

การเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) ที่เกิดขึ้นระหว่างการ
ผลิตคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างที่เป็นมิตร
กับสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต

Comparison of Carbon Dioxide Emissions (CO_2e) Produced Between Ordinary Concrete
Production and Geopolymer Concrete for Environmentally Friendly Construction
Industry by Using Life Cycle Assessment Methods

ศุภกร อัญญเสน (Supakorn Aranyasen)* ดร.กอบร ศรีนาวัน (Dr.Korb Srinavin)^{1**}

ดร.พีรณิธิ อักษร (Dr. Preenithi Aksorn)*** วุฒิพงษ์ กุศลคุ้ม (Wutipong Kusonkhum)****

(Received: June 30, 2020; Revised: September 2, 2020; Accepted: October 1, 2020)

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีตเพื่อการก่อสร้างอาคาร อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการใช้งานพลังงานและก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกสู่สภาพแวดล้อมมากที่สุด เมื่อเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่นๆ เพื่อลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นได้มีการพยายามหา คอนกรีตชนิดอื่นมาใช้แทนคอนกรีตปกติ เช่น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตซึ่งมีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม โดยเถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จาก โรงงานผลิตไฟฟ้าถ่านหิน การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) จากการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa อายุที่ 28 วัน ทั้ง 2 ประเภท ด้วยวิธีการ ประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ในการวิเคราะห์หาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) โดยอาศัยข้อมูลจาก การทบทวนวรรณกรรมและจากการสำรวจภาคสนาม จากการศึกษาพบว่า ผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) สำหรับการผลิตคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทเป็นดังนี้ คอนกรีตปกติ มีค่าเท่ากับ $451.09 \text{ kg-CO}_2\text{e} / \text{m}^3$ และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีค่า เท่ากับ $420.49 \text{ kg-CO}_2\text{e} / \text{m}^3$

ABSTRACT

The construction industry uses cement as the main raw material of concrete production for building construction. However, cement production process produces Carbon dioxide (CO_2) into the environment with higher rate compared to other raw materials. To reduce carbon dioxide emissions from increased cement production, other types of concrete to replace the ordinary concrete such as geopolymer concrete which has fly ash as an ingredient and it is waste from coal-fired power plants was considered. The objective of this study is to compare the amount of carbon dioxide emission equivalent (CO_2e) from the production of 1 cubic meter (m^3) of concrete which has the compressive strength of 40 MPa at 28 days in both types using the Life Cycle Assessment (LCA) method. In the analysis of carbon dioxide equivalent (CO_2e), the data from the literature and field data have been used. It is found that the sum of the carbon dioxide equivalent (CO_2e) for both types of concrete production are as follows: Ordinary concrete emits $451.09 \text{ kg-CO}_2\text{e} / \text{m}^3$ and Geopolymer concrete emits $420.49 \text{ kg-CO}_2\text{e} / \text{m}^3$.

คำสำคัญ: การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต คอนกรีตทั่วไป

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), Geopolymer concrete, Ordinary concrete

¹Corresponding author: korbisri@kku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

****นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมคอนกรีตได้รับการกล่าวขานว่าเป็นหนึ่งในสาเหตุของภาวะโลกร้อนเนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตคอนกรีตและวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC) ประกอบด้วยประมาณ 5% ถึง 7% ของกิจกรรมการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มนุษย์สร้างขึ้นทั่วโลก [1-2] สาเหตุสำคัญของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าสูงที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา คือ การเผาหินปูนซึ่งเป็นหนึ่งในส่วนผสมที่สำคัญซึ่งนำไปสู่การก่อตัวและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ การใช้พลังงานสูงในระหว่างการผลิตรวมถึงการทำความร้อนวัตถุดิบภายในเตาเผาหินปูนที่อุณหภูมิสูงกว่า $1,400^\circ\text{C}$ [3] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาทางเลือกวัสดุอื่นมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเริ่มจากลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อเป็นสารยึดเกาะสำหรับคอนกรีตทั่วไปรวมถึงเถ้าลอย (Fly ash) ที่เป็นของเสียที่เหลือทิ้งจากการเผากำลังก๊าซเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าและตะกรัน (GGBS) เหลือทิ้งจากการผลิตเหล็ก [4] ประเทศไทยมีแหล่งกำเนิดของเถ้าลอยจากโรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง โดยมีปริมาณเถ้าลอยปีละประมาณ 3 ล้านตัน [5] สำหรับเถ้าลอยจะประกอบด้วยซิลิกาและอลูมินาเป็นส่วนใหญ่ [6] ด้วยรูปร่างขนาดเล็กซึ่งและมีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุปอซโซลาน จึงสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ และยังสามารถนำมาเป็นวัสดุตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตอิโพลีเมอร์จากเถ้าลอยได้ [7] อย่างไรก็ตามทั่วโลกยังคงมีความต้องการใช้คอนกรีตทั่วไปเพิ่มขึ้นเกือบ 200 % จนถึงปี 2593 [8 -10] การบรรเทาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปัญหาที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตทั่วไป จึงได้มีวัสดุทางเลือกรูปแบบใหม่ที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่เรียกว่าอิโพลีเมอร์คอนกรีต (GPC) [10] ทำให้เกิดการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพสำหรับใช้อิโพลีเมอร์คอนกรีตเพื่อในอุตสาหกรรมก่อสร้างเพิ่มขึ้น [11] ในกระบวนการผลิตวัตถุดิบเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตทั่วไปและอิโพลีเมอร์คอนกรีตจะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน อย่างไรก็ตามมีการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA) ตามมาตรฐานของ ISO 14040 (2006) [12] มี 4 ขั้นตอนดำเนินงาน คือ 1.การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต 2.การวิเคราะห์บัญชีรายการวงจรชีวิต 3.การประเมินผลกระทบโดยการคำนวณและ 4.การตีความผลลัพธ์ โดยวิธีการดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่ดีที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบชนิดต่างๆที่ใช้ผสมในคอนกรีตเพื่อค้นหาปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของสารผสม จะช่วยให้การประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของการก่อสร้างกลายเป็นเครื่องมือที่สอดคล้องในการบรรลุความยั่งยืนในการออกแบบทางวิศวกรรมโยธา และเป็นวิธีที่ครอบคลุมที่สุดในการพิจารณาผลกระทบต่อวงจรชีวิตด้านสิ่งแวดล้อมของอาคารสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจออกแบบที่จะส่งผลให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลง [13]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) สำหรับการผลิตอิโพลีเมอร์คอนกรีตกับคอนกรีตทั่วไป 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน

วิธีการวิจัย

การประเมินวัฏจักรชีวิตเป็นเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการศึกษาวิจัยได้กำหนดขอบเขตของการประเมินแบบ (Cradle-to-Gate) คือ เริ่มต้นตั้งแต่ขั้นตอนการ

ผลิตวัตถุดิบ และกระบวนการขนส่งวัตถุดิบถึงสถานที่เก็บรวบรวมวัตถุดิบเพื่อผลิตคอนกรีต ซึ่งจะไม่ได้พิจารณาผลกระทบในช่วงการใช้งานรวมถึงการกำจัดทำลายซากเมื่อหมดอายุการใช้งาน โดยขั้นตอนวิธีการประเมินตามมาตรฐาน ISO14040 (2006) มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา (Goal and Scope Definition)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) เพื่อเปรียบเทียบหาปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ออกมาในรูปแบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) ของการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต และคอนกรีตทั่วไป 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa อายุที่ 28 วัน โดยการประเมินวัฏจักรชีวิตจะช่วยตัดสินใจเพื่อระบุและแนะนำประเภทของคอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.1 หน่วยการทำงาน

หน่วยการทำงานเป็นตัวกำหนดสิ่งที่กำลังศึกษาและเป็นดังนั้นจึงเชื่อมโยงกับปริมาณสารขาเข้า (Input) และสารขาออก (Output) ทั้งหมดของการศึกษา สำหรับในการศึกษาหน่วยการผลิตคอนกรีตทั่วไป (OPC) และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (GPC) ถูกระบุเป็นหน่วยลูกบาศก์เมตร (m^3) เพื่อใช้พิจารณากิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ออกมาในรูปแบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) จากการกระบวนการผลิตวัตถุดิบและกระบวนการขนส่งวัตถุดิบ

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

โดยขอบเขตของการศึกษาจะใช้การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในรูปแบบ (Cradle- to-Gate) ตามมาตรฐาน ISO 14040: 2006 คือ (1) กระบวนการผลิตวัตถุดิบทั้งหมดที่ใช้สำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (2) กระบวนการขนส่งวัตถุดิบแต่ละชนิดมายังห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (3) กระบวนการผลิตคอนกรีต (โดยการผสมคอนกรีต) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ สมมติให้ทำการผสมด้วยแรงงานคนจะไม่ได้ก่อให้เกิดค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) เนื่องจากไม่ได้ใช้พลังงานเชื้อเพลิงเป็นตัวจุดระเบิดในการเผาไหม้สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงงานการไฟฟ้าแห่งประเทศไทยเพื่อนำกระแสไฟฟ้ามาใช้หมุนให้เครื่องผสมคอนกรีตทำงานได้ โดยเครื่องผสมคอนกรีตนั้นมีข้อจำกัดเรื่องของปริมาณความจุแตกต่างกันแต่ละยี่ห้อและอายุการใช้งานของเครื่องผสมคอนกรีตจึงไม่นำค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) มาพิจารณา หลังจากได้ข้อมูลทั้ง 3 กระบวนการแล้วทำการคำนวณหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) ของผลิตคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa อายุที่ 28 ภาพที่ (1)

2. การจัดทำบัญชีรายการ (Life Cycle Inventory: LCI)

เป็นขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการดำเนินกิจกรรมที่กำหนดไว้ในขั้นตอนของการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา ซึ่งสำหรับการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมเป็นข้อมูลของปริมาณสารขาเข้า (Input) และสารขาออก (Output) ของกระบวนการผลิตวัตถุดิบแต่ละชนิดจะถูกคิดคำนวณออกมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก สำหรับข้อมูลที่ต้องเก็บรวบรวมเพื่อใช้ในการศึกษามี 2 ส่วนดังนี้ 1) ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary data) คือ ข้อมูลของระยะทางการขนส่งวัตถุดิบจะอ้างอิงระยะการเดินทางในกูเกิลแมพ (Google Map) สำหรับการขนส่งวัตถุดิบผู้วิจัยได้สมมติกำหนดสถานที่ผลิตวัตถุดิบประเภทต่างๆขนส่งมายังร้านขายวัสดุก่อสร้าง และขนส่งวัตถุดิบมาเก็บรวบรวมไว้ที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ภาพที่ 2) 2) ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) คือ ข้อมูลที่ได้จากการทบทวน

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เอกสารที่เผยแพร่สู่สาธารณะรวมถึงจากฐานข้อมูลของแต่ละประเทศ ประกอบด้วย สัดส่วนการผสมคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน [14] สัดส่วนการผสมซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน [15] ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการผลิตวัตถุดิบแต่ละชนิด [4, 16] และค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการขนส่งของรถประเภทต่างๆ [17] (ตารางที่ 3)

3. การคำนวณเพื่อหาค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-e)

วิธีการคำนวณหาค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-e) จากกิจกรรมการผลิตวัตถุดิบตาม Morawicki [18] ได้เสนอวิธีการคำนวณตามสูตรจากสมการที่ (1)

$$\text{GHG emission (CO}_{2\text{-eq}}) = \text{Activity Data} \times \text{Emission Factor} \times \text{GWP} \quad (1)$$

โดยที่

GHG emission (CO ₂ -eq)	คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีหน่วยเป็น กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า
Activity data	คือ ข้อมูลกิจกรรม
Emission factor	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก มีหน่วยเป็น กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อหน่วยข้อมูลกิจกรรม
GWP (Global Warming Potentials)	คือ ศักยภาพของภาวะโลกร้อน สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า (GWP ₁₀₀ เท่ากับ 1)

สำหรับวิธีการคำนวณหาค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-e) จากกิจกรรมการผลิตวัตถุดิบซีเมนต์โพลิเมอร์คอนกรีตและคอนกรีตทั่วไป 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa อายุที่ 28 วัน โดยยกตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂-e) ของผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (ตารางที่ 1) ใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

การผลิตวัตถุดิบ

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการผลิตวัตถุดิบ (คอลัมน์ที่ 4) = ปริมาณของวัตถุดิบ (คอลัมน์ที่ 2) x ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตวัตถุดิบ (คอลัมน์ที่ 3)

การขนส่งวัตถุดิบ

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งวัตถุดิบ (คอลัมน์ที่ 12) = การขนส่งขาไป + การขนส่งขากลับ โดย

การขนส่งขาไป = ระยะทาง (คอลัมน์ที่ 6) x น้ำหนักบรรทุก (คอลัมน์ที่ 7) x ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการขนส่งขาไป (คอลัมน์ที่ 10)

การขนส่งขากลับ = [(น้ำหนักบรรทุก (คอลัมน์ที่ 7) / น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (คอลัมน์ที่ 9)) x ระยะทาง (คอลัมน์ที่ 6) x ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการขนส่งขากลับ (คอลัมน์ที่ 11)]

หมายเหตุ : โดยรถบรรทุกขนาดใหญ่และรถบรรทุกขนาดเล็ก จะวิ่งขนส่งวัสดุขาไป (เต็มคัน) และการขนส่งวัสดุขากลับ (ตีเปล่า)

4. การแปลผล (Interpretation)

เป็นขั้นตอนในการวิเคราะห์และสรุปผลจากการคำนวณหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลผลิตคอนกรีตทั่วไปเปรียบเทียบกับการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพื่อนำเสนอแนวทางในการแก้ไข

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าผลผลิตคอนกรีตทั่วไป 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน พบว่าค่าผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าเท่ากับ $451.09 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ ซึ่งมาจากกระบวนการผลิตวัตถุดิบ เป็นปริมาณ $402.62 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ และจากกระบวนการขนส่งวัตถุดิบ เป็นปริมาณ $48.47 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ โดยปัจจัยผลกระทบหลักมาจากการใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบรวมถึงการใช้งานที่ส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูงที่สุดร้อยละ 87.92 รองลงมา คือ มวลรวมหยาบ (หินบะซอลต์) มีค่าร้อยละ 11.25 (ตารางที่ 1) และการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน จากการคำนวณพบว่าค่าผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีค่าเท่ากับ $420.49 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ ซึ่งมาจากกระบวนการผลิตวัตถุดิบ เป็นปริมาณ $339.18 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ และกระบวนการขนส่งวัตถุดิบ เป็นปริมาณ $81.31 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ โดยมีปัจจัยผลกระทบหลักมาจากการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาที่จะส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมากที่สุด มีค่าร้อยละ 50.27 รองลงมา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่าร้อยละ 25.47 และสำหรับเถ้าลอย มีค่าร้อยละ 1.57 (ตารางที่ 2) ซึ่งสามารถสรุปผลรวมของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการกระบวนการผลิตวัตถุดิบและกระบวนการขนส่งของคอนกรีตทั้ง 2 ชนิด (ภาพที่ 3)

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบได้ว่าผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของการผลิตคอนกรีตทั่วไป 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ $451.09 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ และการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ $420.49 \text{ kg-CO}_2/\text{m}^3$ โดยการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถลดค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ลดลงร้อยละ 6.78 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยของ Turner และ Collin [3] นอกจากนั้นสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ของการผลิตซีเมนต์และมวลรวมยังสอดคล้องกับ Flower และ Sanjayan [4] อีกด้วย ทั้งนี้ประโยชน์ของจีโอโพลิเมอร์จะช่วยลดผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และจากการศึกษามีความเป็นไปได้ที่จะลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 44-64% [20] อย่างไรก็ตามการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตควรมีข้อระมัดระวังผลกระทบจากการใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สูงที่สุด (ตารางที่ 2) จะส่งผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมได้มากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับ Rafk Abbas [21]

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าการใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment) มาใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ถูกคำนวณออกมาเป็นค่าผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของการดำเนินกิจกรรม เริ่มจากกระบวนการผลิตวัตถุดิบหลัก และ กระบวนการขนส่ง เพื่อใช้สำหรับการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน โดย จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถลดค่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลงได้ประมาณร้อยละ 6.78 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมหลัก นอกจากนั้นการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตยังช่วยในการจัดการกับของเสียจากโรงงานผลิตไฟฟ้าถ่านหินเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ เป็นวัสดุทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเป็นคอนกรีตชนิดใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและอาจเป็นที่ต้องการของผู้ประกอบการสำหรับการสร้างมูลค่าจากการนำวัสดุจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมาใช้ได้อย่างแพร่หลายในอนาคต

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

1. การผลิตคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa อายุที่ 28 คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2) โดยมีขอบเขตของการประเมินค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2) ระหว่างคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตในรูปแบบ (Cradle-to-gate) เฉพาะในส่วน of กระบวนการผลิตวัตถุดิบทั้งหมด และกระบวนการขนส่ง เท่านั้น ซึ่งยังขาดค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2) จากกระบวนการผลิตคอนกรีตด้วยเครื่องผสม ในส่วนนี้ไปผู้วิจัยท่านอื่นอาจนำไปศึกษาต่อในอนาคตอาจช่วยให้การประเมินค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2) ได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น
2. ผลลัพธ์ที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนในงานวิจัยของประเทศไทยกับต่างประเทศที่อาจเกิดขึ้นจากประเภทของยานพาหนะ ความเสื่อมสภาพของอายุการใช้งานยานพาหนะ ลักษณะการขับขี่ ประเภทถนน และระยะทางในการขนส่งที่มีความแตกต่างกันมีความเป็นลักษณะเฉพาะที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการขนส่ง
3. ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยจะทราบได้ว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถช่วยลดค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2) ได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป ทำให้ทราบได้ว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า หากมีการศึกษาวิจัยมากขึ้นจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตอาจเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยอมรับให้สามารถใช้ควบคู่ไปกับคอนกรีตปกติทั่วไปในงานก่อสร้างได้แพร่หลายในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Huntzinger DN, Eatmon TD. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2009 May 1;17(7):668-675.
2. Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*. 2009 Sep 1;31(8):601-605.
3. Turner LK, Collins FG. Carbon dioxide equivalent (CO_2 -e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2013 Jun 1; 43:125-130.



4. Flower DJ, Sanjayan JG. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. The international Journal of life cycle assessment. 2007 Jul 1;12(5):282.
5. Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C, Chalee W, Rattanasak U. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. Waste management. 2009 Feb 1;29(2):539-543.
6. Feng J, Zhang R, Gong L, Li Y, Cao W, Cheng X. Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity. *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 529-533.
7. Van Jaarsveld JG, Van Deventer JS, Lukey GC. The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*. 2003 Jan 1;57(7):1272-1280.
8. Nejat P, Morsoni AK, Jomehzadeh F, Behzad H, Vesali MS, Majid MA. Iran's achievements in renewable energy during fourth development program in comparison with global trend. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22:561-570.
9. Pacheco-Torgal F, Moura D, Ding Y, Jalali S. Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Constr Build Mater* 2011;25:3732-3745.
10. Xie T, Ozbakkaloglu T. Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceram Int* 2015;41:5945-5958.
11. Huseien GF, Mirza J, Ismail M, Ghoshal SK, Hussein AA. Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Dec 1;80:54-74.
12. ISO E. ISO 14040: 2006. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework. CEN (European Committee for Standardisation), Brussels. 2006.
13. Vieira DR, Calmon JL, Coelho FZ. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*. 2016 Oct 15;124:656-666.
14. Huang Q, Lin L, Tan EL, Singh B. Mix Design of Recycled Aggregate Concrete Using Packing Density Method. In *Proceedings of the 1st International Conference on Structural Engineering Research*, 20-22 November 2017, Sydney, Australia 2017 (pp. 49-55).
15. SIVA MM, PRABU MB, SOUNDHIRARAJAN MK, RAMYA ME, SARAVANAN MM. STUDY ON MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE MADE WITH RECYCLED AGGREGATES. *micron*. 2019;195(19.5):45.
16. Sukontasukkul P. Methodology for Calculating Carbon Dioxide Emission in the Production of Ready-mixed Concrete. In *1st International Conference on Computational Technologies in Concrete Structures* 2015.
17. Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization: TGO), Carbon Footprint Technical Committee of Products. Guidelines for evaluating carbon footprint of products; 2011 Sep. 101p.
18. Morawicki R O, Hager T "Energy and greenhouse gases footprint of food processing." (2014): 82-99.
19. Collins F. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2010 Jul 1;15(6):549-556.
20. McLellan BC, Williams RP, Lay J, Van Riessen A, Corder GD. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of cleaner production*. 2011 Jun 1;19(9-10):1080-1090.



21. Abbas R, Khereby MA, Ghorab HY, Elkhoshkhany N. Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2020 Jan 19:1-9.



ตารางที่ 1 ผลการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂) ของคอนกรีตทั่วไป 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ เท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน

Mix Proportion		Raw Material Production					Transportation					
		Quantity [14]	Emission Factor of Production	CO2 Emission of Production	%	Distance	Loading	Types of vehicles	Gross Vehicle Weight: GVW	EF goes [17]	EF back [17]	CO ₂ Emission of Transport
(1)		(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Item	Unit	kg.m3	kgCO2-e/kg	kg-CO2.m3		km	tone		tone	kg-CO2- e/tonne-km	kg CO2- e/km	kg CO2-e
Cement		431.69	0.8200 [4]	353.99	87.92	332	0.43169	Semi-truck 22 wheel	32	0.0456	1.0122	11.7
						12		truck 4 wheel	7	0.1399	0.3105	
Coarse Aggregate 10 mm		507.46	0.0357 [4]	18.12	4.5	352	0.50746	Semi-truck 18 wheel	32	0.0408	0.2289	9.27
						12		truck 6 wheel	8.5	0.0672	0.4238	
Coarse Aggregate 20 mm		761.19	0.0357 [4]	27.17	6.75	352	0.76119	Semi-truck 18 wheel	32	0.0408	0.2289	13.92
						12		truck 6 wheel	8.5	0.0672	0.4238	
Fine aggregate		713.62	0.0046 [16]	3.28	0.82	368	0.71362	Semi-truck 18 wheel	32	0.0408	0.2289	13.21
						12		truck 6 wheel	8.5	0.0672	0.4238	
Superplasticizer		2.75	0.0043 [4]	0.01	0.003	364	0.00275	Pickup Truck 4 Wheel, solid box	1.5	0.2136	0.2395	0.37
Water		151.09	0.0003 [17]	0.057	0.01	-	0.15109	pipeline	-	-	-	-
Sum Raw Material Production =				402.62 kg-CO ₂ e	100	Sum Transportation =						48.47 kg-CO ₂ e
Total = 402.62 + 48.47 = 451.09 kg-CO₂e												

*หมายเหตุ ผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร = (คอลัมน์ที่ 4) + (คอลัมน์ที่ 12)

โดยที่ คอลัมน์ที่ 4 = (คอลัมน์ที่ 2) x (คอลัมน์ที่ 3)

คอลัมน์ที่ 12 = [(คอลัมน์ที่ 6) x (คอลัมน์ที่ 7) x (คอลัมน์ที่ 10)] + [(คอลัมน์ที่ 7) / (คอลัมน์ที่ 9) x (คอลัมน์ที่ 6) x (คอลัมน์ที่ 11)]



ตารางที่ 2 ผลการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน

Mix Proportion	Raw Material Production				Transportation						
	Quantity (15)	Emission Factor of Production	CO2 Emission of Production	%	Distance	Loading	Types of vehicles	Gross Vehicle Weight: GVW	EF goes (17)	EF back (17)	CO2 Emission of Transport
	(1)	(2)	(3)	(4)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Item \ Unit	kg·m³	kg·CO _{2e} /kg	kg·CO _{2e} /m³		km	tone		tone	kg·CO _{2e} /tone·km	kg·CO _{2e} /km	kg CO _{2e}
Fly Ash	197.2	0.027 (4)	5.32	1.57	560	0.1972	Semi-Truck Tanker 10 Wheel	16	0.0471	0.460	9.25
					12		Pickup Truck 4 Wheel, solid box	1.5	0.2136	0.2395	
GGBS	197.20	0.143 (4)	28.2	8.31	472	0.1972	Semi-Truck Tanker 10 Wheel	16	0.0471	0.460	7.94
					12		Pickup Truck 4 Wheel, solid box	1.5	0.2136	0.2395	
Coarse aggregate	1294	0.0357 (4)	46.19	13.62	352	1.294	Semi-truck 18 wheel	32	0.0408	0.2289	23.66
					12		Truck 6 Wheel	8.5	0.0672	0.4238	
Fine aggregate	554.00	0.0046 (16)	2.55	0.75	357	0.554	Semi-truck 18 wheel	32	0.0408	0.2289	10.26
					12		Truck 6 Wheel	8.5	0.0672	0.4238	
Sodium hydroxide	45.1	1.915 (3)	86.36	25.47	457	0.0451	Pickup Truck 4 Wheel, solid box	1.5	0.2136	0.2395	7.68
Sodium silicate	112.6	1.514 (3)	170.48	50.27	503	0.1126	Pickup Truck 4 Wheel	1.5	0.2136	0.2395	21.03
Superplasticizer	11.83	0.0043 (4)	0.05	0.01	364	0.01183	Pickup Truck 4 Wheel, solid box	1.5	0.2136	0.2395	1.49
Water	59.14	0.0003 (17)	0.02	0.01	-	0.05914	pipeline	-	-	-	-
Sum Raw Material Production =			339.18 kg·CO _{2e}	100	Sum Transportation =						81.31 kg·CO _{2e}
Total= 339.18 + 81.31 = 420.49 kg·CO_{2e}											

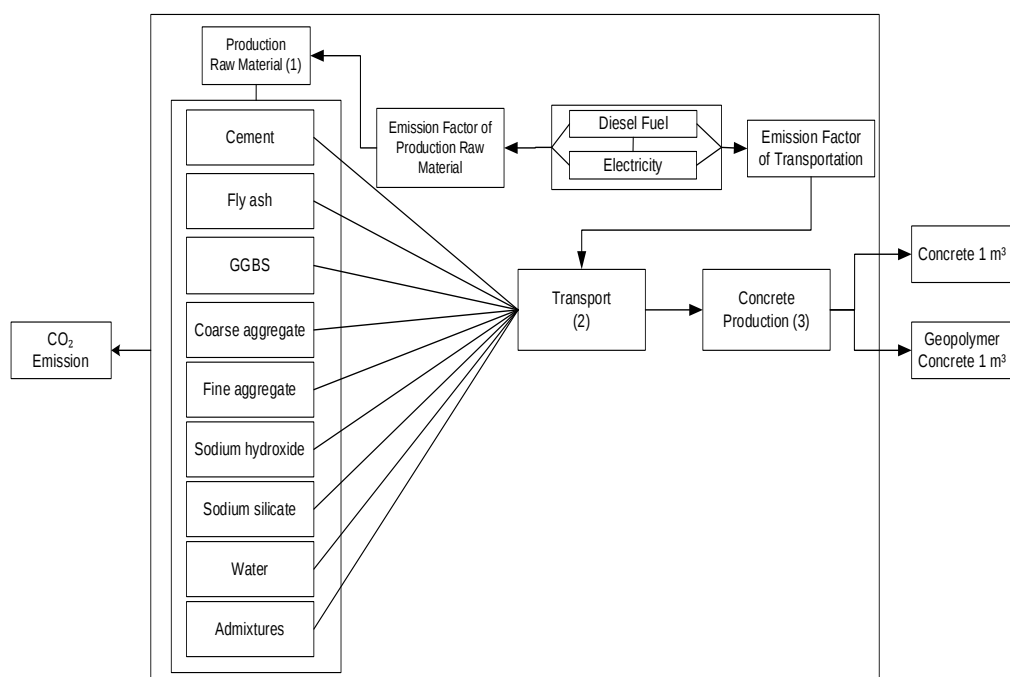
*หมายเหตุ ผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร = (คอลัมน์ที่ 4) + (คอลัมน์ที่ 12)

โดยที่ คอลัมน์ที่ 4 = (คอลัมน์ที่ 2) x (คอลัมน์ที่ 3)

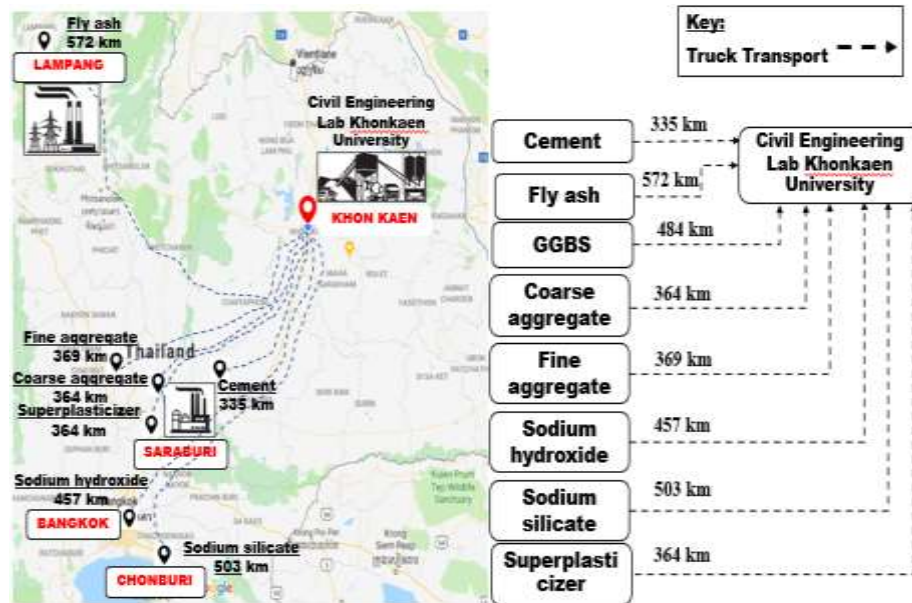
คอลัมน์ที่ 12 = [(คอลัมน์ที่ 6) x (คอลัมน์ที่ 7) x (คอลัมน์ที่ 10)] + [(คอลัมน์ที่ 7) / (คอลัมน์ที่ 9) x (คอลัมน์ที่ 6) x (คอลัมน์ที่ 11)]

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการขนส่งของรถประเภทต่างๆ [17]

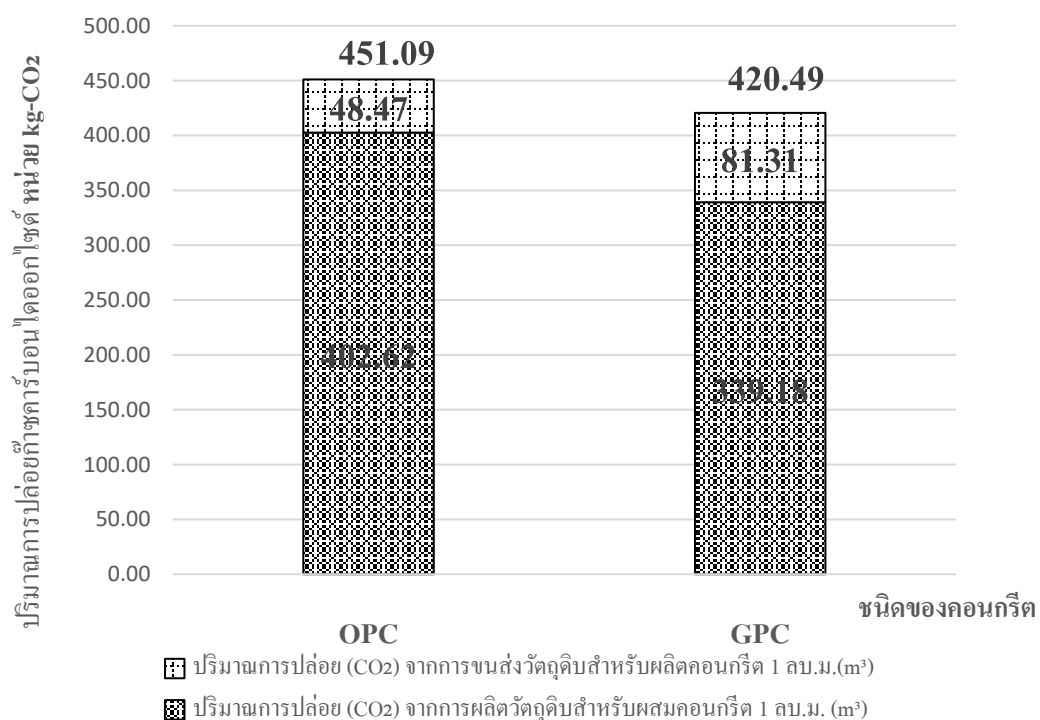
Type of Truck	Gross Vehicle Weight: GVW	Emission Factor	
		Goes (kg CO ₂ -e/(tkm))	Back (kg CO ₂ -e/(km))
Semi-truck 22 wheel	32 T	0.0456	1.0122
Semi-truck 18 wheel	32 T	0.0408	0.2289
Semi-Truck Tanker 10 Wheel	16 T	0.0471	0.46
truck 6 wheel	8.5 T	0.0672	0.4238
truck 4 wheel	7 T	0.1399	0.3105
Pickup Truck 4 Wheel, solid box	1.5 T	0.2136	0.2395
Pipeline	-	0.0003 kg CO ₂ -e/kg	



ภาพที่ 1 ขอบเขตการศึกษาวิจัยโดยจะพิจารณาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นจากกระบวนการผลิตวัตถุดิบสำหรับผลิตคอนกรีตและกระบวนการขนส่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไป และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 2 ระยะทางการเดินทางรวมของรถที่ขนส่งวัตถุดิบแต่ละประเภทมารวบรวมไว้ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อเป็นสถานที่อ้างอิงในการคิดคำนวณหาผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) สำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไปและจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 3 ผลรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2e) ที่เกิดจากกระบวนการผลิตวัตถุดิบและการขนส่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตคอนกรีตทั่วไป (OPC) และจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (GPC) 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 40 MPa ที่อายุ 28 วัน