การประเมินความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิตและแนวทางการจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือนบนมิติสิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคม

ชินพัฒน์ ชูเมือง[1*], และ นิธิดา นาคะปรีชา[2]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน วิทยาลัยสหศาสตร์บรูณาการฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
[2]สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
** Corresponding author: 6680022420@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์มีบทบาทเพิ่มขึ้นในฐานะทางเลือกการผลิตไฟฟ้าที่สนับสนุนความยั่งยืน แต่หลักฐานเชิงประจักษ์ที่ยืนยันครบทั้ง 3 มิติยังมีจำกัด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความยั่งยืนของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผลิตไฟฟ้าในครัวเรือนครอบคลุมมิติสิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคม เพื่อระบุประเด็นที่อาจส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ และนำไปสู่แนวทางการจัดการที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ทำการประเมินตลอดวัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอนขนาด 1 kWp ระยะเวลาการใช้งาน 25 ปี และการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งานตามแนวทาง Full recovery end of life photovoltaic โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด (2) ต้นทุนด้านการเงินโดยไม่รวมต้นทุนแฝงและต้นทุนทางอ้อม และ (3) ผลกระทบทางสังคมโดยพิจารณาผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักคือพนักงานและผู้บริโภค ซึ่งพบว่าผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 0.016 kg CO_2 eq/kWh ต่ำกว่าค่าคาดการณ์จากโครงสร้างพลังงานแบบผสมของโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อบรรลุเป้าหมาย CN50 ถึงร้อยละ 77 ผลกระทบความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดมีค่า 22.95 kg 1,4-DCB ใกล้เคียงกับค่าการปล่อยสารพิษต่อแหล่งน้ำจืดทั่วโลกเฉลี่ยต่อคนต่อปี ในด้านการเงินต้นทุนอยู่ที่ 2.49 THB/kWh ต่ำกว่าค่าไฟฟ้าปัจจุบันและค่าไฟฟ้าที่คาดการณ์ในปี ค.ศ.2050 และผลการประเมินด้านสังคมอยู่ในเกณฑ์ระดับดี ซึ่งจากผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและต้นทุนที่ต่ำกว่าทางเลือกการผลิตไฟฟ้าอื่น กอปรกับผลกระทบทางสังคมที่อยู่ในเกณฑ์ดีนี้ สะท้อนศักยภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนครบทั้ง 3 มิติ

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ / การประเมินวัฏจักรชีวิต / ความยั่งยืน / การผลิตไฟฟ้าในครัวเรือน / ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคม

Life cycle sustainability assessment and management approaches for residential Solar photovoltaic across environmental financial and social dimensions

Chinnapat Choomueang [1 *], and Nitida Nakapreecha [2]

[1] Department of Energy Technology and Management, Collage of Interdisciplinary and Integrative studies, Chulalongkorn University, Wang Mai Subdistrict, Pathumwan district, Bangkok, Thailand

[2] Energy Research Institute, Chulalongkorn University, Wang Mai Subdistrict, Pathumwan district, Bangkok, Thailand

**Corresponding author: 6680022420@student.chula.ac.th*

Abstract

Solar photovoltaics are increasingly recognized as an alternative electricity generation option that supports sustainability however, empirical evidence covering all three dimensions of sustainability remains limited. This study aims to assess the sustainability of residential photovoltaic electricity generation across environmental financial and social dimensions and to identify significant impacts and inform appropriate management approaches. A life cycle assessment was conducted for a 1 kWp multi-Si PV with a 25-year operational lifetime, including end of life management based on full recovery end of life photovoltaic approach. The assessment comprised three components (1) environmental impacts in terms of climate change and freshwater ecotoxicity, (2) financial costs excluding hidden and indirect costs, and (3) social impacts focusing on workers and consumers as the main stakeholders. The result indicate that the climate change impact was 0.016 kg CO_2 eq/kWh, which is approximately 77% lower than the projected valued based on the grid electricity energy mix required to achieve the CN50 target. Freshwater ecotoxicity was 22.95 kg 1,4-DCB, comparable to the global annual average freshwater toxic emissions per capita. The financial cost was 2.49 THB/kWh, lower than current electricity price and the projected electricity price in 2050. Social performance assessment showed as “Good”. These findings demonstrate the strong potential of solar photovoltaics to support sustainable energy development across all three dimensions.

Keywords: Photovoltaics / Life cycle assessment / Sustainability / Residential electricity generation / Environmental, financial, and social impacts

1. บทนำ

เพื่อแก้ไขปัญหาโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอันมีสาเหตุหลักจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของมนุษย์ ประชาคมโลกจึงร่วมกันกำหนดข้อตกลงระหว่างประเทศ เช่น ความตกลงปารีส รวมถึงการตั้งเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจก อาทิ carbon neutrality และ net zero emissions

ในประเทศไทย ภาคพลังงานและการผลิตไฟฟ้าเป็นหนึ่งในแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลัก อีกทั้งมีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจกระทบเป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และความยั่งยืนทางพลังงาน ภาครัฐจึงส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด โดยเฉพาะไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (Power Development Plan: PDP) และมาตรการรับซื้อไฟฟ้าภาคประชาชน อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อกังวลด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้ รวมถึงความคุ้มค่าและระยะเวลาในการคืนทุน

การศึกษานี้จึงทำการประเมินความยั่งยืนของเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดวัฏจักรชีวิตใน 3 มิติ ได้แก่ สิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคม ผ่านการใช้เครื่องมือ Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) ครอบคลุมตั้งแต่การผลิต การใช้งาน จนถึงการจัดการหลังสิ้นสุดการใช้งาน ผลการประเมินจะช่วยระบุผลกระทบสำคัญและเสนอแนวทางจัดการเซลล์แสงอาทิตย์อย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผลิตไฟฟ้าในครัวเรือนอย่างครอบคลุมทั้ง 3 มิติ สิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคม
2. เพื่อวิเคราะห์และระบุจุดที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ (significant impact hotspots) ของวัฏจักรชีวิต
3. เพื่อเสนอแนวทางการจัดการเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือนอย่างยั่งยืนในอนาคต บนพื้นฐานของผลกระทบการประเมินวัฏจักรชีวิต

3. ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการประเมินความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือนโดยครอบคลุมทั้ง 3 มิติ สิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคม โดยมีขอบเขตดังนี้

1. ขอบเขตผลิตภัณฑ์ พิจารณาบนพื้นฐานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน (multi-Si PV) ขนาดติดตั้ง 1 กิโลวัตต์ (kWp) โดยมีลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงในการศึกษา

ลักษณะเฉพาะ	รายละเอียด
ขนาดของแผง	1.6 ตารางเมตร
น้ำหนักแผงไม่รวมกรอบ	11.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
กรอบอลูมิเนียม	อลูมิเนียม 2.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
จำนวนเซลล์ต่อแผง	60 เซลล์ (156 x 156 มิลลิเมตร)
ประสิทธิภาพของแผง	ร้อยละ 18

2. ขอบเขตของวัฏจักรชีวิต ครอบคลุมกระบวนการผลิต ขนส่ง การติดตั้ง การใช้งานการบำรุงรักษา ตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ย 25 ปี และรวมถึงการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน

3. ขอบเขตการประเมินและการวิเคราะห์ ประเมินครอบคลุม 3 มิติหลักความยั่งยืนตาม Toward life cycle sustainability assessment (UNEP and SETAC Life Cycle Initiative) ค.ศ. 2011 [1] ร่วมกับการประเมินทางสังคมตาม A guide to social return on investment (The SROI Network) ค.ศ. 2012 [2] แบ่งเป็น
   3.1 มิติสิ่งแวดล้อม: ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอ้างอิงมาตรฐาน ISO 14040 และ ISO 14044 โดยใช้วิธีการ ReCiPe (H) ในระดับ midpoint ประเมินเฉพาะผลกระทบกลุ่มการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) และผลกระทบกลุ่มความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (ecotoxicity)
   3.2 มิติการเงิน: ประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต โดยพิจารณาเฉพาะต้นทุนทางตรง (direct cost) ครอบคลุมต้นทุนในกระบวนการผลิต การติดตั้ง การใช้งาน การบำรุงรักษา และการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ไม่รวมต้นทุนแฝงหรือต้นทุนทางอ้อมอื่น ๆ เช่น ต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม ต้นทุนค่าเสียโอกาส เป็นต้น
   3.3 มิติสังคม: ประเมินผลตอบแทนทางสังคมเพื่อสะท้อนผลกระทบเชิงบวกในมิติสังคม โดยพิจารณาผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย 2 กลุ่ม ได้แก่ พนักงาน และผู้บริโภค

4. วิธีการศึกษา

การประเมินนี้มุ่งเน้นความยั่งยืนในภาพรวม โดยอาศัยพื้นฐานแนวคิดเชิงวัฏจักรชีวิตควบคู่กับกรอบการประเมินผลกระทบตาม 3 เสาหลักของความยั่งยืน ได้แก่ (1) การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม (2) การประเมินต้นทุนด้านการเงิน และ(3) การประเมินผลตอบแทนทางสังคม จากนั้นผลของการประเมินในแต่ละมิติจะถูกสังเคราะห์และแปลผลร่วมกันเพื่อสะท้อนถึงความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจัดหาแนวทางในการจัดการอย่างยั่งยืนในอนาคต

4.1 ประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอาศัยการประเมินตลอดวัฏจักรชีวิต LCA ตามมาตรฐาน ISO 14040 และ ISO 14044 โดยอ้างอิงจากกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศจีนเป็นหลัก เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตสำคัญที่สะท้อนบริบทจริงของการใช้งานในประเทศไทย กำหนดระยะเวลาการใช้งานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 25 ปี และการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งานตามแนวทาง Full recovery end of life photovoltaic (FRELP) อิงตามเอกสารงานวิจัย [3]

4.1.1 รวบรวมข้อมูล

ข้อมูลในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งตามช่วงวัฏจักรชีวิตได้ 3 ระยะ คือ (1) ระยะการผลิต (2) ระยะการใช้งานและบำรุงรักษา โดยอ้างอิงข้อมูลจากรายงานวิจัยขององค์การพลังงานระหว่างประเทศ (International energy agency: IEA) [4] และ (3) ระยะการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน ตามแนวทาง FRELP อ้างอิงจากงานวิจัย [3]

ข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยปัจจัยขาเข้า (วัตถุดิบ พลังงานและสาธารณูปโภค) ผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์พลอยได้ มลพิษที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน ซึ่งเมื่อรวบรวมมาแล้วนำมาจัดทำเป็นตารางบัญชีรายการวัฏจักรชีวิต (life cycle inventory: LCI) โดยมีการปรับข้อมูลให้สอดคล้องกับหน่วยการทำงาน (functional unit) เพื่อใช้ในการประเมินผลในขั้นตอนถัดไป

4.1.2 การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตดำเนินการโดยนำข้อมูล LCI มาคำนวณด้วยโปรแกรม SimaPro version 10.2.0.2 และเลือกใช้วิธีการประเมินแบบ ReCiPe 2016 Midpoint (H) ในการคัดเลือกหมวดหมู่ผลกระทบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ประเมิน 2 หมวดหมู่หลัก ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) และ

(2) ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด (freshwater ecotoxicity) โดยรายงานผลการประเมินในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO_2 eq) และ กิโลกรัมเทียบเท่า 1,4-ไดคลอโรเบนซีน (kg 1,4-DCB) ตามลำดับ

4.2 ประเมินต้นทุนด้านการเงินตลอดวัฏจักรชีวิต

การประเมินต้นทุนการเงินตลอดวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลต้นทุนการผลิต การติดตั้ง การใช้งานและการบำรุงรักษา รวมถึงต้นทุนการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน จากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำมาวิเคราะห์ผ่านการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (life cycle cost analysis: LCCA)

4.2.1 รวบรวมข้อมูล

ข้อมูลต้นทุนในวัฏจักรชีวิตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจำแนกตามวัฏจักรชีวิตเป็น 3 กลุ่ม คือ

(1) ต้นทุนในกระบวนการผลิต อ้างอิงจาก [5] ซึ่งประเมินด้วยแบบจำลองวิธี bottom-up manufacturing cost model โดยใช้สมมติฐานของโรงงานผลิตที่ตั้งอยู่ในเอเชียเป็นฐานในการคำนวณต้นทุนในแต่ละขั้นตอนการผลิต

(2) ต้นทุนการติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษา โดยอ้างอิงข้อมูลจาก [6] [7] ซึ่งมีการทำแบบจำลองในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งระบบสำหรับที่อยู่อาศัย เชิงพาณิชย์ขนาดเล็ก และขนาดใหญ่

(3) ต้นทุนการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งาน จาก [3] โดยใช้แนวทาง FRELP ซึ่งเป็นกระบวนการที่ออกแบบให้สามารถรีไซเคิลวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้

4.2.2 การประเมินต้นทุนการเงิน

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตกำหนดมุมมองการวิเคราะห์ในฐานะผู้บริโภค เพื่อให้สามารถพิจารณาโครงสร้างต้นทุนตามกรอบระยะเวลาตลอดวัฏจักรชีวิตได้อย่างชัดเจน โดยต้นทุนในกระบวนการผลิตและต้นทุนการติดตั้งทั้งหมดจัดเป็นต้นทุนเริ่มต้น (capital expenditure: CAPEX) และคำนวณในปีที่ 0 ขณะที่ต้นทุนการใช้งาน การบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์จัดเป็นต้นทุนในการดำเนินงาน (operational expenditure: OPEX) ซึ่งคำนวณเป็นรายปี

ส่วนต้นทุนในการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งานจะถูกคำนวณในปีถัดจากช่วงอายุการใช้งานที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ การประเมินต้นทุนรวมตลอดวัฏจักรชีวิตได้คำนวณร่วมกับอัตราคิดลดรวมทั้งสมมติฐานอื่น ๆ เพื่อแปลงผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปมูลค่าปัจจุบัน โดยอ้างอิงกรอบการคำนวณตาม [8] และปรับให้สอดคล้องกับบริบทการศึกษานี้ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$LCC = C_{PI} + C_{OMR} + C_{EOL}$$ สมการที่ 1

LCC	:	ต้นทุนรวมทั้งหมดที่ปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้ว (บาท)
C_{PI}	:	ต้นทุนการผลิตรวมกับต้นทุนการติดตั้งที่ปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้ว (บาท)
C_{OMR}	:	ต้นทุนการดำเนินงาน การบำรุงรักษา และการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้ว (บาท)
C_{EOL}	:	ต้นทุนการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งานที่ปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้ว (บาท)

เพื่อให้ผลการประเมินสะท้อนมุมมองของผู้บริโภคอย่างชัดเจน จึงประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งปัจจัยภายนอก เช่น ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ เงา ฝุ่น สภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม ปัจจัยด้านเทคนิค เช่น องศาการติดตั้ง อัตราการลดประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในการประเมินได้อ้างอิงค่าศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ยของประเทศไทยที่ 1,506 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลวัตต์ติดตั้ง [4] และกำหนดอัตราการเสื่อมประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ร้อยละ 0.5 ต่อปี แล้วคำนวณร่วมกับต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตที่ประเมินได้ เพื่อให้ผลลัพธ์แสดงถึงราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.3 ประเมินผลตอบแทนทางสังคมตลอดวัฏจักรชีวิต

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต ร่วมกับวิธีการประเมินผลตอบแทนทางสังคม (social return on investment: SROI) เพื่อประเมินผลตอบแทนทางสังคมเปรียบเทียบกับต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต เป็นเครื่องมือบ่งบอกถึงผลกระทบเชิงบวกของโครงการเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมุ่งเน้นไปที่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักซึ่งได้รับผลกระทบทางสังคมโดยตรง คือ กลุ่มของพนักงาน และกลุ่มของผู้บริโภคหรือผู้ติดตั้งใช้งาน การวิจัยนี้สะท้อนให้เห็นถึงผลประโยชน์ด้านสังคมและเพิ่มความสมบูรณ์ให้แก่กรอบแนวคิดความยั่งยืน

4.3.1 รวบรวมข้อมูล

การจัดเก็บข้อมูลสำหรับการประเมิน ดำเนินการสำรวจความคิดเห็นจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียโดยตรงผ่านแบบสอบถาม ในกลุ่มเป้าหมาย 2 กลุ่มคือ กลุ่มพนักงาน และกลุ่มของผู้บริโภคหรือผู้ใช้งาน ในรูปแบบของแบบสอบถามออนไลน์ โดยมีการสุ่มกลุ่มตัวอย่างจากกลุ่มเป้าหมายและกำหนดเกณฑ์ในการคัดเข้าและคัดออกของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งการเข้าร่วมตอบแบบสอบถามจะอยู่ภายใต้ความสมัครใจของผู้ตอบแบบสอบถาม ข้อมูลดิบทั้งหมดถูกเก็บรักษาเป็นความลับและทำลายเมื่อสิ้นสุดการทำวิจัย แบบสอบถามที่ใช้ในการเก็บข้อมูลแตกต่างกันไปออกแบบให้สอดคล้องกับบทบาทของกลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่ม (1) กลุ่มของพนักงานจะประกอบด้วยคำถาม 6 ข้อและแบบประเมินความพึงพอใจตามรายการตัวชี้วัดทั้งหมด 11 ตัวชี้วัด (2) กลุ่มผู้บริโภคประกอบด้วยคำถาม 5 ข้อและแบบประเมินความพึงพอใจตามรายการตัวชี้วัดทั้งหมด 7 ตัวชี้วัด โดยการวัดระดับความพึงพอใจใช้เกณฑ์มาตรวัดแบบลิเคิร์ท (Likert Scale) กำหนดช่วงคะแนน 1-5 คะแนนเรียงจากน้อยที่สุดไปมากที่สุดเช่นเดียวกันทั้ง 2 กลุ่ม ในงานวิจัยนี้มีกลุ่มตัวอย่างตอบแบบสอบถามโดยสมัครใจและผ่านเกณฑ์ในการคัดเข้าและคัดออกรวมทั้งสิ้น 21 คน

4.3.2 การประเมินผลตอบแทนทางสังคม

การประเมินผลตอบแทนทางสังคม ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นวิเคราะห์มูลค่าที่เกิดขึ้นจากการลงทุนโดยพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดจากโครงการเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนหลักที่สำคัญของการประเมินคือการจัดทำแผนผังแสดงผลลัพธ์ (mapping-outcomes) เพื่อวิเคราะห์ถึงความเชื่อมโยงเหตุและผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลและให้มูลค่าแก่ผลลัพธ์ (evidencing and valuation of outcomes) คือการกำหนดมูลค่าของผลตอบแทนทางสังคมที่เป็นนามธรรม [2] โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการวัดมูลค่าทางเลือก เช่น มูลค่าของผลประโยชน์ที่สูญเสียหากไม่มีโครงการ หรือมูลค่าความประหยัดที่เกิดขึ้น โดยอ้างอิงฐานข้อมูลพระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พระราชบัญญัติประกันสังคม และเอกสารรายงานทางสถิติที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยนี้ดำเนินการเก็บข้อมูลผ่านเกณฑ์การประเมินค่า (Likert Scale) ช่วงคะแนน 1-5 โดยกำหนดให้ระดับคะแนน 4 และ 5 เป็นเกณฑ์บ่งชี้การเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจึงคำนวณสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงจริงเทียบกับจำนวนกลุ่มตัวอย่างในแต่ละกลุ่มเพื่อหาค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียนั้น ๆ และเพื่อให้ได้มูลค่าผลตอบแทนทางสังคมที่

สะท้อนถึงผลลัพธ์จากโครงการอย่างแท้จริง จึงดำเนินการการปรับลดผลกระทบ เพื่อคัดกรองปัจจัยภายนอกที่ไม่เกี่ยวข้องออกโดยพิจารณาจากปัจจัยลดทอนสำคัญดังนี้:

(1) Deadweight: สัดส่วนของผลลัพธ์หรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอยู่แล้วเป็นปกติแม้จะไม่ได้มีการดำเนินโครงการ

(2) Attribution: สัดส่วนของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากโครงการหรือบุคคลอื่นมีส่วนสนับสนุนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น

ขั้นตอนสุดท้ายเพื่อสะท้อนถึงผลลัพธ์ทางสังคมอย่างชัดเจน ทำการเปรียบเทียบมูลค่าผลตอบแทนทางสังคมกับมูลค่าการลงทุนทั้งหมด เพื่อคำนวณหาสัดส่วนผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุน (SROI Ratio) ซึ่งสะท้อนถึงคุณค่าทางสังคมที่สร้างขึ้นต่อหน่วยเงินลงทุน แสดงวิธีการคำนวณตามสมการที่ 2 อ้างอิงจากคู่มือของ The SROI network [2]

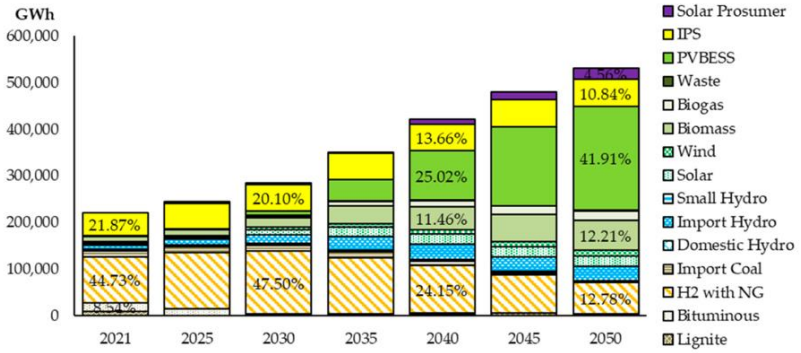
$$SROI\ ratio = \frac{Total\ net\ impact}{Total\ invesment}$$ สมการที่ 2

SROI ratio	:	สัดส่วนผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุน
Total net impact	:	ผลตอบแทนทางสังคมที่หักลบปัจจัยลดทอนอื่น ๆ แล้ว
Total investment	:	มูลค่าการลงทุนทั้งหมดในโครงการ

4.4 ประเมินและแปลผลความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิต

ดำเนินการวิเคราะห์และประเมินผลความยั่งยืนของเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านการบูรณาการข้อมูลจาก 3 มิติ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงและสะท้อนความยั่งยืนของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างชัดเจน โดยมีรายละเอียดในแต่ละมิติดังนี้

มิติสิ่งแวดล้อม: เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพื่อสนับสนุนเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน การศึกษานี้ได้เลือกใช้ค่าอ้างอิงจากสถานการณ์จำลองแผนขยายการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยเพื่อบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนในปี ค.ศ. 2050 (carbon neutrality by 2050: CN50) [9] ซึ่งโครงสร้างพลังงานของประเทศมีการขยายตัวของระบบเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 41.91 ควบคู่กับการปรับลดสัดส่วนเชื้อเพลิงฟอสซิล และการยุติการใช้ถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส lignite และ bituminous ในปี ค.ศ. 2050 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโครงสร้างพลังงานในรูปที่ 1 โดยมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอยู่ที่ 0.07 kg CO_2 eq/kWh ใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และค่าการปล่อยสารพิษต่อแหล่งน้ำจืดทั่วโลกเฉลี่ยต่อคนต่อปี ที่ 25.17 กิโลกรัมเทียบเท่า 1,4-ไดคลอโรเบนซีนต่อคนต่อปี (kg 1,4-DCB eq./person/year) [10] ใช้เปรียบเทียบกับผลกระทบค่าความเป็นพิษต่อระบบนิเวศน้ำจืด



รูปที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโครงสร้างพลังงานปี ค.ศ. 2021 - 2050 [9]

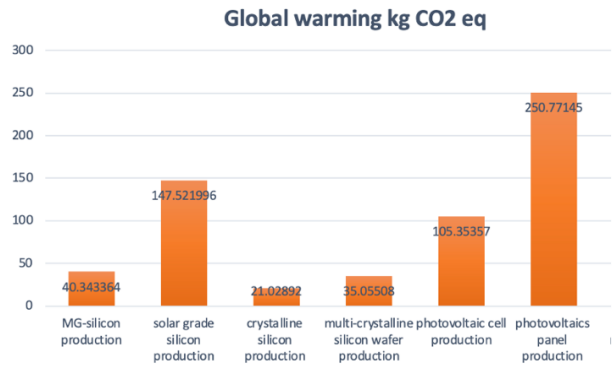
มิติด้านการเงิน: มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความคุ้มค่าและความยั่งยืนในมุมมองผู้บริโภคทั้งในปัจจุบันและระยะยาวผ่านการเปรียบเทียบกับอัตราค่าไฟฟ้า 2 ระยะคือ ระยะปัจจุบัน อ้างอิงอัตราค่าไฟฟ้าที่ภาครัฐประกาศใช้จริง 3.98 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง [11] และระยะยาวในปี ค.ศ. 2050 อ้างอิงค่าไฟฟ้าจากการคาดการณ์สถานการณ์จำลองเพื่อบรรลุเป้าหมาย CN50 ที่ 4.21 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง [9]

มิติด้านสังคม: การประเมินในมิตินี้มีความแตกต่างจากมิติอื่นเนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงคุณค่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การพิจารณาสัดส่วนผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุน (SROI ratio) เพื่อระบุมูลค่าที่ส่งคืนผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่อหน่วยเงินลงทุน ซึ่งเป็นมาตรวัดความยั่งยืนในเชิงคุณค่าทางสังคมโดยตรง

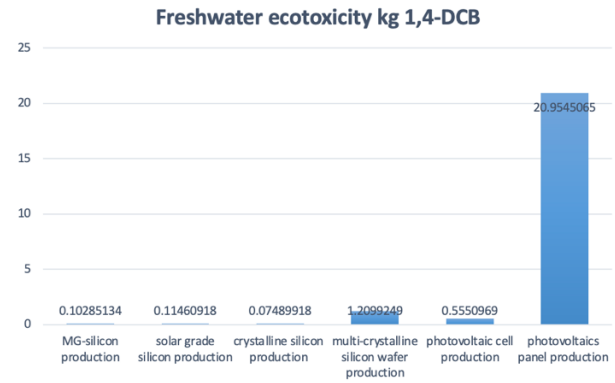
5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ผลการประเมินในมิติด้านสิ่งแวดล้อม

จากการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ 0.016 kg CO_2 eq/kWh โดยเกิดผลกระทบมากที่สุดในการกระบวนการผลิต โดยเฉพาะขั้นตอนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีการผลิตกรอบอลูมิเนียมและการผลิตกระจกรวมอยู่ด้วย รองลงมาคือการผลิตซิลิคอนเกรดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้พลังงานในการทำให้ซิลิคอนบริสุทธิ์สูง และผลกระทบความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดมีค่า 22.95 kg 1,4-DCB โดยเกิดผลกระทบมากที่สุดในขั้นตอนเดียวกัน แสดงผลกระทบของกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนในรูปที่ 2 ในขณะที่การจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งานมีค่าผลกระทบต่ำที่สุดทั้ง 2 กลุ่มผลกระทบในมิติสิ่งแวดล้อม



(ก) แสดงผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

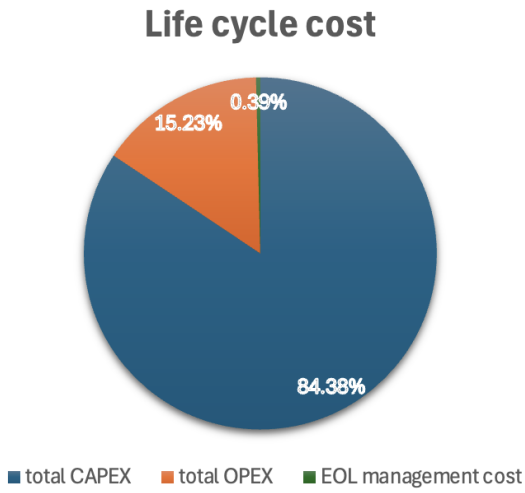


(ข) แสดงผลกระทบความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืด

รูปที่ 2 แสดง (ก) ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและ (ข) ผลกระทบความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดของกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอน

5.2 ผลการประเมินต้นทุนด้านการเงิน

การประเมินต้นทุนด้านการเงินพบว่าต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับครัวเรือนอยู่ที่ 88,401 บาท และคิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าที่ 2.49 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง โดยต้นทุนหลักอยู่ที่กระบวนการผลิตและการติดตั้งทั้งหมด (total CAPEX) ในปีที่ 0 ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84.38 และต้นทุนการใช้งานและบำรุงรักษา (total OPEX) ตลอดระยะเวลา 25 ปี คิดเป็นร้อยละ 15.23 ส่วนที่เหลือคือต้นทุนในการจัดการเมื่อสิ้นสุดการใช้งานซึ่งมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับสองส่วนก่อนหน้าเพียงร้อยละ 0.39 สัดส่วนต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตตามโครงสร้างในการคำนวณ

5.3 ผลการประเมินผลตอบแทนทางสังคม

จากการประเมินผลตอบแทนทางสังคม พบว่ามูลค่าผลตอบแทนทางสังคมของวัฏจักรชีวิตอยู่ที่ 125,978 บาท ในขณะที่ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตอยู่ที่ 88,401 บาท หรือคิดเป็นสัดส่วนผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนได้ 1:1.425 หมายความว่าทุก ๆ 1 บาทที่ลงทุนจะสร้างมูลค่าผลตอบแทนทางสังคมกลับคืนสู่ผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย 1.425 บาท โดยกลุ่มพนักงานได้รับผลประโยชน์สูงสุดในด้านความมั่นคงและสิทธิแรงงาน ขณะที่กลุ่มผู้บริโภคได้รับประโยชน์ด้านความปลอดภัยและการลดภาระทางการเงินแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงมูลค่าตอบแทนทางสังคมในแต่ละผลลัพธ์ของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ผลลัพธ์ (outcomes)	กลุ่มพนักงาน	กลุ่มผู้บริโภค
พนักงานมีความมั่นคงและคุณภาพชีวิตในการทำงานดีขึ้น	5,742.00	
พนักงานได้รับการจ้างงานที่เป็นธรรมและเคารพสิทธิ	57,096.00	
ความปลอดภัยและศักยภาพแรงงานเพิ่มขึ้น	47,196.00	
ผู้บริโภคมีความปลอดภัยและความมั่นใจในการใช้ผลิตภัณฑ์		13,075.87
ภาระทางการเงินและความไม่แน่นอนของผู้บริโภคลดลง		1,002.96
ความเป็นส่วนตัวและความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้น		1865.66
มูลค่าผลตอบแทนทางสังคมทั้งหมด	**110,034.00**	**15,944.50**

5.4 ผลการประเมินและแปลผลความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิต

จากการประเมินผลทั้ง 3 มิติเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตในแต่ละมิติ และเมื่อพิจารณาถึงความยั่งยืนโดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ

มิติสิ่งแวดล้อม ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่า การผลิตไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือนมีค่าผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่ำกว่าค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่อ้างอิงจากการคาดการณ์สถานการณ์จำลองแผนขยายการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย CN50 อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลกระทบความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดมีค่าใกล้เคียงค่าอ้างอิงเฉลี่ยต่อคนต่อปี สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพในการช่วยลดผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างชัดเจน

มิติด้านการเงิน เมื่อพิจารณาในมุมมองของผู้บริโภคราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกกว่าราคาต่อหน่วยไฟฟ้าปัจจุบันและในอนาคตปี ค.ศ. 2050 แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าและสะท้อนความยั่งยืนในมิติการเงิน ของการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือน

มิติด้านสังคม ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่าการลงทุนในโครงการนอกจากผลตอบแทนทางการเงินแล้วยังสร้างมูลค่าผลตอบแทนทางสังคมในอัตราส่วนที่คุ้มค่าในการลงทุน ก่อให้เกิดผลตอบแทนทางสังคมในเชิงบวกต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลักคือพนักงานและผู้บริโภค

เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินวัฏจักรชีวิตกับการศึกษาอื่น ๆ ที่มีเงื่อนไขลักษณะการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ และสภาพอากาศคล้ายกับไทยพบว่า ผลการประเมินในมิติสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ค่าผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศอยู่ในช่วง <0.1 kg CO_2 eq/kWh [12] แม้ค่าจะใกล้เคียงกันแต่สาเหตุที่ยังคงมีความแตกต่างอยู่บ้าง เนื่องมาจากปัจจัยด้านแหล่งพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต ความแปรผันของปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งานตามศักยภาพรังสีอาทิตย์ รวมถึงผลกระทบจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในมิติการเงินผลการประเมินต้นทุนพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยของการศึกษานี้อยู่ที่ 0.0755 USD/kWh สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีศึกษา Malaysia (RPV1) LCOE อยู่ที่ 0.0605 USD/kWh ในขณะที่อีกกรณีศึกษาในไทย Thailand (RPV2) LCOE อยู่ที่ 0.0491 USD/kWh [13] ซึ่งแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างนอกจากสภาพอากาศ การใช้งาน และปัจจัยเชิงเทคนิคแล้ว ปัจจัยเชิงเศรษฐศาสตร์และบริบทของระบบ เช่น ต้นทุนในการติดตั้ง ต้นทุนการบำรุงรักษา ขนาดของระบบ (economics of scale) ข้อจำกัดด้านพื้นที่ติดตั้ง รวมไปถึงโครงสร้างเศรษฐกิจและนโยบายพลังงานของแต่ละประเทศ ยังส่งผลต่อต้นทุนต่อหน่วยไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ในขณะที่มิติสังคมพบว่าแต่ละงานวิจัยในเชิง SROI มีเงื่อนไขและสมมติฐานในการประเมินที่ค่อนข้างแตกต่างกันและมีจำกัด การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการศึกษามีความยากในเชิงความสอดคล้องของข้อมูล อย่างไรก็ตามแนวโน้มส่วนใหญ่เป็นไปในทิศทางบวก โดยมีค่า SROI >1 ซึ่งสะท้อนว่าการลงทุนในระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถสร้างมูลค่าทางสังคมได้มากกว่ามูลค่าที่ลงทุน จึงมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการส่งเสริมการใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์ในภาคครัวเรือน

อนึ่ง การศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมัลติคริสตัลไลน์ (multi-Si) เป็นหลัก ดังนั้นผลการศึกษาจึงอาจไม่ครอบคลุมเทคโนโลยีใหม่ที่มีแนวโน้มประสิทธิภาพและโครงสร้างวัสดุที่ต่างออกไปในอนาคต ข้อจำกัดสำคัญอีกข้อคือความหลากหลายของแหล่งที่มาของข้อมูล โดยข้อมูลด้านบัญชีรายการสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการเงินอ้างอิงจากรายงานวิจัยของประเทศจีนและห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory: NREL) ตามลำดับ เพื่อสะท้อนบริบทของแหล่งผลิตสำคัญและการใช้งานในประเทศไทย ขณะที่ข้อมูลด้านสังคมรวบรวมจากกลุ่มตัวอย่างในประเทศไทย ความแตกต่างเชิงบริบทของข้อมูลข้ามประเทศ เช่น นโยบายสิ่งแวดล้อมและโครงสร้างทางเศรษฐกิจ อาจส่งผลต่อความแม่นยำเชิงลึก ดังนั้น ผลการศึกษาจึงมุ่งเน้นการสะท้อนแนวโน้มและภาพรวมความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิต เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาความยั่งยืนทางพลังงานจากการใช้เซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าการระบุรายละเอียดจำเพาะเจาะจงพื้นที่หรือประเทศใดประเทศหนึ่ง

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการประเมินความยั่งยืนตลอดวัฏจักรชีวิตของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับภาคครัวเรือนของประเทศไทยที่ครอบคลุมและรอบด้าน โดยบูรณาการมิติด้านสิ่งแวดล้อม การเงิน และสังคมเข้าด้วยกัน ซึ่งพบว่า ในมิติสิ่งแวดล้อมการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยลดผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างชัดเจน โดยผลกระทบอยู่ที่ 0.016 kg CO_2 eq/kWh ต่ำกว่าค่าคาดการณ์จากโครงสร้างพลังงานแบบผสมของโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อบรรลุเป้าหมาย CN50 ร้อยละ 77 ผลกระทบความเป็นพิษต่อแหล่งน้ำจืดมีค่า 22.95 kg 1,4-DCB ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยการปล่อยสารพิษต่อแหล่งน้ำจืดทั่วโลกต่อคนต่อปี

ในมิติการเงินการลงทุนติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์สร้างความคุ้มค่าทางการเงินแก่ผู้บริโภคโดยที่ต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.49 THB/kWh ต่ำกว่าค่าไฟฟ้าปัจจุบันและค่าไฟฟ้าในอนาคตปี ค.ศ. 2050 และในมิติสังคมโครงการเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือนช่วยยืนยันถึงการสร้างมูลค่าผลตอบแทนในเชิงบวก ซึ่งสัดส่วนผลตอบแทนทางสังคมจากการลงทุนอยู่ที่ 1.425 เท่าต่อการลงทุนก่อให้เกิดผลตอบแทนทั้งในกลุ่มพนักงานและกลุ่มผู้บริโภค ซึ่งจากการบูรณาการทั้ง 3 มิติชี้ให้เห็นศักยภาพความยั่งยืนของเซลล์แสงอาทิตย์ในครัวเรือน ดังนั้นการส่งเสริมการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพเมื่อสิ้นสุดการใช้งานเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยขับเคลื่อนไปสู่เป้าหมายในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และช่วยเพิ่มความยั่งยืนทางพลังงานอย่างครอบคลุมในทุกมิติ

เอกสารอ้างอิง

[1] UNEP/SETAC. (2011). *Towards Life Cycle Sustainability Assessment*. https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf.

[2] network, t. S. (2012). *A guide to Social Return on Investment*. https://static1.squarespace.com/static/60dc51e3c58aef413ae5c975/t/60f7fa286b9c6a47815bc3b2/1626864196998/The-SROI-Guide-2012.pdf

[3] Markert, E., Celik, I., & Apul, D. (2020). Private and Externality Costs and Benefits of Recycling Crystalline Silicon (c-Si) Photovoltaic Panels. *Energies*, *13*(14), 3650. https://www.mdpi.com/1996-1073/13/14/3650

[4] R. Frischknecht, P. S., L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha. (2020). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems* (IEA-PVPS T12-19:2020, Issue. https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf

[5] NREL. (2025). *Solar Manufacturing Cost Analysis*. https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-manufacturing-cost

[6] NREL. (2025). *Solar Installed System Cost Analysis*. https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-installed-system-cost

[7] Michael Woodhouse, D. F., Vignesh Ramasamy, Brittany Smith,Timothy Silverman, Teresa Barnes, Jarett Zuboy and Robert Margolis. (2021). *Research and Development Priorities to Advance Solar Photovoltaic Lifecycle Costs and Performance*. https://docs.nrel.gov/docs/fy22osti/80505.pdf

[8] Sieglinde K. Fuller, S. R. P. (1995). CALCULATING LIFE-CYCLE COSTS. In *LIFE-CYCLE COSTING MANUAL for the Federal Energy Management Program NIST Handbook 135 2020 Edition*. National Institute of Standards and Technology NIST. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/hb/nisthandbook135-1995.pdf

[9] Diewvilai, R. A., Kulyos. (2022). Possible Pathways toward Carbon Neutrality in Thailand's Electricity Sector by 2050 through the Introduction of H2 Blending in Natural Gas and Solar PV with BESS. *Energies*, *15*(11), 3979.https://www.mdpi.com/1996-1073/15/11/3979

[10] Huijbregts MAJ, S. Z., Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira M, Van Zelm R. (2016). *Normalization scores ReCiPe2016v1.1_20190514* https://www.rivm.nl/en/documents/normalization-scores-recipe-2016?utm_source=chatgpt.com

[11] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2568). ข่าวดีเกินคาด !! "กกพ." หั่นค่าไฟเหลือ 3.98 บาท/หน่วย ให้มีผล พ.ค. 68 เป็นต้นไป. https://www.erc.or.th/th/news-release/3227

[12] APEC. (2019). *Life* Cycle Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region. https://www.apec.org/docs/default-source/Publications/2019/4/Life-Cycle-Assessment-of-Photovoltaic-Systems-in-the-APEC-Region/219_EWG_Life-Cycle-Assessment-of-Photovoltaic-Systems-in-the-APEC-Region.pdf

[13] APEC. (2019). Life Cycle Cost Assessment of Photovoltaic Systems in the APEC Region. https://www.apec.org/docs/default-source/publications/2019/4/life-cycle-cost-assessment-of-photovoltaic-systems-in-the-apec-region/219_ewg_life-cycle-cost-analysis-of-photovotaic-systems-in-the-apec-region.pdf