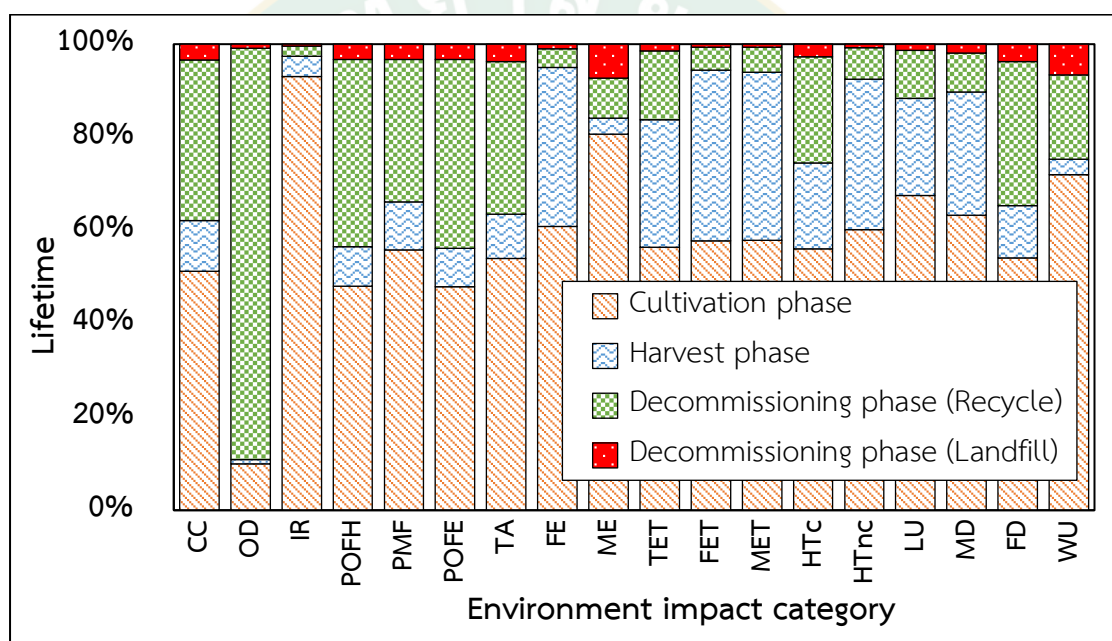
ภาพที่ 68 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการลดของทรัพยากรฟอสซิลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง



ภาพที่ 69 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง

ผลการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง

จากการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์และแปรผลกระทบที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 70 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 18 ด้าน ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากขั้นตอนการเพาะปลูกและการเก็บเกี่ยว ผลผลิตมีค่าเฉลี่ยประมาณ 58.17% รองลงมา คือ กระทบวนเก็บเกี่ยวเฉลี่ยประมาณ 16.82% และกระทบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 25.02% แต่วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงเฉลี่ยประมาณ 22.47% จึงส่งผลกระทบในกระทบวนการกำจัดซากน้อยที่สุดประมาณ 2.54%



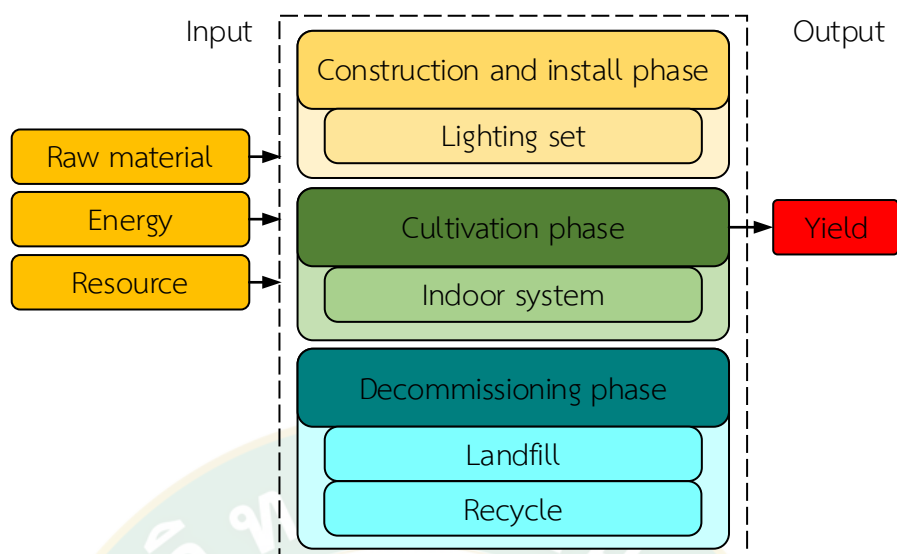
ภาพที่ 70 การแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกในร่ม

เป้าหมายของการศึกษา คือ ประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกในร่ม

ขอบเขตการศึกษา คือ แบบแกระเดล-ทู-เกรฟ โดยพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ พลังงาน ทรัพยากร กระทบวนการสร้าง กระทบวนการดำเนินงาน และกำจัดซาก แสดงดังภาพที่ 71

หน่วยการทำงาน คือ ผลผลิตช่อดอกแห้ง 1 kg



ภาพที่ 71 ขอบเขตการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกในร่ม

ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกในร่ม

ในการจัดเก็บข้อมูลรวบรวมปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกในร่มตลอดวัฏจักรชีวิต รายละเอียดดังแสดงตารางที่ 23

ตารางที่ 23 บัญชีรายการข้อมูลของการเพาะพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นตอนการสร้าง และติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยง			
สารขาเข้า			
โครงสร้าง	ท่อเหล็กชุบสังกะสี	5.5	kg
	เหล็กกล้าคาร์บอน	2.25	kg
สีกันสนิม		50	g
พลังงานไฟฟ้า		0.38	kWh
ขั้นตอนการเพาะเมล็ด			
สารขาเข้า			
กระดาษทิชชู		0.05	g
กล่องพลาสติก	โพลีโพรพิลีน	3.33	g

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
น้ำสะอาด		2.5	ml
เมล็ดพันธุ์		1	seed
สารขาออก			
กระดาษทิชชู		0.05	g
กล่องพลาสติก	โพลีโพรพิลีน	3.33	g
น้ำเสีย		2.5	ml
เมล็ดพันธุ์ออก		1	seed
ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า			
สารขาเข้า			
ดินพีทมอส		240	g
ถุงเพาะชำต้นกล้า	โพลีเอทิลีน	3.5	g
แก้วพลาสติก	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
น้ำสะอาด		160	ml
พลังงานไฟฟ้า		5.28	kWh
เมล็ดพันธุ์ออก		1	seed
สารขาออก			
ถุงเพาะชำต้นกล้า	โพลีเอทิลีน	3.5	g
แก้วพลาสติก	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
ต้นกล้า		1	plant
ขั้นตอนการดูแลรักษา			
สารขาเข้า			
ต้นกล้า		1	plant
กระถางเพาะปลูก	ไนลอน 66	0.77	kg
ดินปลูก		7	kg
ดินมูลไส้เดือน		1.5	kg
ปุ๋ยคอก (มูลวัวแห้ง)		1.5	kg
ปุ๋ยมูลไก่		810	g
ปุ๋ยมูลค่างควา		810	g

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
น้ำสะอาด		41.5	l
พลังงานไฟฟ้า		499	kWh
ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวและตากแห้ง			
สารขาเข้า			
ช่อดอกกัญชาสด		250	g
พลังงานไฟฟ้า		2.94	kWh
สารขาออก			
ช่อดอกกัญชาแห้ง		46.3	g
การรีไซเคิล			
เหล็กกล้าผสม		6.98	kg
พลาสติก	โพลีโพรพิลีน	2.99	g
	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
	ไนลอน 66	0.69	kg
การฝังกลบ			
กระดาษทิชชู		0.05	g
พลาสติกรวม		3.58	g
เศษเหล็ก		0.78	kg

จากการรวบรวมข้อมูลบัญชีรายการของวัตถุดิบ ทรัพยากร และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ต่อการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 1 plant พบว่า ระบบเพาะปลูกนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงรวมทั้งสิ้น 507.6 kWh ตลอดวัฏจักรชีวิต เนื่องจากระบบนี้มีการใช้ระบบปรับอากาศเข้ามาควบคุมสภาวะแวดล้อมและการใช้หลอดไฟสำหรับการสังเคราะห์แสงให้แก่พืชสมุนไพรมูลค่าสูงตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก และมีการใช้วัสดุประเภทเหล็ก จำนวน 7.76 kg สำหรับการสร้างชุดไฟเพาะเลี้ยง

ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกใน ร่ม

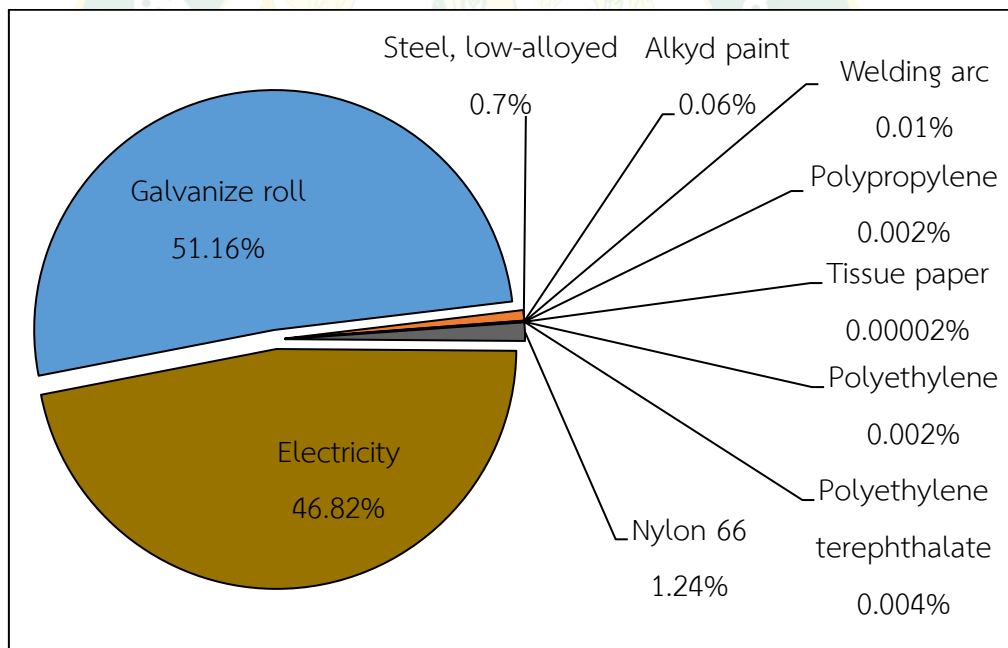
จากผลการวิเคราะห์บัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่มในตารางที่ 23 เมื่อนำมาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชั้นกลางที่เกิดขึ้นทั้ง 18 กลุ่มผลกระทบ แสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกในระบบปลูกในร่ม

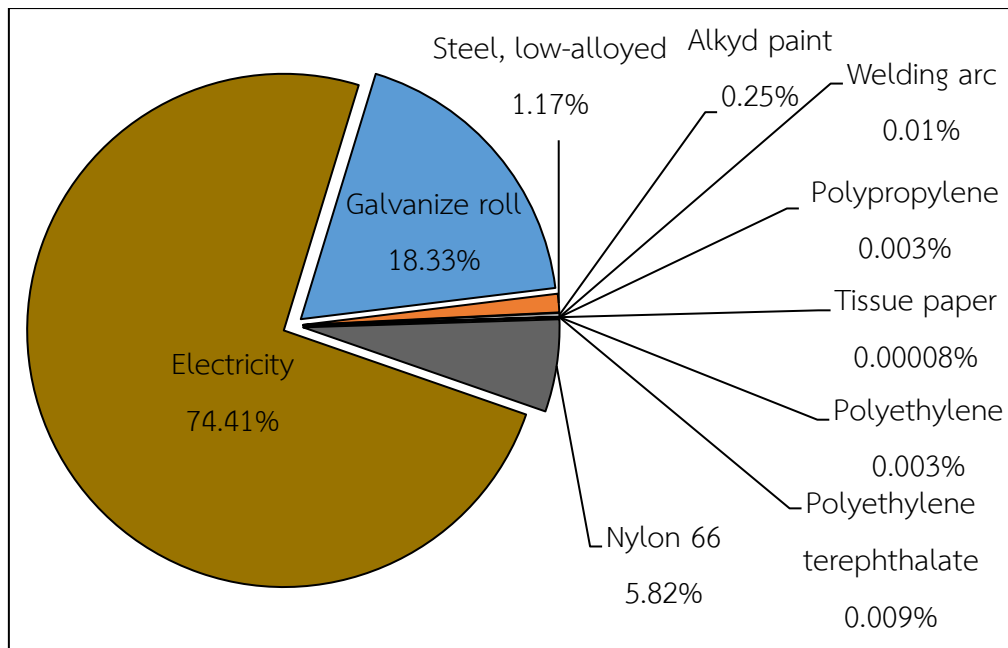
Impact category	Construction phase	Cultivation phase	Harvest phase	Decommissioning phase		Total emission	
				Recycle	Landfill	Lifetime	kg _{dry}
CC	3.13E+02	2.87E+02	2.17E+00	-1.91E+01	1.94E+00	5.85E+02	1.24E+04
OD	2.26E-05	9.07E-05	6.51E-07	-9.78E-06	6.33E-07	1.05E-04	2.23E-03
IR	2.38E+00	8.23E-01	5.51E-03	-5.77E-01	2.62E-03	2.64E+00	5.61E+01
POFH	4.18E-01	4.00E-01	2.99E-03	-4.68E-02	2.54E-03	7.77E-01	1.65E+01
PMF	2.35E-01	2.46E-01	1.84E-03	-3.73E-02	1.35E-03	4.47E-01	9.50E+00
POFE	4.24E-01	4.08E-01	3.05E-03	-4.94E-02	2.58E-03	7.88E-01	1.68E+01
TA	6.92E-01	6.47E-01	4.85E-03	-6.23E-02	3.86E-03	1.29E+00	2.74E+01
FE	3.32E-03	1.77E-01	1.36E-03	-9.21E-03	3.66E-05	1.72E-01	3.67E+00
ME	3.39E-03	1.34E-02	8.83E-05	-2.48E-03	2.09E-04	1.46E-02	3.10E-01
TET	1.77E+02	3.74E+02	2.88E+00	-1.16E+02	6.02E-01	4.39E+02	9.33E+03
FET	9.68E-01	1.84E+01	1.42E-01	-2.86E+00	2.39E-03	1.66E+01	3.54E+02
MET	1.32E+00	2.32E+01	1.79E-01	-3.67E+00	3.11E-03	2.11E+01	4.48E+02
HTc	3.31E+00	1.15E+01	8.78E-02	-1.01E+01	1.12E-02	4.82E+00	1.03E+02
HTnc	2.88E+01	2.61E+02	2.01E+00	-3.67E+01	5.84E-02	2.55E+02	5.42E+03
LU	1.77E-01	1.10E+00	8.38E-03	-2.80E-01	1.09E-02	1.01E+00	2.16E+01
MD	7.10E+00	3.14E-01	2.41E-03	-6.37E-01	5.17E-02	6.83E+00	1.45E+02
FD	6.92E+01	8.42E+01	6.35E-01	-5.13E+00	6.01E-01	1.50E+02	3.18E+03
WU	5.62E+00	1.34E+00	8.98E-03	-2.90E-01	1.05E+00	7.73E+00	1.64E+02

จากผลการพิจารณา พบว่า ในขั้นตอนการสร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้วัสดุประเภทท่อเหล็กกล้าวไนซ์ จำนวน 5.5 kg และเหล็ก จำนวน 2.25 kg โดยส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสูงประเภทการเกิดรังสีชนิดก่อก่อไอออน การลดลงของทรัพยากร

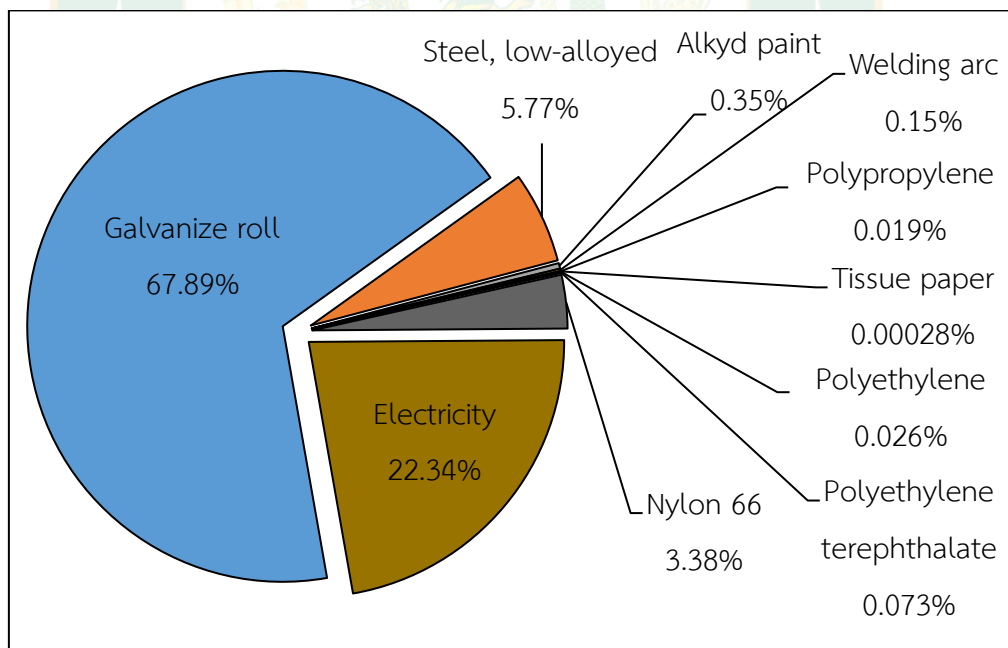
แร่ธาตุ และการใช้ทรัพยากรน้ำ ส่วนในขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้าและการตากแห้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงในประเภทการลดลงของชั้นโอโซน การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง และการใช้ที่ดิน เมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ซึ่งเป็นกระบวนการขั้นสุดท้ายของวัฏจักรชีวิต พบว่า มีวัสดุบางส่วนสามารถแปรรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยคิดเป็นร้อยละ 90 ของวัสดุที่สามารถนำไปแปรรูปใหม่ และในส่วนที่ไม่สามารถกลับมาใช้ใหม่ได้จะถูกนำไปฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลโดยคิดเป็นร้อยละ 10 ของวัสดุที่ถูกใช้งาน ทำให้มีผลกระทบในด้านต่าง ๆ ลดลง โดยผลกระทบของการใช้วัสดุตั้งแต่ด้านตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม มีผลแสดงดังภาพที่ 72 ถึง ภาพที่ 89



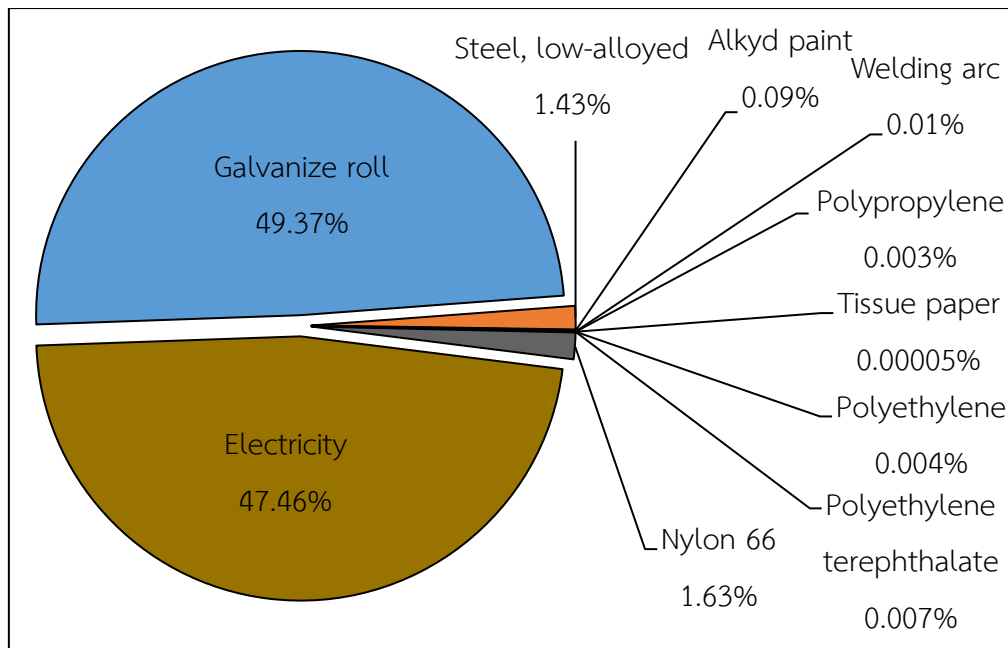
ภาพที่ 72 ผลกระทบของการใช้วัสดุตั้งแต่ด้าน การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



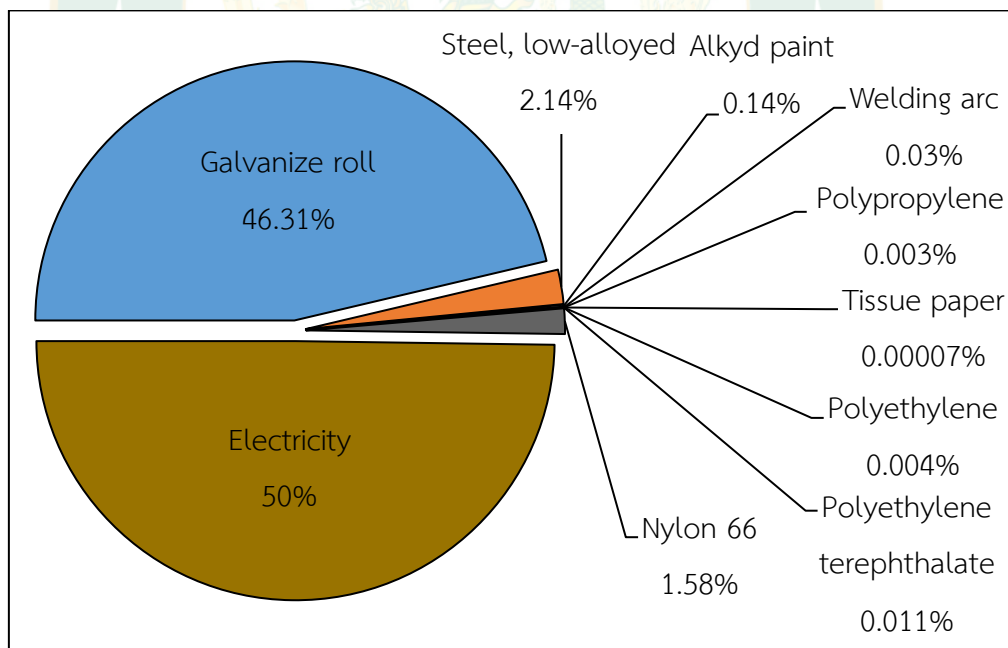
ภาพที่ 73 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการลดลงของชั้นโอโซนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



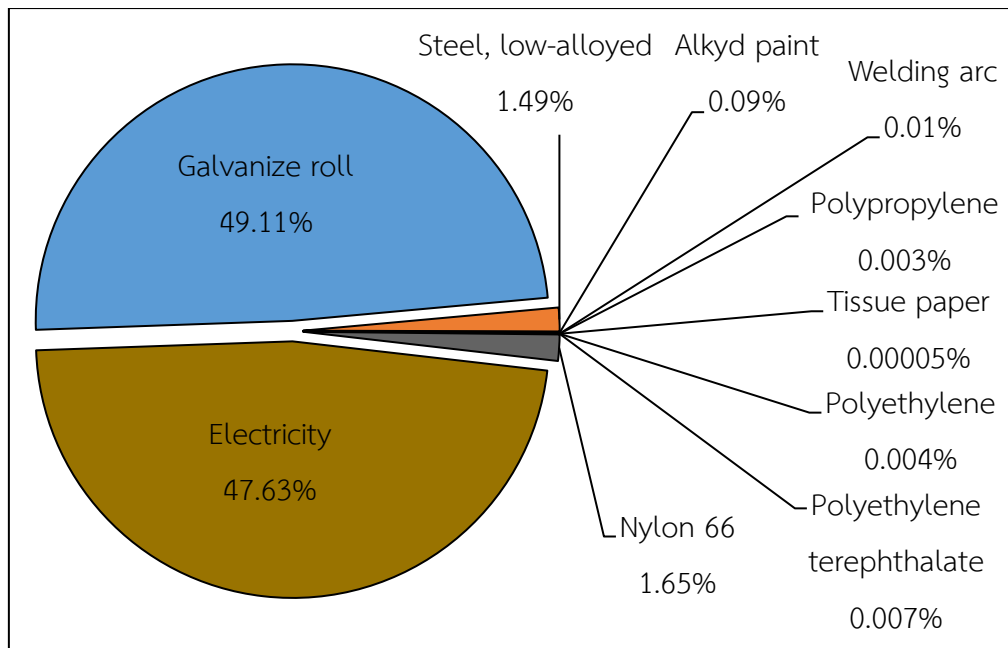
ภาพที่ 74 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเกิดรังสีชนิดก่อไอออนซ์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



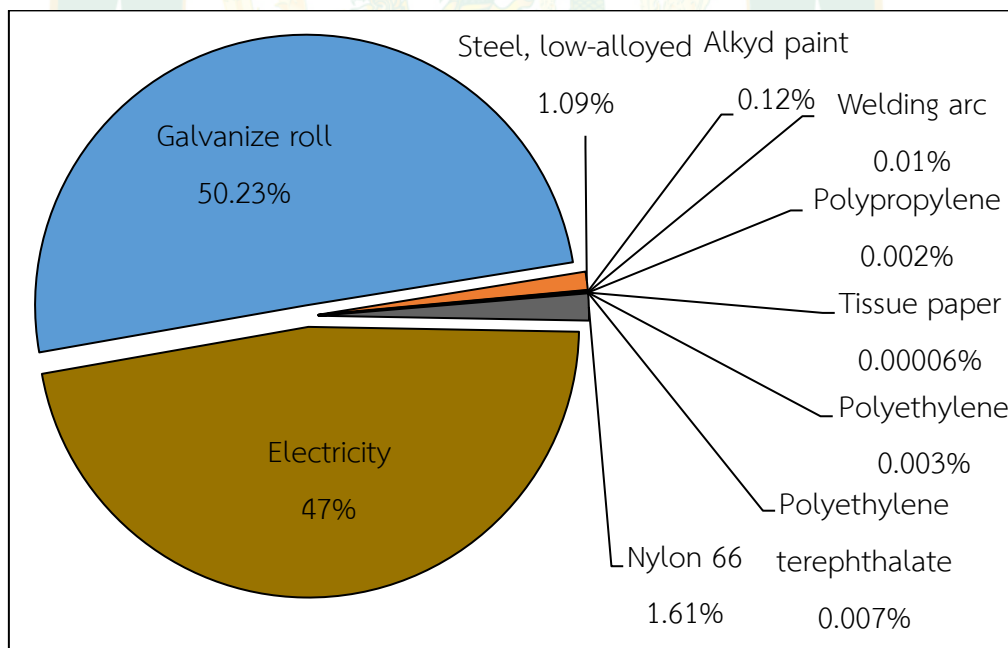
ภาพที่ 75 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเกิดสารออกซิแดนซ์โพโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



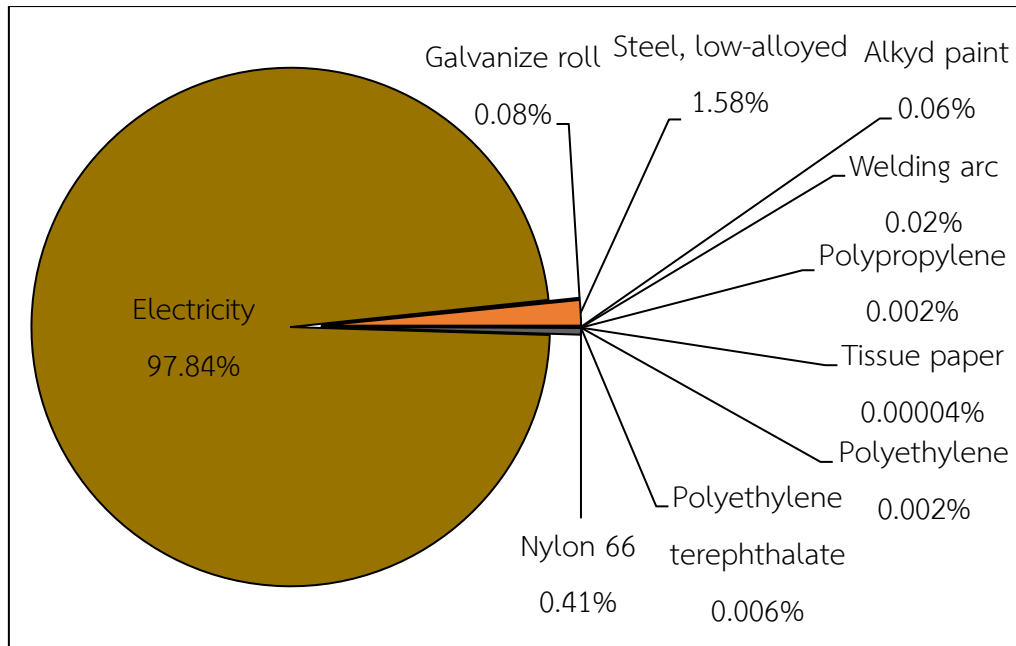
ภาพที่ 76 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการก่อตัวของฝุ่นละอองตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



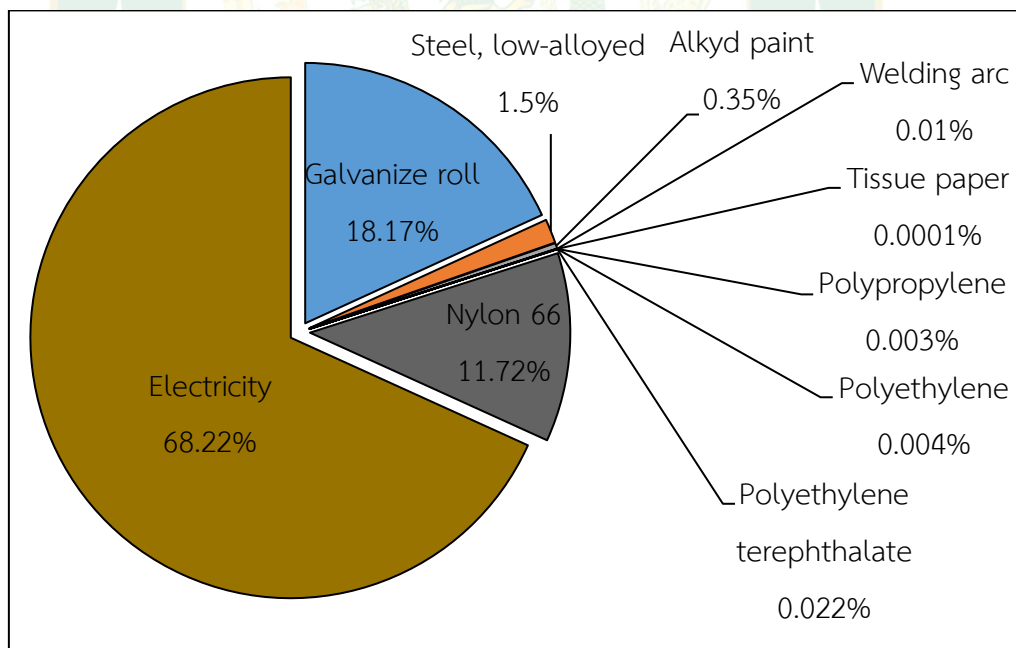
ภาพที่ 77 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการเกิดสารออกซิแดนซ์ที่โพลีโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



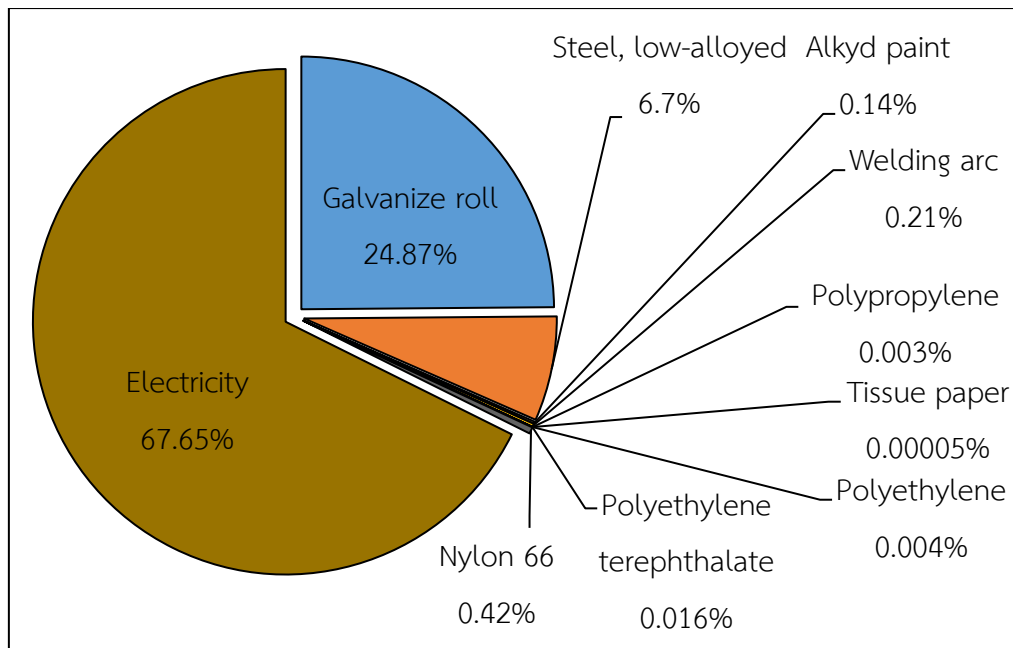
ภาพที่ 78 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการเกิดภาวะฝนกรดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



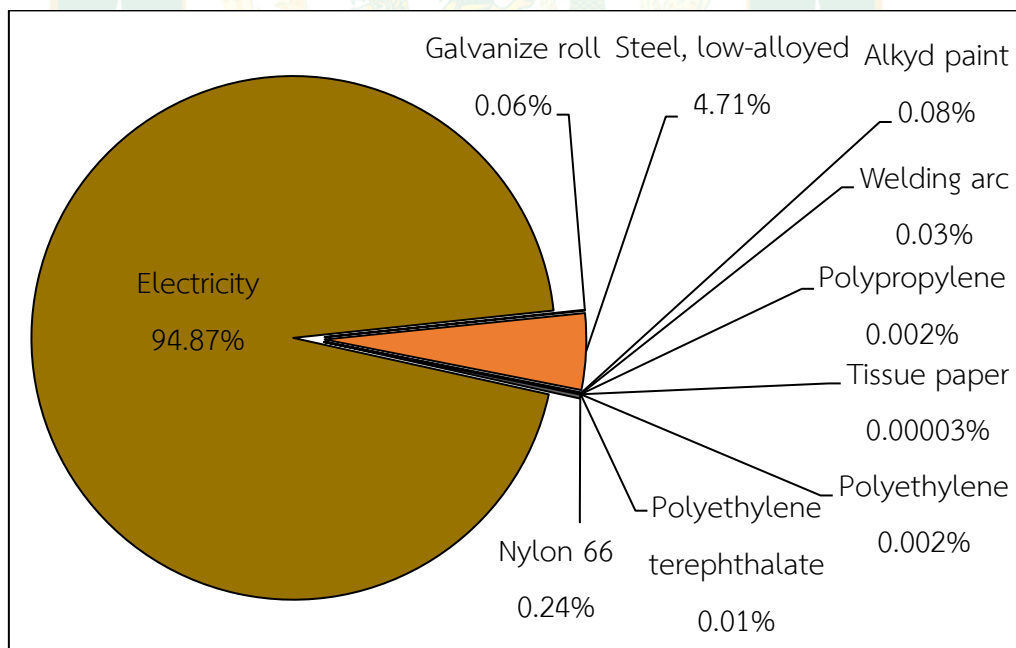
ภาพที่ 79 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



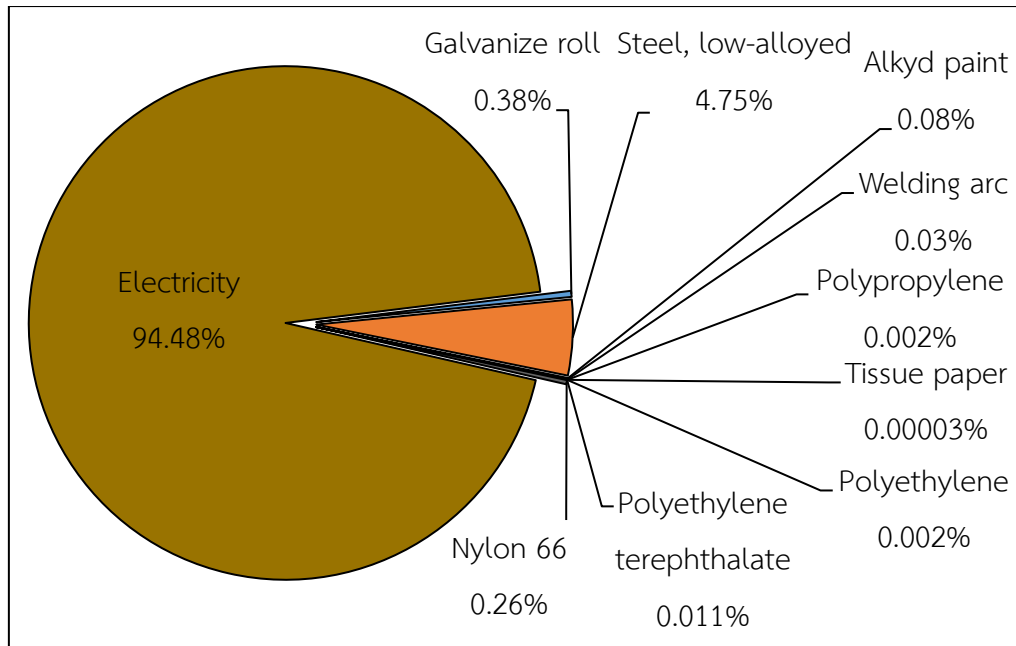
ภาพที่ 80 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



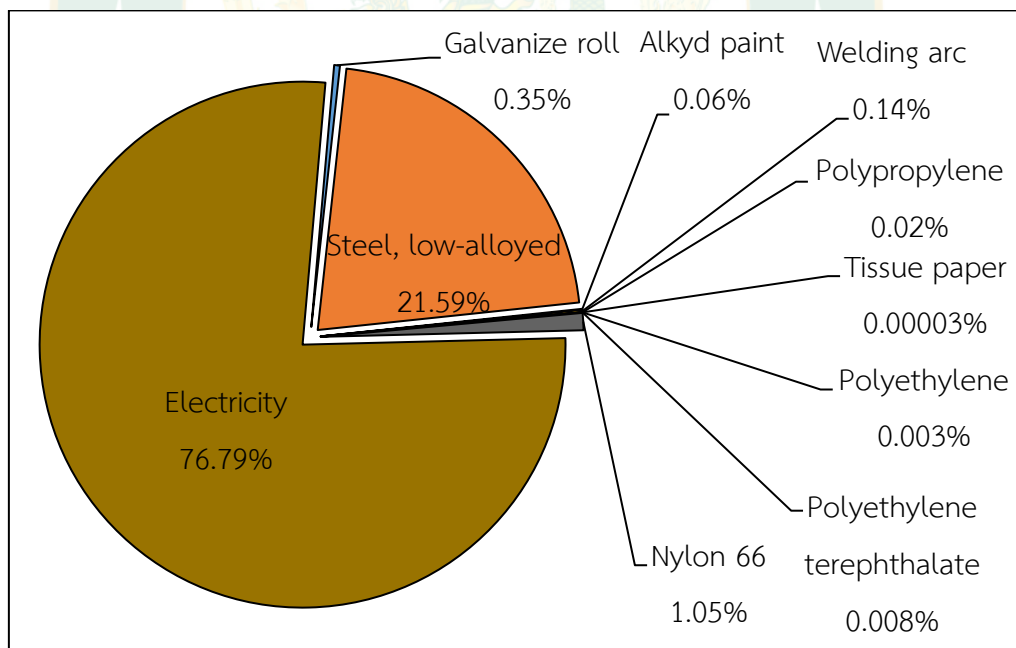
ภาพที่ 81 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกในร่ม



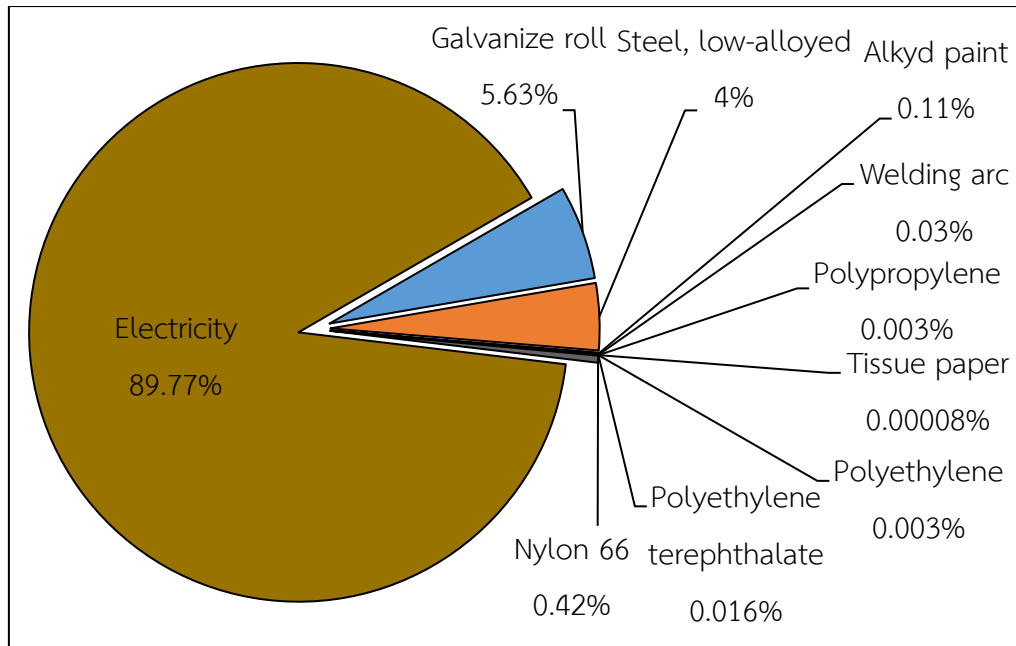
ภาพที่ 82 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อด้านการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกในร่ม



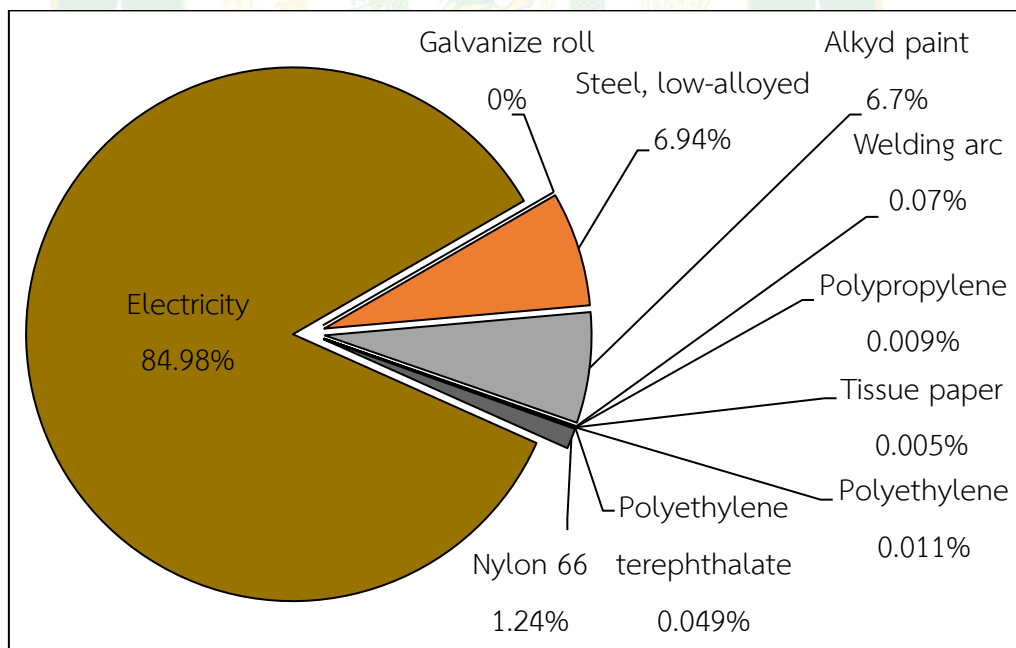
ภาพที่ 83 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



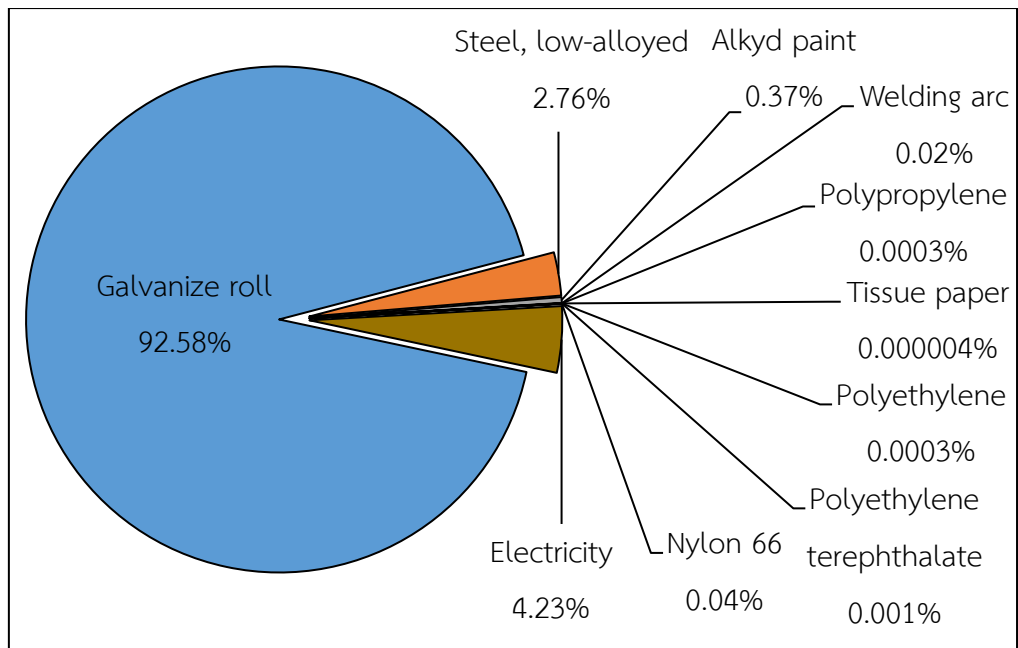
ภาพที่ 84 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



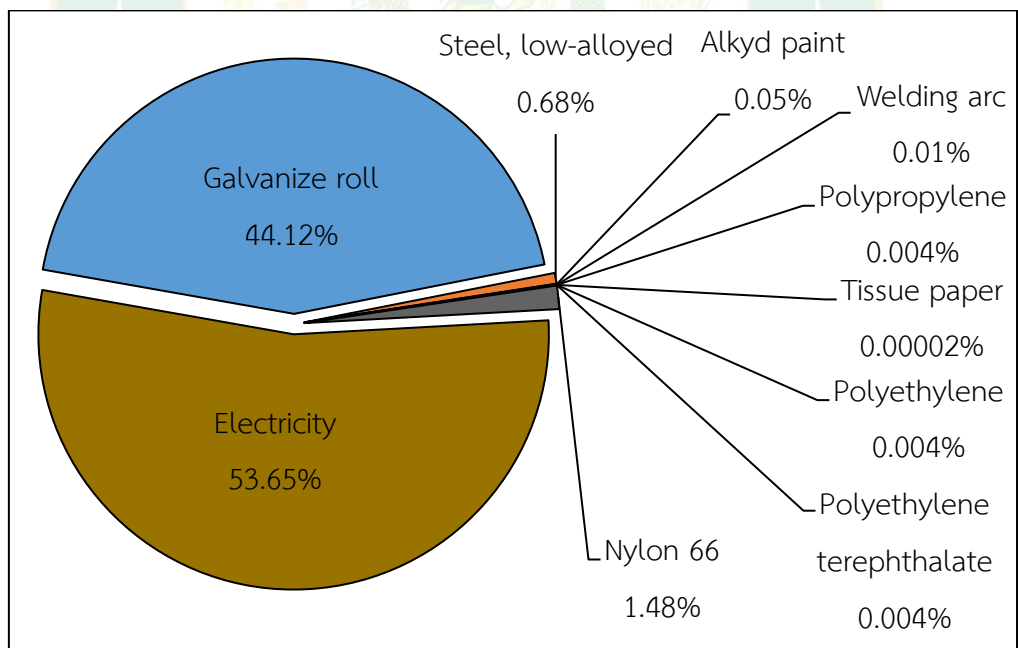
ภาพที่ 85 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อต้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่ มะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกในร่ม



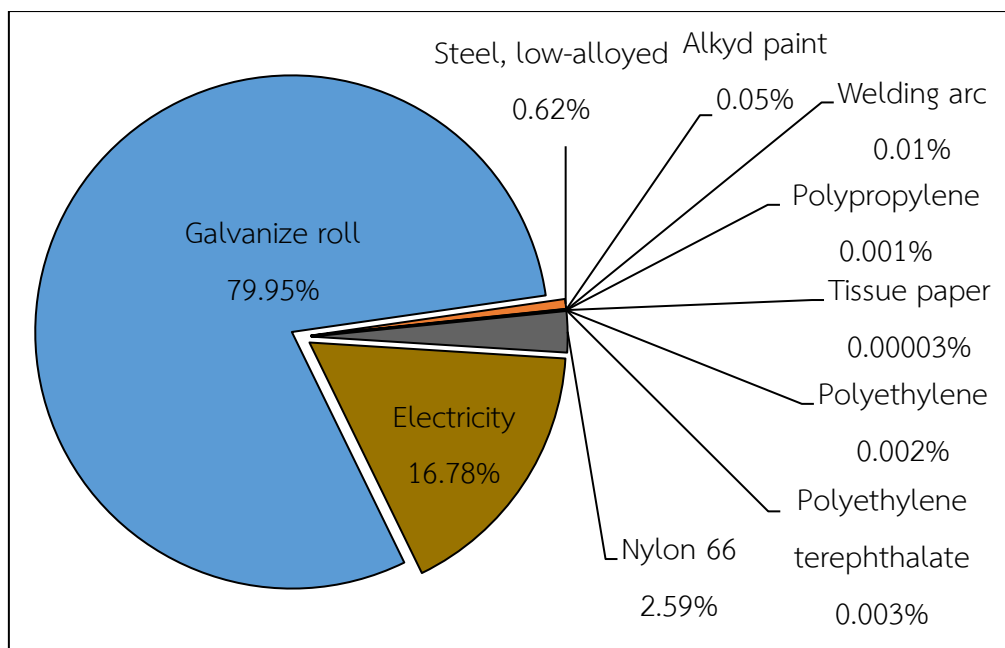
ภาพที่ 86 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อต้านการใช้ที่ดินตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกในร่ม



ภาพที่ 87 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อด้านการลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



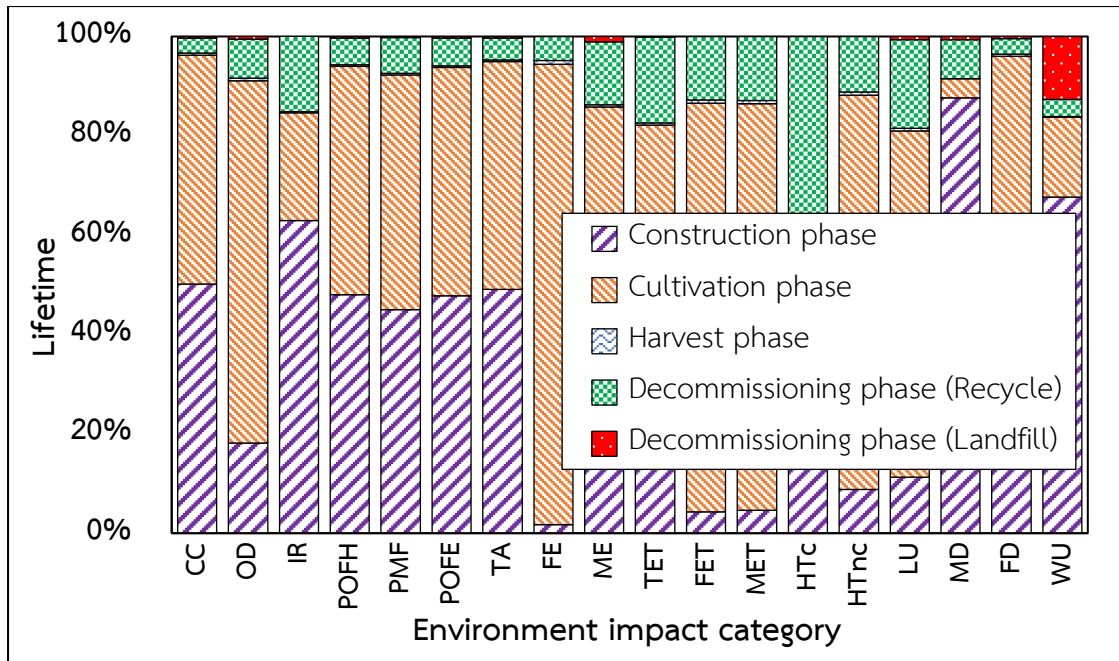
ภาพที่ 88 ผลกระทบของการใช้วัสดุดิบต่อด้านการลดลงของทรัพยากรฟอสซิลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม



ภาพที่ 89 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม

ผลการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม

จากการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม เมื่อนำมาวิเคราะห์และแปรผลกระทบที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 90 พบว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 18 ด้าน ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากขั้นตอนการดูแลรักษา อันเนื่องมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 54.14% ลำดับต่อมา คือขั้นตอนการสร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงที่ใช้วัสดุประเภทเหล็กมีค่าเฉลี่ยประมาณ 33.75% และกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 11.71% แต่วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงเฉลี่ยประมาณ 10.73% จึงส่งผลกระทบในกระบวนการกำจัดซากน้อยที่สุดประมาณ 1%



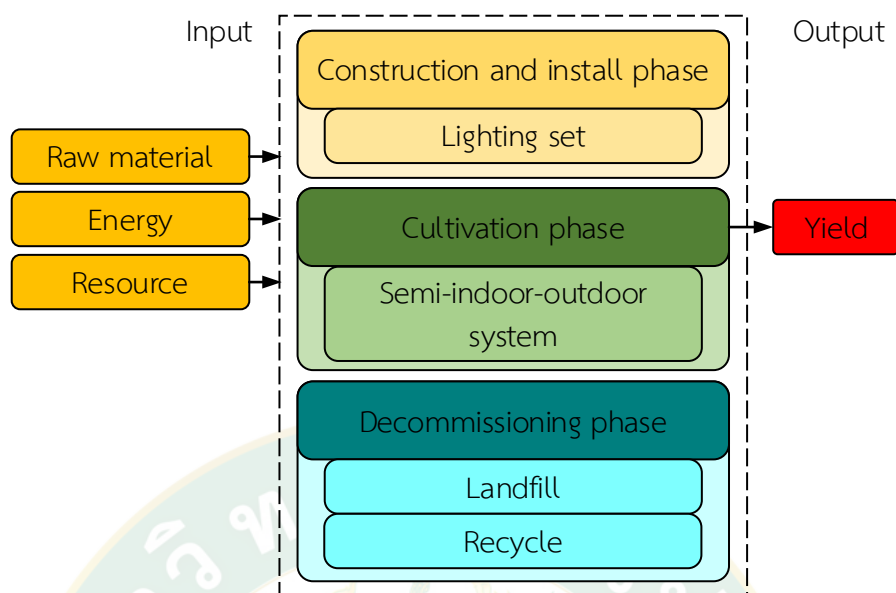
ภาพที่ 90 การแปลผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม

ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ของระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

เป้าหมายของการศึกษา คือ ประเมินวัฏจักรชีวิตของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

ขอบเขตการศึกษา คือ แบบแกระเดล-ทู-เกรฟ โดยพิจารณาตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ พลังงาน ทรัพยากร กระบวนการสร้าง กระบวนการดำเนินงาน และกำจัดซาก แสดงดังภาพที่ 91

หน่วยการทำงาน คือ ผลผลิตช่อดอกแห้ง 1 kg



ภาพที่ 91 ขอบเขตการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

ผลการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

ในการจัดเก็บข้อมูลรวบรวมปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่มตลอดวัฏจักรชีวิต รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 บัญชีรายการข้อมูลของการเพาะพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
ขั้นตอนการสร้าง และติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยง			
สารขาเข้า			
โครงสร้าง	ท่อเหล็กชุบสังกะสี	5.5	kg
	เหล็กกล้าคาร์บอน	2.25	kg
สีกันสนิม		50	g
พลังงานไฟฟ้า		0.38	kWh
ขั้นตอนการเพาะเมล็ด			
สารขาเข้า			
กระดาษทิชชู		0.05	g

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
กล่องพลาสติก	โพลีโพรพิลีน	3.33	g
น้ำสะอาด		2.5	ml
เมล็ดพันธุ์		1	seed
สารขาออก			
กระดาษทิชชู		0.05	g
กล่องพลาสติก	โพลีโพรพิลีน	3.33	g
น้ำเสีย		2.5	ml
เมล็ดพันธุ์งอก		1	seed
ขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า			
สารขาเข้า			
ดินพีทมอส		240	g
ถุงเพาะชำต้นกล้า	โพลีเอทิลีน	3.5	g
แก้วพลาสติก	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
น้ำสะอาด		160	ml
พลังงานไฟฟ้า		5.28	kWh
เมล็ดพันธุ์งอก		1	seed
สารขาออก			
ถุงเพาะชำต้นกล้า	โพลีเอทิลีน	3.5	g
แก้วพลาสติก	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
ต้นกล้า		1	plant
ขั้นตอนการดูแลรักษา			
สารขาเข้า			
ต้นกล้า		1	plant
กระดาษเพาะปลูก	ไนลอน 66	0.77	kg
ดินปลูก		7	kg
ดินมูลไส้เดือน		1.5	kg
ปุ๋ยคอก (มูลวัวแห้ง)		1.5	kg
ปุ๋ยมูลไก่		990	g

รายการ	ชนิดวัตถุดิบ	ปริมาณ	หน่วย
ปุ๋ยมูลค่างคาว		990	g
น้ำสะอาด		55.5	l
พลังงานไฟฟ้า		98.25	kWh
ขั้นตอนการเก็บเกี่ยวและตากแห้ง			
สารขาเข้า			
ช่อดอกกล้วยชาสด		261	g
พลังงานไฟฟ้า		2.94	kWh
สารขาออก			
ช่อดอกกล้วยชาแห้ง		55.8	g
การรีไซเคิล			
เหล็กกล้าผสม		6.98	kg
พลาสติก	โพลีโพรพิลีน	2.99	g
	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต	12.25	g
	ไนลอน 66	0.69	kg
การฝังกลบ			
กระดาษทิชชู		0.05	g
พลาสติกกรรม		3.58	g
เศษเหล็ก		0.78	kg

จากการรวบรวมข้อมูลบัญชีรายการของวัตถุดิบ ทรัพยากร และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ต่อการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูง 1 plant พบว่า ระบบเพาะปลูกนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูงรวมทั้งสิ้น 106.47 kWh ตลอดวัฏจักรชีวิต เนื่องจากระบบนี้มีเพียงการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหลอดไฟ สำหรับการสังเคราะห์แสงให้แก่พืชสมุนไพรมูลค่าสูงตลอดระยะเวลาการเพาะปลูก และมีการใช้วัสดุประเภทเหล็ก จำนวน 7.76 kg สำหรับการสร้างชุดไฟเพาะเลี้ยง

ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบปลูกกิ่ง ในร่มนอกร่ม

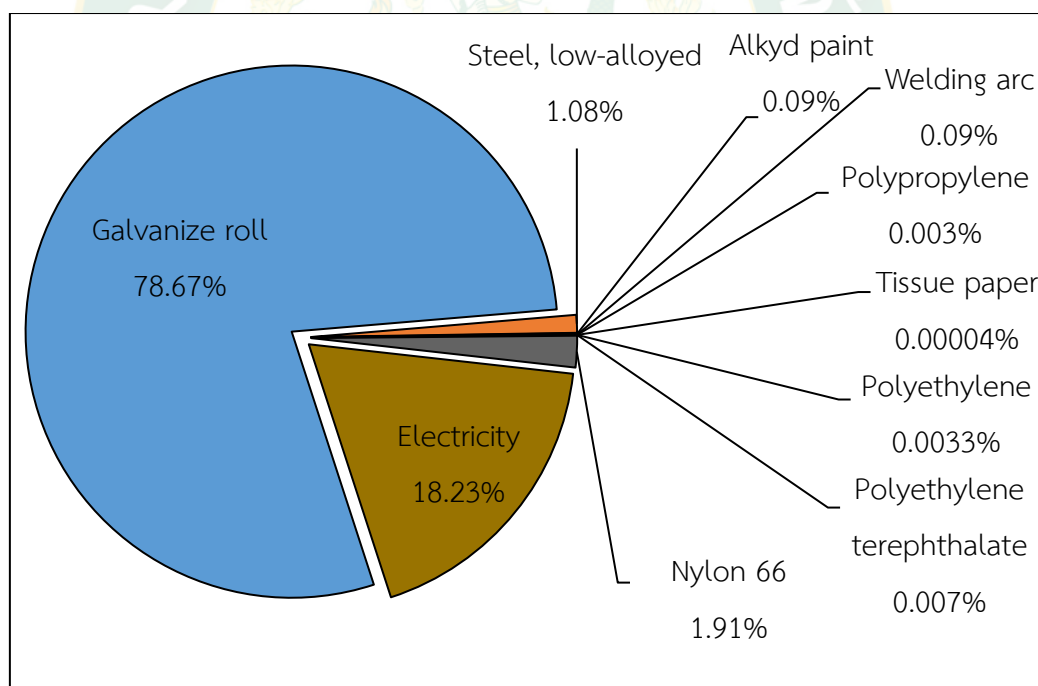
จากผลการวิเคราะห์บัญชีรายการตลอดวัฏจักรชีวิตของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่มในตารางที่ 25 เมื่อนำมาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมชั้นกลางที่เกิดขึ้นทั้ง 18 กลุ่มผลกระทบ แสดงดังตารางที่ 26

ตารางที่ 26 ผลการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม

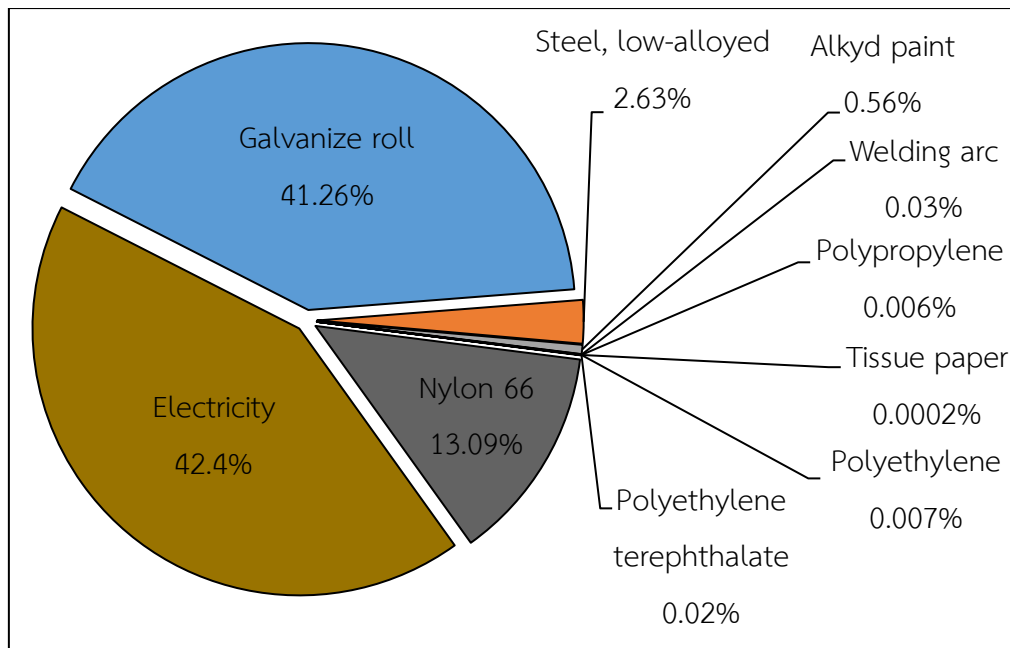
Impact category	Construction phase	Cultivation phase	Harvest phase	Decommissioning phase		Total emission	
				Recycle	Landfill	Lifetime	kg _{dry}
CC	3.13E+02	7.65E+01	2.17E+00	-1.91E+01	1.94E+00	3.75E+02	6.69E+03
OD	2.26E-05	2.74E-05	6.51E-07	-9.78E-06	6.33E-07	4.15E-05	7.41E-04
IR	2.38E+00	2.88E-01	5.51E-03	-5.77E-01	2.62E-03	2.10E+00	3.75E+01
POFH	4.18E-01	1.09E-01	2.99E-03	-4.68E-02	2.54E-03	4.86E-01	8.68E+00
PMF	2.35E-01	6.65E-02	1.84E-03	-3.73E-02	1.35E-03	2.67E-01	4.77E+00
POFE	4.24E-01	1.11E-01	3.05E-03	-4.94E-02	2.58E-03	4.91E-01	8.77E+00
TA	6.92E-01	1.76E-01	4.85E-03	-6.23E-02	3.86E-03	8.15E-01	1.45E+01
FE	3.32E-03	4.42E-02	1.36E-03	-9.21E-03	3.66E-05	3.97E-02	7.09E-01
ME	3.39E-03	4.79E-03	8.83E-05	-2.48E-03	2.09E-04	5.99E-03	1.07E-01
TET	1.77E+02	9.42E+01	2.88E+00	-1.16E+02	6.02E-01	1.59E+02	2.83E+03
FET	9.68E-01	4.57E+00	1.42E-01	-2.86E+00	2.39E-03	2.82E+00	5.04E+01
MET	1.32E+00	5.78E+00	1.79E-01	-3.67E+00	3.11E-03	3.61E+00	6.45E+01
HTc	3.31E+00	2.95E+00	8.78E-02	-1.01E+01	1.12E-02	-3.71E+00	-6.63E+01
HTnc	2.88E+01	6.53E+01	2.01E+00	-3.67E+01	5.84E-02	5.94E+01	1.06E+03
LU	1.77E-01	2.84E-01	8.38E-03	-2.80E-01	1.09E-02	2.00E-01	3.57E+00
MD	7.10E+00	7.95E-02	2.41E-03	-6.37E-01	5.17E-02	6.60E+00	1.18E+02
FD	6.92E+01	2.25E+01	6.35E-01	-5.13E+00	6.01E-01	8.78E+01	1.57E+03
WU	5.62E+00	4.66E-01	8.98E-03	-2.90E-01	1.05E+00	6.85E+00	1.22E+02

จากผลการพิจารณา พบว่า ในขั้นตอนการสร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการใช้วัสดุประเภทท่อเหล็กกล้าไนซ์ จำนวน 5.5 kg และเหล็ก จำนวน 2.25 kg โดยส่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสูงประเภทของการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ การเกิดรังสีชนิดก่อกวนไอออนส์ การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ การก่อดัวของฝุ่นละออง การเกิด

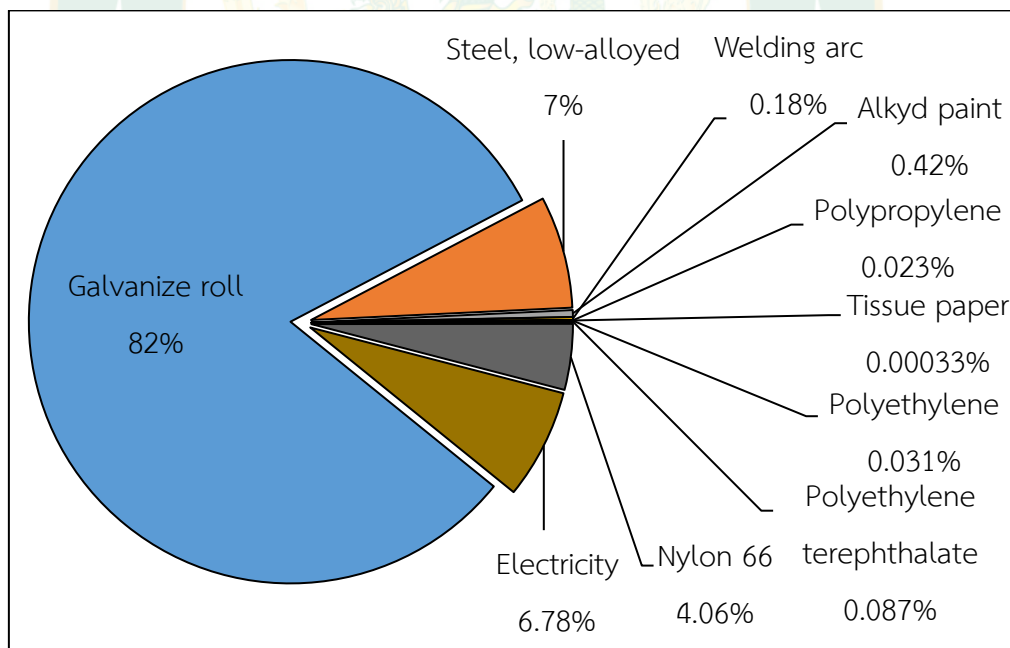
สารออกซิแดนท์โพโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศ การเกิดภาวะฝนกรด การลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุ การลดลงของทรัพยากรฟอสซิล และการใช้ทรัพยากรน้ำ ส่วนในขั้นตอนการเพาะเลี้ยงต้นกล้า และการตากแห้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงในประเภทของการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่ มะเร็ง และการใช้ที่ดิน เมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ซึ่งเป็นกระบวนการขั้นสุดท้ายของวัฏจักรชีวิต พบว่า มีวัสดุบางส่วนสามารถแปรรูปและนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยคิดเป็นร้อยละ 90 ของวัสดุที่สามารถนำไปแปรรูปใหม่ และในส่วนที่ไม่สามารถกลับมาใช้ใหม่ได้จะถูกนำไปฝังกลบตามหลักสุขาภิบาลโดยคิดเป็นร้อยละ 10 ของวัสดุที่ถูกใช้งาน ทำให้มีผลกระทบในด้านต่าง ๆ ลดลง โดยเฉพาะประเภทผลกระทบของภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็งที่มีค่าเป็นลบ โดยผลกระทบของการใช้วัสดุติดแต่ละด้านตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม มีผลแสดงดังภาพที่ 92 ถึง ภาพที่ 109



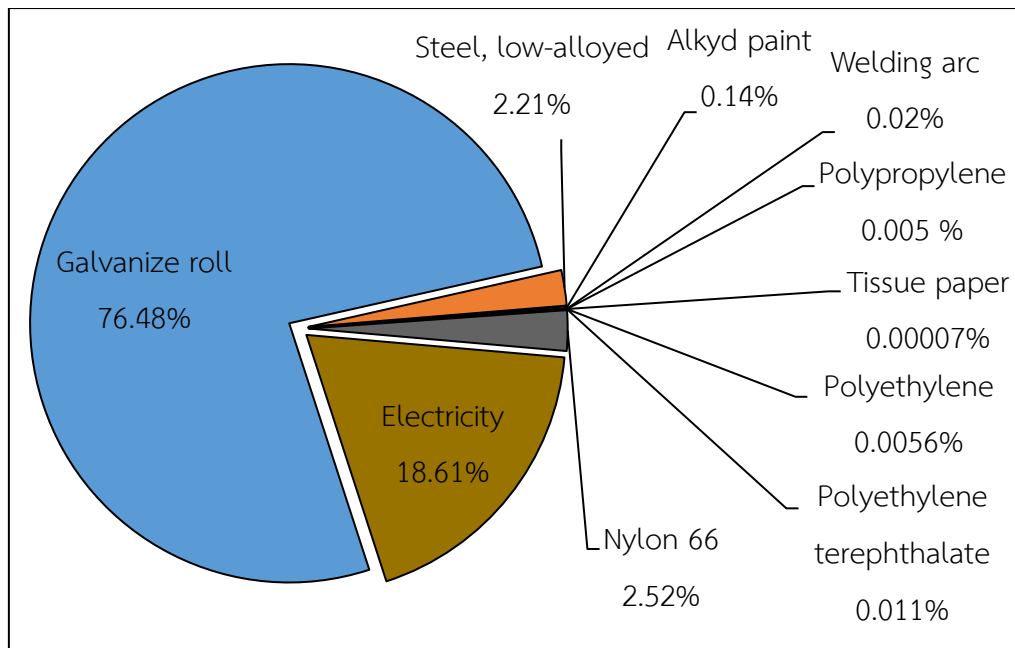
ภาพที่ 92 ผลกระทบของการใช้วัสดุติดต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



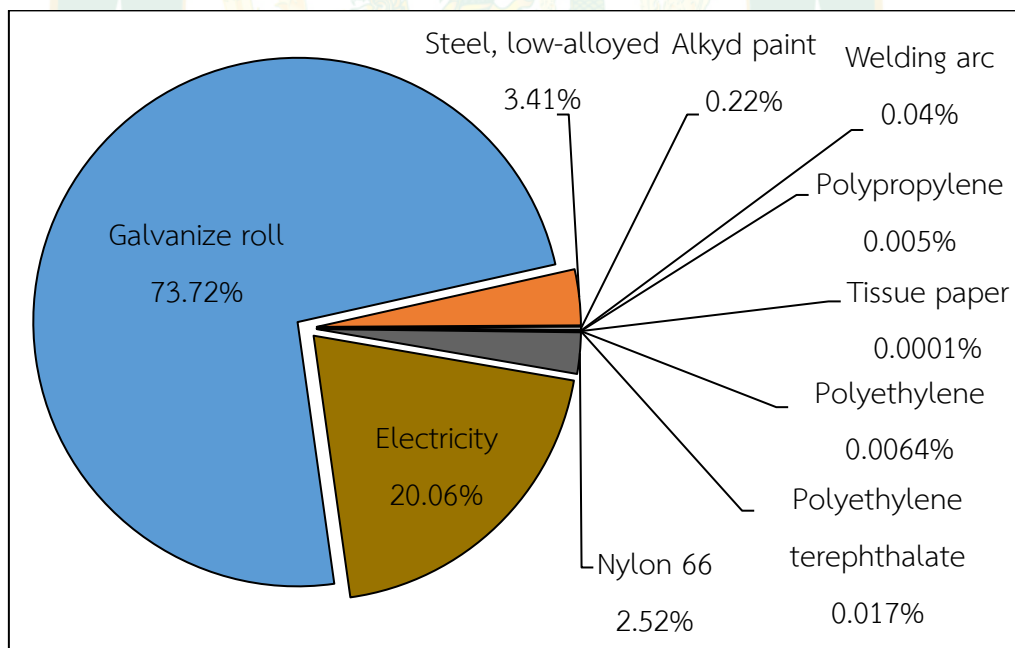
ภาพที่ 93 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการลดลงของชั้นโอโซนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



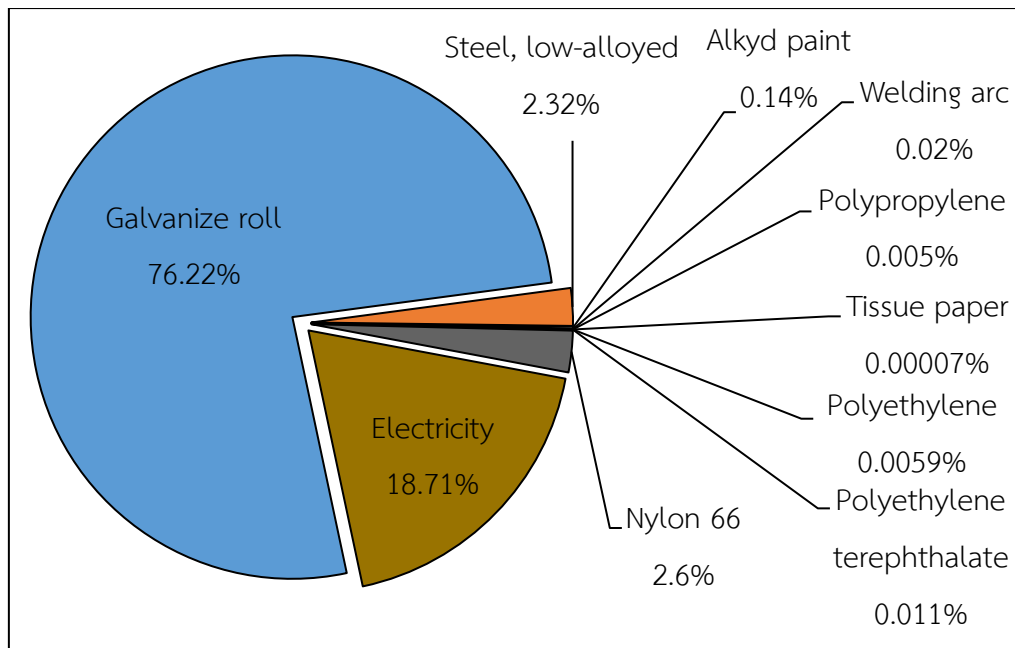
ภาพที่ 94 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเกิดรังสีชนิดก่อไอออนตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



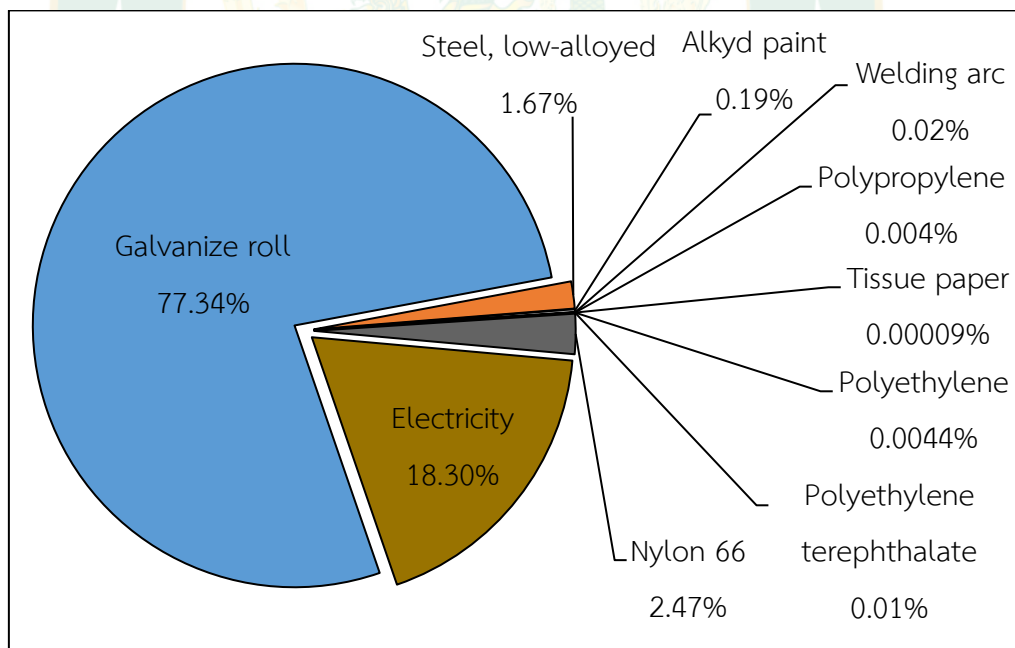
ภาพที่ 95 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเกิดสารออกซิแดนซ์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



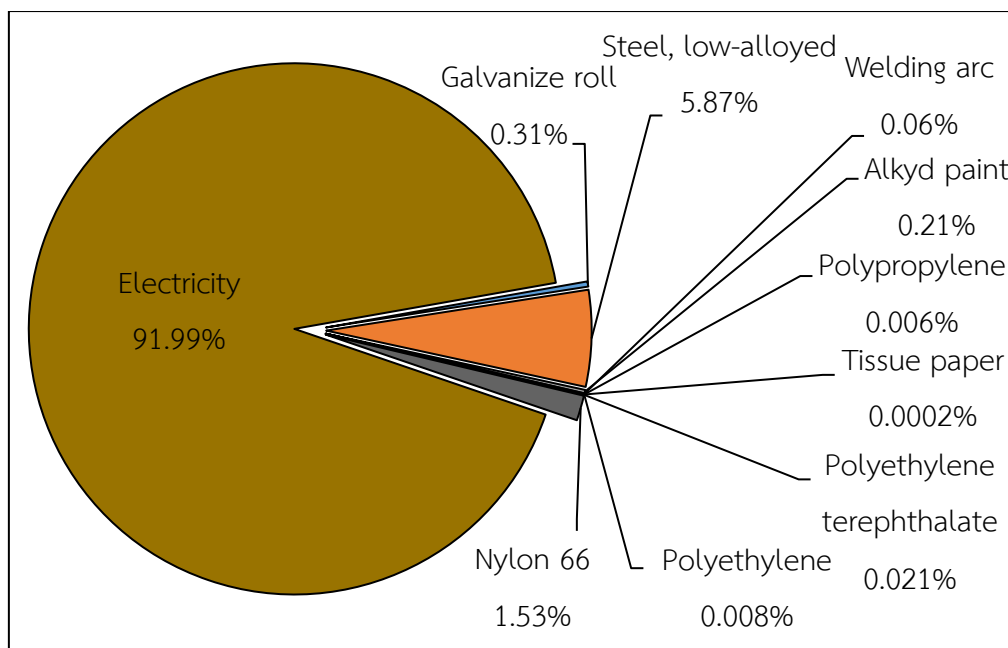
ภาพที่ 96 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการก่อตัวของฝุ่นละอองตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



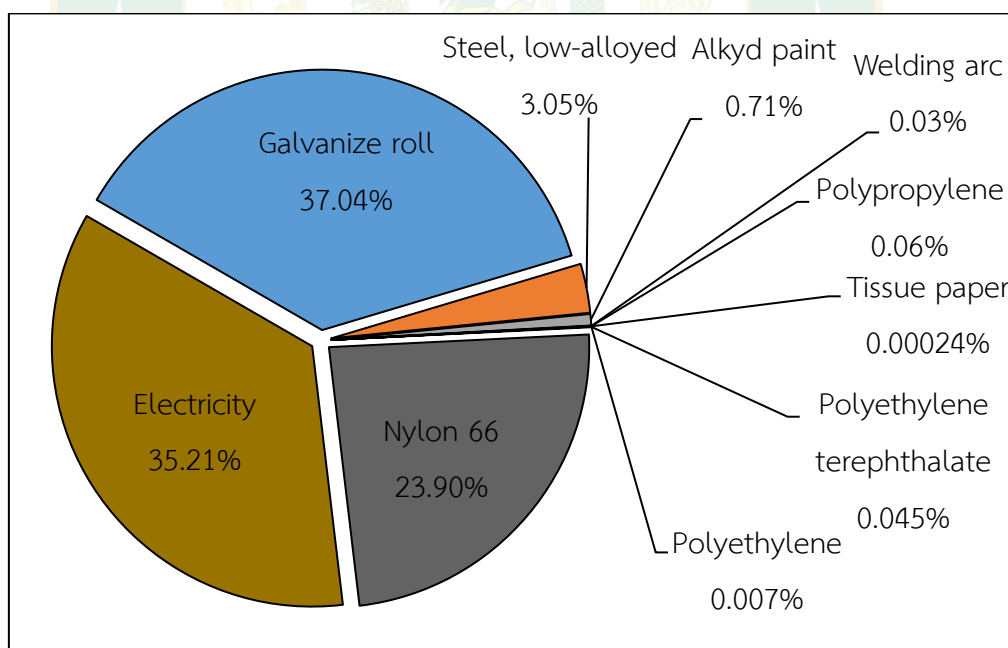
ภาพที่ 97 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการเกิดสารออกซิเดนต์ที่โพลีเอทิลีนต่อคุณภาพของระบบนิเวศตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกกิ่งในร่มนอกร่ม



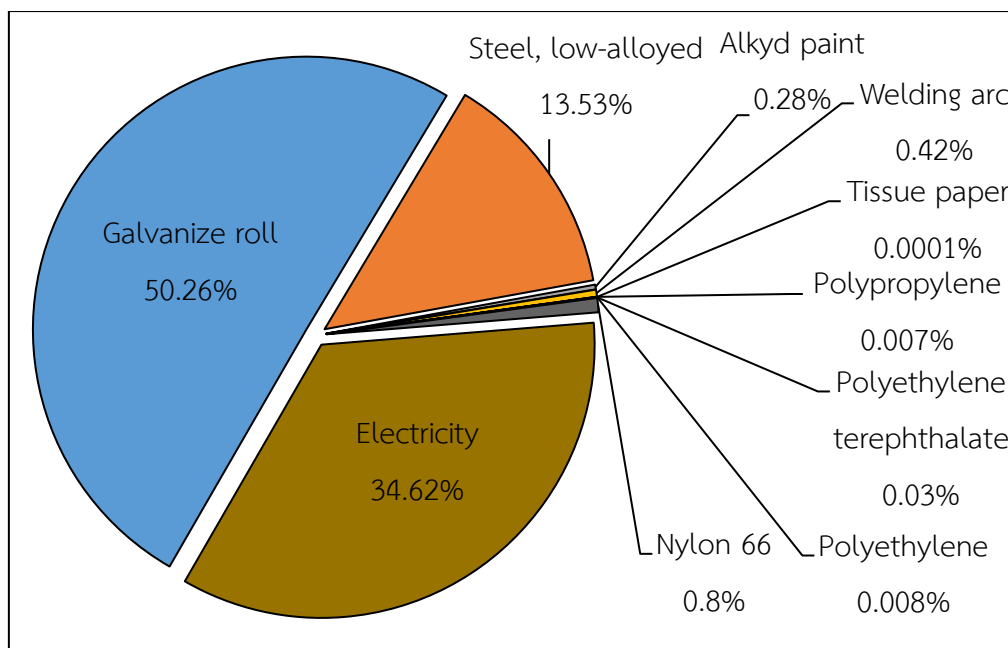
ภาพที่ 98 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการเกิดภาวะฝนกรดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลุกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลุกกิ่งในร่มนอกร่ม



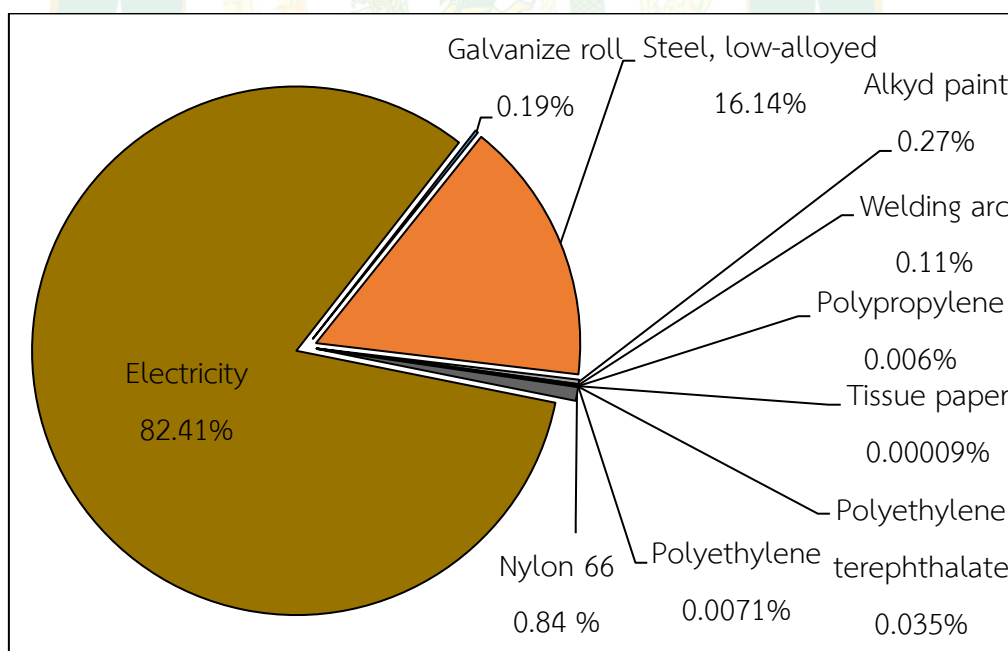
ภาพที่ 99 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืดตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



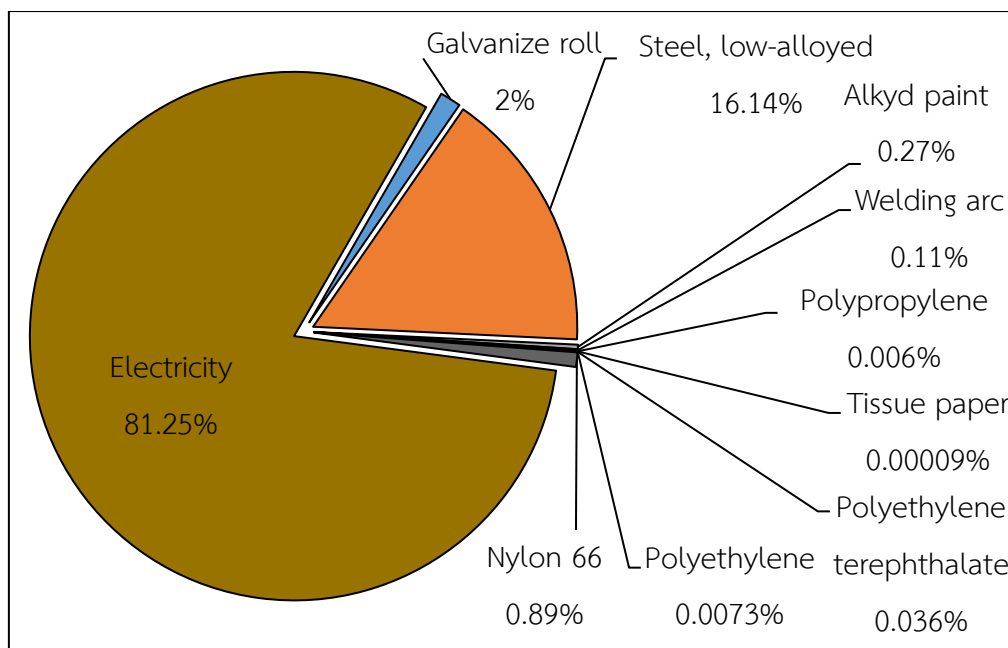
ภาพที่ 100 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อด้านการเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำงทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



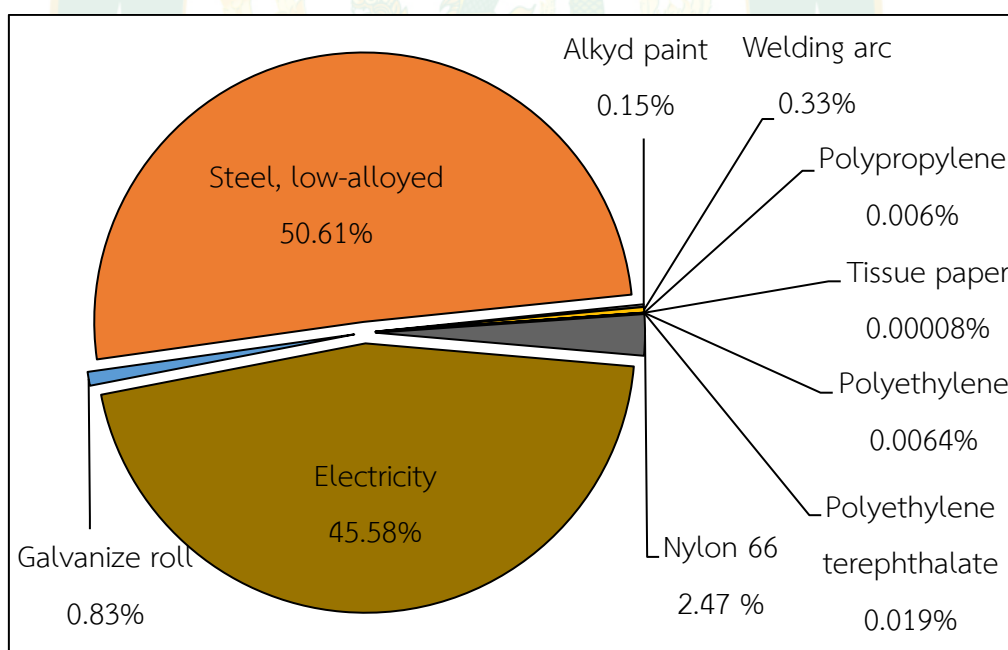
ภาพที่ 101 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



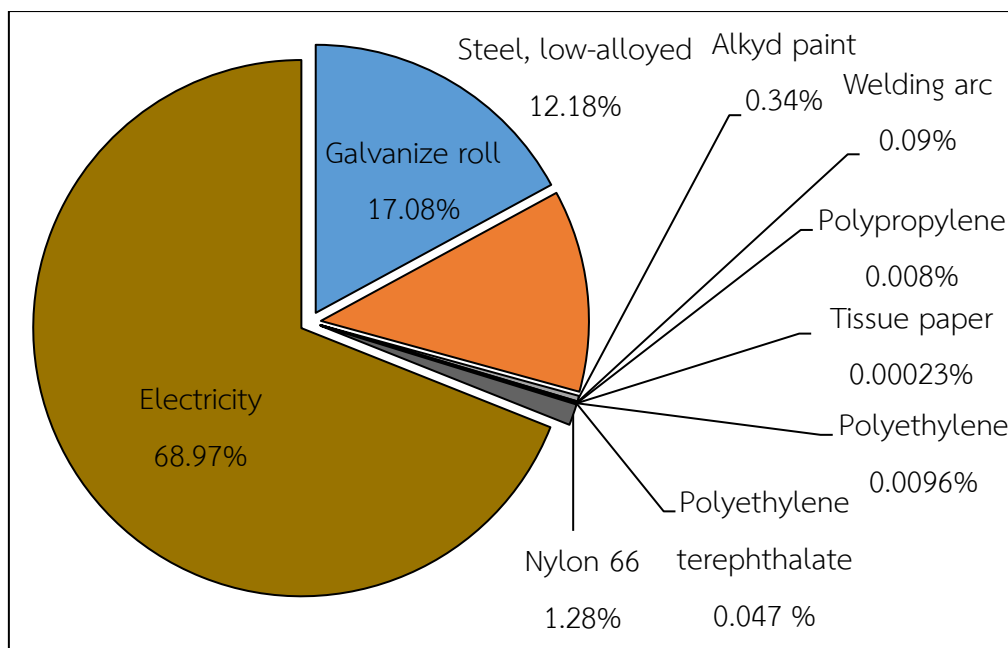
ภาพที่ 102 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด ตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



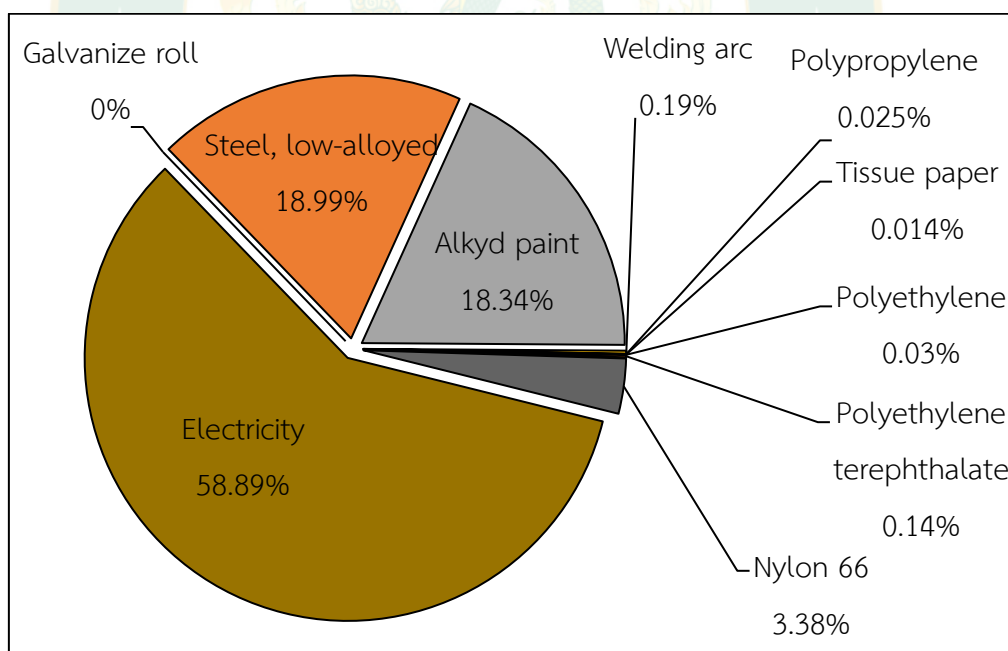
ภาพที่ 103 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



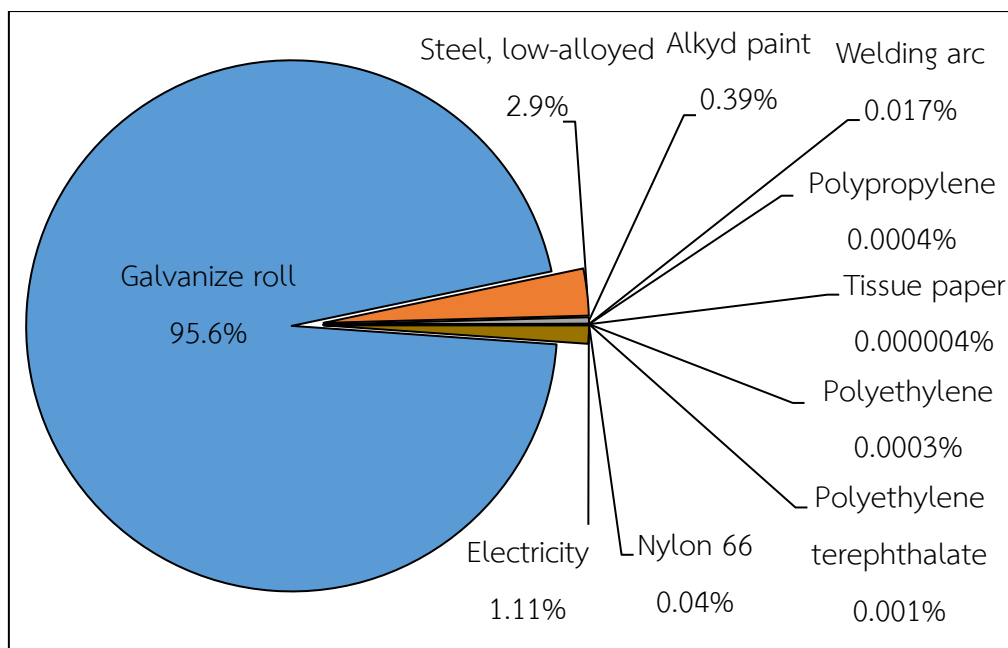
ภาพที่ 104 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการเกิดภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



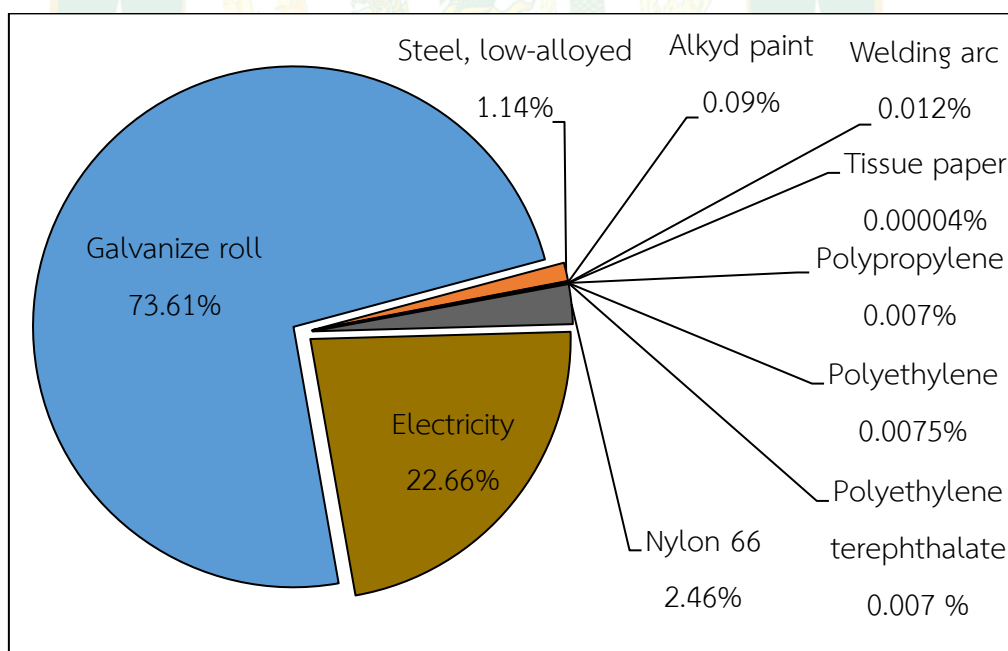
ภาพที่ 105 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่ มะเร็งตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



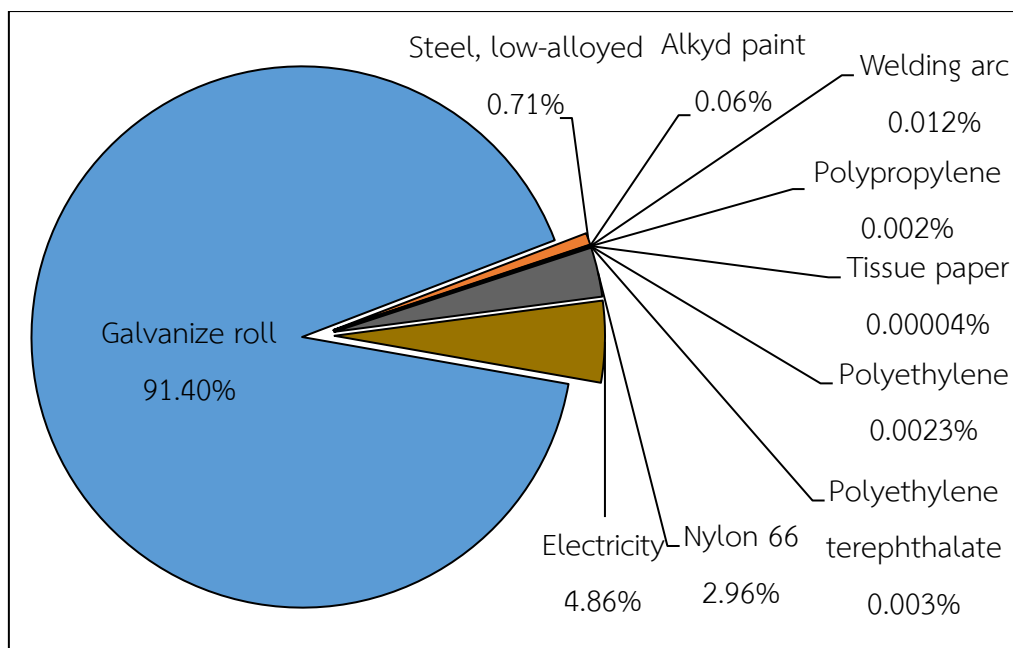
ภาพที่ 106 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อต้านการใช้ที่ดินตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



ภาพที่ 107 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



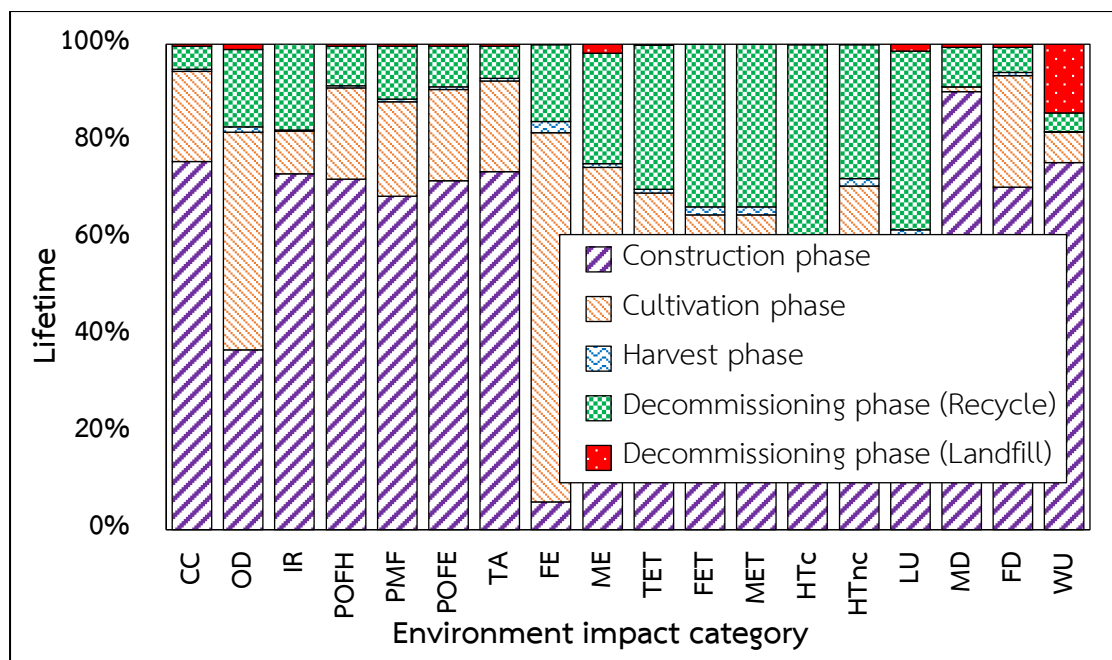
ภาพที่ 108 ผลกระทบของการใช้วัตถุดิบต่อการลดลงของทรัพยากรฟอสซิลตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม



ภาพที่ 109 ผลกระทบของการใช้วัสดุบิดต่อต้านการใช้ทรัพยากรน้ำตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม

ผลการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม

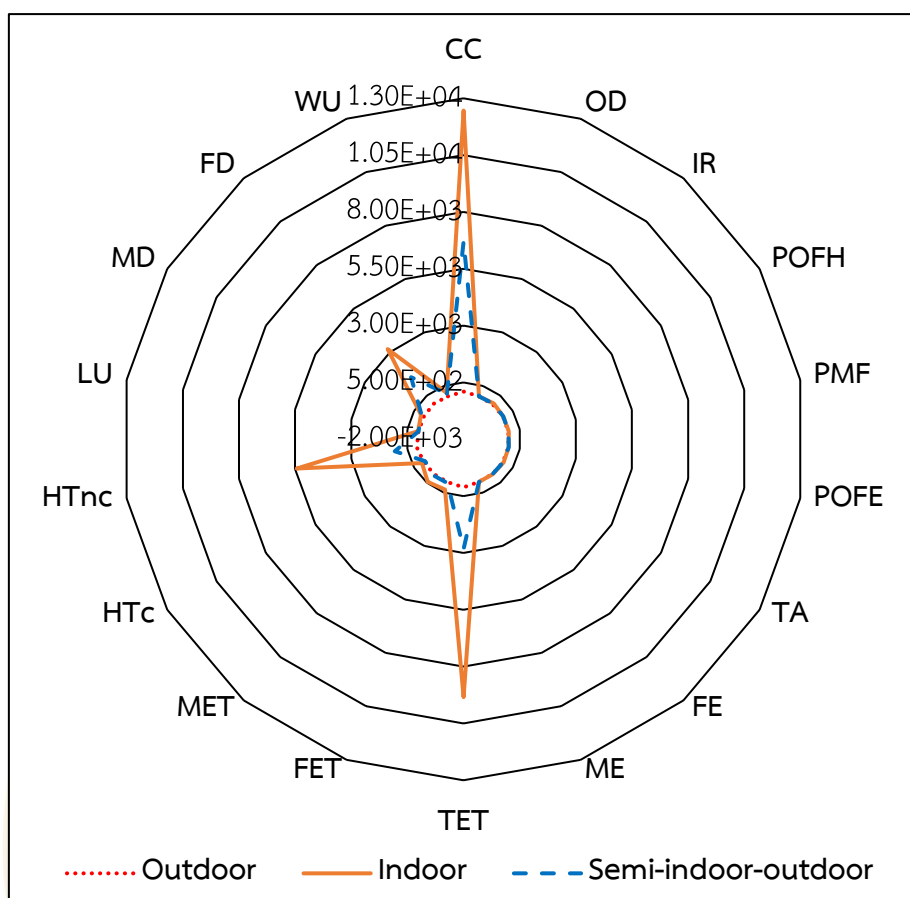
จากการแปรผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม เมื่อนำมาวิเคราะห์และแปรผลกระทบที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 110 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้ง 18 ด้าน ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากขั้นตอนการสร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 48.85% ลำดับต่อมา คือ ขั้นตอนการดูแลรักษา เนื่องจากป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ชุดไฟเพาะเลี้ยงเพียงอย่างเดียวมีค่าเฉลี่ยประมาณ 29.60% กระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 20.72% แต่วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงเฉลี่ยประมาณ 19.48% จึงส่งผลกระทบในกระบวนการกำจัดซากเฉลี่ยประมาณ 1.24% และขั้นตอนการเก็บเกี่ยวมีผลกระทบต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ 0.83%



ภาพที่ 110 การแปลผลกระทบททางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่ม

ผลการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบเพาะปลูกทั้ง 3 ระบบ

จากผลการเปรียบเทียบผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์ในระบบเพาะปลูกทั้ง 3 ระบบ แสดงดังภาพที่ 111 พบว่า การเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่มมีผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่มากกว่าการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้งและการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกึ่งในร่มประมาณ 63×10^3 เท่า และ 40 เท่า ตามลำดับ อันเนื่องมาจากโรงไฟฟ้าในประเทศไทยใช้ถ่านหินและเชื้อเพลิงฟอสซิลในการผลิตพลังงานไฟฟ้า และยังส่งผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก ความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง และการลดลงของทรัพยากรฟอสซิลสูงด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 111 ผลการเปรียบเทียบการประเมินวัฏจักรชีวิตของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์

ผลการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบปลูกในร่ม

ได้ทำการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันของระบบปลูกในร่ม โดยกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ประมาณ 1,700 W ประกอบไปด้วย กำลังไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสง 500 W เปิดใช้งาน 18 h/d และกำลังไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ 1,200 W เปิดใช้งาน 24 h/d เมื่อได้คำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละวัน พบว่า ใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 37.8 kWh/d โดยชั่วโมงการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 09.00 น. ถึง 15.00 น. หรือประมาณ 6 h/d ดังนั้น สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ในช่วงเวลาดังกล่าวได้ประมาณ 10.2 kWh/d โดยแสดงการคำนวณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 แสดงการคำนวณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

รายละเอียด	ข้อมูล
กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ต้องการ (W_e)	1,700
กำลังไฟฟ้าที่ผลิตต่อแผง (W_e/panel)	300
ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (%)	85
จำนวนแผงที่ติดตั้ง (panel)	7
กำลังไฟฟ้าที่แผงผลิตได้สูงสุด (W_e)	1,785
พลังงานไฟฟ้าที่แผงผลิตได้ต่อวัน (kWh/d)	10.71

จากผลการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ติดตั้งแผงผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์จำนวน 7 panel สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อวันได้ประมาณ 10.71 kWh/d ในช่วงเวลากลางวัน โดยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่มได้ประมาณ 10.2 kWh/d ดังนั้น การใช้พลังงานไฟฟ้าของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่มตลอดวันลดเหลือเพียง 27.6 kWh/d

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบปลูกในร่มเท่านั้น เนื่องจากระบบปลูกกลางแจ้งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างน้อย และระบบปลูกกึ่งในร่มนอกร่ม มีการใช้พลังงานในช่วงเวลากลางคืนเท่านั้น ดังนั้น หากมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบดังกล่าว จึงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

สรุปผล

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การจำลองการทำงานของสารทำงานที่เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับระบบปลูกในร่ม คือ สารทำงาน R-32 และขนาดความสามารถการทำความเย็นที่เหมาะสม คือ 3.6 kW ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 0.187 m³/s ความดันห้องเฉลี่ย 101.322 kPa และอุณหภูมิห้องเฉลี่ย 25.41 °C

2. ระบบปรับอากาศขนาด 3.6 kW ที่อุณหภูมิห้อง 25 °C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 50% มีปริมาณที่ควบแน่นประมาณ 18.302 L/d สามารถรดน้ำให้กับพืชสมุนไพรมูลค่าสูงได้ประมาณ 23 plant

3. ชุดไฟเพาะเลี้ยงขนาดความกว้าง 1 m ความยาว 1 m และความสูง 2 m ติดตั้งไดโอดเปล่งแสงสีม่วงขนาด 300 W_e จำนวน 1 ชุด และไดโอดเปล่งแสงสีขาวขนาด 100 W_e จำนวน 1 ชุด มีค่าความหนาแน่นโฟตอนของการสังเคราะห์แสงประมาณ 434 μmol/m²-s

4. การทดสอบและวิเคราะห์ผลผลิตช่อดอกแห้งของพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้งให้ผลผลิตประมาณ 66.7 g ระบบปลูกในร่มประมาณ 46.3 g และระบบปลูกกึ่งในร่มประมาณ 55.8 g

5. การวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดสำหรับการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้งประมาณ 8.22 kWh ระบบปลูกในร่มประมาณ 506.7 kWh และระบบปลูกกึ่งในร่มประมาณ 106.47 kWh

6. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับต้นทุนต่อหน่วยผลผลิตของการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้งมีค่าต้นทุนต่อหน่วยประมาณ 2,912.49 Baht/kg ระบบปลูกในร่มมีค่าต้นทุนต่อหน่วยประมาณ 87,937.59 Baht/kg และระบบปลูกกึ่งในร่มมีค่าต้นทุนต่อหน่วยประมาณ 51,791.28 Baht/kg

7. ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 18 ด้าน ของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกลางแจ้ง เกิดผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ 9.22E+01 kg CO₂ eq/kg_{dry} การลดลงของชั้นโอโซน -8.49E-04 kg CFC11 eq/kg_{dry} การเกิดรังสีชนิดก่อก่อไอออนซ์ 1.83E+00 kBq Co-60 eq/kg_{dry} การเกิดสารออกซิแดนที่โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ 1.05E-01 kg NO_x eq/kg_{dry} การก่อก่อตัวของฝุ่นละออง 1.04E-01 kg PM_{2.5} eq/kg_{dry} การเกิดสารออกซิแดนที่โฟโตเคมีต่อคุณภาพ

ของระบบนิเวศ $1.05E-01$ kg NO_x eq/kg_{dry} การเกิดภาวะฝนกรด $2.64E-01$ kg SO₂ eq/kg_{dry} การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด $5.49E-02$ kg P eq/kg_{dry} การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล $3.20E-02$ kg N eq/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก $1.11E+02$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด $5.22E+00$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล $6.62E+00$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง $3.85E+00$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง $8.03E+01$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การใช้ที่ดิน $4.75E-01$ m²a crop eq/kg_{dry} การลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุ $1.13E-01$ kg Cu eq/kg_{dry} การลดลงของทรัพยากรฟอสซิล $3.24E+01$ kg oil eq/kg_{dry} การใช้ทรัพยากรน้ำ $2.54E+00$ m³/kg_{dry} ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากขั้นตอนการเพาะปลูกและการเก็บเกี่ยวผลผลิตมีค่าเฉลี่ยประมาณ 58.17% รองลงมาคือ กระบวนการเก็บเกี่ยวเฉลี่ยประมาณ 16.82% และกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 25.02% แต่วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงเฉลี่ยประมาณ 22.47% จึงส่งผลกระทบในกระบวนการกำจัดซากน้อยที่สุดประมาณ 2.54%

8. ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 18 ด้าน ของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม เกิดผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ $1.24E+04$ kg CO₂ eq/kg_{dry} การลดลงของชั้นโอโซน $2.23E-03$ kg CFC11 eq/kg_{dry} การเกิดรังสีชนิดก่อกอไอออน $5.61E+01$ kBq Co-60 eq/kg_{dry} การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ $1.65E+01$ kg NO_x eq/kg_{dry} การก่อกอตัวของฝุ่นละออง $9.50E+00$ kg PM_{2.5} eq/kg_{dry} การเกิดสารออกซิแดนท์โฟโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศ $1.68E+01$ kg NO_x eq/kg_{dry} การเกิดภาวะฝนกรด $2.74E+01$ kg SO₂ eq/kg_{dry} การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด $3.67E+00$ kg P eq/kg_{dry} การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล $3.10E-01$ kg N eq/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก $9.33E+03$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด $3.54E+02$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล $4.48E+02$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง $1.03E+02$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง $5.42E+03$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การใช้ที่ดิน $2.16E+01$ m²a crop eq/kg_{dry} การลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุ $1.45E+02$ kg Cu eq/kg_{dry} การลดลงของทรัพยากรฟอสซิล $3.18E+03$ kg oil eq/kg_{dry} การใช้ทรัพยากรน้ำ $1.64E+02$ m³/kg_{dry} ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากขั้นตอนการดูแลรักษา อันเนื่องมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 54.14% ลำดับต่อมา คือขั้นตอนการสร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงที่ใช้วัสดุประเภทเหล็กมีค่าเฉลี่ยประมาณ 33.75% และกระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ

11.71% แต่วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงเฉลี่ยประมาณ 10.73% จึงส่งผลกระทบในกระบวนการกำจัดซากน้อยที่สุดประมาณ 1%

9. ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมทั้ง 18 ด้าน ของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกกิ่งในร่มนอกร่ม เกิดผลกระทบด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ $6.69E+03$ kg CO₂ eq/kg_{dry} การลดลงของชั้นโอโซน $7.41E-04$ kg CFC11 eq/kg_{dry} การเกิดรังสีชนิดก่อก่อไอออน $3.75E+01$ kBq Co-60 eq/kg_{dry} การเกิดสารออกซิแดนซ์โฟโตเคมีต่อสุขภาพของมนุษย์ $8.68E+00$ kg NO_x eq/kg_{dry} การก่อก่อตัวของฝุ่นละออง $4.77E+00$ kg PM_{2.5} eq/kg_{dry} การเกิดสารออกซิแดนซ์โฟโตเคมีต่อคุณภาพของระบบนิเวศ $8.77E+00$ kg NO_x eq/kg_{dry} การเกิดภาวะฝนกรด $1.45E+01$ kg SO₂ eq/kg_{dry} การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในแหล่งน้ำจืด $7.09E-01$ kg P eq/kg_{dry} การเจริญเติบโตผิดปกติของพืชในน้ำทะเล $1.07E-01$ kg N eq/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศบนบก $2.83E+03$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำจืด $5.04E+01$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การเกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางทะเล $6.45E+01$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคมะเร็ง $-6.63E+01$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} ภาวะความเป็นพิษต่อมนุษย์ของการเกิดโรคที่ไม่ใช่มะเร็ง $1.06E+03$ kg 1,4-DCB/kg_{dry} การใช้ที่ดิน $3.57E+00$ m²a crop eq/kg_{dry} การลดลงของทรัพยากรแร่ธาตุ $1.18E+02$ kg Cu eq/kg_{dry} การลดลงของทรัพยากรฟอสซิล $1.57E+03$ kg oil eq/kg_{dry} การใช้ทรัพยากรน้ำ $1.22E+02$ m³/kg_{dry} ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลกระทบจากขั้นตอนการสร้างและติดตั้งชุดไฟเพาะเลี้ยงโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 48.85% ลำดับต่อมา คือ ขั้นตอนการดูแลรักษา เนื่องจากป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่ชุดไฟเพาะเลี้ยงเพียงอย่างเดียวมีค่าเฉลี่ยประมาณ 29.60% กระบวนการกำจัดซากเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 20.72% แต่วัสดุบางส่วนสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ ทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดขึ้นลดลงเฉลี่ยประมาณ 19.48% จึงส่งผลกระทบในกระบวนการกำจัดซากเฉลี่ยประมาณ 1.24% และขั้นตอนการเก็บเกี่ยวมีผลกระทบต่ำสุดเฉลี่ยประมาณ 0.83%

10. ผลการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่ม ติดตั้งแผงผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ขนาด 300 W_e จำนวน 7 panel โดยมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า 85% สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อวันได้ประมาณ 10.71 kWh/d ในช่วงเวลากลางวัน และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของการปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงในระบบปลูกในร่มเหลือเพียง 27.6 kWh/d

ข้อเสนอแนะ

1. จากการเพาะปลูกพืชสมุนไพรมูลค่าสูงทางการแพทย์จำนวน 3 ระบบ โดยในงานวิจัยนี้ทำการเพาะปลูกทั้ง 3 ระบบ ในวันและเวลาเดียวกัน พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการเพาะปลูกนั้นมีความแตกต่างกัน โดยสายพันธุ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสายพันธุ์ผสมที่อาจยังไม่คงที่ จึงเป็นผลที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของแต่ละระบบเพาะปลูก
2. การลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบปลูกในร่ม ควรมุ่งเน้นไปที่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และวัสดุที่สร้างชุดโครงไฟเพาะเลี้ยง





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
การเผยแพร่บทความวิชาการ

บทความทางวิชาการที่ 1

- ชื่อผู้แต่ง: วัชระ กลั่นคูวัฒน์
 นัฐพร ไชยญาติ
 ปรีดา นาเทเวศน์
- ชื่อบทความ: การศึกษาสารทำงานที่เหมาะสมของระบบปรับอากาศสำหรับกัญชา
 Study of Suitable Refrigerant of Air Conditioning System for
 Cannabis
- ชื่อการประชุมวิชาการ: รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการวิจัยและนวัตกรรมสร้างสรรค์ ครั้งที่ 6
 (รูปแบบออนไลน์)
 The 6th Conference on Research and Creative Innovations:
 CRCI 2020 (Online)
- หน้าที่ตีพิมพ์: 173-182
- สถานที่จัดประชุม: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
- วันที่จัดประชุม: 2-3 กันยายน 2563



บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

การประชุมวิชาการวิจัยและนวัตกรรมสร้างสรรค์ ครั้งที่ 6 (แบบออนไลน์)
The 6th Conference on Research and Creative Innovations (Online)

ทยอบเกียรติบัตรฉบับนี้ไว้เพื่อแสดงว่า

วิษระ กลั่นสุวรรณ

บทความ เรื่อง “การศึกษาศาสตร์ทำความเย็นที่เหมาะสมของระบบปรับอากาศสำหรับกีฬา”
ได้เข้าร่วมนำเสนอบทความภาคบรรยาย รูปแบบออนไลน์

“สุขใจ... ไร้ใช้สังคม สร้างสรรค์นวัตกรรม
ยกระดับคุณภาพชีวิต ชุมชนท้องถิ่น... อย่างยั่งยืน”

ระหว่างวันที่ 2-3 กันยายน 2563 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

(รองศาสตราจารย์สุนิษา ทรัพย์ศิริ สาขาครุ)
ผู้บังคับบัญชากิจการระดับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

173

การศึกษาสารทำความเย็นที่เหมาะสมของระบบปรับอากาศสำหรับกัญชา Study of Suitable Refrigerant of Air Conditioning System for Cannabis

วัชระ กลั่นคุ้มน์ นัฐพร ไชยญาติ^{1,3*} และปรีดา นาเทเวศน์^{2,3}

Watchara Klancowat Nattaporn Chaiyat¹ and Preeda Nathewet²

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ²คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

³ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังงานทดแทนและเกษตรอัจฉริยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

¹ School of Renewable Energy, Maejo University ² Faculty of Agricultural Production, Maejo University

³ Excellence Center on Environmental Friendly Smart Agriculture and Renewable Energy Technology (ECoT), Maejo University

*E-mail: benz178tii@hotmail.com, +66(0) 882523088

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเลือกสารทำความเย็นที่เหมาะสมในระบบปรับอากาศขนาดการทำความร้อน 1 TR (3.517 kW) สำหรับปลูกเพาะกัญชา โดยทำการเปรียบเทียบสารทำความเย็น 3 ชนิด คือ R-32 R-452B และ R-466A ภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิของอากาศภายในห้องเพาะเลี้ยงอยู่ในช่วง 22-28 °C และความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 50-55% โดยพิจารณาตัวแปรอันประกอบไปด้วย ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคุณสมบัติทางกายภาพ มวลของสารทำความเย็นต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ ปริมาณสารทำความเย็นในระบบปรับอากาศ และสัมประสิทธิ์สมรรถนะ จากผลการศึกษาพบว่า สารทำความเย็น R-32 มีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในระบบปรับอากาศสำหรับกัญชา เนื่องจากมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างน้อยที่ประมาณ 438.75 kg CO₂ eq/kg_{ref} มีคุณสมบัติการติดไฟต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความร้อนประมาณ 7 มีปริมาณน้ำที่ได้จากการควบแน่นของระบบปรับอากาศประมาณ 18 l/day สามารถนำไปใช้เพาะปลูกกัญชาได้ 23 ต้น

คำสำคัญ: สารทำความเย็น, ระบบปรับอากาศ, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Abstract

This research studies a suitable working fluid in air conditioning at a cooling capacity of 1 TR (3.517 kW) for planting cannabis. Three refrigerants of R-32 R-452B และ R-466A are considered under the operating conditions of air temperature in closed system at the ranges of 22-28 °C and relative humidity at the ranges of 50-55 % by considering 4 parameters of the environmental impact, physical property, mass of refrigerant per output heating capacity, mass of refrigerant in the air conditioning system and coefficient of performance (COP) respective. From the study results, R-32 refrigerant is the suitable working fluid in the cannabis closed system, because of carbon dioxide emission at a low value of approximately 438.75 kg CO₂ eq/kg_{ref}, low-flammability property, COP at a value of approximately 7, and condensed water from air conditioning system at a volume of approximately 18 l/day, which can be used to cannabis cultivate of 23 plants.

Keyword: Refrigerant, Air-conditioning system, Environmental impact

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

174

1. บทนำ

การเพาะปลูกกัญชาในโรงเรือนเป็นวิธีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกัญชาได้อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาของการปลูก โดยสำหรับการปลูกกัญชาในโรงเรือน มีการนำระบบปรับอากาศเข้ามาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูก ซึ่งในระบบปรับอากาศมีสารทำความเย็นทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ จากนั้นสามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นของเหลวด้วยการระบายความร้อน เพื่อเข้าสู่กระบวนการทำความเย็นอีกครั้งได้โดยไม่เสื่อมสถานะ

ในการเลือกสารทำความเย็นสำหรับระบบปรับอากาศสำหรับการปลูกพืช ควรคำนึงถึงด้านความปลอดภัยในการติดตั้ง ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสถานการณ์โลกในปัจจุบัน ได้เกิดภาวะโลกร้อนจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจก และที่สำคัญชั้นบรรยากาศโอโซนถูกทำลาย การเลือกใช้สารทำความเย็นจึงต้องพิจารณาถึงเรื่องนี้ด้วย

โดยในงานวิจัยของ Chaiyat and Kiatsiriroat (2015) ได้ทำการศึกษาศรรณณะการทำความเย็นของระบบปรับอากาศโดยใช้สารทำความเย็น R-32 เทียบกับสารทำความเย็น R-410a ภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า สารทำความเย็น R-32 สามารถทำความเย็นได้เร็วกว่าสารทำความเย็น R-410a โดยสมรรถณะการทำความเย็นของ R-32 สูงกว่า R-410a ทุกสภาวะ และสารทำความเย็น R-32 เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า R-410 ในงานวิจัยของ Taira et al. (2016) ได้ทำการศึกษาศรรณณะของปั๊มความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น สารทำความเย็นผสมระหว่าง R-32/R-125/R-1234yf (67/7/26) และ R-32/R-1234ze(E) (70/30) เพื่อใช้ทดแทนสารทำความเย็น R-410a และ R-32 พบว่า สารทำความเย็นผสม R-32/R-125/R-1234yf สามารถทดแทนสารทำความเย็น R-410a และ R-32 ได้ แต่สัมประสิทธิ์สมรรถณะยังคงน้อยกว่าสารทำความเย็น R-32 ในงานวิจัยของ Dalkilic and Wongwises (2010) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิง

ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอที่มีสารทำความเย็นผสมอยู่บนพื้นฐานของ R-134a R-152a R-32 R-290 R-1290 R-1270 R-600 และ R-600a ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และนำผลเปรียบเทียบกับสารทำความเย็น R-12 R-22 และ R-134a เพื่อเป็นทางเลือกทดแทนระบบทำความเย็นแบบดั้งเดิม ผลการศึกษาพบว่าสารทำความเย็นทางเลือกทั้งหมดนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถณะต่ำกว่า R-12 R-22 และ R-134a เล็กน้อยสำหรับอุณหภูมิการควบแน่นที่ 50 °C และอุณหภูมิระเหยอยู่ระหว่าง -30 ถึง 10 °C สารทำความเย็นผสมระหว่าง R-290/R-600a (40/60) สามารถแทนสารทำความเย็น R-12 ได้และ R-290/R-1270 (20/80) สามารถแทนสารทำความเย็น R-22 ได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาทำแบบจำลองเลือกสารทำความเย็นของระบบปรับอากาศสำหรับปลูกกัญชา และปริมาณน้ำที่ควบแน่นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์สำหรับการเพาะปลูกกัญชา จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาจำลองการทำงานของสารทำความเย็น โดยพิจารณาเลือกสารทำความเย็นให้เหมาะสมกับระบบปรับอากาศสำหรับเพาะปลูกกัญชา

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระบบปรับอากาศสำหรับกัญชา

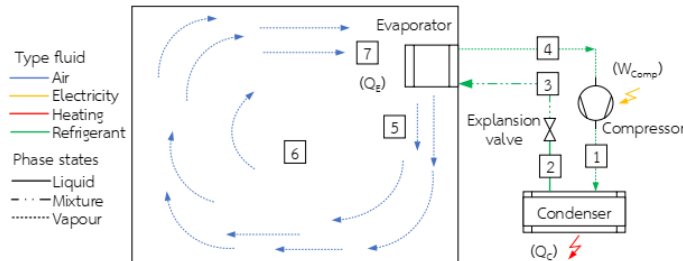
การปลูกกัญชา เป็นรูปแบบการเกษตรภายในโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างที่ปกคลุมด้วยฉนวนกันความร้อนแบบทึบแสง และแสงเทียมประดิษฐ์ถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับการเจริญเติบโตของพืชเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เป็นปัจจัยหลักให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งพืชในกลุ่มสมุนไพรที่ต้องควบคุมคุณภาพและลดความผันผวนผลผลิตได้ดีกว่าการเกษตรแบบดั้งเดิม [Kozai, 2013] [Niam et al., 2018] สำหรับการปลูกกัญชาแบบปิดมีการนำระบบปรับอากาศมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูก แสดงดังรูปที่ 1 และวัฏจักรการทำความเย็นแสดงดังรูปที่ 2

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

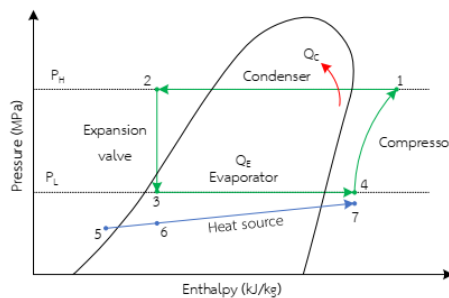
175

หลักการทํางานของระบบ คือ สารทำความเย็นสถานะไอในจุดที่ 1 มีอุณหภูมิและความดันสูงถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่นด้วยเครื่องอัดไอ จากนั้นสารทำความเย็นสถานะไอที่มีอุณหภูมิสูงกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวและระบายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่เครื่องควบแน่นโดยมีความดันคงที่ในจุดที่ 2 จากนั้นสารทำความเย็นถูกลดความดันด้วยอุปกรณ์ลดความดันทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิและความดันลดลง เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของผสมในจุดที่ 3 จากนั้นสารทำความเย็นเข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศภายในห้องทำให้

สารทำความเย็นเดือดกลายเป็นไอในจุดที่ 4 โดยอากาศในจุดที่ 5 มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำ เนื่องจากน้ำในอากาศ (ความชื้น) ถูกควบแน่นที่ผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เกิดเป็นหยดน้ำทำให้อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นลดลง จากนั้นอากาศถูกส่งไปยังพื้นที่เพาะปลูกด้วยพัดลมในจุดที่ 6 เมื่ออากาศผ่านพืชส่งผลให้พืชมีการระเหยน้ำที่ผิวใบทำให้อากาศมีอุณหภูมิและความชื้นเพิ่มสูงขึ้นในจุดที่ 7 จากนั้นอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นที่เครื่องระเหยเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบอีกครั้ง



รูปที่ 1 แผนภาพการทํางานของระบบปรับอากาศแบบอัดไอ



รูปที่ 2 แผนภาพความดันและเอนทัลปีของระบบปรับอากาศแบบอัดไอ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยนี้ แสดงดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ทําการเลือกสารทำความเย็น 3 ชนิด ที่มีศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) ต่ำ มีผลกระทบต่อชั้นโอโซน (Ozone Depletion Potential, ODP) เท่ากับ 0

และมีคุณสมบัติการติดไฟต่ำ เพื่อประยุกต์ร่วมกับระบบปรับอากาศสำหรับปลูกกล้วยาโน

3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายพฤติกรรมทํางานของระบบปรับอากาศ โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel โปรแกรม Psycho logger [Chaiyat, 2019] และโปรแกรม Refprop 9.0 [NIST, 2018] แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อวิเคราะห์ค่ามวลของสารทํา

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

176

ความเย็นต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ ปริมาณสารทำความเย็นในระบบ ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาณสารทำความเย็นในระบบ และสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการจำลองการทำงานของสารทำความเย็นในระบบปรับอากาศที่สภาวะแวดล้อมเหมาะสมต่อการเพาะปลูกกล้วยาใน ดังแสดงเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองในตารางที่ 1

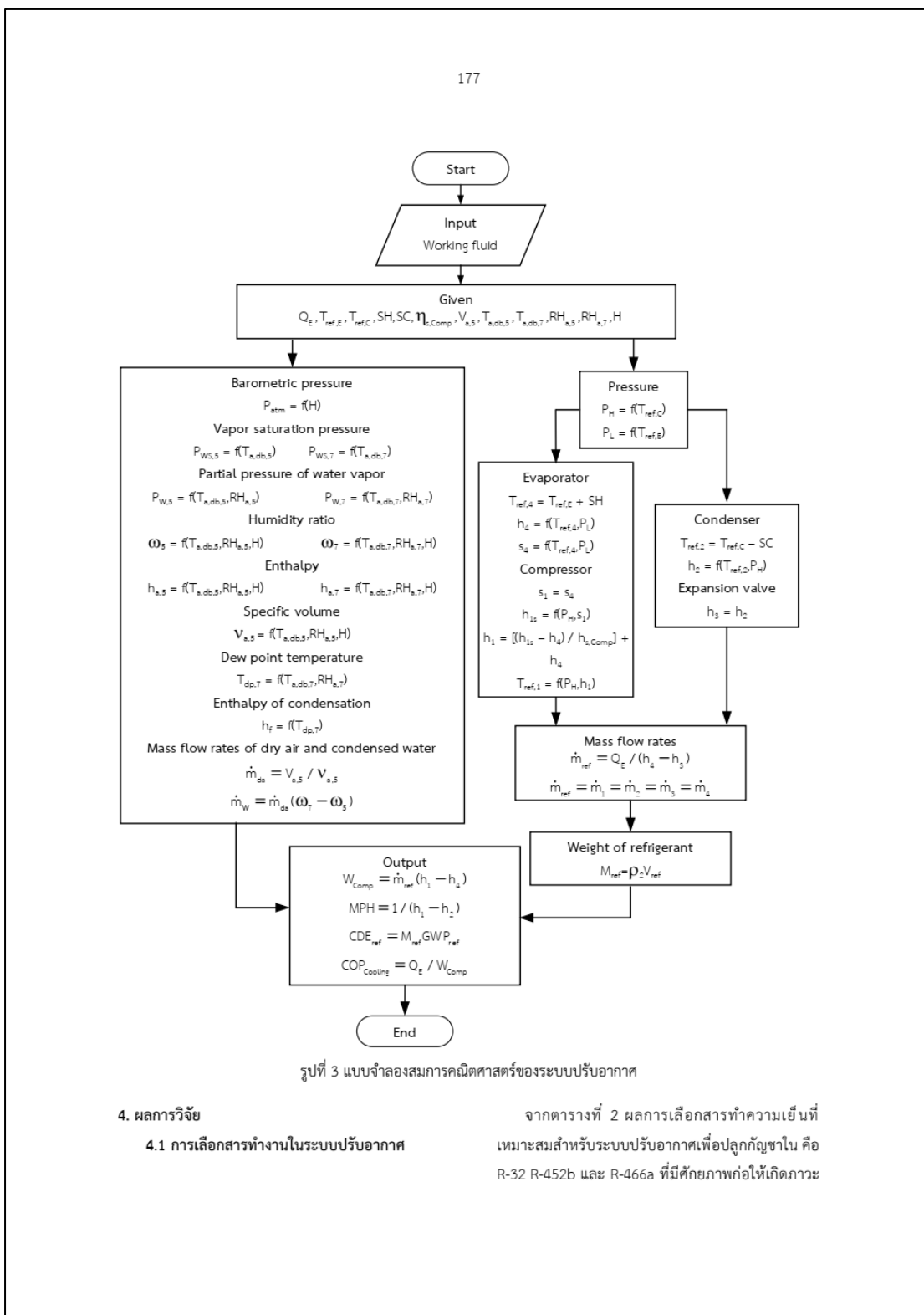
3.3 นำผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเลือกสารทำความเย็นที่เหมาะสม มาทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงที่ได้จากการติดตั้งระบบปรับอากาศสำหรับเพาะปลูกกล้วยา

3.4 วิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ควบแน่นของระบบปรับอากาศ สำหรับใช้ในการเพาะปลูกจำนวนกล้วยาที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทำงานของระบบปรับอากาศสำหรับปลูกพืชกล้วยาใน [Chaiyat, 2019] [Jin et al., 2019]

รายละเอียด	ข้อมูล	หน่วย
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศขาออก ($\dot{V}_{a,5}$)	0.182	m ³ /s
ความสูงจากระดับน้ำทะเล (H)	310	m
อุณหภูมิของอากาศแห้งขาเข้าเครื่องระเหย ($T_{a,db,E,7}$)	22-28	°C
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าเครื่องระเหย ($RH_{a,E,7}$)	55	%
อุณหภูมิของอากาศแห้งขาออกเครื่องระเหย ($T_{a,db,E,9}$)	12-22	°C
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออกเครื่องระเหย ($RH_{a,E,9}$)	50	%
อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องระเหย ($T_{ref,E}$)	0	°C
อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น ($T_{ref,C}$)	50	°C
ค่า Superheating (SH)	5	°C
ค่า Subcooling (SC)	5	°C
ความดันตกคร่อมของสารทำความเย็นในอุปกรณ์ต่าง ๆ (ΔP)	0	bar
ประสิทธิภาพไอเซนทรอปิกของเครื่องอัดไอ ($\eta_{s,comp}$)	80	%

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)



บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

178

โลกร้อนค่อนข้างน้อย โดยสารทำความเย็น R-32 และ R-452b มีคุณสมบัติการติดไฟ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของสารทำความเย็น

รายละเอียด	R-32 ¹	R-452b ²	R-466a ³
มวลโมเลกุล (kg/kmol)	52.03	63.5	80.7
อุณหภูมิวิกฤติ (°C)	78.11	77.1	83.8
ความดันวิกฤติ (MPa)	5.78	5.22	5.91
จุดเดือด (°C)	-51.65	-51.0	-51.7
กลุ่มความปลอดภัย	A2L	A2L	A1
ผลกระทบต่อการทำลายชั้นโอโซน (ODP, R11-related)	0	0	0
ศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP, CO ₂ -100 y)	675	698	733

หมายเหตุ ¹อ้างอิงข้อมูลจาก ASHRAE (2009)

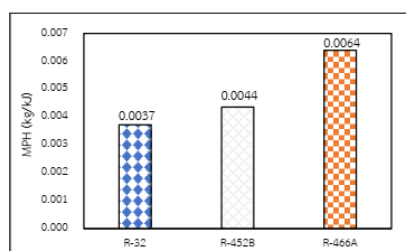
²อ้างอิงข้อมูลจาก Honeywell (2020)

³อ้างอิงข้อมูลจาก Atilla and Vedat (2020)

4.2 ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบปรับอากาศ

จากรูปที่ 4 แสดงถึงมวลของสารทำความเย็นต่อหน่วยความร้อนที่ผลิตได้ (Mass of refrigerant per unit heat output, MPH) จากปริมาณของสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบปรับอากาศเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในปริมาณความร้อนที่เท่ากัน

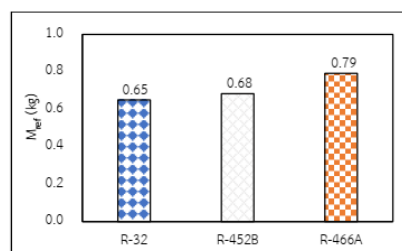
จะเห็นได้ว่าสารทำความเย็น R-466a มีค่ามากที่สุดในระบบอยู่ที่ประมาณ 0.0064 kg/kJ เมื่อเทียบกับสารทำความเย็นชนิดอื่น หากมีค่าที่สูงซึ่งบ่งบอกถึงต้องใช้สารทำความเย็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลให้เครื่องอัดไอมีส่วนประกอบขนาดใหญ่และงานปั๊มอัดสูง ในขณะที่สารทำความเย็น R-32 มีค่าน้อยสุดอยู่ที่ประมาณ 0.0037 kg/kJ



รูปที่ 4 มวลของสารทำความเย็นต่อปริมาณ

ความร้อนที่ผลิตได้

จากรูปที่ 5 แสดงถึงปริมาณของสารทำความเย็น (Weight of refrigerant, M_{ref}) สำหรับบรรจุในระบบปรับอากาศ โดยความหนาแน่นของสารทำความเย็นแต่ละชนิดที่ทางออกของเครื่องควบแน่นมีความหนาแน่นสูงเนื่องจากมีสถานะเป็นของเหลว ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณสารทำความเย็นในระบบปรับอากาศ จากผลการจำลองพบว่าปริมาณสารทำความเย็น R-32 มีค่าต่ำสุดประมาณ 0.65 kg ในขณะที่สารทำความเย็น R-466a มีปริมาณสารมากที่สุดประมาณ 0.79 kg



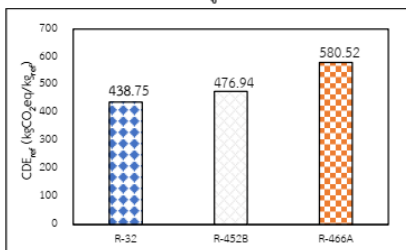
รูปที่ 5 ปริมาณสารทำความเย็นในระบบ

จากรูปที่ 6 แสดงผลปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อมวลของสารทำความเย็น (Carbon dioxide emission per mass of refrigerant, CDE_{ref}) ที่

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

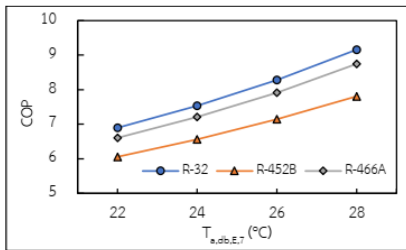
มีผลกระทบต่อโดยตรงต่อศักยภาพก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ของสารทำความเย็นแต่ละชนิดในระยะเวลา 100 ปี หากเกิดการรั่วไหลของสารทำความเย็นในระบบตู้ สิ่งแวดล้อม

จากผลการจำลองการทำงานของสารทำความเย็นตามปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าสารทำความเย็น R-32 และ R-452b มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ ในขณะที่เดียวกันสารทำความเย็น R-466a มีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง



รูปที่ 6 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารทำความเย็นแต่ละชนิด

จากรูปที่ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) การทำความเย็นของสารทำความเย็น สำหรับการทำความเย็นที่มีภาระการทำความเย็น 3.517 kW และอุณหภูมิภายในห้องเพาะปลูกที่ขอยู่ระหว่าง 22-28 °C อุณหภูมิควบแน่นจากตัวเลขดังกล่าวจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของ R-32 สูงสุดในขณะที่ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของ R-452b นั้นต่ำที่สุด



รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์สมรรถนะ

จากผลการจำลองข้างต้น พบว่าสารทำความเย็น R-32 มีเหมาะสมสำหรับระบบปรับอากาศ เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะเฉลี่ยสูงกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่นรวมถึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบของระบบปรับอากาศ

นำผลการจำลองทางคณิตศาสตร์มาขยายผล โดยทำการเลือกระบบปรับอากาศที่ใช้สารทำความเย็น R-32 ยี่ห้อ Daikin รุ่น Sabai inverter (FTKQ) ดังแสดงรายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 3 มาทำการทดสอบที่เงื่อนไขการทำงานที่อุณหภูมิภายในห้องประมาณ 25 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 30 °C

ตารางที่ 3 ค่าอธิบายส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ

ส่วนประกอบ	รายละเอียด	
ความสามารถทำความเย็น	kW	3.5
	BTU/h	12,300
หน่วยภายใน (Fan coil unit)		
รุ่น	FTKQ12SV2S	
อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m ³ /min)	High	9.6
	Medium	8.1
	Low	6.7
ขนาด (H x W x D, mm)	285 x 770 x 223	
หน่วยภายนอก (Condensing unit)		
รุ่น	RKQ12SV2S	
ประเภทเครื่องอัดไอ	Hermetically sealed swing	
กำลังไฟฟ้าที่กำหนด (kW _e)	1.2	
ขนาด (H x W x D, mm)	550 x 658 x 275	

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบของระบบปรับอากาศ

รายละเอียด	ผลการจำลอง	ผลการทดสอบ
สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	7.36	6.94

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

180

รายละเอียด	ผลการจำลอง	ผลการทดสอบ
ปริมาณน้ำควบแน่น ($M_{W,AC}$ l/day)	18.742	18.302

จากผลการทดสอบและเปรียบเทียบการทำงานของระบบปรับอากาศ พบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าใกล้เคียงประมาณ 7 โดยคิดประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเท่ากับ 70% และประสิทธิภาพทางกลเท่ากับ 60% [Chaiyat, 2019] และมีปริมาณน้ำที่ควบแน่นของระบบปรับอากาศที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องประมาณ 55% ประมาณ 18.302 l/day หรือ 0.76 l/h ซึ่งใกล้เคียงกับผลการจำลองอีกด้วย

4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ควบแน่นของระบบปรับอากาศ

จากผลการศึกษา พบว่า ปริมาณน้ำ 18.302 l/day โดยจะทำการรดน้ำต้นกล้วยทุก ๆ 3 day สามารถใช้ในการเพาะปลูกกล้วยได้ 23 ต้น ด้วยระบบแบบน้ำหยด ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5 และรูปที่ 8

ตารางที่ 5 รายละเอียดของปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกกล้วย

รายการ	ข้อมูล
ปริมาตรความจุของกระถาง (m^3)	0.0106
ปริมาตรดินใส่ 90% ของปริมาตรกระถาง (m^3)	0.00954
สัดส่วนปริมาณน้ำต่อกระถางใช้ 25% ของปริมาตรดิน (l)	2.39
ความถี่ในการรดน้ำต่อครั้ง (day)	3
ปริมาณน้ำควบแน่นต่อวัน (l/day)	18.302
ปริมาณน้ำทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอด 3 day (l)	54.906
จำนวนต้นไม้ที่ประเมินได้ (plant)	23.02
จำนวนต้นไม้ที่เหมาะสม (plant)	23.00



รูปที่ 8 ระบบรดน้ำแบบหยดสำหรับเพาะปลูกกล้วย

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษานี้เลือกสารทำความเย็นที่เหมาะสมในระบบปรับอากาศสำหรับเพาะปลูกกล้วย พบว่า

1. สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่เลือกมาพิจารณามี 3 ชนิด คือ R-32 R-452B และ R-466A

2. สารทำความเย็น R-32 มีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในระบบปรับอากาศ เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะประมาณ 7 และมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ $438.75 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/kg}_{ref}$

3. ปริมาณน้ำที่ได้จากการควบแน่นของระบบปรับอากาศประมาณ 18 l/day และความถี่การรดน้ำทุก ๆ 3 day จะมีปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นประมาณ 54.91 l สามารถรดน้ำต้นกล้วยได้ 23 ต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ห้องวิจัยการออกแบบและเทคโนโลยีด้านอุณหภูมิ และศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังงานทดแทนและเกษตรอัจฉริยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ที่มอบทุนการสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

Atila G. D. and Vedat O. (2020). Energetic performance analysis of R466A as an

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

181

- alternative to R410A in VRF systems. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.04.003>
- ASHRAE Handbook fundamentals, 2009. Properties of refrigerant.
- Chaiyat, N. and Kiatsiriroat, T. (2010). Recovering and Upgrading Waste Heat of Air-Conditioner by Combining R-123 Vapor Compression Heat Pump. The 9th National Conference on Heat and Mass Transfer in Thermal Equipments. 1-4.
- Chaiyat, N. and Kiatsiriroat, T. (2014). Study on Thermal Performance of R-32 Air-conditioner. Engineering Journal Chaing Mai University, Vol.22, No.2, pp.38-46
- Chaiyat, N. (2019). *Thermal Renewable Energy Technology*. Chaing Mai, Thailand: Maejo University.
- Cho, I. Y., Seo, H., Kim, D and Kim, Y. (2016). Performance comparison between R410A and R32 multi-heat pumps with a sub-cooler vapor injection in the heating and cooling modes. Energy, 112, 179-187. doi: 10.1016/j.energy. 2016.06.069
- Dalkilic, A.S. and Wongwises, S. (2010). A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants. International Communications in Heat and Mass Transfer, 37: 1340–1349.
- Honeywell. Solstice L41y (R-452B). <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-l41y/>. Accessed date: 20 August 2020.
- Jin, D., Jin, S.X. and Chen, J. (2019). Cannabis Indoor Growing Conditions, Management Practices, and Post-Harvest Treatment: A Review. American Journal of Plant Sciences, 10, 925-946. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.106067>.
- Kozai, T. (2013). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept estimation and application to plant factory. Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci, 89(10): 447–461. doi: 10.2183/pjab.89.447
- Konghuayrob, S. and Khositkullaporn, K. (2016). Performance Comparison of R32, R410A and R290 Refrigerant in Inverter Heat Pumps Application. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2576&context=iracc>.
- Liu H., Ma G., Shao S and Fan B. (2018). Performance investigation on refrigeration and air conditioning systems with multi-evaporator. Sustainable Cities and Society. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.021>.
- NIST (National institute of standards and technology), Inc. (2018). Refprop version 10: Customer number 40754, Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures software, America.
- Migneco, A. I. and Farrugia, M. (2019). EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE REFRIGERATION PERFORMANCE OF R32 AND R410A IN FULL AND PARTIALLY FILLED CONDITIONS. https://www.researchgate.net/publication/334697112_EXPERIMENTAL_EVALUATION_OF_REFRIGERATION_PERFORMANCE_OF_DEGASSING_AND_REGASSING_OF_AN_INVERTER_DRIVEN_R410A_SYSTEM.
- Özkan, D., Agra, Ö. and Cetin, Ö. (2007). A comparison between refrigerants used in air

บทความทางวิชาการที่ 1 (ต่อ)

182

conditioning. Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB8439.pdf>

Taira, S., Haikawa, T. and Minamida, T. (2016). Evaluation of Performance of Heat Pump using R32 and HFO-mixed Refrigerant by Refrigeration Cycle Simulation and Loss analysis. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1737. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1737>

Washim, A., Rifatul, M., Murad, H., Rashedul, I. and Sirajul, K. C. (2018). Recycling of Condensed Water from an Air Conditioning Unit. doi: 10.1109/IC4ME2.2018.8465612

ρ ความหนาแน่น (kg/m^3)

v ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)

ตัวย่อ

a	Air
AC	air conditioner
amb	Ambient
C	Condenser
Comp	Compressor
da	Dry air
db	Dry bulk
dp	Dew point
E	Evaporator
H	High
L	Low
ref	Refrigerant
s	Isentropic
W	Water

8. รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

CDE	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{kg CO}_2 \text{ eq}/100 \text{ y}$)
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ
H	ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (m)
h	เอนทัลปี (kJ/kg)
M	มวล (kg)
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
P	ความดัน (kPa)
Q	อัตราถ่ายเทความร้อน (kW)
RH	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
S	เอนโทรปี (kJ/kg K)
SC	Sub-cooling ($^{\circ}\text{C}$)
SH	Superheating ($^{\circ}\text{C}$)
T	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
V	ปริมาตร (m^3)
W	กำลังงาน (kW)

ตัวกรีก

η	ประสิทธิภาพ (%)
ω	อัตราส่วนความชื้น (kg_w/kg_a)

บทความทางวิชาการที่ 2

ชื่อผู้แต่ง:	Watchara Klancoowat Nattaporn Chaiyat Preeda Nathewet
ชื่อบทความ:	Thermal Performance of Wastewater Recovery from Air Conditioning for Cannabis Production
ชื่อการประชุมวิชาการ:	the Third International Conference on Environmental Development Administration 2020 “Environmental Struggles and the Way Forward”
หน้าที่ตีพิมพ์:	100-109
สถานที่จัดประชุม:	Graduate School of Environmental Development Administration, National Institute of Development Administration
วันที่จัดประชุม:	28 November 2020



บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)



บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"

100

Thermal Performance of Wastewater Recovery from Air Conditioning for Cannabis Production

Watchara Klancoowat¹, Nattaporn Chaiyat^{1,3} and Preeda Nathewet^{2,3}

¹School of Renewable Energy, Maejo University

²Faculty of Agricultural Production, Maejo University

³Excellence Center on Environmental Friendly Smart Agriculture and Renewable Energy Technology (ECoT), Maejo University

Corresponding E-mail: benz178tii@hotmail.com

Abstract

This research presents thermal simulation of selection working fluids of air conditioning from R-32, R-2452b, and R-466 for cannabis process. R-32 is a suitable working fluid in terms of a lowest mass of refrigerant of 0.65, a lowest mass of refrigerant per unit heat output of 0.0037, and a highest thermal COP of 7.53. The testing data from a Daikin R-32 air conditioning model of 12,300 BTU/h also shows that the simulation results are nearly with the experimental data in terms of a COP of 6.94 and a condensed wastewater of 18.302 litre/day. A cannabis lighting set is designed at a sizing of 1.0 m × 1.0 m × 1.8 m, one-violet LED of 300 W_e, and two-daylight LEDs at each of 100 W_e. A plant watering system is developed from Arduino board, solenoid valve, selector switch, LCD monitor, and drip emitter.

Keywords: Wastewater recovery; Air conditioning; Cannabis production; Thermal simulation

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

101

Introduction

Cannabis and smart farming topics are a popular topic in the present medication in Thailand. Internet of things (IOT) is implemented to enhance cannabis cultivation such as temperature, humidity, lighting, and etc. Cannabis is highly promoted for medical products to cure cancer, Alzheimer's disease, and etc. Indoor and outdoor techniques are several discussed for cannabis cultivation. The advantage of outdoor method is low cost, while the main point of indoor method is controllable conditions. The indoor and outdoor cultivation methods are presented in the various research works of design, simulation, construction, and technology. Vanhove et al. [1], Zhang et al. [2], Niam et al. [3], Lim and Kim [4], and Yongson et al. [5] presented a computational fluid dynamics (CFD) technique to design the optimal temperature, relative humidity, air velocity, air flow pattern, and pressure drop for indoor planting room. The CFD was also used to evaluate the suitable conditions for reducing the crop period, investment cost, and operating cost from indoor plant cultivation. In addition, Chaiyat and Kiatsiriroat [6] presented a thermodynamic simulation for selection the suitable working fluid in heat pump and air conditioning. R-290, R-123, R-32, and R-410a were used to contain in both heat engines. This work was supported by Taira et al. [7] and Dalkilic and Wongwises [8], which also represented a new type working fluid by using mixed refrigerants in heat pump and air conditioning.

From the above study works, thermal simulation was the popular technique to investigate the optimal condition in air conditioning system, heat pump system, and air ventilation for the closed system.

The objective of this study aims to:

1. Evaluate the optimal conditions for cannabis cultivation by using thermal simulation technique.
2. Design a cannabis lighting set for cannabis production.
3. Develop an automatic plant watering system from wastewater of air conditioning.

Conceptual framework

Figure 1 shows schematic diagram of an integrated system of air conditioning cycle, wastewater recovery system, and plant watering system. Cooling load (Q_E) from the closed system (indoor room) releases heat into an evaporator at a fan coil unit of air conditioning. A low boiling temperature refrigerant absorbs heat from moist air. After that, refrigerant at the mixture phase transfers to be the pure vapor, which is increased enthalpy, pressure, and

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

102

temperature by a compressor (W_{Comp}). Then, the high-energy fluid is rejected heat to the environment by a condenser (Q_c) at a condensing unit of air conditioning. The vapor phase is condensed to be the liquid phase, and sent through an expansion valve for decreasing pressure in form of the mixture fluid. At the evaporator, a condensed wastewater from the moist air is kept in a wastewater tank for cannabis process. Cooling efficiency in terms of a coefficient of performance (COP) can be defined as follows:

$$\text{COP}_{\text{AC}} = \frac{Q_E}{W_{\text{Comp}}}, \quad (1)$$

$$Q_E = \dot{m}_{\text{da},E}(h_{\text{a},E,i} - h_{\text{a},E,o}) - \dot{m}_w h_{\text{fg},W}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{\text{da},E}(\omega_{\text{a},E,i} - \omega_{\text{a},E,o}). \quad (3)$$

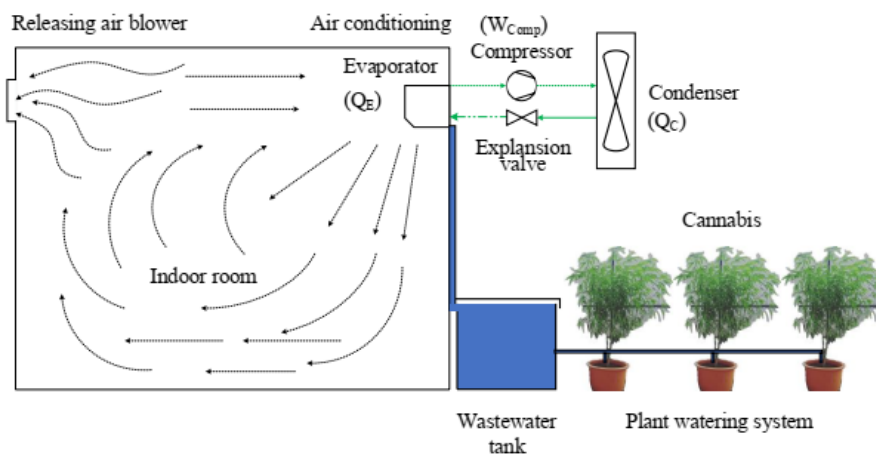


Figure 1 A schematic diagram of wastewater recovery system from air conditioning.

Methods and apparatus

The methods and apparatus of this study are as follows:

1. The suitable working fluid of air conditioning is investigated by using a first law of thermodynamic simulation. Three new environmental refrigerants of R-32, R-2452b, and R-466 are selected in this study, which are focused on an Ozone Depletion Potential impact, as shown in Table 1.

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

103

Table 1: The properties of 3 type working fluids.

Descriptions	R-32 ¹	R-452b ²	R-466a ³
Molecular mass (kg/kmol)	52.03	63.5	80.7
Critical temperature (°C)	78.11	77.1	83.8
Critical pressure (MPa)	5.78	5.22	5.91
Boiling point temperature (°C)	-51.65	-51.0	-51.7
Safety group ⁴	A2	A2	A1
Ozone Depletion Potential (ODP, R11-related)	0	0	0
Global warming potential (GWP, CO ₂ -100 y)	675	698	733

Remark: ¹ ASHRAE (2009) [9].

² Honeywell (2020) [10].

³ Atilla and Vedat (2020) [11].

⁴ A1 is nontoxicity and no flammability, A2 is nontoxicity and lower flammability.

2. The thermal simulation result is implemented the indoor room to verify the simulation and testing data. The COP and condensed wastewater from air conditioning values are investigated and compared between the simulation and testing data under the controlled conditions at a room temperature of 25 °C and a relative humidity of 50-55%.

3. The cannabis lighting set for cannabis process is developed from the comparison results. Daylight and violet light emitting diodes (LED) are used to implement the lighting set. In addition, the wavelength, spectral irradiance, and photosynthetic photon flux density (PPFD) parameters are measured by a PG100N handheld spectral PAR meter.

4. The plant watering system is also designed and constructed from the verified data to support the nursery, vegetative, and flowering stages.

Results and discussion

1. Thermal simulation

Four thermal indicators of mass of refrigerant, mass of refrigerant per unit heat output, carbon dioxide emission per mass of refrigerant, and COP are used to select the suitable working fluid in this study.

Table 2 shows comparison of the thermal simulation results under the control conditions of a room temperature of 25 °C, humidity ratio of the inlet and outlet air from evaporator of 55% and 50%, respectively. R-32 reveals the advantage points in terms of a lowest mass of refrigerant of 0.65, a lowest mass of refrigerant per unit heat output of 0.0037,

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

104

and a highest thermal COP of 7.53. From the above data, R-32 shows a low value of working fluid, which directly effects to the working fluid cost and power consumption of compressor. In addition, R-32 can save the operating cost under a same cooling capacity of 3.517 kW. While, R-452b shows a best environmental impact of 5.22 kg CO₂/kg_{ref}. Thus, the suitable working fluid in air conditioning from the simulation results is R-32.

Table 2: The properties of 3 type working fluids.

Thermal value	R-32	R-452b	R-466a
Mass of refrigerant (kg)	0.65	0.68	0.79
Mass of refrigerant per cooling capacity (kg/kJ)	0.0037	0.0044	0.0064
CO ₂ emission per mass of refrigerant (kg CO ₂ /kg _{ref})	5.78	5.22	5.91
COP (-)	7.53	7.21	6.56

2. Comparison results of thermal simulation and testing data

A Daikin commercial R-32 air conditioning model of 12,300 BTU/h (a fan coil unit model of FTKQ12SV2S and a condensing unit model of RKQ12SV2S) is chosen for experimental process in an insulator room at a sizing of width 2.4 m × long 3.4 m × high 2.5 m, as show in Figure 2. The comparison results found that the real performance of COP is 6.94, which is lower than that of the simulation result of approximately 5.71%. In addition, the condensed wastewater from R-32 air conditioning is found approximately 18.302 litre/day, which is slightly with a simulation result of 18.742 litre/day. The wastewater recovery value of approximately 18 litre/day is used to design the plant watering system in the next part.

The different values of COP and condensed water of the comparison results are occurred from the uncontrolled cooling load of cannabis room. In the simulation, the cooling load can be fixed to be 3.517 kW. On the other hand, the real testing process cannot control the cooling load as steady state.

3. Cannabis lighting set

The cannabis lighting set at a sizing of approximately 1.0 m × 1.0 m × 1.8 m is designed for four cannabis pots at each volume of approximately 12 L. One-violet LED at a power of 300 W_e and two-daylight LEDs at each power of 100 W_e are selected for generating a wavelength of approximately 600 nm, a spectral irradiance of approximately 200 mW/m²-nm, and a PPFD of approximately 100 μmol/m²-s, as shown in Figure 3. The violet LED can adjust the high level following the sizing of cannabis.

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

105

The measurement data indicates that the lighting set should be enhanced all light intensity parameters, especially violet LED. The spectral irradiance of all lighting area should be increased to be $200 \text{ mW/m}^2\cdot\text{nm}$.



Figure 2: A photograph of indoor room and air conditioning system.

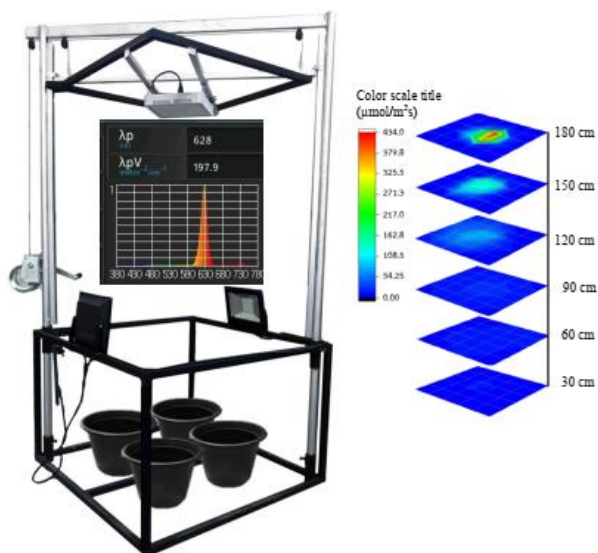


Figure 3: A prototype cannabis lighting set.

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

106

4. Wastewater recovery of air conditioning

From the thermal simulation, wastewater from the 12,300 BTU/h air conditioning at approximately 18 L/day can supply for 20 plants and 5 cannabis lighting sets. Thus, the plant watering system is designed for three modes of 24 h, 48 h, and 72 h. The control devices of Arduino board, solenoid valve, selector switch, LCD monitor, and drip emitter are used to develop the plant watering system, as shown in Figure 4.

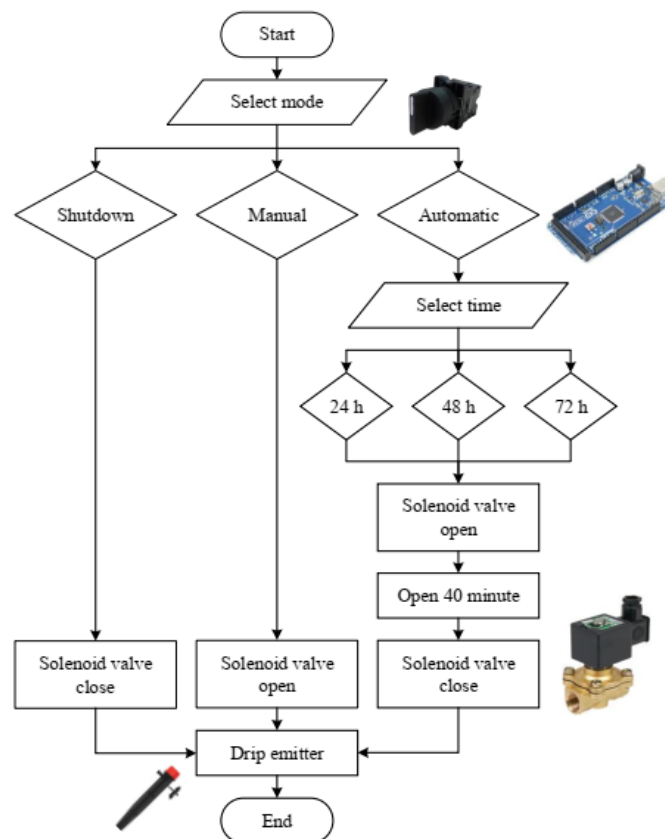


Figure 4: A conceptual design of plant watering system.

From the testing process, the plant watering system is found the error point from electrical power outage. Timer system on microcontroller board is automatically reset, which directly effects to overall plant watering time. Thus, in the next version, timer system of the plant watering system is programmed from the online internet system.

Conclusions and recommendations

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

107

From the above study results, it can be concluded as follows:

- R-32 is the suitable working fluid of wastewater recovery system from air conditioning for cannabis production in terms of the low-mass of refrigerant, low-mass of refrigerant per unit heat output, and high-thermal COP.
- The testing data from the Daikin commercial R-32 air conditioning model of 12,300 BTU/h shows nearly with the simulation results in terms of the COP of 6.94 and the condensed wastewater of 18.302 litre/day.
- The cannabis lighting set is designed at the sizing of 1.0 m \times 1.0 m \times 1.8 m, one violet LED of 300 W_e, and 2-daylight LEDs at each of 100 W_e.
- The prototype of plant watering system is developed from Arduino board, solenoid valve, selector switch, LCD monitor, and drip emitter for three modes of 24 h, 48 h, and 72 h, respectively.

For the future study, the economic (levelized product cost) and environmental (life cycle assessment, LCA) impacts will be investigated and reported in the next work.

Acknowledgements

The authors would like to thank School of Renewable Energy, Maejo University under the project to produce and develop graduates in renewable energy for ASEAN countries for graduate students (2019) for supporting testing facilities and research budget.

Abbreviations and symbols

Nomenclature

EER	energy efficiency ratio, (kW _{th} /kW _e)
h	enthalpy, (kJ/kg)
M	mass, (kg)
m	mass flow rate, (kg/s)
P	pressure, (bar)
Q	heat capacity, (kW)
T	temperature, (°C)
W	Power, (kW _e)

Abbreviations

AC	air conditioning
----	------------------

Greek

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

108

ω	humidity ratio, (kgw/kg _{da})
<i>Subscript</i>	
a	moist air
C	condenser
Comp	compressor
da	dry air
e	electricity
E	evaporator
f	liquid fluid
g	vapor fluid
i	inlet
o	outlet
ref	refrigerant
th	thermal
W	water

References

- Vanhove W., Damme P.V. and Meert N. (2011). Factors determining yield and quality of illicit indoor cannabis (*Cannabis* spp.) production. *Forensic Science International* 212: 158-163.
- Zhang Y., Kacira M and An L. (2016). A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system. *Biosystems Engineering* 147: 193-205.
- Niam AG., Muharam TR., Widodo S., Solahudin M and Sucahyo L. (2018). CFD simulation approach in determining air conditioners position in the mini plant factory for shallot seed production. *The 10th International Meeting of Advances in Thermofluids*. 2062: 020017.
- Lim, T. G. and Kim, Y. H. (2014). Analysis of airflow pattern in Plant Factory with Different Inlet and Outlet Locations using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Biosystems Engineering* 39(4): 310-317.
- Yongson O., Badruddin I. A., Zainal Z.A. and Narayana A. (2007). Airflow analysis in an air conditioning room. *Building and Environment* 42: 1531-1537.
- Chaiyat, N. and Kiatsiriroat, T. (2014). Study on Thermal Performance of R-32 Air-conditioner. *Engineering Journal Chiang Mai University* 22(2): 38-46.
- Taira, S., Haikawa, T. and Minamida, T. (2016). Evaluation of performance of heat pump using

บทความทางวิชาการที่ 2 (ต่อ)

*The Third International Conference on Environmental Development Administration 2020
"Environmental Struggles and the Way Forward"*

109

R32 and HFO-mixed refrigerant by refrigeration cycle simulation and loss analysis.
International Refrigeration and Air Conditioning Conference: 1737.

Dalkilic, A.S. and Wongwises, S. (2010). A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37: 1340-1349.

ASHRAE Handbook fundamentals, 2009. Properties of refrigerant.

Honeywell. Solstice L41y (R-452B). <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-l41y/>. Accessed date: 20 August 2020.

Atila G. D. and Vedat O. (2020). Energetic performance analysis of R466A as an alternative to R410A in VRF systems. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.04.003>.

บทความทางวิชาการที่ 3

- ชื่อผู้แต่ง: Watchara Klancoowat
Nattaporn Chaiyat
Preeda Nathewet
- ชื่อบทความ: Wastewater Recovery of Air Conditioning for Indoor Cannabis
Production
- ชื่อการประชุมวิชาการ: The 15th National and International Sripatum University
Conference: Research and Innovations to Sustainable
Development
- หน้าที่ตีพิมพ์: 341-350
- สถานที่จัดประชุม: Sripatum University
- วันที่จัดประชุม: 18 December 2020



บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)



This is to certify that

Watchara Klancoowat, Nattaporn Chaiyat, Preeda Nathewet

have successfully completed the paper presentation

**at the 15th National and International Sripatum University
Conference (SPUCON2020): Research and Innovations
to Sustainable Development**



on 18th December 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read "R. Pookayaporn".

Dr. Rutchaneeporn Pookayaporn Phukkamarn

President

Sripatum University, Thailand

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

WASTEWATER RECOVERY OF AIR CONDITIONING FOR INDOOR CANNABIS PRODUCTION

Watchara Klancoowat¹, Nattaporn Chaiyat^{1,3*} and Preeda Nathewet^{2,3}

¹ School of Renewable Energy, Maejo University

² Faculty of Agricultural Production, Maejo University

³ Excellence Center on Environmental Friendly Smart Agriculture and Renewable Energy
Technology (ECoT), Maejo University

*Corresponding E-mail: benz178tii@hotmail.com

ABSTRACT

This research studies an optimal process of wastewater recovery from air conditioning for indoor cannabis production. The thermal selection working fluid, computational fluid dynamics (CFD), and microcontroller techniques are used to design a wastewater recovery system. Indoor cannabis room at a sizing of 2.4 m × 3.4 m × 2.5 m is used to contain five lighting sets at each sizing of 1.0 m × 1.0 m × 1.8 m, which consists of one-violet light emitting diodes (LED) at a power of 300 W_e and two-daylight LEDs at each power of 100 W_e. A commercial of R-32 air conditioning at a cooling capacity of 12,300 BTU/h (3.6 kW) is selected from the optimal thermal behavior. The CFD simulation also supports the thermal result in terms of airflow pattern, pressure drop, and temperature at an air flow rate of 0.182 m³/s, an average pressure of 101.322 kPa, and an average room temperature of 25.41 °C, respectively. Wastewater recovery at a volume of 18 L/day is supplied to 20 cannabis plants by using Arduino board, solenoid valve, and drip emitter. These controlled systems can produce a harvest time of approximately 4 months, which is lower than a greenhouse system of approximately 6 months.

Keywords: Wastewater recovery; Air conditioning; Cannabis production; Computational fluid dynamics

1. Introduction

Smart farming topic is a popular technology and a hot issue in Thailand, especially for the high-value medicinal plant. Internet of things (IOT) is used to control and monitoring the optimal conditions for plant propagation and cultivation such as air temperature, relative humidity, lighting, and fertilizer. Cannabis is promoted for using in the medical process. Indoor greenhouse is general technique for cannabis cultivation. The advantage of this method is low-investment cost, low-operating cost from solar energy, and low-maintenance cost. However, the disadvantage in terms of the uncontrollable of air temperature and relative humidity, light

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

intensity, wind speed, and harvest time. Thus, a new concept of wastewater recovery from indoor cannabis cultivation is presented in this study.

Various research works of design, simulation, and construction of indoor cultivation technologies were presented such as Vanhove et al. [1] reported a computational fluid dynamics (CFD) method to evaluate the suitable condition for indoor planting, which was corresponded with Zhang et al. [2], Niam et al. [3], and Lim and Kim [4]. The CFD is used to analyze the air contribution and uniform, sizing and position of air conditioning, and reducing harvest time. In addition, Yongson et al. [5] used the CFD technique to design the optimal condition of operating cost for plant cultivation. In the topic of air conditioning simulation, Chaiyat and Kiatsiriroat [6] compared thermal performance of R-32 and R-410a air conditioning units by testing process under the controlled conditions. R-32 refrigerant revealed a higher thermal behavior of approximately 5%. Taira et al. [7] presented heat pump performance by using the mixed refrigerants of R-32:R-125:R-1234yf (67%:7%:26% by weight) and R-32:R-1234ze(E) (70%:30% by weight) to compare with the pure refrigerants of R-410a and R-32. Both mixed fluids could replace instead of R-410a and R-32 at a lower energy efficiency ratio (EER) compared with R-32 working fluid. Dalkic and Wongwises [8] simulated mixed refrigerants of R-152a, R-32, R-290, R-1290, R-1270, R-600, and R-600a to replace instead of the banned refrigerant of R-12 and R-22. It found that R-290:R-600a at a mass ratio of 40%:60% could be used in the R-12 vapor compression air conditioning, and R-290:R-1270 at a mass ratio of 20%:80% could be replaced in the R-22 unit.

From the above study works, it could be found that the CFD and thermal simulation techniques were popularly used in the optimization process of air conditioning. These methods were not represented for indoor cannabis production. Thus, the objective of this study is to investigate the optimal conditions for cannabis cultivation by using the CFD and thermal simulation methods. In addition, a new conceptual design of the control and monitoring systems are also developed for automatic plant watering system from wastewater of air conditioning.

2. Conceptual framework

Figure 1 shows a schematic diagram of wastewater recovery system from air conditioning. Cooling load (Q_c) from cannabis production in the insulator room releases heat into an evaporator of air conditioning (fan coil unit). After that heat from the returned air transfers to refrigerant, which changes phase from the mixture (liquid and vapor) to be the pure vapor. This fluid is increased pressure and temperature by a compressor ($W_{comp,e}$), which is driven from electricity. Then, the high-temperature fluid rejects heat to the ambient temperature at a condenser (condensing unit, Q_c). The vapor refrigerant is condensed to be the pure liquid refrigerant, and sent through an expansion valve to be the mixture fluid. After that the new cycle of air conditioning is restarted. At the evaporator, in the transfer heat between the moist air and refrigerant, the condensed water is found as wastewater from air conditioning. A wastewater tank is used to storage the condensed water, and supplied through a plant watering system for cannabis production. An air ventilation system in the cannabis room is controlled by blower of the evaporator, and rejects a part of moist air by a releasing air blower. In this study, this waste fluid is considered by

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

using the thermal simulation and CFD techniques to select the suitable refrigerant for indoor cannabis process. The cooling efficiency of air conditioning unit in terms of EER_{AC} can be defined as shown follows:

$$EER_{AC} = \frac{Q_E}{W_{Comp,e}}, \quad (1)$$

$$Q_E = \dot{m}_{da,E} (h_{a,E,i} - h_{a,E,o}) - \dot{m}_w h_{fg,w}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{da,E} (\omega_{a,E,i} - \omega_{a,E,o}). \quad (3)$$

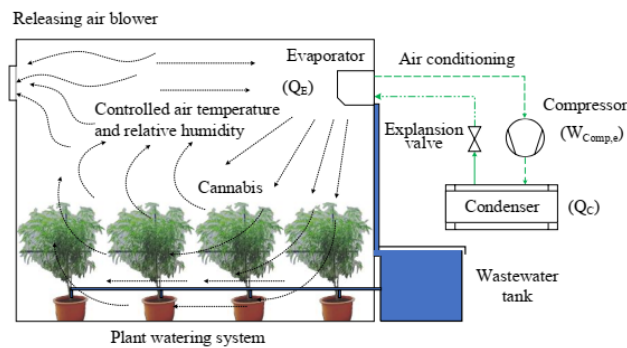


Figure 1 A schematic diagram of wastewater recovery system from air conditioning.

3. Methods and apparatus

The methods and apparatus of this study are as follows:

3.1 The indoor cannabis room and lighting set are designed by using a Solidworks program [9] in form of three dimensions (3D) model.

3.2 The air ventilation in the cannabis room is simulated by using the CFD technique from the Solidworks program (flow simulation). The airflow pattern, pressure drop, and temperature parameters in the controlled room are considered to select the suitable size of air conditioning. A Daikin R-32 commercial types are used to refer the specification data, as shown in Table 1. The CFD process is assumed under the initial conditions of a room temperature of approximately 25 °C and a relative humidity of 55%.

Table 1 Specifications of commercial air conditioning [10].

Cooling capacity (BTU/h)	Volume flow rate (m ³ /s)
9,200	0.165
12,300	0.187
15,000	0.197
18,100	0.215

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

3.3 The thermal and CFD simulation results are used to design the microcontroller system of plant watering system.

3.4 The new design concept of indoor cannabis room, air conditioning, lighting set, and of plant watering system from the previous part are constructed and tested to evaluate the system performance.

4. Results and discussion

4.1 Conceptual design of indoor cannabis room

A 3D drawing of indoor cannabis room is illustrated in Figure 2. Cannabis room at a sizing of approximately 2.4 m × 3.4 m × 2.5 m is designed by using insulator from Isowall at a thickness of 2 inch. The optimal sizing chamber of cannabis room is designed for 1-unit small split type air conditioning unit at a sizing lower than 24,000 BTU/h. In addition, lighting set at a sizing of approximately 1.0 m × 1.0 m × 1.8 m is developed for using with four cannabis pots at each volume of approximately 12 L, which consists of one-violet light emitting diodes (LED) at a power of 300 W_e and two-daylight LEDs at each power of 100 W_e. The LED set is specially designed for generating a wavelength of approximately 600 nm, a spectral irradiance of approximately 200 mW/m² × nm, and a photosynthetic photon flux density (PPFD) of approximately 100 μmol/m² × s. Air conditioning is installed with the wall at a high of 2.0 m, which the suitable sizing of cooling unit will be optimized in the next part. The moist air is managed by a 6 inch-releasing air blower at a power of 16 W_e, that installed at the opposite of cooling unit.

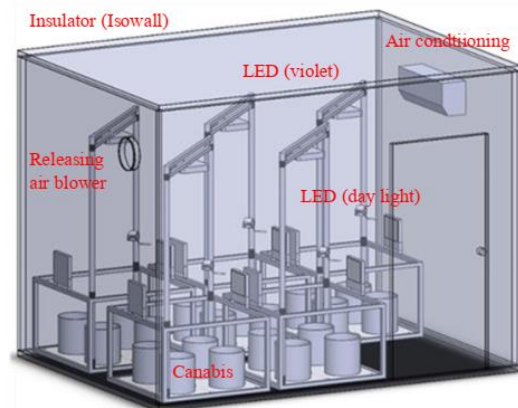


Figure 2 A 3D drawing of indoor cannabis room.

4.2 CFD

Four Daikin commercial air conditioning models are used to investigate the suitable sizing cooling unit, as shown in Figures 3-6. An air conditioning of 9,200 BTU/h reveals a low-air ventilation and nonuniformly. In

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

the cases of air conditionings at the cooling capacity of 15,000 BTU/h and 18,100 BTU/h, the results imply that a high-air ventilation (nonuniformly) is found from the over size of both air conditioning units. Thus, the optimal size of air conditioning in this study is a 12,300 BTU/h model, as presented in Figure 4. The air flow rate of approximately 0.212 m³/s or 0.19 m/s is suitable for the indoor cannabis room of 2.4 m × 3.4 m × 2.5 m.

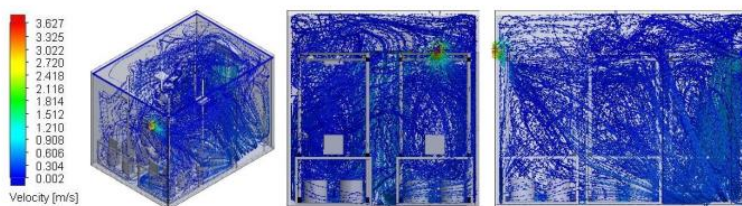


Figure 3 An air ventilation of 9,200 BTU/h-air conditioning.

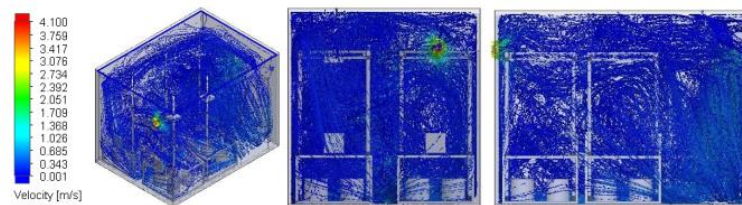


Figure 4 An air ventilation of 12,300 BTU/h-air conditioning.

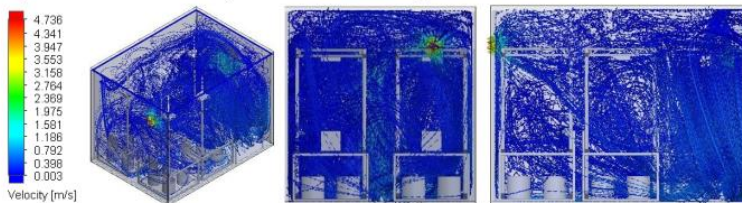


Figure 5 An air ventilation of 15,000 BTU/h-air conditioning.

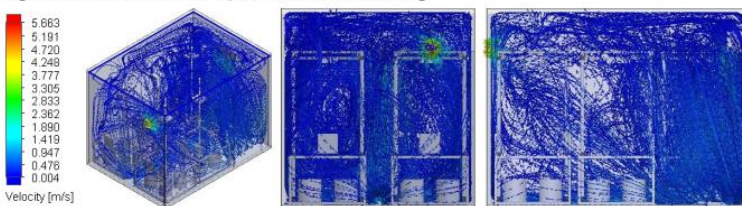


Figure 6 An air ventilation of 18,100 BTU/h-air conditioning.

The 12,300 BTU/h model also shows an average room pressure of 101.322 kPa, as shown in Figure 7, which is nearly with the environmental pressure of 101.325 kPa. In the temperature profile in cannabis room is

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

found that a LED temperature is approximately 49.25 °C, while an average air temperature is approximately 25.41 °C, as shown in Figure 8.

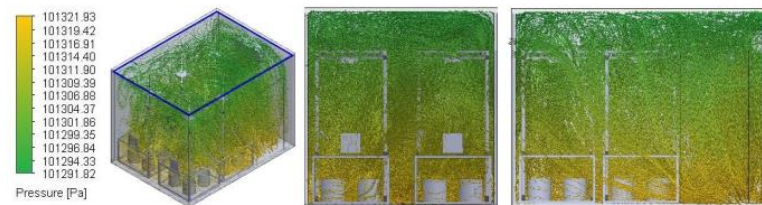


Figure 7 An average room pressure of 12,300 BTU/h-air conditioning.

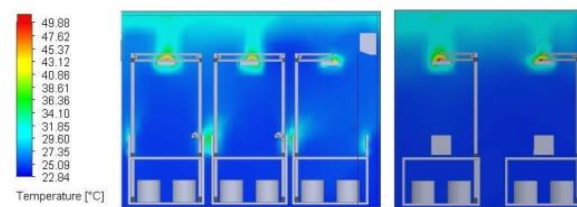


Figure 8 A temperature profile of 12,300 BTU/h-air conditioning.

4.3 Wastewater recovery of air conditioning

From the thermal simulation, wastewater from the 12,300 BTU/h air conditioning is approximately 18.302 L/day or 0.76 L/h. This volume of water can be used to supply for the 12 L-cannabis pot of 20 plants (5 lighting sets). Thus, the conceptual design of control part for plant watering system is set as three modes of 24 h, 48 h, and 72 h, respectively. These setting times are programed for various kinds of cannabis, as presented in Figure 9. The control elements of Arduino board, solenoid valve, selector switch, LCD monitor, and drip emitter are selected to develop plant watering system.

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

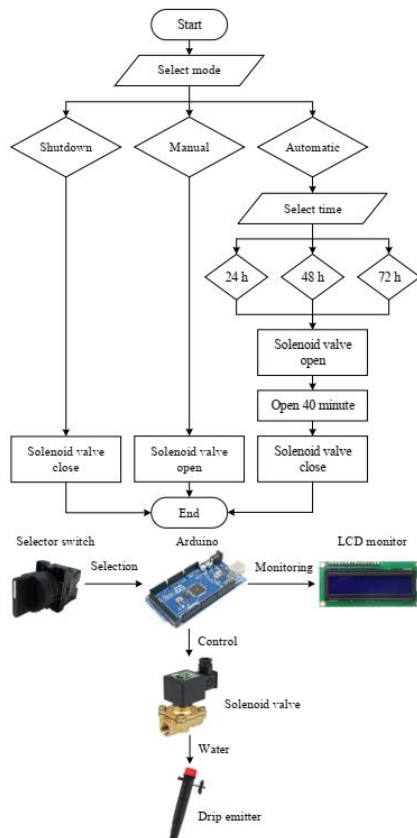


Figure 9 The conceptual design and control devices of plant watering system.

4.4 Prototype of wastewater recovery of air conditioning

A prototype of wastewater recovery from air conditioning is illustrated in Figure 10. All conceptual designs of indoor cannabis room, air conditioning, lighting set, and plant watering system are considerably performed. The cannabis production from the controlled cultivation can produce output production at a harvest time of 4 months, which is lower than the cannabis greenhouse at approximately 2 months (6 months for general process of greenhouse system).

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020)

18th December 2020

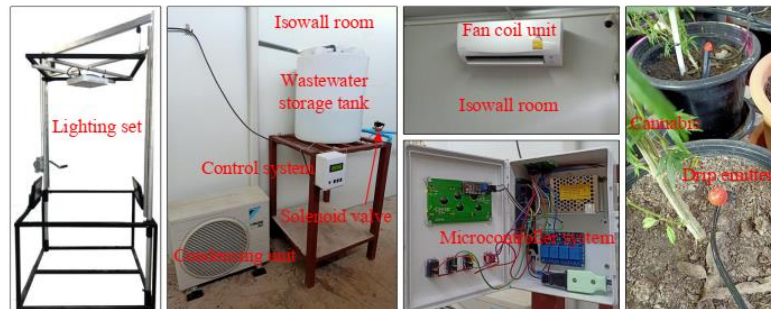


Figure 10 A prototype set of wastewater recovery of air conditioning.

5. Conclusions and recommendations

From the above study results, it can be concluded as follows:

- The cannabis room of 2.4 m x 3.4 m x 2.5 m is design, which uses for the lighting set of 1.0 m x 1.0 m x 1.8 m, cannabis pot of 12 L, violet LED of 300 W_e, and 2-daylight LEDs at each of 100 W_e.
- The optimal size of air conditioning is 12,300 BTU/h (3.6 kW) model for supplying the air flow rate of 0.212 m³/s, average pressure of 101.322 kPa, average air temperature of 25.41 °C.
- The 12,300 BTU/h air conditioning generates the wastewater of 18.302 l/day, which is suitable for supply for the 12 L-cannabis pot of 22 plants. The prototype of plant watering system is developed from Arduino board, solenoid valve, selector switch, LCD monitor, and drip emitter.
- The controlled system can produce the harvest time of approximately 4 months, which is lower than the greenhouse system of approximately 6 months.

Acknowledgements

The authors would like to thank School of Renewable Energy, Maejo University under the project to produce and develop graduates in renewable energy for ASEAN countries for graduate students (2019) for supporting testing facilities and research budget.

Abbreviations and symbols

Nomenclature

EER	energy efficiency ratio, (kW _d /kW _e)
h	enthalpy, (kJ/kg)
M	mass, (kg)
\dot{M}	mass flow rate, (kg/s)
P	pressure, (bar)
Q	heat capacity, (kW)
T	temperature, (°C)
W	Power, (kW _e)

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

Abbreviations

AC air conditioning

Greek

ω humidity ratio, (kg_w/kg_a)

Subscript

a moist air

C condenser

Comp compressor

da dry air

e electricity

E evaporator

f liquid fluid

g vapor fluid

i inlet

o outlet

th thermal

W water

References

- Chaiyat, N. and Kiatsirirot, T. (2014). Study on Thermal Performance of R-32 Air-conditioner. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 22(2), 38-46.
- Daikin. (2020). *Specification data of Daikin air conditioning*. Available online: <https://www.daikin.co.th/product/residential/room-air/>.
- Dalkilic, A.S. and Wongwises, S. (2010). A performance comparison of vapour-compression refrigeration system using various alternative refrigerants. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1340-1349.
- Lim, T. G. and Kim, Y. H. (2014). Analysis of airflow pattern in Plant Factory with Different Inlet and Outlet Locations using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Biosystems Engineering*, 39(4): 310-317.
- Niam AG., Muharam TR., Widodo S., Solahudin M and Suchahyo L. (2018). CFD simulation approach in determining air conditioners position in the mini plant factory for shallot seed production. The 10th International Meeting of Advances in Thermofluids. 2062: 020017.
- Solidworks. (2018). *Solidworks 2018*, License of Maejo University.
- Taira, S., Haikawa, T. and Minamida, T. (2016). Evaluation of performance of heat pump using R32 and HFO-mixed refrigerant by refrigeration cycle simulation and loss analysis. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 1737.

บทความทางวิชาการที่ 3 (ต่อ)

The 15th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2020) 18th December 2020

Vanhove W., Damme P.V. and Meert N. (2011). Factors determining yield and quality of illicit indoor cannabis (Cannabis spp.) production. *Forensic Science International*, 212, 158-163.

Yongson O., Badruddin I. A., Zainal Z.A. and Narayana A. (2007). Airflow analysis in an air conditioning room. *Building and Environment*, 42, 1531-1537.

Zhang Y., Kacira M and An L. (2016). A CFD study on improving air flow uniformity in indoor plant factory system. *Biosystems Engineering*, 147, 193-205.

บรรณานุกรม

- Brighenti V., Pellati F., Steinbach M., Maran D. and Benvenuti S. (2017). Development of a new extraction technique and HPLC method for the analysis of non-psychoactive cannabinoids in fibre-type Cannabis sativa L. (hemp). *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 143, 228-236.
- Chaiyat, N. (2019). *Thermal Renewable Energy Technology*. Chaing Mai, Thailand: Maejo University.
- Daikin. (2020). Specification data of Daikin air conditioning. Available online: <https://www.daikin.co.th/product/residential/room-air/>.
- Engineering. Challenges of Making Solar Energy Economical, Online: <https://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/19841/Challenges-of-Making-Solar-Energy-Economical.aspx>, Accessed: 11 December 2019.
- Jin, D., Jin, S.X. and Chen, J. (2019). Cannabis Indoor Growing Conditions, Management Practices, and Post-Harvest Treatment: A Review. *American Journal of Plant Sciences*, 10, 925-946. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.106067>.
- Marijuanasubjects. Anatomy of the Cannabis Plant, Online: <https://marijuanasubjects.com/2017/04/26/anatomy-of-the-cannabis-plant/>, Accessed: 10 December 2019.
- Medthai. กัญชาสรรพคุณและประโยชน์ของต้นกัญชา 30 ข้อ, Online: <https://medthai.com/%E0%B8%81%E0%B8%B1%E0%B8%8D%E0%B8%8A%E0%B8%B2>, Accessed: 10 December 2019.
- Merrill F., Lu N., Yamaguchi T., Takagaki M., Maruo T., Kozai T. and Yamori W. (2016). Next evolution of agriculture: A review of innovations in plant factories. *Handbook of Photosynthesis*, 723-740.
- NIST (National institute of standards and technology), Inc. (2018). Refprop version 10: Customer number 4 0 7 5 4, Thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures software, America.

- Lu N., Maruo T., Johkan M., Hohjo M., Tsukagoshi S., Ito Y., Ichimura T. and Shinohara Y. (2012). Effects of Supplemental Lighting with Light-Emitting Diodes (LEDs) on Tomato Yield and Quality of Single-Truss Tomato Plants Grown at High Planting Density. *Environ. Control Biol.* 50:63-74.
- Romano L.L. and Hazekamp A. (2013). Cannabis Oil: chemical evaluation of an upcoming cannabis-based medicine. *Cannabinoids*, 1(1), 1-11.
- Rosenthal E. (2010). Marijuana plant life cycle. *Marijuana grower's handbook*. 4 th ed. Canada: Quick Trading Co. 85-98
- Schulze S.C., Barreira A., Pereira G.C., Perales A. and Varela C.S. (2014). Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. *Trends in Biotechnology*, 32, 422-430.
- SEOS. Understanding Spectra from the Earth, Online: <https://seos-project.eu/earthspectra/earthspectra-c04-p08.html>, Accessed: 28 February 2020.
- Seed city. BCN Critical XXL autoflower cannabis seed. <https://www.seed-city.com/seed-stockers/bcn-critical-xxl-autoflower>. Accessed date: 1 December 2020.
- Seedtockers. BCN Critical XXL autoflower. <https://www.seedtockers.com/en/bcn-critical-xxl-autoflower-feminized-cannabis-seed>. Accessed date: 1 December 2020.
- Zamnesia. Gorilla Glue (Zamnesia Seed) feminized. <https://www.zamnesia.com/4532-zamnesia-seed-gorilla-glue-feminized.html>. Accessed date: 1 December 2020.
- กระแสรู้ อานอาชา และโกมล ประชาญกัตถุญ. (2559). การศึกษาต้นทุนและผลตอบแทนของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรม, วารสารเศรษฐศาสตร์รามคำแหง, ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2559; 44-52.
- ธนากร น้ำหอมจันทร์ และอติกร เสรีพัฒนานนท์. (2557). ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร่ดินแบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกะแบบโปรแกรมได้. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, ปีที่ 8 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2557; 98-111.
- วีระ พันอินทร์, สมชาย มณีวรรณ และสุริยงค์ ประชาเชียว. (2557). การประเมินวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิง RDF-5 ที่มีส่วนประกอบของขยะที่ผ่านกระบวนการบำบัดเชิงกลชีวภาพและกากตะกอนน้ำมันดิบ. *Naresuan University Journal: Science and Technology* 2014, 22(1); 138-148.
- วรวรรณ ทองสุข. (2563). กัญชากับการศึกษาเกษตร. วารสารเศรษฐศาสตร์อุตสาหกรรม, ปีที่ 19 ฉบับที่ 1

มกราคม-เมษายน 2563; 144-154.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, กระทรวงพลังงาน. (2560). แผนบูรณาการพลังงานระยะยาว (TIEB). ระบบออนไลน์: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb>, เข้าถึงเมื่อ: 10 ธันวาคม 2562.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายวัชระ กลั่นสุวรรณ
เกิดเมื่อ	1 สิงหาคม 2539
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	-

