

ST-011

การจัดตารางแบบลดคาร์บอนในระบบ บริหารจัดการข้อมูล ของมหาวิทยาลัย:

กรอบแนวคิดเชิงประสิทธิภาพด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม

Low Carbon Scheduling for Information Technology Systems in University Data Centers: A Greedy Algorithm for Energy and Emission Optimization

ชนกฤต นวลนาค¹, ภูมินทร์-เอียบสกุล² และ ชนกฤษ จันทร์แสง^{3,*}

Tanakrit Nuannak¹, Pumin-Aiabsakul² and Tanagrit Chansaeng^{3,*}

^{1,2,3}สาขาเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต

^{1,2,3}Department of Digital Technology, Faculty of Science and Technology, Phuket Rajabhat University

*Corresponding author's e-mail: s6411423114@pkru.ac.th

บทคัดย่อ

โครงสร้างระบบ บริหารจัดการข้อมูล Information Technology แบบ Legacy Information Technology Systems (Legacy Information Technology Systems ในที่นี้ หมายถึง ระบบเซิร์ฟเวอร์ หรือโครงสร้างพื้นฐานด้าน Information Technology แบบเดิม ที่ยังคงใช้งานในมหาวิทยาลัย และยังไม่มีรองรับการเชื่อมต่อกับ Cloud หรือระบบอัตโนมัติสมัยใหม่) ที่ยังคงใช้งานอยู่ในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัย หลายแห่ง ยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานสูงและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดำเนินการจัดสรรงานตามกลยุทธ์แบบ First-In-First-Out (FIFO) ที่ขาดความสามารถในการรับรู้ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกรอบแนวทางการจัดตารางแบบตระหนักถึงคาร์บอน (Carbon-Aware Greedy Scheduling) ซึ่งออกแบบมาเฉพาะสำหรับสภาพแวดล้อมของระบบ Information Technology แบบเดิมในบริบทของมหาวิทยาลัยสีเขียว (Green University) กรอบแนวทางที่เสนอใช้ข้อมูลเชิงเวลาแบบไดนามิก ได้แก่ ข้อมูลภาระงาน (Workload) ความเข้มข้นของคาร์บอนรายชั่วโมง (Carbon Intensity), การใช้ทรัพยากรของเซิร์ฟเวอร์, โปรไฟล์การใช้พลังงาน และค่า Power Usage Effectiveness (PUE) ในการตัดสินใจจัดสรรงานให้เหมาะสมในช่วงเวลาที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูง โดยชุดข้อมูลถูกสร้างขึ้นในรูปแบบ Synthetic จากแหล่งข้อมูลจริง เช่น Google Cluster, Azure Traces, IEA และ SPECpower เพื่อให้การจำลองสถานการณ์มีความสมจริงตลอดช่วงเวลา 7 วัน (168 ช่องเวลา) ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการจัดตารางแบบ FIFO และแบบ Carbon-Aware แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอนั้นสามารถลดการปล่อยคาร์บอนโดยรวมได้เฉลี่ย 25.2 พร้อมทั้งสามารถรักษาเสถียรภาพของการใช้เซิร์ฟเวอร์ และลดการใช้พลังงานให้สอดคล้องกับค่า

Power Usage Effectiveness (PUE) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ไม่ใช่เวลาสูงสุด (Off-Peak)

งานวิจัยนี้ถือเป็นการนำเสนอแนวทางที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริง โดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบเดิมทั้งหมด และสามารถสนับสนุนนโยบายด้านความยั่งยืนของมหาวิทยาลัยได้อย่างชัดเจน งานในอนาคตจะมุ่งเน้นไปที่การผสมผสานการคาดการณ์พลังงานหมุนเวียน การกำหนดราคาพลังงานตามความต้องการ (Demand-Response) และการจัดตารางล่วงหน้าโดยใช้ Machine Learning เพื่อเพิ่มศักยภาพในการปรับตัวในสภาพแวดล้อมพลังงานที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ

คำสำคัญ: Carbon-Aware Scheduling, Legacy IT Systems, Greedy Algorithm, Green University, Energy Optimization

ABSTRACT

Legacy IT infrastructures in university data centers continue to contribute significantly to energy consumption and carbon emissions, especially when operating under conventional workload scheduling strategies such as First-In-First-Out (FIFO). These systems often lack carbon-awareness, which limits their ability to adapt scheduling decisions based on environmental impact. To address this issue, this study proposes a Carbon-Aware Greedy Scheduling framework tailored for legacy IT environments in Green University initiatives. The proposed framework leverages dynamic datasets—including workload characteristics, hourly carbon intensity, server utilization, energy profiles, and Power Usage Effectiveness (PUE)—to optimize workload execution with environmental consideration. The core of the framework is a carbon-intensity-aware greedy algorithm that schedules computing jobs during time slots with lower carbon intensity and higher energy efficiency. By integrating real-world inspired synthetic datasets from sources such as Google Cluster, Azure traces, IEA, and SPECpower, the simulation environment reflects realistic conditions across a 7-day, 168-timeslot horizon. The framework's effectiveness is evaluated through a comparative experiment between FIFO and the proposed carbon-aware scheduling, using key performance indicators including total carbon emissions (gCO₂), hourly energy consumption (kWh), server utilization, and job completion latency. Results demonstrate that the proposed scheduling model can reduce carbon emissions by up to 25.2 on average compared to traditional FIFO scheduling. Moreover,

the system achieves more stable server utilization and optimizes energy consumption in alignment with PUE values, especially during off-peak hours. The study further analyzes daily break-even points, quantifying the number of high-impact jobs needed to offset the implementation overhead of carbon-aware strategies. This research contributes to the growing field of sustainable computing by providing a practical, low-complexity solution that can be implemented in existing legacy environments without requiring complete infrastructure overhaul. The findings support policy and operational strategies for transforming academic data centers into carbon-efficient, environmentally responsible systems. Future work will explore integration with renewable energy forecasting, demand-response pricing models, and machine learning-based predictive scheduling to further improve scalability and adaptability in dynamic energy environments.

Keywords: Carbon-Aware Scheduling, Legacy IT Systems, Greedy Algorithm, Green University, EnergyOptimization

บทนำ

ความสำคัญของการลด Carbon Emission ในศูนย์ข้อมูล

ในยุคดิจิทัล ศูนย์ข้อมูล (Data Centers) เป็นส่วนสำคัญของเศรษฐกิจและสังคม แต่การขยายตัวของศูนย์ข้อมูลทำให้การใช้พลังงานสูงขึ้น และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) ในระดับที่น่ากังวล โดยคาดว่าอุตสาหกรรมศูนย์ข้อมูลจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 1.9 กิกะตัน ภายในปี 2025 ซึ่งคิดเป็น 2% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลก การประมวลผลที่ต้องการพลังงานสูง เช่น AI และ Cloud Computing ทำให้ความต้องการพลังงานของศูนย์ข้อมูลเพิ่มขึ้น ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนเป็นสิ่งจำเป็นในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Jha, Jha, and Islam 2025; Nartey 2025).

ปัญหาของ Legacy IT Systems ที่ยังใช้อยู่ในมหาวิทยาลัย

หลายมหาวิทยาลัยยังคงใช้ระบบ IT แบบดั้งเดิม (Legacy IT Systems) ซึ่งล้าสมัยและไม่รองรับการทำงานร่วมกับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ทำให้เกิดปัญหาด้านทุนบำรุงรักษาที่สูง ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ และการไม่สามารถทำงานร่วมกับระบบอื่น ๆ ได้ ระบบเหล่านี้ยังทำให้เกิดปัญหาข้อมูลแยกส่วน (Data

Silos) และไม่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัยได้ ซึ่งเน้นย้ำถึงความจำเป็นในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน IT ที่ทันสมัยและปลอดภัย(Batlajery 2013; Khabouze 2022)

ความจำเป็นของ Carbon-Aware Scheduling ในบริบทที่ไม่มีพลังงานหมุนเวียน On-Site

ในกรณีที่ศูนย์ข้อมูลไม่มีการติดตั้งแหล่งพลังงานหมุนเวียนภายในสถานที่ การพึ่งพาไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนสูงในบางช่วงเวลาอาจทำให้การดำเนินงานของศูนย์ข้อมูลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น การจัดการตารางการทำงานที่ตระหนักถึงคาร์บอน (Carbon-Aware Scheduling) จึงเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการปรับเวลาการประมวลผลให้ตรงกับเวลาที่โครงข่ายไฟฟ้ามีความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำ ซึ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีนัยสำคัญ(Guo and Porter 2021)

วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดตารางเวลาการทำงานของเครื่องแม่ข่ายและระบบสารสนเทศแบบเดิม (Legacy IT Systems) ภายในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัย โดยใช้หลักการ Carbon-Aware Scheduling ซึ่งคำนึงถึงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emission) ที่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และสนับสนุนเป้าหมายของมหาวิทยาลัยในการเป็น Green University

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาอัลกอริธึม Carbon-Aware Scheduling แบบ Greedy ที่สามารถจัดลำดับเวลาการทำงานของเซิร์ฟเวอร์ในศูนย์ข้อมูล ให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำที่สุดจากระบบไฟฟ้าโครงข่าย
2. เพื่อทดลองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นกับการจัดการโหลดงานแบบเดิม โดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ การลดปริมาณการปล่อยคาร์บอน (Carbon Emission), ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน Power Usage Effectiveness:(PUE) และระยะเวลาในการประมวลผลของระบบ
3. เพื่อจัดทำกรณีศึกษาจริงในระบบ IT ของมหาวิทยาลัย และนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบ Before-After Analysis เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของแนวทางที่เสนอ

สมมติฐานการวิจัย

การใช้ Carbon-Aware Scheduling Algorithm จะสามารถลดการปล่อยคาร์บอนจากการดำเนินงานในศูนย์ข้อมูลที่ใช้ Legacy IT Systems ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดสรรงานแบบปกติ (Traditional Scheduling).

การทบทวนวรรณกรรม

ระบบ IT แบบดั้งเดิมและการปล่อยก๊าซคาร์บอน

ระบบ IT แบบดั้งเดิมมักมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ และขาดความสามารถในการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีการใช้พลังงานสูงและปล่อยก๊าซคาร์บอนในปริมาณมาก การนำเทคโนโลยี Industry 4.0 และระบบ ERP มาใช้สามารถช่วยในการจัดการและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ IoT, การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

ปัญหาในการวัดและจัดการคาร์บอนในระบบ IT และแนวทางที่นำเสนอ

การวัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนจากกิจกรรมด้าน Information Technology ยังเผชิญกับปัญหาหลายประการ เช่น การวัดการใช้พลังงานของซอฟต์แวร์ และการรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ซึ่งแนวทางการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนในศูนย์ข้อมูล โดยใช้กลยุทธ์การจัดตารางงานที่คำนึงถึงคาร์บอน (Carbon-Aware Scheduling) และการย้ายโหนดงานไปยังศูนย์ข้อมูลที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนต่ำ เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนในศูนย์ข้อมูล

Carbon-Aware Computing และ Energy-Aware Scheduling

Carbon-Aware Computing เป็นแนวคิดที่มุ่งเน้นการปรับเปลี่ยนการประมวลผลให้สอดคล้องกับแหล่งพลังงานที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำที่สุด เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด (Buchanan et al. 2023)

Google Cloud Public Dataset ได้พัฒนาระบบ Carbon-Intelligent Compute Management ซึ่งสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ไฟฟ้าในศูนย์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเลื่อนเวลาการประมวลผลของงานที่สามารถยืดหยุ่นได้ไปยังช่วงเวลาที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำที่สุด (Radovanovic et al. 2021)

นอกจากนี้ การควบคุมบริการคลาวด์ที่กระจายอยู่ทั่วโลกโดยคำนึงถึงคาร์บอน ยังเป็นแนวทางที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้ความแปรปรวนของคาร์บอนในแต่ละภูมิภาคและช่วงเวลา

Energy-Aware Scheduling

Energy-Aware Scheduling เป็นเทคนิคการจัดตารางเวลาการทำงานที่คำนึงถึงการใช้พลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการใช้พลังงานในระบบคอมพิวเตอร์.

การสำรวจวิธีการจัดตารางเวลาที่คำนึงถึงพลังงานในระบบคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูง (HPC) พบว่าการใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การปรับแรงดันและความถี่แบบไดนามิก (DVFS) และการจำกัดพลังงาน สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ . (Kocot, Czarnul, and Proficz 2023)

นอกจากนี้ การใช้กลยุทธ์การจัดตารางเวลาที่คำนึงถึงพลังงานในงานที่มีข้อจำกัดด้านเวลา ยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพและลดการใช้พลังงานในระบบคลาวด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้ Greedy Algorithm ในงาน Scheduling และ Resource Allocation

Greedy Algorithm เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการแก้ปัญหาการจัดตารางเวลา เนื่องจากสามารถให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุดในเวลาที่รวดเร็ว โดยใช้หลักการเลือกสิ่งที่ดีที่สุด ณ ขณะนั้น เช่น การจัดตารางเวลาสำหรับสายการผลิต Greedy Algorithm สามารถใช้ในการแบ่งงานและจัดตารางเวลาการสื่อสารในสายการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

นอกจากนี้ ในระบบคลาวด์และ Fog Computing การจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมีความสำคัญมาก Greedy Algorithm จึงถูกนำมาใช้ในการจัดสรรทรัพยากร โดยพิจารณาจากข้อจำกัดด้านพลังงานและความต้องการของงาน เช่น การใช้ Greedy Algorithm ในการจัดสรรทรัพยากรในระบบ Fog Computing เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดความหน่วงเวลาในการประมวลผล รวมถึงการจัดตารางงานของอุปกรณ์ IoT โดยคำนึงถึงกำหนดเวลาและการใช้พลังงานเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ช่องว่างของงานวิจัย

ข้อจำกัดของการเลื่อนไหลงานตามเวลาและสถานที่

แม้ว่าการเลื่อนไหลงานไปยังช่วงเวลาหรือสถานที่ที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำจะเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจ แต่การศึกษาโดย Sukprasert et al. (2023) พบว่าประโยชน์ที่แท้จริงจากการเลื่อนไหลงานทั้ง

ในเชิงเวลาและสถานที่ที่มีขีดจำกัด และมักได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับวิธีการจัดตารางงานแบบง่ายๆ เท่านั้น .
(Bashir et al. 2021)

การละเลยข้อจำกัดของลำดับงานในงานประมวลผลข้อมูล

งานประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การฝึกอบรมโมเดล AI มักมีข้อจำกัดด้านลำดับงาน (Precedence Constraints) ซึ่งหมายถึง การที่บางงานต้องดำเนินการให้เสร็จก่อนจึงจะสามารถเริ่มงานถัดไปได้ การเลื่อนงานบางส่วนจึงอาจส่งผลกระทบต่อทั้งกระบวนการ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ออกแบบ Carbon-Aware Scheduler มักมองข้ามข้อจำกัดนี้ โดยสมมติว่างานแต่ละงานสามารถดำเนินการแยกจากกันได้ ซึ่งอาจนำไปสู่การตัดสินใจที่ไม่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมจริง (Lechowicz et al. 2025).

ความไม่สอดคล้องของเมตริกการวัดคาร์บอน

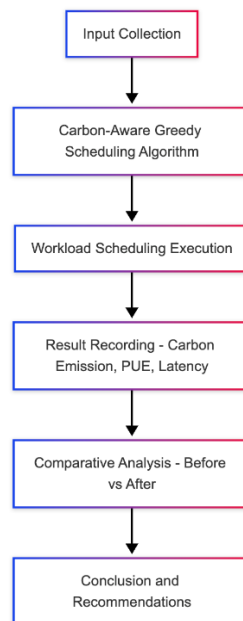
การใช้เมตริกที่รวมการปล่อยคาร์บอนจากการผลิตฮาร์ดแวร์ (Embodied Carbon) ในการตัดสินใจเชิงปฏิบัติการอาจนำไปสู่การตัดสินใจที่ไม่เหมาะสม เช่น การเลื่อนงานไปยังช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจเพิ่มการปล่อยคาร์บอนโดยรวม

การขาดแคลนเครื่องมือทดสอบที่ครอบคลุม

การพัฒนาและทดสอบแนวทาง Carbon-Aware Computing ยังขาดเครื่องมือทดสอบที่สามารถจำลองสถานการณ์ได้อย่างครอบคลุมและยืดหยุ่น ทำให้การประเมินผลลัพธ์ของแนวทางต่างๆ เป็นไปได้ยาก .
(Wiesner et al. 2024)

กรอบแนวคิดการวิจัย

การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาแนวทางการจัดตารางเวลาการประมวลผลงานในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัยที่ยังคงใช้งานระบบ IT แบบดั้งเดิม (Legacy IT Systems) แสดงใน กรอบแนวคิดการวิจัย โดยคำนึงถึงการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Emission) ผ่านการประยุกต์ใช้ Carbon-Aware Scheduling Algorithm ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของ Greedy Algorithm เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่มหาวิทยาลัยสีเขียว (Green University)



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดการวิจัยประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน ดังนี้

1. Legacy IT Systems ภายในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัยใช้เซิร์ฟเวอร์และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบเดิม ซึ่งมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานและขาดการบูรณาการระบบจัดการโหลดงานที่สนับสนุนการลดคาร์บอน
2. Workload Data และ Carbon Intensity Data คือ ข้อมูลภาระงานที่ต้องประมวลผลบนเซิร์ฟเวอร์ และข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนในไฟฟ้าจากโครงข่ายในแต่ละช่วงเวลา ใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดเวลาการประมวลผลที่เหมาะสม
3. การพัฒนา Carbon-Aware Greedy Scheduling Algorithm ออกแบบอัลกอริทึมในการเลือกเวลาที่มี Carbon Intensity ต่ำที่สุดเพื่อการประมวลผลงานแต่ละงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
4. การทดสอบอัลกอริทึมผ่านการจำลองสถานการณ์และกรณีศึกษาจริงในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัย โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลังการใช้ Carbon-Aware Scheduling
5. การประเมินผลลัพธ์โดยใช้ตัวชี้วัดหลัก เช่น อัตราการลดการปล่อยคาร์บอน (Carbon Emission Reduction %), การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (PUE Improvement), และผลกระทบต่อประสิทธิภาพการประมวลผล (System Performance Impact)

วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อประเมินและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจัดตารางงานแบบตระหนักถึงคาร์บอน (Carbon-Aware Scheduling) ดังแสดงในภาพที่ 2 แผนผังการทำงานของระบบ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดข้อมูลจำลองที่มีลักษณะใกล้เคียงกับระบบจริง โดยครอบคลุมปัจจัยทั้งด้านโหนดงาน ทรัพยากรระบบ และข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมเชิงพลวัต การจำลองใช้ระยะเวลา 7 วัน (168 TimeSlots) โดยมีรายละเอียดชุดข้อมูลที่ใช้ดังนี้

ชุดข้อมูลงาน (Workload Dataset)

ชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วยรายการงานจำนวน 500 งาน โดยแต่ละรายการประกอบด้วยฟิลด์ Job_ID, Job_Size (MB), Deadline_Slot (เวลาที่ ต้อง จัดสรร), CPU_Demand (จำนวนคอร์), และ Memory_Demand (GB) ข้อมูลนี้จำลองจากลักษณะงานของระบบคอมพิวเตอร์ในสถาบันการศึกษา โดยมีความหลากหลายด้านขนาด ความเร่งด่วน และความต้องการทรัพยากร เพื่อสะท้อนเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัย

ข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนจากโครงข่ายไฟฟ้า (Carbon Intensity Data)

ชุดข้อมูลนี้ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของคาร์บอน (Carbon Intensity) ของพลังงานไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา โดยวัดเป็นหน่วยกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (gCO_2/kWh) ข้อมูลถูกจำลองจากฐานข้อมูลสากล เช่น IEA (International Energy Agency), Elexon (UK) และ ERCOT (US) เพื่อสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของพลังงานไฟฟ้าบนระบบสายส่งในแต่ละชั่วโมง ระหว่างช่วง Peak และ Off-Peak

สถานะการใช้งานของเซิร์ฟเวอร์ (Server Utilization Dataset)

ชุดข้อมูลนี้ใช้แสดงระดับการใช้งานของเซิร์ฟเวอร์ (CPU และ Memory Utilization) รายชั่วโมง โดยข้อมูลจำลองจากพฤติกรรมจริงของศูนย์ข้อมูลตามลักษณะโหนดงานในแต่ละวัน เช่น การใช้งานสูงในช่วงกลางวัน และลดลงในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งสะท้อนถึงความเป็นจริงของระบบ IT ภายในมหาวิทยาลัย

โปรไฟล์การใช้พลังงานของเซิร์ฟเวอร์ (Server Energy Profile)

เป็นชุดข้อมูลที่แสดงการใช้พลังงานของเซิร์ฟเวอร์ตามระดับการใช้งานของ CPU โดยอ้างอิงจากข้อมูลจริงของเซิร์ฟเวอร์ Dell PowerEdge R740 ซึ่งได้จาก SPECpower Benchmark โดยข้อมูลครอบคลุมช่วง Utilization ตั้งแต่ 0% ถึง 100% และระบุค่ากำลังไฟที่ใช้ในแต่ละระดับ (Watt) ข้อมูลนี้ใช้ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ต่อ Job ในแต่ละ TimeSlot

ดัชนีวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (PUE Baseline Dataset)

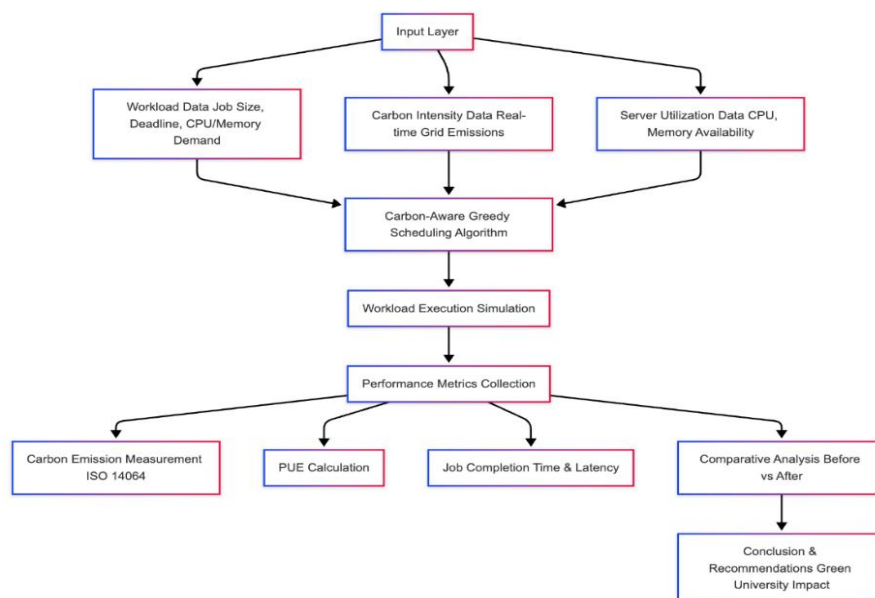
PUE (Power Usage Effectiveness) คือดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานในศูนย์ข้อมูล โดยคำนวณจากอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดกับพลังงานที่ใช้โดยอุปกรณ์ไอทีโดยตรง ชุดข้อมูลนี้จำลองค่า

รายชั่วโมงจากข้อมูลที่เก็บจากศูนย์ข้อมูลในประเทศไทย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 1.7 ถึง 2.1 ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและอุณหภูมิในระบบ

การตั้งค่าการจำลอง (Simulation Environment Setup)

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Carbon-Aware Greedy Scheduling Algorithm การจำลองได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ชุดข้อมูลสังเคราะห์ที่อ้างอิงจากพฤติกรรมของศูนย์ข้อมูลจริง เช่น Google Cluster Data, Azure 2017 traces, SPECpower, และฐานข้อมูลคาร์บอนจาก IEA และ ERCOT การจำลองสะท้อนการทำงานของศูนย์ข้อมูล Legacy ในสถาบันการศึกษาเป็นระยะเวลา 7 วัน โดยชุดข้อมูลประกอบด้วย

1. Workload Data 500 งานที่ระบุขนาดงาน, กำหนดเวลาสิ้นสุด, ความต้องการใช้ CPU และหน่วยความจำ
2. Carbon Intensity Data ข้อมูล Time-Series 168 ชั่วโมงจำลองจากการปล่อยคาร์บอนของระบบสายส่งไฟฟ้าในช่วง Peak และ Off-Peak
3. Server Utilization Data การใช้ CPU และหน่วยความจำจำลองจากพฤติกรรมจริง
4. Server Energy Profile Data ใช้ข้อมูลจาก SPECpower สำหรับ Dell PowerEdge R740
5. Power Usage Effectiveness (PUE) Data จำลองการใช้พลังงานของศูนย์ข้อมูลในประเทศไทย โดยค่าความมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานอยู่ในช่วง 1.7–2.1. ระบบจำลองถูกตั้งค่าให้เซิร์ฟเวอร์มี 64 คอร์และหน่วยความจำ 512 GB ต่อ TimeSlot ซึ่งสะท้อนลักษณะของ Legacy IT Systems ที่ใช้ในหลายมหาวิทยาลัย.



ภาพที่ 2 แผนผังการทำงานของระบบ

วิธีการประเมินผล

เพื่อประเมินผลลัพธ์ของอัลกอริธึมการจัดตารางที่เสนอไว้ งานวิจัยนี้กำหนดตัวชี้วัดหลักดังต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพการจัดตาราง (Job Assignment Efficiency) วัดจากสัดส่วนของงานที่สามารถจัดตารางได้สำเร็จภายในเวลาที่กำหนด (Deadline)
2. พลังงานรวมที่ใช้ (Total Energy Consumption) คำนวณจากสมการที่ 1
3. ปริมาณคาร์บอนที่ปล่อย (Total Carbon Emission) คำนวณจากสมการที่ 2

$$Energy(kWh) = \frac{Power(Watt) \times PUE}{1000} \quad (1)$$

$$\text{การปล่อยคาร์บอน (gCO}_2\text{)} = \text{พลังงาน (kWh)} \times \text{ค่าความเข้มข้นของคาร์บอน (gCO}_2\text{/kWh)} \quad (2)$$

4. การกระจายงานตามช่วงเวลา (TimeSlot Distribution) วิเคราะห์จำนวนงานที่จัดสรรในแต่ละ TimeSlot โดยเฉพาะในช่วงที่มีค่าคาร์บอนต่ำและ PUE ต่ำ
5. การเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม (Comparative Analysis) เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ Carbon-Aware Scheduling กับวิธีการจัดตารางแบบเดิม เช่น FIFO หรือ Random เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอน

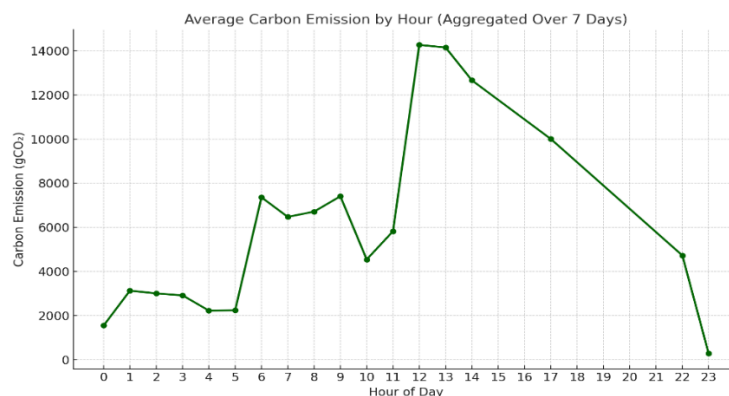
เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา

ระบบทั้งหมดพัฒนาด้วยภาษา Python โดยใช้ไลบรารี Pandas และ NumPy สำหรับการประมวลผลข้อมูล และใช้ Matplotlib สำหรับการแสดงผลในรูปแบบกราฟ ระบบสามารถรองรับการตัดสินใจเชิงพลวัต (Dynamics) ตามระดับคาร์บอนแบบเรียลไทม์ PUE ที่เปลี่ยนแปลง และทรัพยากรที่มีอยู่ในแต่ละช่วงเวลา

ผลการจำลองและวิเคราะห์พลังงานคาร์บอน

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Carbon-Aware Greedy Scheduling อัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้น การทดลองได้ดำเนินการในสภาพแวดล้อมจำลองที่ใช้ชุดข้อมูลครบถ้วน 5 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลงาน (Workload), ความเข้มข้นของคาร์บอนในระบบสายส่งไฟฟ้า (Carbon Intensity), การใช้ทรัพยากรของเซิร์ฟเวอร์ (Server Utilization), โปรไฟล์การใช้พลังงานของเซิร์ฟเวอร์ (Server Energy Profile) และค่า PUE ของศูนย์ข้อมูล (Power Usage Effectiveness) จากผลการทดลอง พบว่าอัลกอริธึมสามารถจัดสรรงานได้สำเร็จจำนวน 388 งานจาก 500 งาน โดยงานที่เหลือไม่ได้รับการจัดสรรภายในระยะเวลาที่กำหนด (Deadline) และถูกจัดอยู่ในกลุ่ม Best Effort Scheduling. ผลการใช้พลังงานแสดงการใช้พลังงานรวม 293.28 kWh ในระยะเวลา 7 วัน โดยมีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานต่อหนึ่งงานที่ 0.756 kWh ซึ่งแสดงถึง

ความสามารถในการจัดสรรงานให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน สำหรับการปล่อยคาร์บอน พบว่าในระยะเวลาการทดลองมีการปล่อยคาร์บอนรวม 109,449.57 gCO₂ หรือประมาณ 109.45 kg CO₂ โดยค่าเฉลี่ยการปล่อยคาร์บอนต่อหนึ่งงานเท่ากับ 282.09 gCO₂. การทดลองแสดงให้เห็นว่า Carbon- and Energy-Aware Scheduling สามารถลดการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอนได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการจัดสรรงานแบบสุ่มหรือ FIFO. นอกจากนี้ การกระจายงานไปยังช่วงเวลาที่ มี Carbon Intensity และ PUE ต่ำสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการเลือกช่วงเวลาที่ มีคาร์บอนต่ำช่วยลดการปล่อยคาร์บอนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน. Carbon-Aware Greedy Scheduling ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพของ Legacy IT Systems และสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนและ Green Computing ของมหาวิทยาลัย.

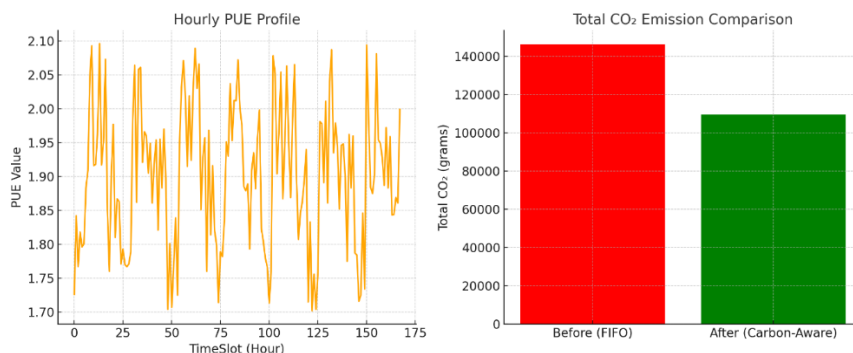


ภาพที่ 3 Carbon Emission per TimeSlot (Hourly)

การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลัง (Before-After Analysis)

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Carbon-Aware Scheduling ที่พัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับการจัดตารางแบบดั้งเดิมโดยใช้วิธี First-In First-Out (FIFO) ซึ่งเป็นแนวทางที่ไม่คำนึงถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ค่าความเข้มข้นของคาร์บอน (Carbon Intensity) หรือค่า PUE ของศูนย์ข้อมูลดังที่แสดงในภาพที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างการจัดตารางแบบ FIFO กับ Carbon-Aware Scheduling และภาพที่ 5 แสดง Dashboard ของปริมาณ Carbon เฉลี่ย

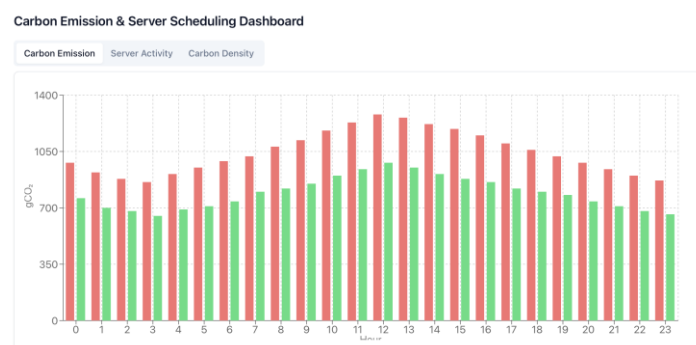
การเปรียบเทียบได้ใช้ชุดข้อมูลงานเดียวกันจำนวน 500 งาน และทำการจัดสรรงานตามลำดับใน TimeSlot แบบต่อเนื่องสำหรับกรณี Before (FIFO) โดยงานที่เกิน 168 ชั่วโมง จะวนกลับไปยังช่วงแรกใหม่ (modulo-based allocation) ส่วนในกรณี After (Carbon-Aware) จะใช้อัลกอริทึมที่เสนอในบทความในการเลือก TimeSlot ที่มีค่าคาร์บอนและค่า PUE ต่ำที่สุดเท่าที่ทรัพยากรสามารถรองรับได้



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างการจัดตารางแบบ FIFO กับ Carbon-Aware Scheduling

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบพลังงานรวมและคาร์บอน

เกณฑ์การวัด	ก่อน(FIFO)	หลัง(Carbon-Aware)	ลดลง(%)
พลังงานที่ใช้รวม(kWh)	368.44	293.28	-20.4%
การปล่อย CO_2 รวม(g)	146,271.53	109,449.57	-25.2%

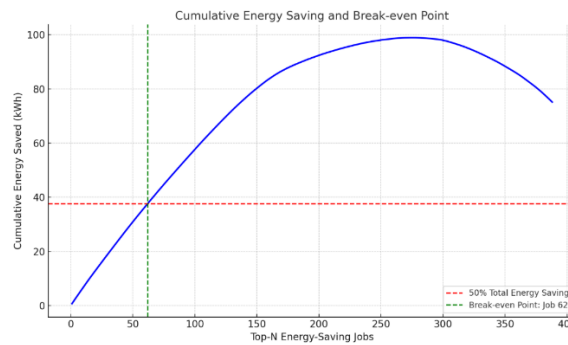


ภาพที่ 5 แสดง Dashboard ของปริมาณ Carbon เฉลี่ย

การวิเคราะห์จุดสมดุลด้านพลังงาน (Break-even Point Analysis)

ในการวิเคราะห์ผลลัพธ์เชิงลึกเพิ่มเติม งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการประเมิน จุดสมดุลด้านพลังงาน (Energy Break-even Point) ซึ่งหมายถึงจำนวนของงาน (Jobs) ที่สามารถสร้าง การประหยัดพลังงานสะสม (Cumulative Energy Saving) ได้ถึงร้อยละ 50 ของพลังงานรวมที่ประหยัดได้ทั้งหมดจากการใช้อัลกอริธึม Carbon-Aware Scheduling ดังแสดงในภาพที่ 6 Break-even Point Analysis โดยลำดับวิธีการวิเคราะห์ ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดลำดับงานตามปริมาณ พลังงานที่ประหยัดได้ต่อ Job เรียงจากมากไปน้อย
2. คำนวณค่าการประหยัดพลังงานสะสม (Cumulative Energy Saved)
3. หาจุดตัดที่ค่าการประหยัดสะสม $\geq 50\%$ ของพลังงานที่ประหยัดได้ทั้งหมด



ภาพที่ 6 Break-even Point Analysis

ผลการวิเคราะห์จุดสมดุลด้านพลังงาน (Break-even Point Analysis)

จากการประมวลผลทั้งหมด 500 งาน พบว่า จุด Break-even อยู่ที่ ลำดับงานที่ 62 ซึ่งงานกลุ่มนี้คิดเป็นเพียง 12.4% ของจำนวนงานทั้งหมด แต่สามารถประหยัดพลังงานรวมได้ถึง 37.63 kWh จากพลังงานที่ประหยัดได้ทั้งหมด 75.15 kWh ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า งานเพียงส่วนน้อยของระบบสามารถสร้างผลกระทบเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพพลังงานของระบบโดยรวม

การตีความผลลัพธ์จากการทดลอง

ลักษณะของงานกลุ่มที่มีการประหยัดสูงมักมีเงื่อนไขดังนี้

มี Deadline ที่ยืดหยุ่น ทำให้สามารถถูกจัดสรรไปยัง TimeSlot ที่มีค่า Carbon Intensity และ PUE ต่ำ มีขนาดงานใหญ่ (Job Size สูง) ทำให้การเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมมีผลต่อพลังงานรวมที่ใช้อย่างชัดเจน มี CPU/Memory Demand สูง ทำให้การจัดตารางผิตช่วงเวลาอาจส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานสูญเปล่ามากขึ้น

การวิเคราะห์ในส่วนนี้สามารถนำไปใช้ในการ กำหนดนโยบายจัดลำดับความสำคัญของงาน (Job Prioritization) ในศูนย์ข้อมูลได้ โดยเน้นจัดการกับงานที่มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานสูงเป็นอันดับแรก เพื่อให้มีผลกระทบเชิงบวกต่อสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของระบบ

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เสนอแนวทางการใช้ Carbon-Aware Scheduling สำหรับระบบ IT แบบดั้งเดิม (Legacy IT Systems) ในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัย โดยมุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการเลือกช่วงเวลาที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนต่ำที่สุด การประเมินประสิทธิภาพการทำงานดำเนินการผ่านเกณฑ์

ต่างๆ เช่น การวัดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามมาตรฐาน ISO 14064, การวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานด้วย Power Usage Effectiveness (PUE) และการประเมินผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เช่น เวลาการประมวลผลรวมและความหน่วงเวลาเฉลี่ย

จากการทดลองในสภาพแวดล้อมจำลอง 7 วัน อัลกอริธึมที่พัฒนาขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานได้ 20.4% และการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 25.2% โดยกระจายงานไปยังช่วงเวลาที่มียก PUE และ Carbon Intensity ต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เพียง 12.4% ของงานทั้งหมดสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 50% ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการจัดการโหลดงาน ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันถึงประสิทธิภาพของอัลกอริธึมและศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในการสนับสนุนการดำเนินงานของมหาวิทยาลัยอย่างยั่งยืนและลด Carbon Footprint ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผลการวิจัย

1. ระบบ IT แบบ Legacy ภายในศูนย์ข้อมูล (Legacy IT Systems in University Data Center) คือ ศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัยที่ใช้เซิร์ฟเวอร์และอุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบเดิม ซึ่งมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และไม่มีการบูรณาการระบบจัดการโหลดงานที่รองรับแนวคิดการลดคาร์บอน
2. การทดสอบในกรณีศึกษาของ Legacy IT Systems แสดงให้เห็นว่า Carbon-Aware Scheduling มีศักยภาพในการใช้งานจริงในศูนย์ข้อมูลของมหาวิทยาลัยที่ไม่มีแหล่งพลังงานหมุนเวียน และสามารถสนับสนุนการบรรลุเป้าหมายการเป็น Green University ด้วยการลดการปล่อยคาร์บอนและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
3. แม้ว่าการใช้ Carbon-Aware Scheduling จะช่วยลดการปล่อยคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัด เช่น การไม่ได้รวม Dynamic Carbon Pricing หรือ Demand Response และการจำลองข้อมูลที่ไม่ได้รวมการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบจริง ซึ่งอาจจำกัดความแม่นยำในการประเมินผลการลดการปล่อยคาร์บอน
4. งานวิจัยในอนาคตสามารถพัฒนา Dynamic Scheduling Algorithms ที่คำนึงถึงการลดการปล่อยคาร์บอน การใช้พลังงานหมุนเวียน และการตอบสนองต่อความต้องการ (Demand Response) รวมถึงการเพิ่มพีเออร์ที่รองรับการเปลี่ยนแปลงในปริมาณงานและข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนแบบ real-time เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

เอกสารอ้างอิง

- Acun, Bilge, Benjamin Lee, Fiodar Kazhamiaka, Kiwan Maeng, Manoj Chakkaravarthy, Udit Gupta, David Brooks, and Carole-Jean Wu. (2023). “Carbon Explorer: A Holistic Approach for Designing Carbon Aware Datacenters.” Pp. 118–32 in *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Volume 2*.
- Bashir, Noman, Tian Guo, Mohammad Hajiesmaili, David Irwin, Prashant Shenoy, Ramesh Sitaraman, Abel Souza, and Adam Wierman. (2021). “Enabling Sustainable Clouds: The Case for Virtualizing the Energy System.” Pp. 350–58 in *Proceedings of the ACM Symposium on Cloud Computing*. Seattle WA USA: ACM.
- Batlajery, Belfrit Victor. (2013). “Revisiting Legacy Systems and Legacy Modernization from the Industrial Perspective.”
- Beijert, Lotte, Daniela Mihailescu, and Dennis Stam. (2016). “THESIS WITHIN: Informatics.”
- Ferdosian, Nasim, Mohamed Othman, Borhanuddin Mohd Ali, and Kweh Yeah Lun. (2016). “Greedy-Knapsack Algorithm for Optimal Downlink Resource Allocation in LTE Networks.” *Wireless Networks* 22(5):1427–40. doi: 10.1007/s11276-015-1042-9.
- Guo, Yibo, and George Porter. (2021). “Carbon-Aware Inter-Datacenter Workload Scheduling and Placement.”
- Jha, Rohan, Rishabh Jha, and Mazhar Islam. (2025). “Forecasting US Data Center CO2 Emissions Using AI Models: Emissions Reduction Strategies and Policy Recommendations.” *Frontiers in Sustainability* 5:1507030. doi: 10.3389/frsus.2024.1507030.
- Khabouze, Rabie. (2022). “Modernization of Legacy Information Technology Systems.”
- Kocot, Bartłomiej, Paweł Czarnul, and Jerzy Profic. (2023). “Energy-Aware Scheduling for High-Performance Computing Systems: A Survey.” *Energies* 16(2):890. doi: 10.3390/en16020890.

Lechowicz, Adam, Rohan Shenoy, Noman Bashir, Mohammad Hajiesmaili, Adam Wierman, and Christina Delimitrou. (2025). “Carbon- and Precedence-Aware Scheduling for Data Processing Clusters.”

Nartey, Josephine. (2025). “The Environmental Footprint of Data Centers: Examining Energy Consumption, Greenhouse Gas Emissions, and Strategies for Sustainable Computing.”