บทที่ 4
การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรมซีเมนต์

4.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบ

ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจนั้นข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลของกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ทั้งหมด 5 โรงงาน ในปี พ.ศ.2551 มีข้อมูลการบริโภคทรัพยากรต่างๆ ที่เป็นวัตถุดิบของโรงงานดังต่อไปนี้

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

ที่มา: รายงานการพัฒนาอย่างยั่งยืน ประจำปี 2551

ตารางที่ 4.1 : การใช้ทรัพยากรของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ (ตัน)

ยอดขายของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปี พ.ศ. 2551 คิดเป็นเงิน 49,999 ล้านบาท และจำนวนวัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมดคิดเป็น28.475 ล้านตัน ดังนั้นจากสมการที่ 2 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตถุดิบเท่ากับ 0.00176 ล้านบาท/ตัน หรือ 1,760 บาท/ตัน

4.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านพลังงาน

การบริโภคพลังงานความร้อนของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปีพ.ศ. 2551 มีค่าประมาณ 54,000 เทระจูล (10^{12} จูล) ดังนั้นจากสมการที่ 5 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านพลังงานเท่ากับ 0.926 ล้านบาท/เทระจูล

4.3 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านน้ำดิบ

การใช้น้ำดิบของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปีพ.ศ. 2551 มีปริมาณน้ำที่ใช้ในโรงงานปูนซีเมนต์และโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จประมาณ 3,033,137 ลูกบาศก์เมตร และ 1,551,722 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับทำให้ปริมาณการใช้น้ำดิบในกลุ่มปูนซีเมนต์มีทั้งสิ้น 4,584,859 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจากสมการที่ 8 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านน้ำดิบเท่ากับ 0.011 ล้านบาท/ลูกบาศก์เมตร

สำหรับการจัดการน้ำในโรงงานนั้น ทางบริษัทได้มีการออกแบบการใช้น้ำให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อลดการดึงน้ำจากแหล่งน้ำสาธารณะ โดยในโรงงานปูนซีเมนต์มีการใช้น้ำเฉพาะการหล่อเย็นของเครื่องจักร และลดอุณหภูมิของลมร้อน ซึ่งน้ำที่เหลือจากการหล่อเย็น ได้ถูกรวบรวมและวนกลับไปสู่บ่อพักน้ำเพื่อลดอุณหภูมิ และนำกลับมาใช้ในการหล่อเย็นเครื่องจักรโดยไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งออกนอกโรงงาน (Zero Discharged, Close Circuit System) จึงไม่เกิดผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำสาธารณะ

สำหรับการจัดการน้ำบนเหมืองหินปูนนั้น ได้มีการวางระบบรางระบายน้ำเพื่อรวบรวมและเก็บกักน้ำฝนลงในบ่อพักของโรงงาน และสูบกลับมาใช้ในการควบคุมฝุ่นที่เกิดจากการบดย่อย การจราจรขนส่งบนเหมือง และการปลูกต้นไม้ รดน้ำต้นไม้เพื่อฟื้นฟูเหมืองโดยไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่นกัน นอกจากนี้ยังได้มีการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำโดย จัดให้มีการบำรุงรักษาท่อส่งน้ำ การรวบรวมน้ำฝนในบ่อน้ำของโรงงานและมีการส่งเสริมการปลูกป่า พืชคลุมดินและสร้างฝายชะลอน้ำในพื้นที่ป่าอีกด้วย

4.4 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านกากอุตสาหกรรม

ในปีพ.ศ. 2551 ของเสียจากกระบวนการผลิตจากโรงงานปูนซีเมนต์และโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ รวมแล้วประมาณ 917 ตัน หากเป็นของเสียอันตราย เช่นน้ำมันใช้แล้ว ผ้าเปื้อนน้ำมัน และบรรจุภัณฑ์ที่ปนเปื้อน จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตหรือส่งคืนผู้ผลิต

ส่วนของเสียไม่อันตราย ซึ่งมีปริมาณ 169,000 ตัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเศษปูนจากงานซ่อมเครื่องจักร อิฐทนไฟ บรรจุภัณฑ์และเศษคอนกรีตที่เหลือจากการส่งมอบให้ลูกค้า โดยเศษปูนจากการทำความสะอาดหรือจากการซ่อมบำรุงจะนำกลับเข้ามาในกระบวนการผลิตหรือใช้ถมที่ ปรับพื้นที่ทั้งภายในและภายนอกโรงงาน ส่วนภาชนะบรรจุภัณฑ์จะส่งคืนหรือนำกลับไปรีไซเคิล และเศษคอนกรีตที่เหลือส่งจากการส่งมอบจะนำมาทำพื้นคอนกรีต หรือก้อนคอนกรีตมอบให้แก่ วัด โรงเรียน สถานที่ราชการ เป็นสาธารณะประโยชน์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชนมากที่สุดและลด

ปริมาณของเสียซึ่งเป็นภาระของประเทศลงอีกด้วย ดังนั้นจากสมการที่ 9 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านกากของเสียเท่ากับ 0.294ล้านบาท/ตัน

4.5 การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นอาจมีมาตรการในการจัดการหลายแบบ เช่น การเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากการใช้ถ่านหินทั้งหมดมาเป็นการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมโค๊ก ยางรถยนต์เก่าๆที่หมดอายุการใช้งานแล้ว หรือเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ แกลบ ใบอ้อยและปีกไม้ยางพารา ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอนำเสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยให้ผู้ที่เป็นผู้ตัดสินใจในการค้นหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยที่สุดโดยคำตอบของระบบสมการนั้นจะทำให้รู้ว่าส่วนผสมในการผลิตปูนเม็ดต้องใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเป็นจำนวนอย่างละเท่าใด

4.5.1 กำหนดเป้าหมาย (Objective Function)

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

$$= (C_1X_1 + C_2X_2 + ... + C_{10}X_{10}) \tag{9}$$

โดยที่

Z : ราคาค่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งหมด

C1 : ราคาหินปูน (บาท/กิโลกรัม)

C2 : ราคาดินเหนียว (บาท/กิโลกรัม)

C3 : ราคาทราย (บาท/กิโลกรัม)

C4 : ราคาแร่เหล็ก (บาท/กิโลกรัม)

C5 : ราคาถ่านหิน (บาท/กิโลกรัม)

C_6 : ราคาปิโตรเลียมโค๊ก (บาท/กิโลกรัม)

C_7 : ราคายางรถยนต์เก่า (บาท/กิโลกรัม)

C_8 : ราคาแกลบ (บาท/กิโลกรัม)

C_9 : ราคาใบอ้อย (บาท/กิโลกรัม)

C10 : ราคาปีกไม้ยางพารา (บาท/กิโลกรัม)

วัตถุดิบ	หินปูน	ดินเหนียว	ทราย	เหล็ก
องค์ประกอบ	X1	X2	X3	X4
CaO	50.66	1.23	1.13	0.71
SiO2	5.04	61.62	93.00	7.60
Al2O3	1.19	16.59	2.87	1.13
Fe2O3	0.67	9.01	1.20	82.97
MgO	0.78	-	0.10	-
SO3	0.10	3.00	0.50	-
Na2O	0.10	0.30	0.50	-
K2O	0.30	5.00	1.00	-

ตารางที่ 4.2 : ส่วนประกอบทางเคมีในวัตถุดิบ
(% โดยน้ำหนัก) (Carpio 2008)

เชื้อเพลิง	ถ่านหิน	เพ็ตโค๊ก	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)	28200	31700	29500

ตารางที่ 4.3 : ส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ
(% โดยน้ำหนัก) (Carpio 2008 และ U.Kaantee 2003)

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	0.17	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

ตารางที่ 4.4 : ส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงชีวมวล
(% โดยน้ำหนัก) (www.efe.or.th)

4.5.2 กำหนดข้อจำกัด (Constraints)

$$50.66X1+1.23X2+1.13X3+0.71X4+0.18X5+0.53X7 \geq 63.76 \quad (10)$$

$$50.66X1+1.23X2+1.13X3+0.71X4+0.18X5+0.53X7 \leq 70.14 \quad (11)$$

$$5.04X1+61.62X2+93X3+7.6X4+2.0X5+0.94X7 \geq 19.71 \quad (12)$$

$$5.04X1+61.62X2+93X3+7.6X4+2.0X5+0.94X7 \leq 24.25 \quad (13)$$

$$1.19X1+16.59X2+2.87X3+1.13X4+1.07X5+0.11X7 \geq 3.76 \quad (14)$$

$$1.19X1+16.59X2+2.87X3+1.13X4+1.07X5+0.11X7 \leq 6.78 \quad (15)$$

$$0.67X1+9.01X2+1.2X3+82.97X4+0.31X5+0.36X7 \geq 1.29 \quad (16)$$

$$0.67X1+9.01X2+1.2X3+82.97X4+0.31X5+0.36X7 \leq 4.64 \quad (17)$$

$$0.78X1+0.1X3+0.08X5+0.94X7 \leq 6.50 \quad (18)$$

$$28.2X5+31.7X6+29.5X7+13.5X8+15.4X9+8.60X10 = 3.60 \quad (19)$$

$$1.30X5+4.00X6+1.54X7+0.04X8+0.17X9+0.02X10 \leq 5.00 \quad (20)$$

$$0.1X1+ 3X2 + 0.5X3 \geq 0.20 \quad (21)$$

$$0.1X1+ 3X2 + 0.5X3 \leq 2.07 \quad (22)$$

$$0.1X1+ 0.3X2 + 0.5X3 \geq 0.03 \quad (23)$$

$$0.1X1+ 0.3X2 + 0.5X3 \leq 0.33 \quad (24)$$

$$0.1X1+ 5X2 + 1.0X3 \geq 0.31 \quad (25)$$

$$0.1X1+ 5X2 + 1.0X3 \leq 1.76 \quad (26)$$

สำนักงานวิจัยแห่งชาติ กรุงเทพมหานคร ห้องสมุด

สมการที่ 10 และ 11 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 64% - 71% สมการที่ 12 และ 13 แสดงถึง เปอร์เซ็นต์ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20% - 25% สมการที่ 14 และ 15 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์อลูมิเนียมไตรออกไซด์(Al_2O_3) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 4% - 7% สมการที่ 16 และ 17 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์เฟอร์รัสไตรออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2% - 5% สมการที่ 18 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของธาตุแมกนีเซียม ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 6.50 %

สมการที่ 19 แสดงถึงค่าความร้อน (Heating value) ที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดซึ่งต้องใช้ปริมาณความร้อนเท่ากับ 3600 เมกะจูลต่อตันปูนเม็ด สมการที่ 20 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของธาตุกำมะถัน (Sulphur) ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% ซึ่งค่ากำมะถันมาจากชนิดของเชื้อเพลิง สมการที่ 21 – 26 เป็นสมการของความเป็นกรดและเบสของปูนเม็ดซึ่งมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตในแต่ละชนิด

โดยสมการที่ 21 -22 ค่าความเป็นกรดควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2% - 2.07% สมการที่ 23 - 24 ค่าความเป็นเบสจากโซเดียมออกไซด์ (Na2O) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03% - 0.33% สมการที่ 25 -26 ค่าความเป็นเบสจากโปแทสเซียมออกไซด์ (K2O)ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.31% - 1.76% (Carpio 2008)

4.6 ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ส่วนประกอบ	สัญลักษณ์	ผลที่ได้ (kg/kg clk)
หินปูน	X1	1.250
ดินเหนียว	X2	0.130
ทราย	X3	0.060
เหล็ก	X4	0.000
ถ่านหิน	X5	0.095
เพ็ตโค๊ก	X6	0.000
ยางรถยนต์	X7	0.000
แกลบ	X8	0.000
ใบอ้อย	X9	0.060
ไม้ยางพารา	X10	0.000

ตารางที่ 4.5 : ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Clk = Clinker)

ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบว่าควรใช้วัตถุดิบในการผลิตคือ หินปูน 1.25 กิโลกรัม ดินเหนียว 0.13 กิโลกรัม ทราย 0.06 กิโลกรัม และใช้เชื้อเพลิงในการผลิตคือ ถ่านหิน 0.095 กิโลกรัม และใบอ้อย 0.06 กิโลกรัม ต่อการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อใช้อัตราส่วนดังกล่าวแล้วจะทำให้ต้นทุนในการผลิตต่อ 1 กิโลกรัมมีค่าประมาณ 46 สตางค์ (0.46 บาท/กิโลกรัมปูนเม็ด) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

4.7 การคำนวณหาปริมาณก๊าซซึ่งเกิดจากหม้อเผา

ในการคำนวณหาปริมาณก๊าซที่ออกจากหม้อเผาจะใช้หลักการของปริมาณสารสัมพันธ์เบื้องต้นเพื่อหาก๊าซทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO2) และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO2) ซึ่งเป็นก๊าซตัวหลักๆที่ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผาเท่านั้น

ในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 3.6 MJ/kg clk และถ่านหินมี LHV เท่ากับ 28,200 kj/kg ดังนั้นจะต้องใช้ถ่านหินเท่ากับ 0.128 กิโลกรัม หรือ 128 กรัม
ดังนั้นเราสามารถหาส่วนประกอบของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละ	กรัม
C	70.6	90.368
H	4.3	5.504
N	1.2	1.536
O	11.8	15.104
S	1.3	1.664

(Carpio 2008 และ U.Kaantee 2003)

ตารางที่ 4.6 : องค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้ถ่านหินอย่างเดียว (128 กรัม)

สมการเคมีของการเผาไหม้เชื้อเพลิง คือ

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 \quad (26)$$

$$S + O_2 \longrightarrow SO_2 \quad (27)$$

$$N + O_2 \longrightarrow NO_2 \quad (28)$$

และจากจำนวนโมลมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของสารในหน่วยกรัมหารด้วยน้ำหนักโมเลกุลของสารนั้นทำให้สามารถหาปริมาณก๊าซทั้ง 3 ชนิดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ ดังสมการ

สมการเคมีของการเผาไหม้วัตถุดิบเพื่อให้แตกตัว คือ

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2 \quad (30)$$

$$MgCO_3 \longrightarrow MgO + CO_2 \quad (31)$$

ในการทำให้วัตถุดิบแตกตัวเป็นปูนเม็ดต้องการ ปูนเม็ดประมาณ 65% และเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนตประมาณ 3% ของวัตถุดิบที่ใส่เข้าไปหมายความว่าใส่วัตถุดิบเข้าไป 1 กิโลกรัม จะกลายเป็นเม็ดปูนประมาณ 650 กรัม และได้แมกนีเซียมออกไซด์ประมาณ 30 กรัม ดังนั้นจากสมการของการแตกตัวเป็นปูนเม็ดเราสามารถหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบได้ดังต่อไปนี้

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา $CaCO_3$:

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{650}{56} = \frac{g2}{44}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา $CaCO_3$ เท่ากับ 511 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา $MgCO_3$:

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{30}{40} = \frac{g2}{44}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา $MgCO_3$ เท่ากับ 33 กรัม

ดังนั้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบ เท่ากับ 544 กรัม

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \quad (29)$$

ธาตุ	น้ำหนักโมเลกุล	ธาตุ	น้ำหนักโมเลกุล
C	12	$CaCO_3$	100
O	16	MgO	40
S	32	$MgCO_3$	84
N	14	H_2O	18
CO_2	44	SO_2	64
CaO	56	NO_2	46

ตารางที่ 4.7 : ตารางแสดงธาตุ และน้ำหนักโมเลกุล

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 128 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{90.368}{12} = \frac{g2}{44}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 331.349 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 128 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{1.703}{32} = \frac{g2}{64}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 3.328 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 128 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{1.572}{14} = \frac{g2}{46}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 5.046 กรัม

4.8 การคำนวณหาปริมาณก๊าซซึ่งเกิดจากหม้อเผาเมื่อได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบนั้น เนื่องจากคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาเผามิได้เปลี่ยนแปลงกล่าวคือ ไม่สามารถหาวัตถุดิบอื่นที่จะนำมาใช้แทนหินปูนในการผลิตปูนเม็ดได้ ดังนั้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการเผา (ทำให้แตกตัว) ยังคงมีค่าเท่าเดิม คือ 544 กรัม ต่อกิโลกรัมปูนเม็ด

ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงคือส่วนของการใช้เชื้อเพลิงทดแทนนั่นเองซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้หลักการปริมาณสารสัมพันธ์เช่นกัน

ในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 3.6 MJ/kg clk โดยถ่านหินมี LHV เท่ากับ 28,200 kj/kg ใช้ถ่านหินเท่ากับ 0.095 กิโลกรัม หรือ 95 กรัม และใช้ใบอ้อย 0.06 กิโลกรัม หรือ 60 กรัม โดยใบอ้อย LHV เท่ากับ15,479 kj/kg

ดังนั้นเราสามารถหาส่วนประกอบของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละ	กรัม
C	70.6	67.07
H	4.3	4.085
N	1.2	1.140
O	11.8	11.21
S	1.3	1.235

ตารางที่ 4.8 : องค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้ถ่านหิน 95 กรัม

(Carpio 2008 และ U.Kaantee 2003)

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละ	กรัม
C	41.6	24.96
H	5.08	3.048
N	0.17	0.102
O	37.42	22.452
S	0.02	0.012

ตารางที่ 4.9 : องค์ประกอบของใบอ้อยโดยใช้ใบอ้อย 60 กรัม

(www.efe.or.th)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 95 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{67.07}{12} = \frac{g2}{44}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 245.92 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 95 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{1.235}{32} = \frac{g2}{64}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 2.47 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 95 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{1.14}{14} = \frac{g2}{46}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 3.847 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากใบอ้อย 60 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{24.96}{12} = \frac{g2}{44}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 91.52 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากใบอ้อย 60 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{0.012}{32} = \frac{g2}{64}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 0.024 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากใบอ้อย 60 กรัม :

$$\text{จากจำนวนโมล} = \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2}$$

$$= \frac{0.102}{14} = \frac{g2}{46}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 0.335 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากใบอ้อยจะไม่นำมาคิดรวมเข้าไปด้วยเพราะถือว่าเกิดการ Neutral กล่าวคือ จะไม่นำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดออกมาจากการใช้วัสดุชีวมวลทุกชนิดมาคิด ซึ่งในความจริงการเผาชีวมวลก็ยังคงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอยู่นั่นเองแต่ถือเสมือนหนึ่งว่าไม่มี สาเหตุที่มีวิธีคิดเช่นนี้เพราะ The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) ได้ให้เหตุผลไว้ว่า พืชในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่นั้นได้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมาเพื่อทำการสังเคราะห์แสงในการเจริญเติบโตของพืชนั้นเอง ซึ่งก็คือการเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาทำให้อยู่ในรูปคาร์บอนและต่อมาเมื่อพืชนั้นตายลงกลายเป็นชีวมวลต่างๆ เช่น แกลบ ใบอ้อย ซังข้าวโพด ไม้ยางพารา ฯลฯ มนุษย์ได้นำชีวมวลนั้นมาเผาจึงเป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคยมีอยู่ในบรรยากาศนั้นออกมาเท่านั้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ถือได้ว่าปริมาณก๊าซที่ดูดซับเข้าไปกับปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าเท่ากัน จึงสามารถกล่าวได้ว่า ไม่ได้มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเพิ่มขึ้นแต่

ประการใด ซึ่งจะแตกต่างกับการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน เพ็ตโค๊ก ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ โดยถือว่าการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศโดยตรงไม่ถือว่าเกิดการ Neutral ดังเช่นการเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นการใช้พลังงานชีวมวลทดแทนได้มากเท่าไรยิ่งเท่ากับลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงมีข้อจำกัดมากมายที่ทำให้ไม่สามารถใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้มาแทนเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลได้ทั้งหมด เช่น ค่าความร้อนต่ำ ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นปริมาณมาก ค่าความชื้นสูง เนื่องจากไม่มีการ Treat ก่อนเข้าเตาเผาทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาได้อย่างมีเสถียรภาพ อีกทั้งเชื้อเพลิงชนิดนี้มีไม่พอต่อความต้องการอย่างสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับฤดูกาลและอยู่ห่างไกลจากโรงงานทำให้มีค่าขนส่งสูง จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถสรุปปริมาณก๊าซต่างๆที่เกิดจากการเผาได้ดังต่อไปนี้

ชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้น	ใช้ถ่านหิน 128 กรัม	ใช้ถ่านหิน 95 กรัม	ใช้ชีวมวล 60 กรัม	รวมใช้ถ่านหินและชีวมวล	ผลต่างของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างถ่านหินอย่างเดียวกับการใช้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล
CO_2	331.349	245.92	Neutral	245.92	85.429
SO_2	3.328	2.47	0.024	2.494	0.834
NO_2	5.046	3.745	0.335	3.847	1.199

ตารางที่ 4.10 : ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆกัน (กรัม)

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเห็นได้ว่าสามารถทำให้ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปได้ 85.429 กรัม ลดปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไปได้ 0.834 กรัม ลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ลงไปได้ 1.199 กรัม ในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม