

Research article

การศึกษาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ
แนวทางการพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืนในประเทศไทย
Carbon Emission Analysis and
Sustainable Website Development Practices in Thailand

พัฒนะ ดวงพัตรา¹Patana Duangpatra¹

Received: 09 March 2025 | Revised: 06 July 2025 | Accepted: 07 July 2025

<https://doi.org/10.55003/acaad.2025.278125>**บทคัดย่อ**

การขยายตัวอย่างก้าวกระโดดของเทคโนโลยีสารสนเทศและการแพร่หลายของระบบเครือข่ายเว็บไซต์ในกิจกรรมเศรษฐกิจ สังคม และการศึกษา ได้ส่งผลให้เกิดการบริโภคพลังงานในระบบดิจิทัลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเว็บไซต์ที่ขาดการออกแบบโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและหลักการพัฒนายั่งยืน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การศึกษานี้มุ่งหวั่นบรรลุดูวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ (1) วิเคราะห์และประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากเว็บไซต์ 100 อันดับแรกในประเทศไทย และ (2) จัดทำแนวทางปฏิบัติที่ดีในการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การดำเนินการวิจัยนำระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณมาประยุกต์ใช้ โดยดำเนินการประเมินเว็บไซต์ที่ได้รับความนิยมสูงสุด 100 อันดับแรกในประเทศไทยผ่านเครื่องมือมาตรฐานสากล ได้แก่ Website Carbon Calculator และ Ecoindex ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในวงการวิชาการและสามารถวิเคราะห์ตัวแปรสำคัญหลายประการ อันได้แก่ ปริมาณการโอนถ่ายข้อมูล จำนวนคำร้องขอที่ส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ ขนาดโดยรวมของหน้าเว็บไซต์ ความซับซ้อนของโครงสร้างเนื้อหา ตำแหน่งของโฮสต์เซิร์ฟเวอร์ แหล่งพลังงานของผู้ให้บริการเว็บไซต์ รวมถึงการใช้งานโครงข่ายการจัดส่งเนื้อหาและการประยุกต์ใช้เทคนิคการแคชข้อมูลไว้ล่วงหน้า

ผลการศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงประจักษ์เผยให้เห็นภาพที่น่าวิตกกังวล โดยเว็บไซต์ส่วนใหญ่ยังคงมีระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 64% ของเว็บไซต์ทั้งหมดที่ได้รับการประเมินได้รับการจัดอันดับให้อยู่ในระดับ F ตามเกณฑ์มาตรฐานของเครื่องมือ Website Carbon Calculator ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับสูงสุด การวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่า เว็บไซต์ที่มีประสิทธิภาพดีต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 0.21 กรัมต่อการเข้าชมหนึ่งครั้ง ขณะที่เว็บไซต์ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดปล่อยก๊าซ

¹ สาขาวิชาจิตตวิกรมและเป็นผู้ประกอบการ คณะนิเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ ประเทศไทย

¹ Program in Media Imagination Engineering and Entrepreneurship,

Faculty of Communication Arts, Assumption University, Thailand

ผู้พิมพ์ประสานงาน อีเมล: patanadng@au.du

คาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 26.62 กรัมต่อการเข้าชมหนึ่งครั้ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณต่อการเข้าชมจำนวน 10,000 ครั้ง เว็บไซต์ที่มีค่าการปล่อยสูงสุดจะส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมมากกว่า 266.2 กิโลกรัม ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสงของต้นไม้จำนวนถึง 146 ต้น เพื่อดูดซับและสร้างสมดุลทางคาร์บอนให้กับระบบนิเวศ การประเมินผลด้วยเครื่องมือ Ecoindex ได้เผยให้เห็นข้อมูลที่สอดคล้องกัน โดยพบว่า 80% ของเว็บไซต์ที่ได้รับการศึกษามีระดับประสิทธิภาพสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมิติของขนาดของหน้าเว็บไซต์ จำนวนคำร้องขอข้อมูล และความซับซ้อนของเว็บไซต์

การวิเคราะห์เชิงลึกพบว่า หน้าเว็บไซต์จำนวนมากมีค่าเฉลี่ยของคำร้องขอ HTTP สูงถึง 189 คำขอต่อหน้า ซึ่งเกินกว่าค่าที่แนะนำสำหรับการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เว็บไซต์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำนั้นมีจำนวนคำร้องขอไม่เกิน 30 รายการเท่านั้น การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงคุณภาพเพิ่มเติมยังพบว่า ไฟล์ภาพขนาดใหญ่เกินไป ไฟล์วิดีโอที่ขาดการบีบอัดที่มีประสิทธิภาพ และการใช้โค้ดที่ไม่เหมาะสมหรือซ้ำซ้อน เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการบริโภคข้อมูลและทรัพยากรการประมวลผลที่สูงเกินความจำเป็น

การตรวจสอบแหล่งพลังงานของผู้ให้บริการเซิร์ฟเวอร์เว็บไซต์ได้เผยให้เห็นข้อมูลที่หลากหลาย โดยพบว่า 53% ของเว็บไซต์ที่ได้รับการศึกษาใช้บริการโฮสต์ที่มีการประกาศสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียน หรืออยู่ภายใต้การรับรองมาตรฐานจาก The Green Web Foundation ซึ่งเป็นองค์กรที่มีความน่าเชื่อถือในระดับสากล อย่างไรก็ตาม อีก 47% ของเว็บไซต์ยังคงใช้บริการโฮสต์ที่ไม่สามารถยืนยันแหล่งที่มาของพลังงานได้อย่างชัดเจน

จากการสังเคราะห์ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ได้จากการศึกษา ร่วมกับการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบจากเอกสารวิชาการจำนวน 34 ฉบับในช่วงระยะเวลา พ.ศ. 2559–2568 ผู้วิจัยได้ดำเนินการสรุปและจัดหมวดหมู่แนวทางปฏิบัติที่ดีสำหรับการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนออกเป็น 6 มิติหลัก ประกอบด้วย (1) การเลือกใช้โฮสต์ที่พลังงานหมุนเวียนและเครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (2) กำหนดเป้าหมายในเชิงการพัฒนาเว็บไซต์ (3) การออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน (4) การพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน (5) การประเมินและตรวจสอบผล และ (6) การสร้างความตระหนักรู้ และการสนับสนุนจากภาครัฐ

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แม้จะมีเทคโนโลยีและแนวปฏิบัติด้านการพัฒนาเว็บไซต์เพื่อสิ่งแวดล้อมที่ได้รับการพัฒนาและเผยแพร่อย่างแพร่หลายในระดับสากล แต่การนำไปประยุกต์ใช้จริงในบริบทของประเทศไทยยังคงเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ ทั้งในมิติของการขาดแคลนองค์ความรู้เชิงลึก การขาดความตระหนักรู้ในระดับองค์กร และบุคคล และการขาดแคลนนโยบายสนับสนุนในระดับมหภาคที่เป็นรูปธรรม การศึกษาวิจัยฉบับนี้จึงเสนอแนะให้มีการสร้างกลไกการสนับสนุนเชิงนโยบายที่เป็นระบบจากภาครัฐ ควบคู่ไปกับการสร้างความร่วมมือแบบบูรณาการจากภาคเอกชนในการพัฒนาเว็บไซต์ที่มีความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง เพื่อเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนในบริบทของสังคมไทยอย่างเป็นรูปธรรมและมีประสิทธิภาพในระยะยาว

คำสำคัญ: เว็บไซต์ที่ยั่งยืน รอยเท้าคาร์บอน การออกแบบเว็บไซต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Abstract

The rapid growth of information technology and the increasing use of websites in economic, social, and educational activities have caused a continuous rise in energy consumption within digital systems. This is especially true for websites that are not designed with resource efficiency and sustainable principles in mind. These trends have led to considerable levels of carbon dioxide emissions, which affect environmental stability.

This study focuses on two main goals. The first goal is to analyze and assess the environmental impact of the 100 most visited websites in Thailand. The second goal is to offer practical recommendations for creating websites that reduce negative effects on the environment.

A quantitative research method was used. The top 100 websites in Thailand were assessed using international tools such as Website Carbon Calculator and Ecoindex. These tools are well recognized in academic fields and helped measure several important factors. These include the amount of data transferred, the number of HTTP requests, the total size of each webpage, the complexity of website content, the location of hosting servers, the energy source used by the hosting providers, the use of content delivery networks, and the application of caching techniques.

The findings presented a cause for concern. Most websites showed a high level of carbon emissions. Sixty-four percent of the assessed websites received an F rating based on the Website Carbon Calculator, indicating the highest environmental impact. Data analysis revealed that the most efficient websites released only 0.21 grams of carbon dioxide per visit. In contrast, the least efficient websites emitted up to 26.62 grams per visit. When projected to 10,000 visits, the highest emitting websites could release over 266 kilograms of carbon dioxide. This amount equaled to what approximately 146 trees would need to absorb through photosynthesis to maintain carbon balance. Results from Ecoindex supported these findings. Eighty percent of the websites showed poor performance, especially in terms of page weight, request count, and website complexity.

Further analysis showed that many websites had an average of 189 HTTP requests per page. This number was far higher than the recommended range for sustainable web development. In comparison, websites with a lower environmental footprint had no more than 30 requests per page. Additional analysis found that oversized image files, uncompressed videos, and unnecessary or inefficient code were the main reasons for excessive data use and energy consumption.

An assessment of web hosting providers revealed mixed practices. About 53% of the websites used hosting services that support renewable energy or have certifications from organizations like the Green Web Foundation. However, the remaining 47% used hosting services that could not clearly verify their energy sources.

Based on this field study and a review of 34 academic articles published between 2016 and 2025, the researcher identified six key practices for sustainable website development. These practices include 1) choosing environmentally friendly hosting and content networks, 2) planning goals clearly during the development process, 3) designing websites for energy efficiency, 4) using technical development that reduces data load, 5) regularly monitoring performance, and 6) increasing awareness through support from the public sector.

This research highlights that even though sustainable web practices have been widely developed and disseminated globally, many challenges still exist in applying them in the Thai context. These include a lack of deep knowledge, low awareness at both the individual and organizational level, and limited support from national policy. Therefore, the study recommends that the government develop clear policy frameworks and encourage cooperation with private companies to support environmentally responsible

website development. Such efforts are necessary for Thailand to move toward long-term sustainable development in a practical and effective way.

Keywords: Sustainable Website, Carbon Footprint, Eco-friendly Web Design

1. บทนำ

การเติบโตอย่างรวดเร็วของอินเทอร์เน็ตและการพึ่งพาเทคโนโลยีดิจิทัลในชีวิตประจำวันส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่น่ากังวล ศูนย์ข้อมูลที่เก็บเว็บไซต์และแอปพลิเคชันออนไลน์ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการรักษาเซิร์ฟเวอร์ให้ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการเข้าถึงเว็บไซต์ยังมีส่วนสำคัญในการใช้พลังงาน และเพิ่มปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย (Ewim et al., 2023)

การเข้าชมเว็บไซต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในแต่ละปี เว็บไซต์และศูนย์ข้อมูลทั่วโลกมีส่วนในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับที่น่าตกใจ หากเว็บไซต์ไม่ได้รับการออกแบบให้ยั่งยืน ปัญหานี้จะทวีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีผลต่อประสิทธิภาพของเว็บไซต์โดยตรง เว็บไซต์ที่ไม่ได้รับการปรับแต่งให้ประหยัดพลังงานอาจโหลดช้า ซึ่งส่งผลให้ผู้ใช้รู้สึกไม่พึงพอใจและอาจละทิ้งการใช้งานกลางคัน (Garett et al., 2016; Hulleberg et al., 2023) นอกจากนี้เว็บไซต์ที่ประสิทธิภาพต่ำ ยังส่งผลต่อการจัดอันดับในเครื่องมือค้นหา ทำให้การเข้าถึงกลุ่มเป้าหมายยากขึ้นอีกด้วย (Bansal, 2024)

ด้วยเหตุนี้การออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืน (Sustainable Web Design) จึงกลายเป็นแนวทางที่สำคัญอย่างยิ่ง การนำหลักการออกแบบที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมเข้ามาปรับใช้สามารถช่วยลดการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แนวทางนี้ยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของเว็บไซต์ ส่งผลให้ประสบการณ์ของผู้ใช้ดีขึ้น การออกแบบที่ยั่งยืน ยังช่วยให้ธุรกิจตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในยุคปัจจุบันที่มีความใส่ใจด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยธุรกิจที่ใช้ความยั่งยืนสามารถสร้างข้อได้เปรียบเชิงการแข่งขัน และสร้างความเชื่อมั่นในกลุ่มลูกค้า (Bebinger, 2022)

นอกจากนี้การออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนยังถือเป็นการลงทุนที่มีคุณค่าในระยะยาว ธุรกิจสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน และสร้างภาพลักษณ์ที่ดีต่อองค์กร การปรับปรุงเว็บไซต์ให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงไม่เพียงตอบสนองต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังเป็นกลยุทธ์ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแกร่งในยุคดิจิทัลได้อย่างยั่งยืน (Doyon, 2020; Karyotakis & Antonopoulos, 2021)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อวิเคราะห์และประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากเว็บไซต์ 100 อันดับแรกของประเทศไทยในปัจจุบัน
- 2.2 เพื่อจัดทำแนวทางปฏิบัติที่ดีในการพัฒนาและออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดการวิจัยหรือการศึกษา

การพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน เป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผ่านการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ (Willis et al., 2020; Santarius et al., 2023) แนวคิดที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืน (Sustainable Web Design) ซึ่งเน้นการลดขนาดไฟล์และการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด การใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เพื่อรองรับการดำเนินงานของเว็บไซต์ และการใช้สีโทนมืด (Dark Mode) เพื่อช่วยประหยัดพลังงาน

ของหน้าจอ โดยเฉพาะในอุปกรณ์ที่ใช้หน้าจอ OLED (Varvello & Livshits, 2021; Yang et al., 2023) นอกจากนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพเว็บไซต์ (Web Performance Optimization) ผ่านการเลือกใช้ไฟล์ที่เหมาะสมและการลดจำนวนการร้องขอข้อมูล ก็เป็นอีกแนวทางที่ช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการโหลดเว็บไซต์ (Marang, 2018)

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องการวิจัยหรือการศึกษา

3.2.1 ทฤษฎีรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint Theory)

ทฤษฎีรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint Theory) มุ่งเน้นการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากกิจกรรมหรือผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะในแง่ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทฤษฎีนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการประเมินผลกระทบของเว็บไซต์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเว็บไซต์ต้องใช้พลังงานในการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง ทั้งในส่วนของเซิร์ฟเวอร์ โครงสร้างพื้นฐานของดาต้าเซ็นเตอร์ และการถ่ายโอนข้อมูล ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Fahlström and Persson (2023) พบว่า การนำหลักการออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืนมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสม เช่น การลดการใช้พลังงานของเว็บไซต์ และการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโครงสร้างพื้นฐานดิจิทัล สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเว็บไซต์ได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับข้อเสนอของ Santarius et al. (2023) ที่ระบุว่า Digital Green Deal ควรมุ่งเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเทคโนโลยีดิจิทัลตลอดทั้งวงจร ตั้งแต่การออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ การกำหนดมาตรฐานการใช้พลังงานของดาต้าเซ็นเตอร์ ไปจนถึงการสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน อันจะช่วยยกระดับความยั่งยืนของบริการดิจิทัล รวมถึงเว็บไซต์อย่างเป็นรูปธรรม

3.2.2 ทฤษฎีความยั่งยืน (Sustainability Theory)

การพัฒนาที่ยั่งยืนมุ่งสร้างความสมดุลระหว่างเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อสร้างความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจที่พึ่งพาตนเองได้ ขณะเดียวกันก็แก้ไขความตึงเครียดที่เกิดจากการพัฒนาที่ไม่สมดุล และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผ่านระบบการผลิตที่รักษารูปแบบ และใช้ทรัพยากรอย่างพอเพียง ตลอดจนแสวงหาแนวทางแก้ไขใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การบรรลุเป้าหมายดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยระบบนิเวศการพัฒนาที่ครอบคลุมทุกมิติ ตั้งแต่ระบบการเมืองหรือนโยบายที่เปิดกว้างให้ประชาชนมีส่วนร่วม ระบบเศรษฐกิจที่เสริมสร้างองค์ความรู้ และสร้างมูลค่าอย่างยั่งยืน ระบบสังคมที่ลดความเหลื่อมล้ำ และระบบเทคโนโลยีที่มุ่งค้นหาแนวทางใหม่เพื่อรองรับการพัฒนาอย่างยั่งยืนทั้งระบบ (World Commission on Environment and Development, 1987) ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ Santarius et al. (2023) ที่เสนอให้เชื่อมโยงเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ากับวิสัยทัศน์ของความเป็นอยู่ที่ดีของมนุษยชาติภายในขอบเขตการดำรงอยู่ของโลกอย่างปลอดภัย พร้อมทั้งให้ความสำคัญกับความเสมอภาคและความยุติธรรมทางสังคม นอกจากนี้งานวิจัยของ Willis et al. (2020) ยืนยันว่าการใช้เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น โฮสติ้งพลังงานหมุนเวียน และการใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา สามารถสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนได้เป็นอย่างดี (Kandlakunta & Simuni, 2024)

3.2.3 ทฤษฎีการออกแบบที่เน้นผู้ใช้งาน (User Experience Design Theory)

ทฤษฎีนี้มุ่งเน้นการสร้างประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้ใช้งานเว็บไซต์ โดยให้ความสำคัญกับการใช้งานที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว รวมถึงการลดเวลาในการโหลดหน้าเว็บไซต์ เทคนิคสำคัญที่ช่วยให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าวคือ การออกแบบเว็บไซต์ที่รองรับทุกอุปกรณ์ (Responsive Web Design) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและลดการใช้พลังงาน (Bhanarkar et al., 2023)

นอกจากนี้ การเข้าถึงข้อมูลที่ง่ายและรวดเร็วผ่านระบบนำทาง (Navigation) ที่ชัดเจน ยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสบการณ์ของผู้ใช้งาน โดยองค์ประกอบหลักในการออกแบบระบบนำทางที่ดี ได้แก่ เมนูที่เด่นและ มีความสม่ำเสมอ มองเห็นง่าย โครงสร้างเว็บไซต์ที่ไม่ซับซ้อน และฟังก์ชันค้นหาที่มีประสิทธิภาพ (Garett et al., 2016)

ด้านการแสดงผลกราฟิกก็มีบทบาทสำคัญในการดึงดูดความสนใจของผู้ใช้งาน โดยควรเลือกรูปภาพที่มีคุณภาพสูง สีที่สอดคล้องกับธีม และการจัดวางองค์ประกอบอย่างสมดุล ขณะเดียวกัน การจัดระเบียบเนื้อหาอย่างเป็นระบบด้วยหัวข้อ และหัวข้อย่อยที่ชัดเจน การจัดลำดับเนื้อหาอย่างมีเหตุผล และการใช้พื้นที่ว่างอย่างเหมาะสม จะช่วยให้ผู้ใช้งานเข้าใจ

โครงสร้างและเนื้อหาของเว็บไซต์ได้ง่ายขึ้น รวมถึงความเรียบง่ายในการออกแบบช่วยลดภาระทางความคิดของผู้ใช้ โดยเน้นที่ความชัดเจน หลีกเลี่ยงองค์ประกอบที่ไม่จำเป็น และใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย ซึ่งทั้งหมดนี้ส่งผลให้ผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพที่ดีและประทับใจในการใช้งานเว็บไซต์ (Garett et al., 2016)

3.2.4 ทฤษฎีการจัดการประสิทธิภาพเว็บไซต์ (Web Performance Management Theory)

ทฤษฎีนี้เน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพเว็บไซต์ด้วยเครื่องมือเฉพาะทาง เช่น Ecoindex, Ecograder และ Google Lighthouse เพื่อวิเคราะห์และลดการใช้พลังงาน พร้อมทั้งปรับปรุงความเร็วในการโหลดและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ (Granum et al., 2023; Lecorney et al., 2023)

3.3 ผลจากการทบทวนวรรณกรรม

ในการสังเคราะห์แนวทางปฏิบัติที่ดี ผู้วิจัยได้คัดสรรข้อมูลและเอกสารจำนวน 33 รายการ ในช่วงระยะเวลาการเผยแพร่ พ.ศ. 2559-2568 (ค.ศ. 2016-2025) และอีก 1 รายการ พ.ศ. 2530 (ค.ศ. 1987) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแนวคิด "การพัฒนาที่ยั่งยืน" ในระดับโลก รวมทั้งสิ้น 34 รายการ ซึ่งค้นจากฐานข้อมูล Scopus, Google Scholar และแหล่งข้อมูลมาตรฐานทางวิชาชีพ โดยใช้คำสำคัญในการค้นหา เช่น "sustainable web design", "carbon footprint" และ "green hosting" เป็นต้น ครอบคลุมเอกสารทั้งภาษาอังกฤษและภาษาไทย

เกณฑ์การคัดเลือกเอกสารประกอบด้วย (1) กล่าวถึงผลกระทบด้านพลังงานและจำนวนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเว็บไซต์ (2) นำเสนอแนวปฏิบัติหรือกรอบการวิเคราะห์เพื่อออกแบบและพัฒนาเว็บ และ (3) ผ่านการตีพิมพ์ในวารสารหรือวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการรับรอง จำนวนและสัดส่วนของเอกสารที่คัดเลือกแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทและสัดส่วนของเอกสารที่ใช้ในการทบทวนวรรณกรรม

Table 1 Types and Proportions of Documents Included in the Literature Review

ประเภทเอกสาร Document Type	จำนวน Number	สัดส่วน (%) Proportion (%)
มาตรฐาน คู่มือ แนวปฏิบัติ (Standards & Guidelines)	5	14.71
บทความวิชาการเชิงแนวคิด (Conceptual, Analytical Papers)	10	29.41
บทความวิจัยเชิงประจักษ์ (Proceedings Empirical Studies)	9	26.47
วิทยานิพนธ์ โครงการวิจัย (Theses & Projects)	8	23.53
หนังสือ รายงานนโยบาย (Books & Policy Reports)	2	5.88

เอกสาร 28 ฉบับจากทั้งหมด 34 ฉบับที่มีประบุ (คิดเป็น 82.36%) ได้รับการตีพิมพ์ในช่วง 2020-2024 สะท้อนให้เห็นว่างานศึกษาส่วนใหญ่เป็นข้อมูลปัจจุบัน ซึ่งสอดคล้องกับความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีและการพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน การศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืนจำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการออกแบบเว็บไซต์ เว็บไซต์ที่ไม่ได้ออกแบบตามหลักการยั่งยืนมักก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้เนื้อหาที่มีเดียขนาดใหญ่ที่ไม่ได้รับการบีบอัดหรือปรับขนาดอย่างเหมาะสม (Fahlström & Persson, 2023; Hulleberg et al., 2023) นอกจากนี้การเลือกใช้บริการโฮสต์ที่พึ่งพาแหล่งพลังงานแบบเดิมยังเพิ่มการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ (Bzdyk, 2022; Doyon, 2020)

3.3.1 หลักการออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน

3.3.1.1 การออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน

เนื่องจากการใช้งานเว็บไซต์มีผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างชัดเจน การศึกษาของ Fahlström and Persson (2023) พบว่าการออกแบบเว็บไซต์ด้วยหลักการที่ยั่งยืนสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเว็บไซต์ได้ถึง 550% เมื่อเปรียบเทียบกับเว็บไซต์ทั่วไป โดยการลดขนาดไฟล์ภาพและวิดีโอด้วยนามสกุลไฟล์ที่มีประสิทธิภาพ เช่น WebP หรือ AVIF สำหรับภาพถ่ายจะช่วยลดขนาดได้ 25-35% (Ilica, 2022) รวมถึงลดการใช้ metadata และ EXIF data ในภาพถ่าย (Willis et al., 2020) สำหรับวิดีโอควรใช้ AV1 Codec เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบีบอัดสูง ช่วยลดการใช้พลังงานและข้อมูล (Granum et al., 2023; Hulleberg et al., 2023) และหลีกเลี่ยงการเล่นอัตโนมัติ (Toonen, 2023)

นอกจากนี้การเลือกตัวอักษรก็มีบทบาทสำคัญในการออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืน เพื่อให้ อ่านง่าย ควรเลือกใช้แบบอักษรแบบไม่มีเชิง (Sans-Serif) ซึ่งได้รับความนิยมมากในการออกแบบเว็บไซต์ และสื่อดิจิทัล Sawyer et al. (2020) ระบุว่า ฟอนต์ที่มีรูปทรงเปิดโล่ง เช่น Frutiger และ Meta ช่วยให้ อ่านได้ง่ายกว่า ส่งผลดีต่อการอ่านโดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ต้องอ่านอย่างรวดเร็ว รวมถึงใช้ขนาดตัวอักษรที่เหมาะสม (14–22 พอยท์สำหรับผู้สูงอายุ) ขนาดตัวอักษรควรอยู่ระหว่าง 1.3-2.0 มม. หรือการใช้คอนทราสต์ที่สูงจึงเหมาะกับการอ่าน ซึ่งไม่ควรต่ำกว่า 4.5:1 ตามที่ WCAG (Web Content Accessibility Guidelines) กำหนดขั้นต่ำไว้ ในส่วนการเว้นระยะห่างระหว่างบรรทัด และตัวอักษรที่เหมาะสมดังกล่าวยังสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการอ่านและลดความล้าของสายตา (Hou et al., 2022; Punsongserm & Suvakunta, 2024) ซึ่งการออกแบบเนื้อหาและเลือกแบบอักษรที่ดีและเหมาะสมช่วยลดเวลาอ่าน และเพิ่มความเข้าใจ ทำให้ผู้ใช้เข้าถึงข้อมูลได้เร็วขึ้น ส่งผลต่อเว็บไซต์ที่ยั่งยืน โดยลดการใช้พลังงานในการโหลดและประมวลผลข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์

การใช้สีโทนมืด (Dark Mode) ช่วยลดการใช้พลังงานในจอ OLED และ AMOLED ได้ถึง 11-13% ช่วยลดการปล่อยแสงสีฟ้าที่เป็นอันตรายต่อดวงตา ลดผลกระทบต่อการนอนหลับ (Varvello & Livshits, 2021; Yang et al., 2023) เช่น สีเทาเข้ม (#121212) หรือสีฟ้าเข้ม (#0A0F29) และสีดำเป็นสีที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด ในขณะที่สีขาวเป็นสีที่ใช้พลังงานมากที่สุด พิกเซลสีน้ำเงินเป็นสีที่ใช้พลังงานมากกว่าพิกเซลสีแดง และสีเขียวประมาณ 25% รวมถึงการใช้ฟอนต์ภายในเครื่อง (Local Fonts) ช่วยลดการโหลดข้อมูล (Bebinger, 2022; Sustainable Web Design, n.d.)

3.3.1.2 เทคโนโลยีโฮสติ้งและเครือข่าย

เทคโนโลยีโฮสติ้งที่ใช้พลังงานหมุนเวียน มีความสำคัญในการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้งานเว็บไซต์ (Bzdyk, 2022; Ferreirós, 2024) นอกจากนี้ การใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (Content Delivery Network: CDN) ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล ลดเวลาโหลดหน้าเว็บ และลดพลังงานที่ใช้ในการประมวลผล (Kandlakunta & Simuni, 2024)

3.3.1.3 ประสิทธิภาพของเว็บไซต์

ประสิทธิภาพของเว็บไซต์ เช่น ขนาดไฟล์หน้าแรก จำนวนคำ และระบบแคช มีผลโดยตรงต่อปริมาณการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เว็บไซต์ที่มีการจัดการขนาดไฟล์ให้เล็กลง รวมไฟล์ บีบอัดไฟล์ เช่น JavaScript, CSS และลดจำนวนคำขอจะช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานโดยรวมได้มากขึ้น เพราะกว่า 80% ของเวลาในการโหลดเว็บไซต์เกิดจากการร้องขอไฟล์จากภายนอก (Bzdyk, 2022; Doyon, 2020; Granum et al., 2023; Ilica, 2022; Souders, 2007) โดยการกำหนดเป้าหมายตั้งแต่เริ่มต้นโครงการช่วยให้การพัฒนาเว็บไซต์ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ (Pixel Fridge, 2023) และมากไปกว่านี้ Souders (2007) ระบุว่า การใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (Content Delivery Network: CDN) ช่วยลดเวลาโหลดหน้าเว็บได้อย่างมาก เพราะลดทั้งความหน่วง (Latency) และเวลาตอบสนอง (Response Time)

จากการทบทวนวรรณกรรม สามารถจำแนกแนวทางปฏิบัติออกเป็น 3 แนวทางหลัก

1) การเลือกโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Green Infrastructure)

การลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดควรเริ่มต้นจากการเลือกศูนย์ข้อมูลและผู้ให้บริการโฮสติ้งที่ใช้พลังงานหมุนเวียน 100% การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ต้องแก้ไข

โค้ดโปรแกรม งานวิจัยของ Ferreirós (2024) พบว่าสัดส่วนพลังงานสีเขียวของศูนย์ข้อมูลเป็นตัวชี้วัดที่แม่นยำที่สุดในการทำนายปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา

2) การเพิ่มประสิทธิภาพด้านหน้าเว็บไซต์ (Front-End Optimization)

เมื่อเลือกกระบวนโครงสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการลดขนาดไฟล์ที่ส่งไปยังผู้ใช้ การเปลี่ยนรูปภาพเป็นรูปแบบ WebP หรือ AVIF และวิดีโอเป็น AV1 สามารถลดขนาดข้อมูลได้ 25-35% (Ilica, 2022) นอกจากนี้ยังควรกำหนดเป้าหมายขนาดหน้าเว็บไซต์ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ ลดจำนวนคำขอ HTTP เปิดใช้ระบบแคช และบีบอัดไฟล์ CSS และ JavaScript ตามหลักการเว็บประสิทธิภาพสูงของ Souders (2007), and Pixel Fridge (2023) ซึ่งยืนยันว่าหน้าเว็บไซต์ที่เล็กและโหลดเร็วจะใช้พลังงานน้อยกว่า

3) การออกแบบประสบการณ์ผู้ใช้ (User Experience)

แม้โครงสร้างและไฟล์จะประหยัดพลังงานแล้ว หากการออกแบบเลย์เอาต์ ตัวอักษร หรือสีทำให้อ่านยาก ผู้ใช้จะต้องใช้เวลามากขึ้นในการเข้าชมเว็บไซต์ ส่งผลให้การใช้พลังงานต่อครั้งเพิ่มขึ้น การศึกษาของ Yang et al. (2023) รวมถึง Varvello and Livshits (2021) พบว่าการใช้โหมดสีเข้มบนหน้าจอ OLED สามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้ 11-13% ขณะที่ Bebinger (2022) ชี้ให้เห็นว่าการใช้ฟอนต์ที่มีอยู่ในระบบ (System fonts) สามารถลดการเรียกไฟล์จากภายนอกได้ทันที งานวิจัยของ Hou et al., (2022), and Punsongserm and Suvakunta (2024) ยืนยันว่าการใช้ฟอนต์ Sans-Serif ขนาดที่เหมาะสมและคอนทราสต์สูงตามแนวทางการทำเว็บไซต์ให้ทุกคนเข้าถึงได้ (Web Content Accessibility Guidelines: WCAG) ช่วยให้ผู้ใช้ อ่านได้เร็วขึ้น ลดเวลาการประมวลผลทั้งในเซิร์ฟเวอร์และอุปกรณ์ผู้ใช้

การบูรณาการทั้งสามแนวทางนี้ทำให้ได้แนวทางปฏิบัติที่ดี ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การเลือกศูนย์ข้อมูลไปจนถึงรายละเอียดของไฟล์และการออกแบบหน้าจอ ทำให้สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดการใช้งานเว็บไซต์ได้อย่างเป็นระบบ

ตัวแปรแทรกซ้อนที่ส่งผลต่อการนำแนวทางการออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนไปใช้อย่างกว้างขวาง ได้แก่ ความตระหนักรู้ด้านสิ่งแวดล้อมของนักพัฒนาเว็บไซต์และการสนับสนุนจากภาครัฐ งานวิจัยพบว่านักพัฒนามีความรู้ในหลักการออกแบบที่ยั่งยืนแต่ยังไม่ได้ปฏิบัติจริงอย่างเต็มที่ เนื่องจากขาดแรงจูงใจหรือทรัพยากรที่จำกัด (Hansen et al., 2023; Hulleberg et al., 2023) รัฐบาลมีบทบาทสำคัญผ่านการผลักดันนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมดิจิทัล โดยสร้างแรงจูงใจให้ภาคเอกชนคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการออกแบบเว็บไซต์และส่งเสริมแนวคิดดิจิทัลสีเขียว (Hansen et al., 2023; Granum et al., 2023) อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบหลักฐานเกี่ยวกับการให้เงินสนับสนุนโดยตรงจากรัฐในด้านนี้ (Santarius et al., 2023)

4. วิธีการวิจัย เครื่องมือวิจัย และระเบียบวิธีวิจัย

4.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเว็บไซต์และแนวทางในการพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน โดยพิจารณาตัวแปรต้น ได้แก่ การออกแบบเว็บไซต์ ซึ่งรวมถึงการบีบอัดไฟล์ภาพและวิดีโอ การใช้ไฟล์ที่ประหยัดพลังงาน การใช้สีโทนมืด และฟอนต์ภายในเครื่อง นอกจากนี้ยังมีเทคโนโลยีโฮสติ้ง และเครือข่าย เช่น การใช้โฮสติ้งที่ใช้พลังงานหมุนเวียน และการใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (Content Delivery Network: CDN) รวมถึงประสิทธิภาพเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้องกับขนาดไฟล์หน้าแรก จำนวนคำขอ และระบบแคช

ตัวแปรตามประกอบด้วย การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งวัดจากปริมาณการปล่อยก๊าซต่อการเข้าชมหนึ่งครั้ง และ ประสิทธิภาพเว็บไซต์ เช่น ความเร็วในการโหลดและคะแนนวิเคราะห์ประสิทธิภาพ ในขณะที่ตัวแปรแทรกซ้อน ได้แก่ ความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมของนักพัฒนาเว็บไซต์ และการสนับสนุนจากภาครัฐ ซึ่งอาจมีผลต่อการนำแนวทางที่ยั่งยืนไปใช้

กรอบแนวคิดนี้ช่วยให้เข้าใจปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเว็บไซต์ที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมแนวทางปฏิบัติที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเว็บไซต์

4.2 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยปฏิบัติการ (Action Research) ที่ศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากเว็บไซต์ โดยเก็บข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 100 เว็บไซต์ยอดนิยมในประเทศไทยจาก Truehits ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 และทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อจัดทำแนวทางปฏิบัติที่ดีในการพัฒนาและออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4.3 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้เพื่อศึกษาและพัฒนาแนวทางการออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน

4.3.1 การทบทวนวรรณกรรม

ทำการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของเว็บไซต์ในปัจจุบัน รวมถึงรวบรวมแนวทางการออกแบบเว็บไซต์ที่มุ่งเน้นความยั่งยืน เพื่อสร้างความเข้าใจในปัจจัยที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ แนวทางการลดผลกระทบดังกล่าว เพื่อนำมาจัดทำแนวทางปฏิบัติที่ดีในการพัฒนาและออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนต่อไป

4.3.2 คัดเลือกเว็บไซต์ตัวอย่าง

คัดเลือก 100 เว็บไซต์ยอดนิยมในประเทศไทยโดยอ้างอิงจากข้อมูลของ Truehits ซึ่งเป็นระบบจัดเก็บและรายงานสถิติการเข้าชมเว็บไซต์แบบตามเวลาจริง (Real time) พัฒนาโดยสำนักบริการเทคโนโลยีสารสนเทศภาครัฐ (สบทร.) ข้อมูลจาก Truehits เป็นแหล่งอ้างอิงสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ความนิยมของเว็บไซต์ในประเทศไทย (Truehits, n.d.)

4.3.3 ประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เบื้องต้น

นำเว็บไซต์ตัวอย่างทั้งหมดไปประเมินด้วย Website Carbon Calculator เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเว็บไซต์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาจากปัจจัยสำคัญ 4 ด้าน ได้แก่ ปริมาณข้อมูลที่ถ่ายโอน แหล่งพลังงานของศูนย์ข้อมูล ความเข้มข้นของพลังงาน และปริมาณการเข้าชม ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยืนยันความน่าเชื่อถือจากงานวิจัยของ Sanchez-Cuadrado and Morato (2024) ที่ใช้เครื่องมือนี้ในการประเมินรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint) ของเว็บไซต์มหาวิทยาลัยสเปน 93 แห่ง

4.3.4 ตรวจสอบแหล่งพลังงานและที่ตั้งโฮสต์ของเว็บไซต์

ค้นหาตำแหน่งโฮสต์ด้วย Check-host (<https://check-host.net>) และ The green web foundation (<https://www.thegreenwebfoundation.org>) เพื่อตรวจสอบแหล่งพลังงานและระยะทางของเซิร์ฟเวอร์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความยั่งยืนของเว็บไซต์ (Lindberg et al., 2021)

4.3.5 วิเคราะห์ประสิทธิภาพเว็บไซต์

ประเมินประสิทธิภาพเว็บไซต์โดยใช้ Ecoindex เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เว็บไซต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ Green IT เพื่อประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมจากการใช้งานเว็บไซต์ ใช้เกณฑ์ประเมินมาตรฐาน 3 ด้าน ได้แก่ โครงสร้าง, จำนวนคำขอ และขนาดข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางความยั่งยืน (Lindberg et al., 2021)

4.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล สรุปและพัฒนาแนวทางการออกแบบ

จากข้อมูลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์ข้อมูล การวิจัยนี้พัฒนาแนวทางการออกแบบเว็บไซต์ที่ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้การวิเคราะห์เชิงปริมาณเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความซับซ้อนของเว็บไซต์ต่าง ๆ และนำมาเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปผนวกรวมกับการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน เพื่อนำข้อมูลและพัฒนาแนวทางใหม่ในการออกแบบเว็บไซต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืน

4.4 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยเว็บไซต์ยอดนิยมในประเทศไทย โดยมีกลุ่มตัวอย่างเป็นเว็บไซต์ที่ได้รับความนิยมสูงสุด 100 อันดับแรกจาก Truehits ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างนี้ใช้เกณฑ์การคัดเลือกจากด้านความนิยมเป็นหลัก เนื่องจากเว็บไซต์ที่มียอดเข้าชมสูงสุดสามารถสะท้อนพฤติกรรมการใช้งานอินเทอร์เน็ตของประชากรส่วนใหญ่ในประเทศได้อย่างแท้จริง และช่วยลดอคติจากการเลือกตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างที่ได้ครอบคลุมเนื้อหาที่หลากหลายถึง 18 หมวดหมู่ โดยมีสัดส่วนสูงสุดในหมวดหมู่ข่าวและสื่อซึ่งมีถึง 42 เว็บไซต์ ตามด้วย บันเทิง (9 เว็บไซต์), ธุรกิจ (7 เว็บไซต์), ธนาคารและการเงิน (6 เว็บไซต์), ยานยนต์ (5 เว็บไซต์), การศึกษา มือถือ และท่องเที่ยว (อย่างละ 4 เว็บไซต์), หน่วยงานราชการและองค์กร (5 เว็บไซต์), คอมพิวเตอร์ และอสังหาริมทรัพย์และก่อสร้าง (อย่างละ 3 เว็บไซต์), สุขภาพ (2 เว็บไซต์), ส่วนหมวดหมู่ กีฬา, เกมส์, ซอปปิง, บุคคลและสังคม, ศิลปะและวัฒนธรรม, และ อินเทอร์เน็ตเพียงอย่างละ 1 เว็บไซต์ นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยบทความวิจัย เอกสารวิชาการ และ ข้อมูลต่าง ๆ ทั้งหมดจำนวน 34 บทความ ซึ่งผ่านการคัดเลือกจากฐานข้อมูลที่เชื่อถือได้ระดับนานาชาติ

5. ผลการวิจัยหรือการศึกษา

5.1 ผลการสังเคราะห์แนวทางปฏิบัติ

จากการทบทวนวรรณกรรม 34 เรื่อง ผู้วิจัยสกัดแนวปฏิบัติที่ดีสำหรับการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนเป็น 6 หมวดหลัก ตั้งแต่การเลือกโครงสร้างพื้นฐานไปจนถึงการสร้างความตระหนักด้านนโยบาย ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งตอบสนองวัตถุประสงค์ 2.2 โดยนำเสนอวิธีการที่อิงหลักฐานเชิงประจักษ์และแนวคิดสากล

ตารางที่ 2 แนวทางปฏิบัติในการพัฒนาและออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน

Table 2 Best Practices for Sustainable Website Development and Design

หมวดหมู่ Category	แนวทางปฏิบัติ Best Practices	รายละเอียด Details
การเลือกโฮสต์ตั้งพลังงาน หมุนเวียน และเครือข่ายจัดส่ง เนื้อหา Choosing Green Hosting and Content Delivery Network (CDN)	การเลือกโฮสต์ตั้งพลังงาน หมุนเวียน Choosing Green Hosting	- เลือกโฮสต์ที่ใช้พลังงานหมุนเวียนหรือชดเชยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ - ช่วยเพิ่มการสร้างภาพลักษณ์ที่ดีต่อองค์กร - Choose hosting powered by renewable energy or carbon offsetting - Enhance the organization's eco-friendly image
	การใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา Using Content Delivery Network (CDN)	- เพิ่มความเร็วในการเข้าถึงเว็บไซต์ - ลดการรับส่งข้อมูลระหว่างเซิร์ฟเวอร์และผู้ใช้ - ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน - Increase website access speed - Reduce data transfer between server and user - Improve energy efficiency
การวางแผน Planning	กำหนดเป้าหมายในบริบทของการ พัฒนาเว็บไซต์ Web Development Goals	- กำหนดขนาดไฟล์หน้าแรก - จำกัดจำนวนคำขอจากภายนอก - กำหนดเวลาโหลดหน้าเว็บไซต์ไม่เกินกี่วินาที - Define homepage file size (Page Size)

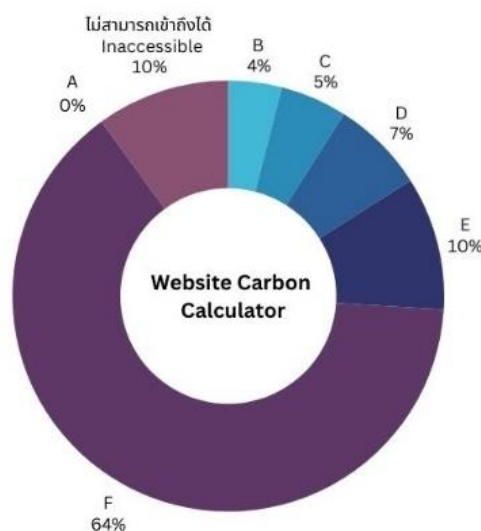
หมวดหมู่ Category	แนวทางปฏิบัติ Best Practices	รายละเอียด Details
		- Limit external requests - Set a maximum page load time (in seconds)
การออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน Sustainable Website Design	ระบบนำทาง Navigation System	- ระบบนำทางต้องเข้าใจง่ายและชัดเจน - โครงสร้างไม่ซับซ้อน - Navigation should be simple and clear - Avoid complex structures
	เนื้อหาที่ง่ายต่อการอ่าน Readable Content	- ใช้ฟอนต์แบบไม่มีเชิง (Sans-Serif) - ขนาดตัวอักษรระหว่าง 1.3-2.0 มม. - ความแตกต่างของสีควรอย่างน้อย 4.5:1 ยิ่งสูงยิ่งดี - ช่องว่างระหว่างบรรทัดเหมาะสม - Use Sans-Serif fonts - Font size between 1.3 to 2.0 mm - Minimum color contrast ratio of 4.5:1 - Appropriate line spacing
	การเลือกใช้สีที่ประหยัดพลังงาน Considerations for Choosing Energy-Efficient Colors	- ใช้สีโทนมืดหรือสีเข้ม เช่น สีเทาเข้ม (#121212) หรือสีฟ้าเข้ม (#0A0F29) - สีดำเป็นสีที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด - Use dark or deep tones like dark gray (#121212) or dark blue (#0A0F29) - Black consumes the least energy
	การใช้ฟอนต์มาตรฐานในเครื่อง Using Standard Local Fonts	- ใช้ฟอนต์มาตรฐานเช่น Arial, Times New Roman, หรือ Verdana - ติดตั้งฟอนต์บนเซิร์ฟเวอร์เพื่อลดการพึ่งพาภายนอก - Use standard fonts like Arial, Times New Roman or Verdana - Install fonts on the server to reduce external dependencies
	ภาพและกราฟิก Images and Graphics	- ใช้ภาพที่ชัดเจนและสอดคล้องกับเนื้อหา - Use clear and relevant images
การพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน Sustainable Website Development	การลดขนาดไฟล์ภาพและวิดีโอ Reducing Image and Video File Sizes	- ใช้ไฟล์ภาพ: WebP หรือ AVIF - ใช้ไฟล์วิดีโอ: AV1 Codec - หลีกเลี่ยงการเล่นวิดีโออัตโนมัติ - ลดการใช้ metadata และ EXIF data ในภาพถ่าย เพื่อลดขนาดไฟล์ - บีบอัดไฟล์ PDF - Use image formats: WebP or AVIF - Use video formats: AV1 Codec - Avoid autoplay for videos

หมวดหมู่ Category	แนวทางปฏิบัติ Best Practices	รายละเอียด Details
		- Minimize metadata and EXIF data in images to reduce file size - Compress PDF files
	การใช้แคช Using Caching	- ลดการโหลดข้อมูลซ้ำ - ลดจำนวนคำขอไปยังเซิร์ฟเวอร์ - Reduce repeated data loading - Reduce server requests
	การลดการร้องขอจากภายนอก Reducing External Requests	- ลดการโหลดไฟล์สคริปต์, รูปภาพ และ ฟอนต์จากภายนอก - ลดการใช้ API ที่ไม่จำเป็น - Reduce loading external scripts, images and fonts - Minimize unnecessary API usage
	การลดปริมาณโครงสร้างและความซับซ้อนของไฟล์ Reducing File Structure and Complexity	- บีบอัดไฟล์ HTML, CSS และ JavaScript - Compress HTML, CSS and JavaScript files
การประเมินและตรวจสอบผล Evaluation of performance	การใช้เครื่องมือวัดและประเมินความยั่งยืน Using Measurement and Evaluation Tools for Sustainability	- ใช้เครื่องมือเช่น Website Carbon Calculator, Ecoindex, Ecograder, Google lighthouse หรือ Thegreenwebfoundation - Use tools like Website Carbon Calculator, Ecoindex, Ecograder, Google lighthouse or Thegreenwebfoundation
การสร้างความรู้ความตระหนักรู้ Awareness Building	การอบรมและให้ความรู้ Training and Education	- จัดอบรมเกี่ยวกับการออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน - สร้างจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อมให้กับนักพัฒนา - Conduct training on sustainable website design - Build environmental awareness among developers
การส่งเสริมจากภาครัฐ Government Support	รัฐบาลสร้างแรงจูงใจให้คำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการออกแบบเว็บไซต์ Government initiatives for sustainable web design	- รัฐบาลควรมีบทบาทสำคัญผ่านการผลักดันนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมดิจิทัล โดยสร้างแรงจูงใจให้ภาคเอกชนคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในการออกแบบเว็บไซต์ - Government leadership in digital environmental policy

5.2 ผลจากการนำเว็บไซต์ไปตรวจสอบที่ Website Carbon Calculator

การศึกษาจากการใช้ Website Carbon Calculator จากการนำเว็บไซต์ที่ได้รับความนิยมที่สุดในประเทศไทยจำนวน 100 เว็บไซต์ โดย Website Carbon Calculator ประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการโหลดหน้าเว็บหนึ่งครั้ง เกณฑ์ประเมินประกอบด้วย ขนาดหน้าเว็บ (Page Size), ปริมาณข้อมูลที่ถ่ายโอน (Data Transfer), แหล่ง

พลังงานของโฮสติ้ง, จำนวนผู้เข้าชมเว็บไซต์ (Traffic) และการใช้บริการโฮสติ้งที่ใช้พลังงานหมุนเวียน โดยผลลัพธ์จะแสดงเป็นเกรดจาก A ถึง F พร้อมรหัสสีตั้งแต่สีเขียว (ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ) ถึงสีแดง (ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง) ซึ่ง A หมายถึง เว็บไซต์เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมาก ใช้พลังงานต่ำ โหลดเร็ว มีการใช้พลังงานหมุนเวียน และ F หมายถึง เว็บไซต์ไม่มีการปรับแต่งเลย ใช้พลังงานมาก และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง ผลการเก็บข้อมูลแสดงให้เห็นว่า เว็บไซต์ที่ได้รับการประเมินในระดับเกรด B ซึ่งถือว่าเป็นระดับสูงสุด มีจำนวน 4 เว็บไซต์ (4%) ได้แก่ trueid.net, droidsans.com, meemodel.com และ flash-mini.com เกรด C มี 5 เว็บไซต์ (5%), เกรด D มี 7 เว็บไซต์ (7%), เกรด E มี 10 เว็บไซต์ (10%), เกรด F มี 64 เว็บไซต์ (64%) และอีก 10 เว็บไซต์ (10%) ไม่สามารถเข้าถึงได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลจากการวัดผลเว็บไซต์ในประเทศไทย 100 อันดับแรกจากเว็บไซต์ Website Carbon Calculator

Figure 1 Results of measuring the top 100 Thai websites using Website Carbon Calculator

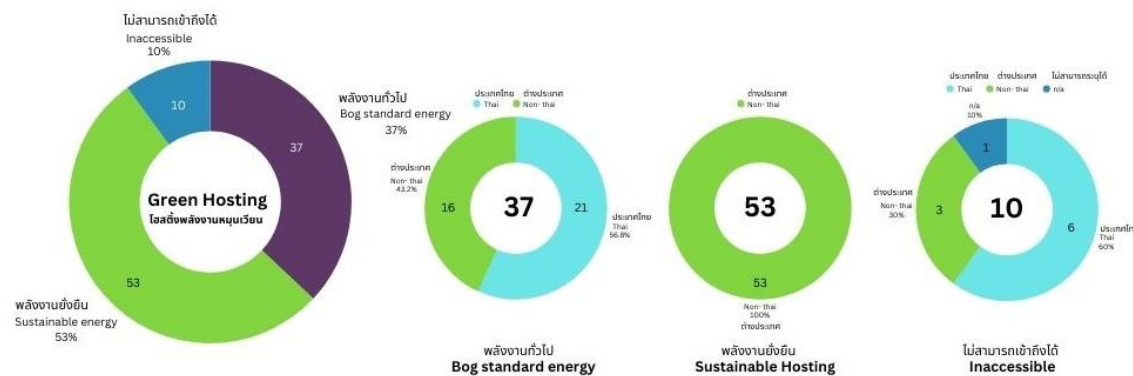
จากการวิเคราะห์พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเว็บไซต์ไทย โดยเว็บไซต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 0.21 กรัมต่อการเยี่ยมชมหนึ่งครั้ง ขณะที่เว็บไซต์ประสิทธิภาพต่ำสุดปล่อยสูงถึง 26.62 กรัมต่อการเยี่ยมชม เมื่อเปรียบเทียบการเยี่ยมชม 10,000 ครั้ง เว็บไซต์ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 3,194.46 กิโลกรัม ใช้พลังงาน 8,336 กิโลกรัม เทียบเท่าการชาร์จสมาร์ทโฟน 694,688 ครั้ง หรือขับรถไฟฟ้าได้ 53,352 กิโลเมตร ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เว็บไซต์ที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดต้องปลูกต้นไม้ 146 ต้นทดแทน ขณะที่เว็บไซต์ที่ปล่อยต่ำสุดต้องปลูกเพียง 2 ต้น เพื่อชดเชยการปล่อยมลพิษจากการเยี่ยมชม 10,000 ครั้ง

5.3 ผลจากการนำเว็บไซต์ไปตรวจสอบตำแหน่งโฮสติ้ง

จากการตรวจสอบเว็บไซต์ยอดนิยม 100 อันดับแรกในประเทศไทย พบว่า 53% ใช้บริการโฮสติ้ง หรือใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (Content Delivery Network: CDN) ต่างประเทศที่มีความยั่งยืน (Sustainable Hosting) โดยอ้างอิงข้อมูลจาก The Green Web Foundation และเครื่องมือตรวจสอบตำแหน่งเซิร์ฟเวอร์จาก Check Host เว็บไซต์ที่ใช้โฮสติ้งแบบยั่งยืนส่วนใหญ่เลือกใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหาของ Cloudflare ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้าถึงเว็บไซต์ และลดการปล่อยก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ โดยการกระจายข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ใกล้ผู้ใช้งานที่สุด ช่วยลดระยะทางการรับส่งข้อมูลและลดภาระในการประมวลผลที่ต้นทาง ส่งผลให้ประหยัดพลังงานมากขึ้น

ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ภาคธุรกิจไทยเริ่มตระหนักถึงความสำคัญของการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนผ่านการใช้เทคโนโลยีที่ช่วยลดการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตาม ยังมีอีก 37% ของเว็บไซต์ตัวอย่างที่ยังใช้บริการโฮสติ้งแบบทั่วไปซึ่งไม่ได้เน้นการใช้พลังงานหมุนเวียน (bog standard energy) โดยในกลุ่มนี้ 21 เว็บไซต์ (56.76%) ใช้บริการโฮสติ้งภายในประเทศไทย และอีก 16 เว็บไซต์ (43.24%) ใช้จากต่างประเทศ ทั้งนี้ ตำแหน่งของเซิร์ฟเวอร์ที่ตรวจพบอาจไม่ใช่แหล่งโฮสติ้งที่แท้จริงเนื่องจากการใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (Content Delivery Network: CDN) ทำให้ข้อมูลถูกกระจายไปยังเซิร์ฟเวอร์หลายแห่งทั่วโลก ซึ่งอาจส่งข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ที่อยู่ใกล้ผู้ใช้งานที่สุด จึงไม่สามารถระบุแหล่งโฮสติ้งที่แท้จริงได้อย่างแน่ชัด

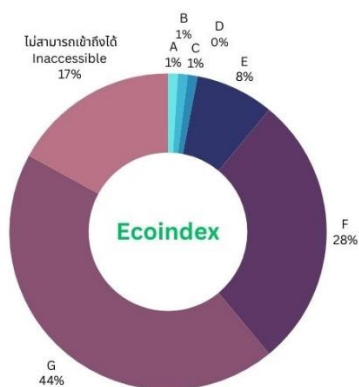


รูปที่ 2 ข้อมูลการใช้พลังงานและตำแหน่งโฮสติ้งของเว็บไซต์

Figure 2 Energy usage data and hosting location of the website

5.4 ผลจากการนำเว็บไซต์ไปตรวจสอบที่ Ecoindex

จากการรวบรวมข้อมูลจำนวน 100 เว็บไซต์ และนำมาทดสอบด้วยเครื่องมือ Ecoindex ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินและปรับปรุงโครงสร้างเว็บไซต์ให้มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาจากปัจจัยทางเทคนิค เช่น จำนวนคำขอ HTTP (HTTP requests), ขนาดรวมของหน้าเว็บ (page weight), ความซับซ้อนของโครงสร้าง (complexity), เวลาในการโหลด (load time), จำนวนองค์ประกอบในหน้าเว็บ และการแคช (caching) เพื่อสะท้อนถึงการใช้ทรัพยากรและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการเก็บข้อมูลแสดงให้เห็นว่าจากการวิเคราะห์ Ecoindex Grade ซึ่งจะใช้ระบบเกรดที่มีการจัดอันดับจาก A ถึง G การจัดอันดับเกรดนี้แสดงถึงระดับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเว็บไซต์ โดยที่ A แสดงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำมาก และมีประสิทธิภาพสูง โดยประเมินจากปัจจัยข้างต้น และ G แสดงถึงผลกระทบสูงสุด โดยประเมินจากประสิทธิภาพการทำงานของหน้าเว็บ เกณฑ์ที่ใช้ประกอบด้วย โดยผลลัพธ์จะแสดงเป็นเกรด A ถึง G พร้อมรหัสสีตั้งแต่สีเขียว (ประสิทธิภาพดีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม) ไปจนถึงสีแดง (ประสิทธิภาพต่ำและมีผลกระทบสูง)



รูปที่ 3 ผลจากการวัดผลจากเว็บไซต์ Ecoindex

Figure 3 Results from Ecoindex website assessment

จากผลการประมวลข้อมูลเว็บไซต์ยอดนิยมในประเทศไทยจำนวน 100 เว็บไซต์ ในรูปที่ 3 พบว่าเว็บไซต์ส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูง (เกรด E, F, G) รวมทั้งสิ้น 80 เว็บไซต์ หรือคิดเป็น 80% ของทั้งหมด ซึ่งเป็นเว็บไซต์ที่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงด้านประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่มีเว็บไซต์เพียง 3 เว็บไซต์ หรือคิดเป็น 3% ของทั้งหมดที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีผลกระทบต่ำที่สุด (เกรด A, B, C) ได้แก่ trueid.net, pptvhd36.com และ flash-mini.com ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการใช้พลังงานต่ำและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับน้อย นอกจากนี้ ยังมีเว็บไซต์อีก 17 เว็บไซต์ หรือคิดเป็น 17% ที่ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้

สำหรับการวิเคราะห์ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเยี่ยมชมเว็บไซต์ 1,000 ครั้ง พบว่าเว็บไซต์ที่มีผลกระทบสูง (เกรด E, F, G) มีค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 2.76 กิโลกรัม ขณะที่เว็บไซต์ที่มีผลกระทบต่ำสุด (เกรด A, B, C) มีค่าเฉลี่ยเพียง 1.45 กิโลกรัมต่อ 1,000 ครั้ง ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน ทั้งนี้ คำนี้นำมาใช้เป็นตัวชี้วัดในการประเมินระดับการใช้พลังงานของเว็บไซต์จากการเข้าชมจำนวนมาก และช่วยให้เจ้าของหรือผู้พัฒนาเว็บไซต์สามารถปรับปรุงให้มีความยั่งยืนมากยิ่งขึ้น

ผลการศึกษาในด้านขนาดของหน้าเว็บไซต์ (Ecoindex Page Weight) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่ามีเว็บไซต์ที่มีน้ำหนักหน้าเว็บมากเกินไป (Too Heavy) ถึง 81 เว็บไซต์ (81%) ในขณะที่มีเพียง 2 เว็บไซต์ (2%) เท่านั้นที่มีขนาดไฟล์เบา (So Light) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการออกแบบเว็บไซต์ที่ยังขาดความใส่ใจต่อการลดปริมาณข้อมูลในการโหลดหน้าเว็บ

ในด้านค่าความซับซ้อนของเว็บไซต์ (Complexity) ซึ่งพิจารณาจากองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน เช่น การใช้แบนเนอร์ สคริปต์ หรือการออกแบบที่ไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์พกพา พบว่าเว็บไซต์ที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีผลกระทบต่ำสุด (เกรด A, B, C) มีเพียง 3 เว็บไซต์ (3%) ที่มีค่าความซับซ้อนต่ำ (Simple) ขณะที่เว็บไซต์ที่มีผลกระทบสูง (เกรด E, F, G) จำนวน 80 เว็บไซต์ (80%) มีค่าความซับซ้อนสูงทั้งหมด (Too Complex) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการโหลดและการใช้งาน

ในการวิเคราะห์จำนวนการร้องขอข้อมูลหรือทรัพยากรจากเว็บไซต์ (Ecoindex Requests) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงาน พบว่าเว็บไซต์ที่มีผลกระทบต่ำสุด (เกรด A, B, C) มีจำนวนคำขอเฉลี่ยต่ำเพียง 30 คำขอ (Few Requests) ในขณะที่เว็บไซต์ที่มีผลกระทบสูง (เกรด E, F, G) มีจำนวนคำขอเฉลี่ยสูงถึง 189 คำขอ (Too Many Requests) แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นในการดึงข้อมูลของเว็บไซต์มีความเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง

จากข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ทั้งหมด พบว่าแนวโน้มการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนในประเทศไทยเริ่มมีความตื่นตัวมากขึ้น โดยเริ่มมีการให้ความสำคัญกับประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมผ่านการออกแบบและพัฒนาเว็บไซต์ที่มุ่งลดการใช้ทรัพยากรและพลังงาน

6. การอภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ

6.1 อภิปรายผล

ผลการวิจัยในครั้งนี้ช่วยสะท้อนให้เห็นถึงความเป็นจริงเกี่ยวกับระดับความยั่งยืนของเว็บไซต์ยอดนิยมในประเทศไทย โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ แนวปฏิบัติ และข้อเสนอแนะที่มีการกล่าวถึงในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีหลายประเด็นที่เว็บไซต์ในประเทศไทยยังคงต้องปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลด้านการพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืน

จากผลการประเมินเว็บไซต์ 100 อันดับแรกของประเทศไทยด้วย Ecoindex และ Website Carbon Calculator พบว่ากว่า 64% ของเว็บไซต์อยู่ในเกรด F ซึ่งหมายถึงมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ตัวเลขนี้ตอกย้ำข้อค้นพบของงานวิจัยก่อนหน้านี้หลายชิ้นที่ชี้ว่าเว็บไซต์จำนวนมากมีส่วนสำคัญในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อพิจารณาว่าเว็บไซต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดปล่อยเพียง 0.21 กรัมต่อการเยี่ยมชมหนึ่งครั้ง ในขณะที่เว็บไซต์ที่ปล่อยสูงสุดกลับสูงถึง 26.62 กรัมต่อการเยี่ยมชมหนึ่งครั้ง ความแตกต่างนี้บ่งชี้ถึงศักยภาพมหาศาลในการลดรอยเท้าคาร์บอนผ่านการปรับปรุงการออกแบบและการดำเนินงาน

แนวปฏิบัติของ Karyotakis and Antonopoulos (2021) ยังเน้นย้ำถึงความสำคัญของการเลือกใช้พลังงานหมุนเวียน 100% ในการเลือกโฮสต์ของเว็บไซต์ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาพบว่า มีเพียง 53% ของเว็บไซต์ที่ใช้โฮสต์ตั้งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งหมายความว่าเกือบครึ่งหนึ่งของเว็บไซต์ยอดนิยมในประเทศไทยยังคงพึ่งพาแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิมหรือไม่ได้รับการยืนยันว่าเป็นพลังงานสะอาด สิ่งนี้สอดคล้องกับสิ่งที่ Bebinger (2022) ได้เสนอแนะไว้ว่า เว็บไซต์ควรเลือกโฮสต์ที่ได้รับการรับรองด้านการใช้พลังงานหมุนเวียนเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

นอกจากนี้การใช้เทคโนโลยีเครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (Content Delivery Network: CDN) เป็นอีกประเด็นหนึ่งที่ควรกล่าวถึง พบว่าเว็บไซต์ที่ใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา มีแนวโน้มปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าเว็บไซต์ที่ไม่ได้ใช้เทคโนโลยีนี้ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ Souders (2007), and Kandlakunta and Simuni (2024) ที่กล่าวว่าการใช้เทคโนโลยีเครือข่ายจัดส่งเนื้อหา สามารถช่วยลดระยะทางของการส่งข้อมูล ลดความล่าช้า และลดการใช้พลังงานในการโหลดข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ต้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในอีกแง่หนึ่ง ตามที่ Willis et al. (2020) ได้ตั้งข้อสังเกตว่าการใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา อาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุดเสมอไปสำหรับการออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืน แม้ว่าการใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา จะช่วยลดระยะทางของการส่งข้อมูลได้ แต่หากเว็บไซต์ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพด้านโค้ดอย่างดีแล้ว การเรียกใช้สคริปต์จำนวนมากจากเซิร์ฟเวอร์ภายนอกผ่านเครือข่ายจัดส่งเนื้อหา อาจส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น ดังนั้นการตัดสินใจใช้ เทคโนโลยีเครือข่ายจัดส่งเนื้อหา ควรพิจารณาจากบริบทและความเหมาะสมของโครงสร้างเว็บไซต์เป็นกรณีไป

ในด้านการออกแบบและพัฒนาเว็บไซต์ การเลือกใช้นามสกุลไฟล์ที่มีประสิทธิภาพ เช่น WebP หรือ AVIF (Ilica, 2022) หรือ AV1 Codec สำหรับวิดีโอ ซึ่งช่วยลดขนาดของไฟล์ได้อย่างมาก (Granum et al., 2023; Hulleberg et al., 2023) แนวปฏิบัตินี้สอดคล้องกับคำแนะนำจาก Willis et al. (2020) ที่เน้นให้ลดการใช้ทรัพยากรที่ไม่จำเป็น รวมถึงลดขนาดของสื่อบนเว็บไซต์เพื่อประหยัดพลังงาน ผลการวิเคราะห์ Ecoindex ที่ระบุว่า 81% ของเว็บไซต์มีน้ำหนักหน้าเว็บมากเกินไป และ 80% มีความซับซ้อนสูง ยิ่งตอกย้ำความจำเป็นเร่งด่วนในการนำหลักการเหล่านี้มาใช้เพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ต้องถ่ายโอนและประมวลผล

การใช้สีโทนมืด (Dark Mode) และฟอนต์ที่ติดตั้งภายในเครื่องก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Bebinger (2022) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสีโทนมืด ช่วยลดการใช้พลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานบนหน้าจอ OLED ได้ถึง 11-13% (Varvello & Livshits, 2021; Yang et al., 2023) แม้การใช้สีโทนมืดจะช่วยประหยัดพลังงาน แต่ Chen และ Muhamad

(2022) พบว่า ในบริบทของการอ่าน ตัวหนังสือสีดำบนพื้นสว่าง (positive polarity) ยังคงให้อ่านได้ดีกว่า ดังนั้น แม้การเลือกสีพื้นหลังสีขาวจะช่วยให้อ่านง่ายขึ้น แต่หากพิจารณาในบริบทของการประหยัดพลังงาน ผู้วิจัยมีความเห็นว่าการใช้สีโทนมืดก็ยังคงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า ขณะที่ Fahlström and Persson (2023), and Bebinger (2022) ต่างก็เห็นพ้องว่าการใช้ฟอนต์ภายในเครื่องช่วยลดการไหลตจากเซิร์ฟเวอร์ภายนอก และลดปริมาณข้อมูลที่ต้องรับส่ง การที่ Ecoindex ระบุว่าเว็บไซต์ส่วนใหญ่มีการร้องขอข้อมูลสูงถึง 189 คำขอโดยเฉลี่ย เน้นย้ำถึงความสำคัญของการใช้ฟอนต์ภายในเครื่องและการลดการร้องขอภายนอกอื่น ๆ เพื่อลดภาระการประมวลผลและการใช้พลังงาน

เมื่อพิจารณาพร้อมกับเกณฑ์ที่ Willis et al. (2020), and Lecorney et al. (2023) ได้เสนอไว้ว่า เว็บไซต์ควรได้รับการออกแบบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างสม่ำเสมอ ผลการวิจัยได้สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการนำแนวปฏิบัติเหล่านี้มาใช้ในวงกว้าง เพื่อเป็นการติดตามและประเมินผลการดำเนินการด้านความยั่งยืนของเว็บไซต์ในประเทศไทย แต่ถึงอย่างไรก็ดี Willis et al. (2020) กล่าวว่าไม่ว่าแม้เครื่องมือดังกล่าวจะไม่สามารถคำนวณค่าได้อย่างแม่นยำสมบูรณ์ แต่ยังคงมีคุณค่าอย่างยิ่งในการแสดงให้เห็นว่า แต่ละเว็บไซต์มีระดับการบริโภคพลังงานที่แตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบและการออกแบบของแต่ละเว็บไซต์ไม่เหมือนกัน ดังนั้น การใช้เครื่องมือวิเคราะห์จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อสะท้อนภาพรวมการใช้พลังงานของเว็บไซต์ และช่วยขับเคลื่อนการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนได้อย่างเป็นรูปธรรม ความจริงที่ว่า 64% ของเว็บไซต์ได้เกรด F แสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องมือเหล่านี้ยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร หรือผลจากการปรับปรุงยังไม่เห็นผลชัดเจน

โดยสรุป ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ แนวปฏิบัติ และนโยบายที่มีอยู่ พบว่าประเทศไทยยังมีช่องว่างที่ต้องพัฒนาอย่างชัดเจน แม้ว่าจะมีเว็บไซต์บางกลุ่มที่เริ่มตระหนักถึงความสำคัญของการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืน แต่โดยภาพรวมแล้ว ยังมีความจำเป็นต้องผลักดันการนำแนวปฏิบัติที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากลมาใช้อย่างเป็นระบบมากขึ้น สิ่งนี้ไม่เพียงแต่เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเว็บไซต์ สร้างประสบการณ์ที่ดีขึ้นแก่ผู้ใช้ และเสริมสร้างภาพลักษณ์ที่ดีให้กับธุรกิจในยุคดิจิทัล ทั้งนี้เพื่อยกระดับคุณภาพของเว็บไซต์ไทยให้สามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับทิศทางของการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระดับสากล (Eckert and Kovalevska, 2021; Granum et al., 2023; Lecorney et al., 2023; Santarius et al., 2023)

6.2 สรุปผล

การศึกษานี้ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างครบถ้วน โดยในส่วนของวัตถุประสงค์ข้อ 2.1 ซึ่งมุ่งเน้นการประเมินผลการออกแบบเว็บไซต์ในปัจจุบันที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากผลการสำรวจเว็บไซต์ไทย 100 อันดับแรกด้วยเครื่องมือ Website Carbon Calculator และ Ecoindex ได้แสดงให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน เว็บไซต์ส่วนใหญ่มีขนาดข้อมูลที่สูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการโหลดลดลง และยังพบว่าการใช้พลังงานของเซิร์ฟเวอร์สำหรับหลายเว็บไซต์ยังคงพึ่งพาแหล่งพลังงานที่มาจากฟอสซิลหรือยังไม่มีการยืนยันการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างชัดเจน นอกจากนี้ แม้ว่าบางเว็บไซต์จะใช้บริการเครือข่ายการจัดส่งเนื้อหา (CDN) เพื่อเพิ่มความเร็วและลดระยะทางในการส่งข้อมูล แต่ก็ยังมีอีกหลายเว็บไซต์ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีนี้อย่างเต็มที่ ทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเข้าชมสูงกว่าที่ควร ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าปัจจุบันการออกแบบเว็บไซต์ในไทยยังมีช่องว่างในการพัฒนาเพื่อเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

สำหรับวัตถุประสงค์ข้อ 2.2 ซึ่งเน้นการสังเคราะห์แนวทางการปฏิบัติที่ดีในการพัฒนาและออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้ได้รวบรวมแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณข้างต้นมาประมวลเป็นข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติที่ชัดเจน แนวทางที่สังเคราะห์ขึ้นครอบคลุมหลากหลายมิติของการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืน เช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพของเว็บไซต์ด้วยการลดขนาดไฟล์และจำนวนคำร้องขอ (requests) การเลือกใช้โฮสติ้งที่ใช้พลังงานหมุนเวียน การใช้เทคนิคการแคชและเครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (CDN) อย่างเหมาะสมเพื่อลดปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งผ่านเครือข่ายและพลังงาน ตลอดจนการออกแบบเนื้อหาและส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่มีความเรียบง่ายไม่ซับซ้อนเพื่อหลีกเลี่ยง

การประมวลผลที่เกินจำเป็น แนวทางเชิงปฏิบัติเหล่านี้ไม่เพียงสอดคล้องกับหลักการพัฒนาที่ได้รับจากเอกสารวิชาการ แต่ยังสนับสนุนโดยหลักฐานเชิงข้อมูลที่ได้จากการศึกษาคุณลักษณะของเว็บไซต์ไทย

โดยสรุปผลการวิจัยครั้งนี้สามารถตอบวัตถุประสงค์ของการศึกษาได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ ได้ทั้งสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับสถานการณ์ปัจจุบันของการออกแบบเว็บไซต์ในมิติของความยั่งยืน (จากการวิเคราะห์เว็บไซต์กลุ่มตัวอย่าง) และพัฒนาแนวทางการออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนที่เป็นรูปธรรมจากการสังเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและองค์ความรู้จากวรรณกรรม แนวทางที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในวงการพัฒนาเว็บไซต์และงานด้านนโยบาย เพื่อส่งเสริมการสร้างเว็บไซต์ที่มีประสิทธิภาพสูงและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาสู่ดิจิทัลที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต

แนวทางเหล่านี้ผ่านการสรุปจากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณของเว็บไซต์ตัวอย่าง 100 อันดับแรก และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จึงสามารถนำไปปฏิบัติจริงได้ จากข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 2 ผู้วิจัยจึงได้นำมาเรียบเรียงและกำหนดเป็นลำดับขั้นตอนการดำเนินงาน 6 ขั้นตอน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางเชิงปฏิบัติสำหรับนักพัฒนานักออกแบบเว็บไซต์ และธุรกิจที่มุ่งความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมในยุคดิจิทัล



รูปที่ 4 ลำดับขั้นตอนของแนวทางการออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืน

Figure 4 Sustainable Web Development Process

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

จากผลการวิจัยซึ่งชี้ให้เห็นถึงสถานการณ์ด้านความยั่งยืนของเว็บไซต์ในประเทศไทย พร้อมทั้งแนวทางปฏิบัติที่สามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างเป็นรูปธรรม จึงสามารถเสนอแนะการนำผลไปใช้ในบริบทต่าง ๆ ได้ดังนี้

6.3.1.1 สำหรับหน่วยงานภาครัฐและองค์กรที่เกี่ยวข้อง

ควรผลักดันให้เกิดการนำแนวทางการออกแบบเว็บไซต์อย่างยั่งยืนไปใช้จริงในภาครัฐและธุรกิจ ผ่านการจัดทำนโยบายหรือข้อแนะนำด้านสิ่งแวดล้อมดิจิทัล และส่งเสริมการใช้โฮสติ้งพลังงานหมุนเวียน การใช้เครือข่ายจัดส่งเนื้อหา (CDN) และเครื่องมือประเมินด้านสิ่งแวดล้อม เช่น Website Carbon Calculator และ Ecoindex ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6.3.1.2 สำหรับสถาบันการศึกษาและผู้พัฒนาหลักสูตร

ควรนำแนวคิดและแนวทางการพัฒนาเว็บไซต์ที่ยั่งยืนเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อหาการเรียนการสอนในรายวิชาที่เกี่ยวข้อง เช่น การออกแบบเว็บไซต์ การพัฒนาเว็บ หรือวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล เพื่อปลูกฝังจิตสำนึกด้านสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมให้นักศึกษาเข้าใจว่าการออกแบบที่ดีไม่ใช่เพียงด้านประสิทธิภาพผู้ใช้ แต่รวมถึงความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

6.3.1.3 สำหรับนักออกแบบและนักพัฒนาเว็บไซต์

ควรนำนวัตกรรมที่มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงาน เช่น การบีบอัดไฟล์ การเลือกใช้ฟอนต์ภายในเครื่อง สที่ประหยัดพลังงาน และโครงสร้างหน้าเว็บที่มิซับซ้อน ไปใช้ในงานจริงมากขึ้น รวมถึงควรประเมินเว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้นผ่านเครื่องมือวัดผลด้านสิ่งแวดล้อมอย่างสม่ำเสมอ และลดการร้องขอจากภายนอกให้น้อยที่สุด เพื่อยกระดับประสิทธิภาพเว็บไซต์ทั้งในแง่การใช้งานและความยั่งยืนทางพลังงาน

6.3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

เพื่อให้การศึกษาด้านการพัฒนาเว็บไซต์อย่างยั่งยืนมีความสมบูรณ์และครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคตดังนี้

6.3.2.1 ควรขยายขอบเขตของกลุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมเว็บไซต์ที่หลากหลายมากขึ้น ทั้งในด้านประเภทเว็บไซต์ ขนาดองค์กร และเทคโนโลยีที่ใช้งาน เพื่อเพิ่มความเป็นตัวแทนของข้อมูล และลดอคติที่อาจเกิดขึ้นจากการเลือกตัวอย่างที่กระจุกอยู่ในบางกลุ่ม

6.3.2.2 ควรดำเนินการทดสอบความเชื่อมั่นและความเที่ยงตรงของเครื่องมือวิจัยอย่างเป็นระบบ รวมถึงการใช้เครื่องมือที่หลากหลายในการประเมินผล เช่น ใช้ Website Carbon Calculator ร่วมกับ Ecoindex เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์และเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่น่าไปสู่อ้างอิง

6.3.2.3 ควรพิจารณาการทำวิจัยในลักษณะระยะยาว (Longitudinal Study) เพื่อติดตามแนวโน้มของเว็บไซต์ไทยในด้านความยั่งยืนอย่างต่อเนื่อง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลกระทบที่อาจเกิดจากปัจจัยแทรกซ้อน เช่น ความตระหนักรู้ของนักพัฒนาเว็บไซต์ หรือการสนับสนุนจากภาครัฐ

6.3.2.4 ควรศึกษาปัจจัยเพิ่มเติมที่ส่งผลต่อการนำแนวทางการออกแบบเว็บไซต์ที่ยั่งยืนไปใช้จริง เช่น ความพร้อมของทีมพัฒนา งบประมาณ เทคโนโลยีที่มีอยู่ หรือแรงจูงใจขององค์กร ซึ่งอาจช่วยอธิบายข้อจำกัดที่พบในเว็บไซต์ส่วนใหญ่ที่ยังมีคะแนนประสิทธิภาพต่ำ

เอกสารอ้างอิง

- Bansal, D. (2024). How SEO makes website loads faster and helps in user engagement. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 6(2), 1–17. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i02.15291>
- Bebinger, H. (2022). Sustainability in web development through energy efficiency. *Bowling Green State University Honors Projects*. <https://scholarworks.bgsu.edu/honorsprojects/790>
- Bhanarkar, N., Paul, A., & Mehta, A. (2023). Responsive web design and its impact on user experience. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, 3(4), 50–55. <https://doi.org/10.48175/IJARSC-9259>
- Bzdyk, V. (2022). *Sustainable web design with WordPress: An attempt to set up sustainability online* [Master's thesis, University of Applied Sciences Burgenland, Austrian Institute of Management]. FH Burgenland Digital Collections. <https://fhburgenland.contentdm.oclc.org/digital/collection/p15425dc/id/138961>

- Chen, A.-H., & Muhamad, N. (2022). Impact of color and polarity on visual resolution with varying contrast ratios and different text backgrounds. *Journal of Ophthalmic and Vision Research*, 17(2), 217–224. <https://doi.org/10.18502/jovr.v17i2.10793>
- Doyon, D. F. (2020, April 29). The pedagogy of sustainable web design. *Journal of Sustainability Education*, 23. https://www.susted.com/wordpress/content/the-pedagogy-of-sustainable-web-design_2020_04/
- Eckert, E., & Kovalevska, O. (2021). Sustainability in the European Union: Analyzing the discourse of the European Green Deal. *Journal of Risk and Financial Management*, 14(2), 80. <https://doi.org/10.3390/jrfm14020080>
- Ewim, D. R. E., Ninduwezuor-Ehiobu, N., Orikpete, O. F., Egbokhaebho, B. A., Fawole, A. A., & Onunka, C. (2023). Impact of data centers on climate change: A review of energy efficient strategies. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(6), 16397–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl9iss6pp16397-01e>
- Fahlström, E., & Persson, F. (2023). Sustainable web design: How much can environmentally friendly design principles improve a website's carbon footprint? (Higher Education Diploma, Faculty of Computing, Blekinge Institute of Technology). Blekinge Institute of Technology. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1775278>
- Ferreirós, N. (2024, September 12). Guidelines for making WordPress websites more sustainable: First steps and plans. WordPress.org. <https://make.wordpress.org/sustainability/2024/09/12/guidelines-for-making-wordpress-websites-more-sustainable-first-steps-and-plans/>
- Garett, R., Chiu, J., Zhang, L., & Young, S. D. (2016). A literature review: Website design and user engagement. *Online Journal of Communication and Media Technologies*, 6(3), 1–14. <https://doi.org/10.29333/ojcm/2556>
- Granum, H. L., Hansen, S. G., Hulleberg, O., & Moen, M. (2023). *Sustainable web design guidelines: Reducing carbon emissions from the web by raising awareness, expanding available research, and providing practical recommendations for web designers* [Bachelor's thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Architecture and Design, Department of Design]. NTNU Open. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/>
- Hansen, S. G., Granum, H. L., Moen, M., Hulleberg, O., Monllaó, C. V., & Inal, Y. (2023). Current challenges and barriers in sustainable web design: A qualitative study. In *MuC '23: Proceedings of Mensch und Computer 2023* (pp. 375–379). <https://doi.org/10.1145/3603555.3608529>
- Hou, G., Anicetus, U., & He, J. (2022). How to design font size for older adults: A systematic literature review with a mobile device. *Frontiers in Psychology*, 13, Article 931646. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.931646>
- Hulleberg, O., Landgraff Granum, H., Gullberg Hansen, S., Moen, M., Vicient Monllaó, C., & Inal, Y. (2023). The awareness and practices of web developers toward sustainable web design. In A. Marcus, E. Rosenzweig, & M. M. Soares (Eds.), *Design, user experience, and usability. HCI 2023. Lecture notes*

- in computer science* (Vol. 14030, pp. 134-145). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35699-5_11
- Ilica, B. (2022, July 26). *Sustainable user interface generation for digital devices: A case study*. Carolina Digital Repository. <https://doi.org/10.17615/s4nw-c860>
- Kandlakunta, A. R., & Simuni, G. (2024). *Content delivery networks (CDNs) for improved web performance*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5053338>
- Karyotakis, M.-A., & Antonopoulos, N. (2021). Web communication: A content analysis of green hosting companies. *Sustainability*, 13(2), 495. <https://doi.org/10.3390/su13020495>
- Lecorney, S., Zweifel, R., & Taylor, J. (2023, December 14). *Review of web analytic tools for eco-conception*. TechRxiv. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.170259059.92136685/v1>
- Lindberg, J., Abdennadher, Y., Chen, J., Lesieutre, B. C., & Roald, L. (2021). *A guide to reducing carbon emissions through data center geographical load shifting*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09120>
- Marang, A. Z. (2018). *Analysis of web performance optimization and its impact on user experience* [Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology]. DiVA Portal. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1228341/FULLTEXT01.pdf>
- Pixel Fridge. (2023). *Sustainability checklist* [PDF]. Pixel Fridge. https://media.pixelfridge.digital/uploads/2024/07/sustainability_checklist_V1-PixelFridge.pdf
- Punsongserm, R., & Suvakunta, P. (2024). Enhancing accessibility through typography in Thai government mobile applications: Identifying issues and recommending inclusive guidelines for typefaces, type sizes, and color contrast. *Archives of Design Research*, 37(2), 25–57. <https://doi.org/10.15187/adr.2024.05.37.2.25>
- Sánchez-Cuadrado, S., & Morato, J. (2024). The carbon footprint of Spanish university websites. *Sustainability*, 16(13), 5670. <https://doi.org/10.3390/su16135670>
- Santarius, T., Dencik, L., Diez, T., Ferreboeuf, H., Jankowski, P., Hankey, S., Hilbeck, A., Hilty, L. M., Höjer, M., Kleine, D., Lange, S., Pohl, J., Reisch, L. A., Ryghaug, M., Schwanen, T., & Staab, P. (2023). Digitalization and Sustainability: A Call for a Digital Green Deal. *Environmental Science & Policy*, 147, 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.04.020>
- Sawyer, B. D., Dobres, J., Chahine, N., & Reimer, B. (2020). The great typography bake-off: Comparing legibility at-a-glance. *Ergonomics*, 63(4), 391–398. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1714748>
- Souders, S. (2007). *High performance web sites: Essential knowledge for front-end engineers*. O'Reilly Media.
- Sustainable Web Design. (n.d.). *Are you considering accessibility and energy efficiency when making color choices? - Sustainable web design*. <https://sustainablewebdesign.org/has-the-color-palette-prioritized-colors-that-used-less-energy-on-oled-screens/>
- Toonen, E. (2023, April 19). *The carbon footprint of your website and how to reduce it*. Yoast. <http://yoast.com/carbon-footprint-of-website/>

- Truehits. (n.d.). *Truehits: Website traffic statistics system*. Bureau of Information Technology Services (BITS). Retrieved April 4, 2025, from <https://www.truehits.net> (in Thai)
- Varvello, M., & Livshits, B. (2021). Shedding (some) light on mobile browsers energy consumption. *Proceedings of the IFIP Networking Conference*, 1–9. <https://tma.ifip.org/2021/wp-content/uploads/sites/10/2021/08/tma2021-paper18.pdf>
- Willis, M., Hanna, J., Encinas, E., & Auger, J. (2020). Low power web: Legacy design and the path to sustainable net futures. Extended abstracts of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems (pp. 1–8). <https://doi.org/10.1145/3334480.3382979>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press. <https://ambiente.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>
- Yang, A., Goh, C. H., & Lim, J. Y. (2023). The research into dark mode: A systematic review using two-stage approach and S-O-R framework. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 15(4). 1748–1764. <https://doi.org/10.22399/ijcesen.1415>