

การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เพื่อการจัดการก๊าซเรือนกระจกในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์



นาย วรเดช เกรียงสันติกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ASSESSMENT OF ECO - EFFICIENCY AND APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL
FOR GREEN HOUSE GAS MANAGEMENT IN CEMENT PLANTS



Mister Voradej Kriengsantikul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการจัดการก๊าซเรือนกระจกใน
โรงงานผลิตปูนซีเมนต์

โดย

นาย วรเดช เกரியงสันติกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

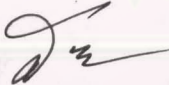


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiratวงศ์)

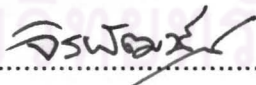
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



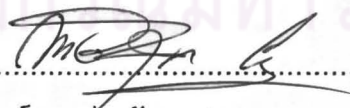
..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จันทนา จันทโร)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พงษ์สุดา ผ่องธัญญา)

5070675521 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : CEMENT PRODUCTION PROCESS / ECO - EFFICIENCY ASSESSMENT / GREEN HOUSE GAS MANAGEMENT / EMISSION CHARGE

VORADEJ KRIENGSAANTIKUL : ASSESSMENT OF ECO – EFFICIENCY AND APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL FOR GREEN HOUSE GAS MANAGEMENT IN CEMENT PLANTS. THESIS ADVISOR : PROF.SIRICHAN THONGPRASERT, PH.D.,124 pp.

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 0.00176 MB/ton and energy eco – efficiency is 0.926 .MB/Terajoules

Mathematical model show that the optimum solution for cement making should use limestone 1.25 kilogram clay 0.13 kilogram sand 0.06 kilogram coal 0.095 kilogram and sugar kane's leaf 0.060 kilogram to make 1 kilogram of clinker.

Department: Industrial Engineering..... Student's Signature.....
Field of study:... Industrial Engineering.....Advisor's Signature.....
Academic Year.....2010.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รศ. จันทนา จันทโร (ประธานกรรมการ) รศ. จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ (กรรมการ) และ ดร. พงษ์สุดา ผ่องธัญญา (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) คุณ เมธา รัตนสุพรรณ ผู้อำนวยการบริษัท สยามวิจัย และนวัตกรรม จำกัด คุณสุรัชย์ วัชรตันชัย ผู้จัดการประจำบริษัท สยามวิจัยและนวัตกรรม จำกัด คุณ พงศกร สุวรรณวงศ์ คุณ สมหวัง สิ้นธุมงคลชัยผู้จัดการประจำบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีข้อผิดพลาดแต่ประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว และความดีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแต่บิดามารดา ผู้เป็นพรหมของบุตรและได้ให้ปัจจุบัน และอนาคตแก่ผู้เขียน

ศูนย์วิทยพัชยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ปัญหาระดับน้ำทะเลสูง.....	1
1.1.2 ผลกระทบต่อระบบนิเวศและความหลากหลายทางชีวภาพ.....	2
1.1.3 ผลกระทบต่อการเกษตรและแหล่งน้ำ.....	2
1.1.4 เหตุการณ์สภาพอากาศรุนแรง.....	3
1.1.5 ผลกระทบด้านสุขภาพ.....	3
1.1.6 ผลกระทบทางสังคมและเศรษฐกิจ.....	3
1.2 ความหมายของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ.....	8
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	10
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.6 ขั้นตอนและการดำเนินการ.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ.....	12
2.1.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบ.....	12
2.1.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านพลังงาน.....	13
2.1.3 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านน้ำดิบที่ใช้.....	13
2.1.4 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านการปล่อยกากอุตสาหกรรม.....	14

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	14
2.2.1 รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง.....	16
2.2.2 การหาผลลัพธ์โดยใช้โปรแกรม Solver ใน Microsoft Excel.....	17
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 ข้อมูลของโครงการที่เป็นกรณีศึกษา.....	29
3.1 ที่ตั้งโรงงาน.....	29
3.2 นโยบายสิ่งแวดล้อมของโรงงาน.....	29
3.3 กระบวนการผลิต.....	30
3.4 ผลิตภัณฑ์.....	38
3.5 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม.....	39
บทที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรมซีเมนต์.....	41
4.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบ.....	41
4.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านพลังงาน.....	41
4.3 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านน้ำดิบที่ใช้.....	42
4.4 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านการปล่อยกากอุตสาหกรรม.....	42
4.5 การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	43
4.5.1 กำหนดเป้าหมาย.....	43
4.5.2 กำหนดข้อจำกัด.....	45
4.6 ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
4.7 การคำนวณหาปริมาณก๊าซที่เกิดจากหม้อเผา.....	47
4.8 การคำนวณหาปริมาณก๊าซที่เกิดจากหม้อเผาเมื่อได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	50

บทที่ 5 การวิเคราะห์และสรุปผล.....	54
5.1 ตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco – Efficiency Factor).....	54
5.2 ตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco – Efficiency Factor) เมื่อประยุกต์ใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	56
5.3 ค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของแต่ละผลิตภัณฑ์.....	58
5.4 ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย.....	67
5.5 การวิเคราะห์ความไว(Sensitivity Analysis).....	70
5.6 สรุปผลการศึกษา.....	72
5.7 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย.....	73
5.8 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ประวัติปุ๋ยมะพร้าว.....	79
กระบวนการผลิตโดยสังเขป.....	82
การบดวัตถุดิบ.....	86
การผสมวัตถุดิบ.....	90
การบ้อนวัตถุดิบเข้าหม้อเผา.....	92
การเผาปุ๋ยมะพร้าวและการทำให้เย็น.....	93
กระบวนการเผาในหม้อเผา.....	95
การควบคุมหม้อเผา.....	98
การเริ่มต้นและการหยุดหม้อเผา.....	101
อิฐทนไฟ.....	102
การยิงฝุ่นเข้าไปในเปลวหม้อเผา.....	105
การทำความสะอาดไซโคลน.....	107
เชื้อเพลิงสำหรับหม้อเผา.....	108
การเผาด้วยถ่านหิน.....	111
การทำให้ปุ๋ยมะพร้าวเย็น.....	115
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ค่ากำหนดปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานปูนซีเมนต์.....	6
ตารางที่ 1.2	ผลกระทบหลักที่ควรพิจารณาของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์.....	7
ตารางที่ 4.1	การใช้ทรัพยากรของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ (ตัน).....	41
ตารางที่ 4.2	ส่วนประกอบทางเคมีในวัตถุดิบ (% โดยน้ำหนัก).....	44
ตารางที่ 4.3	ส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (% โดยน้ำหนัก).....	44
ตารางที่ 4.4	ส่วนประกอบทางเคมีในเชื้อเพลิงชนิดชีวมวล (% โดยน้ำหนัก).....	45
ตารางที่ 4.5	ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	46
ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้ถ่านหินอย่างเดียว.....	47
ตารางที่ 4.7	ตารางแสดงธาตุและน้ำหนักโมเลกุล.....	48
ตารางที่ 4.8	องค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้ถ่านหิน 95 กรัม.....	50
ตารางที่ 4.9	องค์ประกอบของไบอ้อยโดยใช้ไบอ้อย 60 กรัม.....	50
ตารางที่ 4.10	ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กัน (กรัม)	53
ตารางที่ 5.1	การประมาณต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตแบบเดิมเทียบกับแบบใหม่....	55
ตารางที่ 5.2	ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กัน (กรัม)	56
ตารางที่ 5.3	สรุปค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านต่างๆเมื่อใช้ไบอ้อย....	58
ตารางที่ 5.4	ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อไม่พิจารณาไบอ้อย.....	60
ตารางที่ 5.5	องค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้ถ่านหิน 105.5 กรัม.....	61
ตารางที่ 5.6	องค์ประกอบของแกลบโดยใช้แกลบ 46.23 กรัม.....	61
ตารางที่ 5.7	ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ กัน (กรัม)	63
ตารางที่ 5.8	การประมาณต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตแบบเดิมเทียบกับแบบใหม่....	64
ตารางที่ 5.9	สรุปค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านต่างๆเมื่อใช้แกลบ.....	66
ตารางที่ 5.10	ปฏิทินชีวมวลในภาคกลาง.....	67
ตารางที่ 5.11	รายละเอียดพื้นที่ปลูกผัก ผลผลิตหลักและไม่ยางพารา.....	68
ตารางที่ 5.12	ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศไทยปี 2551.....	69
ตารางที่ 5.13	ราคาชีวมวลชนิดต่างๆ เมื่อทำการเพิ่ม/ลดราคาราวละ 10%.....	70
ตารางที่ 5.14	ราคาชีวมวลชนิดต่างๆ เมื่อทำการเพิ่มชีวมวล คราวละ 10%(บาท/กิโลกรัม).....	71

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ปริมาณของก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี.....	5
รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพการไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ของกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และปิโตรเคมีภายในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง.....	20
รูปที่ 2.2 Project Future Gen.....	22
รูปที่ 2.3 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Factor X) ของโรงงานผลิตโพรทาศน์สีแห่งหนึ่งในประเทศญี่ปุ่น.....	24
รูปที่ 3.1 ดินลูกรัง.....	30
รูปที่ 3.2 หินปูน.....	31
รูปที่ 3.3 หินดินดาน.....	31
รูปที่ 3.4 หม้ออบดวัตถุดิบ.....	32
รูปที่ 3.5 ไชโลวัตถุดิบ.....	32
รูปที่ 3.6 กระบวนการผลิตปูนเม็ด.....	33
รูปที่ 3.7 หอคุ่น.....	34
รูปที่ 3.8 หม้อเผา.....	34
รูปที่ 3.9 หม้อลดอุณหภูมิปูนเม็ด.....	35
รูปที่ 3.10 ปูนเม็ด.....	35
รูปที่ 3.11 ไชโลปูนเม็ด.....	35
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ผลิตปูนเม็ด.....	36
รูปที่ 3.13 หม้ออบคปูนซีเมนต์.....	36
รูปที่ 3.14 ปูนซีเมนต์.....	37
รูปที่ 5.1 การวิเคราะห์ความไวเมื่อทำการเพิ่ม / ลด ราคาชีวมวลคราวละ 10%.....	71
รูปที่ 5.2 การวิเคราะห์ความไวเมื่อทำการเพิ่มราคาชีวมวลคราวละ 10%.....	72

ตารางที่ ผ.1	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	108
ตารางที่ ผ.2	เปรียบเทียบอุณหภูมิเปลวอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้และปริมาณก๊าซเสียที่เกิด.....	108
รูปที่ ผ.1	ปิรามิดในสมัยอียิปต์.....	79
รูปที่ ผ.2	โคลีเซียมในประเทศอิตาลี.....	80
รูปที่ ผ.3	หินของเกาะปอร์ตแลนด์(ซึ่งเป็นที่มาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์).....	81
รูปที่ ผ.4	Cement Plant Schematic Process Flow.....	85
รูปที่ ผ.5	Cyclone Preheaters.....	94
รูปที่ ผ.6	Direct Coal Firing System.....	114



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาโลกร้อนและผลกระทบที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ได้แก่ ปัญหาระดับน้ำทะเลสูง ผลกระทบต่อระบบนิเวศและความหลากหลายทางชีวภาพ ผลกระทบต่อการเกษตรและแหล่งน้ำ เหตุการณ์สภาพอากาศรุนแรง ผลกระทบด้านสุขภาพและผลกระทบทางสังคมและเศรษฐกิจ

1.1.1 ปัญหาระดับน้ำทะเลสูง

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทยประเมินไว้ว่า มีสิ่งชี้ชัดในเรื่องความเป็นไปได้ของภาวะการขาดแคลนน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ และอุทกภัยที่ถี่ขึ้นและรุนแรงยิ่งขึ้นในพื้นที่ราบลุ่ม โดยเฉพาะในบริเวณชายฝั่งของกรุงเทพฯที่มีความหนาแน่นของประชากรสูง และอยู่เหนือระดับน้ำทะเลเพียง 1 เมตร โดย ระดับการรุกของน้ำเค็มจะเข้ามาในพื้นที่แม่น้ำเจ้าพระยาถึง 40 กิโลเมตร ส่งผลกระทบต่อพื้นที่เกษตรกรรมที่มีความอ่อนไหวต่อความสมดุลของน้ำจืดและน้ำเค็มในพื้นที่ นอกจากนี้ กรุงเทพฯยังมีความเสี่ยงต่อความเสียหายจากเหตุการณ์น้ำล้นตลิ่งและอุทกภัย ที่จะก่อความเสียหายกับระบบสาธารณูปโภค ที่อยู่อาศัยของคนจำนวนมาก รวมถึงผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจที่จะตามมา

ส่วนพื้นที่ชายฝั่งจะได้รับผลกระทบด้วยเช่นกัน โดยผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อพื้นที่ชายฝั่งแตกต่างกันไปเป็นกรณี เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่ชายฝั่งหลายแบบ เช่น พื้นที่ชายฝั่งที่เป็นหน้าผา อาจจะมีการยุบตัวเกิดขึ้นกับหินที่ไม่แข็งตัวพอ แต่กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ส่วนชายหาดจากเพชรบุรีถึงสงขลาซึ่งมีลักษณะชายฝั่งที่แคบจะหายไป และชายหาดจะถูกร่นเข้ามาถึงพื้นที่ราบริมทะเล

ส่วนพื้นที่ป่าชายเลนจะมีความหนาของพรรณไม้ลดลง เนื่องจากระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นจะทำให้พืชตาย แอ่งน้ำเค็มลดลงและถูกแทนที่ด้วยหาดเลน ในขณะที่ปากแม่น้ำจะจมลงใต้น้ำทำให้เกิดการชะล้าง พังทลายของพื้นที่ลุ่มน้ำ โดย ทะเลสาบสงขลาซึ่งเป็นแหล่งน้ำชายฝั่งจะมีพื้นที่เพิ่มขึ้นและอาจมีน้ำเค็มรุกเข้ามามากขึ้น

ตัวอย่างอื่นๆของพื้นที่ที่จะได้รับความเสียหาย คือ จังหวัดสุราษฎร์ธานี หากระดับน้ำทะเลสูงขึ้นอีก 1 เมตร พื้นที่ร้อยละ 34 ของจังหวัดจะถูกกัดกร่อนและพังทลาย ก่อให้เกิดความเสียหายกับพื้นที่การเกษตรและนาุ้งในบริเวณดังกล่าวด้วย

1.1.2 ผลกระทบต่อระบบนิเวศและความหลากหลายทางชีวภาพ

อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้การระเหยของน้ำทะเล มหาสมุทร แม่น้ำ ลำธาร และทะเลสาบเพิ่มมากขึ้น ยิ่งจะทำให้ฝนตกมากขึ้น และกระจุกตัวอยู่ในบางบริเวณ ทำให้เกิดอุทกภัย ส่วนบริเวณอื่นก็จะเกิดปัญหาแห้งแล้ง เนื่องจากฝนตกน้อยลง กล่าวคือ พื้นที่ภาคใต้จะมีฝนตกชุก และเกิดอุทกภัยบ่อยครั้งขึ้น ในขณะที่ภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ ต้องเผชิญกับภัยแล้งมากขึ้น

รูปแบบของฝนและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้วัฏจักรของน้ำเปลี่ยนแปลง ลักษณะการไหลของระบบน้ำผิวดิน และระดับน้ำใต้ดินก็จะได้รับผลกระทบด้วย ทั้งพืชและสัตว์จึงต้องปรับปรุงตัวเองเข้าสู่ระบบนิเวศที่เปลี่ยนไป ลักษณะความหลากหลายทางชีวภาพก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ระบบนิเวศทางทะเล ก็เป็นอีกระบบนิเวศหนึ่งที่จะได้รับผลกระทบจากภาวะโลกร้อน เนื่องจากระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้น และอุณหภูมิผิวน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พืชและสัตว์ทะเลบางชนิดสูญพันธุ์ รวมถึงการเกิดปรากฏการณ์ปะการังฟอกสีทั้งในอ่าวไทยและฝั่งทะเลอันดามัน

1.1.3 ผลกระทบต่อการเกษตรและแหล่งน้ำ

การศึกษาของสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย ระบุว่า ในประเทศไทยมีแนวโน้มว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจะทำให้ปริมาณน้ำลดลง (ประมาณ 5 - 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจะมีผลต่อผลผลิตด้านการเกษตร โดยเฉพาะข้าว ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ และต้องอาศัยปริมาณน้ำฝนและแสงแดดที่แน่นอน รวมถึงความชื้นของดินและอุณหภูมิเฉลี่ยที่พอเหมาะด้วย สำหรับประเทศไทย ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อภาคการเกษตรจะไม่รุนแรงมาก เพราะพื้นที่ชลประทานจะได้รับการป้องกัน แต่ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคมอาจจะรุนแรงในบริเวณที่ขาดน้ำอยู่แล้ว

นอกจากนี้ ผลกระทบยังอาจเกิดขึ้นกับการทำประมง เนื่องจาก แหล่งน้ำที่เคยอุดมสมบูรณ์ตลอดทั้งปี อาจแห้งขอดลงในบางฤดูกาล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การขยายพันธุ์และการ

เจริญเติบโตของสัตว์น้ำ ซึ่งจะทำให้จำนวนและความหลากหลายของชนิดของสัตว์น้ำลดจำนวนลงอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ความหลากหลายทางชีวภาพ และความอุดมสมบูรณ์ในแหล่งน้ำแถบลุ่มแม่น้ำโขงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะลดลงอย่างต่อเนื่อง หากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังคงดำเนินต่อไป

1.1.4 เหตุการณ์สภาพอากาศรุนแรง

จากสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง อากาศที่ร้อนขึ้น และความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ภัยธรรมชาติต่างๆ เกิดบ่อยครั้งและรุนแรง จะทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองบ่อยครั้งขึ้นและไม่เป็นไปตามฤดูกาล โดยภาคใต้ของประเทศซึ่งเคยมีพายุไต้ฝุ่นพัดผ่านจะเกิดพายุมากขึ้น และความรุนแรงของพายุไต้ฝุ่นก็จะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงอัตราเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของแนวโน้มอุทกภัยแบบฉับพลันด้วยเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ประชาชนจำนวนมากไร้ที่อยู่อาศัย และก่อให้เกิดความเสียหายกับระบบนิเวศ ภัยธรรมชาติอีกอย่างหนึ่งที่คาดการณ์ว่าจะรุนแรงขึ้น ได้แก่ ภาวะภัยแล้ง เช่น ในช่วงกลางปี พ.ศ. 2533 ประเทศไทยต้องประสบกับความแห้งแล้งรุนแรงจากปรากฏการณ์ เอล นินโญ่ ที่เชื่อกันว่าอาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อผลผลิตทางการเกษตร นอกจากนี้ไฟป่าอาจจะเกิดบ่อยครั้งขึ้นสืบเนื่องมาจากภาวะภัยแล้ง

1.1.5 ผลกระทบด้านสุขภาพ

อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นและเหตุการณ์ตามธรรมชาติที่รุนแรงและเกิดบ่อยครั้งส่งผลกระทบต่อสุขภาพและอนามัยของคนไทย โรคระบาดที่สัมพันธ์กับการบริโภคอาหารและน้ำดื่ม มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มสูงมากขึ้น โดยภัยธรรมชาติ เช่น ภาวะน้ำท่วมทำให้เกิดการปนเปื้อนของเชื้อโรคในแหล่งน้ำ ไม่ว่าจะเป็น โรคบิด ท้องร่วง และอหิวาตกโรค เป็นต้น โรคติดต่อในเขตร้อนก็มีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้น และจะคร่าชีวิตผู้คนเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะไข้มาลาเรีย ซึ่งมีอยู่กลายเป็นพาหะ เนื่องจากการขยายพันธุ์ของยุงจะมากขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่ร้อนขึ้นและฤดูกาลที่ไม่แน่นอน

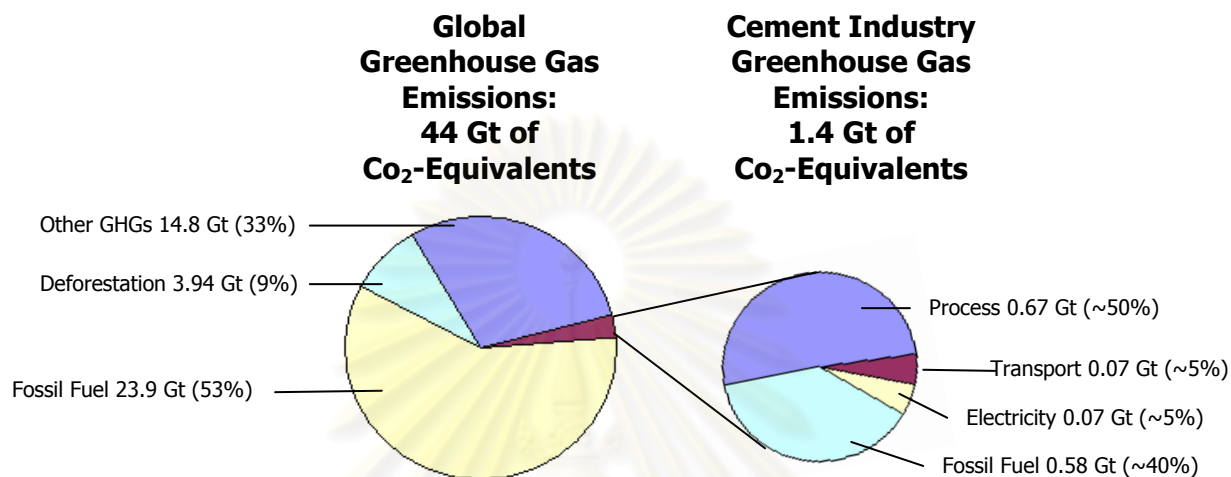
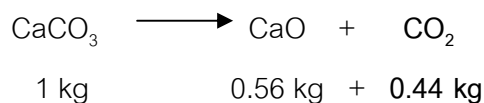
1.1.6 ผลกระทบทางสังคมและเศรษฐกิจ

ภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนั้นไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยในทางกายภาพเท่านั้น หากแต่ยังส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางสังคม

และเศรษฐกิจของประเทศชาติเช่นเดียวกัน กล่าวคือ การยุบตัวของพื้นที่ชายฝั่ง ภูมิอากาศแปรปรวน โรคระบาดรุนแรง นอกจากนี้ประชาชนยังจะได้รับความสะดวกจากการขาดแคลนอาหารและน้ำดื่มที่ถูกสุขลักษณะระหว่างภาวะน้ำท่วม การป้องกันการรุกคืบของน้ำเค็มในพื้นที่ทำกิน อาจทำได้โดยการสร้างเขื่อน และประตูน้ำป้องกันน้ำเค็ม แต่วิธีการนี้ต้องลงทุนสูง ดังนั้นเมื่อราคาของการป้องกันสูงเกินกว่าที่ชาวนาจะสามารถรับได้ การทิ้งพื้นที่ทำกินในบริเวณที่ให้ผลผลิตต่ำจึงเป็นทางออกที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

นอกจากนี้ ความเสียหายต่างๆที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การสูญเสียพื้นที่เกษตรกรรมที่สำคัญตามแนวชายฝั่งที่ยุบตัว ภัยธรรมชาติ และความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์ธรรมชาติที่รุนแรง ล้วนส่งผลให้ผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งเป็นสินค้าหลักของประเทศมีปริมาณลดลง พื้นที่ที่คุ้มค่าแก่การป้องกันในเชิงเศรษฐกิจ และพื้นที่ที่มีการพัฒนาสูง อาจได้รับการป้องกันล่วงหน้า เช่น นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จำต้องมีโครงสร้างป้องกันกระแสน้ำ ซึ่งจะรุนแรงขึ้นเมื่อน้ำทะเลสูงขึ้น หรือการสร้างกำแพงกันน้ำทะเลหรือเขื่อน เพื่อป้องกันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำทางการเกษตร และการทำนาเกลือ การป้องกันดังกล่าวนั้นจะต้องใช้งบประมาณจำนวนมหาศาล ดังนั้น ในพื้นที่ที่ไม่คุ้มค่าที่จะป้องกันในเชิงเศรษฐกิจจะถูกละทิ้งไป ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่เกิดปัญหาเศรษฐกิจและสังคมมากที่สุด เช่น การช่วยเหลือชาวนา ซึ่งจำเป็นที่จะต้องย้ายไปอยู่ที่ที่สูงขึ้นเนื่องจากน้ำทะเลรุก

ในการวิจัยนี้ได้นำหลักการของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ เพื่อประเมินผลกระทบของอุตสาหกรรมต่อสิ่งแวดล้อม โดยเลือกวิเคราะห์อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์เป็นอุตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณ 5% ของอุตสาหกรรมทั้งหมด ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งมากจากกระบวนการผลิตเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากในกระบวนการผลิตในขั้นตอน Calcination ซึ่งต้องใช้หินปูน (CaCO_3) เป็นวัตถุดิบในการผลิตซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



รูปที่ 1.1 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

ที่มา : Ken Humphreys and Maha Mahasen. Climate Change. World Business Council for Sustainable Development, 2002.

เนื่องจากการปล่อยปริมาณก๊าซที่เป็นมลพิษสูงในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงมีประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานปูนซีเมนต์ พ.ศ. 2549 อาศัยอำนาจตามความในข้อ 16 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม ออกประกาศไว้ คือ อากาศที่สามารถระบายออกจากโรงงานปูนซีเมนต์ ต้องมีค่าปริมาณของสารเจือปนไม่เกินที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งการกำหนดปริมาณสารเจือปนในอากาศนี้จึงทำให้ต้องมีการพิจารณาผลกระทบหลักตามมาโดยมีประเด็นที่ควรพิจารณาในการติดตามตรวจสอบการดำเนินโครงการสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ซึ่งทำให้มีการลงทุนสูงขึ้นจึงทำให้มีผลกระทบต่อต้นทุน ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 ค่ากำหนดปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงานปูนซีเมนต์

โรงงานปูนซีเมนต์ซึ่งมีการระบายอากาศเสียออกจากหน่วยการผลิตดังต่อไปนี้	ค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศ		
	ฝุ่นละออง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)	ออกไซด์ของไนโตรเจนในรูปของไนโตรเจนไดออกไซด์ (ส่วนในล้านส่วน)
1. หม้อเผาปูนซีเมนต์ทั่วไป (grey cement kiln)	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 500
2. หม้อเผาปูนซีเมนต์ขาว (white cement kiln)	ไม่เกิน 120	ไม่เกิน 500	ไม่เกิน 500
3. หม้อเย็น (clinker cooler)	ไม่เกิน 120	-	-
4. หม้อบดปูน (clinker grinding mill)	ไม่เกิน 120	-	-
5. หม้อบดถ่านหิน (coal grinding mill)	ไม่เกิน 120	-	-
6. หน่วยการผลิตอื่น ๆ กรณีไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง กรณีมีการเผาไหม้เชื้อเพลิง	ไม่เกิน 400 ไม่เกิน 320	- ไม่เกิน 700	- ไม่เกิน 400

ที่มา : <http://she.cportal.net/Portals/0/Law-IND-092.pdf>

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1.2 ผลกระทบหลักที่ควรพิจารณาของอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	ผลกระทบหลักที่ควรพิจารณา
อุตสาหกรรมทั่วไป	ปูนซีเมนต์	<ul style="list-style-type: none"> ● ด้านอากาศเสีย (TSP, SO₂, NO₂, CO) 1) เตรียมและบดวัตถุดิบ <ul style="list-style-type: none"> - ปิดคลุมสายพานลำเลียงอย่างมิดชิด - ติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิตหรือถุงกรอง - ปลุกต้นไม้เป็นแนวป้องกันฝุ่นรอบกองวัตถุดิบ 2) เผาปูนเม็ด <ul style="list-style-type: none"> - ติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิตหรือถุงกรอง - สถิติการขัดข้องของอุปกรณ์ดักฝุ่น (EP trip) และมาตรการควบคุมเพื่อลดการแพร่กระจายของฝุ่นละออง 3) บดปูนซีเมนต์ <ul style="list-style-type: none"> - ติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นละอองแบบไฟฟ้าสถิตหรือถุงกรอง 4) บรรจุหีบห่อ <ul style="list-style-type: none"> - ติดตั้งอุปกรณ์ดักฝุ่นละอองแบบถุงกรอง - ทำความสะอาดพื้นโรงงานอย่างสม่ำเสมอ <p>ข้อควรพิจารณา : ควรสังเกตการสะสมของฝุ่นละอองบริเวณปล่อง ส่วนอาคารที่ห่างจากถนน และสังเกตการสะสมของฝุ่นละอองบนใบไม้และอาคาร โดยคำนึงถึงอิทธิพลจากน้ำฝน</p>

ที่มา : สำนักงานนโยบายและวางแผนสิ่งแวดล้อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 ความหมายของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (ECO - EFFICIENCY)

คำว่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจมาจากการรวมกันของ คำ 2 คำ ได้แก่คำว่า Eco หมายความว่าได้ถึง ระบบนิเวศ: Ecology และ เศรษฐกิจ: Economy กับคำว่า Efficiency ซึ่งแปลตามภาษาไทยว่า ประสิทธิภาพ นิยามของคำว่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจซึ่งบัญญัติโดย The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) หมายความว่า การนำมาซึ่งการแข่งขันกันในด้านคุณภาพด้านการผลิตและการบริการโดยมีจุดประสงค์ที่จะตอบสนองความต้องการของมนุษย์และนำมาซึ่งคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ในขณะที่การแข่งขันดังกล่าวมีความจำเป็นที่จะต้องตระหนักถึงผลกระทบที่มีต่อระบบนิเวศและทรัพยากรธรรมชาติ ให้อยู่ในระดับที่อย่างน้อยต้องสอดคล้องกับความสามารถของโลกใบนี้ที่จะรองรับผลกระทบที่เกิดจากการแข่งขันดังกล่าวได้ โดยมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ

1. พยายามลดการบริโภคทรัพยากร (Reducing the consumption of resources)
หมายความว่ารวมถึงการพยายามลดการใช้วัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต พลังงาน น้ำ และที่ดิน ส่งเสริมการใช้ซ้ำ (Reuse) และการแปรใช้ใหม่ (Recycle) ของผลิตภัณฑ์
2. พยายามลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม (Reducing the impact on nature)
หมายความว่ารวมถึงการลดการปล่อยของเสีย ได้แก่ น้ำทิ้ง ขยะ และสารพิษ ออกสู่สิ่งแวดล้อม
3. เพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และบริการ (Increasing product or service value)
หมายถึงความพยายามที่จะทำให้ผู้บริโภคได้รับผลประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ สินค้าและบริการสูงสุด โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติน้อย ที่สุด

การนำหลักการประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจไปใช้กับภาคธุรกิจนั้นสามารถช่วยให้ธุรกิจเกิดผลกำไรที่เพิ่มมากขึ้นจากการพยายามลดการใช้ทรัพยากร หรือวัตถุดิบตั้งต้น และพลังงาน รวมถึงลดการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมลง จะเห็นได้ว่าหลักการของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ นอกจากจะเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในทางธุรกิจที่สามารถตรวจวัดได้จริงและชัดเจนแล้ว ยังเป็นดัชนีชี้วัดความสัมพันธ์ด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมที่ช่วยชี้นำทิศทางและสนับสนุนให้นโยบายของรัฐ มุ่งไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืนเพิ่มมากขึ้น อันเป็นเป้าหมายโดยรวมของประเทศในระยะยาว ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม WBCSD ได้กำหนดแนวทาง 7 ประการที่จะช่วยให้การดำเนินงานด้านธุรกิจประสบความสำเร็จในเชิงนิเวศเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น อันประกอบด้วย

1. ลดการใช้ทรัพยากร หรือวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต และบริการ (Reduce material intensity)
2. ลดการใช้พลังงานในการผลิต และบริการ (Reduce energy intensity)
3. ลดการปล่อยสารพิษต่างๆ (Reduce dispersion of toxic substance)
4. เสริมสร้างศักยภาพการแปรใช้ใหม่ของวัสดุ (Enhance recyclable)
5. เพิ่มปริมาณการใช้ทรัพยากรที่หมุนเวียนได้ (Maximize use of renewable)
6. เพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (Extend product durability)
7. เพิ่มระดับการให้บริการแก่ผลิตภัณฑ์และเสริมสร้างธุรกิจบริการ (Increase service intensity)

การประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจสามารถทำได้จากการพิจารณาสัดส่วนของมูลค่าผลิตภัณฑ์และการบริการเปรียบเทียบกับผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม โดย WBCSD ได้กำหนดวิธีการประเมินหาค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1)

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

เนื่องจากการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจโดย สมการข้างต้นมีหลายวิธีในการนำค่าข้อมูลมาคำนวณทั้งนี้เนื่องจากทั้งผลิตภัณฑ์หรือการบริการ และผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมประกอบด้วยตัวชี้วัด (Indicator) มากมายหลากหลายที่ไม่สามารถนำมารวมกันเป็นตัวเลขเดียวได้ ยกตัวอย่างเช่น ค่าข้อมูลผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจจะสามารถนำข้อมูลผลกระทบมาได้จากตัวชี้วัดหลายๆด้าน เช่น ค่าข้อมูลที่ได้จากตัวชี้วัดผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านพลังงาน หรือด้านทรัพยากรน้ำ เป็นต้น ดังนั้นในการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจจากสมการดังกล่าวจึงต้องเลือกค่าข้อมูลจากตัวชี้วัดที่เหมาะสมกับธุรกิจแต่ละประเภท ผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จากตัวชี้วัดดังกล่าวต้องสามารถสื่อสารได้ง่าย และสามารถนำไปสู่การตัดสินใจที่จะนำผลลัพธ์การคำนวณไปสู่การปฏิบัติของผู้บริหารและคนในองค์กรรวมทั้งบุคคลภายนอกทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจทั้งทางตรงและทางอ้อม

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในแต่ละปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์
2. เพื่อวิเคราะห์หากกลยุทธ์ที่เหมาะสมในการจัดการก๊าซเรือนกระจกโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะทำให้เกิดต้นทุนที่ต่ำที่สุดในการดำเนินการ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่พิจารณาเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)
2. ข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจเป็นข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ซึ่งได้มาจากอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์บางส่วน
3. ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจได้แก่ ปัจจัยในด้าน การใช้วัตถุดิบ, การใช้พลังงาน, การใช้ทรัพยากรน้ำ, การปลดปล่อยของเสีย โดยปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น
4. ในการวิเคราะห์หาแนวทางที่ทำให้ต้นทุนต่ำที่สุดนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่โปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อทราบถึงประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในแต่ละตัวชี้วัดและสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้
2. เพื่อทราบถึงกลยุทธ์ที่เหมาะสมในการจัดการก๊าซเรือนกระจกโดยเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานน้อยที่สุดในขณะที่การผลิตเป็นไปตามเป้าหมาย
3. สามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไปได้

1.6 ขั้นตอนในการทำวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำความรู้มาประยุกต์ใช้กับการวิจัย
2. เก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาเบื้องต้นในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เพื่อทราบสภาพปัจจุบันของอุตสาหกรรมและข้อมูลต่างๆจากโรงงานตัวอย่าง
3. ศึกษาและวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายจากการนำเทคโนโลยีมาจัดการก๊าซเรือนกระจก
4. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ทฤษฎีประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาต้นทุนดำเนินการที่ต่ำที่สุด
5. แสดงผลการวิเคราะห์และประเมินที่ได้จากขั้นตอนที่ 4
6. สรุปผลการดำเนินงานและเสนอแนะแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาต่อไป
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอผลงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-Efficiency) เป็นหลักการที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้การพัฒนาด้านเศรษฐกิจที่ก้าวรุดหน้าเพิ่มขึ้นอยู่ตลอดนั้นเดินควบคู่ไปได้พร้อมกับ การพัฒนาที่ยั่งยืน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือหลักการดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการจัดการให้ภาคธุรกิจต่างๆมีศักยภาพใน การแข่งขันด้านเศรษฐกิจระหว่างกันควบคู่ไปกับการมีส่วนร่วมรับผิดชอบต่อผลกระทบที่จะเกิดขึ้นต่อทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco-Efficiency) มักจะถูกนิยามโดย สมการดังนี้

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

จากหลักการดังกล่าวเราสามารถเขียนประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในแต่ละด้าน ต่างๆได้ เช่น ด้านวัตถุดิบที่ใช้ ด้านพลังงาน ด้านการใช้น้ำดิบและด้านการปล่อยของเสีย

2.1.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของวัตถุดิบที่ใช้

Material Eco-Efficiency (ME) สามารถเขียนได้ดังนี้

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

$$\text{ME} = \frac{Q}{\sum (M_1 CF_1 + M_2 CF_2 + \dots + M_n CF_n)} \quad (3)$$

$$\sum Mt = (M_1 CF_1 + M_2 CF_2 + \dots + M_n CF_n) \quad (4)$$

ME = ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของวัตถุดิบที่ใช้ (ล้านบาท/ตัน)

Q = มูลค่าของผลิตภัณฑ์ (ล้านบาท)

$\sum Mt$ = ผลรวมของวัตถุดิบที่ใช้ (ตัน)

C = ตัวคูณปรับค่าเพื่อแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน

2.1.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของพลังงานที่ใช้ Energy Eco-Efficiency (EE) สามารถเขียนได้ดังนี้

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

$$EE = \frac{Q}{\sum (E_1 CF_1 + E_2 CF_2 + \dots + E_n CF_n)} \quad (6)$$

$$\sum Et = (E_1 CF_1 + E_2 CF_2 + \dots + E_n CF_n) \quad (7)$$

EE = ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของวัตถุดิบที่ใช้ (ล้านบาท/เทระจูล)

Q = มูลค่าของผลิตภัณฑ์ (ล้านบาท)

$\sum Et$ = ผลรวมของพลังงานที่ใช้จากแหล่งต่างๆ (เทระจูล)

C = ตัวคูณปรับค่าเพื่อแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน

2.1.3 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของน้ำดิบที่ใช้ Water Eco-Efficiency (Wa E) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Wa E = \frac{Q}{\sum Wt} \quad (8)$$

Wa E = ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของน้ำดิบที่ใช้ (ล้านบาท/ลูกบาศก์เมตร)

Q = มูลค่าของผลิตภัณฑ์ (ล้านบาท)

$\sum Wt$ = ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร)

2.1.4 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของการปล่อยกากอุตสาหกรรม Waste Eco-Efficiency (Ws E) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Ws E = \frac{Q}{\sum W_s} \quad (9)$$

Ws E = ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านของการปล่อยกากอุตสาหกรรม(ล้านบาท/ตัน)

Q = มูลค่าของผลิตภัณฑ์ (ล้านบาท)

$\sum W_t$ = ปริมาณกากอุตสาหกรรมที่ปลดปล่อย (ตัน)

เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจแล้วเห็นว่าปัจจัยที่เป็นสาระสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมปูนคือ ปัจจัยด้านพลังงานและปัจจัยด้านวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 อย่างนี้เป็นเหตุให้ต้องทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการวิเคราะห์หาจำนวนวัตถุดิบที่เหมาะสม การใช้พลังงานหรือการเปลี่ยนไปใช้เชื้อเพลิงชนิดใหม่อันมีผลกระทบต่อค่าเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายรายปี

ปัจจัยในด้านกากของเสียนั้น สามารถทำให้ลดค่ากำจัดขยะและยังเป็นการลดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบได้อีกด้วย แต่เมื่อเทียบกับปัจจัยด้านพลังงานและวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ประโยชน์นั้นน้อยมาก จึงยังมีใช้สาระสำคัญอันควรได้รับการพิจารณา

ปัจจัยในด้านน้ำดิบนั้น ในอุตสาหกรรมปูนไม่ค่อยนิยมใช้ชีวิวัต เพราะเหตุว่าใช้น้ำดิบในการหล่อเย็นเท่านั้น เมื่อใช้งานเสร็จก็ยังสามารถนำกลับมาบำบัดเพื่อนำกลับไปใช้งานใหม่ได้อีก แม้ว่าจะมีการระเหยเป็นไอน้ำออกไปจากระบบเสียบ้าง จึงไม่ต้องนำมาประยุกต์ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกได้พยายามคิดหาแนวทางสำหรับการที่จะจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้ดีที่สุด จนกระทั่งถึงกลางศตวรรษที่ 20 จึงเริ่มประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรก แต่ก็ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย จนกระทั่งถึงปี ค.ศ. 1950 เทคนิคดังกล่าวก็เริ่มได้รับความนิยมแพร่หลาย ได้มีการเขียนตำรา และบทความกันขึ้นเป็นระยะๆ แสดงถึงแง่มุมต่างๆ ในการนำไปประยุกต์ใช้

และพัฒนาวิธีการคำนวณให้เหมาะสม ซึ่งไม่มีใครปฏิเสธได้ว่าการพัฒนาขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์นั้นเป็นส่วนสำคัญในการกระตุ้นให้มีการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางและมีการพัฒนาวิธีการคำนวณได้อย่างลึกซึ้งจนสามารถหาคำตอบได้ใกล้เคียง กับสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง

เทคนิคดังกล่าวนี้มีชื่อเรียกว่า “โปรแกรมเส้นตรง” (Linear Programming หรือชื่อย่อว่า LP) ซึ่งเป็นการจัดสรรทรัพยากรภายใต้ข้อจำกัดที่มีอยู่ให้ดีที่สุด (Optimal) เพื่อที่จะบรรลุเป้าหมายที่กำหนด (Specified goal) ภายใต้ทางเลือกที่เป็นไปได้ (Feasible alternative) ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก สำหรับคำว่าเส้นตรงนั้น มีความหมายทางคณิตศาสตร์ว่าโปรแกรมดังกล่าวมีระบบสมการทั้งหมดซึ่งสามารถจัดความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปเส้นตรงได้

การตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดสรรทรัพยากรที่ให้ประโยชน์มากที่สุด หรือเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดนั้น อาจเกี่ยวข้องกับตัวแปร และเงื่อนไขต่างๆ เป็นจำนวนมาก จนเป็นการยากที่จะใช้เพียงประสบการณ์แต่เพียงอย่างเดียวในการตัดสินใจ ทรัพยากรเหล่านี้อยู่อย่างจำกัด และจำเป็นจะต้องแจกแจงไปใช้ประโยชน์หลายอย่างพร้อมๆ กัน การแก้ปัญหาในลักษณะเช่นนี้อาจทำได้โดยใช้เทคนิคของโปรแกรมเส้นตรง

ลักษณะของเทคนิคแบบนี้ถึงแม้จะมีข้อจำกัด แต่ก็ยังเป็นวิธีการวางแผนเพื่อประกอบการตัดสินใจที่แพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบันทั้งในวงการของรัฐบาลและธุรกิจเอกชนไม่ว่าจะเป็นปัญหาการวางแผนการผลิต การลงทุน การจัดซื้อการขนส่ง เกมและกลวิธี หรืออื่นๆ อีกมากมายที่สามารถจัดรูปให้มาอยู่ในสมการเส้นตรงได้ หรือสมการที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงให้อยู่ในระบบของสมการเส้นตรงได้ เมื่อสามารถทำได้เช่นนี้ก็ทำให้การแก้ปัญหาเพื่อมีการจัดสรรทรัพยากรได้ดีที่สุดเป็นไปได้ไปอย่างง่ายดาย ในการจัดรูปปัญหาเพื่อให้ใช้โปรแกรมเส้นตรงได้นั้น จะต้องมีสมการจุดประสงค์ (Objective equation) ที่สามารถกำหนดความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง และจะต้องมีข้อจำกัดต่างๆ (Constraints) ของการที่จะบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้สามารถกำหนดความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้เช่นเดียวกัน

ในการจัดรูปปัญหานั้น จำเป็นจะต้องรู้ว่าต้องการเป้าหมายในรูปของค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุด นอกจากนั้นยังต้องศึกษาหาข้อมูลอย่างเพียงพอ ที่จะสามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างทรัพยากรต่างๆ ที่แน่นอนจนสามารถแสดงให้อยู่ในรูปข้อจำกัดที่จะไปสู่เป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุดนั้นๆ ข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถหาได้จากการศึกษาหรือทดลองเบื้องต้น หรือทำการค้นคว้าจากสิ่งที่มีผู้อื่นได้ทำวิจัยหรือเก็บรวบรวมเอาไว้ การเก็บข้อมูลได้อย่างละเอียดเพียงพอ เพื่อสามารถกำหนดความสัมพันธ์ได้อย่างถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็นในการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมเส้นตรง

โปรแกรมเส้นตรงนั้น ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหามากมายหลายรูปแบบ ซึ่งพอจะสรุปเพื่อให้ภาพกว้างๆ ได้ดังนี้

1. การวางแผนการผลิต และการลงทุน
2. การผสมส่วนผสมวัตถุดิบ
3. การจัดลำดับและการกระจายงาน
4. การขนส่ง
5. ปัญหาอื่นๆ

2.2.1 รูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming Model)

รูปแบบแทนระบบทางคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นตรงมีโครงสร้างดังนี้

1. มีสมการกำหนดเป้าหมาย (Objective function) คือสมการแสดงความสัมพันธ์ของต้นทุนกำไร ฯลฯ เพื่อให้กำหนดเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด (Maximize, Minimize)
2. มีสมการแสดงข้อบ่งชี้ (Constraints) ซึ่งแสดงความจำกัดของปัจจัยหรือทรัพยากรในรูปสมการหรืออสมการ
3. ความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการต่างๆ ของรูปแบบแทนระบบต้องมีลักษณะเชิงเส้นตรง (Linear form) คือตัวแปรทุกตัวในสมการเป้าหมายและสมการหรืออสมการของข้อบ่งชี้จะต้องมีความสัมพันธ์ของเส้นตรงเป็นกำลังเดียวกัน
4. ตัวแปรทุกตัวต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

จากรูปแบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรงนี้ จะเห็นได้ว่าตัวค่าวัดผลการดำเนินงาน (Measure of effectiveness) จะได้จากสมการกำหนดเป้าหมายซึ่งเราจะต้องพยายามหาค่าเป็นไปตามเป้าหมายโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ และตัวแปรต่างๆจะเป็นตัวแทนจำนวน ปริมาณหรือค่าของปัจจัยที่มีอยู่จำกัดโดยการกำหนดของสมการหรืออสมการในข้อบ่งชี้ของปัญหา ผลการวิเคราะห์จะได้เป็นค่าของตัวแปรที่จะนำไปตัดสินใจเพื่อดำเนินการให้ได้ตามเป้าหมาย การกำหนดข้อบ่งชี้ของปัญหาด้วยสมการหรืออสมการนั้นจะกำหนดขึ้นตามความเป็นจริง ซึ่งจะมีโอกาสอยู่ในแบบของอสมการมากกว่า เช่น การกำหนดให้สินค้าต้องใช้เวลาวัตถุดิบชนิดหนึ่ง ปริมาณที่มีอยู่จำกัดในจำนวน 10 ตัน จะได้สมการข้อบ่งชี้เป็น “น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ตัน” สำหรับปริมาณวัตถุดิบที่ใช้นั้นๆ หรือกำหนดว่าปริมาณการขายสำหรับสินค้าชนิดนั้นต่ำสุดเป็น 20,000 ชิ้น ทำให้เกิดอสมการ “มากกว่าหรือเท่ากับ 20,000 ชิ้น” สำหรับปริมาณการขายเป็นต้น

ตัวอย่างรูปแบบแทนระบบของการโปรแกรมเชิงเส้นตรง เพื่อให้หาค่าของตัวแปร เช่น X_1, X_2, \dots, X_n ที่ให้ผลการดำเนินงานที่มีค่าสูงสุดตามสมการเป้าหมายดังนี้

สมการเป้าหมาย : $\text{Max. } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

$$\cdot \qquad \qquad \qquad \cdot$$

สมการหรืออสมการข้อช่วย :

$$\cdot \qquad \qquad \qquad \cdot$$

$$\cdot \qquad \qquad \qquad \cdot$$

$$\cdot \qquad \qquad \qquad \cdot$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m$$

$$X_i \geq 0; i = 1, 2, \dots, n$$

โดยมี $Z = F(X_i)$ เป็นสมการเป้าหมาย

X_i เป็นตัวแปร

a_{ij}, C_j เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีค่าคงที่

b_j เป็นข้อกำหนดที่จะนำมาใช้ในแต่ละกิจการซึ่งมีค่าคงที่

ในตัวอย่างนี้เรามีตัวแปรที่จะสามารถเลือกเปลี่ยนได้อยู่ n ตัว การเพิ่มค่าตัวแปรตัวหนึ่งตัวใดมีผลทำให้ตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกันลดค่าลงไปด้วยภายใต้ข้อช่วยที่กำหนดเป็นสมการหรืออสมการโดยเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์คือ = (เท่ากับ) , \leq (น้อยกว่าหรือเท่ากับ) และ \geq (มากกว่าหรือเท่ากับ)

2.2.2 การหาผลลัพธ์โดยใช้โปรแกรม Solver ใน Microsoft Excel

การใช้โปรแกรม Solver เป็นการให้โปรแกรมช่วยค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นแบบจำลองที่อาศัยวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการจัดสรรทรัพยากรต่างๆ ที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อนำเอาทรัพยากรเหล่านั้นไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

1. ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

เป็นตัวเลขเชิงปริมาณ ที่จะบ่งชี้ถึงคำตอบของตัวปัญหา และเราสามารถนำเอาค่าของมันไปใช้ในการตัดสินใจดำเนินงานของเราได้ ตัวแปรตัดสินใจจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

2. ข้อจำกัดของตัวปัญหา (Constraint)

เป็นสิ่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตัดสินใจ กับปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่ ซึ่งจะนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยจะอยู่ในรูปแบบของสมการ หรืออสมการก็ได้

3. เป้าหมายของตัวปัญหา (Objective)

ภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ ของตัวปัญหา จะทำให้เราได้ค่าของตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนมากมาย ซึ่งจะเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ที่เราสามารถนำเอาคำตอบเหล่านี้ไปใช้ในการดำเนินงานได้ คำตอบเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างกันไป และคำตอบแต่ละอันก็จะให้ความพึงพอใจแก่เราได้ไม่เท่ากัน และเนื่องเราอยากได้คำตอบที่เราพอใจมากที่สุด ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดตัววัดความพึงพอใจที่จะวัดคำตอบให้ออกมาเป็นตัวเลขของความพอใจได้ ตัววัดความพอใจของคำตอบนั้นก็คือ เป้าหมายของตัวปัญหานั้นเอง

2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

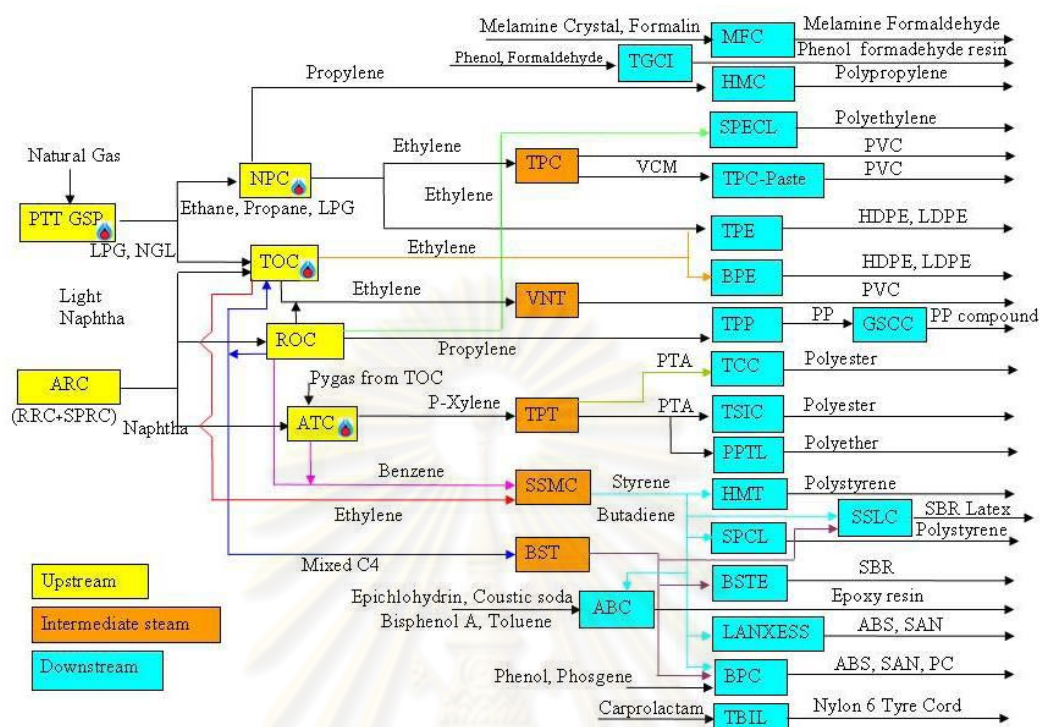
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการผลิตปูนซีเมนต์มากมาย โดยเฉพาะเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงาน และลดสารมลพิษที่เกิดขึ้น ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาถึงการใช้การประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ตัวอย่างการลดพลังงานเช่น การใช้สารเติมแต่ง (Additives) ได้แก่ ซีเมนต์, ซีโลหะ, อีซูทิก บดผสมกับปูนเม็ดเพื่อลดพลังงานต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้โดย Das et al (1997) การใช้กากของเสียเป็นเชื้อเพลิงเพื่อแทนที่การใช้ถ่านหินบางส่วน และการลดอุณหภูมิของการเกิดปูนเม็ดเพื่อลดพลังงานที่ใช้โดย Schneider M. และ Kuhlmann K. (1997)

I.Guerra, I. Vivar และคณะ (2008) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการโดยใช้เศษอิฐ ปูน เศษหิน ที่ได้จากการรื้อถอนสิ่งก่อสร้าง ถนน มาเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งในการทดลองได้ทำการปรับค่าส่วนผสมระหว่าง 20% ถึง 50% แล้วตรวจสอบค่าความแข็งแรงของคอนกรีต จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ว่า คอนกรีตที่ได้มีคุณสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกับคอนกรีตที่ใช้กระบวนการผลิตแบบเดิม เช่นแรงดึง แรงบิด ความเครียด การทนทานต่อการสึกกร่อน การทนต่อ

คลอรีน อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงเป็นการช่วยลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านของการจัดการกากของเสีย ลดค่าใช้จ่ายในการนำไปทำลายหรือกำจัดขยะได้อีกทางหนึ่ง

G.P. Kharel และ K. Charmondusit (2007) ได้นำหลักการของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กแท่งในประเทศเนปาล ซึ่งเป็นผลทำให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติ การใช้พลังงาน การปลดปล่อยกากอุตสาหกรรม การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศและการใช้น้ำดิบ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่น การเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงในเตาเผาให้มีค่าความร้อนสูงขึ้น การอุดรอยรั่วของเตาเผา การผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่อัดเข้าไปในอัตราส่วนที่เหมาะสม การติดตั้งสวิตช์เปิด ปิด ปั้มน้ำอัตโนมัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากถ่านหินมาเป็นก๊าซธรรมชาติและการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนที่ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศกลับมาใช้ใหม่มีผลทำให้เป็นการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ก่อเกียรติ เกิดปากแพรง และ กิตติกร จามรดุสิต (2550) ได้นำเสนอแนวทางการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของกลุ่มปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ภายในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งพยายามแสดงให้เห็นถึงการนำประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจมาประยุกต์ใช้เป็นตัวชี้วัดในมิติเชิงเศรษฐกิจควบคู่กับมิติเชิงสิ่งแวดล้อมที่เป็นประโยชน์สำหรับองค์กรธุรกิจอุตสาหกรรม ตั้งแต่ในระดับโรงงาน บริษัท และกลุ่มบริษัท จนกระทั่งถึงระดับกลุ่มอุตสาหกรรมการศึกษาวิจัยเริ่มจากการศึกษาความสัมพันธ์ภายในกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดโดยใช้แผนภาพการไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวชี้วัดด้านเศรษฐกิจ ได้แก่ ปริมาณยอดขายรวม และกำไรขั้นต้น ตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ ปริมาณพลังงานที่ใช้ ปริมาณการใช้น้ำ และปริมาณกากของเสียอันตราย ตั้งแต่ปี พ.ศ.2546-2548 เพื่อนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ ตามหลักการประเมินของ The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของกลุ่มอุตสาหกรรมโดยใช้แผนภาพการไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นถึงลำดับความสัมพันธ์ของบริษัทที่อยู่ภายในกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตั้งแต่ขั้นต้น ชั้นกลางจนกระทั่งถึงขั้นปลาย



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพการไหลของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ของกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และปิโตรเคมีภายในนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

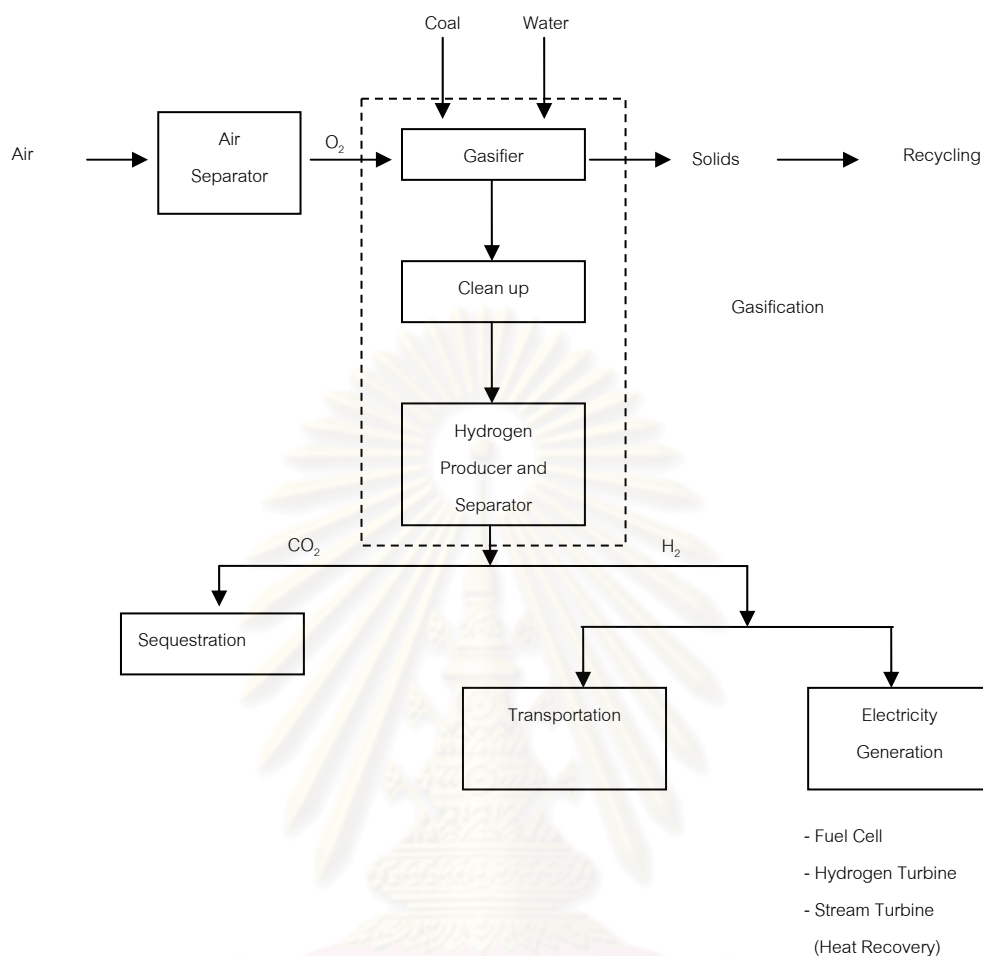
ศิริจันทร์ และ มานิจ ทองประเสริฐ (2550) ได้ศึกษาเรื่องโครงการเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด เทคโนโลยีหลักที่มีการวิจัยพัฒนา ได้แก่ เทคโนโลยีการเปลี่ยนให้เป็นก๊าซ (Gasification Technology) และเทคโนโลยีกังหัน (Turbine Technology) สำหรับเทคโนโลยีการเปลี่ยนเป็นก๊าซ เป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนถ่านหิน หรือเชื้อเพลิงที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนให้เป็นก๊าซ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) และผลพลอยได้ (Byproduct) ที่เป็นสารเคมีประเภทต่าง ๆ แล้วแต่องค์ประกอบของถ่านหิน หลังจากกำจัดละอองฝุ่นผงของถ่านหินและสารเคมีออก จะได้ก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas) ที่เรียกว่า Syngas ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ประมาณ 85% ส่วนที่เหลือจะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน

Syngas ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยผ่านระบบกังหันก๊าซความร้อนร่วม ซึ่งประกอบด้วยระบบกังหันก๊าซประสิทธิภาพสูง ในการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วใช้ความร้อนเหลือใช้ (Exhaust heat) จากกังหันก๊าซไปผลิตไอน้ำเพื่อผ่านเข้ากังหันไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม การใช้ Syngas ในการผลิตกระแสไฟฟ้านี้ยังคงมีการปล่อยออกก๊าซเรือนกระจก

โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเพื่อที่จะกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โรงไฟฟ้าถ่านหินสะอาดจึงต้องมีระบบการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย โดยที่ในการผลิต Syngas ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับไฮโดรเจน ในส่วนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อใช้งานเสร็จจะรวมกับออกซิเจนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องการกำจัด ส่วนก๊าซไฮโดรเจนซึ่งไม่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจกและสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในด้านต่าง ๆ ได้ จึงมีความสนใจที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากถ่านหิน แล้วใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตกระแสไฟฟ้ารวมทั้งเมื่อมีเหลือก็จะสามารถนำไปใช้ในงานอื่น เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ ทำให้ในขณะนี้ได้มีการวิจัยและพัฒนาการผลิตและการใช้งานก๊าซไฮโดรเจนเป็นงานหลักหนึ่งในด้านการวิจัยและพัฒนาพลังงานในสหรัฐอเมริกา

เพื่อให้สามารถวิจัยและพัฒนาแนวคิดที่จะนำไปสู่การผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินโดยไม่มี การปล่อยออกก๊าซเรือนกระจกรัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้มีประกาศการลงทุนในโครงการ “Future Gen. Co- Production” ซึ่งจะเป็นโครงการ 10 ปีในวงเงิน 950 ล้านดอลลาร์สหรัฐ สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 275 เมกกะวัตต์ ที่มีการจับตรึง (Sequestration) 90% ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการวิจัยและพัฒนาจะประกอบด้วยงาน 5 ด้าน คือ เทคโนโลยีด้านระบบผลิตก๊าซ (Gasification system technology), การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากถ่านหิน, กักเก็บก๊าซไฮโดรเจน, การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell), และการจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และตรึงไว้ในที่เก็บ (Storage) แบบต่าง ๆ รูปที่ 2.2 แสดงไดอะแกรมอย่างง่ายของโครงการ Future Gen

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 Project Future Gen

ที่มา : www.technologymedia.co.th

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงกระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้ข้างต้นจะช่วยลดพลังงานและสารมลพิษลงได้ แต่เมื่อพิจารณาตามหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิตพบว่าการนำอุปกรณ์หรือวัตถุดิบใหม่เข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนอื่นๆ ในช่วงวัฏจักรชีวิตของการผลิต ซึ่งมักจะหมายถึงความถึงความต้องการทางด้านพลังงานและวัตถุดิบที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดสารมลพิษที่มากขึ้นด้วย ซึ่งสิ่งต่างๆ ที่เพิ่มขึ้นโดยอ้อมจากการปรับปรุงกระบวนการเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้โดยง่าย แต่ต้องพิจารณาเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง

Kamala Ernest (2007) ทำการศึกษาวิจัยในเรื่อง Energy-use Benchmarks for the Cement Sector โดยนำข้อมูลการบริโภคพลังงานของบริษัทปูนซีเมนต์ในประเทศมาเลเซีย ทำการเทียบเคียงค่า SEC ที่โรงงานทำกับค่า SEC Benchmarks และค่าเฉลี่ยโดยรวมของบริษัททั้ง 3 บริษัทที่นำมาศึกษานั้นเท่ากับ 4.00 GJ/ton ซึ่งสูงกว่า SEC Benchmarks ที่มีค่าเท่ากับ 3.93 GJ/ton จากนั้นทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของบริษัทปูนซีเมนต์ทั้ง 3 โดยนำมาตรการการปรับปรุงเข้ามาปรับใช้ดังนี้

ใช้ Biomass เป็นทางเลือกเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง

Heat recovery จากเตาเผา สำหรับการอบ และการอุ่นวัตถุดิบก่อนเข้าเตา

Reduce the leakage and insulate pre-heater

ประยุกต์ใช้ VSD กับมอเตอร์พัดลมและปั๊ม

Reduce the leakage in compressed air system

ปรับปรุงระบบขนส่งถ่านหินและนำกลับมาใช้ใหม่

หลังจากนำมาตรการเข้ามาปรับปรุงแล้วสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ และได้ผลของการประหยัดพลังงานมากกว่า 88 เปอร์เซ็นต์ จากเดิมก่อนการปรับปรุง

Taeko Aoe (2006) ได้นำเสนอดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจตัวใหม่เรียกว่า Factor X โดยค่า Factor X นี้เราสามารถหาได้จากการนำค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาในปัจจุบันหารด้วยค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ที่ใช้อ้างอิงเพื่อใช้พิจารณาว่ากระบวนการผลิตได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากน้อยเพียงใด หากค่า Factor X ที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาใหม่นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าผลิตภัณฑ์เดิม ในทางตรงข้ามหากค่า Factor X ที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาใหม่นั้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าผลิตภัณฑ์เดิม ซึ่งเหตุการณ์นี้อาจเกิดขึ้นได้จากการใช้ทรัพยากรไม่สมดุลกันมาก เช่น ลดการใช้วัตถุดิบได้แต่ทำให้การใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นเกินไปก็อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าการช่วยประหยัดก็เป็นไปได้ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการประเมินค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของโทรทัศน์สีรุ่นใหม่(แบบ Digital LCD) เทียบกับรุ่นเก่า (แบบ CRT) ซึ่งผลที่ได้ปรากฏว่าค่า Factor X ที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก ซึ่งในการนี้เกิดจากการออกแบบพัฒนาเชิงสิ่งแวดล้อม (Eco-Design)

Table 2
GHG Factors X of TV sets

GHG Factor X		2.3		$\frac{P_d \times L_a}{G_d} = \frac{1.0 \times 8}{1.31E+03}$	
GHG Factor X =		GHG efficiency of the evaluated product		$\frac{P_d \times L_a}{G_d} = \frac{1.0 \times 8}{2.98E+03} = 2.3$	
		Evaluated product		Reference product	
		36" Digital Hi-Vision TV		36" Hi-Vision TV	
		2004		1993	
		TH-36D60		TH-36HV10	
		GHG emissions	Unit	GHG emissions	Unit
Manufacture	Material production	3.15E+01	kg/unit	5.75E+01	kg/unit
	Electronic component production	4.63E+02	kg/unit	7.38E+02	kg/unit
	Assembly	1.47E+01	kg/unit	1.47E+01	kg/unit
Transport	Transportation	1.39E+01	kg/unit	1.41E+01	kg/unit
	Power consumption during operation	7.78E+02	kg/unit	2.03E+03	kg/unit
Use	Power consumption during standby	4.13E+00	kg/unit	1.22E+02	kg/unit
	Consumable material	5.22E-02	kg/unit	5.22E-02	kg/unit
	Transportation	6.89E+00	kg/unit	6.89E+00	kg/unit
Transport	Recycling/disposal	9.13E-01	kg/unit	9.36E-01	kg/unit
EQL	GHG emissions over the life	1.31E+03	kg/unit	2.98E+03	kg/unit
Total					
Life span		8		8	
Functional		1.0		1.0	
GHG efficiency		6.09E-03		2.68E-03	
GHG Factor X		2.3			

รูปที่ 2.3 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Factor X) ของโรงงานผลิตโทรทัศน์สีแห่งหนึ่งในประเทศไทย

Cembureau the European Cement (2006) ได้ศึกษาเรื่องค่า SEC ของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ พลังงานหลักที่ใช้สำหรับกระบวนการผลิตนั้นมี 2 ชนิด คือ พลังงานเชื้อเพลิงและพลังงานไฟฟ้า ต้นทุนพลังงานทั้ง 2 ที่ใช้ในกระบวนการผลิตคิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนพลังงานทั้งหมด โดยพลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ของกระบวนการผลิต คิดเป็นค่าใช้จ่ายในเรื่องพลังงาน 25 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพลังงานเชื้อเพลิงมีความต้องการเฉพาะในกระบวนการผลิตปูนเม็ดเท่านั้น ค่าการบริโภคพลังงานที่ได้ขึ้นขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นๆ ซึ่งในแต่ละกระบวนการย่อยนั้นหากเลือกใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยก็สามารถประหยัดพลังงานได้โดยค่าการใช้พลังงานในกระบวนการบดวัตถุดิบจะมีช่วงการใช้พลังงานอยู่ที่ 90-150 kWh/toncement โดยในกระบวนการบดไม่รวมการกระบวนการผลิตปูนเม็ดนั้นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการเลือกใช้เทคโนโลยีนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อการบริโภคพลังงาน งานวิจัยนี้ได้ทำงานเปรียบเทียบการใช้พลังงานของ Pre-heater แต่ละ stages ดังนี้

3 stages: 3400 to 3800 MJ/ton clinker

4 stages: 3200 to 3600 MJ/ton clinker

5 stages: 3100 to 3500 MJ/ton clinker

6 stages: 3000 to 3400 MJ/ton clinker

Ernst Worrell and Christina Galitsky (2004) เสนองานศึกษาและวิจัยเรื่อง Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making An Energy Star Guide for Energy and Plant Managers อุตสาหกรรมใน U.S. มีทิศทางในการบริโภคพลังงานที่สูงมาโดยตลอดค่าใช้จ่ายที่เป็นผลจากการบริโภคพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ผ่านมาก็สูงตามเช่นกัน จากการศึกษามาตรการการอนุรักษ์พลังงานที่ผ่านมาสามารถลดค่าใช้จ่ายในเรื่องพลังงานและการปล่อย CO₂ โดยจากการวิเคราะห์การใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซ CO₂ ของงานวิจัยที่ผ่านมานั้นสามารถวิเคราะห์ถึงสาเหตุได้ว่าในกระบวนการผลิตนั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างของเทคโนโลยีที่ใช้ ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาต่อในเรื่องการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เพิ่มเติมต่อจากงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้ทำการศึกษามาบ้างแล้วโดยยึดหลักการที่ว่า การบริโภคพลังงานและการปล่อยก๊าซ CO₂ เป็นผลจากเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน และจากการศึกษาได้นำเทคโนโลยีในแต่ละกระบวนการผลิตย่อยมาทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงาน โดยนำแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดมาร่วมในการวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานเพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ลดลงได้ และพบว่าในระหว่างปี 1970 และ 1999 พลังงานปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถลดลงได้ 1% จาก 7.3 MBtu/short ton ถึง 5.3 MBtu/short ton การปล่อยก๊าซ CO₂ จากการใช้เชื้อเพลิงและเฝ้าวัตถุดิบลดลง 16% จาก 609 lb C/ton (0.31 tC/tonne) ของซีเมนต์ ถึง 510 lb. C/ton cement (0.26 tC/tonne)

Mr. Shibani Ji Raina (2002) ศึกษาและวิจัยในเรื่อง ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT IN INDIAN CEMENT INDUSTRY กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศอินเดีย มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้นทุกๆ ปี ดังนั้นจึงได้มีการตรวจสอบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและพบว่าส่วนใหญ่มาจากด้านพลังงานจึงได้ทำการศึกษาวิจัย และตรวจสอบเกี่ยวกับเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต การบริโภคพลังงานเกิดขึ้นที่ไหนบ้าง และพบว่า การบริโภคพลังงานส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกระบวนการเผา เพราะใช้ทั้งพลังงานเชื้อเพลิง และพลังงานไฟฟ้า จึงได้จัดทำเกณฑ์มาตรฐานเพื่อใช้เทียบเคียงการบริโภคพลังงานในแต่ละระดับสำหรับแต่ละกระบวนการผลิตย่อย ดังนั้นทางโรงงานจึงมีการศึกษาเพื่อทำมาตรการที่จะประหยัดพลังงาน มีการจัดการ และพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อนำไปสู่เป้าหมายการลงทุน และจากการทำการศึกษาวิจัยพบว่าสามารถทำให้ค่าใช้จ่ายเรื่องพลังงานลดลง ส่งผลให้อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มีการพัฒนาและ

พยายามอย่างต่อเนื่องเพื่อที่จะลดการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอนเพิ่มขึ้นอีก โดยวิธีการเพิ่มจิตสำนึกในเรื่องการประหยัดพลังงาน และปฏิบัติให้เกิดการแพร่หลายในทุกๆ กระบวนการผลิต การควบคุมการผลิตทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การพัฒนาเรื่องพลังงาน ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น และสามารถนำไปปรับปรุงในเรื่องค่าใช้จ่ายอื่นๆ ของกระบวนการผลิต

เอกสิทธิ์ สุวรรณศรี (2543) ได้ศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงาน เพื่อดำเนินการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จากการศึกษาพบว่าการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด ทำให้ต้องดำเนินการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ให้ดีขึ้น โดยมีแนวทางการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานดังต่อไปนี้

1. การกำหนดนโยบายจากผู้บริหารระดับสูงและกำหนดเป้าหมายในการดำเนินงาน
2. กำหนดแผนงานหลักในการดำเนินงานการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานและแผนงานในระดับแรก
3. ปรับปรุงองค์กรดำเนินงานให้เข้าถึงทุกส่วนในกระบวนการผลิต
4. วางแผนการเดินเครื่องจักรในกระบวนการผลิตให้เหมาะสมโดยควบคุมปริมาณความต้องการไฟฟ้าสูงสุด
5. ปรับปรุงระบบการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงานโดยจัดทำเอกสารมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบและทำการจัดตั้งทีมงานในการตรวจสอบการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง
6. ปรับปรุงกระบวนการติดตามการปรับปรุงแก้ไขการดำเนินงานที่เกิดขึ้น

จากการดำเนินการปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จากการทำวิจัยครั้งนี้จะส่งผลให้กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามเป้าหมายที่กำหนดขึ้นในกระบวนการผลิต โดยทราบได้จากอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ และอัตราการใช้พลังงานความร้อนต่อปริมาณปูนเม็ด ที่มีค่าลดลงได้ตามมาตรฐานของผู้ผลิตได้ และอัตราการใช้พลังงานความร้อนต่อปริมาณปูนเม็ด ที่มีค่าลดลงได้ตามมาตรฐานของผู้ผลิตเครื่องจักร ซึ่งจากการดำเนินงานปรับปรุงดังกล่าวจะส่งผลให้ต้นทุนอัตราค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง 25.44% และอัตราค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อนต่อปริมาณปูนเม็ดลดลง 3.37% คิดเป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ 218.01 ล้านบาท

Ernst Worrell, Nathan Martin, Lynn Price Received (1999) ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในยุโรปทำการวิจัยศึกษาการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิต และการปล่อย CO₂ โดยศึกษาในเรื่องเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต ในแต่ละกระบวนการย่อย มีความแตกต่างกันในเรื่องเทคโนโลยี ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากเทคโนโลยีที่ใช้ในแต่ละกระบวนการทำให้ค่าพลังงานที่บริโภคมีความแตกต่างกัน อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ใน U.S. มีการบริโภคพลังงานที่ผ่านมามีเพิ่มขึ้น และในปัจจุบันมีการพัฒนาเพื่อจะลดการใช้พลังงานและปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง เมื่อได้ทำการศึกษาถึงสาเหตุและแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดที่สามารถนำมาใช้ และนำมาปฏิบัติสำหรับการบริโภคพลังงานและการปล่อย CO₂ แล้วสามารถสรุปได้ว่าแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดที่นำมาใช้ และนำมาปฏิบัตินั้นเป็นการการบริโภคพลังงานในกระบวนการผลิต และการปล่อย CO₂ ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีการใช้พลังงานลดลงได้ถึง 30% นั่นคือจาก 7.9 GJ /t ลงเหลือ 5.6 GJ/t การปล่อยก๊าซเรือนกระจกก็ลดลงจากการบริโภคเชื้อเพลิง 17 %

ในการลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงาน Blue Circle Caudon Environmental Report (1998) ใช้เศษยางรถยนต์แทนปริมาณถ่านหินบางส่วน ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลงแล้ว ยังสามารถลดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ลงได้อีกด้วย สำหรับการลดอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาในเตาสามารถทำได้โดยเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ เช่น Sharp และคณะ (1999) ใช้เบไลท์ (Ca₂SiO₄) แทนเฮไลท์ (Ca₃SiO₅) เนื่องจากซิลิกา 1 โมล ในเฮไลท์ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต 3 โมล แต่ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ในเบไลท์ 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต 2 โมล และปฏิกิริยาการเกิดปูนเม็ดของเบไลท์ ใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ 1200 °C ซึ่งน้อยกว่าการเกิดปฏิกิริยาของเฮไลท์ ที่ใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ 1450 °C ทำให้พลังงานที่ใช้ลดลง ส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการน้อยลงด้วย ซึ่งทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยลงเช่นกัน Raina และ Janakiraman (1998) ใช้แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) หรือยิปซัม (CaSO₄) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของปูนเม็ด และเป็นการลดอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาลงด้วย

วีระพงษ์ ประสาทศิลป์ (2541) จากวิทยานิพนธ์เรื่อง การประหยัดพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า กรณีศึกษา โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมพระนครใต้ ชุดที่ 1 สรุปว่า การใช้

พลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้พลังงานเชื้อเพลิงต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าให้น้อยลง ซึ่งพิจารณาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะเป็นส่วนสำคัญ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของกังหันก๊าซ คือ

- 1.ระดับความสูงที่ติดตั้งเครื่องจักร (Altitude)
- 2.ความดันไอเสีย (Exhaust Pressure)
- 3.การเสื่อมสภาพของกังหันก๊าซ (Gas Turbine Degradation)
- 4.ความดันอากาศขาเข้า (Inlet Pressure)
- 5.อุณหภูมิทางเข้าคอมเพรสเซอร์ (Air Inlet Temperature)
- 6.ความสะอาดของคอมเพรสเซอร์ (Cleanliness of Compressor)

การรักษาสมรรถนะของกังหันก๊าซโดยลงทุนน้อยที่สุดนั้นสามารถกำหนดได้โดยการรักษาความสะอาดของคอมเพรสเซอร์ และทำ PM (Preventive Maintenance) โดยตรวจสอบสภาพเครื่องจักรกังหันก๊าซ ตามระยะเวลา ประจำวัน ประจำสัปดาห์และประจำเดือน เพื่อทำการแก้ไขป้องกันก่อนเกิดความเสียหาย

Hiroshi (1996) ได้เสนอวิธีการลดฝุ่นโดยการเปลี่ยนกระบวนการให้เป็นระบบปิด และติดตั้งอุปกรณ์แยกฝุ่นจากก๊าซที่ปล่อยออกมา ปริมาณของฝุ่นซึ่งส่วนมากมาจากขั้นตอนการผสมวัตถุดิบ การเผา และการบดละเอียด สามารถลดได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์แยกฝุ่นที่เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นที่แขวนลอยในก๊าซ วิธีการนี้สามารถลดปริมาณฝุ่นในก๊าซที่ออกจากหม้อเผาจาก 0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในปี ค.ศ.1970 ลงมาเหลือ 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในปี ค.ศ. 1994 และ ธิดา ทศนราพันธ์ (2543) ได้พิจารณาการเปลี่ยนหม้อบดละเอียดจาก Ball Mill หรือ Tube Mill เป็น Roller Mill โดยพิจารณาผลกระทบเฉพาะกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อย่างเดียว พบว่าการใช้ Roller Mill จะเกิดฝุ่นมากขึ้น แต่ถ้าพิจารณาโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตพบว่าทั้งปริมาณฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าการใช้หม้อบดแบบ Ball Mill หรือ Tube Mill ส่วนการเปลี่ยนหม้อเผาจาก Long Dry Kiln มาเป็น Suspension Preheater Kiln หรือ Kiln with Dry Calcinator ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงเพียงเล็กน้อย แต่หม้อเผาทั้งสองชนิดเป็นหม้อเผาที่ใช้เชื้อเพลิง อย่างมีประสิทธิภาพจึงใช้เชื้อเพลิงในปริมาณน้อยกว่า ทำให้ผลกระทบจากต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีปริมาณลดลงมาก

บทที่ 3

ข้อมูลโรงงานและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้รับความร่วมมือจากกลุ่มธุรกิจปูนซีเมนต์และบริษัท สยามวิชัย และนวัตกรรม จำกัด

3.1 ที่ตั้งโรงงาน

โรงงานแก่งคอย ตั้งอยู่บนที่ราบเหนือระดับน้ำทะเล 26 เมตร ที่ตำบลบ้านป่า อำเภอกา่งคอย จังหวัดสระบุรี ห่างจากกรุงเทพฯไปทางตะวันออกเฉียงเหนือราว 127 กิโลเมตร ทางด้านเหนือและตะวันออกเฉียงของโรงงานเป็นแหล่งหินปูนที่ใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงาน ทางด้านตะวันตก ห่างไป 2 กิโลเมตร เป็นแม่น้ำป่าสัก

3.2 นโยบายสิ่งแวดล้อมของโรงงาน

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยป้องกันภาวะมลพิษภายใต้นโยบายปรับปรุงสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง

ปรัชญาของโรงงาน คือ การพัฒนาคุณภาพสิ่งแวดล้อมในโรงงานให้ได้มาตรฐานสิ่งแวดล้อมตามที่รัฐบาลกำหนด

การจัดการสิ่งแวดล้อมเป็นการควบคุมและลดภาวะมลพิษ เช่น มลพิษจากฝุ่น เสียง น้ำเสีย และขยะที่เกิดจากกระบวนการผลิต การขนส่ง วัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ ฯลฯ โดยมีวิธีการดังนี้

1. ควบคุมปริมาณฝุ่นในที่ทำงานและชุมชนโดยรอบให้อยู่ในมาตรฐานคุณภาพอากาศ
2. นำน้ำที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีกและบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง
3. ปรับปรุงสิ่งแวดล้อมทางเสียงในที่ทำงาน
4. นำขยะกลับมาใช้
5. ควบคุมการใช้พลังงาน (เชื้อเพลิงและไฟฟ้า)
6. ทำตามกฎหมายสิ่งแวดล้อมอย่างเคร่งครัด
7. ร่วมมือกับภาครัฐและองค์กรเอกชนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

โรงงานได้จัดทำเอกสารนโยบายสิ่งแวดล้อมของโรงงาน ซึ่งพนักงานทุกคนที่โรงงานแก่งคอยจะต้องปฏิบัติ นโยบายนี้เปิดเผยต่อสาธารณะ

3.3 กระบวนการผลิต

ในประเทศไทยใช้กระบวนการผลิตแบบแห้ง ในการผลิตปูนซีเมนต์มีกรรมวิธีเป็นขั้นๆ คือนำวัตถุดิบที่มีธาตุ อะลูมินาและธาตุซิลิกาซึ่งมีอยู่มากในดินดาน กับเหล็กซึ่งมีอยู่มากในดินลูกรัง มาผสมกันตามสัดส่วน บดให้ละเอียดและ นำไปเผาในหม้อเผา (Cement kiln) จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจับกันเป็นเม็ดเล็กที่เรียกว่า ปูนเม็ด (clinker)

ขั้นตอนกระบวนการผลิตที่สำคัญในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งได้ 5 ขั้นตอนหลักมีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทำเหมืองและการเตรียมวัตถุดิบ วัตถุดิบที่จำเป็นในการผลิตซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ วัตถุดิบที่มีแคลเซียมสูง (calcareous materials) เช่น หินปูน ซอล์ก เป็นต้น และวัตถุดิบที่มีซิลิกาสูง (argillaceous materials) เช่น ดินเหนียว เริ่มต้นจากการระเบิดเหมืองเพื่อนำเอาหินปูน (limestone) มา เป็นวัตถุดิบผสมกับวัตถุดิบอื่นได้แก่ ดินขาว ดินดานและดินลูกรัง ในสัดส่วนที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.1 ดินลูกรัง



รูปที่ 3.2 หินปูน



รูปที่ 3.3 หินดินดาน

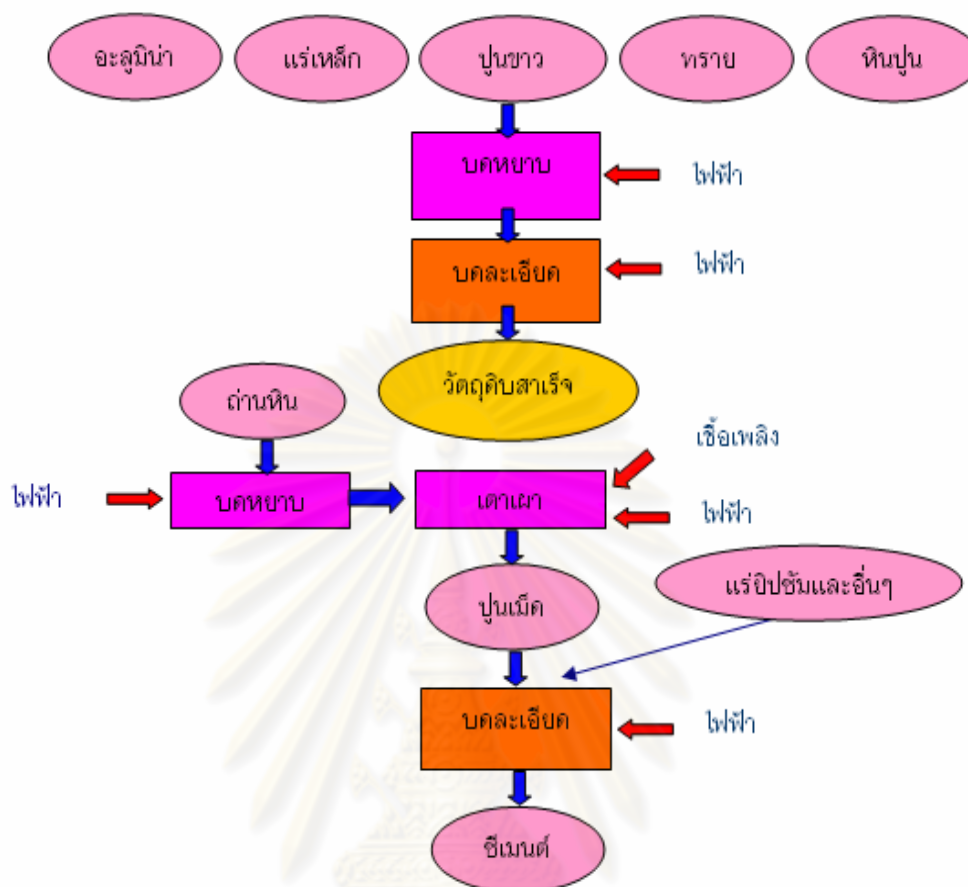
ขั้นตอนที่ 2 การบดวัตถุดิบ หินปูนที่ได้มาจากเหมืองจะถูกนำมาป้อนเข้าเครื่องบดหยาบ (Crusher) เพื่อทำการบดย่อย ขนาด โดยหินปูนที่บดแล้วและส่วนผสมอื่นๆถูกนำไปเก็บไว้ที่ถังเก็บวัตถุดิบเพื่อรอการนำไปบดผสมในสัดส่วนที่เหมาะสมจน ได้ออกมาเป็นวัตถุดิบสำเร็จ (Raw meal) แล้วจึงนำไปเก็บสะสมไว้ในไซโลเก็บวัตถุดิบสำเร็จ



รูปที่ 3.4 หม้อบดวัตถุดิบ



รูปที่ 3.5 ไซโลเก็บวัตถุดิบ



รูปที่ 3.6 กระบวนการผลิตปูนเม็ด

ขั้นตอนที่ 3 การผลิตปูนเม็ด ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะถูกนำเข้าไปเครื่องบดหยาบ (Crusher) บดละเอียด (Coal mill) อบแห้งด้วยอากาศร้อน (hot air) ซึ่งสร้างขึ้นจากเตาเผาถ่านหิน (Coal-fired furnace) จากนั้นจะถูกส่งไปยังเตาเผา (Kiln) และ calciner (การเผาให้เป็นผง) วัตุดิบสำเร็จจะถูกป้อนผ่านเครื่อง Pre-heater แบบ 5 stage ดังแสดงในรูปที่ 6 และ ผ่าน cyclone ซึ่งอยู่ส่วนบนสุดของเตาเผา ผงถ่านหินจะพ่นจากด้านหน้าเตาเผาใหม่ ถ่ายเทความร้อนให้วัตุดิบสำเร็จ ที่ไหลสวนทางจากด้านบนลงมาจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อไหลเข้าเตาฯ ได้รับความร้อนภายในเตาวัตุดิบสำเร็จจะ เปลี่ยนสภาพเป็นปูนเม็ดเมื่อเคลื่อนที่ถึงหน้าเตาฯ ปูนเม็ดมีอุณหภูมิสูง $1,200^{\circ}\text{C}$. จะถูกทำให้เย็นลงด้วยตัวลดอุณหภูมิ (Clinker Cooler) ซึ่งอากาศจากภายนอกไหลเข้าและถ่ายเทความร้อนจากปูนเม็ดกลายเป็นลมร้อนซึ่งบางส่วนจะนำกลับไปใช้ในการสันดาปในเตาเผาอีกครั้ง (เพื่อประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในการอุ่นอากาศ) ส่วนปูนเม็ดที่ถูกทำให้เย็นแล้วจะถูก นำไปเก็บในไซโลเพื่อรอการนำไปบดเป็นปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.7 หอดุ่น (Pre heater)



รูปที่ 3.8 หม้อเผา (Rotary kiln)



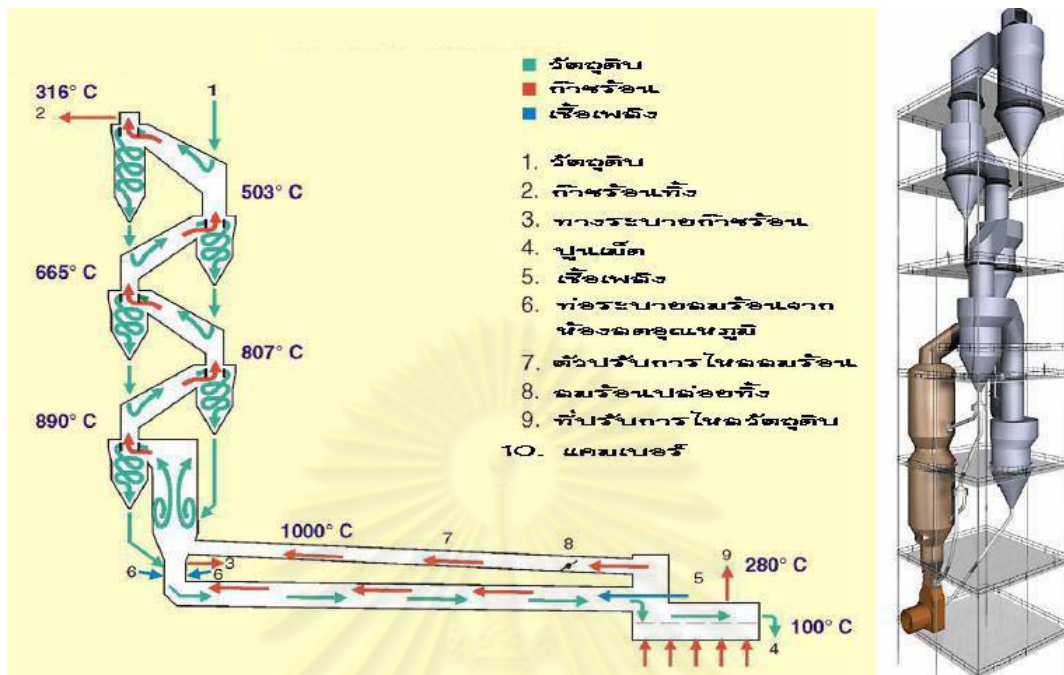
รูปที่ 3.9 หม้อลดอุณหภูมิปูนเม็ด



รูปที่ 3.10 ปูนเม็ด



รูปที่ 3.11 ไซโลปูนเม็ด



รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ผลิตปูนเม็ด

ขั้นตอนที่ 4 การบดปูนซีเมนต์ ปูนเม็ดที่เก็บไว้จะถูกป้อนเข้าเครื่องบด (Cement ball mill) เพื่อบดผสมกับยิปซัม ตามสัดส่วน จนกลายเป็นซีเมนต์ จากนั้นซีเมนต์ที่ได้จะถูกเก็บรวมไว้ใน bag filter แล้วนำไปไว้ใน Cement silo



รูปที่ 3.13 หม้อบดปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.14 ปูนซีเมนต์

ที่มา : เอกสารวิชาการปูนซีเมนต์และการประยุกต์การใช้งานของปูนซีเมนต์ไทย

ขั้นตอนที่ 5 การบรรจุและขนส่งปูนซีเมนต์ ลำเลียงปูนซีเมนต์เก็บไว้ในไซโล ผงปูนนี้ส่วนใหญ่จะสามารถร่อน ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 จากนั้นซีเมนต์ที่ได้จะถูกเก็บรวมไว้ในถังกอง แล้วนำไปไว้ในไซโลเก็บปูนซีเมนต์เพื่อ รอการนำไปบรรจุขาย

โดยโรงงานตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งหินปูนและหินดินดาน (หิน shale) ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้งในปัจจุบัน และมีเหมืองหินปูนและหินดินดานเป็นเหมืองของโรงงานเองซึ่งรายละเอียดโดยทั่วไปของโรงงานมีดังนี้

- เหมืองหินปูนเป็นเหมืองแบบ Semi Open Cut
- มีทั้งหมด 4 สายการผลิต กล่าวคือ มีทั้งหมด 4 หม้อเผา
- เป็นโรงงานที่ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานปรับปรุงคุณภาพของเสียรวม (ลำดับที่ 101) จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม จึงมีการรับของเสีย (waste) เข้ามากำจัดในโรงงานโดยใช้ทดแทนเชื้อเพลิงและวัตถุดิบ ดังนี้
 1. ของเสียที่นำมาทดแทนวัตถุดิบ ได้แก่ ผุ่นเหล็ก (iron powder) โดยนำมาทดแทนแร่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีทรายได้แบบจากโรงเหล็กมาทดแทนซิลิกา (จากทราย)
 2. ของเสียที่นำมาทดแทนเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว ยางรถยนต์และแกลบ โดยนำมาทดแทนเชื้อเพลิงที่หม้อเผาปูนในกระบวนการเผา
 3. ของเสียที่ไม่สามารถนำมาทดแทนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงได้ก็จะป้อนเข้าเตาเผาเพื่อกำจัด

- น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นน้ำหล่อเย็นสำหรับเครื่องจักร โดยมีการใช้ไฟฟ้าในการสูบน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิตและใช้สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

- ผลิตปูนเม็ด (Clinker) 2 ประเภท คือ Clinker Type I และ Clinker Type I/II ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบกันเล็กน้อยโดยที่ Clinker Type I จะนำไปผลิตปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเสือ และตราแสด ส่วน Clinker Type I/II จะนำไปผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I/II ดังรูปที่ 3.1

มีโรงงานผลิตถุงบรรจุปูนเพื่อใช้บรรจุปูนถุง (50 กก.) นอกจากนี้ยังรับจ้างทำถุงบรรจุปูนเพื่อจำหน่ายไปยังโรงงานในเครือข่าย และโรงงานอื่นอีกด้วย

3.4 ผลิตภัณฑ์

1) ปูนซีเมนต์ตราช้าง จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตาม มอก. 15-2514/2517 และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C150-71 Type I ซึ่งผลิตโดยการนำปูนเม็ด มาบดผสมกับยิปซัมเหมาะสำหรับใช้ทำโครงสร้างและงานคอนกรีตที่ต้องการแรงอัดสูง โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่ายมีทั้งจำหน่ายในรูปปูนซีเมนต์ผง และปูนซีเมนต์ผงบรรจุถุง (50 กิโลกรัม)

2) ปูนซีเมนต์ตราเสือ เหมาะสำหรับใช้เป็นปูนก่อ ปูนฉาบ และงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการแรงอัดมากนัก ผลิตโดยการนำปูนเม็ด มาบดผสมกับยิปซัมและหินปูนโดยที่ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่ายมีทั้งจำหน่ายในรูปปูนซีเมนต์ผง และปูนซีเมนต์ผงบรรจุถุง (50 กิโลกรัม)

3) ปูนซีเมนต์ตราแสด ผลิตโดยการนำปูนเม็ด มาบดผสมกับยิปซัมและหินปูนโดยที่มีอัตราส่วนผสมต่างไปจากปูนซีเมนต์ตราเสือ โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่ายจะมีจำหน่ายเฉพาะปูนซีเมนต์ผงบรรจุถุง (50 กิโลกรัม)

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I/II จัดเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีคุณลักษณะอยู่ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท II ผลิตโดยการนำปูนเม็ดมาบดผสมกับยิปซัม แต่ใช้ปูนเม็ดคนละประเภทกับปูนซีเมนต์ตราช้าง โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่จัดจำหน่ายจะมีจำหน่ายเฉพาะปูนซีเมนต์ผงเท่านั้น

- การบรรจุและจำหน่ายนั้นมีการจำหน่ายปูนทั้งแบบปูนซีเมนต์ผง (Bulk) และปูนซีเมนต์ถุง (50 กิโลกรัม) และขนส่งโดยรถบรรทุกปูนซีเมนต์ถุง รถเต้าบรรทุกปูนซีเมนต์ผง และรถไฟ ในส่วนของการจำหน่ายปูนซีเมนต์นั้น มีการจำหน่ายปูนภายในประเทศในรูปปูนซีเมนต์ผงตราช้าง ตราเสือ และปูนปอร์ตแลนด์ประเภท I/II และจำหน่ายในรูปปูนซีเมนต์ถุง ตราช้าง ตราเสือ และตราแสด นอกจากนี้ยังมีการจำหน่ายปูนไปยังต่างประเทศโดยจำหน่ายทั้งปูนซีเมนต์ผง ตราช้าง

และปูนปอร์ตแลนด์ประเภท I/II และในรูปปูนซีเมนต์ถุงตราช้างและตราเสือ ซึ่งปูนซีเมนต์บรรจุถุงส่งออกนั้นจะบรรจุใส่ถุงคนละชนิดกับถุงที่จำหน่ายในประเทศเพื่อความปลอดภัยและสะดวกในการขนส่ง

- มีการจำหน่ายปูนเม็ด ให้กับโรงงานปูนซีเมนต์อื่นและส่งออกไปยังต่างประเทศ

3.5 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) : สาเหตุหนึ่งของการเกิดฝนกรด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อการเผาไหม้สมบูรณ์และมีก๊าซออกซิเจนปริมาณมาก หรือการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมาก ๆ จึงกำหนดให้มีขั้นตอนการปฏิบัติงานสำหรับควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหมาะสม ขณะเดียวกันได้มีการปรับปรุงติดตั้งอุปกรณ์เพื่อลดออกไซด์ของไนโตรเจน อาทิ การติดตั้งระบบหัวเผาที่มีประสิทธิภาพสูง (Ultra Low NOX Burner) ที่สามารถลดการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนจากภาวะปกติได้กว่าร้อยละ 40

ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SOx) : ก๊าซที่ไม่มีสี แต่มีกลิ่น เป็นสาเหตุหลักของฝนกรด เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) อาทิ ถ่านหิน และน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากเชื้อเพลิงเหล่านี้มีสารประกอบของซัลเฟอร์ (Sulfur) ปะปนอยู่ด้วยเมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถัน จะได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) หรือออกไซด์ของซัลเฟอร์ (SO_x) จากการวิเคราะห์สาเหตุดังกล่าว หน่วยงานจัดหาของบริษัท จึงมีนโยบายการเลือกซื้อเชื้อเพลิงที่ต้องคำนึงถึงคุณภาพและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงด้วยรวมทั้งมีการนำเทคโนโลยีการจัดการออกไซด์ของซัลเฟอร์เข้ามาเพื่อกำจัดและบำบัดออกไซด์ของซัลเฟอร์ไปพร้อม ๆ กันเช่น การนำเทคโนโลยี Circulating Fluidized Bed (CFB) ที่ช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และมีการเติมปูนขาวเกิดปฏิกิริยาได้สารยิปซัม (Calcium Sulfate) สามารถลดออกไซด์ของซัลเฟอร์ในปีที่ผ่านมาลงไปได้ร้อยละ 12

ฝุ่น (Dust, Particulate) : กิจกรรมที่ก่อให้เกิดฝุ่นในกระบวนการผลิตนั้น เริ่มต้นตั้งแต่วัตถุดิบ การขนส่ง การเผาไหม้และการกองเก็บ บริษัทจึงได้นำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาใช้เพื่อการบำบัด โดยพิจารณาจากชนิดและประเภทของฝุ่นที่เกิดขึ้นในกิจกรรมต่าง ๆ เช่น

- การขนส่ง ฝุ่นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดจากฝุ่นที่ติดล้อรถบรรทุกขนส่งวัตถุดิบและสินค้า ดังนั้นบริษัท เอสซีจี โลจิสติกส์ แมเนจเม้นท์ จำกัด จึงกำหนดให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ล้างล้อรถบรรทุก โดยนำแนวคิดของอุปกรณ์ล้างรถอัตโนมัติ ทำการฉีดน้ำแบบพวยแรงดันสูงที่บริเวณบ่อล้างล้อ สามารถแก้ปัญหาฝุ่น ติดล้อรถบรรทุก

- ฝุ่น จากการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นฝุ่นที่มีความร้อนสูง ความชื้นต่ำ จะถูกนำไปผ่านอุปกรณ์ดักฝุ่นประเภทไซโคลน (Cyclone) เพื่อลดความร้อนและดักฝุ่นขนาดใหญ่ และผ่านเข้าถุงกรองฝุ่น (Bag Filter) นอกจากนี้ เอสซีจี ซีเมนต์ยังติดตั้งอุปกรณ์กำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic recipitation) เพื่อดักจับฝุ่นซีเมนต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นฝุ่นละเอียด โดยสามารถบำบัดฝุ่นที่ปล่อยออกจากปล่องได้ถึงร้อยละ 99.99 และสามารถนำฝุ่นจากการดักจับส่งกลับไปใช้ซ้ำเป็นวัตถุดิบอีกครั้งหนึ่ง ในปีที่ผ่านมา เอสซีจีสามารถลดฝุ่นจากปล่องลงได้กว่าร้อยละ 19

- ฝุ่นจากการกองเก็บ โดยเฉพาะการกองเก็บถ่านหินทางบริษัท ให้ความสำคัญกับการป้องกันปัญหาจากฝุ่นถ่านหินดังกล่าวที่สามารถส่งผลกระทบต่อชุมชนโดยรอบ จึงได้จัดให้มีมาตรการป้องกัน เช่น การรดน้ำบริเวณกองเก็บอย่างสม่ำเสมอในบริเวณกองที่มีการเปิด อยู่ในระหว่างดักหรือขนส่งการจัดผ้าใบคลุมอย่างมิดชิดและการทำตาข่ายกันลมติดตั้งในทิศทางที่เหมาะสม โดยมีการศึกษาถึงทิศทาง ความเร็วลมและลักษณะการตั้งบ้านเรือนของชุมชนโดยรอบ เพื่อกำหนดความยาว ความสูง และลักษณะของตาข่าย และการปลูกต้นไม้ล้อมรอบพื้นที่ เพื่อเป็นพื้นที่แนวกันชน(Buffer Zone) ดักกรองฝุ่นที่อาจเล็ดลอดออกไปอีกชั้นหนึ่ง และยังทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามอีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในอุตสาหกรรมซีเมนต์

4.1 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบ

ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจนั้นข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์เป็นข้อมูลของกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ 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
หินสบู	34,000

ที่มา: รายงานการพัฒนารายงานอย่างยั่งยืน ประจำปี 2551

ตารางที่ 4.1 : การใช้ทรัพยากรของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ (ตัน)

ยอดขายของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปี พ.ศ. 2551 คิดเป็นเงิน 49,999 ล้านบาท และจำนวนวัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมดคิดเป็น 28.475 ล้านตัน ดังนั้นจากสมการที่ 2 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตถุดิบเท่ากับ 0.00176 ล้านบาท/ตัน หรือ 1,760 บาท/ตัน

4.2 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านพลังงาน

การบริโภคพลังงานความร้อนของกลุ่มธุรกิจซีเมนต์ในปี พ.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 ได้ถูกรวบรวมและวนกลับไปสู่อุปกรณ์เพื่อลดอุณหภูมิ และนำกลับมาใช้ในการหล่อเย็นเครื่องจักรโดยไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งออกนอกโรงงาน (Zero Discharged, Close Circuit System) จึงไม่เกิดผลกระทบต่อคุณภาพแหล่งน้ำสาธารณะ

สำหรับการจัดการน้ำบนเหมืองหินปูนนั้น ได้มีการวางระบบวางระบบน้ำเพื่อรวบรวมและเก็บกักน้ำฝนลงในบ่อพักของโรงงาน และสูบกลับมาใช้ในการควบคุมฝุ่นที่เกิดจากการบดย่อย การจราจรขนส่งบนเหมือง และการปลูกต้นไม้ รดน้ำต้นไม้เพื่อฟื้นฟูเหมืองโดยไม่มีการปล่อยน้ำทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมเช่นกัน นอกจากนี้ยังได้มีการอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำโดย จัดให้มีการบำรุงรักษาท่อส่งน้ำ การรวบรวมน้ำฝนในบ่อน้ำของโรงงานและมีการส่งเสริมการปลูกป่า ฟื้นฟูผืนดินและสร้างฝายชะลอน้ำในพื้นที่ป่าอีกด้วย

4.4 ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านกากอุตสาหกรรม

ในปีพ.ศ. 2551 ของเสียจากกระบวนการผลิตจากโรงงานปูนซีเมนต์และโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จ รวมแล้วประมาณ 917 ตัน หากเป็นของเสียอันตราย เช่น น้ำมันใช้แล้ว ฝาเบื่อน้ำมัน และบรรจุภัณฑ์ที่ปนเปื้อน จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตหรือส่งคืนผู้ผลิต

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

ปริมาณของเสียซึ่งเป็นภาระของประเทศลงอีกด้วย ดังนั้นจากสมการที่ 9 ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านกากของเสียเท่ากับ 0.294 ล้านบาท/ตัน

4.5 การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นอาจมีมาตรการในการจัดการหลายแบบ เช่น การเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงจากการใช้ถ่านหินทั้งหมดมาเป็นการใช้พลังงานจากปิโตรเลียมโค้ก ยางรถยนต์เก่าๆที่หมดอายุการใช้งานแล้ว หรือเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ แกลบ ใบอ้อยและปึกไม้ยางพารา ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอเสนอการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยให้ผู้ที่เป็นผู้ตัดสินใจในการค้นหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อที่จะลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยที่สุดโดยคำตอบของระบบสมการนั้นจะทำให้รู้ว่าส่วนผสมในการผลิตปูนเม็ดต้องใช้อัตถุดิบและเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเป็นจำนวนอย่างละเท่าใด

4.5.1 กำหนดเป้าหมาย (Objective Function)

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

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

โดยที่

Z : ราคาค่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งหมด

C1 : ราคาหินปูน (บาท/กิโลกรัม)

C2 : ราคาดินเหนียว (บาท/กิโลกรัม)

C3 : ราคาทราย (บาท/กิโลกรัม)

C4 : ราคาแร่เหล็ก (บาท/กิโลกรัม)

C5 : ราคาถ่านหิน (บาท/กิโลกรัม)

C6 : ราคาปิโตรเลียมโค้ก (บาท/กิโลกรัม)

C7 : ราคายางรถยนต์เก่า (บาท/กิโลกรัม)

C8 : ราคาแกลบ (บาท/กิโลกรัม)

C9 : ราคาใบอ้อย (บาท/กิโลกรัม)

C10 : ราคาปึกไม้ยางพารา (บาท/กิโลกรัม)

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

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

เชื้อเพลิง	ถ่านหิน	เพ็ดโค้ก	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	ปึกไม้ ยางพารา
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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$28.2X_5 + 31.7X_6 + 29.5X_7 + 13.5X_8 + 15.4X_9 + 8.60X_{10} = 3.60 \quad (19)$$

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

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

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

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

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

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

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

สมการที่ 10 และ 11 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 64% - 71% สมการที่ 12 และ 13 แสดงถึง เปอร์เซ็นต์ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20% - 25% สมการที่ 14 และ 15 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์อลูมิเนียมไตรออกไซด์ (Al₂O₃) ที่มีอยู่ในเนื้อปูนเม็ด (clinker) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 4% - 7% สมการที่ 16 และ 17 แสดงถึงเปอร์เซ็นต์เฟอร์รัสไตรออกไซด์ (Fe₂O₃) 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
เพ็ดโค้ก	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)

ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบว่าควรรใช้วัตถุดิบในการผลิตคือ หินปูน 1.25 กิโลกรัม ดินเหนียว 0.13 กิโลกรัม ททราย 0.06 กิโลกรัม และใช้เชื้อเพลิงในการผลิตคือ ถ่านหิน 0.095 กิโลกรัม และไบออย 0.06 กิโลกรัม ต่อการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อใช้อัตราส่วนดังกล่าวแล้วจะทำให้ต้นทุนในการผลิตต่อ 1 กิโลกรัมมีค่าประมาณ 46 สตางค์ (0.46 บาท/กิโลกรัมปูนเม็ด) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในบทถัดไป

4.7 การคำนวณหาปริมาณก๊าซที่เกิดจากหม้อเผา

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

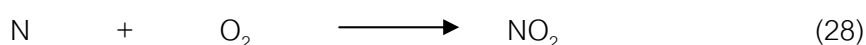
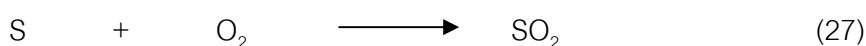
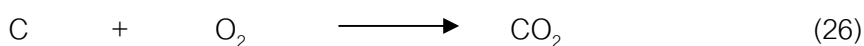
ในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม จะต้องใช้พลังงานเท่ากับ 3.6 MJ/kg clk และถ่านหินมี LHV เท่ากับ 28,200 kJ/kg ดังนั้นจะต้องใช้ถ่านหินเท่ากับ 0.128 กิโลกรัม หรือ 128 กรัม ดังนั้นเราสามารถหาส่วนประกอบของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

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



และจากจำนวนโมลมีค่าเท่ากับ น้ำหนักของสารในหน่วยกรัมหารด้วยน้ำหนักโมเลกุลของสารนั้นทำให้สามารถหาปริมาณก๊าซทั้ง 3 ชนิดที่เกิดจากการเผาไหม้ได้ ดังสมการ

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

ธาตุ	น้ำหนักโมเลกุล	ธาตุ	น้ำหนักโมเลกุล
C	12	CaCO ₃	100
O	16	MgO	40
S	32	MgCO ₃	84
N	14	H ₂ O	18
CO ₂	44	SO ₂	64
CaO	56	NO ₂	46

ตารางที่ 4.7 : ตารางแสดงธาตุ และน้ำหนักโมเลกุล

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 128 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{90.368}{12} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 331.349 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 128 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{1.703}{32} = \frac{g2}{64} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 3.328 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 128 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{1.572}{14} = \frac{g2}{46} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 5.046 กรัม

สมการเคมีของการเผาไหม้วัตถุดิบเพื่อให้แตกตัว คือ



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

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา CaCO_3 :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{650}{56} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา CaCO_3 เท่ากับ 511 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา MgCO_3 :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{30}{40} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผา MgCO_3 เท่ากับ 33 กรัม

ดังนั้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบ เท่ากับ 544 กรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.8 การคำนวณหาปริมาณก๊าซซึ่งเกิดจากหม้อเผาเมื่อได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาวัสดุที่นั้น เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาเผาได้เปลี่ยนแปลงกล่าวคือ ไม่สามารถหาวัสดุอื่นที่จะนำมาใช้แทนหินปูนในการผลิตปูนเม็ดได้ 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 และใช้ไบอ้อย 0.06 กิโลกรัม หรือ 60 กรัม โดยไบอ้อย LHV เท่ากับ 15,479 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 : องค์ประกอบของไบอ้อยโดยใช้ไบอ้อย 60 กรัม

(www.efe.or.th)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 95 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{67.07}{12} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 245.92 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 95 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{1.235}{32} = \frac{g2}{64} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 2.47 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 95 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{1.14}{14} = \frac{g2}{46} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 3.847 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากไบอ้อย 60 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{24.96}{12} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 91.52 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากไบอ้อย 60 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{0.012}{32} = \frac{g2}{64} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 0.024 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากไบอ้อย 60 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{0.102}{14} = \frac{g2}{46} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 0.335 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากไบอ้อยจะไม่นำมาคิดรวมเข้าไปด้วยเพราะถือว่าการ Neutral กล่าวคือ จะไม่นำปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดออกมาจากการใช้วัสดุชีวมวลทุกชนิดมาคิด ซึ่งในความจริงการเผาชีวมวลก็ยังคงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอยู่นั่นเองแต่ถือเสมือนหนึ่งว่าไม่มี สาเหตุที่มีวิธีคิดเช่นนี้เพราะ The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) ได้ให้เหตุผลไว้ว่า พืชในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่นั้นได้ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมาเพื่อทำการสังเคราะห์แสงในการเจริญเติบโตของพืชนั่นเอง ซึ่งก็คือการเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาทำให้อยู่ในรูปคาร์บอนและต่อมาเมื่อพืชนั้นตายลงกลายเป็นชีวมวลต่างๆ เช่น แกลบ ไบอ้อย ชังข้าวโพด ไม้ยางพารา ฯลฯ มนุษย์ได้นำชีวมวลนั้นมาเผาจึงเป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคยมีอยู่ในบรรยากาศนั้นออกมาเท่านั้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ถือได้ว่าปริมาณก๊าซที่ดูดซับเข้าไปกับปริมาณก๊าซที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าเท่ากัน จึงสามารถกล่าวได้ว่า ไม่ได้มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเพิ่มขึ้นแต่

ประการใด ซึ่งจะแตกต่างกับการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน เพ็ทโค๊ก ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ โดยถือว่าการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศโดยตรงไม่ถือว่าการ Neutral ดังเช่นการเผาเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นการใช้พลังงานชีวมวลทดแทนได้มากเท่าไรยิ่งเท่ากับลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงมีข้อจำกัดมากมายที่ทำให้ไม่สามารถใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้มาแทนเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลได้ทั้งหมด เช่น ค่าความร้อนต่ำ ทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นปริมาณมาก ค่าความชื้นสูง เนื่องจากไม่มีการ Treat ก่อนเข้าเตาเผาทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่มีพหุต่อความต้องการอย่างสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับฤดูกาลและอยู่ห่างไกลจากโรงงานทำให้มีค่าขนส่งสูง จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นเราสามารถสรุปปริมาณก๊าซต่างๆที่เกิดจากการเผาได้ดังต่อไปนี้

ชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้น	ใช้ถ่านหิน	ใช้ถ่านหิน	ใช้ชีวมวล	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

บทที่ 5 การวิเคราะห์และสรุปผล

5.1 ตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco Efficiency Factor)

ตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco Efficiency Factor) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ตัวใหม่หรือตัวที่ได้รับการปรับปรุงเทียบกับประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ตัวเก่าหรือตัวที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงในเทอมของมูลค่าของผลิตภัณฑ์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service}(\text{New-product} / \text{Old-product})}{\text{Environmental burden}(\text{New-product} / \text{Old-product})} \quad (32)$$

$$= \frac{\text{Service}(\text{New})}{\text{Service}(\text{Old})} \times \frac{\text{Environmental burden}(\text{Old})}{\text{Environmental burden}(\text{New})} \quad (33)$$

จะเห็นได้ว่าถ้าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ใหม่ลดลงเทียบกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์เดิมจะทำให้ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจมีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ แต่ในทางตรงกันข้ามหากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ใหม่ลดลงเทียบกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์เดิมจะทำให้ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการลดลงของประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

แต่อย่างไรก็ดี การกำหนดราคาของผลิตภัณฑ์หรือมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เป็นเรื่องกลยุทธ์ในทางการค้าของบริษัท ทำให้ไม่สามารถนำราคาขายของผลิตภัณฑ์ใหม่มาหารด้วยราคาขายของผลิตภัณฑ์เดิมได้ กล่าวคือ เกี่ยวกับมูลค่าหรือราคาไม่อาจจะใช้ข้อมูลโดยตรงได้ จึงต้องหาราคาต้นทุนที่สามารถลดลงได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคิดแทนราคา เนื่องจากการลดต้นทุนการผลิตได้ย่อมหมายถึงการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้นั่นเอง ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณราคาของต้นทุนการผลิตในส่วน of ค่าวัตถุดิบและค่าเชื้อเพลิง

วัตถุดิบ/ เชื้อเพลิง	ราคาต่อหน่วย (บาท/กิโลกรัม)	การผลิตเดิม (กิโลกรัม)	การผลิตใหม่ (กิโลกรัม)	ราคาเดิม (บาท)	ราคาใหม่ (บาท)
หินปูน	0.08	N/A	1.25	N/A	0.1
ดินเหนียว	0.15	N/A	0.13	N/A	0.02
ทราย	0.3	N/A	0.06	N/A	0.018
แร่เหล็ก	0.5	N/A	-	N/A	-
ถ่านหิน	3.1	0.128	0.95	0.397	0.295
แกลบ	1.1	-	-	-	-
ใบอ้อย	0.5	-	0.06	-	0.03
ต้นทุนการผลิต				0.535	0.463

ตารางที่ 5.1 : การประมาณต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตแบบเดิมเทียบกับแบบใหม่

เนื่องจากราคาวัตถุดิบและราคาเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตที่ดี ปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตที่ดี ทางบริษัทไม่อาจเปิดเผยข้อมูลได้เพราะเป็นกลยุทธ์ทางการค้าและเป็นทรัพย์สินทางปัญญาของบริษัท ดังนั้นในการประมาณราคาต้องอาศัยราคากลางที่มีอยู่ในท้องตลาดและต้องตั้งสมมุติฐานว่า

1. ต้นทุนที่ลดลงนั้นมาจากต้นทุนของเชื้อเพลิงเท่านั้นไม่ใช่มาจากต้นทุนค่าวัตถุดิบ
2. ราคาวัตถุดิบของการผลิตแบบเดิมก็ให้ถือเอาราคาวัตถุดิบของการผลิตแบบใหม่เป็นราคาที่ใช้แทนกันได้ และจากการสอบถามทางผู้ผลิตพบว่าราคาวัตถุดิบที่ประมาณได้ 0.138 บาท/กิโลกรัม ปูนเม้นต์นั้น ไม่แตกต่างจากราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจริงมากนัก ดังนั้นต้นทุนการผลิตแบบเดิมจึงมีค่าเท่ากับ $0.397 + 0.138 = 0.535$ บาท/กิโลกรัมปูนเม้นต์

$$\begin{aligned} \text{จะเห็นได้ว่าถ้าใช้ใบอ้อยจะทำให้ราคาลดลง} &= \frac{0.535 - 0.463}{0.535} \times 100\% \\ &= 13.5\% \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องถือว่าการทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้เทียบได้กับการทำให้สินค้ามีคุณค่าเพิ่มขึ้นได้ 13.5% และจากสมการที่ 33 ในพจน์แรกจะได้

$$\frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} = \frac{1.135}{1}$$

5.2 ตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Eco Efficiency Factor) เมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณก๊าซต่างๆที่เกิดจากเผาเชื้อเพลิงได้ดังตารางต่อไปนี้

ชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้น	ใช้ถ่านหิน 128 กรัม	ใช้ถ่านหิน 95 กรัม	ใช้ชีวมวล 60 กรัม	รวมใช้ถ่านหิน และชีวมวล	ผลต่างของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น ระหว่างถ่านหินอย่างเดียวกับ การใช้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล
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 5.2 : ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆกัน (กรัม)

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาวัสดุดิบไม่ว่าจะเป็นกรณีใช้หรือไม่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 544 กรัม ดังนั้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ถ่านหินอย่างเดียวรวมกับที่เกิดจากการเผาวัสดุดิบจึงรวมกันได้เท่ากับ 875.35 กรัม และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ถ่านหินร่วมกับเชื้อเพลิงชีวมวลรวมกับที่เกิดจากการเผาวัสดุดิบจึงรวมกันได้เท่ากับ 789.92 กรัม

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}}$$

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{1.135}{1} \times \frac{875.35}{789.92}$$

$$= 1.257$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่
ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผามีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ
ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{1.135}{1} \times \frac{3.328}{2.494} \\ &= 1.514 \end{aligned}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่
ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผามีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{1.135}{1} \times \frac{5.046}{3.847} \\ &= 1.488 \end{aligned}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่
ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผามีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตุดิบ

ในการประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้านวัตุดิบนั้นจากการสอบถามข้อมูลของ
บริษัทผู้ผลิตปูนซีเมนต์พบว่าใช้ ปริมาณวัตุดิบทั้งหมด 1.56 กิโลกรัมในการผลิต ปูนเม็ด 1

กิโลกรัม แต่ทางบริษัทไม่สามารถให้ข้อมูลได้ว่าใน 1.56 กิโลกรัมนั้นประกอบไปด้วยวัสดุชนิด ใดเท่าใดเนื่องจากเป็นความลับของทางบริษัทผู้วิจัยไม่อาจก้าวล่วงได้ ส่วนปริมาณวัสดุจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์คือ ใช้หินปูน 1.25 กิโลกรัม ดินเหนียว 0.13 กิโลกรัม ททราย 0.06 กิโลกรัม รวมใช้วัสดุทั้งสิ้น 1.44 กิโลกรัม ในการผลิต ปูนเม็ด 1 กิโลกรัม

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{1.135}{1} \times \frac{1.56}{1.44} \\ &= 1.229 \end{aligned}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ปัจจัยที่พิจารณา	ผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม (เดิม)	ผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม (ใหม่)	Eco – Efficiency Factor
ด้าน CO ₂	875.35	789.92	1.257
ด้าน SO ₂	3.328	2.494	1.514
ด้าน NO ₂	5.046	3.847	1.488
ด้านวัสดุ	1.56	1.44	1.229

ตารางที่ 5.3 : สรุปค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านต่างๆ เมื่อใช้ใบอ้อย

5.3 ค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของแต่ละผลิตภัณฑ์

ในการที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ขึ้นมา 1 ชนิด จะมีการบริโภคทรัพยากรหลายชนิดด้วยกันและ อาจมีการปลดปล่อยของเสียหรือมีการปลดปล่อยก๊าซ สารเคมีต่างๆ ออกมาสู่สิ่งแวดล้อม สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถทำได้โดยนำค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศ

เศรษฐกิจในแต่ละปัจจัยมาทำการเฉลี่ยกันโดยวิธีรากที่สองของกำลังสอง (Root mean square – RMS) โดยที่

$$\text{RMS of Eco Efficiency} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{EEF}_i^2}{n}} \quad (34)$$

แทนค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของแต่ละปัจจัยจะได้

$$\begin{aligned} \text{RMS of Eco Efficiency} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 \text{EEF}_i^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{(1.257)^2 + (1.514)^2 + (1.488)^2 + (1.229)^2}{4}} \\ &= 1.378 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์ทั่วไป คือ 1.378 ซึ่งในทางปฏิบัติโรงงานจะมีผลิตภัณฑ์หลายชนิดอยู่แล้ว เช่น คอนกรีตธรรมดา คอนกรีตทนแรงอัดสูง คอนกรีตทนทานซัลเฟตสูง คอนกรีตทนทานน้ำเค็ม ดินเค็ม คอนกรีตที่ใช้ในงานชุดเจาะน้ำมัน ซีเมนต์ขาวตราช้างเผือก ฯลฯ ก็สามารถนำหลักการนี้ไปหาค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดของบริษัทได้

แม้ว่าจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเห็นได้ว่าการใช้ไบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในลำดับที่ 1 แต่เนื่องจากไบอ้อยนั้นมีค่า LHV สูงและมีราคาต่อหน่วยต่ำเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงทางเลือกในลำดับที่ 2 (แกลบ) แต่ในความเป็นจริงไบอ้อยไม่สามารถนำมาใช้ได้ตลอดไปเพราะว่าไบอ้อยนั้นมีฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่ค่อนข้างจำกัด กล่าวคือไม่สามารถนำมาใช้ได้ตลอดทั้งปี ดังนั้นจึงต้องนำแกลบซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในลำดับที่ 2 เข้ามาพิจารณาด้วยซึ่งแกลบนั้นก็มีฤดูกาลเก็บเกี่ยวเช่นกันแต่เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวล 2 ชนิดนี้มาใช้แล้วจะทำให้สามารถมีเชื้อเพลิงชีวมวลใช้ได้ตลอดทั้งปี โดยในการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกนั้นจะใช้ได้แต่เฉพาะเชื้อเพลิงทางเลือก 1 ชนิดเท่านั้น ไม่สามารถนำเชื้อเพลิงทางเลือก 2 ชนิดไปพร้อมๆกันได้ เช่น ใช้เชื้อเพลิงหลักเป็นถ่านหินประกอบกับใช้เชื้อเพลิงชีวมวลไบอ้อยหรือแกลบอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น จะใช้ถ่านหินประกอบไบอ้อยประกอบแกลบ เช่นนี้ไม่ได้ เพราะไบอ้อยกับแกลบนั้นมีค่า LHV ต่างกันทำ

ให้การควบคุมอุณหภูมิในเตาทำได้ยากขึ้นไปอีก ซึ่งตามปกติแล้วควรใช้เชื้อเพลิงเพียงชนิดเดียวในการเผาเท่านั้น การที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินประกอบไบอ้อยหรือแกลบอย่างใดอย่างหนึ่งก็ทำได้ยากอยู่แล้วและอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปูนเม็ดที่ออกมาได้

ดังนั้นประเด็นที่จะต้องนำมาพิจารณาต่อไปมีว่า ในกรณีที่ใช้ไบอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกในลำดับที่ 1 หมดแล้วจึงนำแกลบเข้ามาใช้แทนไบอ้อยต่อไปนั้น แกลบให้ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจเป็นอย่างไร ค่าประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของแต่ละผลิตภัณฑ์เป็นอย่างไรและเมื่อใดไม่ควรจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอีกต่อไปแล้วโดยการทำการวิเคราะห์ความไว

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเดิมใช้ไบอ้อย 60 กรัม เป็นการลดการใช้ปริมาณถ่านหินจาก 128 กรัมเหลือ 95 กรัม ต่อการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม แต่เมื่อไบอ้อยซึ่งเป็นเชื้อเพลิงลำดับที่ 1 ถูกใช้ไปหมดแล้ว ดังนั้นจึงต้องทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดยังคงเหมือนเดิมทุกประการ เพียงแต่ตัดส่วนของไบอ้อยออกไปไม่ต้องนำมาพิจารณาอีกซึ่งจะได้ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ดังต่อไปนี้

ส่วนประกอบ	สัญลักษณ์	ผลที่ได้ (kg/kg clk)
หินปูน	X1	1.250
ดินเหนียว	X2	0.130
ทราย	X3	0.060
เหล็ก	X4	0.000
ถ่านหิน	X5	0.105
เพ็ทโค๊ก	X6	0.000
ยางรถยนต์	X7	0.000
แกลบ	X8	0.046
ไม้ยางพารา	X10	0.000

Clk = Clinker

ตารางที่ 5.4 : ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อไม่พิจารณาไบอ้อย

ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อไม่พิจารณาใบย่อยทำให้ทราบว่าควรใช้วัตถุดิบในการผลิตคือ หินปูน 1.25 กิโลกรัม ดินเหนียว 0.13 กิโลกรัม ทราาย 0.06 กิโลกรัม และใช้เชื้อเพลิงในการผลิตคือ ถ่านหิน 0.1055 กิโลกรัม และแกลบ 0.0462 กิโลกรัม ต่อการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อใช้อัตราส่วนดังกล่าวแล้วจะทำให้ต้นทุนในการผลิตต่อ 1 กิโลกรัมมีค่าประมาณ 52 สตางค์ (0.52บาท/กิโลกรัมปูนเม็ด)

เราสามารถหาส่วนประกอบของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงได้ดังต่อไปนี้

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละ	กรัม
C	70.6	74.483
H	4.3	4.536
N	1.2	1.266
O	11.8	12.449
S	1.3	1.372

ตารางที่ 5.5 : องค์ประกอบของถ่านหินโดยใช้ถ่านหิน 105.5 กรัม
(Carpio 2008 และ U.Kaantee 2003)

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละ	กรัม
C	37.48	17.327
H	4.41	2.038
N	0.17	0.078
O	33.27	15.380
S	0.04	0.018

ตารางที่ 5.6 : องค์ประกอบของแกลบโดยใช้แกลบ 46.23 กรัม

(www.effe.or.th)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 105.5 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{74.48}{12} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 273.09 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 105.5 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{1.372}{32} = \frac{g2}{64} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 2.744 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากถ่านหิน 105.5 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{1.266}{14} = \frac{g2}{46} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 4.159 กรัม

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากแกลบ 46.23 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{17.327}{12} = \frac{g2}{44} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 63.53 กรัม

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากแกลบ 46.23 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{0.018}{32} = \frac{g2}{64} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 0.036 กรัม

ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดจากแกลบ 46.23 กรัม :

$$\begin{aligned} \text{จากจำนวนโมล} &= \frac{g1}{M1} = \frac{g2}{M2} \\ &= \frac{0.078}{14} = \frac{g2}{46} \end{aligned}$$

จะได้ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกมาเท่ากับ 0.256 กรัม

จากการใช้แกลบทำให้สามารถเปรียบเทียบปริมาณก๊าซต่างๆ ที่เกิดจากเผาเชื้อเพลิงได้ดังตารางต่อไปนี้

ชนิดของก๊าซที่เกิดขึ้น	ใช้ถ่านหิน	ใช้ถ่านหิน	ใช้แกลบ	รวมใช้ถ่านหินและแกลบ	ผลต่างของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างถ่านหินอย่างเดียวกับการใช้ถ่านหินร่วมกับชีวมวล
CO ₂	331.349	273.09	Neutral	273.09	58.259
SO ₂	3.328	2.744	0.036	2.780	0.584
NO ₂	5.046	4.159	0.256	4.415	0.631

ตารางที่ 5.7 : ปริมาณก๊าซที่เกิดจากการเผาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆกัน (กรัม)

แต่อย่างไรก็ดี การกำหนดราคาของผลิตภัณฑ์หรือมูลค่าของผลิตภัณฑ์ เป็นเรื่องกลยุทธ์ในทางการค้าของบริษัท ทำให้ไม่สามารถนำราคาขายของผลิตภัณฑ์ใหม่มาหารด้วยราคาขายของผลิตภัณฑ์เดิมได้ กล่าวคือ เกี่ยวกับมูลค่าหรือราคาไม่อาจจะใช้ข้อมูลโดยตรงได้ จึงต้องหาจากราคาต้นทุนที่สามารถลดลงได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคิดแทนราคา เนื่องจากการลดต้นทุนการผลิตได้ย่อมหมายถึงการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้นั่นเอง ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณราคาของต้นทุนการผลิตในส่วนของค่าวัตถุดิบและค่าเชื้อเพลิง

วัตถุดิบ/ เชื้อเพลิง	ราคาต่อหน่วย (บาท/กิโลกรัม)	การผลิตเดิม (กิโลกรัม)	การผลิตใหม่ (กิโลกรัม)	ราคาเดิม (บาท)	ราคาใหม่ (บาท)
หินปูน	0.08	N/A	1.25	N/A	0.1
ดินเหนียว	0.15	N/A	0.13	N/A	0.02
ทราย	0.3	N/A	0.06	N/A	0.018
แร่เหล็ก	0.5	N/A	-	N/A	-
ถ่านหิน	3.1	0.128	0.1055	0.397	0.327
แกลบ	1.1	-	0.0462	-	0.05
ไบอ้อย	0.5	-	-	-	-
ต้นทุนการผลิต				0.535	0.515

ตารางที่ 5.8 : การประมาณต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตแบบเดิมเทียบกับแบบใหม่

$$\begin{aligned} \text{จะเห็นได้ว่าถ้าใช้แกลบจะทำให้ราคาลดลง} &= \frac{0.535 - 0.515}{0.535} \times 100\% \\ &= 3.74\% \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องถือว่าการทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงได้เทียบได้กับการทำให้สินค้ามีคุณค่าเพิ่มขึ้นได้ 3.74% และจากสมการที่ 33 ในพจน์แรกจะได้

$$\frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} = \frac{1.037}{1}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาวัตถุดิบไม่ว่าจะเป็นกรณีใช้หรือไม่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 544 กรัม ดังนั้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ถ่านหินอย่างเดียวรวมกับที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบจึงรวมกันได้เท่ากับ 875.35 กรัม และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ถ่านหินร่วมกับแกลบรวมกับที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบจึงรวมกันได้เท่ากับ 817.09 กรัม

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}}$$

$$\begin{aligned} \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{1.037}{1} \times \frac{875.35}{817.09} \\ &= 1.111 \end{aligned}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผามีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่จำเป็นการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลแกลบหรือไบโอดีเซลนั้นก็ไม่ได้ทำให้ Eco Efficiency Factor ของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

$$\begin{aligned} \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}} \\ \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{1.037}{1} \times \frac{3.328}{2.780} \\ &= 1.241 \end{aligned}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผามีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

$$\begin{aligned} \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}} \\ \text{Eco Efficiency Factor} &= \frac{1.037}{1} \times \frac{5.046}{4.415} \\ &= 1.185 \end{aligned}$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่
ถูกปลดปล่อยจากกระบวนการเผามีค่ามากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบ

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{\text{Service(New)}}{\text{Service(Old)}} \times \frac{\text{Environmental burden(Old)}}{\text{Environmental burden(New)}}$$

$$\text{Eco Efficiency Factor} = \frac{1.037}{1} \times \frac{1.56}{1.44}$$

$$= 1.123$$

ค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีค่า
มากกว่า 1 คือมีการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะเป็นการใช้เชื้อเพลิง
ชีวมวลแกลบหรือไบโอดีเซลนั้นก็ไม่ได้ทำให้ Eco Efficiency Factor ของวัตถุดิบเปลี่ยนแปลงไป

ปัจจัยที่พิจารณา	ผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม (เดิม)	ผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อม (ใหม่)	Eco – Efficiency Factor
ด้าน CO ₂	875.35	817.09	1.111
ด้าน SO ₂	3.328	2.780	1.241
ด้าน NO ₂	5.046	4.415	1.185
ด้านวัตถุดิบ	1.56	1.44	1.123

ตารางที่ 5.9 : สรุปค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจในด้านต่างๆ เมื่อใช้แกลบ

แทนค่าตัวประกอบประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของแต่ละปัจจัยจะได้

$$\begin{aligned} \text{RMS of Eco Efficiency} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 EEF_i^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{(1.111)^2 + (1.241)^2 + (1.185)^2 + (1.123)^2}{4}} \\ &= 1.166 \end{aligned}$$

5.4 ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย

ในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกเสริมกับพลังงานหลักที่มาจากถ่านหินนั้น เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกันซึ่งจะต้องดูจากปฏิทินชีวมวลจึงจะทำให้ทราบได้ว่าในเดือนใด มีชีวมวลประเภทใดบ้างที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกได้ อีกทั้งเพื่อให้มีการจัดซื้อมาสำรองไว้เป็นพัสดุดังกล่าวได้อีกด้วย

จากการสำรวจปฏิทินชีวมวลพบว่า ในภาคกลางนั้น เชื้อเพลิงชนิดแกลบจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมของทุกๆปี และอีกช่วงหนึ่งก็คือเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคมของทุกๆปี รวมมีแกลบใช้ได้ประมาณ 7-8 เดือนต่อปี ส่วนเชื้อเพลิงชนิดใบอ้อยจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในเดือนธันวาคมถึงเดือนเมษายนของทุกๆปี รวมมีใบอ้อยใช้ได้ประมาณ 4-5 เดือนต่อปี ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพภูมิอากาศด้วย ส่วนในเดือนสิงหาคมและกันยายนนั้นไม่มีเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิดนี้เลย แต่จะเห็นได้ว่าในเดือนมีนาคมและเมษายนนั้นมีเชื้อเพลิงได้ทั้ง 2 ชนิด จึงต้องมีการสำรวจเชื้อเพลิงในเดือนมีนาคมและเมษายนไว้ใช้ในเดือนสิงหาคมและกันยายนด้วย

เชื้อเพลิง	ระยะเวลา (เดือน)											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
แกลบ												
ใบอ้อย												

ตารางที่ 5.10 : ปฏิทินชีวมวลในภาคกลาง (www.efe.or.th)

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใบ และทะลายปาล์ม เป็นต้น

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ ชีวมวลนับรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ ปลายไม้จากอุตสาหกรรมไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร และของเสียจากชุมชน

ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ตารางข้างล่างแสดงรายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา

	2549/50		2550/51	
ชนิด	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต
อ้อย	6,314	64,365	6,588	73,501
ข้าว	67,610	29,640	66,950	29,900
ข้าวฟ่าง	208	57	205	55
ข้าวโพด	5,969	3,602	6,517	4,249
น้ำมันปาล์ม	2,663	6,613	2,873	9,264
มันสำปะหลัง	7,338	26,915	7,397	25,155
สับปะรด	597	2,305	581	2,278
ไม้ยางพารา	10,939	5,700	11,371	3,166

ตารางที่ 5.11 : รายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตพืชหลัก และไม้ยางพารา (www.dede.go.th)

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร 2551 (หน่วย: พันไร่ / พันตัน)

สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล ตารางข้างล่างแสดงศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยปี 2551

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ค่าเปลี่ยนเป็นชีวมวล	ปริมาณชีวมวลที่ได้ (ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	พลังงาน (GJ)	เทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe)	กำลังไฟฟ้า (MW)
ถั่ว	73,501,000	ขนถั่ว	0.30	22,050,300	16.21	357,435,363	8,461	97.2
		ยอดและใบ	0.24	17,640,240	16.42	289,652,741	6,857	79
ข้าว	29,900,000	แกลบ	0.23	6,877,000	15.56	107,006,120	2,533	2.5
		ฟางข้าว	1.19	35,581,000	15.51	551,810,992	13,064	152.3
ข้าวโพด	4,249,000	ซัง	0.19	807,310	16.63	13,425,565	318	3.7
น้ำมันปาล์ม	9,264,000	ทะลายน้ําดำ	0.23	2,130,720	19.41	37,221,547	881	10.2
		กากใบ	0.15	1,389,600	19.94	27,708,624	656	7.5
		กะลา	0.06	555,840	21.13	11,744,899	278	3.1
		ทางใบ/ ก้าน	0.27	2,501,280	17.87	44,697,873	1,058	0.5
มันสำปะหลัง	25,155,000	ลำต้น	0.12	301,860	13.38	4,038,887	96	1
		เหง้า	0.10	251,550	10.61	2,668,945	63	0.6
ยางพารา	3,166,000	ซีลี้อย	0.03	940,980	16.65	1,581,417	37	0.3
		เศษไม้	0.10	316,600	16.85	5,334,710	126	1.3
ยูคาอิมปัส	6,800,000	ไม้คั้น	0.20	1,360,000	16.85	22,916,000	542	6.2
		เปลือกไม้	0.10	680,000	17.30	11,764,000	278	3.1
ไม้จากสวนป่า	6,000,000	เศษไม้	0.10	600,000	16.85	10,110,000	239	2.6
รวม	158,035,000			98,118,970		1,499,168,000	35,488	363.4

ตารางที่ 5.12 : ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศไทยปี 2551 (www.dede.go.th)

จากศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศไทยดังกล่าวทำให้ทราบว่า ชีวมวลประเภทแกลบนั้นมีอยู่ด้วยกันทั้งหมดประมาณ 6.87 ล้านตัน ซึ่งแกลบมีค่า LHV เท่ากับ 13,517 kJ/kg คิดเป็นพลังงานทั้งหมดจากชีวมวลแกลบมีค่าประมาณ 92.8×10^{15} จูล (92.8 เพตตะจูล) ส่วนชีวมวลประเภทใบอ้อยนั้นมีอยู่ด้วยกันทั้งหมดประมาณ 17.64 ล้านตัน ซึ่งใบอ้อยมีค่า LHV เท่ากับ 15,479 kJ/kg คิดเป็นพลังงานทั้งหมดจากชีวมวลใบอ้อยมีค่าประมาณ 273.05×10^{15} จูล

ส่วนกำลังการผลิตปูนทั้งหมดประมาณ 56 ล้านตัน/ปี โดยที่การผลิตปูน 1 ตันนั้นต้องใช้พลังงาน 3.6 GJ (กิกะจูล) คิดเป็นพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตปูนเท่ากับ 201.6×10^{15} จูล แต่เนื่องจากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบว่าสามารถนำชีวมวลทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ประมาณ 25% ของพลังงานที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นพลังงานที่มาจากชีวมวลทั้งหมดในการผลิตปูนจึงมีค่าเท่ากับ 51.53×10^{15} จูล ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าไม่ว่าจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทใดก็ตาม ประเทศไทยยังคงมีศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลที่เพียงพอต่อความต้องการในการผลิตปูนอยู่นั่นเอง

แต่ในความเป็นจริงศักยภาพของชีวมวลดังกล่าวเป็นศักยภาพโดยรวมทั้งประเทศจึงไม่อาจจะนำมาใช้ในจังหวัดใดจังหวัดหนึ่งได้ อีกทั้งทางบริษัทปูนหลายๆ แห่งก็ได้มีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลบางส่วนในการผลิต รวมทั้งมีการตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล

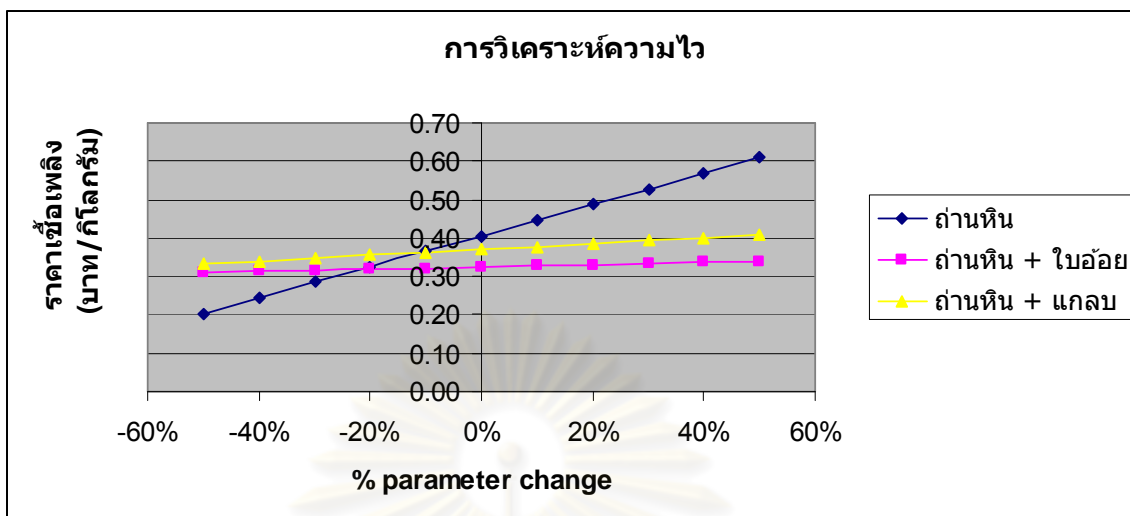
เพิ่มขึ้นมากมายหลายแห่งด้วยกัน ส่วนทางเจ้าของโรงสีเองก็อาจจะไม่ยอมขายเชื้อเพลิงชนิดนี้แล้วเพราะเหตุว่าเจ้าของโรงสีต้องการจะผลิตไฟฟ้าและขนานระบบเข้ากับระบบผลิตของการไฟฟ้าเสียเอง ซึ่งจะทำให้เจ้าของโรงสีได้รับกำไรจากการขนานระบบมากกว่าขายเชื้อเพลิงชีวมวลเองโดยตรง จึงทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลที่เคยเพียงพอต่อการผลิตปูนทั้งหมดกลับกลายเป็นไม่เพียงพอต่อความต้องการผลิตปูนทั้งหมดเสียแล้ว ดังนั้นเมื่อความต้องการมากกว่าปริมาณที่มีอยู่ยอมทำให้ราคาชีวมวลมีแต่จะเพิ่มขึ้น จึงมีปัญหาค่าที่ต้องนำมาพิจารณาว่า เมื่อราคาชีวมวลขยับขึ้นไปเป็นเท่าใด จึงควรหันกลับมาใช้ถ่านหินทั้งหมดตามเดิม

5.5 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

ในการวิเคราะห์ความไวนั้น จะพิจารณาจากราคาชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงไปเท่าไรนั้น กล่าวคือจะกำหนดให้ปริมาณที่ต้องใช้ชีวมวลยังคงเท่าเดิมอยู่ คือใช้ใบอ้อย 60 กรัม เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม หรือใช้แกลบ 46.23 กรัม เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนเม็ด 1 กิโลกรัม แล้วค่อยๆทำการเปลี่ยนแปลงราคาชีวมวลเพิ่มขึ้นทีละ 10 % จนกระทั่งทราบว่า เมื่อใดราคาชีวมวลรวมกับราคาถ่านหิน (95 กรัม) มากกว่าราคาของถ่านหินแต่เพียงชนิดเดียว (128 กรัม) ซึ่งราคาถ่านหิน 128 กรัม จะตกประมาณ 0.4 บาทหรือ 40 สตางค์ เมื่อนั้นควรจะเลิกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้แล้ว

% change	ถ่านหิน	ใบอ้อย	แกลบ
50%	4.65	0.75	1.65
40%	4.34	0.7	1.54
30%	4.03	0.65	1.43
20%	3.72	0.6	1.32
10%	3.41	0.55	1.21
0%	3.1	0.5	1.1
-10%	2.79	0.45	0.99
-20%	2.48	0.4	0.88
-30%	2.17	0.35	0.77
-40%	1.86	0.3	0.66
-50%	1.55	0.25	0.55

ตารางที่ 5.13 : ราคาชีวมวลชนิดต่างๆเมื่อทำการเพิ่ม/ลดราคา คราวละ 10%(บาท/กิโลกรัม)

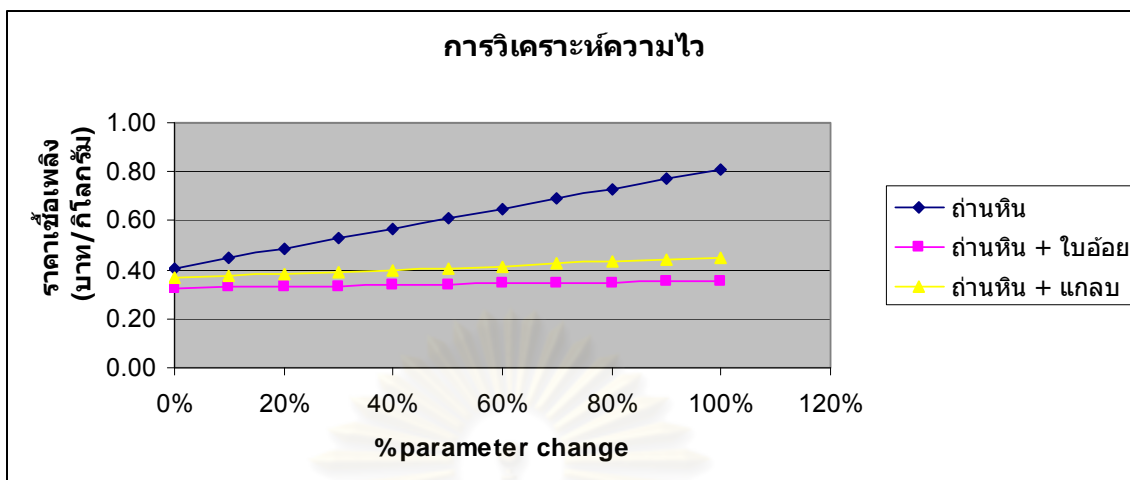


รูปที่ 5.1 : การวิเคราะห์ความไวเมื่อทำการเพิ่ม / ลด ราคาชีวมวลคราวละ 10%

เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงชีวมวลมีแต่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ความไวแต่เฉพาะด้านการเปลี่ยนแปลงราคาชีวมวลในด้านบวกเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องพิจารณาในด้านลบก็สามารถทำได้

% change	ถ่านหิน	ใบอ้อย	แกลบ
100%	6.2	1	2.2
90%	5.89	0.95	2.09
80%	5.58	0.9	1.98
70%	5.27	0.85	1.87
60%	4.96	0.8	1.76
50%	4.65	0.75	1.65
40%	4.34	0.7	1.54
30%	4.03	0.65	1.43
20%	3.72	0.6	1.32
10%	3.41	0.55	1.21
0%	3.1	0.5	1.1

ตารางที่ 5.14 : ราคาชีวมวลชนิดต่างๆ เมื่อทำการเพิ่มราคาชีวมวล คราวละ 10% (บาท/กิโลกรัม)



รูปที่ 5.2 : การวิเคราะห์ความไวเมื่อทำการเพิ่มราคาชีวมวลคราวละ 10%

จากการวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงชีวมวลจะเห็นได้ว่า ถ้าราคาแกลบเพิ่มขึ้นมากกว่า 50% จะทำให้ราคาเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้ถ่านหินแต่เพียงอย่างเดียว จึงควรเลิกใช้แกลบ ส่วนไบโอดีนั้น แม้ราคาเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าก็ยังคงใช้ได้และยังคงใช้ได้ตลอดไป จนกว่าราคาไบโอดีจะเพิ่มขึ้นอีก 260% จึงควรเลิกใช้ไบโอดี

5.6 สรุปผลการศึกษา

1) ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจพบว่า การใช้เชื้อเพลิงก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยสารมลพิษดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการบดวัตถุดิบในส่วนของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นขั้นตอนที่เกิดปริมาณฝุ่นแขวนลอยมากที่สุด

2) การวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ทราบว่ามลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นมากที่สุดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณถึง 875 กก. จากปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปริมาณ 1 ตัน ทั้งนี้คิดจากสมการที่เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

เท่านั้น ไม่คิดถึงกรณีที่เกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซ SOx , NOx ออกมาด้วย

3) การลดผลกระทบที่มีต่อปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศสามารถทำได้โดยนำเชื้อเพลิงชีวมวลเข้ามาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้สามารถลดปริมาณ CO₂ จาก 875 กก. เหลือ 790 กก.ต่อตันปูนซีเมนต์ เฉพาะที่เกิดจากกระบวนการเผาเท่านั้นซึ่งเป็นกระบวนการหลักที่ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาเป็นปริมาณมาก

4) จากการวิเคราะห์ความไวโดยการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงชีวมวลจะเห็นได้ว่า ถ้าราคาแกลบเพิ่มขึ้นมากกว่า 40% จะทำให้ราคาค่าเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้ถ่านหินแต่เพียงอย่างเดียว จึงควรเลิกใช้แกลบ ส่วนไบโอดีเซล แม้ราคาเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าก็ยังใช้ได้และยังคงใช้ได้ตลอดไปจนกว่าราคาไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นอีก 260% จึงควรเลิกใช้ไบโอดีเซล

5.7 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงานวิจัย

1) การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์เป็นวิธีการที่มีความซับซ้อน และต้องการข้อมูลและความรู้เชิงเทคนิคเป็นอย่างมาก จึงเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลและใช้ในวงการผลิตอุตสาหกรรม

2) การเข้าถึงข้อมูลต่างๆ ไม่อาจทำได้อย่างเต็มที่เนื่องจากข้อมูลด้านปัจจัยการผลิตเช่น วัตถุดิบ เชื้อเพลิง ราคาวัตถุดิบ ราคาเชื้อเพลิง สมดุลวัตถุดิบ สมดุลพลังงาน การนำปูนมาผสม เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆของบริษัทเป็นเรื่องกลยุทธ์ทางการค้าและ เป็นความลับของบริษัทที่ไม่อาจเปิดเผยแก่บุคคลภายนอกได้เลย แม้กระทั่งผู้วิจัยเอง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้หลักการทางนิเวศเศรษฐกิจเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ในบางส่วนเท่านั้น ไม่อาจครอบคลุมได้ในทุกกรณี อีกทั้งในความเป็นจริงการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งหมดนั้น ไม่สามารถทำได้เพราะติดข้อจำกัดหลายๆประการดังที่ได้อธิบายในบทก่อนหน้านี้อแล้ว

5.8 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นควรมีการติดต่อประสานงานกับโรงงานที่ใช้ในการศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลปฐมภูมิที่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- 2) ในการวิเคราะห์การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์นั้น อาจมีการพัฒนาโดยใช้โปรแกรม (Software) มาช่วยในการคำนวณ
- 3) ในการวิเคราะห์การประเมินประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์นั้น อาจมีการพัฒนาโดยใช้โปรแกรม (Software) มาช่วยในการคำนวณกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับแนวคิดของฉลากเขียว ที่เป็นกลยุทธ์หนึ่งในนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมที่ใช้การตลาดเป็นเครื่องมือ เพื่อผลักดันให้ผู้ผลิตอื่นๆ ต้องแข่งขันกับปรับปรุงคุณภาพของสินค้าหรือบริการของตน โดยคำนึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสำคัญเช่นกัน
- 4) เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมมาจากกระบวนการผลิตที่ต้องใช้หินปูนเป็นวัตถุดิบและจากการบริโภคพลังงานและเชื้อเพลิง การลดการปล่อยออกอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมของการเปลี่ยนวัตถุดิบจากหินปูนไปเป็นอย่างอื่น การใช้สัดส่วนเม็ดปูนในการผลิตซีเมนต์ให้น้อยลงโดยที่ยังคงมีคุณสมบัติของคอนกรีตไว้ได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิตติกร จามรดุสิต. Eco – Efficiency แนวทางเพิ่มประสิทธิภาพอุตสาหกรรมสู่ความยั่งยืน
มหาวิทยาลัยมหิดล, 2551

ก่อเกียรติ เกิดปากแพรก. Eco-Efficiency Evaluation of Petroleum and Petrochemical in the
MAP TA PUT Industrial Estate, Rayong Thailand, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,
มหาวิทยาลัยมหิดล, 2550

จิตวิสุทธิ์ ธิณ กลาง. ประสิทธิภาพเชิงนิเวศเศรษฐกิจกับอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย,
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2545

ชณิชา หมอชาติ. มาตรการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานในกระบวนการผลิตสำหรับอุตสาหกรรม
ปูนซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, “คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)”, คอนกรีตผสมเสร็จซีแพค,
เอกสารวิชาการของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2537

บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, รายงานการพัฒนาอย่างยั่งยืน ประจำปี 2549, 2549
บุญยิศา คีนดี . การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และการวิเคราะห์เชิง
เศรษฐศาสตร์สำหรับเทคโนโลยีเพื่อการจัดการมลพิษทางอากาศ . วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551

วีระพงษ์ ประสาทศิลป์. การประหยัดพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า กรณีศึกษาโรงไฟฟ้า
พลังงานความร้อนร่วมพระนครใต้ ชุดที่ 1, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต,
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541

ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และมานิจ ทองประเสริฐ. การลดก๊าซเรือนกระจก : งานวิจัยและพัฒนาด้าน
เทคโนโลยี. 2550.

สำนักงานนโยบายและวางแผนสิ่งแวดล้อม. คู่มือติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโครงการ
ประเภทเหมืองแร่หินปูนและอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์. 2544

สำนักงานนโยบายและวางแผนสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.
โครงการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมระดับพื้นที่จากกิจกรรมเหมืองหินปูน โรงโม่
หิน และอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในจังหวัดสระบุรี. 2537.

เอกสิทธิ์ สุวรรณศรี. การปรับปรุงการจัดการด้านพลังงานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์,
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543

ภาษาอังกฤษ

Adiana B., Ondrej M., John E., CO2 Capture Technology For Cement Industry, 2008

Adiana B. Strategy for the Use of Market-Based Instruments in Indonesia's Environmental Management. Environment Division. Office of Environment and Social Development. Asian Development. 1997

Carpio RC, Alternative fuels mixture in cement industry kilns employing Particle Swarm Optimization algorithm. 2008

Carpio, R.C. Case Study in Cement Kilns Alternative Secondary Fuels Mixing Using Sequential Quadratic Programming, Genetic Algorithms. 2005

Charlene S., Charlotte J., Royce D., Eco-efficiency and firm value, 2008

Das ,A.,and Kandpal T.C. Energy-Environment Implications of Cement Manufacturing in India: a Scenrio Analysis.International Journal of Energy Research.(1997): 56-67

Ernst Worrell, Lynn Price, Nathan Martin, Chris Hendriks, and Leticia OzawaMeida. Carbondioxide Emission from The Global Cement Industry. 2001.

Guerra I., Vivar I., B. Llamas, A.Juan, J.Moran, Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installation on mechanical properties of concrete, 2008

Hanssen ,J.O. Environmental impacts of product systems in a life cycle perspective: a survey of five product types based on life cycle assessments studies. 1998

Iniyana S., Suganthib L., Anand A. Samuel, Energy models for commercial energy prediction and substitution of renewable energy sources, 2006

John W. Halloran, Carbon-neutral economy with fossil fuel-based hydrogen energy and carbon materials, 2007

Kaantee U., Zevenhoven R. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modeling, 2003

Ken Humphreys ,and Maha Mahasenana. Climate Change. World Business Council for Sustainable Development, 2002.

Kessler ,G.r. Cement Kiln Dust (CKD)Methods for Reduction and Control. IEEE Transactions on Industry Application, 1995.

- Kharel G. ,Charmondusit K. , Eco-efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal, 2008
- Kyoungsoon Cha, Songtak Lim, Tak Hur, Eco-efficiency approach for global warming in the context of Kyoto Mechanism, 2008
- Li,V.C.,Fischer,G.,Kim,Y.,Lepech,M.,Qian,S,Weimann,M.,and Wang,S. Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites. 2003.
- McQueen ,A.T.et al. Cement Kiln NOx Control. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995.
- Mohammed B., Hernane C ., Ali E., Eric C., Peter L., Analysis and Optimizat Carbon dioxide Emission Mitigation in Cement Industry. 2008.
- Mycock, JC.,J.D. Mckenna and L.Theodore. Handbook of Air Pollution C Engineering and Technology. Lewis Publisher, 1995.
- Raina , K., and Janakiraman L.K. Use of mineralizer in black meal process for improved clinkerization of energy.Cement and Concrete Research. 1998
- Runar Brannlund, Tommy Lundgren, Swedish industry and Kyoto—An assessment of the effects of the European CO2 emission trading system, 2007
- Schneider ,M. ,and Kuhlmann K. Environmental Relevance of the Use of Secondary Constituents in Cement Production. ZKG International, 1997.
- Sharp, J.H.,Lawrence C.D. ,and Yang R. Calcium Sulfoaluminate Cements Low-Energy Cements. Advances in Cement Research. 1999.
- Taeko Aoe. Eco-efficiency and eco-design in electrical and electronic products, 2006
- Tahsin Engin *, Vedat Ari, Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study, 2005

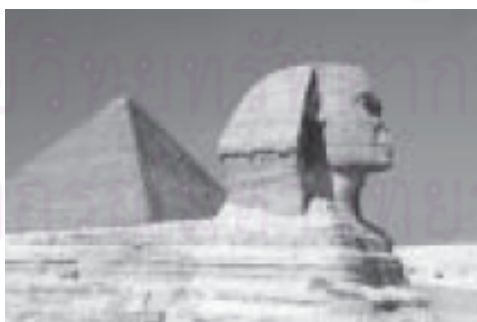


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติปูนซีเมนต์

จากหลักฐานทางประวัติศาสตร์พบว่า มีการนำปูนซีเมนต์มาใช้งานตั้งแต่สมัยอียิปต์, กรีก และโรมัน โดยในยุคต้นจะเป็นการใช้งานเพื่อสร้างเป็นที่หลบภัยหรือที่อยู่อาศัยเป็นส่วนใหญ่ โดยช่างก่อสร้างได้ใช้ดินเหนียว (Clay) เป็นตัวยึดเกาะก้อนหินขนาดใหญ่เข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างแข็ง สำหรับสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ในปี พ.ศ. 2367 Joseph Aspdin ซึ่งมีอาชีพเป็นช่างปูน ชาวอังกฤษได้ประดิษฐ์คิดค้นปูนซีเมนต์ขึ้นใช้ชื่อว่า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland cement) เนื่องจากเมื่อเกิดการก่อตัวจะมีสีเหมือนกับสีของหินปูนบนเกาะพอร์ตแลนด์ บริเวณช่องแคบอังกฤษ ซึ่งชื่อดังกล่าวยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบันและแพร่หลายไปทั่วโลกในประเทศไทยพบว่า ได้เริ่มผลิตปูนซีเมนต์ใช้เองภายในประเทศในปี พ.ศ. 2456 ด้วยพระราชประสงค์ของ พระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว (รัชการที่ 6) เพื่อลดการนำเข้าปูนซีเมนต์จากต่างประเทศภายใต้ชื่อ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ตั้งอยู่ ณ ตำบลบางซื่อ (โรงงานบางซื่อ) ซึ่งต่อมาได้แปรสภาพเป็นบริษัทมหาชน ภายใต้ชื่อ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) จนถึงปัจจุบัน

ในยุคแรกของการก่อสร้าง ช่างก่อสร้างได้ใช้ดินเหนียว (clay) และหิน (stone) ผสมเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างแข็งชนิดหนึ่งเพื่อใช้ป้องกันและหลบภัยต่างๆ คอนกรีตที่เก่าแก่ที่สุดถูกค้นพบประมาณ 7,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช และในปี 1985 ได้มีการค้นพบการทำพื้นถนนคอนกรีตที่ Yiftah El ใน Galilee ประเทศอิสราเอล ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ประกอบด้วยปูนขาว (lime) จากการทำหินปูน (limestone) ไปเผาจนได้เป็นปูนขาว จากนั้นนำปูนขาวดังกล่าวผสมกับน้ำและหิน ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะอยู่ในรูปคอนกรีต



รูปที่ ๘-1 พีระมิดในสมัยอียิปต์

ประมาณ 2,500 ปีก่อนคริสต์ศักราช ได้มีการก่อสร้างในประเทศอียิปต์ ซึ่งวัสดุที่ใช้เชื่อมประสานระหว่างก้อนหินสำหรับโครงสร้างของพีระมิดนั้นบางรายงานระบุว่า เป็นมอร์ต้าที่ทำมา

จากปูนขาว ขณะที่บางรายงานระบุว่า เป็นวัสดุที่ได้มาจากการเผาชิปขี้มูลของคองกรีตใน ยุคโรมันอาจจะต้องย้อนกลับไปประมาณ 300 ปีก่อนคริสต์ศักราช ซึ่งคำว่าคองกรีตได้มาจาก ภาษาลาติน “concretus” ซึ่งแปลว่า การเข้าด้วยกันหรือการคลุกเคล้าผสมกัน ชาวโรมันได้มีการ ใช้วัสดุปอซโซลาน (pozzolan) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยได้มาจากถ้ำภูเขาไฟ ซึ่งเดิมคิดว่าเป็น พวกทรายโดยนำมาผสมกับปูนขาว ซึ่งของผสมที่ได้มีความแข็งแรงกว่าการผลิตก่อนหน้านี้เป็นอย่างมาก การค้นพบดังกล่าวมีความสำคัญต่อการก่อสร้างเป็นอย่างมาก และนอกจากนี้ยังทำให้ ทราบว่าวัสดุดังกล่าวแท้จริงแล้วไม่ใช่เป็นพวกทราย แต่เป็นเถ้าละเอียดจากภูเขาไฟที่ ประกอบด้วยสารประกอบซิลิกา (silica) และอลูมินา (alumina) ซึ่งเมื่อมีการรวมกันทางเคมีกับปูน ขาวก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรารู้จักในชื่อ ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน (pozzolanic cement)



รูปที่ ผ-2 โคลีเซียมในประเทศอิตาลี

วัสดุเหล่านี้ใช้ในการปลูกสร้างสิ่งก่อสร้างที่มีชื่อเสียง เช่น กำแพงโรมัน, โรงละคร (theatre), Colosseum และ Pantheon ในกรุงโรม เป็นต้น แต่ในช่วงของยุคกลางดูเหมือนว่า ปูนซีเมนต์ปอซโซลาน ไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับยุคแรกๆ และคุณภาพของวัสดุ เชื่อมประสานก็เสื่อมลง การเผาปูนขาวและการใช้วัสดุปอซโซลานจึงไม่มีการนำมาใช้อีกจนกระทั่ง ปี ค.ศ. 1,300 ได้มีความพยายามในการหาว่า เหตุใดปูนขาวบางชนิดจึงมีคุณสมบัติไฮดรอลิก ขณะที่บางชนิดไม่มีคุณสมบัติดังกล่าวซึ่งไม่สามารถหาคำตอบได้ จนกระทั่งศตวรรษที่ 18 John Smeaton ซึ่งได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาแห่งวิศวกรรมโยธาของประเทศอังกฤษ (father of civil engineering in England) ซึ่งงานของเขาเกี่ยวข้องกับทางด้านนี้เป็นอย่างมาก ได้พบว่าความไม่ บริสุทธิ์ (impure) ของหินปูนที่อ่อนนุ่ม (soft limestone) ที่มีส่วนผสมของดินเหนียว (clay mineral) จะทำให้เกิดเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกได้ดีที่สุด และเขาใช้ปูนซีเมนต์ชนิดนี้กับวัสดุปอซโซ ลานจากประเทศอิตาลีในโครงการก่อสร้าง Eddystone Lighthouse ที่ประเทศอังกฤษในปี ค.ศ.

1759 โดยดำเนินการทั้งหมด 3 ปีจนสำเร็จ การค้นพบการผลิตปูนซีเมนต์ของ John Smeaton ในครั้งนี้ นับเป็นจุดเริ่มในการพัฒนาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์



รูปที่ ผ-3 หินของเกาะปอร์ตแลนด์(ซึ่งเป็นที่มาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์)

การพัฒนาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลเนื่องมาจากความพยายามทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมเพื่อผลิตปูนซีเมนต์ธรรมชาติที่มีคุณภาพดีกว่า ผู้ที่ประดิษฐ์คิดค้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์คือ Joseph Aspdin ซึ่งมีอาชีพเป็นช่างปูน ชาวอังกฤษ เขาได้จดทะเบียนในปี ค.ศ. 1824 สำหรับที่มาของชื่อ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เนื่องจากเมื่อเกิดการก่อตัวจะมีสีเหมือนกับสีของหินปูนบนเกาะปอร์ตแลนด์ บริเวณช่องแคบอังกฤษซึ่งชื่อดังกล่าวยังคงใช้อยู่ถึงจนถึงปัจจุบันและแพร่หลายไปทั่วโลก

Aspdin เป็นผู้กำหนดสูตรปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และมีการจดสิทธิบัตรไว้เป็นคนแรก อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 1845 I.C.Johnson และบุตรชาย ได้ทำการเผาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ด้วยความร้อนสูงจนกระทั่งมีลักษณะคล้ายแก้ว (vitrified) ซึ่งเป็นการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เรารู้จักกันในปัจจุบัน ปูนซีเมนต์ดังกล่าวได้กลายเป็นที่นิยมระหว่างช่วงแรกของศตวรรษที่ 19 และได้มีการส่งออกจากประเทศอังกฤษไปยังประเทศต่างๆทั่วโลก และได้มีการผลิตอีกครั้งในประเทศเบลเยียม ฝรั่งเศสและเยอรมัน และมีการส่งออกจากประเทศเหล่านี้ไปยังอเมริกาเหนือในปี ค.ศ. 1865 หลักฐานที่มีการจดบันทึกในการส่งสินค้าประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาปรากฏเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1868 ส่วนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในประเทศสหรัฐอเมริกามีขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1871 ที่โรงงานใน Coplay รัฐ Pennsylvania

ในสมัยรัชกาลที่ 4 ถึงรัชกาลที่ 6 ประเทศไทยต้องนำเข้าปูนซีเมนต์จากต่างประเทศ ทำให้ต้องเสียเงินตราแก่ต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ในขณะที่ประเทศไทยก็มีศักยภาพและวัตถุดิบอย่างเพียงพอในการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อใช้งาน ประกอบกับความต้องการปูนซีเมนต์ภายในประเทศเพิ่มสูงขึ้น ทำให้บริษัทผลิตปูนซีเมนต์แห่งแรกของประเทศไทยถือกำเนิดขึ้นในปี พ.ศ. 2456 ด้วยพระราชประสงค์ของ พระบาทสมเด็จพระปรเมนทรมหาอานันทมหิดล พระอัฐมรามาธิบดินทร (รัชกาลที่ 6) เพื่อให้สามารถผลิตปูนซีเมนต์ขึ้นใช้เองภายในประเทศ ลดการนำเข้าปูนซีเมนต์จากต่างประเทศจัดสรรการใช้ทรัพยากรภายในประเทศอย่างคุ้มค่า และช่วยนำประเทศไปสู่ความเจริญก้าวหน้าในอนาคต ภายใต้ชื่อ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด โดยเริ่มก่อตั้งเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2456 และได้รับการจดทะเบียนเป็นบริษัทเมื่อวันที่ 8 ธันวาคม พ.ศ. 2458

ครั้นต่อมา เมื่อความต้องการใช้ปูนซีเมนต์ในประเทศเพิ่มสูงขึ้น บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด จึงได้ขยายโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ไปยังภูมิภาคต่างๆ ทั่วประเทศ ได้แก่ โรงงานปูนซีเมนต์ไทย ท่าหลวง(จ.สระบุรี) โรงงานปูนซีเมนต์ไทย ทุ่งสง(จ.นครศรีธรรมราช) โรงงานปูนซีเมนต์ไทย แก่งคอย(จ.สระบุรี) โรงงานปูนซีเมนต์ไทย เขาวง(จ.สระบุรี) และโรงงานปูนซีเมนต์ไทยลำปาง(จ.ลำปาง) และได้มีการปิดโรงงานที่บางซื่อในเวลาต่อมาโดยใช้เป็นที่ตั้งของสำนักงานใหญ่ของเครือซีเมนต์ไทยในปัจจุบัน

กระบวนการผลิตโดยสังเขป

ซีเมนต์คือ สารที่ทำหน้าที่ยึดผิวของของแข็งเข้าด้วยกันอย่างมั่นคงหรือกล่าวให้เฉพาะเจาะจงก็คือ ผงที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานโดยต้องผสมกับน้ำก่อน ซึ่งจะแข็งตัวเมื่อแห้งโดยสามารถใช้เป็นตัวประสานหรือยึดอิฐ หิน ฯลฯ ในการก่อสร้างอาคาร สถานที่ต่างๆ

ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์

จากรูปที่ ๘-5 Cement Plant Schematic Process Flow แบ่งขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

Raw Material Preparation

หินปูน (Limestone) และดินดาน (Shale) ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตปูนซีเมนต์จะถูกลำเลียงจากเหมืองผ่านเข้าเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อย่อยให้มีขนาดเล็กลงพอเหมาะจะผ่านเข้าหม้อบดวัตถุดิบได้ การย่อยวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลงและมีขนาดใกล้เคียงกันทำให้วัตถุดิบแต่ละประเภทมีคุณภาพสม่ำเสมอยิ่งขึ้น วัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บในยูนิตด้วย Stacker ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบในกองให้สม่ำเสมอ และจะถูกลำเลียงออกจากยูนิตด้วยReclaimer ซึ่งช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าของวัตถุดิบดียิ่งขึ้นก่อนลำเลียงไปเก็บใน Hopper

Raw Material Grinding

วัตถุดิบที่ป้อนเข้าหม้อบดจะต้องควบคุมส่วนผสมโดยใช้เครื่องป้อนวัตถุดิบ(Feeder) ให้มีส่วนผสมระหว่างวัตถุดิบแต่ละชนิดตามที่กำหนดแล้วป้อนเข้าหม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) เพื่อบดให้ละเอียด ในระหว่างการบดจะใช้ลมร้อนช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ หม้อบดวัตถุดิบที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 แบบได้แก่ Horizontal Mill (Tube Mill) และ Vertical Mill วัตถุดิบที่ผ่านการบดและตรวจสอบคุณภาพเรียบร้อยแล้ว (Raw Meal) จะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ใน Blending Silo หรือ Homogenizing Silo ซึ่งมีทั้งแบบ Batch Type และ Continuous Type เพื่อคลุกเคล้าส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันใน Silo และพร้อมจะนำเข้ากระบวนการเผาต่อไป

Burning

กรรมวิธีการให้ความร้อนในการเผาปูนซีเมนต์โดยใช้หม้อเผา ปัจจุบันนิยมใช้หม้อเผาแบบหมุน(Rotary Kiln) ซึ่งใน SCI หม้อเผาเป็นชนิด Suspension Preheater with Precalciner Kiln ซึ่งจะติดตั้งชุด Precalciner ต่อจาก Suspension Preheater เพื่อทำหน้าที่แทน Calcining Zone คือ เผาให้ CaCO_3 แยกตัวประมาณ 85-90% เป็น CaO ก่อนที่จะนำเข้าสู่ Burning Zone ซึ่งหม้อเผาชนิดนี้จะมี Thermal Load ใน Burning Zone ลดลง ส่งผลให้อายุการใช้งานของอิฐทนไฟยาวนานขึ้น Raw Meal เมื่อผ่านการเผาใน Burning Zone ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1,400-1,600 องศาแล้วจะถูกส่งเข้า Cooling Zone เพื่อให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว ผลผลิตที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ดสีเทาเข้มเรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) เครื่องจักรที่ใช้ทำให้ปูนเม็ดเย็นตัวเรียกว่า หม้อเย็น (Clinker Cooler) ซึ่งใน SCI จะเป็นหม้อเย็นชนิด Grate Cooler ซึ่งภายในจะมีลักษณะเป็นห้องต่อกัน 3-4 ห้อง หรือมากกว่านี้ ภายในแต่ละห้องจะมีแผ่นตะแกรง (Grate) เคลื่อนที่เพื่อลำเลียงปูนเม็ดให้เคลื่อนไปข้างหน้าแผ่นตะแกรงจะมีรูปวงเพื่อให้อากาศร้อนขึ้นไประบายความร้อนออกจากปูนเม็ด ปูนเม็ดที่ออกจากหม้อเย็นชนิดนี้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแบบ Planetary Cooler หรือ Rotary Cooler ซึ่งปูนเม็ดที่ได้จะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ใน Clinker Silo เพื่อเตรียมนำเข้ากระบวนการบดเป็นปูนซีเมนต์ต่อไป

Cement Grinding

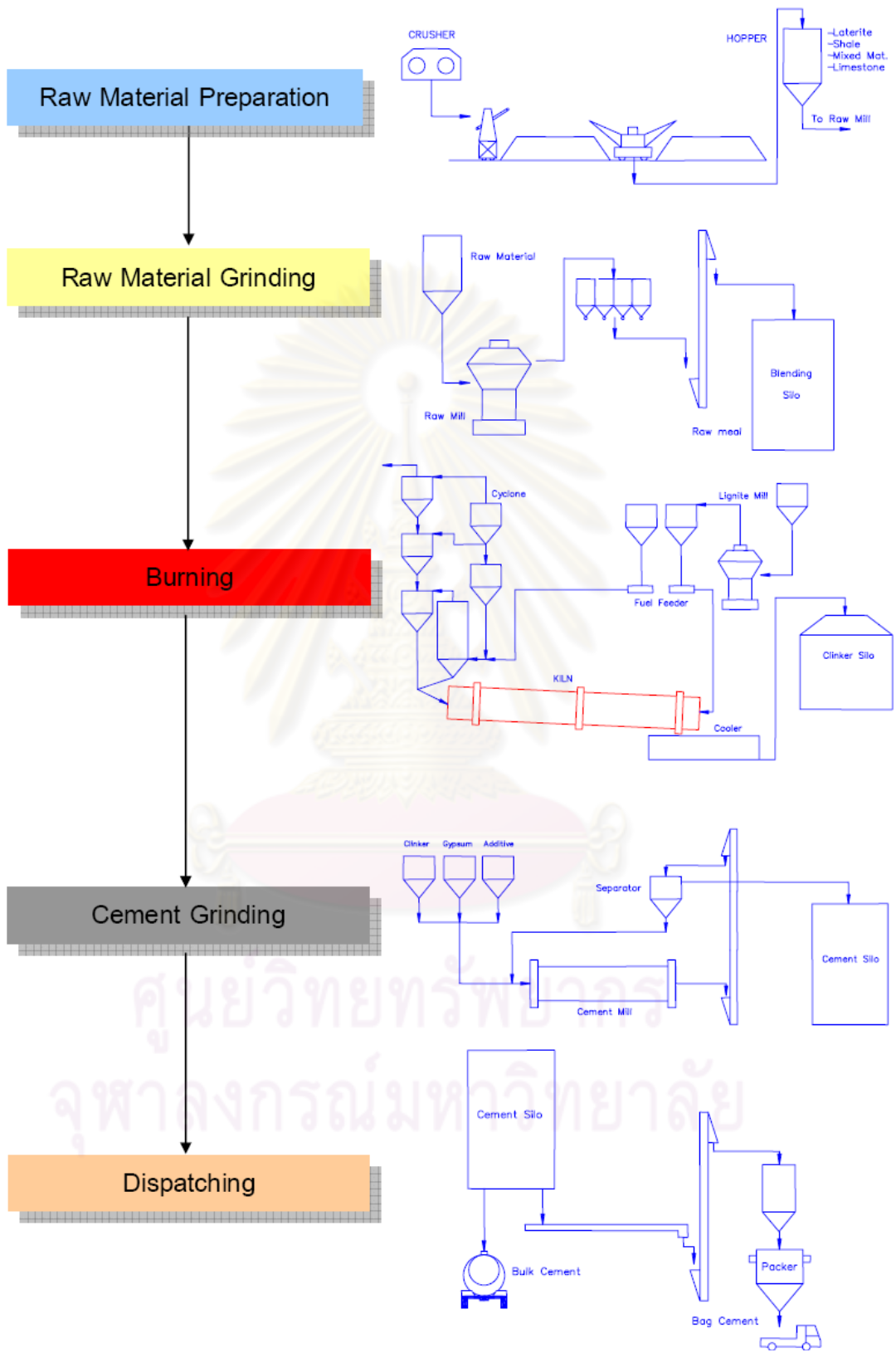
ปูนเม็ดที่ผ่านการเผาและทำให้เย็นตัวใน Cooling Zone ของหม้อเผาแล้ว จะผ่านเครื่องย่อยเพื่อย่อยให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 25 mm. แล้วลำเลียงเข้า Clinker Silo หลังจากนั้นจะลำเลียงออกไปยัง Hopper ของหม้อบดปูนซีเมนต์ (Cement Mill) เพื่อบดให้ละเอียดต่อไป ในระหว่างการบดจะผสมยิปซั่มประมาณ 3-6% เพื่อควบคุมระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของปูนซีเมนต์ให้มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนดปูนเม็ดและยิปซั่มจาก Hopper จะผ่านเครื่องป้อน (Feeder) เพื่อควบคุมน้ำหนักให้ได้ตามที่ต้องการ และมีปริมาณที่พอเหมาะกับการบด

ของหม้อบด การบดในระบบปิด (Closed Circuit Grinding system) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบันเป็นการบดปูนซีเมนต์ที่มีเครื่องแยก (Separator) เป็นส่วนประกอบ กล่าวคือ ปูนซีเมนต์ที่ผ่านการบดแล้วจะถูกส่งไปเข้าเครื่องแยก เพื่อแยกส่วนที่ละเอียดและส่วนที่หยาบออกจากกัน ส่วนที่หยาบจะถูกส่งกลับเข้าหม้อบดเพื่อบดร่วมกับปูนเม็ดและยิปซัมอีกครั้งหนึ่ง สำหรับส่วนที่ละเอียดจะเป็นปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดตามที่ต้องการ ซึ่งจะถูกลำเลียงไปเก็บในถังเก็บปูนซีเมนต์ (Cement Silo) เพื่อรอจำหน่ายให้กับลูกค้าต่อไป

Dispatching

เมื่อมีลูกค้าเข้ามาซื้อ ปูนซีเมนต์จากถังเก็บจะถูกลำเลียงมาเข้าเครื่องบรรจุถุง (Packer) เพื่อจ่ายให้กับลูกค้าที่ต้องการปูนซีเมนต์ถุง (Bag Cement) ส่วนลูกค้าที่ต้องการปูนซีเมนต์ผง (Bulk Cement) จะรับปูนซีเมนต์ผงได้จากถังเก็บปูนซีเมนต์ได้โดยตรง การขนส่งปูนซีเมนต์ถุงและปูนซีเมนต์ผงออกจากโรงงาน จะขนส่งได้ทั้งทางรถยนต์ ทางรถไฟและทางเรือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๕-5 Cement Plant Schematic Process Flow

การบดวัตถุดิบ (Raw Milling)

หม้อบดวัตถุดิบรุ่นใหม่มากกว่า 80% จะเป็นหม้อบดแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) อย่างไรก็ตามหม้อบดแบบนอน (Ball Mill) ก็ยังคงมีใช้กันอยู่ โดยอาจติดตั้ง Roller Press สำหรับช่วยบดเบื้องต้น (Pre-grinding) เพิ่มเพื่อช่วยบดก่อนเข้าหม้อบดวัตถุดิบ (ในบางครั้งอาจมีการติดตั้งเครื่องตีแผ่นวัตถุดิบที่ผ่านออกจาก Roller Press เพื่อนำส่วนละเอียดแยกออกเป็นวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) ก่อนป้อนเข้าหม้อบด การติดตั้ง Roller Press ในระบบหม้อบดแบบนอน (Ball Mill) เช่นนี้มักดำเนินการกรณีที่ต้องการปรับปรุงหม้อบดแบบนอน (Ball Mill) เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตและลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า

หม้อบดแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) สามารถที่จะรองรับวัตถุดิบที่มีความชื้นได้ถึง 15% ขณะที่หม้อบดแบบนอน (Ball Mill) ที่มีห้องไล่ความชื้น (Drying Compartment) และชุดลมร้อนผ่านตัวหม้อบดด้วยความเร็ว 2.5-3.5 m/s เหนือระดับลูกบด สามารถไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบในปริมาณไม่เกิน 8% ออกจากวัตถุดิบได้ สำหรับหม้อบดแบบนอน (Ball Mill) ชนิด Center Discharge Mill (Double Rotator) ซึ่งชุดลมร้อนผ่านตัวหม้อบดด้วยความเร็ว 5-6 m/s เหนือระดับลูกบด สามารถไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบในปริมาณ 12-14% ซึ่งโดยปกติแล้วความร้อนที่ใช้ในการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบจะได้จากระบบ Preheater ของหม้อเผาซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 300 °C โดยปกติจากระบบ Preheater ของหม้อเผาอาจไม่สามารถไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอได้แม้ว่าจะดึงความร้อนออกจากหม้อเผาอย่างเต็มความสามารถของหม้อเผาแล้ว สำหรับหม้อเผาที่มี Preheater 5-6 ระดับจะมีความสามารถในการไล่ความชื้นไม่มากนัก ดังนั้นเมื่อต้องการไล่ความชื้นปริมาณที่มากขึ้นอาจจะต้องใช้ Hot Gas Generator ช่วยในการไล่ความชื้นด้วย ซึ่งมีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายจะค่อนข้างสูงอย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจมีการนำความร้อนที่เกิดจากมอเตอร์ขับเคลื่อนของหม้อบดวัตถุดิบ (Mill Drive) มาช่วยไล่ความชื้นด้วย ซึ่งปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ขับเคลื่อนหม้อบดใช้ไป 1000 kWh สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบได้ประมาณ 1 ตัน

ระบบ Silo จะมีความสำคัญและจำเป็นสำหรับการเก็บวัตถุดิบก่อนผ่าน Feeder เข้าหม้อบดวัตถุดิบในกรณีที่ไม่มียุทธการผสม (Preblending) หรือ ยุ้งเก็บสำหรับวัตถุดิบจำพวกหินปูนหรือเซลที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ แต่หากว่าวัตถุดิบมีความชื้นค่อนข้างสูงซึ่งจำเป็นจะต้องนำเข้าไปไล่ความชื้นออกที่หม้อบดวัตถุดิบจะไม่จำเป็นต้องมีระบบ Silo เก็บวัตถุดิบแต่ควรมีระบบการกองเก็บในยุ้งวัตถุดิบรวมทั้งระบบการผสม (Preblend) เพื่อช่วยผสมและลดความชื้นแทน

หม้อบดแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบดต่ำกว่า หม้อบดแบบนอน (Ball Mill) โดยหม้อบดแบบตั้งของ Loesche จะประกอบด้วย Roller 2-4 ลูก ซึ่งจะกดลงบนจานหมุน (Table) ผ่านชุด Hydraulic สำหรับแกนของ Roller จะเอียงทำมุม 15° เมื่อเทียบกับจานหมุน (Table) สำหรับการหมุนของทั้ง Roller และ Table จะมีทั้งแบบกลิ้ง (Rolling) และแบบไถล (Sliding) ไปพร้อมๆกัน เพื่อทำให้เกิดการบดและลดขนาดของวัสดุบด โดยวัสดุบดจะถูกลำเลียงเข้าหม้อบดบริเวณกึ่งกลางของจานหมุน (Table) และถูกเหวี่ยงออกเนื่องจาก แรงจากการหมุนของจานหมุน (Table) เข้าสู่ช่องว่างระหว่างจานหมุน (Table) และ Roller โดยมีลมร้อนผ่านขึ้นมาจากด้านล่างของจานหมุน (Table) โดยสามารถควบคุมทิศทางของลมร้อนได้จากชุด Louvre Ring รอบนอกของจานหมุน (Table) กระแสลมร้อนที่ผ่านขึ้นมาจากใต้จานหมุน (Table) ผ่านชุด Louvre Ring จะหอบวัสดุบดที่ผ่านการบดแล้วให้ลอยขึ้นผ่านเข้าสู่เครื่องคัดขนาดวัสดุบด (Classifier) โดยวัสดุบดส่วนที่ละเอียดจะถูกหอบออกไปเป็นวัสดุบดสำเร็จ (Raw Meal) พร้อมกับลม ในขณะที่วัสดุบดส่วนที่หยาบหรือยังไม่ได้ขนาดจะตกกลับลงสู่จานหมุน (Table) และผ่านเข้าสู่กระบวนการบดซ้ำหมุนเวียนก่อนไปในลักษณะเช่นนี้

กระบวนการไล่ความชื้นออกจากวัสดุบดจะเกิดขึ้นในช่วงที่กระแสลมร้อนหอบวัสดุบดที่ผ่านการบดแล้วจากจานหมุน (Table) ผ่านเข้าสู่เครื่องคัดขนาดวัสดุบด (Classifier) ซึ่งโดยปกติค่าปริมาณวัสดุบดที่หมุนเวียนในระบบ (Circulating Load) จะมีค่าประมาณ 800% อย่างไรก็ตามการเดินหม้อบดแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) อาจเกิดปัญหาการสั่นของหม้อบด (Vibration) ได้ซึ่งมีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของความหนาของวัสดุบดบนจานหมุน (Table) ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มักเกิดจากวัสดุบดที่มีลักษณะแห้งและละเอียดซึ่งแก้ไขได้โดยการฉีดน้ำในหม้อบดเข้าไปบนผิวของวัสดุบดบนจานหมุน (Table)

นวัตกรรมล่าสุดของระบบหม้อบดวัสดุบดแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) คือ เครื่องคัดขนาดวัสดุบดประสิทธิภาพสูง (LV High Efficiency Classifier) คิดค้นโดย Nielsen & Tsuchiya ซึ่งหลักการทำงานคือ การเพิ่มความเร็วของกระแสลมร้อนที่หอบวัสดุบดจากจานหมุน (Table) ให้เพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้ Pressure ตกคร่อมหม้อบดลดลง ส่งผลให้วัสดุบดส่วนที่ลอยวนอยู่ในหม้อบดลดลง รวมทั้งวัสดุบดส่วนที่ Reject จากเครื่องคัดขนาดวัสดุบด (Classifier) มีสภาพหยาบยิ่งขึ้น ส่งผลให้ความหนาของวัสดุบดบนจานหมุน (Table) มีความสม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการบดวัสดุบดให้ละเอียดทำได้ดียิ่งขึ้นอัตราการผลิตจึงเพิ่มขึ้นประมาณ 12-30% ทำให้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงได้ 1.5-5 kWh/t

การเดินหม้ออบวัตถุดิบแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) เริ่มต้นโดย Roller จะถูกยกขึ้นจากจานหมุน (Table) ขณะที่วัตถุดิบเริ่ม Feed ลงบนจานหมุน (Table) เพื่อเริ่มกระบวนการบด โดยมี การติดตั้ง Limit Switch หรือ Mechanical Stop เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหา Roller กระแทกกับจานหมุน (Table) ขณะบดวัตถุดิบ สำหรับวัตถุดิบที่ลมร้อนไม่สามารถหอบขึ้นไปได้จะตกลงไปในช่อง Reject โดยบางระบบอาจมีการออกแบบระบบลำเลียงวัตถุดิบที่ตกจาก Table กลับขึ้นไปป้อนเข้าหม้ออบใหม่ (External Circulating System) ซึ่งจะทำให้สามารถลดความเร็วลมร้อนที่ผ่านช่องลมรอบจานหมุน (Table) ลงได้โดยอาจลดลงจาก 80-85 m/s เหลือ 45-60 m/s ซึ่งส่งผล Pressure ตกคร่อมหม้ออบลดลงได้ อย่างไรก็ตามประเด็นที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับหม้ออบแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) คือ ระบบการป้องกันไม่ให้มีโลหะเข้าไปในหม้ออบอย่างเด็ดขาด เนื่องจากจะก่อให้เกิดปัญหาจานหมุน (Table) หรือ Roller แตกหักเสียหายได้

กำลังไฟฟ้าของหม้ออบแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) จะขึ้นอยู่กับแรงกดจาก Roller ลงบนจานหมุน (Table) รวมทั้งระยะความสูงของ Dam Ring ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความสูงของวัตถุดิบบนจานหมุน (Table) โดยความสูงของ Dam Ring จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุดิบที่ Reject ออกจากจานหมุน (Table) ความสูงของ Dam Ring ที่มากจะทำให้วัตถุดิบ Reject ในปริมาณมาก อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการบดวัตถุดิบหากพบว่าแรงดันตกคร่อมหม้ออบวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าอาจเกิดปัญหาจุดรั่วในระบบการบด จึงควรตรวจสอบหาจุดรั่วในระบบ และทำการแก้ไข โดยปกติปริมาณลมรั่วระหว่างหม้ออบวัตถุดิบและเครื่องดูดจับฝุ่น (Dust Collector) ไม่ควรเกิน 10-15%

Loesche ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตหม้ออบแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) ชี้แนะได้ให้นิยามความหมายรุ่นของหม้ออบแบบตั้งรุ่นต่างๆของ Loesche ที่ผลิตว่า จะบ่งบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานหมุน (Table) และจำนวนลูก Roller เช่น หม้ออบรุ่น LM46.4 หมายถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจานหมุน (Table) 4.6 m. และมีจำนวน Roller จำนวน 4 ลูก

หัวข้อควบคุมซึ่งใช้ในการควบคุมและติดตามประสิทธิภาพการเดินหม้ออบแบบตั้ง (Vertical Roller Mill) มีดังนี้

- กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนหม้ออบ (Mill Drive Power) หรือ แรงดันตกคร่อมตัวหม้ออบ (Differential Pressure) ซึ่งควบคุมอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าหม้ออบ
- อุณหภูมิ Gas เข้าหม้ออบ (อาจสูงถึง 600 °C)
- อุณหภูมิ Gas ออกจากหม้ออบ
- ปริมาณ Gas ออกจากหม้ออบ

เนื่องจาก Cycle Time ของการบดวัตถุดิบในระบบหม้อบดแบบตั้ง (Material Cycle Time) อยู่ในช่วงไม่เกิน 1 นาทีซึ่งค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับหม้อบดนอนซึ่งใช้ระยะเวลาหลายนาที ดังนั้นระบบการควบคุมหม้อบดแบบตั้ง (Control Response Time) จึงจำเป็นต้องรวดเร็วและตอบสนองของการควบคุมระบบการบดได้อย่างเหมาะสมและทันที่ นอกจากนั้นระบบการป้อนวัตถุดิบเข้าหม้อบดก็ต้องสามารถป้อนวัตถุดิบเข้าหม้อบดได้อย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันปัญหาหม้อบดตันและหยุดเนื่องจากวัตถุดิบบนจานหมุน (Table) มีปริมาณน้อยหรือขาดช่วง

ความละเอียดของวัตถุดิบสำเร็จที่ป้อนเข้าสู่หม้อเผา (Kiln Feed) ควรควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ละเอียดมากเกินไป เนื่องจากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการบดมาก แต่ควรเพียงพอเท่าที่หม้อเผาจะสามารถรับได้และคุณภาพปูนเม็ดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยปกติความละเอียดของวัตถุดิบสำเร็จที่ป้อนเข้าสู่หม้อเผา (Kiln Feed) ควรอยู่ที่ประมาณ 15% ค้างตะแกรงเบอร์ 170(88 ไมครอน) และ 1.5-2.5% ค้างตะแกรงเบอร์ 50(300 ไมครอน) สำหรับการกระจายตัวของขนาดวัตถุดิบ (Particle Size Distribution) ควรควบคุมให้อยู่ในช่วงแคบๆ เนื่องจากวัตถุดิบส่วนที่ละเอียดมากเกินไปจะไปเพิ่มปริมาณ Dust Loss ที่ Cyclone ลูกบนสุดของระบบหม้อเผา ขณะที่ส่วนที่หยาบจะส่งผลให้การทำปฏิกิริยาในหม้อเผาเกิดขึ้นได้ยากและปูนเม็ดที่เผาได้มีโอกาสเกิด Free CaO สูงได้ง่าย ซึ่งจะทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิงในการเผาในปริมาณที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น

อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของหม้อบดวัตถุดิบจะขึ้นกับความแข็ง (Hardness) ของวัตถุดิบรวมทั้งประสิทธิภาพของหม้อบด โดยอัตราการใช้พลังงานของหม้อบดแบบนอน (เฉพาะตัวหม้อบด) จะอยู่ที่ประมาณ 10 kWh/t สำหรับวัตถุดิบที่อ่อน และประมาณ 25 kWh/t สำหรับวัตถุดิบที่แข็ง แต่อัตราการใช้พลังงานของหม้อบดแบบตั้ง (เฉพาะตัวหม้อบด) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 4.5-8.5 kWh/t และหากคิดรวมทั้งระบบหม้อบดแล้ว อัตราการใช้พลังงานของหม้อบดแบบตั้ง จะต่ำกว่าหม้อบดแบบนอนประมาณ 30%

วัตถุดิบสำเร็จที่ผลิตได้ (Raw Meal) จะถูกตรวจวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบต่อเนื่อง (On-Line Analysis) หรือการวิเคราะห์รายชั่วโมงในห้องทดสอบ เพื่อควบคุมสัดส่วนวัตถุดิบให้ได้วัตถุดิบสำเร็จที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ โดยนำโปรแกรมคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์มาใช้ในการควบคุมและลดความแตกต่างจากสิ่งเจือปนตามธรรมชาติในแต่ละวัตถุดิบ ทำให้ได้วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) ที่มีคุณภาพสม่ำเสมออยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ สิ่งที่ต้องเฝ้าติดตามในการเดินหม้อบดวัตถุดิบ มีดังนี้

- อัตราการป้อนวัตถุดิบ (t/h)
- ชั่วโมงการบดวัตถุดิบ

- ชั่วโมงการหยุดหม้อบดวัตถุดิบ
- อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ Main Motor ของหม้อบดวัตถุดิบ
- %ความละเอียดของ Raw Meal (%ค้ำตะแกรงเบอร์ 170 และเบอร์ 50)
- %ความชื้นของวัตถุดิบเข้าหม้อบดวัตถุดิบ
- %ความชื้นของ Raw Meal ที่ผลิตได้
- %หินที่ใช้เทียบกับปริมาณ Raw Meal ที่ผลิตได้
- %Clay/Shale ที่ใช้เทียบกับปริมาณ Raw Meal ที่ผลิตได้
- %Additive ที่ใช้เทียบกับปริมาณ Raw Meal ที่ผลิตได้

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรในกระบวนการผลิตที่ควรตรวจสอบเป็นระยะๆ ดังนี้

- Circulating load (%)
- อัตราการใช้ลูกบดเทียบกับปริมาณ Raw Meal ที่ผลิตได้ (g/t) กรณีหม้อบดแบบนอน
- ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ Raw Meal ที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 170

สำหรับ Raw Meal ส่วนหยาบที่ผลิตได้ (ค้ำตะแกรงเบอร์ 170) อาจมีสัดส่วนของ Lime หรือ Silica สูงเมื่อเทียบกับตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งควรมีการติดตามและควบคุมไม่ให้มีปริมาณมาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในขั้นตอนการเผาในหม้อเผา

ขนาด Silica ที่ควรควบคุมปริมาณ

>200 ไมครอน ไม่ควรมากกว่า 0.5% ของ Kiln Feed

90-200 ไมครอน ไม่ควรมากกว่า 1.0%

>45 ไมครอน ไม่ควรมากกว่า 2.0%

ขนาด Calcite ที่ควรควบคุมปริมาณ

>125 ไมครอน ไม่ควรมากกว่า 5.0%

การผสมวัตถุดิบ (Blending)

ระบบ Blending Silo สำหรับเก็บและผสมวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) มีการออกแบบอยู่ มากมายหลายระบบ แต่ระบบหลักที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีเพียง 2 ระบบได้แก่ ระบบ Turbulence ซึ่งหลักการทำงานคือ วัตถุดิบจะถูกลำเลียงให้ไหลออกจาก Silo ด้วยปริมาณลมจำนวนมากที่เป่า ผ่าน Airpad จำนวนมากที่ติดตั้งอยู่บริเวณก้น Silo แต่สำหรับระบบ Control Flow จะมีหลักการทำงานที่แตกต่างกันกล่าวคือ จะใช้ปริมาณลมจำนวนน้อยกว่าเป่าผ่าน Airpad ที่ติดตั้งในแต่ละ บริเวณของ Silo ในลำดับเวลาที่แตกต่างกันเพื่อให้เกิดการผสมกันของ Raw Meal แต่ละชั้น

ภายใน Silo โดย Blending Silo ระบบนี้มักจะมีช่องทางออกของ Raw Meal หลายช่อง รวมทั้ง อาจมีโดม (Inverted Cone) บริเวณกึ่งกลาง Silo เหนือช่องทางออก โดยบริเวณโดมห้องว่าง และมีลมเป่าช่วยในการผสมวัตถุดิบ สำหรับอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของ Blending Silo แต่ละระบบมีค่าโดยประมาณดังนี้

- Turbulent Mixing (air-merge) 1.50 - 2.50 kWh/t
- Control Flow Inverted Cone 0.25 - 0.50 kWh/t
- Multi Outlet 0.10 - 0.13 kWh/t

Turbulent Mixing สามารถเดินเครื่องจักรได้ 2 รูปแบบคือ แบบ Batch-wise ซึ่งผสม Raw Meal ทีละชุดแบบ Batch ไม่ต่อเนื่อง หรือแบบ Continuous ซึ่งจะผสม Raw Meal แบบ ต่อเนื่องกันไป สำหรับรูปแบบการทำงานแบบ Batch-wise จะเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเติม การผสม การเก็บตัวอย่าง การวิเคราะห์ การแก้ไข การผสมใหม่ และการป้อนเข้าสู่หม้อเผา แต่สำหรับ รูปแบบการทำงานแบบ Continuous จะมีการผสมอย่างต่อเนื่องพร้อมกันไปกับการลำเลียงเข้าสู่ Silo แรก การ Over Flow เข้าสู่ Silo ที่ 2 และการป้อนเข้าสู่หม้อเผาตามลำดับ

โดยทั่วไประบบ Blending Silo รุ่นใหม่ๆจะเป็นระบบ Controlled Flow แบบผสมต่อเนื่อง (CF-Silo) ซึ่งออกแบบให้มีขนาดความจุ (Capacity) มากกว่าปริมาณการใช้ที่หม้อเผา 24 ชม. และมี Blending Ratio ประมาณ 3-5 เท่า (Silo แบบเก่ามี Blending Ratio เพียงประมาณ 2-3 เท่า)

สิ่งที่ต้องเฝ้าติดตามในการเดินระบบ Blending Silo มีดังนี้

- Blending Ratio (sdfeed / sdproduct)
- อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดลมเป่าใต้ Silo (Compressor) เทียบปริมาณ Raw Meal ที่ Feed เข้าหม้อเผา

โดยปกติภายใน Blending Silo อาจมีแนวโน้มการจับตัวของวัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) ที่บริเวณก้น Silo อันเนื่องมาจากความชื้นจาก Raw Meal หรือความผิดปกติของระบบลมเป่าใต้ Silo ซึ่งอาจมีความชื้นปะปนเข้ามาในระบบ จึงควรมีการตรวจสอบสภาพภายในและดำเนินการ ซ่อมแซมทุก 1-2 ปี และกรณีที่ไม่ได้ใช้งาน Blending Silo เป็นระยะเวลานาน เช่น การหยุดซ่อม หรือปรับปรุงหม้อเผาเป็นระยะเวลานาน ควรมีการเคลียร์ Raw Meal ออกจาก Blending Silo หรือ เดินเครื่องจักรเพื่อหมุนเวียนวัตถุดิบ (Recirculated) เพื่อป้องกัน Raw Meal จับตัวกันแน่นภายใน Blending Silo

วัตถุดิบป้อนเข้าหม้อเผา (Kiln Feed)

องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณ Raw Meal ที่ป้อนเข้าหม้อเผา (Kiln Feed) ควรมีความสม่ำเสมอ เพื่อควบคุมสภาพการเผาภายในหม้อเผาให้อยู่ในสภาพหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะส่งผลให้คุณภาพปูนเม็ดที่ผลิตมีคุณภาพที่ดีแล้ว ยังเป็นการลดอัตราการการใช้เชื้อเพลิงในหม้อเผาด้วย จึงควรจะมีการติดตามและควบคุมทั้งคุณภาพและปริมาณ Raw Meal ที่ Feed เข้าหม้อเผาทั้งในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในรายชั่วโมง รวมทั้งค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลายาวๆ

ระบบ Cyclone Preheater ของหม้อเผารุ่นใหม่ในปัจจุบัน จะก่อให้เกิดการสูญเสีย Kiln Feed ที่ละเอียดบางส่วนไปกับลมร้อนที่ออกจาก Preheater (Dust Lost) ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณ Dust Loss จะมีปริมาณอยู่ในช่วง 6-12% ของปริมาณ Kiln Feed ที่ Feed เข้าหม้อเผา และเนื่องด้วยคุณภาพของ Dust Lost แตกต่างจาก Kiln Feed ปกติ ดังนั้นการนำ Dust Lost ป้อนกลับเข้าสู่ระบบจึงควรติดตั้งชุด Hopper เล็กๆ เพื่อเป็น Buffer รวมทั้งติดตั้งชุด Feed เพิ่มอีกชุดเพื่อควบคุมปริมาณการ Feed กลับเข้าหม้อเผาให้มีปริมาณสม่ำเสมอ โดยมีการนำคุณภาพของ Dust Lost ที่วิเคราะห์ให้ได้มาคำนวณร่วมกับคุณภาพ Kiln Feed ปกติเพื่อควบคุมให้คุณภาพของ Kiln Feed รวมทั้งป้อนเข้าหม้อเผาเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากนี้ Dust Lost จากระบบ Cyclone Preheater ยังสามารถนำไปเป็นส่วนผสมในการบดปูนซีเมนต์หรือนำไปทำเป็นปุ๋ยได้ด้วย

สิ่งที่ต้องเฝ้าติดตามสำหรับ Kiln Feed มีดังนี้

- ผลวิเคราะห์ทางเคมีของ Kiln Feed ทุกๆ 4 หรือ 8 ชั่วโมงเพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ Oxide หลักๆ ในรูป C3S หรือ LSF

โดยปกติ Kiln Feed จะถูกลำเลียงด้วยชุดกะพ้อจากบริเวณด้านล่างของ Blending Silo ขึ้นไป Feed เข้าบริเวณด้านบนของ Preheater เพื่อให้อัตราการใช้ไฟฟ้าในการลำเลียงต่ำที่สุด แต่หากใช้ลมในการลำเลียง (Air Lift) แทนชุดกะพ้อก็ควรควบคุมปริมาณลมที่ใช้ในการลำเลียงให้น้อยที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่อง Load ของพัดลม IDF ที่เพิ่มสูงขึ้นมากเกินไป ซึ่งอาจส่งผลให้ต้องลดปริมาณ Kiln Feed เข้าหม้อทำให้ปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ลดลงตามไปด้วย

อัตราส่วนของปริมาณ Kiln Feed ที่ใช้ต่อปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ (Kiln Feed to Clinker Ratio) โดยปกติจะอยู่ในช่วงประมาณ 1.65-1.75 เท่า ซึ่งควรปรับแก้ให้ถูกต้องเป็นระยะๆ โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด Stock จริงของปูนเม็ดและปูนซีเมนต์ รวมทั้งปริมาณ Dust Loss จากลมร้อนที่ผ่านออกจาก Preheater

การเผาปูนเม็ดและการทำให้เย็น (Burning and Cooling)

ระบบหม้อเผาปูนซีเมนต์ในปัจจุบันโดยทั่วไปจะประกอบด้วยพรีฮีตเตอร์ (Preheater) ซึ่งทำหน้าที่อุ่นวัตถุดิบให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างวัตถุดิบกับลมร้อนสำหรับหม้อเผาปูนเม็ด (Kiln) ทำหน้าที่เผาวัตถุดิบที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วให้ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นปูนเม็ด (Clinker) และลำเลียงวัตถุดิบผ่านหม้อเย็น (Clinker Cooler) ซึ่งทำหน้าที่ลดอุณหภูมิปูนเม็ดให้ลดต่ำลงโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมเย็น

- วัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบหม้อเผา (Kiln) จะเกิดปฏิกิริยาต่างๆตามช่วงอุณหภูมิต่างๆดังนี้
- > 100 °C นำเกิดการระเหยกลายเป็นไอ
 - > 500 °C องค์ประกอบของน้ำในวัตถุดิบระเหย
 - > 860 °C หินปูนเกิดการแตกตัวจาก $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
 - > 900 °C เกิดปฏิกิริยาระหว่าง CaO กับ Al_2O_3 และ Fe_2O_3 กับ SiO_2
 - > 1,200 °C เกิดการหลอมละลายเป็นเฟสของของเหลว (Liquid Phase)
 - > 1,280 °C เกิด C3S และปฏิกิริยาของ CaO อย่างสมบูรณ์

ระบบหม้อเผาแบบไซโคลนพรีฮีตเตอร์ (Cyclone Preheater Kiln) มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วตั้งแต่ปี 1950 เป็นต้นมาและเป็นที่ยอมรับใช้จนถึงปัจจุบัน โดยการติดตั้งครั้งแรกเป็นแบบไซโคลน 4 ลูก 1 แถว ซึ่งมีอัตราการผลิตปูนเม็ดในปริมาณจำกัดที่ประมาณ 4,500 ตัน/วัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไซโคลนมากถึง 10 เมตร แต่ในปัจจุบันหม้อเผาขนาดใหญ่ๆจะประกอบด้วยพรีฮีตเตอร์จำนวน 2-3 แถวรวมถึงอาจจะมีพรีแคลซิเนอร์ (Precalciner) ติดตั้งระหว่างพรีฮีตเตอร์และหม้อเผาพร้อมด้วยเพื่อช่วยเผาไหม้ก่อนเข้าหม้อเผา ซึ่งหม้อเผาระบบนี้สามารถจะผลิตปูนเม็ดได้มากถึงวันละ 10,000 ตัน อย่างไรก็ตามกรณีที่ไม่ต้องการปริมาณความร้อนจากลมร้อนเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบมากนัก สามารถจะออกแบบระบบอุ่นวัตถุดิบเป็นแบบไซโคลน 5 หรือ 6 ลูกได้ ซึ่งจะสามารถลดความดันตกคร่อมลงได้โดยไม่ประสิทธิภาพของไซโคลนไม่ลดลง

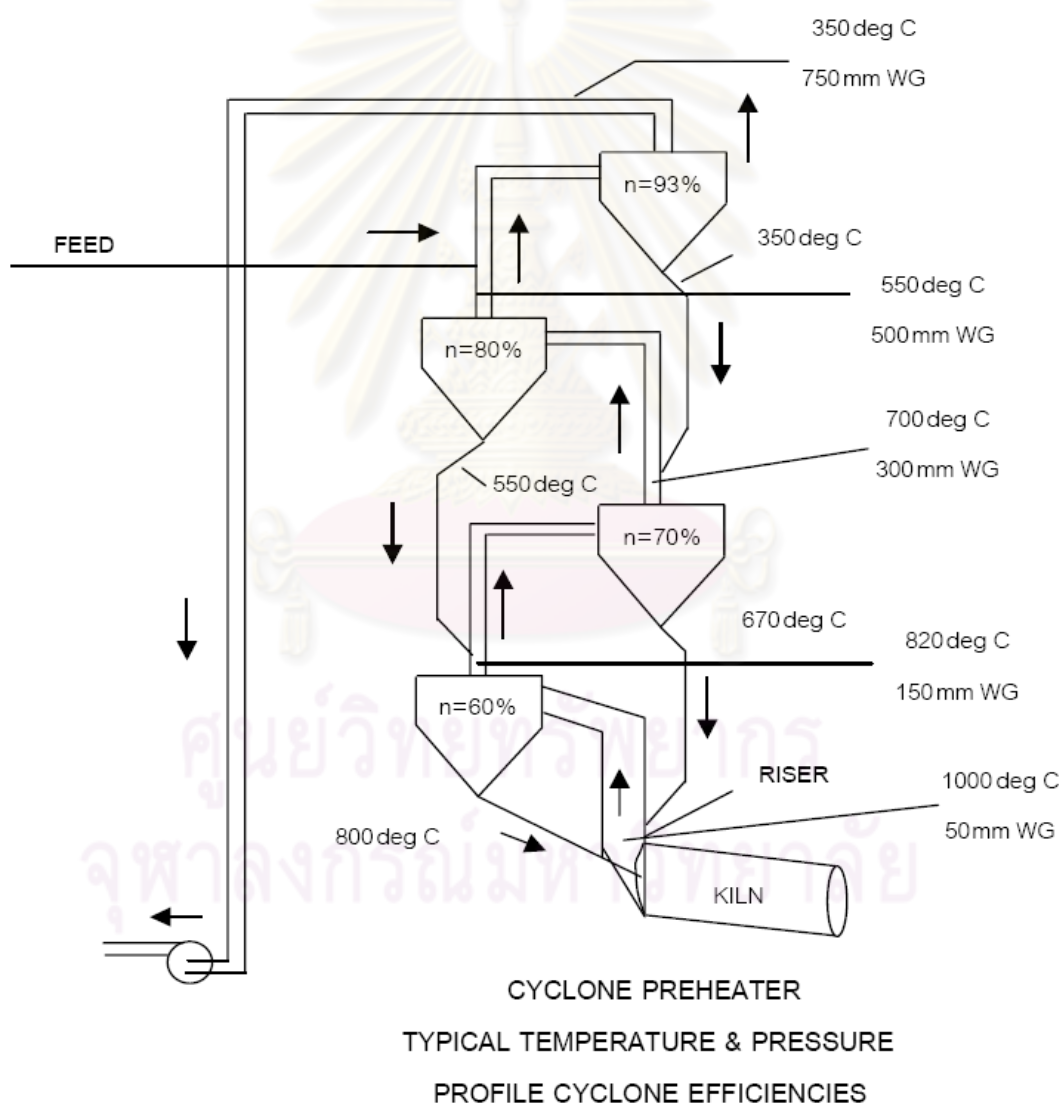
อุณหภูมิลมร้อน ความดัน และอัตราการใช้เชื้อเพลิงออกจากระบบหม้อเผาสมัยใหม่เป็นดังนี้

ไซโคลน 6 ลูก 280 °C 450 mmH₂O 710 kcal/kg-cli.

ไซโคลน 5 ลูก 310 °C 400 mmH₂O 725 kcal/kg-cli.

ไซโคลน 4 ลูก 350 °C 350 mmH₂O 750 kcal/kg-cli.

โดยทั่วไปอุณหภูมิลมร้อนที่ออกจากระบบหม้อเผาสมัยใหม่ซึ่งมีฟรีแคลไซเนอร์จะต่ำกว่าระบบหม้อเผาแบบที่ไม่มีฟรีแคลไซเนอร์ประมาณ 20 - 30 °C และสำหรับระบบหม้อเผาแบบไซโคลน 4 ลูกในยุคแรกๆจะมีความดันตกคร่อมอยู่ในช่วง 700-800 mmH₂O (และอาจจะสูงกว่านี้หากมีการปรับปรุงพัฒนา IDF โดยไม่มีการปรับปรุงไซโคลนและท่อลมให้เหมาะสม) โดยอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะอยู่ในช่วง 850-900 kcal/kg-cl.ii.



รูปที่ ๗-6 CYCLONE PREHEATER

กระบวนการเผาในหม้อเผา (Kiln Burning)

โดยทั่วไปข้อมูลที่ต้องเฝ้าติดตามในขณะที่เดินหม้อเผามีดังนี้

- อัตราการผลิต (t/h)
- ชั่วโมงการเดิน
- ชั่วโมงการหยุดของเครื่องจักรที่ไม่ได้กำหนดไว้
- ปริมาณความร้อนที่ใช้ (kcal/kg-cli.)
- อัตราการใช้เชื้อเพลิง (t/h)
- สัดส่วนการนำเชื้อเพลิงที่แคลไซต์เนอร์ และ หม้อเผา
- อุณหภูมิของลมทุติยภูมิ (secondary air temp.)
- ความดันตกคร่อมพัดลม IDF (mmH₂O)
- อุณหภูมิลมร้อนที่ออกจากพรีฮีตเตอร์ (°C)
- ปริมาณออกซิเจนบริเวณท้ายหม้อเผา (%)
- ปริมาณออกซิเจนบริเวณท้ายหม้อเผา (%)
- คุณภาพวัตถุดิบก่อนเข้าหม้อเผา - LOI (%) , - SO₃ (%)
- กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหม้อเผา (kW)

ข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ควรมีการบันทึกไว้เพื่อใช้ติดตามดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระบบการเผาซึ่งจะส่งสัญญาณให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นหรืออาจจะเกิดขึ้นในระบบการเผา นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลที่สำคัญและจำเป็นสำหรับใช้วิเคราะห์ระบบการเผา เช่น การทำสมดุลความร้อนระบบการเผา (Heat Balance)

นอกจากนี้ยังมีข้อมูลอื่นๆ ที่มีผลต่อการเดินหม้อเผา ที่ควรติดตามอย่างต่อเนื่อง เช่น

- ความเร็วลมปฐมภูมิ (primary air velocity, m/sec)
- ปริมาณวัตถุดิบจำเพาะในหม้อเผา (specific kiln volume loading, %)
- ความเร็วลมภายในหม้อเผาในช่วง Burning Zone (m/sec)
- ปริมาณความร้อนจำเพาะในช่วง Burning Zone (specific heat loading of burning zone, kcal/h/m² ของพื้นที่หน้าตัดในช่วง Burning Zone (effective burning zone))
- ปริมาณลมที่ใช้ในหม้อเย็น (Clinker Cooler, Nm³/h/m² ของพื้นที่แผ่น Grate)
- ปริมาณลมหม้อเย็นและปริมาณลมปฐมภูมิที่ใช้ (Nm³/kg-cli.)
- อุณหภูมิ ความดันและปริมาณออกซิเจนที่พรีฮีตเตอร์

อย่างไรก็ตามกรณีปริมาณความร้อนที่ใช้ในระบบหม้อเผาสูงเกินไป ควรจะต้องเร่งหาสาเหตุและแก้ไขโดยด่วน เนื่องจากอาจเป็นสิ่งบ่งชี้ความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดของเครื่องมือวัด อัตราการป้อนวัตถุดิบหรือคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ ความผิดปกติของเชื้อเพลิงหรือหัวเผา (main burner) ปริมาณออกซิเจนในระบบที่มากหรือน้อยเกินไปไป เกิดลมรั่วบริเวณซีลหม้อเผาหรือฟริชเตอร์ อุณหภูมิของลมทุติยภูมิ (secondary air temp) ที่ต่ำเกินไป หรือปัญหาความบิดเบี้ยวเสียรูปของ splash-plates ในฟริชเตอร์ เป็นต้น

ปริมาณ Free CaO ที่เหลือในปูนเม็ด ควรควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่สูงที่สุดที่สามารถยอมรับได้เพื่อไม่ให้กระบวนการเผายากจนเกินไป แต่ก็ไม่ควรสูงจนก่อให้เกิดปัญหาการขยายตัวของมอร์ต้า (mortar expansion) ซึ่งค่าปกติอยู่ในช่วง 0.5-2% อย่างไรก็ตามหากเป็นไปได้ควรควบคุมให้คงที่อยู่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.8-1.0% แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับคุณภาพและเกณฑ์การควบคุมของแต่ละโรงงาน

ปัญหาการแกว่งของคุณภาพวัตถุดิบสำเร็จ (kiln feed) ที่ป้อนเข้าหม้อเผาอาจส่งผลให้การควบคุมกระบวนการเผาเพื่อให้ได้ปูนเม็ดคุณภาพดีทำได้ยาก การเผาแบบเผาร้อน (over burning) ซึ่งอาจควบคุมให้สามารถเผาได้ปูนเม็ดที่มีคุณภาพดี แต่จะส่งผลให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการเผา เกิดความเครียดในอิฐทนไฟ (stress) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการบดปูนซีเมนต์สูงขึ้นเนื่องจากปูนเม็ดแข็งขึ้น รวมทั้งความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ (strength) ต่ำลง ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าค่า Free CaO ทุกๆ 0.1% ที่ลดลงจะต้องใช้ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นประมาณ 14 kcal/kg-cl.

วิธีการการประมาณค่า Free CaO ของปูนเม็ดที่รวดเร็ววิธีหนึ่งคือ การหาค่า Litre-weight ของปูนเม็ดโดยใช้ตะแกรงร้อนขนาดปูนเม็ดที่เก็บจากหม้อเย็น (clinker cooler) ขนาด ซึ่งโดยทั่วไปค่า Litre-weight ควรอยู่ในช่วงประมาณ 1,100 – 1,300 g/L ซึ่งปกติค่า Litre-weight จะแปรผกผันกับค่า Free CaO

อุณหภูมิของลมทุติยภูมิ (secondary air temp.) ควรควบคุมให้สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ในกระบวนการเผาในหม้อเผาให้ได้มากที่สุด ซึ่งโดยปกติจะอยู่ในช่วง 800-1,000°C การเพิ่มอุณหภูมิของลมทุติยภูมิให้สูงขึ้นจะสัมพันธ์กับความหนาของชั้นปูนเม็ดบนแผ่น Grate ที่ควบคุม รวมทั้งปริมาณลมที่เป่าเข้าไปใน recuperating zone ของหม้อเย็น (clinker cooler) อย่างไรก็ตามการวัดอุณหภูมิของลมทุติยภูมิโดยตรงนั้นโดยปกติจะทำได้ค่อนข้างยาก นอกจากจะวัดจากลมร้อนที่ดึงไปใช้สำหรับการเผาไหม้ที่ฟริชเตอร์หรือหม้อบด

ถ่าน สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิที่ไม่มีการป้องกันการแผ่รังสีความร้อนอาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่อ่านได้

โดยทั่วไปหม้อเผาที่มีฟริแคลไซเนอร์จะป้อนเชื้อเพลิงที่ฟริแคลไซเนอร์เพื่ออุ่นวัตถุดิบประมาณ 60% และป้อนผ่านหัวเผา (main burner) ที่หน้าหม้อเผา 40% ซึ่งจะช่วยให้ขนาดของหม้อเผา รวมทั้งปริมาณความร้อนในหม้อเผา (heat load) ลดลง แต่ไม่ได้หมายความว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) ในหม้อเผาจะลดลง สำหรับหม้อเผาที่ไม่มีฟริแคลไซเนอร์จะสามารถป้อนเชื้อเพลิงเพื่ออุ่นวัตถุดิบบริเวณ riser pipe ได้ประมาณ 10-20% ซึ่งจะช่วยให้ควบคุมหม้อเผาได้ค่อนข้างนิ่ง อายุการใช้งาน รวมทั้งสามารถนำเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำหรือกากของเสียมาใช้ได้ แต่ควรติดตามและควบคุมอย่างใกล้ชิด เนื่องจากหากเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อาจก่อให้เกิด CO ระบบการเผาไหม้ได้

หลังจากเดินหม้อเผาไปหลายปีอาจเกิดปัญหาการเอียงและเสียรูปบริเวณ dip tubes ของไซโคลนลูกกลางได้ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักไม่ได้มีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยน แต่สำหรับ dip tubes รุ่นใหม่จะออกแบบให้ทำจากอัลลอย (Alloy) ที่ทนอุณหภูมิได้สูงโดยสามารถติดตั้งเข้าไปแทนที่ dip tubes เดิมได้อย่างไรก็ตามสามารถสังเกตผลของ Vortex Finder (dip tubes) ที่มีต่ออุณหภูมิและความดันตกคร่อมที่ฟริสเตอร์ รวมทั้งความเปลี่ยนแปลงในการใช้เชื้อเพลิงช่วงก่อนและหลังที่ท่อถูกถอดออกหรือหลุดร่วงไปเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าจะติดตั้งใหม่หรือไม่

ในระบบหม้อเผาที่ใช้หม้อเย็น (clinker cooler) แบบ grate plate ปลายของหัวเผา (main burner) ควรติดตั้งอยู่ในแนวระนาบเดียวกับ kiln nose หรือยื่นเข้าไปในตัวหม้อเผา เพื่อป้องกันความเสียหายจากปูนเม็ดที่ร่วงลงมา รวมทั้งควรติดตั้งอยู่ในแนวศูนย์กลางของตัวหม้อเผา ผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่มักตั้งหัวเผาให้อยู่ในแนวระนาบซึ่งจะกระดกลงเมื่อมีน้ำหนักจากปูนเม็ดตกลงที่หัวเผา อย่างไรก็ตามทฤษฎีการปรับตั้งหัวเผามีด้วยกันหลายทฤษฎี ผู้ปฏิบัติงานควรพิจารณาเลือกใช้จากสภาพจริงที่เกิดขึ้นประกอบด้วย สำหรับตำแหน่งการติดตั้งหัวเผาและความเร็วลมปฐมภูมิ (primary air) บริเวณปลายหัวเผาส่งผลต่อสภาพลมร้อนในบริเวณดังกล่าว (hood aerodynamic) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสภาพการเผาในช่วง Burning Zone

แหวนดินในหม้อเผา (kiln ring) คือ สภาพการเกิดการเกาะจับตัวของ Coat ในหม้อเผาเป็นวงโดยรอบหม้อเผาในปริมาณที่มากผิดปกติ โดยปกติจะพบในบริเวณ Burning Zone รวมทั้งบริเวณท้ายหม้อเผาซึ่งจะขวางกั้นทิศทางการไหลของวัตถุดิบ รวมทั้งลมร้อนในหม้อเผา ซึ่งอาจส่งผลให้ต้องหยุดหม้อเผาเพื่อระบายออก ในทางตรงกันข้ามหากแม้ไม่ต้องหยุดหม้อเผาแต่แหวนดินที่เกิดและพังหรือร่วงเป็นระยะๆ ก็ก่อให้เกิดปัญหาปูนเม็ด Free CaO สูงได้เนื่องจากเกิดการ

ทะเล็กของวัตถุเป็นระยะๆสำหรับแวนดินที่เกิดบริเวณ Burning Zone สามารถตรวจสอบพบได้จากการใช้เครื่องสแกนเนอร์(Scanner) ซึ่งสามารถตรวจวัดอุณหภูมิเปลือกหม้อเผาได้รอบวงตลอดความยาวของหม้อเผาเพื่อให้สามารถเร่งแก้ไขโดยเร็ว อย่างไรก็ตามกรณีแวนดินก่อตัวเพิ่มมากขึ้นให้ใช้วิธีปรับความเร็วรอบหม้อเผารวมทั้งปรับเปลวไฟเข้าและออก สำหรับแวนดินที่เกิดบริเวณท้ายหม้อเผาโดยส่วนใหญ่มักเกิดจากสารระเหยที่ปนอยู่ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิง โดยเฉพาะสารระเหยของซัลเฟอร์ซึ่งควรเร่งดำเนินการแก้ไขคุณภาพของวัตถุดิบทันที

โรงงานปูนซีเมนต์บางแห่งมีการใช้วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนหรือต้องการกำจัดดินที่ปนเปื้อนน้ำมันซึ่งโดยทั่วไปอาจมีสัดส่วนน้ำมันมากถึง 3% ซึ่งถ้าปนร่วมกับวัตถุดิบสารระเหยในน้ำมันปนเปื้อนจะเกิดการระเหยเมื่อมีอุณหภูมิมากกว่า 300-400 °C และถูกปล่อยออกไปกับก๊าซทิ้ง ดังนั้นเพื่อป้องกันการปล่อยมลพิษและนำความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ วัตถุดิบที่มีน้ำมันปนเปื้อนควรถูกป้อนในที่ที่มีอุณหภูมิสูงและเพียงพอต่อการเผาไหม้ไอระเหยดังกล่าว สารที่มีการระเหยต่ำเช่นปิโตรเลียมโคก (Petroleum Coke) หรือ คาร์บอนในถ้ำ ลอยสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยสามารถใช้ประโยชน์จากความร้อนได้อย่างดี อย่างไรก็ตามถ้ำลอยอาจมีค่าคาร์บอนสูงและแวกมาก (1-30%) ถ้าไม่มีการผสมให้ดีขึ้น อาจทำให้เกิดปัญหาในการเผาได้

การควบคุมหม้อเผา

การเดินหม้อเผาเป็นศิลปะที่ซับซ้อนซึ่งมีหลักการที่สำคัญดังนี้

1. อุณหภูมิ Burning zone (จากไพโรมิเตอร์ หรือดูจากกำลังขับหม้อเผาหรือ NOx) 1500 °C
2. อุณหภูมิท้ายหม้อเผา 1000 °C
3. ออกซิเจนท้ายหม้อเผา 2.0 %

การควบคุมหม้อเผาสามารถทำได้โดยปรับความเร็วรอบของหม้อเผา อัตราป้อนเชื้อเพลิงและความเร็วพัดลม IDF ไม่ว่าจะเดินหม้อเผาในระบบ Manual หรือระบบอัตโนมัติ หม้อเผาส่วนใหญ่ยังคงมีปัญหาเกี่ยวกับแวนดิน Coating และการสูญเสียความร้อนอื่นๆ ดังนั้นจึงมีความพยายามต่างๆในการที่จะลดผลของความยุ่งยาก สร้างความเสถียรในการเดินหม้อเผาซึ่งถือเป็นสิ่งที่ต้องการของระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม

อัตราการป้อนวัตถุดิบและความเร็วรอบของหม้อเผาปกติจะถูกควบคุมแบบโดยการแปรผันตรงตามสัดส่วนคือมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ส่วนการปรับความเร็วอย่างเดียวนั้นจะใช้ใน

กรณีสั้นๆหรือกรณีพิเศษเท่านั้นและส่วนมากจะแนะนำให้ความคุมแบบความเร็วคงที่อัตราป้อนในระดับสูง

ความเร็วหม้อเผาควรจะถูกปรับเพื่อให้ไหลอยู่ในช่วง 10 – 13 % ปกติหม้อเผาแบบไซโคลนพรีฮีตเตอร์ จะหมุนที่ 2 - 2.5 rpm (50 - 70 cm/sec) และระยะเวลาของวัตถุดิบในหม้อเผาอยู่ที่ 20 – 40 นาที ขณะที่หม้อเผาที่มีพรีแคลไซเนอร์จะหมุนที่ 3.5 – 4.5 rpm (80 - 100 cm/sec) ที่ใช้เวลาในการเผาเท่ากับหม้อเผาแบบพรีฮีตเตอร์ พบว่า CaO ที่ได้จากการแตกตัวของหินปูนมีความไวในการทำปฏิกิริยามาก อย่างไรก็ตามความไวนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิจาก 900 ถึง 1300 °C ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานที่สูงในการเผาเพื่อทำให้เกิดปูนเม็ด ถ้าเพิ่มระดับการแตกตัว(Degree of Calcination) ของวัตถุดิบที่จุดก่อนเข้าหม้อเผาขณะที่ระยะเวลาการเผาเท่าเดิมจะทำให้ CaO มีความไวมากขึ้น (อัตราการการใช้พลังงานลดลง)

หม้อเผาส่วนใหญ่จะเดินพัคลม IDF เต็มที่ ดังนั้นจึงต้องปรับอัตราการป้อนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงเพื่อรักษาระดับออกซิเจนให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

หม้อเผาแบบพรีแคลไซเนอร์จะสันดาปเชื้อเพลิงที่หัวเผาโดยดึงลมจากหม้อเย็นห้องแรก ส่วนการสันดาปที่พรีแคลไซเนอร์จะใช้ลมจากหม้อเย็นห้องที่ 2 โดยผ่านท่อลมส่วนที่ 3 (Tertiary air) บางหม้อเผาจะมี Damper ที่ท่อลมส่วนที่ 3 และท่อโรเซอร์รี่เพื่อสามารถคุมปริมาณลมของจุดสันดาปทั้งสองได้แต่ส่วนใหญ่จะใช้วิธีปรับปริมาณเชื้อเพลิงให้สอดคล้องกับปริมาณลม โดยคุมระดับออกซิเจนที่ท้ายหม้อเผาที่ประมาณ 2% อุปกรณ์วัดก๊าซที่ท้ายหม้อควรติดตั้งโดยมีการป้องกันการรบกวนจากลมรั่วที่เข้าไปในหม้อเผาซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อย นอกจากนี้ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์และ NOx ก็ควรถูกวัดเช่นกัน

ปริมาณความเข้มข้นของออกซิเจนที่ท้ายหม้อขึ้นอยู่กับความนิ่งของการเดินหม้อเผาและประสิทธิภาพของการเผาไหม้ การเผาไหม้ที่ดีออกซิเจนควรอยู่ที่ 1-2 % ที่คาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า 100 ppm ขณะที่เปลวจากการเผาไหม้ที่มีการแกว่งอาจส่งผลให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์มากกว่า 0.1% และออกซิเจนมากกว่า 3% ได้ ในบางหม้อเผามีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซก่อนเข้าพัคลมIDF จะสามารถหาค่าลมรั่วได้จากค่าออกซิเจนที่สูงขึ้นได้ (เช่น 2-3 %)

โดยปกติในการเผาปูนจะมีการเก็บข้อมูลทุกๆ 2 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์หาค่า SO₃ ในปูนเม็ดและทุก 8 ชั่วโมงจะหา SO₃ และอัลคาไล จากการเก็บตัวอย่างวัตถุดิบที่กั้นไซโคลน ค่าปกติของ SO₃ที่ปูนเม็ดจะเท่ากับ 0.6 % และที่ตัวอย่างวัตถุดิบที่กั้นไซโคลนลูกล่างสุดเท่ากับ 2 - 3% ในหม้อเผาแบบ พรีแคลไซเนอร์ ระยะเวลาการเผาวัตถุดิบและอัตราการให้ความร้อนจะมีค่าค่อนข้างต่ำและอัลคาไลด์ (K, Na) จะผ่านไปกับปูนเม็ด ขณะที่ SO₃ จะเกิดวงจรระเหย

(Volatile Cycle) ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ง่ายมากถ้ามีอัลคาไลด์ต่ำ โดย SO₃ จะระเหยเมื่อเข้ามาในหม้อเผาและจะเกิดการกลั่นตัวที่โรเตอร์ไ้ปและไหลมากับวัตถุดิบเข้าหม้อเผา ถ้าสภาพการเผาร้อนมากจะเกิดวงจรมีเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการจับก้อนอุดตันที่โรเตอร์ไ้ปและที่ทางเข้าหม้อเผา ขณะที่คุณภาพปูนเม็ดจะมีค่า SO₃ ต่ำอย่างผิดปกติ แต่ถ้าหม้อเผาไม่ร้อนมาก SO₃ จะหลุดไปกับปูนเม็ดได้มาก การแกว่งของค่า SO₃ ส่งผลต่อค่าความแข็งของปูนเม็ดและความสามารถในการบด

ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อความเสถียรของหม้อ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน การใช้พลังงานไฟฟ้าในการบดซีเมนต์ รวมทั้งความสม่ำเสมอของคุณภาพของปูนซีเมนต์นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณการป้อนวัตถุดิบและเชื้อเพลิง การควบคุมสภาพหม้อเผาควรติดตามค่าวัดจากเครื่องวัดรวมทั้งรายงานผลต่างๆด้วย และสิ่งที่ควรพิจารณาคือ

- ค่าวัดที่ผิดพลาดจากเครื่องวัดความดันและก๊าซ
- ค่าแกว่งแบบช่วงสั้นเนื่องจากการลดทอนสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์
- การแกว่งของชุดป้อนเนื่องจากวัตถุดิบเหนียวหรือเปียกหรือเป็นผงมาก
- การแกว่งของคุณภาพวัตถุดิบเนื่องจากความผิดพลาดจากการวัด วิธีทางสถิติ หรือวิธีการจัดการไม่ถูกต้อง

การแกว่งของหม้อเผาจะต้องมีสาเหตุแต่กรณีที่ไม่สามารถอธิบายสาเหตุได้ว่ามาจากการป้อนหรือจากกระบวนการที่แกว่ง อาจถือว่ามีค่าผิดพลาด (Error) เกิดขึ้นแล้ว ในทางปฏิบัติควรมีเครื่องแสดงข้อมูลชนิดอ่านอย่างเดียวหรือตัวเก็บข้อมูลเพื่อไว้ติดตามค่าโดยไม่รบกวนกระบวนการเช่น อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ความเร็วหม้อเผา เป็นต้น

หม้อเผาแบบใหม่และระบบกล้องส่องในหม้อเย็นช่วยสังเกตรูปร่างเปลวและตำแหน่งวัตถุดิบในหม้อเผา สโนแมน (Show men) ที่เกิดขึ้นที่Grate Plateใต้หม้อเผา และการเป่าลมมากเกินไปสภาพของปูนเม็ดจะบอกถึงสภาพการเผาได้ ปูนเม็ดที่มีผิวและแก่นกลางสีดำเข้มเป็นเงาและเนื้อแน่นหมายถึงปูนเม็ดมีคุณภาพดี การเผาได้ที่ มีฝุ่นน้อย ในขณะที่ปูนเม็ดที่มีแก่นกลางสีน้ำตาลบอกถึง Reducing Condition ในหม้อเผา (ไม่มี O₂) หรือเกิดจากปูนเม็ดที่มีสภาพ Permeability ลดลงเพราะมี Belite และความเข้มข้นของ SO₃ สูง ซึ่งเกิดจากความสามารถในการออกซิเดชันของเหล็ก(Fe²⁺) ให้เป็นเหล็ก (Fe³⁺) ลดลงในช่วงระบายนความร้อนทำให้ปูนเม็ดส่วนนั้นไม่เป็นสีดำซึ่งเป็นผลจากการแกว่งทางคุณภาพของวัตถุดิบและภาวะสารระเหยซัลเฟอร์ต่ำในหม้อเผา การเกิดปูนเม็ดสีน้ำตาลทำให้มีอัตราการใช้ความร้อนสูง บดยาก ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ลดลงและมีเวลาในการก่อตัวต่ำ

ระบบเตือนต่างๆในระบบหม้อเผาเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากระบบเตือนปกติทางด้านเครื่องจักรและอุณหภูมิผิวหม้อเผาอันเนื่องมาจากความผิดปกติของอิฐแล้ว ระบบเตือนบางชนิดต้องการการตอบสนองที่พิเศษออกไปเช่นเครื่องวัดก๊าซที่ทำยหม้อ ถ้าคาร์บอนมอนอกไซด์เกิน 1% จะต้องมีระบบเตือนและถ้าเกิน 2% ควรมีการตัดการป้อนของเชื้อเพลิงหรือหยุดการทำงานของเครื่องกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตเพื่อป้องกันการระเบิด บางครั้งยังมีการตรวจจับเปลวไฟในช่วงอุ่นหม้อเผาด้วย โดยต้องมีระบบตัดเชื้อเพลิงอัตโนมัติเมื่อเปลวไฟดับ

ช่วงการอุ่นหม้อเผานับว่ามีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากอุณหภูมิยังต่ำจนไม่สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้อย่างสมบูรณ์ต่อเนื่องทำให้อาจมีเชื้อเพลิงสะสมในหม้อเผาและค่อยๆ สันดาปกลายเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งอาจเกิดการระเบิดได้ หากเกิดเปลวไฟดับในช่วงระหว่างอุ่นหม้อเผา ควรทำการไล่น้ำมันด้วยการดึงลมผ่านหม้อเผาในปริมาณ 5 เท่าของปริมาตร (หรือนานประมาณ 3-5 นาที) ก่อนที่จะจุดไฟอีกครั้ง

การเริ่มเดินหม้อเผาและการหยุดหม้อเผา

แผนการหยุดซ่อมหม้อเผาควรมีการจัดเตรียมและแจ้งต่อผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่าย เพื่อให้มั่นใจว่าทุกอย่างดำเนินไปอย่างถูกต้อง การอุ่นหม้อเผาต้องได้รับความเห็นชอบจากทั้งส่วนผลิตและส่วนซ่อมบำรุงว่าปิดงานเสร็จแล้ว เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัตถุติด ได้นำออกไปแล้ว และประตูทุกบานได้รับการปิด งานซ่อมหม้อเย็นอาจยังทำได้แต่ต้องไม่มีคนงานอยู่ในหม้อเย็นในช่วงของการจุดไฟอุ่นหม้อเผา โดยปกติการอุ่นหม้อเผาจากสภาวะเย็นจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมงแต่สามารถอุ่นนานกว่า 24 ชั่วโมงได้ในกรณีพิเศษ เช่นต้องการรักษาอิฐ การปรับเพิ่มอุณหภูมิสามารถทำได้โดยการเพิ่มเชื้อเพลิงและความเร็วรอบหม้อเผาตามโปรแกรมการป้อนเชื้อเพลิง (50% อัตราการป้อนปกติ) การป้อนเชื้อเพลิงที่อัตราปกติจะทำได้หลังป้อนวัตถุติดไปแล้ว 8 ชั่วโมง สำหรับหม้อเผาที่มี ฟรีแคลไฮเนออร์ เชื้อเพลิงจะป้อนเข้าพร้อมกับวัตถุติด (ใช้วัตถุติดที่ร้อนเป็นตัวจุดเชื้อเพลิง โดยป้อนผ่าน Swivel Gate ในขณะที่พัดลม IDF ควรเดินโดยควบคุมความเข้มข้นของออกซิเจนที่ประมาณ 10% ที่ทำยหม้อ จากนั้นเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะการเดินปกติจึงปรับค่าควบคุมออกซิเจนลงมาเหลือ 2-3%

สำหรับหม้อเผาที่ใช้เชื้อเพลิงแข็ง (ถ่านหิน) มักใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันเตาในการอุ่นหม้อเผาแล้วค่อยเปลี่ยนเป็นถ่านหินเมื่อเริ่มป้อนวัตถุติด แต่ถ้าหม้อบดถ่านหินใช้ลมร้อนจากหม้อเย็นก็จะต้องรอนานกว่านั้นอีกเพื่อให้ได้ลมร้อนเพียงพอในการเดินหม้อบดก่อน

ก่อนและหลังการอุ่นหม้อเผาอุปกรณ์ต่างๆจะต้องถูกตรวจเช็คจนแน่ใจได้ว่าเครื่องจักรทุกตัวพร้อมสำหรับการเดิน การอุ่นหม้อเผาในขณะที่หม้อเผายังร้อน (เช่นหยุดน้อยกว่า 24 ชั่วโมง) จะใช้เวลาอุ่นราวครึ่งหนึ่งของช่วงเวลาที่หยุด

การหยุดเดินหม้อเผา (Shut-down) เกิดขึ้นได้ในกรณีดังนี้

- กรณีฉุกเฉิน การหยุดฉุกเฉินเครื่องจักรทุกตัวหยุดพร้อมกันหมดแบบทันทีทันใด
- กรณีควบคุม คือการหยุดโดยตั้งใจจะมีการทำความสะอาดในระบบทุกๆจุด เช่นระบบ

ป้อนวัตถุดิบ ระบบถ่านหิน วัตถุดิบในหม้อเผาและในหม้อเย็น หัวเผาจะถูกนำออก มีการเดินพัดลมหม้อเย็นและหมุนหม้อเผาตามตารางมากกว่า 12 ชั่วโมง จนกระทั่งเย็นโดยเดินพัดลม IDF ที่ความเร็วต่ำ

ข้อแนะนำสำหรับการหยุดหม้อเผา

0 – 2 ชั่วโมง = ตลอดเวลา

2 – 4 ชั่วโมง = ¼ รอบทุกๆ 15 นาที

4 – 12 ชั่วโมง = ¼ รอบทุกๆ ชั่วโมง

ถ้าการหยุดน้อยกว่า 1 วันและไม่ต้องเข้าหม้อเผาหรือ ฟรีซีสเตอร์ ต้องควบคุมความร้อนไว้ในหม้อเผาโดยการหยุดพัดลม IDF ทันทีหลังจากผ่านไปแล้ว 2 ชั่วโมงให้ปิด Damper ของฟรีซีสเตอร์หรือ(ถ้าไม่มี Damper) ให้หยุดพัดลม IDF หลังจากผ่านไปแล้ว 2 ชั่วโมง

อิฐทนไฟ (Kiln Refractories)

สำหรับหม้อเผาที่มีฟรีแคลไซต์เนอรัค่าเฉลี่ยของอายุอิฐทนไฟจะยาวกว่าหม้อเผาธรรมดาโดย

อายุเฉลี่ยของอิฐทนไฟแสดงดังต่อไปนี้

Discharge – 1D 70 - 85% alumina 8 เดือน

1D - 8D Basic, dolomite, or spinel 6-10 เดือน

8D - 10D 70% alumina 21 เดือน

10D - Feed end 40% alumina 21-37 เดือน

การบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนอิฐทนไฟการทบทวนข้อมูลการเปลี่ยนอิฐเป็นสิ่งสำคัญในการลดต้นทุนและลดการหยุดหม้อเผา ในทางปฏิบัติอิฐทนไฟชนิดอลูมินาสูงจะถูกเปลี่ยน ถ้าพบว่ามี ความหนาเท่ากับหรือน้อยกว่า 10 cm ดังนั้นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำ คือ เมื่อใดที่มีการหยุดหม้อเผา และ Coat ถูกลอกออก ให้เจาะรูเพื่อตรวจสอบความหนาของอิฐทุก ๆ 1 เมตร (สามารถลดระยะ

ในการเจาะหรือลดความถี่ในการเจาะได้สำหรับอิฐอลูมินาต่ำ) การเจาะรูวัดความหนาอิฐเพื่อพิสูจน์ความผิดปกติของอิฐนั้นจะต้องระมัดระวังเมื่อใกล้เปลือกหุ้มเผา โดยเครื่องมือที่ใช้วัดความหนาอิฐแบบไม่ต้องการเจาะก็มีเช่นกัน เช่น Hogan's Lino Meter

การเปลี่ยนเชื้อเพลิง วัตถุดิบ หรือวิธีการเผาจะกระทบต่อตำแหน่งของ Burning Zone ตำแหน่งของ Coat และสภาวะของอิฐทนไฟ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยดูผลจากอุณหภูมิผิวหุ้มเผาโดยใช้สแกนเนอร์ขณะที่บริเวณใต้แหวนหุ้มเผาควรได้รับการตรวจอุณหภูมิผิวหุ้มเผาเป็นพิเศษด้วยตา เนื่องจากสแกนเนอร์ไม่สามารถตรวจวัดได้

เปลือกหุ้มเผาที่ร้อนผิดปกติสามารถควบคุมได้โดยใช้พัลลวมแบบติดตั้งอยู่กับที่หรือแบบเคลื่อนที่ทำการเป่าไปยังตำแหน่งที่ร้อนผิดปกติ กรณีที่เกิดจุดแดง "Red Spot" เมื่อเปลือกหุ้มเผามีความร้อนมากขึ้นจนเป็นสีแดงจะแสดงถึงความผิดปกติอย่างมากและไม่ควรที่จะเดินหุ้มเผาต่อ

ถ้าจุดแดงน้อยลงและเป็นจุดที่อยู่ใน Burning Zone อาจจะเป็นไปได้ที่ Coat มาจับเกาะอีกครั้งซึ่งจะสามารถเดินหุ้มเผาต่อไปได้ กรณีที่เกิดจุดเล็ก ๆ ที่เป็นเหลี่ยม อาจจะมีการอิฐหลุดออกมา 1 หรือ 2 ก้อน หากเกิดขึ้นที่ Burning Zone สามารถแก้ไขเบื้องต้นได้ โดยการหยุดหุ้มเผา 2-5 นาที ขณะมีวัตถุดิบและใช้ลมเป่าที่จุดแดง อย่างไรก็ตามการเกิดจุดแดงจะเป็นปัญหาระยะยาวซึ่งอาจทำให้เปลือกหุ้มเผาบิดเบี้ยว หากจุดแดงเกิดขึ้นที่จุดอื่นที่ไม่ใช่บริเวณการเผาใหม่สามารถแก้ไขได้โดยใช้กล่องเหล็กปิดบริเวณด้านบนนอกของพื้นที่ที่ร้อนผิดปกติ โดยต้องเท Castable ลงในกล่องและกล่องเหล็กควรตัดออกและซ่อมถาวรในการหยุดหุ้มเผาตามแผนครั้งต่อไป

จากข้อมูลทั่วไปอัตราการใช้อิฐเฉลี่ยอยู่ที่ 850 กรัม/ตันปูนเม็ด สำหรับหุ้มเผาแบบไฮดรอลิกพีซีทีเตอร์ และอัตราการใช้อิฐเฉลี่ยที่ 500 กรัม/ตันปูนเม็ด สำหรับหุ้มเผาที่มีพีซีทีเตอร์

ความหนาของอิฐทนไฟที่ใช้ก่อความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหุ้มเผา ดังนี้

< 4.2 m. 180 mm.

4.2 - 4.7 m. 200 mm.

4.7 - 5.2 m. 225 mm.

> 5.2 m. 250 mm.

และ อิฐทนไฟที่ใช้มีความถ่วงจำเพาะโดยประมาณ

Magnesite 3.05

Spinel 2.95

Dolomite 2.80

70% Alumina 2.30

40% Alumina 2.05

วิธีการก่ออิฐในหม้อเผามีอยู่ 2 วิธี คือ Epoxy method และ Ring-jack method การก่ออิฐด้วยวิธี Ring-jack ปกติจะใช้เวลาเร็วกว่าสำหรับการก่ออิฐระยะทางยาวแต่จะไม่สามารถหมุนหม้อเผาในช่วงที่มีการก่ออิฐ ถ้ามีงานบำรุงรักษาอื่นๆที่ปฏิบัติที่เปลือกหม้อเผา ชุดขับหรือซีด โดยปกติการก่ออิฐจะอยู่ที่อัตรา 0.5 เมตร/ชม.

นอกจากอิฐที่ก่อแล้วยังมี Monolithic ซึ่งประกอบด้วย Castable และ Plastic Refractory สามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่นใช้ป็นยิงหรือเทในแบบหล่อที่มีรูปร่างซับซ้อนเช่นเทที่หัวเผา

Castable เป็นคอนกรีตที่ประกอบด้วยวัสดุทนไฟและตัวผสมที่มีความต้านทานความร้อนสูง

Castable มีทั้งชนิดที่มีน้ำหนักมากและน้อยซึ่งสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- Standard (> 2.5% CaO)
- Low cement (1.0-2.5% CaO)
- Ultra-low cement (<1.0% CaO)

Castable จะถูกผสมกับน้ำ และหล่อลงแม่พิมพ์หรือยิงเข้าไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะต้องทิ้งไว้ให้แข็งตัวเป็นเวลา 24 ชม. Castable ชนิดผสมซีเมนต์ต่ำจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำที่ใช้ ดังนั้นจึงต้องพิถีพิถันในการผสมน้ำและควรวินปริมาณน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ Castable มีระยะเวลาในการเทต่ำลง จึงต้องใช้เครื่องสั่นช่วยในการเทลงแบบหล่อต่างๆ

วัสดุทนไฟชนิดพลาสติก (Plastics) มีลักษณะคล้ายดินเหนียวสามารถปั้นขึ้นรูปได้ โดยปกติจะใช้วิธีดำแทรกเข้าไปในพื้นที่มีช่องว่างและอาจจะใช้ยิงเข้าไปถ้าสามารถทำได้ โดยสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- Standard
- Air- Setting
- Chemically Bonded (ปกติจะเป็นพันธะ Phosphate)

วัสดุทนไฟประเภทนี้ควรจะถูกบ่มให้ความร้อนที่ค่าอัตราค่าหนึ่งก่อนในการแข็งตัวเพื่อให้พร้อมในการอุ่นหม้อเผาได้ต่อไป

วัสดุทนไฟชนิด Castable และ Plastic ต้องการเหล็กหนามเตยในการยึดเกาะกับพื้นที่ผิว การออกแบบและการติดตั้งจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่สามารถให้ Castable เคลื่อนที่ระหว่างเหล็กหนามเตยได้และควรเผื่อระยะขยายตัวไว้ด้วย ในการเลือกการใช้งานจะพิจารณาถึงอุณหภูมิการใช้งาน การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการทนต่อการขัดสีที่ต้องการ

แม้ว่ามีการพิจารณาเรื่องการขยายตัวไว้แล้วการติดตั้งแหวนเหล็กรับน้ำหนักที่ติดกับเปลือกหม้อเป็นสิ่งจำเป็นต้องมีเพื่อรับแรงผลัดจากอิฐจากการหมุนหม้อเผาและการเอียงของหม้อเผา การติดตั้งแหวนเหล็กจะติดตั้งที่ระยะประมาณ 1 m จากปากหม้อเผา ส่วนแหวนอื่นๆจะติดตั้งตามความต้องการแต่ต้องห่างจากแท่นหม้อเผาอย่างน้อย 5 m โดยปกติแหวนเหล็กจะเป็นแผ่นเหล็กโค้งสูง 40 - 50 mm และมีความหนาน้อยกว่าความกว้างของอิฐ 1 ก้อน ดังนั้นแหวนเหล็กจะถูกปิดด้วยแนวอิฐแหวนเหล็กกับเปลือกหม้อเผาจะติดกันโดยการเชื่อม ผลของการรับน้ำหนักของแหวนเหล็กที่เตี้ยกว่าอิฐทำให้เกิดภาระของอิฐส่วนล่างมาก (ส่วนที่ดันแหวนเหล็ก) และจะมีความเสี่ยงในภายหลังได้ (อิฐแถวแรกที่ติดแหวนเหล็กหัก/แตก) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาแหวนรับน้ำหนักที่เป็นลักษณะลิ้มซึ่งประกอบด้วยเหล็กอัลลอยด์พิเศษที่มีรูเป็นลักษณะรังผึ้งโดยเติม Castable ลงไป

การยิงฝุ่นเข้าไปในเปลวหม้อเผา (Insufflation)

การยิงฝุ่นเข้าไปในเปลวหม้อเผา ฝุ่นอาจถูกป้อนเข้าไปกับลูกที่ใช้ในการเผาไหม้หรืออาจป้อนเข้าไปในหม้อเผาโดยใช้ระบบลมเป่าต่างหากแยกจากหัวเผา วัตถุประสงค์ของการยิงฝุ่นเข้าไปในเปลวหม้อเผามีดังนี้

- เพิ่มความสว่าง และทำให้การถ่ายความร้อนจากเปลวไฟของน้ำมันหรือก๊าซดีขึ้น
- ลดอุณหภูมิของเปลวไฟและการเกิดไนโตรเจนออกไซด์ลง
- หมุนเวียนฝุ่นกลับเข้าหม้อเผา เป็นการเพิ่มโอกาสในการรวมกับปูนเม็ดซึ่งดีกว่าการถูกหอบไปกับลมร้อน
- เพิ่มการระเหยเป็นไอของอัลคาไรต์ในฝุ่น ซึ่งดีต่อการในการผลิตปูนเม็ดชนิดอัลคาไรต์ต่ำ
- สามารถผลิตปูนเม็ดชนิดพิเศษที่มีปริมาณน้อย โดยการปรับการออกแบบการผสมวัตถุดิบโดยไม่ต้องปรับการผสมวัตถุดิบใหม่ทั้งกอง หรือการป้อนวัตถุดิบใหม่ ในอีกกรณีหนึ่งถ้ามีการใช้น้ำมันหรือก๊าซทดแทนการใช้ถ่านหินเป็นการชั่วคราว ซึ่งซีเถ้าของถ่านหินมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของปูนเม็ด ก็จะสามารถรักษาสภาพปูนเม็ดได้โดยการฉีดฝุ่นวัตถุดิบที่เหมาะสมเข้าไปในหม้อเผาได้

- เหมาะสำหรับการกำจัดกากวัสดุที่มีพิษปริมาณน้อยๆที่ต้องป้อนโดยตรงเข้าที่โซนที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ เพื่อการกำจัดให้หมดสิ้นในทันที

สังเกตได้ว่าการป้อนฝุ่นวัสดุที่หัวเผา นั้นเป็นการใช้ความร้อนเกินปริมาณที่จำเป็นในการอุ่นวัสดุซึ่งมีการใช้ประสิทธิภาพความร้อนน้อยกว่าการป้อนวัสดุแบบปกติ แต่มีข้อดีตรงที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนดีกว่า อย่างไรก็ตามในกรณีใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้การแผ่ความร้อนลดลง และการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและลมอาจจะไม่ดีนัก

Kiln Bypass

ถ้าสารระเหยส่วนเกิน (K_2O , Na_2O , Sulfur หรือ Chloride) อยู่ในวัสดุหรือเชื้อเพลิง จะทำให้เกิดการระเหยใน Burning Zone และจะเกิดการกลั่นตัวในพรีฮีตเตอร์ เกิดเป็นวัฏจักรซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นวัสดุ และเกิดจุดตันใน พรีฮีตเตอร์ ซึ่งมีผลกระทบต่อการผลิตอย่างมากดังนั้นถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงส่วนประกอบที่เป็นสารระเหยได้ หรือถ้ามีผลต่อค่าใช้จ่ายมากแล้ววิธีการ Bypass น่าจะเป็นทางออกที่ดี โดยการติดตั้งระบบเพื่อดูดลมร้อนบริเวณท้ายหม้อเผาแล้วทำให้เย็นด้วยลมเย็นปริมาณ 2-3 เท่าของลมร้อนที่แยกออกมาแล้วปรับสภาพด้วยน้ำให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $150-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, ทำการแยกฝุ่นออกมา แล้วนำไปกำจัดด้วยวิธีที่ถูกต้อง

โดยทั่วไปการทำ Bypass จะทำที่ 10-70% ของลมร้อนที่เกิดขึ้นในหม้อเผา ตำแหน่งของการติดตั้งระบบ Bypass เป็นจุดที่สำคัญเพื่อให้แน่ใจว่าจุดที่มีสารระเหยสูงสุด และถูก Bypass ออกด้วยปริมาณลมร้อนต่ำสุด เพื่อให้เกิดการสูญเสียความร้อนต่ำสุดนั่นเอง ฝุ่นที่ Bypass ออกจะมีค่าประมาณ $100-300\text{ mg/Nm}^3$

ประมาณการความร้อนที่ต้องสูญเสียในการทำ Bypass เป็นดังนี้

- หม้อเผาไซโคลนพรีฮีตเตอร์ ca $5\text{ kcal/kg-cl.} \cdot x\%$ bypass
- หม้อเผาแบบพรีแคลไซเนอร์ ca $2\text{ kcal/kg-cl.} \cdot x\%$ bypass

การทำ Bypass นั้นค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ปริมาณอัลคาไลด์ในวัสดุ การสมดุลระหว่างอัลคาไรด์และซัลเฟอร์ขึ้นอยู่กับค่าระเหยที่แท้จริง อัตราการให้ความร้อนและระยะเวลาการเผา และยังขึ้นกับเกณฑ์คุณภาพปูนซีเมนต์ ในการทำ Bypass ที่ 10% ของลมร้อนจากหม้อเผา จะสามารถลดปริมาณ Cl 45-65%, 20% สำหรับ SO_3 , 10% สำหรับ K_2O และ 4% สำหรับ Na_2O มีการพัฒนาการควบคุมการ Bypass แบบอัตโนมัติโดยใช้

การสู่มตัวอย่างและวิเคราะห์วัตถุบิ ค่าคลอไรด์ที่สะสมในหม้อเผาควรถูกจำกัดที่ 5-10g/kg.ปูนเม้ด ขึ้นอยู่กับระดับการแตกตัวของหินปูน

แนวโน้มนปูนซีเมนต์ปัจจุบันจะเป็นประเภทมีอัลคาไรด์ต่ำมากขึ้น ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O} < 0.6\%$) ในขณะที่ SO_3 ที่เกินในปูนเม้ด จะขัดขวางการเกิด C3S อย่างไรก็ตามสภาวะที่มีอัลคาไรด์หรือ SO_3 เกิน 1% หรือคลอไรด์เกิน 0.015% เทียบกับน้ำหนักปูนเม้ด คาดว่าจะเกิดปัญหาของหม้อเผาได้

โดยทั่วไปก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกจับอย่างมีประสิทธิภาพในไซโคลนพรีฮีตเตอร์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่พบจากปล่องจะเป็นไพไรท์ (Pyrite) หรือเป็นซัลเฟอร์จากสารอินทรีย์ในวัตถุบิไม่ใช่ ซัลเฟอร์จากซัลเฟตหรือซัลเฟอร์จากเชื้อเพลิง

การทำสะอาดไซโคลน

พรีฮีตเตอร์ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มนที่่จะเกิดการสะสมของฝุ่นวัตถุบิได้ โดยเฉพาะที่่ข้อต่อระหว่างหม้อเผาและไรเซอร์ไ้ พนักงานเดินเครื่องที่ดีหรือไซคอดีเท่านั้นที่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดอุดตันที่่ไซโคลนได้ซึ่งสาเหตุการตันมาจากความเหนียวของการกลั่นตัวของสารระเหย (K, Na, S, Cl) หรือจากอุณหภูมิที่่เปลี่ยนแปลงไปมา ฝุ่นวัตถุบิที่่สะสมจะอยู่ในรูปของ Spurrite ($2\text{C}_2\text{S} \cdot \text{CaCO}_3$) ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดคาร์บอนเนต วัตถุบิที่่ทำหม้อเผาและไซโคลนลูกล่างๆมีแนวโน้มนที่่เกิดการจับตัวและสะสมบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำโดยเฉพาะจุดที่มีลมรั่ว ดังนั้นควรจะมีการป้องกันลมรั่วที่่รอยต่อของหม้อเผาและที่่จุดอื่นๆทั้งหมดของไซโคลนลูกล่าง

การทำความสะอาดการสะสมของวัตถุบิในระหว่างการผลิตเป็นสิ่งที่มักปฏิบัติกัน โดยใช้ Air Lances, jack-hammers และ ลมอัดและน้ำแรงดันสูง ผู้ปฏิบัติงานต้องได้รับการอบรมและได้รับอนุญาตและช่องเปิดควรเปิดเพื่อเฉพาะสำหรับทำความสะอาดเท่านั้นและต้องแน่ใจว่าไม่มีคนอยู่ใต้บริเวณพื้นที่่ทำงาน นอกจากนี้ยังพบว่า การนำ ZrO_2 และ SiC มาใส่ในวัสดุทนไฟมีแนวโน้มนที่่จะลดการสะสมได้

การเคลียร์ไซโคลนเป็นงานหลักในการเดินหม้อเผาเพื่อไม่ต้องการให้หม้อเผาหยุด โดยปกติจะใช้ Long Air lances ผ่าน angled port ในไซโคลน การใช้น้ำแรงดันสูงที่่ 700 kg/cm² สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีความเป็นไปได้ที่่จะเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและวัตถุบิถ้าปฏิบัติไม่ถูกต้อง ซึ่งทุกคนที่่ปฏิบัติจะต้องมีจิตสำนึกและเข้าใจว่าการเคลียร์ไซโคลน มีโอกาสที่่จะมีการปล่อยฝุ่นปริมาณมากและอุณหภูมิสูงออกมา เนื่องจากการใช้น้ำ ช่องเปิดและประตูข้างใต้ไซโคลนควรจะต้องไม่มีใครยืนอยู่หน้า Hood และไม่มีใครเข้าไปในหม้อเย็น

เชื้อเพลิงสำหรับหม้อเผา

ปกติเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนเม็ดได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตาหรือถ่านหิน โดยราคาและการจัดหาเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้ โดยปกติเชื้อเพลิงจะคิดราคาในเทอมของค่าความร้อนรวม (Gross Heat: ความร้อนทั้งหมดที่ได้ รวมถึงความร้อนแฝงจากการกลั่นตัวของน้ำ) ในทางปฏิบัติความร้อนสุทธิ (Net Heat) เท่านั้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตได้ (เนื่องจากไอน้ำจะไม่ได้กลั่นตัวโดยจะออกไปในลักษณะยังเป็นไอน้ำอยู่) ตัวอย่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ แสดงในตารางต่อไปนี้

ค่าความร้อนรวม kcal/kg-cli.	สุทธิ kcal/kg-cli	ผลต่าง
ถ่านหิน 5,500-7,100	5,400-7,000	2%
น้ำมัน 10,200	9,700	5%
ก๊าซธรรมชาติ (kcal/m ³) 6,200	5,600	10%

ตารางที่ ผ-1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

การเผาก๊าซจะมีการแผ่ความร้อนต่ำที่สุดและมีความต้องการปริมาณอากาศที่ใช้ในเผาไหม้ต่อหน่วยความร้อนมากกว่า ทำให้มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยปกติกำลังการผลิตของหม้อเผาสามารถเพิ่มขึ้นได้ราว 2-3% เมื่อใช้ถ่านหินแทนก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ง่ายที่สุดคือจ่ายเงินหลังการใช้และไม่มีการเก็บ

ตารางต่อไปนี้เปรียบเทียบอุณหภูมิเปลว อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้และปริมาณก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ โดยมีอัตราการให้ความร้อนในการผลิตที่ 850 kcal/kg-cli.

และมีออกซิเจนส่วนเกิน 2 % อุณหภูมิเปลว ลมใช้ในการเผาไหม้ ก๊าซจากการเผาไหม้

เชื้อเพลิง	อุณหภูมิเปลว	Nm ³ /M cal	Nm ³ /ton clinker
ถ่านหิน	2250°C	1.23	1360
น้ำมัน	2350°C	1.31	1420
ก๊าซธรรมชาติ	2400°C	1.45	1550

ตารางที่ ผ-2 เปรียบเทียบอุณหภูมิเปลว อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้และปริมาณก๊าซเสียที่เกิด

เมื่อเทียบกับน้ำมันเตาหรือก๊าซธรรมชาติแล้ว ถ่านหินมีองค์ประกอบที่แกว่งมากกว่า การผลิตโดยทั่วไปผู้ขายจะสามารถลดการแกว่งในระยะสั้นได้ ส่วนการลดการแกว่งในระยะยาวจะเป็นการจัดการโดยระบบการวิเคราะห์และควบคุมกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามถ้าเป็นการจัดหาจากผู้ขายจำนวนมากราย หรือมาจากหลายแหล่ง อาจจำเป็นต้องทำการกองหรือผสมใช้ให้ดีกว่านี้ใช้งาน

การกองเก็บถ่านหินจะต้องมีความระมัดระวังเนื่องจากถ่านหินสามารถลุกติดไฟด้วยตนเองโดยเฉพาะถ่านหินที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน ถ่านหินส่วนที่ควรจะถูกคัดแล้วโรยด้วยฝุ่นหินปูนจากนั้นกดอัดให้แน่น ถ้ามีความจำเป็นต้องเก็บในระยะยาว การทำกองจะต้องมีการกดอัดให้แน่น และปิดด้วยน้ำมันถ่านหินผสมน้ำและมีการวัดอุณหภูมิของกองโดยฝังเครื่องวัดอุณหภูมิลงไปลึก 1 – 2 เมตร จากผิวกองเพื่อตรวจสอบว่ามีการเผาไหม้หรือไม่

ปกติถ่านหินจะถูกอบแห้งแล้วบดจนมีการค้ำตะแกรง 200# (75μ) ไม่มากกว่า 0.5% ของสารระเหย จากนั้นจะถูกเป่าด้วยลมอัดที่ความดัน 120-150 g/cm² และที่ความเร็ว 60-80 m/sec

ในขณะที่น้ำมันเตาต้องมีการอุ่นเพื่อลดความหนืดก่อนที่จะบีบเข้าหัวฉีด ด้วยความดันประมาณ 20 kg/cm² ส่วนความดันที่ใช้สำหรับการกระจายเป็นละอองจะใช้ที่ 100 kg./cm² น้ำมันที่ปล่อยออกมาควรมีขนาดละอองไม่เกิน 200μ เพื่อให้สามารถเผาไหม้ได้ และอยู่ภายในเปลวไฟ

ปกติก๊าซธรรมชาติจะได้รับที่ความดัน 10-70 kg/cm² และไม่ความจำเป็นต้องใช้ลมไพรมารีแอร์ โดยก๊าซจะถูกเป่าในแนวแกนหรือผสมกับสเวิร์ลแอร์ (swirl air) โดยมีการไหลที่ความดัน 3-10 kg/cm² และความเร็วที่ 300-400 m/sec (การส่งก๊าซปกติจะถูกจำกัดที่ความเร็วเสียงคือ 430 m/sec สำหรับมีเทนที่อุณหภูมิ 0 °C) ก๊าซต้องการลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนและการกระจายความร้อนจะเป็นไปอย่างช้าๆ มากกว่าน้ำมันหรือถ่านหิน จุดที่มีความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 20 เมตร เข้าไปในหม้อเผา ขณะที่น้ำมันเตาจะอยู่ที่ระยะราว 5-10 เมตร การเผาก๊าซจึงมีลักษณะการตอบสนองช้าทำให้การควบคุมหม้อเผายากขึ้นไปด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการติดไฟของก๊าซสูงกว่าน้ำมันและถ่านหินดังนั้นก๊าซธรรมชาติจึงอาจจะมีปัญหาในการจุดติดไฟขณะที่หม้อเผายังไม่ร้อน

ในปัจจุบันมีการผลิตหัวฉีดแบบ "Precessing jet" เพื่อเพิ่มความสว่างของเปลวไฟและลด NOx ในการเผาไหม้ เทคโนโลยีนี้ได้ถูกใช้ในการผสมระหว่างก๊าซและถ่านหินด้วยการเผาไหม้ประกอบด้วย

- การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง
- การจุดติดไฟ
- การเกิดการเผาไหม้
- การปล่อยก๊าซเสีย

ในกระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่ขั้นตอนการผสมจะใช้เวลานานที่สุด การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะขึ้นอยู่กับระบบการเคลื่อนไหวยของลมผ่านหม้อเผาหรือฟรีแคสซิเนอร์ และโมเมนต์ที่ปลายหัวฉีดจะมีความสัมพันธ์กับโมเมนต์ของลมทุติยภูมิ

ในปัจจุบันนี้ราคาของเชื้อเพลิงมักเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดของต้นทุนดังนั้นบริษัทส่วนใหญ่จึงมีแนวโน้มที่จะหาเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกมาทดแทน ปิโตรเลียมโค้กเป็นหนึ่งในทางเลือกและเป็นเชื้อเพลิงที่ดี โดยเฉพาะมีค่าความร้อนสูง แต่ในบางตลาดก็มีราคาสูงขึ้นทำให้ไม่คุ้มทุนในการนำไปใช้ โดยปกติ

ปิโตรเลียมโค้กจะมีส่วนประกอบของซัลเฟอร์อยู่ระหว่าง 3-6% ซึ่งเป็นตัวจำกัดอัตราการใช้ปิโตรเลียมโค้กมีอยู่ 2 ชนิดหลัก คือ “Delayed” และ “Fluid” ปิโตรเลียมโค้กชนิด Delayed เป็นชนิดที่มีน้ำหนักมากมาจากกระบวนการ Delayed Batch โดยให้ความร้อน 500 °C ภายใต้แรงดูดจะมีค่าสารระเหยอยู่ในช่วง 8-16% ในขณะที่ถ้าให้ความร้อนที่ 1700 °C จะมีค่าสารระเขยน้อยกว่า 1% ปิโตรเลียมโค้กชนิดนี้สามารถบดกับถ่านหินได้ โดยสามารถใช้ได้ที่ 60% ของเชื้อเพลิงทั้งหมด (มีผู้แจ้งว่าสามารถใช้ได้ถึง 100%) ส่วนปิโตรเลียมโค้กชนิด Fluid จะประกอบด้วย อนุภาคกลมขนาดเล็กที่เป็นผลมาจากกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิ 650 °C สารระเหยอยู่ที่ 5-10% และจะแข็งมากโดยปกติจะถูกยิงเข้าหม้อเผาโดยไม่ต้องบดในอัตรา 10-20% ของเชื้อเพลิงทั้งหมด

นอกจากนี้ยังมีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนอื่นๆอีก เช่นกากของเสียจากกระบวนการผลิตต่างๆ ซึ่งบางครั้งอาจได้ค่ากำจัดด้วย อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาในการนำมาใช้ เช่น การจัดหากากของเสียที่มีค่าความร้อนสูงและใช้ง่าย (สารละลายหรือน้ำมันเครื่องใช้แล้ว) หรือปัญหาด้านการแข่งขันราคาของเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้แล้วกากของเสียประเภทของแข็งต่างๆ ทั้งเป็นพิษและไม่เป็นพิษจะมีปัญหาเกี่ยวกับข้อกำหนดที่มากมายและยุ่งยากในการนำมาใช้ประโยชน์ และต้องมีการตรวจสอบความสม่ำเสมอด้านคุณภาพและการปนเปื้อนด้วย ยางรถยนต์มีความเป็นไปได้ที่นำมาใช้แต่มีปัญหาเรื่องการกองเก็บ ในขณะที่การทำให้เป็นชิ้นเล็กๆเพื่อสะดวกในการใช้ก็มีต้นทุนสูงมาก การป้อนเชื้อเพลิงแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น ยางทั้งเส้นมีผลกระทบต่อารเดินหม้อเผาซึ่งจำเป็น

ที่ต้องเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ ซึ่งมีลักษณะแบบลูกคลื่น ตารางต่อไปนี้จะแสดงตัวอย่างกากของเสียต่างๆที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

สารละลาย น้ำหล่อลื่นใช้แล้ว

กากตะกอนสี กากตะกอนน้ำมัน

เศษพลาสติก ยางรถยนต์

กากตะกอนน้ำเสีย เศษยาง

หม้อเผาที่มีการใช้เชื้อเพลิงทดแทน จะมีต้องมีรายละเอียดในการจัดการและควบคุม เพื่อลดผลกระทบที่อาจมีต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยมีการสุ่มตัวอย่างและตรวจเช็คก่อนการใช้งานทุกครั้งที่มีการขนส่ง โดยทั่วไปค่าความร้อนไม่ควรมีต่ำกว่า 4,500 kcal/kg-cl. . และคลอไรด์น้อยกว่า 1% และโรงงานส่วนใหญ่จะไม่ใช้เชื้อเพลิงที่มีสารพีซีบี (PCB:สารก่อมะเร็ง) เกิน 50 ppm เชื้อเพลิงทดแทนสามารถป้อนเข้าหม้อเผาที่บริเวณโรเตอร์เป้ ปริแคลไซเนอร์ หรือที่หัวเผา

การเผาด้วยถ่านหิน

การใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อเผาจะมีการใช้อยู่ 2 แบบ (รูปที่ 4-4) 1) แบบเผาตรง (Direct firing) จะมีการบดถ่านหินและป้อนโดยตรงเข้าหัวเผา ลมที่ใช้ในการอบแห้งถ่านหินจะเป็นลมที่ใช้ลำเลียงถ่านหินด้วยโดยเป่าเข้าในหัวเผาเหมือนเป็นลมไพร์มารีแอร์ (ประมาณ 15-30% ของปริมาณลมที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด) 2) แบบเผาทางอ้อม (Indirect Firing) จะมีการเก็บถ่านหินที่บดแล้ว ก่อนที่จะป้อนเข้าหม้อเผา ซึ่งระบบทั้ง 2 จะมีความแตกต่างกันในหลายประเด็นดังนี้

ระบบเผาทางอ้อมจะให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าเนื่องจากสามารถลดปริมาณไพร์มารีแอร์ได้และยังสามารถแยกความชื้นจากการอบแห้งถ่านหินออกจากไพร์มารีแอร์ได้ด้วย ซึ่งใช้ได้กับทุกหัวเผายกเว้นหัวเผาแบบใช้ลมไพร์มารีแอร์ต่ำ เนื่องจากส่วนผสมที่ไม่ดีของเชื้อเพลิงและอากาศขณะที่ไอน้ำที่ปนอยู่ในเปลวไฟจะมีสภาพเหมือนตัวช่วยในการเผาไหม้ สิ่งที่สำคัญที่สุดคือความสามารถของระบบทางอ้อมที่ประกอบด้วยหม้อบด 1 ใบ แต่สามารถป้อนเชื้อเพลิงส่งไปให้หัวฉีด 2 จุดหรือมากกว่าได้ ขณะที่การเผาแบบตรงจะต้องใช้ 1 หม้อบดต่อ 1 หัวเผา การระบายอากาศของระบบการบดจะทำให้สูญเสียสารระเหยซึ่งมีค่าความร้อนราว 280 kcal/kg-cl.

ถ่านหินสามารถบดโดยใช้หม้อบดได้หลายชนิด แต่นิยมใช้หม้อบดแบบตั้ง (Vertical Mill) ในการบดเช่น Badcock E-Mill แม้ว่าจะมีการใช้ในงานอุตสาหกรรมซีเมนต์ไม่มาก แต่ก็นิยมใช้งานบดถ่านหินในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า

โดยทั่วไปหม้ออบแบบตั้งจะถูกออกแบบให้มีการใช้งานกับเครื่องคัดแยกแบบ Intergral Static Classifiers แต่มีบ้างที่ใช้ Dynamic classifiers ซึ่งสามารถปรับความละเอียดได้โดยปรับความเร็วของโรเตอร์ ระยะห่างของลูกกลิ้งและจานหมุนควรวางกันประมาณ 5-10 mm. และขนาดของถ่านหินที่ป้อนเข้าหม้ออบมีขนาดไม่เกิน 25 mm. และประมาณค้ำตะแกรง 10 mm. ที่ 30% หินและเศษเหล็กจะถูกแยกโดยหล่นออกจากจานหมุนลงไปในลมร้อนและถูกกวาดโดยตัวกวาดแบบหมุน การมีวัสดุออกมามากกว่าปกติ (เช่นมากกว่า 2% ของอัตราการป้อน) อาจเกิดจากช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งกับจานหมุนมีค่ามากกว่า 15 mm. หรือระยะห่างของจานหมุนและ louvre ring มีค่ามากกว่าปกติ เช่นถ้าช่องว่างมีระยะมากกว่า 10 mm. จากปกติ จะไม่สามารถรักษาระดับความเร็วของลมซึ่งต้องการที่ 25 m/sec ได้

หม้ออบแบบแบบตั้งสามารถอบแห้งถ่านหินได้ถึงระดับความชื้น 10% ตามการออกแบบของแต่ละโรงงาน โดยปกติหม้ออบจะถูกออกแบบสำหรับถ่านหินที่ความแข็งขนาด 55 HGI ถ่านหินที่มีค่า HGI ต่ำลงจะมีความแข็งมากขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการอบของหม้ออบลดลง ในการออกแบบหม้ออบหนึ่งๆ ถ้าหม้ออบและพัดลมมีชุดขับแยกกันจะสามารถเพิ่มอัตราการผลิตขึ้นได้โดยการปรับความเร็วของจานหมุนให้สูงขึ้น (เช่นจาก 900 rpm เป็น 1200 rpm) ส่วนการปรับด้านพัดลมจะต้องมีการประเมินด้านวิศวกรรมก่อน

อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบไล่ความชื้นไม่ควรเกิน 315°C และถ่านหินไม่ควรถูกอบแห้งจนมีความชื้นผิวต่ำกว่า 1% อุณหภูมิของลมที่ออกจากหม้ออบไม่ควรเกิน 65°C สำหรับระบบเผาไหม้อัอมและ 80°C สำหรับระบบเผาไหม้ตรง ความเร็วของลมที่หอบควรมากกว่า 20 m/sec เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของฝุ่นในท่อ

เพื่อให้มั่นใจต่อการลำเลียงถ่านผง อัตราไหลต่ำสุดของลมที่ใช้ในการลำเลียงควรอยู่ระหว่าง 1-1.5 kg (0.8-1.2Nm³) อากาศตอกิโลกรัมถ่านหินผง โดยจะต้องใช้ลมที่อัตรานี้แม้ว่าจะไม่ต้องการอบแห้งถ่านหินก็ตาม อาจจะมีการติดไฟขึ้นเนื่องจากมีเศษผ้าหรือไม้ในหม้ออบโดยสามารถตรวจพบได้จากอุณหภูมิของลมที่ออกจากระบบที่เพิ่มขึ้นอย่างผิดปกติและไม่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของลมร้อนเข้าหรืออัตราการป้อน ไฟที่เกิดขึ้นในหม้ออบในระบบเผาไหม้ตรงสามารถทำให้หมดไปได้โดยการเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบเพื่อให้ความร้อนและอุณหภูมิของวัตถุดิบต่ำลง ส่วนหม้ออบในระบบเผาไหม้อัอม ปกติจะดูค่าคาร์บอนมอนอกไซด์เพื่อตรวจสอบการเผาไหม้แทนการดูอุณหภูมิเนื่องจากการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแสดงผลได้ช้า หากมีการลุกติดไฟสามารถดับได้โดยการฉีดน้ำหรือใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไนโตรเจนพร้อมทั้งคาร์บอนไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพดีกว่า

ลมร้อนที่ใช้สำหรับการไล่ความชื้นถ่านหินสามารถดึงจากลมร้อนทิ้งของหม้อเย็นหรือลมร้อน (มีปริมาณออกซิเจนต่ำ) จากฟรีฮีตเตอร์ โดยต้องควบคุมอุณหภูมิลมร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิลมขาออกตามที่กล่าวแล้วข้างต้น การดึงลมจากหม้อเย็นจะได้อุณหภูมิประมาณ 370 °C ขณะที่ถ้าดึงลมร้อนจาก ฟรีฮีตเตอร์ จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 300-350 °C โดยมีออกซิเจน 5% และความชื้น 6% อุณหภูมิและความชื้นเป็นเรื่องที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบระบบ อย่างไรก็ตามการลุกติดไฟในหม้อบดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงเริ่มเดินหม้อเผาหรือเพิ่งหยุดหม้อบด ขณะที่ปริมาณออกซิเจนที่มีน้อยในอากาศจะทำให้ลดความเสี่ยงในการเกิดไฟในหม้อบดขณะเดินปกติ

ในระบบการเผาไหม้ตรงถ่านหินผงจะถูกเป่าออกจากหัวเผาที่ความเร็วปลายหัวฉีดประมาณ 80 m/sec ซึ่งความเร็วนี้ควรจะสูงกว่าความเร็วเปลวไฟเสมอโดยอาจสูงถึง 25 m/sec ปลายท่อหัวเผาควรมีขนาดเล็กลงเพื่อให้เกิดการความปั่นป่วนซึ่งจะช่วยให้การผสมระหว่างเชื้อเพลิงและลมดีขึ้น สำหรับระบบเผาไหม้อ้อมหัวเผาถูกออกแบบให้มี 3 ช่อง (ตามรูปที่ 4-4) โดยช่องนอกสุดเป็นช่องสำหรับเจ็ตแอร์ (Jet air) ถัดไปเป็นช่องสำหรับถ่านหินและด้านในจะเป็นสแวลลแอร์ การที่จะได้โมเมนต์ที่เพียงพอสำหรับการหมุนเวียนเปลว (Flame Recirculation) โดยใช้ลมไพรมารีแอร์ที่น้อยนั้น เจ็ตแอร์ควรมีความเร็วสูงถึง 440 m/sec และ สแวลลแอร์ จะมีความเร็ว 160 m/sec ส่วนช่องกลางอาจจะใช้สำหรับเชื้อเพลิงชนิดที่สอง

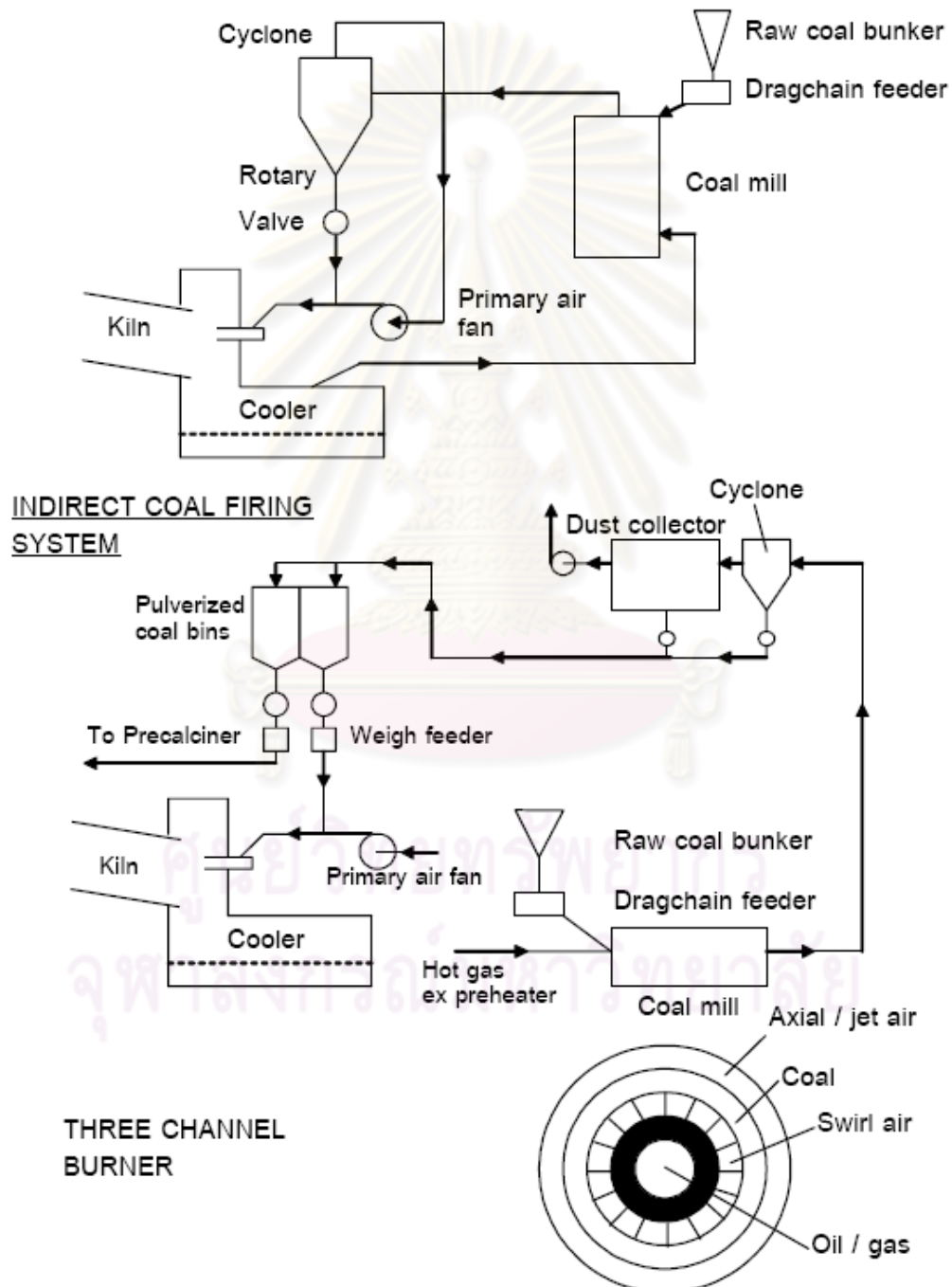
การลุกติดไฟของถ่านหินผงเป็นเรื่องที่ปกติและหลีกเลี่ยงได้ยาก เนื่องจากถ่านหินผงจะสัมผัสกับลมก่อนที่จะลำเลียงไปถึงหัวเผาซึ่งเกี่ยวข้องกับการติดไฟและระเบิดด้วยตัวเอง การออกแบบระบบเผาไหม้ถ่านหินจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและควรพิจารณาถึงเรื่องต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิต่ำสุดในการติดไฟของการผสมเชื้อเพลิงกับลม โดยถ่านหินจะมีอุณหภูมิตัดไฟอยู่ระหว่าง 200-750 °C ขณะที่อุณหภูมิตัดไฟของสารระเหยจะมีค่าต่ำกว่านี้
- ปริมาณของเชื้อเพลิงในอากาศต่ำสุดที่สามารถระเบิดได้ มีค่าประมาณ 40 g/m³ (ผุ่นจะแขวนลอยไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน)
- ปริมาณออกซิเจนมากที่สุดที่ยอมรับได้ที่ไม่เกิดการจุดติดไฟ คือ 12%
- ระบบถ่านหินผงจะต้องถูกออกแบบให้สามารถทนความดันได้ 3.5 kg./cm² หรือมีระบบลดแรงดันจากการระเบิด

ผุ่นถ่านหินมีแนวโน้มที่จะระเบิดเพิ่มขึ้นถ้าถ่านหินนั้นมีสารระเหยและความละเอียดสูงขึ้น แต่จะลดลงถ้ามีน้ำหรือผุ่นเฉื่อย (เช่นหินผุ่น) มากขึ้น

ฝุ่นถ่านหินจะมีแนวโน้มการจุดติดไฟด้วยตนเองเพิ่มขึ้นตามความหนาของฝุ่นและความง่ายในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เช่นไฟโรท์ (มากกว่า 2%) และถ่านหินที่คูลอยู่สามารถถูกเป็นไฟได้ถ้าถูกกวน

Figure7 DIRECT COAL FIRING SYSTEM



รูปที่ ๗-7 DIRECT COAL FIRING SYSTEM

การทำให้ปูนเม็ดเย็น

หม้อเย็นมีไว้สำหรับทำให้ปูนเม็ดเย็นตัวลงจากอุณหภูมิ 1,200 °C ขณะที่ออกจากหม้อเผาให้ลดลงเหลืออุณหภูมิน้อยกว่า 100 °C โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากปูนเม็ดกับอากาศปกติ ทำให้อากาศที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและใช้เป็นอากาศ สำหรับการเผาไหม้ในหม้อเผาหรือในพรีแคลไซเนอร์ ต่อไป

หม้อเย็นแบบGrate Plateถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดยบริษัท Fuller เป็นชนิดเคลื่อนที่ไปหน้า - หลัง (Reciprocating) ประกอบด้วยห้องใต้Grate Plateหลายห้อง แต่ละห้องมีพัดลมสำหรับเป่าลมเข้าหม้อเย็นแบบGrate Plateสามารถควบคุมได้ทั้งปริมาณลมและความดัน โดยอาจแบ่งห้องใต้Grate Plateได้ถึง 8 ห้อง และมีชุดขับแผ่นGrate Plateได้ถึง 2-3 ชุด Grate Plate ของ Fuller กำหนดเป็นค่าความกว้างและความยาวของแต่ละGrate Plate โดยใช้ตัวเลขเป็นชุด เช่น 825S/1031/1031 หมายถึง Grate Plate1 มีความกว้าง 8 ฟุต ยาว 25 ฟุต (S หมายถึง Sloped คือมีความเอียง), Grate Plate 2, 3 มีความกว้าง 10 ฟุต ยาว 31 ฟุต ไม่มีความเอียง เป็นต้น ความดันห้องใต้ Grate Plate1 มีค่าประมาณ 600 mm. และจะลดลงจนมีค่าประมาณ 200 mm. ที่ห้องใต้Grate Plateห้องสุดท้าย

หม้อเย็นแบบGrate Plate สามารถยืดอายุการใช้งาน(ให้ยาวกว่าอายุหม้อเผา)ได้ โดยการเพิ่มความดันและปริมาณอากาศที่ห้องใต้Grate Plateและการทำเช่นนั้น ไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนักต่อการไหลของปูนเม็ดที่Grate Plate1 หรือต่ออุณหภูมิลมทุติยภูมิที่จะลดลงหรือค่า ความร้อนสูญเสียที่ออกจากหม้อเย็นที่เพิ่มมากขึ้น

Grate Plateแบบปกติทั่วไปจะกำหนดระยะห่างใต้จุกแต่ละGrate Plate 3-5 mm. ตัวรองรับที่ผิดปกติมีผลต่อระยะห่างและหน้าสัมผัสของแผ่นGrate Plateซึ่งจะลดประสิทธิภาพของหม้อเย็นจึงควรมีการจัดแนวใหม่โดยการใส่แผ่นรอง (Shim) ตลอดความยาวของGrate Plate

โดยทั่วไปการระบายความร้อนปูนเม็ดให้เหลืออุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C จะต้องใช้อากาศปริมาณ 2-2.5 Nm³/kg ปูนเม็ด ซึ่งอากาศจำนวนประมาณ 0.9 Nm³/kg จะถูกนำไปใช้ต่อการเผาไหม้และที่เหลือจะถูกปล่อยทิ้งซึ่งคิดเป็นค่าความร้อนประมาณ 100 kcal/kg-cl. โดยขนาดของหม้อเย็นจะอยู่ที่ 35 – 40 t/m²/day และความหนาของปูนเม็ดบนแผ่นGrate Plateจะอยู่ในช่วงประมาณ 200 – 400 mm

ปัจจุบันผู้ผลิตหม้อเย็นทุกรายมีการออกแบบท่อลมที่จะนำลมไปยังช่องแผ่นGrate Plate และจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการนำลมออกสู่ชั้นของปูนเม็ดมากกว่าGrate Plateแบบเดิม โดย

Grate Plateจะใช้อากาศประมาณ 1.5-2 Nm³/kg และอัตราการผลิต 45-55 t/m²/day โดยมีความหนาของชั้นปูนเม็ด ~800 mm สำหรับท่อลมของGrate Plateของบริษัท FL.Smidth ถูกออกแบบให้อากาศผ่านในแนวนอนไปยังช่องลมหน้าแผ่นGrate Plateทำให้ลดการตกลงมาของปูนเม็ดที่ละเอียดและทำให้การเปลี่ยนแปลงการไหลของอากาศขึ้นกับความหนาของชั้นปูนเม็ด ลดลง Grate Plateในลักษณะนี้จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Reduced Fall Through (RFT)

ชั้นส่วนGrate Plateจำนวนมากจะถูกประกอบบนโครงแบบแขนแกว่งตุ้มและถูกขับโดย 1 ชุดขับเพื่อลดการซ่อมบำรุง นอกจากนี้ยังมีGrate Plateชุดแรกที่ยืดหยุ่นและไม่เคลื่อนที่โดยใช้ท่อลมอีก 6-9 ชุด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการกระจายของปูนเม็ดก่อนเข้าGrate Plateถัดไป นอกจากนี้ยังมี การป้องกันความร้อน (Heat Shield) ที่ควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิคคอยกันที่ปลายห้อง Recouperation เพื่อนำอากาศไปใช้เป็นลมทุติยภูมิหรือลมเทอร์เชียรีแอร์ (Tertiary Air) เป็นการลดการสูญเสียความร้อนที่ปล่อยออกสู่ปล่อง โดยGrate Plate 1 ชุดมีมูลค่าการติดตั้งประมาณ 0.5-1.0 ล้านเหรียญสหรัฐ

เนื่องจากปูนเม็ดที่ออกจากหม้อเผามีการเปลี่ยนแปลงทั้งอัตราและขนาด ทำให้มีผลต่อความดันตกคร่อมที่ห้องใต้Grate Plateเนื่องมาจากปูนเม็ดบนแผ่นGrate Plateที่เปลี่ยนไป โดยปกติความดันที่ห้องใต้Grate Plateจะถูกรักษาให้คงที่ (โดยเฉพาะห้องที่ 2) ได้โดยการควบคุมความดันกับความเร็วที่ใช้ขับGrate Plate1 ซึ่งควบคุมความเร็วที่ใช้ขับGrate Plate2 โดยความเร็ว Grate Plate2 ต้องเร็วกว่า Grate Plate1 10% ที่ความกว้างGrate Plateเท่ากัน

ปูนเม็ดขนาดใหญ่และชั้นส่วนที่หลุดจาก Coating ในหม้อเผา จะไม่สามารถทำให้เย็นอย่างมีประสิทธิภาพจึงได้มีการติดตั้งตัวย่อยปูนเม็ดในหม้อเย็นแบบGrate Plateเพื่อลดขนาดของปูนเม็ดโดยอาจติดตั้ง Roll Crusher ที่ตอนกลางของหม้อหรือติดตั้ง Hammer Breaker ที่ตอนท้ายของหม้อเย็น (เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องการซ่อมบำรุง) นอกจากนี้ยังมีการแนะนำให้ใช้ Acoustic Horn ในการเพิ่มประสิทธิภาพการนำความร้อนกลับคืนของหม้อเย็น

การตรวจสอบหม้อเย็นด้วยการมองดูเป็นเรื่องสำคัญ เช่นการตรวจพบ “Red River” ซึ่งแสดงถึงการเกิดปัญหาที่แผ่นGrate Plateหรือเป็นเรื่องของการกระจายลม หรือการตรวจพบอาการ “blow through” ซึ่งแสดงถึงอากาศไหลมากผิดปกติที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของGrate Plate

การตรวจสอบการทำงานของหม้อเย็นสามารถตรวจสอบจากพารามิเตอร์ต่างๆต่อไปนี้
- อุณหภูมิของ Secondary Air (°C)

- อุณหภูมิของ Tertiary Air ($^{\circ}\text{C}$)
- อุณหภูมิลมร้อนจากปล่อง ($^{\circ}\text{C}$)
- ปริมาณของลมร้อนจากปล่องหรือกำลังพัดลม (amps)
- อุณหภูมิปูนเม็ด ($^{\circ}\text{C}$)

แผ่นGrate Plateที่แตกชำรุดอาจทำให้ปูนเม็ดที่ร้อนตกลงไปยังห้องใต้Grate Plateและสร้างความเสียหายมากได้ ดังนั้นจึงต้องมีเครื่องวัดอุณหภูมิหรือวัดระดับติดตั้งอยู่ใต้ชุดขับGrate Plateเพื่อสร้างสัญญาณเตือนหากมีปูนเม็ดร้อนตกลงมาสะสมอยู่มากที่ห้องใต้Grate Plate การวัดปริมาณการผลิตปูนเม็ดไม่สามารถวัดได้โดยตรงต้องใช้การคำนวณจากปริมาณวัตถุดิบที่ป้อนหรือจากการจ่ายซีเมนต์แต่จะมีประโยชน์มากถ้ามีการติดตั้งเครื่องวัดน้ำหนักที่ระบบลำเลียงปูนเม็ดเพื่อตรวจสอบได้ถูกต้อง

หม้อเย็นชนิดอื่น ๆ ที่มีการใช้ในปัจจุบันโดยไม่ต้องใช้ระบบจับฝุ่นได้แก่

- หม้อเย็นแบบโรตารีมีลักษณะเป็นถังที่หมุนเพื่อยกปูนเม็ดขึ้นไปแล้วเทลงมาผ่านอากาศที่นำเข้ามาสำหรับการเผาไหม้ หม้อเย็นชนิดนี้ใช้ได้เฉพาะหม้อเผาขนาดเล็ก (เช่นหม้อเผาซีเมนต์ขาว เป็นต้น)
- หม้อเย็นแบบแพนเนทตารี (Planetary) ประกอบด้วยท่อหลายอันเรียงกันเป็นแหวนติดอยู่กับเปลือกหม้อเผาและหมุนไปพร้อมกับหม้อเผาทำงานคล้ายกับมีหม้อเย็นแบบโรตารีหลายๆ ชุดหม้อเย็นชนิดนี้อาจสร้างปัญหาให้กับตัวหม้อเผา การควบคุมสภาพเปลวไฟยากจึงเป็นอุปสรรคในการแก้ไขสภาพปัญหาพิเศษ นอกจากนี้ยังเป็นการยากที่จะกระจายปูนเม็ดเข้าไปในท่อให้เหมาะสมด้วย

หม้อเย็นแบบโรตารีและแพนเนทตารีมีประสิทธิภาพน้อยกว่าหม้อเย็นแบบGrate Plate เนื่องจากปริมาณอากาศถูกจำกัดด้วยปริมาณที่จะนำไปใช้สำหรับการเผาไหม้ที่หม้อเผาเท่านั้น แต่ด้วยการมีอุปกรณ์ภายในในการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อุณหภูมิปูนเม็ดที่ออกจากหม้อเย็นอยู่ในระดับ 180°C (แต่ก็ยังสูงอยู่ดี) การเปลี่ยนหม้อเย็นจากแบบโรตารีเป็นหม้อเย็นแบบGrate Plate จึงเป็นที่นิยมกัน

หม้อเย็นแบบ G (จาก Claudius Peters) มีประสิทธิภาพมาก ปูนเม็ดที่ออกจากหม้อเย็นชนิดนี้จะมีอุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยการรวมหม้อเย็นแบบแพนเนทตารี (ซึ่งใช้ปริมาณอากาศน้อย) และหม้อเย็นแบบGrate Plateเข้าด้วยกันทำให้สามารถเพิ่มกำลังของหม้อเผาได้สูงกว่าระดับหม้อเย็นแบบ Grate Plate ปกติปูนเม็ดที่ผ่านหม้อเย็นและการย่อยแล้วจะถูกปล่อยให้มีการถ่ายเทความร้อนในท่อที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ หม้อเย็นชนิดนี้ออกแบบโดยพิจารณาความกว้าง

ความยาวและการลดลงของอุณหภูมิปูนเม็ด หม้อเย็นชนิดนี้ต้องการการบำรุงรักษาบ่อย แต่มีข้อเสียคือปูนเม็ดที่ละเอียดจะอยู่ในหม้อเย็นนานทำให้ต้องมีการควบคุมระดับชั้นปูนเม็ดในหม้อเย็นอย่างใกล้ชิด

กลไลหม้อเผา

เปลือกหม้อเผาถูกออกแบบสำหรับรองรับการก่ออย่างแน่นหนาของอิฐทนไฟภายในและลำเลียงวัตถุดิบจากทางเข้าจนออกไปเป็นปูนเม็ด เนื่องจากการเปลี่ยนอิฐทนไฟเป็นสาเหตุหลักของการหยุดหม้อเผา จึงเป็นเรื่องสำคัญในการจัดการปัจจัยต่างๆที่มีผลต่ออายุอิฐ เพื่อให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ขณะที่เปลือกหม้อเผาต้องอยู่ในสภาพที่ดีด้วย

แม้ว่าหม้อเผาจะทำด้วยเหล็กเป็นทอทรงกระบอกตรง แต่ในความเป็นจริงจะตักห้องข้างและเสียบรูปได้ตรงช่วงระหว่างแท่นหม้อเผา หน้าตัดที่ตำแหน่งใด ๆ จะเป็นวงรี การเปลี่ยนตำแหน่งของแกนตามแนวยาวจะไม่เหมือนกันในจุดต่างๆของหม้อเผา ที่บริเวณใกล้กับลูกกลิ้งและคานเหนือหน้าตัดแกนตามแนวยาวจะเคลื่อนที่ในแนวนอน ขณะที่ตำแหน่งระหว่างแท่นหม้อเผา (บริเวณที่ตักห้องข้าง) แกนจะเปลี่ยนตำแหน่งในแนวตั้ง เปลือกหม้อเผาจะบิดตัวไปมาน้อยเพียงใดขึ้นกับการหมุนความเครียดของอิฐทนไฟที่เกิดความเครียดจากความร้อน โดยอิฐทนไฟจะดูดซับความเครียดไว้ได้เพียงใดขึ้นกับคุณลักษณะของอิฐและการเคลื่อนที่ระหว่างอิฐด้วยกัน ความแข็งแรงของอิฐและจุดที่เชื่อมต่อกันของอิฐจะทำให้ Lining ฝิดรูปไปได้บ้างโดยไม่เสียหาย แต่ถ้ามีความเครียดที่มากเกินไปอาจทำให้อิฐทนไฟเสียหายได้ เป็นการยากที่จะหาค่าความเครียดของอิฐทนไฟแต่สามารถสรุปได้ว่าควรหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดความเครียดที่มากเกินไปกับเปลือกหม้อเผาเนื่องจากจะส่งผลแก่อิฐทนไฟการตั้งและจัดวางที่เหมาะสมของลูกกลิ้งหม้อเผา และการดูแลระยะแผ่นรองลูกกลิ้งอย่างถูกต้องเป็นเรื่องสำคัญอันดับแรกที่จะช่วยลดความเครียดลงได้

เพลาลูกกลิ้งจะต้องเอียงเป็นค่าเดียวกับหม้อเผา แม้ว่าจะมีการบิดตัวเนื่องจากภาระในแนวตั้งของหม้อเผาสูงถึง 100–500 μ เพลาลูกกลิ้งจะต้องขนานกันเพื่อหลีกเลี่ยงแรงกระทำที่จะเกิดกับแบร็งเพลลาจะต้องลาดเอียงน้อยกว่าแนวแกนของหม้อเผาเล็กน้อย เพื่อให้เกิดแรงกระทำที่ลูกกลิ้งให้ผลึกหม้อเผาขึ้น เมื่อตั้งค่าลาดเอียงให้แบร็งเหมาะสมแล้ว ลูกกลิ้งจะหมุนโดยเคลื่อนตัวลงแต่จะมี Thrust Bearing คอยประคองอยู่ การเปลี่ยนความลาดเอียงเล็กน้อยของลูกกลิ้งแทนหม้อเผาจะช่วยลดแรงกระทำลงที่มีต่อ Thrust Roller ลงได้

แม้ว่า Thrust Roller จะถูกออกแบบมาให้รับแรงกระทำลงของหม้อเผา โดยใช้ระบบไฮดรอลิกจึงสามารถทำงานเช่นนี้ได้ตลอดเวลา อย่างไรก็ตามเมื่อลูกกลิ้งทุกตัวมีความลาดเอียงอยู่ใน

แนวที่เหมาะสมภายใต้การเดินหม้อเผาที่ปกติ ลูกกลิ้งแต่ละตัวจะสร้างแรงกระทำขึ้นเพื่อผลักดันหม้อเผาให้เคลื่อนที่ขึ้น โดยหม้อเผาได้กดน้ำหนักหรือมีการสัมผัส Thrust Roller เป็นระยะๆเท่านั้น

แรงกระทำที่เกิดกับลูกกลิ้งสามารถตรวจสอบได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิของ Thrust Bearing และอัตราการสึกของแบร้ง โดยหม้อเผาส่วนใหญ่ไม่มีเครื่องวัดอุณหภูมิแบร้งโดยตรง แต่จะใช้อุณหภูมิของเปลือกแบร้งหรือการวัดอุณหภูมิของบ่าเพลาลูกกลิ้งแทนโดยใช้ไพโรมิเตอร์ วิธีอื่น ๆ ที่ใช้ตรวจสอบแรงกระทำที่เกิดกับลูกกลิ้งคือการถ่วงน้ำหนักกับผิวของลูกกลิ้งไปทั้ง 2 ทิศทาง โดยผิวลูกกลิ้งจะเรียบในทิศทางหนึ่งขณะที่จะหยาบในอีกทิศทางหนึ่ง

ช่วงทางเข้าและทางออกของหม้อเผาต้องมีซีลเพื่อป้องกันอากาศที่ไม่ต้องการที่จะเข้ามาในระบบ ซีลด้านขาเข้าควรมีค่าทนความดัน 4-5 cmH₂O ขณะที่ด้านขาออกซีลควรทนความดัน 1 cmH₂O หรือน้อยกว่า ลมรั่วจากที่ทางออกหม้อเผาจะเข้าไปแทนที่ลมที่ใช้ในการเผาไหม้ (900-1000 °C) นั่นคือทำให้ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิงลดลง ในขณะที่ลมรั่วที่ด้านขาเข้าไม่เพียงทำให้กำลังผลิตและประสิทธิภาพลดลง แต่เป็นการเปิดช่องให้อากาศเย็นเข้าไปในกลางวัฏจักรของสารระเหยซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการจับตัวของวัสดุติดอย่างมาก จนไปรบกวนการไหลของวัสดุติดและก๊าซ

ซีลหม้อเผามีการออกแบบที่หลากหลาย ซึ่งจะใช้งานได้ดีถ้ามีการบำรุงรักษาที่ถูกต้อง การออกแบบโดยทั่วไปจะใช้ซีลแบบเปลี่ยนใบได้โดยใช้เหล็กแผ่นที่ยึดอยู่กับตัวได้นำมาเรียงรอบๆ หม้อเผาแผ่นเหล็กจะสัมผัสกับหม้อเผาที่ซีล (แม้จะเป็นซีลแบบนี้ก็ยังมีรูปแบบที่แตกต่างกันอีกมาก) สาเหตุหลักที่มักทำให้ซีลเสียหายคือการได้รับความร้อนมากเกินไป การป้องกันคือการออกแบบให้ผิวด้านในของซีลหลีกเลี่ยงการสัมผัสความร้อนหรือการใช้ลมเป่า

นอกจากการที่ได้รับความร้อนมากเกินไปซึ่งทำให้ซีลเสียหายแล้ว ยังเกิดจากสาเหตุที่มีการสัมผัสกันระหว่างส่วนที่หมุนและส่วนที่อยู่กับที่ทำให้เกิดการสึกจึงต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นพิเศษ

การออกแบบเปลือกหม้อเผา จะพิจารณาเหมือนกับการออกแบบท่อนทรงกระบอก การออกแบบที่ดีจะกำหนดตำแหน่งของแท่นที่จะกระจายภาระไปยังส่วนบนและส่วนล่างของหม้อเผานับจากแท่นกลาง รวมทั้งน้ำหนักของเปลือกหม้อเผาที่แขวนอยู่ระหว่างแท่นด้วย ความหนาของเปลือกหม้อเผาจะออกแบบโดยใช้ข้อยืนยันทางสถิติให้สามารถรองรับระดับความเครียดได้ภายใต้ความสามารถของเนื้อเหล็กที่ใช้ รวมถึงสมมติฐานของการออกแบบด้วย

เหล็กที่นำมาใช้ทำเปลือกหม้อเผาจะสูญเสียความแข็งแรง เมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 400 °C แต่ในความเป็นจริงที่อุณหภูมิ 500 °C เหล็กจะมีความแข็งแรงเป็นครึ่งหนึ่งของความแข็งแรงที่

อุณหภูมิบรรยากาศ ดังนั้นอุณหภูมิที่เปลือกหุ้มเผลอควรรได้มีการติดตามเป็นพิเศษอย่างต่อเนื่อง ทำการบันทึกและมีสัญญาณเตือน ซึ่งมักจะมีการนำระบบแสงอินฟราเรดมาใช้ตรวจสอบเพื่อตรวจสอบสภาพอิฐทนไฟ ความหนาของ Coat และระยะ Tire Creep ซึ่งจะไม่เป็นศูนย์ แต่จะอยู่ที่ประมาณ 2 cm ต่อ 1 รอบการหมุน อุณหภูมิของเปลือกหุ้มเผลอที่เกินกว่า 350 °C ต้องติดตามอย่างใกล้ชิด และควรมีการแก้ไขอย่างถูกต้องก่อนที่อุณหภูมิเปลือกหุ้มเผลอจะสูงถึง 500 °C ซึ่งจะทำให้เปลือกหุ้มเผลอเสียรูปอย่างถาวร หรือเริ่มมีรอยร้าว

โดยทั่วไปที่แต่ละแหวนของหุ้มเผลอจะมีพื้นที่หนากว่าปกติคือ ที่ใต้แหวนจะมีพื้นที่หนา มากเรียกว่า Tire Course และส่วนที่หนารองลงมาจะอยู่ที่ด้านข้างของแหวนเรียกว่า Flanking Plate สำหรับส่วนอื่น ๆ ของเปลือกหุ้มเผลอจะบางกว่า Flanking Plate ส่วนที่เกิดรอยร้าวได้ง่าย คือช่วงรอยต่อระหว่าง Flanking Plate และส่วนที่บางกว่า ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ระหว่างแท่นหุ้มเผลอ ส่วนที่เสียได้บ่อย คือ รอยเชื่อมต่อของเปลือกหุ้มเผลอด้านที่บาง แต่เราสามารถทำเครื่องหมายตรงรอยร้าวไว้ก่อนโดยยังไม่หยุดหุ้มเผลอ รอยร้าวสามารถกำจัดได้โดยการเผาหรือ การเซาะจากร่องด้านนอกด้วยมุม 60 °C

การเชื่อมจะต้องใช้โลหะสำหรับเชื่อมให้ถูกต้องและเชื่อมเป็นแนวตรงให้ซ้อนทับกัน ครั้งหนึ่งตามแนวยาว เพื่อให้ความร้อนจากการเชื่อมช่วยลดความเครียดที่เกิดจากการหดตัวและแนวเชื่อมที่อยู่ด้านล่าง แนวเชื่อมต้องเป็นเส้นตรงขนานกัน ห้ามเชื่อมแนวสวนกันเพราะคุณภาพการเชื่อมจะต่ำและมีความเครียดตกค้าง ชั้นของการเชื่อมจะต้องสูงจนเสมอขอบที่ได้ทำการเซาะร่องไว้ หลังการเชื่อมไม่ต้องการลดความเครียดแต่เปลือกหุ้มเผลอควรรักษาอุณหภูมิให้สูงกว่า 5 °C ตลอดจนการเชื่อมการหยุดการแพร่กระจายของรอยร้าวที่เป็นที่นิยมใช้คือ การเจาะรูที่ปลายรอยร้าวทั้ง 2 ข้าง แต่มักจะไม่ได้ผลยกเว้นในบางกรณีเช่นรูต้องมีขนาด 2 นิ้วขึ้นไป จึงควรใช้วิธีการเผา และเซาะร่องแล้วเชื่อมใหม่ตามที่ได้อธิบายข้างต้น

นอกจากเรื่องการได้รับความร้อนมากเกินไป ความเสียหายสำคัญที่มักเกิดกับเปลือกหุ้มเผลออีกชนิดคือการร้าวของเปลือกหุ้มเผลอ ซึ่งมีสาเหตุมาจากความล้าเนื่องจากความเครียดที่สูงเกินไปจากการหมุนหุ้มเผลอที่มีระยะห่างของ Tire Pad สูง แม้ว่า Tire Creep จะถูกบันทึกอยู่ทุกวัน แต่ก็ไม่ได้เป็นสิ่งที่แสดงได้แน่ชัดว่าระยะห่างของ Tire Pad เป็นเท่าใด ซึ่งควรใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า Obourg Pen Tester ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ระหว่าง Tire และเปลือกหุ้มเผลอจากการหมุนได้ สิ่งที่สำคัญกว่านั้นคือจะต้องทำการวัดค่า Ovality ที่ tire ทุกตัวว่าเปลือกหุ้มเผลอมีการบิดตัวไปเท่าใด โดยหากค่า

“ %Ovality > เส้นผ่าศูนย์กลางเปลือกหม้อเผา/10 ”

สำหรับ Tire ที่อยู่ใกล้กับเฟืองขับหม้อเผาจะต้องมีการหาค่าปกติหรือ Low Ovality เมื่อระยะห่างระหว่าง Tire Pad มีค่าสูงถึงระดับหนึ่ง จะต้องดำเนินการแก้ไข เพราะแม้ว่าเกียร์จะสามารถรองรับเปลือกหม้อเผาที่มีค่า Ovality เล็กน้อยได้ แต่ไม่ได้ถูกออกแบบให้รองรับความเครียด ที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ดังกล่าว Tire Creep จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเปลือกหม้อเผาและสามารถวัดค่าได้จากสแกนเนอร์บางครั้ง Creep จะเกิดขึ้นตลอดเวลา และจะอยู่ที่ประมาณ 2 cm. ต่อ 1 รอบการหมุน การแก้ไขทำได้ด้วยการรอง Tire Pad

Tire Thrusting หรือภาวะไหลดส่วนเกินที่เกิดกับ Tire จะสังเกตได้จากการเกิดการสัมผัสกันของแรงแรงระหว่าง Kiln Tire และอุปกรณ์ที่รองรับ สาเหตุที่มักทำให้ Tire Thrust สูงคือความแตกต่างของความเอียงของลูกกลิ้งกับแกนหม้อเผาที่ลากผ่าน Tire นอกจากนี้บางครั้งการสึกแบบกรวยของ Tire หรือลูกกลิ้งหรือระยะห่างที่สูงเกินไปของ Tire Pad ก็เป็นสาเหตุได้เช่นกัน

Axial thrusting ของ Kiln Tire จะต้องได้รับการแก้ไขก่อนที่จะเกิดการหลุดของชิ้นส่วนโลหะ ออกจากด้านข้างของ Tire เนื่องจากจะเป็นงานยากที่จะทำการแก้ไขในภายหลัง การปรับมุมเอียงของลูกกลิ้งมีผลต่อ Tire Thrust น้อยมาก สิ่งที่จะดำเนินการเพื่อแก้ไขในเรื่องนี้ได้คือ การออกแบบความเอียงให้ที่ถูกต้อง การทำให้ลูกกลิ้งและ Tire ให้เป็นทรงกระบอกกลมหรือลดระยะห่างของ Tire Pad

ระบบขับหม้อเผาจะใช้ระบบเฟืองและพินเนียน (Pinion) ที่ถูกออกแบบให้มีอายุการใช้งานได้มากกว่า 20 ปี ถ้ามีการหล่อลื่นและการตั้งแนวอย่างถูกต้อง การหล่อลื่นจะต้องปฏิบัติตามคำแนะนำจากผู้ขายทั้งค่าความหนืดและอุณหภูมิทำงาน การวัดค่าอุณหภูมิของเฟืองและพินเนียนจะใช้ไพโรมิเตอร์ซึ่งอย่างน้อยจะต้องมีการวัดค่า 3 จุดตลอดหน้าเฟือง โดยบันทึกค่าไว้ทุกเดือน ชุดเฟืองที่มีการตั้งตำแหน่งดีแล้วไม่ควรมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกินกว่า 5°C ในแต่ละฟันเฟือง การปรับตั้งแนวเฟืองควรกระทำเมื่อมีภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเกินกว่า 10°C

ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางถึงปลายระหว่างเฟืองและพินเนียนจะต้องวัดค่าอยู่เป็นประจำ โดยเฉพาะหลังการเกิดเสียหายของอิฐทนไฟทุกกรณี ซึ่งอาจมีผลเสียหายต่อผิวหม้อเผาได้ การวัดค่าจะต้องวัดที่ตำแหน่งเหนือและล่างของซี่ฟันเฟืองพินเนียนในทุกๆตำแหน่ง 60° ของการหมุนหม้อเผาเพื่อให้มั่นใจว่าระยะห่างยังคงสามารถใช้งานได้อย่างไม่เกิดปัญหา การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของลูกกลิ้งจะต้องพิจารณาเรื่องการแก้ไขการจัดวางตำแหน่งของเฟือง

กว่า 80% ของแรงแม่ที่ใช้ในการขับหม้อเผาเป็นการใช้เพื่อยกน้ำหนักของหม้อเผา การตั้งแนวที่ไม่ถูกต้องจะเป็นการเพิ่มภาระการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น การออกแบบทั่วไปจะกำหนดให้มอเตอร์

สามารถรับแรงบิดได้ 2.5 เท่าในระยะสั้นเพื่อเอาชนะแรงเฉื่อยของหม้อเผาในช่วงการเริ่มต้น (หมุน) หม้อเผา เทคโนโลยีด้านฟรีแคสซิเนอร์และการลดระยะเวลาการเผาของวัตถุในช่วงการทำให้หินปูนแตกตัวและหลอมละลายมีแนวโน้มที่จะใช้ความเร็วการหมุนหม้อเผาเพิ่มขึ้นได้

หม้อเผารุ่นเก่าสามารถปรับปรุงเพื่อเพิ่มความเร็วได้ 3 วิธี ดังนี้

- เปลี่ยนอัตราทดเกียร์
- ลดความแรงของมอเตอร์
- ใช้ความเร็วที่สูงกว่าเดิมกับมอเตอร์ไฟสลัด้วยอุปกรณ์ปรับความเร็ว

ก่อนการตัดสินใจเพิ่มความเร็วรอบหม้อเผา ควรตรวจสอบว่ามอเตอร์จะสามารถรับภาระที่เพิ่มขึ้นในสภาพการเผาที่ผิดปกติได้ ถ้ามอเตอร์ทำงานที่สภาพเกือบเต็มที่อยู่แล้ว ภาวะโหลดที่เกิดขึ้นในช่วงหม้อเผาเดินผิดปกติ จะทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วหม้อเผาได้ตามต้องการซึ่งสามารถเกิดผลเสียหายอย่างมากได้ ดังนั้นในการปรับปรุงเพิ่มความเร็วการหมุนหม้อเผา ควรเปลี่ยนใช้มอเตอร์ที่สามารถรองรับภาวะโหลดส่วนเพิ่มได้ โดยระหว่างการเดินหม้อเผามอเตอร์ควรมีภาระอยู่ที่ประมาณ 60% ซึ่งจะช่วยให้รับแรงบิดที่สูงขึ้นจาก Thermal bowing, การเกิด Coating ที่ไม่สม่ำเสมอและการตั้งแนวที่ไม่ถูกต้องได้

แนวหม้อเผา (Kiln Alignment) การตั้งแนวของหม้อเผาจะถูกจำกัดด้วยความดันของแบร็ริงระหว่างเพลลาของลูกกลิ้งกับแบร็ริงอยู่ที่ประมาณ 35 kg/cm² ซึ่งอาจสูงกว่านี้ได้ถ้าเป็นแบร็ริงชนิดแบบปรับตัวเองได้ ความดันของแบร็ริงขึ้นกับวัสดุที่ใช้ผลิต (เช่นทองเหลืองหรือเงิน) นอกจากนี้ ความยาวของสลักแบร็ริงจะต้องสามารถรักษาแรงดันตามที่ยกแบบได้ ฟิล์มน้ำมันหล่อลื่นที่เกิดจากการหมุนของสลักลูกกลิ้ง โดยปกติจะหนาไม่เกิน 125 μ เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีการตรวจสอบผิวของเพลลาเป็นประจำขณะที่หยุดหม้อเผา ก่อนที่จะเกิดรอยสึกมากที่ผิวและเกิดความเสียหายของแบร็ริงได้

การออกแบบหม้อเผาจะต้องสามารถรองรับน้ำหนักของวัตถุดิบ อิฐทนไฟ และสิ่งอื่น ๆ ที่มาจับเกาะได้ การที่จะเดินหม้อเผาให้หนึ่ง ผิวของสลักลูกกลิ้ง และระยะห่างของแบร็ริง ต้องมีน้ำมันหล่อลื่นที่มีค่าความหนืด ปริมาณ และความสะอาดเพียงพอ การเปลี่ยนแปลงของ Coating ที่ไม่แน่นอนจะทำให้คุณสมบัติของเปลือกหม้อเผาเปลี่ยนแปลง เป็นเหตุให้เกิดการกัดและเสียรูปร่างอย่างถาวรและแบร็ริงเสียหาย

การที่ลดความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่หม้อเผาอย่างหนึ่งคือการตั้งแนวช่วงรอยต่อของเปลือกหม้อเผาให้เหมาะสม ซึ่งต้องมีการวัดเส้นแกนหม้อเผาขณะกำลังเดินหม้อเผา โดยการวัดตำแหน่งของ Riding Ring โดยตั้งสมมติฐานว่าแหวนและเปลือกหม้อเผากลมสมบูรณ์

จากนั้นจึงคำนวณตำแหน่งแกนหม้อเผาที่แต่ละ Tire แล้วลากเส้นตรงผ่านแกนดังกล่าว ถ้าเส้นที่ลากไม่อยู่ในแนวเดียวกันกับเส้นที่ควรจะเป็นในทางทฤษฎี โดยยอมให้ห่างจากเส้นในทางทฤษฎีได้ 3 mm. ไปทางซ้ายหรือขวาเมื่อมองจากด้านบน ตำแหน่งในแนวตั้งของแนวแท่นหม้อเผาเทียบกับแนวแกนหม้อเผาทางทฤษฎี อาจมีการแตกต่างกันได้อย่างมาก ในแต่ละหม้อเผา

โดยทั่วไปชุดรองรับหม้อเผาทั้ง 3 ตัว ตัวกลางจะรับภาระสูงที่สุด จึงต้องจัดให้มีระดับต่ำกว่าเส้นทฤษฎีเล็กน้อยเพื่อลดความดันที่แบริงลงบางส่วน วิธีการที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการตั้งแนวขั้นสุดทำคือการใช้ Ovality Gauge วัดค่าการบิดตัวของหม้อเผาที่แต่ละแท่น จากนั้นลูกกลิ้งจะถูกปรับให้ค่าการบิดตัวทั้งซ้ายและขวาเท่ากัน อย่างไรก็ตาม แต่ละแท่นหม้อเผาไม่จำเป็นต้องถูกปรับให้มี %Ovality ที่เท่ากัน เนื่องจาก Ovality เกิดจากระยะห่างของ Tire Pad คุณสมบัติของแบริงก็เป็นตัวแสดงภาระของลูกกลิ้งได้จึงต้องเฝ้าดูอย่างใกล้ชิด Tire Ovality ไม่ควรมีค่าเกิน 0.2% Tire (แหวนหม้อเผา) ที่สึกมากจะทำให้เกิด Tire Ovality มากซึ่งจะต้องถูกเปลี่ยนใหม่

ลูกกลิ้งหม้อเผาถูกออกแบบให้รับน้ำหนักของหม้อเผารวมทั้ง Thrust ที่เกิดจากการเอียงตัวของหม้อเผาด้วย แนวแกนของลูกกลิ้งที่แต่ละแท่นของหม้อเผา จะต้องขนานกับแนวเส้นทางทฤษฎีเพื่อให้สามารถรองรับ Thrust ที่แต่ละแท่นหม้อเผาได้ และแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ลูกกลิ้งจะรองรับไม่ให้น้ำหนักของหม้อเผาทั้งหมดตกลงมาที่ Thrust Roller ตลอดเวลาในสภาพการเดินหม้อเผาและสภาพ Coat ปกติ การขยายตัวตามแนวยาวของหม้อเผาปกติจะอยู่ที่ประมาณ 20 cm. และต้องมั่นใจว่า Tire จะอยู่ตรงกลางของลูกกลิ้งขณะที่หม้อเผาเดิน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วรเดช เกรียงสันติกุล เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม จากโรงเรียน อัสสัมชัญ บางรัก และเข้าศึกษาต่อจน สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปีการศึกษา 2547 เข้าศึกษาในคณะนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัย รามคำแหงในปีการศึกษา 2550 จนสำเร็จปริญญานิติศาสตรบัณฑิตในปีการศึกษา 2552 และได้ ศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาของโรงเรียนกฎหมายแห่ง เนติบัณฑิตยสภา



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย