

## การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อ การผลิตปูนซีเมนต์

วรเดช เกรียงสันติกุล<sup>1)</sup> ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ<sup>2)</sup>

### บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ มีความสำคัญในแง่ของการผลิตเพื่อส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างและมีความสำคัญอย่างมากต่อเศรษฐกิจของประเทศ แต่อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ยังถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอนาคตการให้ความสำคัญกับการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมจะกลายมาเป็นปัจจัยหนึ่งในการแข่งขันกันทางธุรกิจ ดังนั้นจึงได้ศึกษาและทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ และประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดและยังสามารถลดก๊าซเรือนกระจก ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ได้อีกด้วย

ตัวชี้วัดซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้กับโรงปูน ได้แก่ ตัวชี้วัดในด้านวัตถุดิบ, การใช้พลังงาน ซึ่งประเด็นตัวชี้วัดเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยทำการประเมินจากกลุ่มอุตสาหกรรมซีเมนต์ของบริษัทแห่งหนึ่งจำนวน 5 โรงงาน และทำการประเมินในปี พ.ศ. 2551 ซึ่งผลปรากฏว่ากลุ่มธุรกิจนี้มีค่าประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตถุดิบเท่ากับ 1,760 บาท/ตัน และมีประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านพลังงานเท่ากับ 926,000 บาท/ทะระจุล

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยต้องการต้นทุนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงต่ำที่สุดนั้นทำให้ทราบว่าควรใช้วัตถุดิบในการผลิตคือ หินปูน 1.25 กิโลกรัม ดินเหนียว 130 กรัม ททราย 60 กรัม และใช้เชื้อเพลิงในการผลิตคือ ถ่านหิน 95 กรัม และไบอ้อย 60 กรัม ต่อการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม การที่เราสามารถนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ได้นั้นทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงเหลือ 46 สตางค์ต่อ 1 กิโลกรัมปูนเม็ด อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้น เป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง เช่นช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 25.78 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 25.06 และไนโตรเจนไดออกไซด์ ลดลงร้อยละ 23.77 ดังนั้นจากนิยามของค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ จะเห็นได้ว่าการพัฒนาทั้งในด้านการลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องถือว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจแล้ว

**คำสำคัญ:** ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ปูนซีเมนต์

<sup>1)</sup> นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพฯ10330

อีเมลล์: gooldinko@hotmail.com

<sup>2)</sup> ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพฯ10330

อีเมลล์ : sirichan.t@chula.ac.th

\* Corresponding Author

## ASSESSMENT OF ECO – EFFICIENCY AND APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL FOR CEMENT MANUFACTURING

Voradej Kriengsantikul <sup>1)</sup> Sirichan Thongprasert <sup>2)</sup>

### Abstract

Cement industries are the important upstream for building material industries and they also important to the economic of country . However, the processes of cement manufacturing are effect to environment. In the future environmental problems will become a business competition. Hence, the article focus on evaluate eco – efficiency and apply mathematical model to minimize material cost and fuel cost .

The indices that apply for cement plants are material and energy eco – efficiency. These indices imply with cost of manufacture and also environmental influence. The assessment base on 5 factories of cement group and assessed in 2008. The material eco – efficiency is 1,760 Baht/ton and energy eco – efficiency is 926,000 Baht/Terajoules.

Mathematical model show that the optimum solution for cement making should use limestone 1.25 kilogram clay 130 grams sand 60 grams and coal 95 grams and sugar cane 's leaves 60 grams to make 1 kilogram of clinker. In case of we can use biomass fuel. It can reduce manufacturing cost to 0.46 Baht / ton clinker and reduce environmental burden such as reduce greenhouse gas 25.78 % ,sulphur dioxide 25.06%, nitrogen dioxide 23.77%. So we can conclude that there is an improvement of eco - efficiency

**Keywords:** In English language : eco – efficiency, mathematical model, cement

<sup>1)</sup> Post graduated Students, Department of Industrial Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330  
E-mail: gooldinko@hotmail.com

<sup>2)</sup> Professor, Department of Industrial Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330  
Email: sirichan.t@chula.ac.th

\* Corresponding Author

## 1. บทนำ

คำว่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจมาจากการรวมกันของ คำ 2 คำ ได้แก่คำว่า Eco หมายความว่าได้ถึงระบบนิเวศ: Ecology และ เศรษฐกิจ: Economy กับคำว่า Efficiency ซึ่งแปลตามภาษาไทยว่า ประสิทธิภาพ นิยามของคำว่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจซึ่งบัญญัติโดย The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) หมายความว่าถึงการนำมาซึ่งการแข่งขันกันในด้านคุณภาพด้านการผลิตและการบริการโดยมีจุดประสงค์ที่จะตอบสนองความต้องการของมนุษย์และนำมาซึ่งคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกันจำเป็นที่จะต้องตระหนักถึงผลกระทบที่มีต่อระบบนิเวศและทรัพยากรธรรมชาติ โดยให้อยู่ในระดับที่อย่างน้อยต้องสอดคล้องกับความสามารถที่รองรับได้ของโลกใบนี้ (Carrying Capacity) โดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ

**1.1 พยายามลดการบริโภคทรัพยากร** หมายความว่ารวมถึงการพยายามลดการใช้วัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตพลังงาน น้ำ และที่ดิน ส่งเสริมการใช้ซ้ำ (Reuse) และการแปรใช้ใหม่ (Recycle) และใช้วัตถุดิบทดแทนในการผลิต

**1.2 พยายามลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม** หมายความว่ารวมถึงการลดการปล่อยของเสีย ได้แก่ น้ำทิ้ง ขยะ ก๊าซเรือนกระจก ฝุ่นละออง สารพิษ คาร์บอน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือ สิ่งอื่นใด อันมีผลต่อสิ่งแวดล้อม

**1.3 เพิ่มมูลค่าของสินค้าผลิตภัณฑ์และการบริการ** หมายถึงความพยายามที่จะทำให้ผู้บริโภคได้รับประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ สินค้าและบริการสูงสุด โดยที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติน้อยที่สุด เช่นการประยุกต์ใช้นวัตกรรมใหม่ๆที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การนำหลักการประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจไปใช้กับภาคธุรกิจนั้นสามารถช่วยให้ธุรกิจเกิดผลกำไรที่เพิ่มมากขึ้นจากการพยายามลดการใช้ทรัพยากร หรือวัตถุดิบตั้งต้น และพลังงาน รวมถึงลดการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมลง จะเห็นได้ว่าหลักการของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ นอกจากจะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ

ในทางธุรกิจที่สามารถตรวจวัดได้จริงและชัดเจนแล้ว ยังเป็นดัชนีชี้วัดความสัมพันธ์ด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมที่ช่วยชี้นำทิศทางและสนับสนุนให้นโยบายของรัฐ มุ่งไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืนเพิ่มมากขึ้น อันเป็นเป้าหมายโดยรวมของประเทศในระยะยาว ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม WBCSD ได้กำหนดแนวทาง 7 ประการที่จะช่วยให้การดำเนินงานด้านธุรกิจประสบความสำเร็จในเชิงนิเวศเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น อันประกอบด้วย

- ลดการใช้ทรัพยากร หรือวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตและบริการ (Reduce material intensity)
- ลดการใช้พลังงานในการผลิต และบริการ (Reduce energy intensity)
- ลดการปล่อยสารพิษต่างๆ (Reduce dispersion of toxic substance)
- เสริมสร้างศักยภาพการแปรใช้ใหม่ของวัสดุ (Enhance recyclable)
- เพิ่มปริมาณการใช้ทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ (Maximize use of renewable)
- เพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (Extend product durability)
- เพิ่มระดับการให้บริการของผลิตภัณฑ์และเสริมสร้างธุรกิจบริการ (Increase service intensity)

การประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจสามารถทำได้จากการพิจารณาสัดส่วนของมูลค่าผลิตภัณฑ์และการบริการเปรียบเทียบกับผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม โดย WBCSD ได้กำหนดวิธีการประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\text{Eco - Efficiency} = \frac{\text{Product or service value}}{\text{Environmental influence}} \quad (1)$$

เนื่องจากการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจโดย สมการข้างต้นมีหลายวิธีในการนำค่าข้อมูลมาคำนวณทั้งนี้เนื่องจากทั้งผลิตภัณฑ์หรือการบริการ และผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยตัวชี้วัด (Indicator) มากมายหลากหลายที่ไม่สามารถนำมา รวมกันเป็นตัวเลขเดียวได้ ยกตัวอย่างเช่น ค่าข้อมูล

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจจะสามารถนำข้อมูลผลกระทบมาได้จากตัวชี้วัดหลายด้าน เช่น ค่าข้อมูลที่ได้จากตัวชี้วัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านพลังงาน หรือด้านทรัพยากรน้ำ เป็นต้น ดังนั้นในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ จากสมการดังกล่าวจึงต้องเลือกค่าข้อมูลจากตัวชี้วัดที่เหมาะสมกับธุรกิจแต่ละประเภท ผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จากตัวชี้วัดดังกล่าวต้องสามารถสื่อสารได้ง่าย และสามารถนำไปสู่การตัดสินใจที่จะนำผลลัพธ์การคำนวณไปสู่การปฏิบัติของผู้บริหาร และ คนในองค์กรรวมทั้งบุคคลภายนอกทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจทั้งทางตรงและทางอ้อม (กิตติกร 2551)

## 2. ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์

### 2.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตถุดิบ

(Material Eco – Efficiency) : ME

$$ME = \frac{Q}{\sum Mt} \quad (2)$$

$$\sum Mt = (M_1CF_1 + M_2CF_2 + \dots + M_nCF_n) \quad (3)$$

$$ME = \frac{Q}{(M_1CF_1 + M_2CF_2 + \dots + M_nCF_n)} \quad (4)$$

ME = ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของวัตถุดิบที่ใช้ (ล้านบาท/ตัน)

Q = มูลค่าของผลิตภัณฑ์ (ล้านบาท)

$\sum Mt$  = ผลรวมของวัตถุดิบที่ใช้ (ตัน)

CF = ตัวคูณปรับค่าเพื่อแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน

### 2.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านพลังงาน

(Energy Eco – Efficiency) : EE

$$EE = \frac{Q}{\sum Et} \quad (5)$$

$$\sum Et = (E_1CF_1 + E_2CF_2 + \dots + E_nCF_n) \quad (6)$$

$$EE = \frac{Q}{(E_1CF_1 + E_2CF_2 + \dots + E_nCF_n)} \quad (7)$$

EE = ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของพลังงานที่ใช้ (ล้านบาท/เทระจูล)

Q = มูลค่าของผลิตภัณฑ์ (ล้านบาท)

$\sum Et$  = ผลรวมของพลังงานที่ใช้ (เทระจูล)

CF = ตัวคูณปรับค่าเพื่อแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน (ก่อกเกียรติ 2550)

เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจแล้วเห็นว่าปัจจัยที่เป็นสาระสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมปูนคือ ปัจจัยด้านพลังงานและปัจจัยด้านวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 อย่างนี้เป็นเหตุให้ต้องทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาจำนวนวัตถุดิบที่เหมาะสม การใช้พลังงานหรือการเปลี่ยนไปใช้เชื้อเพลิงชนิดใหม่อันมีผลกระทบต่อค่าเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายรายปี

ปัจจัยในด้านกากของเสียนั้น สามารถทำให้ลดค่ากำจัดขยะและยังเป็นการลดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบได้อีกด้วย แต่เมื่อเทียบกับปัจจัยด้านพลังงานและวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ประโยชน์นั้นน้อยมาก จึงยังมีใช้สาระสำคัญอันควรได้รับการพิจารณา

ปัจจัยในด้านน้ำดิบนั้น ในอุตสาหกรรมปูนไม่ค่อยนิยมใช้ชี้วัด เพราะเหตุว่าใช้น้ำดิบในการหล่อเย็นเท่านั้น เมื่อใช้งานเสร็จก็ยังสามารถนำกลับมาบำบัดเพื่อนำกลับไปใช้งานใหม่ได้อีก แม้ว่าจะมีการระเหยเป็นไอน้ำออกไปจากระบบเสียบ้าง จึงไม่ต้องนำมาประยุกต์ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 3. การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นอาจมีมาตรการในการจัดการหลายแบบ เช่น การเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากการใช้ถ่านหินทั้งหมดมาเป็นการใช้พลังงานจากถ่านหินให้น้อยลง แล้วใช้ ยางรถยนต์เก่าๆที่หมดอายุการใช้งานแล้ว หรือเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ แกลบ ใบอ้อยและปึกไม้ยางพารา ทดแทนบางส่วน ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยให้อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ตัดสินใจในการค้นหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีค่าใช้จ่ายในการ

ดำเนินการน้อยที่สุดโดยคำตอบของระบบสมการนั้นจะทำให้รู้ว่าส่วนผสมในการผลิตปูนเม็ดต้องใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเป็นจำนวนอย่างละเท่าใด

**3.1 กำหนดเป้าหมาย (Objective Function)**

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{10} C_n X_n \tag{8}$$

$$= (C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_{10} X_{10}) \tag{9}$$

โดยที่

Z : ราคาค่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งหมด

C<sub>1</sub> : ราคาหินปูน (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>2</sub> : ราคาดินเหนียว (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>3</sub> : ราคาทราย (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>4</sub> : ราคาแร่เหล็ก (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>5</sub> : ราคาถ่านหิน (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>6</sub> : ราคาปิโตรเลียมโค้ก (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>7</sub> : ราคาขี้เถ้า (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>8</sub> : ราคาแกลบ (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>9</sub> : ราคาใบช้อย (บาท/กิโลกรัม)

C<sub>10</sub> : ราคาปีกไม้ยางพารา (บาท/กิโลกรัม)

**ตารางที่ 1 : ส่วนประกอบทางเคมีในวัตถุดิบ**

(% โดยน้ำหนัก) (Carpio 2008)

วัตถุดิบ	หินปูน	ดินเหนียว	ทราย	แร่เหล็ก
องค์ประกอบ	X1	X2	X3	X4
CaO	50.66	1.23	1.13	0.71
SiO <sub>2</sub>	5.04	61.62	93.00	7.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.19	16.59	2.87	1.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.67	9.01	1.20	82.97
MgO	0.78	-	0.10	-
SO <sub>3</sub>	0.10	3.00	0.50	-
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.30	0.50	-
K <sub>2</sub> O	0.30	5.00	1.00	-

**ตารางที่ 2 : ส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ**  
(% โดยน้ำหนัก) (Carpio 2008)

เชื้อเพลิง	ถ่านหิน	พีตโค้ก	ยางรถยนต์
องค์ประกอบ	X5	X6	X7
C	70.60	89.50	79.60
H	4.30	3.08	7.00
N	1.20	1.71	0.43
O	11.8	1.11	5.00
S	1.30	4.00	1.54
Cl	0.07		0.06
P (in ash)	0.02		0.02
Na (in ash)	0.05		0.04
K (in ash)	0.12		0.04
Ca (in ash)	0.18		0.53
Fe (in ash)	0.31		0.36
Al (in ash)	1.07		0.11
Si (in ash)	2.00		0.94
Mg (in ash)	0.08		
Ni (in ash)		0.04	0.02
LHV (kJ/kg)	28,200	33,700	32,500

ตารางที่ 3 : ส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงชีวมวล  
(% โดยน้ำหนัก) (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม 2553)

ชีวมวล	แกลบ	ใบอ้อย	ปีกไม้ยางพารา
องค์ประกอบ	X8	X9	X10
C	37.48	41.6	25.58
H	4.41	5.08	3.19
O	33.27	37.42	24.48
N	0.17	0.14	0.14
S	0.04	0.02	0.02
Cl	0.09	0.01	0.01
LHV (kJ/kg)	13,517	15,479	8,600

### 3.2 กำหนดข้อจำกัด (Constraints)

$$50.66X_1 + 1.23X_2 + 1.13X_3 + 0.71X_4 + 0.18X_5 + 0.53X_7 \geq 63.76 \quad (10)$$

$$50.66X_1 + 1.23X_2 + 1.13X_3 + 0.71X_4 + 0.18X_5 + 0.53X_7 \leq 70.14 \quad (11)$$

$$5.04X_1 + 61.62X_2 + 93X_3 + 7.6X_4 + 2.0X_5 + 0.94X_7 \geq 19.71 \quad (12)$$

$$5.04X_1 + 61.62X_2 + 93X_3 + 7.6X_4 + 2.0X_5 + 0.94X_7 \leq 24.25 \quad (13)$$

$$1.19X_1 + 16.59X_2 + 2.87X_3 + 1.13X_4 + 1.07X_5 + 0.11X_7 \geq 3.76 \quad (14)$$

$$1.19X_1 + 16.59X_2 + 2.87X_3 + 1.13X_4 + 1.07X_5 + 0.11X_7 \leq 6.78 \quad (15)$$

$$0.67X_1 + 9.01X_2 + 1.2X_3 + 82.97X_4 + 0.31X_5 + 0.36X_7 \geq 1.29 \quad (16)$$

$$0.67X_1 + 9.01X_2 + 1.2X_3 + 82.97X_4 + 0.31X_5 + 0.36X_7 \leq 4.64 \quad (17)$$

$$0.78X_1 + 0.1X_3 + 0.08X_5 + 0.94X_7 \leq 6.50 \quad (18)$$

$$28.2X_5 + 33.7X_6 + 32.5X_7 + 13.5X_8 + 15.4X_9 + 8.60X_{10} = 3.60 \quad (19)$$

$$1.30X_5 + 4.00X_6 + 1.54X_7 + 0.04X_8 + 0.17X_9 + 0.02X_{10} \leq 5.00 \quad (20)$$

$$0.1X_1 + 3X_2 + 0.5X_3 \geq 0.20 \quad (21)$$

$$0.1X_1 + 3X_2 + 0.5X_3 \leq 2.07 \quad (22)$$

$$0.1X_1 + 0.3X_2 + 0.5X_3 \geq 0.03 \quad (23)$$

$$0.1X_1 + 0.3X_2 + 0.5X_3 \leq 0.33 \quad (24)$$

$$0.1X_1 + 5X_2 + 1.0X_3 \geq 0.31 \quad (25)$$

$$0.1X_1 + 5X_2 + 1.0X_3 \leq 1.76 \quad (26)$$

ในการเผาวัตถุดิบและเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ นั้น ต้องตั้งสมมุติฐานว่าเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ทั้งหมดและองค์ประกอบของทั้งวัตถุดิบและเชื้อเพลิงเมื่อผ่านการเผาแล้วจะไปรวมตัวในเม็ดปูนส่วนหนึ่งและเป็นก๊าซชนิดต่างๆ ออกจากระบบไปอีกส่วนหนึ่ง แต่ทั้งนี้ส่วนประกอบที่ไปรวมเป็นเนื้อปูนเม็ดต้องเป็นไปตามมาตรฐานว่าในเนื้อปูนเม็ดยังมีองค์ประกอบแต่ละชนิดอย่างละเท่าใด

สมการที่ 10 และ 11 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) 1 กิโลกรัม ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 64% - 71% สมการที่ 12 และ 13 แสดงถึง เปอร์เซ็นต์ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20% - 25% สมการที่ 14 และ 15 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์อลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 4% - 7% สมการที่ 16 และ 17 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์เฟอร์รัสไตรออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2% - 5% สมการที่ 18 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของธาตุแมกนีเซียมควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 6.50 %

สมการที่ 19 แสดงถึงค่าความร้อน (Heating value) ที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดซึ่งต้องใช้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 3.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัมปูนเม็ด สมการที่ 20 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของธาตุกำมะถัน (Sulphur) ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ซึ่งค่ากำมะถันมาจากชนิดของเชื้อเพลิง สมการที่ 21 - 26 เป็นสมการของความชื้นกรดและเบสของปูนเม็ดซึ่งมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตในแต่ละชนิด โดยสมการที่ 21 - 22 ค่าความชื้นกรดควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2% - 2.07% สมการที่ 23 - 24 ค่าความเป็นเบสจากโซเดียมออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03% - 0.33% สมการที่ 25 - 26 ค่าความเป็นเบสจากโปแทสเซียมออกไซด์ (K<sub>2</sub>O) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.31% - 1.76%

(Carpio 2008) (Carpio 2005)

#### 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

ในส่วนนี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้ข้อมูลจากกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ของบริษัทแห่งหนึ่งเป็นจำนวน 5 โรงงานในปี พ.ศ. 2551 และจะทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้รู้ว่าควรใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเป็นจำนวนเท่าใด

##### 4.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบ

###### ตารางที่ 4 : การใช้ทรัพยากรของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์

(ต้น)ปูนซีเมนต์ไทย (2551) และ (2537)

หินปูน	23,650,000
ดิน	3,500,000
ทราย	290,000
ลูกรัง	410,000
ทรายดำ	11,000
ยิปซัม	580,000
หินสบู	34,000

ยอดขายของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปี พ.ศ. 2551 คิดเป็นเงิน 49,999 ล้านบาท และจำนวนวัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมดคิดเป็น 28.475 ล้านตัน ดังนั้นจากสมการที่ 2 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตถุดิบเท่ากับ 1,760 บาท/ตัน

##### 4.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านพลังงาน

การบริโภคพลังงานความร้อนของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปี พ.ศ. 2551 มีค่าประมาณ 54,000 เทระจูล (10<sup>12</sup> จูล) ดังนั้นจากสมการที่ 5 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านพลังงานเท่ากับ 926,000 บาท/เทระจูล ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ เป็นดัชนีอย่างหนึ่งเพื่อชี้วัดว่า ในการใช้ทรัพยากรแต่ละชนิดไม่ว่าจะเป็นวัตถุดิบ พลังงาน น้ำดิบ นั้นให้ผลกำไรหรือมูลค่าของสินค้าหรือการบริการออกมาเป็นเท่าใด ซึ่งจากการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของ กลุ่มธุรกิจซีเมนต์ของบริษัทแห่งหนึ่งในปี 2551 พบว่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้าน

วัตถุดิบเท่ากับ 1,760 บาท/ตัน หมายความว่า กลุ่มธุรกิจนี้ บริโภคทรัพยากรที่เป็นวัตถุดิบต่างๆเข้าไป 1 ตัน แล้วให้มูลค่าออกมาได้ 1,760 บาท มีทางใดบ้างที่จะทำให้มูลค่าเพิ่มสูงขึ้นได้อีก เช่น จัดให้มีการเอาเศษวัสดุก่อสร้าง หรือจากการทุบตีกลับมาใช้ใหม่ก็ดี การลด clinker ratio โดยการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ทดแทนบางส่วนก็ดี จะทำให้มีมูลค่ามากขึ้นได้ ในทำนองเดียวกันกลุ่มธุรกิจนี้ใช้พลังงานไปถึง 1 เทระจูล แล้วให้มูลค่าออกมาได้ 926,000 บาท มีทางใดบ้างที่จะทำให้มูลค่าเพิ่มสูงขึ้นได้อีก เช่น จัดให้มีการประหยัดพลังงานแสงสว่างก็ดี อุดรอยรั่วตามผนังเตาเผาก็ดี เอาพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งจากการเผาปูนเม็ดไปผลิตกระแสไฟฟ้าก็ดี หรือทำอย่างไรก็ได้เพื่อให้ heat loss ในระบบน้อยที่สุด เช่นนี้ก็ทำให้มูลค่าเพิ่มขึ้นมากรกว่า 926,000 บาท หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการทำให้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจดีขึ้นนั่นเอง

4.3 ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 5 : ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ส่วนประกอบ	สัญลักษณ์	ผลที่ได้ (kg/kg clk)
หินปูน	X1	1.25
ดินเหนียว	X2	0.13
ทราย	X3	0.06
เหล็ก	X4	0.00
ถ่านหิน	X5	0.095
เพ็ติโค๊ก	X6	0.00
ยางรถยนต์	X7	0.00
แกลบ	X8	0.00
ไบอ้อย	X9	0.06
ไม้ยางพารา	X10	0.00

Clk = Clinker

ในการคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ออกจากหม้อเผาจะใช้หลักการของปริมาณสารสัมพันธ์เบื้องต้นเพื่อหาก๊าซทั้ง 3 ชนิดได้แก่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นก๊าซตัวหลักๆที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผาเท่านั้น

ในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 3.6 MJ/kg clk ดังนั้นจะต้องใช้ถ่านหินเท่ากับ 128 กรัม เมื่อใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อใช้ถ่านหินประกอบไบอ้อยพบว่าจะต้องใช้ถ่านหินเท่ากับ 95 กรัม และใช้ไบอ้อย 60 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากไบอ้อยจะไม่นำมาคิดรวมเข้าไปด้วยเพราะถือว่าเป็นการ Neutral กล่าวคือ จะไม่นำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดออกมาจากการใช้วัสดุชีวมวลทุกชนิดมาคิด ซึ่งในความจริงการเผาชีวมวลก็ยังคงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอยู่นั่นเองแต่ถือเสมือนหนึ่งว่าไม่มี ดังนั้นการใช้พลังงานชีวมวลทดแทนได้มากเท่าไรยิ่งเท่ากับลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงมีข้อจำกัดมากมายที่ทำให้ไม่สามารถใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้มาแทนเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลได้ทั้งหมด เช่น ค่าความร้อนต่ำ ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นปริมาณมาก ค่าความชื้นสูงเนื่องจากไม่มีการ Treat ก่อนเข้าเตาเผาทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่พอต่อความต้องการอย่างสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับฤดูกาลและอยู่ห่างไกลจากโรงงานทำให้มีค่าขนส่งสูง จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถสรุปปริมาณก๊าซต่างๆที่เกิดจากการเผาได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6 : ปริมาณก๊าซต่างๆที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิง

ก๊าซที่เกิดขึ้น	ถ่านหิน 128 กรัม	ถ่านหิน 95 กรัม	ชีวมวล 60 กรัม	ถ่านหิน และ ชีวมวล
CO <sub>2</sub>	331.36	245.92	Neutral	245.92
SO <sub>2</sub>	3.328	2.47	0.024	2.494
NO <sub>2</sub>	5.047	3.745	0.335	3.847

จะเห็นได้ว่าจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเข้ามาทดแทนบางส่วนทำให้ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 85.44 กรัม หรือร้อยละ 25.78 ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ลดลง 0.834 กรัม หรือร้อยละ 25.06 และไนโตรเจนไดออกไซด์ลดลง 1.20 กรัม หรือร้อยละ 23.77 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการใช้ถ่านหินในการผลิตอย่างเดียว

ส่วนการหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบนั้น เนื่องจากคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาเผาไม่ได้เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ไม่สามารถเปลี่ยนชนิดวัตถุดิบที่จะใช้ในการผลิตได้ ต้องใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบหลักอยู่ นั่นเอง ดังนั้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการเผายังคงมีค่าเท่าเดิม คือ 544 กรัม ต่อ กิโลกรัมปูนเม็ด

## 5. สรุป

ในปี พ.ศ. 2551 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตถุดิบเท่ากับ 1,760 บาท/ตัน ส่วนประสิทธิภาพเชิงนิเวศเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านพลังงานเท่ากับ 926,000 บาท/เทระจูล ส่วนผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบว่าควรใช้วัตถุดิบในการผลิตคือ หินปูน 1.25 กิโลกรัม ดินเหนียว 130 กรัม ททราย 60 กรัม และใช้เชื้อเพลิงในการผลิตคือ ถ่านหิน 95 กรัม และใบอ้อย 60 กรัม ต่อการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อใช้อัตราส่วนดังกล่าวแล้วจะทำให้ต้นทุนในการผลิตต่อ 1 กิโลกรัมมีค่าประมาณ 46 สตางค์ (0.46บาท/กิโลกรัมปูนเม็ด) ซึ่งการที่เราสามารถนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ได้นั้น ย่อมทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลงเมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินอย่างเดียว อีกทั้งการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลนั้น เป็นการช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง เช่นช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ ได้บางส่วน ดังนั้น จากนิยามของคำว่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ จะเห็นได้ว่าการพัฒนาทั้งในด้านการลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องถือว่ามี การปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจแล้ว

## 6. ข้อจำกัดของการศึกษา

เนื่องจากข้อมูลด้านราคาวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์นั้น เป็นข้อมูลที่เป็นความลับของบริษัท ดังนั้นจึงไม่สามารถเปิดเผยข้อมูลได้อีกทั้งข้อมูลทางการใช้พลังงานก็เป็นข้อมูลที่เป็นความลับของบริษัทด้วยจึงทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเชิงนิเวศเศรษฐกิจได้แต่เฉพาะในปี พ.ศ. 2551

## 7. เอกสารอ้างอิง

- กิตติกร จามรดุสิต (2551). Eco – Efficiency แนวทางเพิ่มประสิทธิภาพอุตสาหกรรมสู่ความยั่งยืน
- ก่อเกียรติ เกิดปากแพร (2550). Eco-Efficiency Evaluation of Petroleum and Petrochemical in The MAP TA PUT Industrial Estate, Rayong Thailand
- ปูนซีเมนต์ไทย (2551). รายงานการพัฒนาอย่างยั่งยืน
- ปูนซีเมนต์ไทย (2537). เอกสารวิชาการของปูนซีเมนต์-ไทย
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม Available from: <http://www.efe.or.th/home.php?ds=preview&back=content&mid=hGtTu8zx7jWvD4by&doc=26nANzbfw3SYaIPH> (วันที่ค้นข้อมูล: 16 มีนาคม 2553)
- Carpio, R.C. (2005). Case Study in Cement Kilns Alternative Secondary Fuels Mixing Using Sequential Quadratic Programming, Genetic Algorithms
- Carpio R.C. (2008). Alternative fuels mixture in cement industry kilns employing Particle Swarm Optimization algorithm
- Charlene S., Charlotte J., Royce D., (2008). Eco-efficiency and firm value
- G.P.Kharel., K. Charmondusit., (2008). Eco-Efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal