การประเมินวัฏจักรของการผลิตปูนซีเมนต์

นางสาว ธิดา ทัศนราพันธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-347-295-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PORTLAND CEMENT PRODUCTION

Miss Thida Thasanaraphan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-347-295-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินวัฏจักรของการผลิตปูนซีเมนต์
โดย	นางสาว ธิดา ทัศนราพันธ์
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. วิจิตรา จงวิศาล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ. ดร. ประเสริฐ ภาวสันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…….. ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภาวสันต์)

…….. กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

…….. กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สมประสงค์ ศรีชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธิดา ทัศนราพันธ์ : การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ (Life Cycle Assessment of Portland Cement Production) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. วิจิตรา จงวิศาล , อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร. ประเสริฐ ภวสันต์ , 157 หน้า ISBN 974-347-295-9.

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนการประเมินผลกระทบ และขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ ในงานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้หลักการ cradle-to-gate ซึ่งมีขอบเขตเฉพาะขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ ได้แก่ การผลิตไฟฟ้า การทำเหมืองหิน และการทำเหมืองถ่านหิน และขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่ในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และรายงานการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม จากการประเมินผลกระทบพบว่า ประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ คือ สารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศคือมีฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ รวมทั้งการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งใช้เป็นดัชนีสิ่งแวดล้อมที่แสดงถึงคุณภาพของอากาศและบ่งบอกความรุนแรงของผลกระทบ

การบดวัตถุดิบในส่วนของการผลิตปูนซีเมนต์เป็นขั้นตอนที่เกิดปริมาณฝุ่นแขวนลอยมาก และเป็นขั้นตอนที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ส่วนการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้าเป็นขั้นตอนที่ก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มาก เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ใช้เชื้อเพลิงปริมาณมาก ดังนั้นในส่วนของการปรับปรุงกระบวนการผลิตจึงพยายามลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ให้น้อยลง โดยทำการเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์และหาขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา Visual Basic เพื่อช่วยในการคำนวณหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ และหาขนาดของวัตถุดิบที่ออกจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสม จากการคำนวณถ้าพิจารณาการเปลี่ยนหม้อบดละเอียดจาก Ball Mill หรือ Tube Mill เป็น Roller Mill โดยพิจารณาผลกระทบเฉพาะกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์อย่างเดียว พบว่าการใช้ Roller Mill จะเกิดฝุ่นมากขึ้น แต่ถ้าพิจารณาโดยการใช้การประเมินวัฏจักรชีวิต พบว่าทั้งปริมาณฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าการให้หม้อบดแบบ Ball Mill หรือ Tube Mill ส่วนการเปลี่ยนหม้อเผาจาก Long Dry Kiln มาเป็น Suspension Preheater Kiln หรือ Kiln with Dry Calcinator ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงเพียงเล็กน้อย แต่หม้อเผาทั้งสองชนิดเป็นหม้อเผาที่ใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพจึงใช้เชื้อเพลิงในปริมาณน้อยกว่า ทำให้ผลกระทบจากการประเมินในวัฏจักรชีวิต ซึ่งได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีปริมาณลดลงมาก สำหรับการหาขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมพบว่าถ้าพิจารณาผลกระทบเฉพาะการผลิตปูนซีเมนต์ การเปลี่ยนขนาดของวัตถุดิบไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลกระทบ แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุดิบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงจึงทำให้เกิดผลกระทบจากการประเมินวัฏจักรชีวิตน้อยลง

ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2543	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170344621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD : LIFE CYCLE ASSESSMENT / PORTLAND CEMENT PRODUCTION / PROGRAM / ENVIRONMENTAL IMPACT / INDICATOR / IMPROVEMENT

THIDA THASANARAPHAN : LIFE CYCLE ASSESSMENT OF CEMENT PRODUCTION. THESIS ADVISOR : VICHITRA CHONGVISAL, Ph.D., Assist. Prof. THESIS CO-ADVISOR : PRASERT PAVASANT, Ph.D. Assist. Prof. 157 pp. ISBN 974-347-295-9.

Life cycle assessment (LCA) comprises of three stages ; life cycle inventory, life cycle impact analysis and life cycle improvement analysis. In this research, LCA was used to assess environmental impacts of portland cement production, according to cradle-to-gate approach. The boundary of this work included raw material acquisition (power plant, quarry, and mining) and cement production. Most of data were secondary data obtained from the environmental impact assessment reports and environmental quality monitoring reports. The life cycle impact analysis indicated that air emissions and fuel consumption were significant environmental aspects. The total suspended particulates, sulfur dioxide, and oxides of nitrogen as well as fuel consumption were considered to be environmental indicators. These indicators can be used to express the air quality and severity of consequences.

Grinding of raw materials for cement production was found to generate large amount of suspended particulates and consume most of electric power. In power plant, the fuel combustion generates large amount of sulfur dioxide and oxides of nitrogen. Therefore, it is desirable to reduce energy consumption in the stage of life cycle improvement analysis by changing types of equipments and determining suitable sizes of raw materials used for the production. In this work, a computer program was developed using Visual Basic language for assessing environmental impacts of cement production by LCA approach, and determining suitable sizes of raw materials from primary and secondary crushers. The calculation showed that if a roller mill was used instead of a ball mill or a tube mill, more particulates were generated when the impacts of cement production only was assessed. Using LCA to assess environmental impacts, the result revealed that suspended particulates, sulfur dioxide, and nitrogen oxides generated from a roller mill were less than those emitted from a ball mill or tube mill. In clinker production, change of a long dry kiln to a suspension preheater kiln or kiln with dry calcinator consumed less electric power. Since the latter kilns were kilns of efficient utilization of fuel, they consumed less fuel resulting in less emissions of sulfur dioxide and nitrogen oxides when life cycle assessment was used. In determining suitable sizes of raw materials, change in raw material sizes did not change the impacts significantly when only cement production was assessed. It was found from LCA study that less energy was consumed in such case, resulting in less environmental impacts.

Department	Chemical Engineering	Student's signature …….
Field of study	Chemical Engineering	Advisor's signature …….
Academic year	2000	Co-advisor's signature ……

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. วิจิตรา จงวิศาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร. ประเสริฐ ภวสันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างดียิ่ง

และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร. ธวัชชัย ชรินพาณิชกุล (ประธานกรรมการ) ผศ.ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช (กรรมการ) และ อ.ดร. สมประสงค์ ศรีชัย (กรรมการ) ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้มีอุปการะคุณที่ให้การสนับสนุนตลอด และเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฎ

คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ด

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 มูลเหตุจูงใจ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ 5

2.2 ดัชนีด้านสิ่งแวดล้อม 14

2.3 การผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตไฟฟ้า และการทำเหมือง 15

2.4 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผลการวิจัย 29

3.1 การรวบรวมข้อมูล 29

3.2 การประเมินผลกระทบ 49

3.3 การปรับปรุงกระบวนการ 60

3.4 การกำหนดดัชนีสิ่งแวดล้อม 80

หน้า

บทที่ 4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 84

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 97
5.1 บทสรุป 97
5.2 ข้อเสนอแนะ 98

รายการอ้างอิง 99

ภาคผนวก 105
ภาคผนวก ก อุปกรณ์หลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง 106
ก.1 หม้อบดวัตถุดิบ 106
ก.2 หม้อเผา 115
ก.3 การคำนวณไฟฟ้าที่ใช้ในเหมือง 122
ก.4 การคำนวณปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า 123
ก.5 การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดจากขั้นตอนการผลิต 124

ภาคผนวก ข ข้อมูลที่ใช้ประกอบการคำนวณและการประเมินผลกระทบ 128
ข.1 รายละเอียดของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ 128
ข.2 ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการทำเหมือง 141
ข.3 ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการผลิตไฟฟ้า 144

ภาคผนวก ค ผลการคำนวณ 146

ประวัติผู้เขียน 157

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ขอบเขตของระบบสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์	7
รูปที่ 2.2	กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	17
รูปที่ 2.3	กระบวนการผลิตไฟฟ้า	21
รูปที่ 3.1	ขอบเขตของระบบสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ ...	30
รูปที่ 3.2	ผังกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	32
รูปที่ 3.3	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1	35
รูปที่ 3.4	ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1	36
รูปที่ 3.5	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2	37
รูปที่ 3.6	ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2	38
รูปที่ 3.7	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3	39
รูปที่ 3.8	ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3	40
รูปที่ 3.9	ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4	41
รูปที่ 3.10	ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4	42
รูปที่ 3.11	สิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์	43
รูปที่ 3.12	สิ่งที่ออกจากกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์	44
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนการทำงานหลักของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	85
รูปที่ 4.2	ขั้นตอนการคำนวณสารมลพิษโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์	86

หน้า

รูปที่ 4.3	ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสม	87
รูปที่ 4.4	หน้าจอเริ่มต้น	88
รูปที่ 4.5	หน้าจอวัตถุดิบ	88
รูปที่ 4.6	ตัวอย่างหน้าจอย่อยเมื่อเลือกชนิดของวัตถุดิบ	89
รูปที่ 4.7	ตัวอย่างหน้าจอย่อยเพื่อกำหนดอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับหม้อเผา	89
รูปที่ 4.8	หน้าจอย่อยแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของถ่านหิน	90
รูปที่ 4.9	หน้าจอผังกระบวนการผลิต	91
รูปที่ 4.10	หน้าจอแสดงปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	91
รูปที่ 4.11	หน้าจอวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์	92
รูปที่ 4.12	หน้าจอแสดงขอบเขตของวงจรชีวิตที่พิจารณา	93
รูปที่ 4.13	หน้าจอแสดงสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในขอบเขตวัฏจักรชีวิต	93
รูปที่ 4.14	หน้าจอแสดงการเปรียบเทียบสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	94
รูปที่ 4.15	หน้าจอการคำนวณ	94
รูปที่ 4.16	ภาพเคลื่อนไหวขณะที่โปรแกรมทำการคำนวณ	95
รูปที่ 4.17	หน้าจอแสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตเดิมและกระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว	95
รูปที่ 4.18	หน้าจอฐานข้อมูล	96
รูปที่ ก.1	Jaw Crusher	107
รูปที่ ก.2	Gyratory Crusher	108
รูปที่ ก.3	Cone Crusher	109
รูปที่ ก.4	Hammer Crusher	110
รูปที่ ก.5	Impact Crusher	110
รูปที่ ก.6	Ball Mill	111
รูปที่ ก.7	Roller Mill	112
รูปที่ ก.8	MPS Roller Bowl Mill	113
รูปที่ ก.9	Long Dry Kiln	115

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

รูปที่ ก.10	Suspension Preheater Kiln	116
รูปที่ ก.11	Kiln with Dry Calcinator	117
รูปที่ ข.1	กระบวนการผลิตของโรงงานที่ 1	128
รูปที่ ข.2	กระบวนการผลิตของโรงงานที่ 2	131
รูปที่ ข.3	กระบวนการผลิตของโรงงานที่ 3 และโรงงานที่ 4	136
รูปที่ ค.1	ผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษของโรงงานที่ 1	146
รูปที่ ค.2	ผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษของโรงงานที่ 2	147
รูปที่ ค.3	ผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษของโรงงานที่ 3	148
รูปที่ ค.4	ผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษของโรงงานที่ 4	149

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เกณฑ์การพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	11
ตารางที่ 2.2	ความสำคัญของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม	13
ตารางที่ 2.3	การจำแนกประเภทของผลิตภัณฑ์ตามลักษณะการใช้งาน	23
ตารางที่ 2.4	ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แยกตามประเภทของผลิตภัณฑ์	24
ตารางที่ 3.1	สิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และสิ่งที่ออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เมื่อพิจารณาแบบวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์	33
ตารางที่ 3.2	Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากหม้อบด	34
ตารางที่ 3.3	Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากหม้อเผา	34
ตารางที่ 3.4	Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากหม้อเย็น	34
ตารางที่ 3.5	Emission Factor ของก๊าซที่ปล่อยออกจากหม้อเผา	35
ตารางที่ 3.6	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 1 ..	36
ตารางที่ 3.7	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 2 ..	37
ตารางที่ 3.8	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 3 ..	39
ตารางที่ 3.9	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 4 ..	41
ตารางที่ 3.10	การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 1	46
ตารางที่ 3.11	การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 2	47
ตารางที่ 3.12	การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 3	48
ตารางที่ 3.13	การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 4	48

หน้า

ตารางที่ 3.14 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นของการผลิตปูนซีเมนต์ .. 50
ตารางที่ 3.15 การประเมินประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ 57
ตารางที่ 3.16 ผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบดหินปูนให้มีขนาดเท่ากันของหม้อบดแต่ละชนิด 61
ตารางที่ 3.17 พลังงานไฟฟ้าและปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากหม้อบดละเอียดชนิดต่าง ๆ 62
ตารางที่ 3.18 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหม้อเผาและสารมลพิษที่เกิดจากหม้อเผาแต่ละชนิด 63
ตารางที่ 3.19 ผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 1 เดิม 65
ตารางที่ 3.20 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ของโรงงานที่ 1 65
ตารางที่ 3.21 ผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 2 เดิม 65
ตารางที่ 3.22 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ของโรงงานที่ 2 66
ตารางที่ 3.23 ผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 3 และ 4 เดิม 66
ตารางที่ 3.24 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ของโรงงานที่ 3 67

หน้า

ตารางที่ 3.25 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ของโรงงานที่ 4 67

ตารางที่ 3.26 วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน 69

ตารางที่ 3.27 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยรวมที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ 69

ตารางที่ 3.28 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ 74

ตารางที่ 3.29 ผลการคำนวณอัตราส่วนของปริมาณวัตถุดิบ 74

ตารางที่ 3.30 ค่าใช้จ่ายของระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์และระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง 78

ตารางที่ 3.31 ข้อดีและข้อเสียของระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์และแบบถุงกรอง ... 79

ตารางที่ 3.32 ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานในประเทศไทย 81

ตารางที่ 3.33 ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานในประเทศไทย 81

ตารางที่ 3.34 ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานต่างประเทศ 82

ตารางที่ 3.35 ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานต่างประเทศ 82

ตารางที่ ก.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ แฟกเตอร์ของแรงกระทำและดัชนีงานของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ 108

ตารางที่ ก.2 ค่า Specific Output (I_s) ของหม้อเผาแต่ละชนิด 121

ตารางที่ ก.3 Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่ปล่อยสู่บรรยากาศที่เกิดจากการบดและการทำปูนเม็ดให้เย็นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 124

ตารางที่ ก.4 Emission Factor ของสารมลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 125

ตารางที่ ก.5 Emission Factors ของการเผาไหม้ถ่านหินในหม้อต้มแบบ Pulverized Coal Boiler 127

ตารางที่ ข.1 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 1 129

ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 1 129

หน้า

ตารางที่ ข.3 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 1 129
ตารางที่ ข.4 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานที่ 1 ปี พ.ศ. 2535 – 2538 130
ตารางที่ ข.5 ผลการตรวจวัดระดับเสียงจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 ปี พ.ศ. 2535 – 2538 130
ตารางที่ ข.6 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะน้ำทิ้งจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 ปี พ.ศ. 2535 – 2538 131
ตารางที่ ข.7 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 2 132
ตารางที่ ข.8 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 2 132
ตารางที่ ข.9 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 2 132
ตารางที่ ข.10 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2536 – 2538 133
ตารางที่ ข.11 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2541 134
ตารางที่ ข.12 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในสถานที่ปฏิบัติงานของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2537 135
ตารางที่ ข.13 ผลการตรวจวัดเสียงในสถานที่ปฏิบัติงานเขตเครื่องจักรของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2539 – 2541 135
ตารางที่ ข.14 ผลการตรวจวัดเสียงในสถานที่ปฏิบัติงานเขตมีพนักงานประจำของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2539 – 2541 136
ตารางที่ ข.15 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 3 137
ตารางที่ ข.16 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 3 137
ตารางที่ ข.17 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 3 137
ตารางที่ ข.18 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบบำบัดของโรงงานที่ 3 . 138
ตารางที่ ข.19 ผลการตรวจวัดความดังเสียงในสถานที่ทำงานโรงงานที่ 3 138
ตารางที่ ข.20 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะน้ำทิ้งจากการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานโรงงานที่ 3 ปี พ.ศ. 2541 139
ตารางที่ ข.21 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 4 139
ตารางที่ ข.22 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 4 139

หน้า

ตารางที่ ข.23 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 4 140
ตารางที่ ข.24 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบบำบัดของโรงงานที่ 4 . 140
ตารางที่ ข.25 ผลการตรวจวัดความดังเสียงในสถานที่ทำงานโรงงานที่ 4 141
ตารางที่ ข.26 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะน้ำทิ้งจากการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 4 ปี พ.ศ. 2541 141
ตารางที่ ข.27 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่หินปูน 142
ตารางที่ ข.28 ผลการตรวจวัดระดับเสียงบริเวณเหมืองแร่หินปูน 142
ตารางที่ ข.29 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่หินปูน 142
ตารางที่ ข.30 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่ลิกไนต์ 143
ตารางที่ ข.31 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่ลิกไนต์ 143
ตารางที่ ข.32 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่ยิปซัม 143
ตารางที่ ข.33 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่ยิปซัม 143
ตารางที่ ข.34 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่หินดินดาน 144
ตารางที่ ข.35 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่หินดินดาน 144
ตารางที่ ข.36 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศหลังผ่านระบบบำบัดของโรงไฟฟ้า 144
ตารางที่ ข.37 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงไฟฟ้า 145
ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 150
ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2 150
ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3 150
ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4 151
ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจาการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 152
ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจาการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2 148
ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจาการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3 153
ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจาการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4 154

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

γ	=	ความถ่วงจำเพาะของวัตถุดิบที่ป้อน, ตัน/ลบ.ม.
μ	=	แฟกเตอร์ของแรงกระทำของวัตถุดิบที่ถูกบด (loading factor) โดยทั่วไป
ρ	=	ความหนาแน่นของวัตถุดิบ, กิโลกรัม/ลบ.ม.
η	=	ประสิทธิภาพการขับเคลื่อนของมอเตอร์
A/F	=	Alumina-Iron Ratio
Al_2O_3	=	ร้อยละของอลูมินาในวัตถุดิบ
a	=	ความกว้างของหลุม, เมตร
BF	=	Burnability Factor
b	=	ความยาวของหลุม, เมตร
C	=	ปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน, ร้อยละ
CaO	=	ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในวัตถุดิบ
D	=	เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเตาเผา , เมตร
D	=	ขนาดของโคน, เมตร
d_1	=	ขนาดเฉลี่ยของวัตถุดิบที่ป้อน, เมตร
d_2	=	ขนาดเฉลี่ยของวัตถุดิบที่ผ่านการบดแล้ว, เมตร
F	=	พื้นที่หน้าตัดของเตาเผา, ตร.ม.
Fe_2O_3	=	ร้อยละของเหล็กออกไซด์ในวัตถุดิบ
H	=	ความร้อนที่ให้กับหม้อต้ม, กิโลแคลอรี
H	=	ปริมาณไฮโดรเจนในถ่านหิน, ร้อยละ
Hu	=	ค่าความร้อนของถ่านหิน, กิโลแคลอรี/กิโลกรัมของถ่านหิน
h	=	ความลึกของหลุม, เมตร
h_i	=	เอนทาลปีของน้ำก่อนเข้าหม้อต้ม, Btu/lb
h_o	=	เอนทาลปีของน้ำที่ออกจากหม้อต้ม, Btu/lb
J	=	ปริมาตรของหม้อเผา, ลบ.ม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

K	=	อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินต่อน้ำหนักปูนเม็ด
K_d	=	แฟกเตอร์ของพลังงานที่ต้องการ
KS_K	=	Kind's Lime Saturation
L	=	ความยาวของหม้อเผา, เมตร
LSF	=	Lime Saturation Factor
MgO	=	ร้อยละของแมกนีเซียในวัตถุดิบ
m	=	น้ำหนักของไอน้ำ, ตัน
N	=	น้ำหนักของถ่านหิน, ตัน
N	=	ปริมาณถ่านหิน, ตัน
O	=	ปริมาณออกซิเจนในถ่านหิน, ร้อยละ
Q	=	กำลังการผลิตปูนเม็ด, ตัน/วัน
Q_c	=	ปริมาณถ่านหิน, ตัน
Q_{cl}	=	น้ำหนักของปูนเม็ด, ตัน
Q_s	=	ปริมาณหิน, ตัน
R	=	ความหนาของหม้อเผา, เมตร
S	=	ความเร็วเฉลี่ยของรถ, กิโลเมตร/ชั่วโมง
S	=	ปริมาณซัลเฟอร์ในถ่านหิน, ร้อยละ
SiO_2	=	ร้อยละของซิลิกาในวัตถุดิบ
SR	=	Silica Ratio
s	=	Thermal Loading, กิโลแคลอรี/ตร.ม.-ชั่วโมง
s	=	ความหนาแน่นฝุ่นบนถนน, เปอร์เซ็นต์
s	=	ช่วงการเหวี่ยงของ jaw (amplitude of the swing jaw), เมตร
sL	=	ความหนาแน่นฝุ่นบนถนน, กรัม/ตร.ม.
T	=	ผลรวมของปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ด, กิโลแคลอรี/น้ำหนักปูนเม็ด (กิโลกรัม)
t_a	=	อุณหภูมิของอากาศ (อุณหภูมิห้อง), องศาเซลเซียส
t_{cl}	=	อุณหภูมิของปูนเม็ด, องศาเซลเซียส
t_g	=	อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากหม้อเผา, องศาเซลเซียส
TSP_{b1}	=	ฝุ่นจากการระเบิด, กิโลกรัมกรัม/การระเบิด 1 ครั้ง
TSP_{b2}	=	ฝุ่นจากการระเบิด, กิโลกรัมกรัม/ตันวัตถุดิบ
TSP_{pr}	=	ฝุ่นจากถนนลาดยาง, กรัม/ระยะทางที่รถวิ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TSP_{ur}	=	ฝุ่นจากถนนลาดยาง, กิโลกรัม/ระยะทางที่รถวิ่ง
VkT	=	vehicle kilometer traveled
v_g	=	ความเร็วแก๊สที่ออกจากเตาเผา, เมตร/วินาที
W	=	กำลังไฟฟ้าจำเพาะ, กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน
W	=	น้ำหนักเฉลี่ยของรถบรรทุกทั้งขาไปและขากลับ, ตัน
W	=	ปริมาณน้ำในถ่านหิน, ร้อยละ
W_A	=	กำลังไฟฟ้าทั้งหมด, เมกกะวัตต์
W_c	=	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำเหมืองถ่านหิน, กิโลวัตต์
W_s	=	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำเหมืองหิน, กิโลวัตต์
w	=	จำนวนล้อของรถ
w_i	=	ดัชนีงาน (work index) ที่สอดคล้องกับทฤษฎีของ Bond ดัชนีงานของ
x	=	ร้อยละของวัตถุดิบที่ยังคงค้างอยู่บนตะแกรง 170 เมส (% residue on 170 mesh)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มูลเหตุจูงใจ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในปัจจุบันมีหลายสาเหตุด้วยกัน สาเหตุที่สำคัญประการหนึ่งเกิดจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจควบคู่ไปกับการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากก่อให้เกิดสารมลพิษปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมแล้ว ยังส่งผลให้มีการใช้แหล่งทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลืองอีกด้วย เมื่อสิ่งแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง หลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนมีความพยายามที่จะลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมโดยมีเป้าหมายที่จะลดปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นให้น้อยลง เดิมแนวทางในการลดปริมาณสารมลพิษจะเป็นการบำบัดปลายทาง (End- of-Pipe) คือบำบัดสารมลพิษที่เกิดขึ้น ต่อมาแนวความคิดได้เปลี่ยนจากการบำบัดมาเป็นการป้องกันการเกิดของเสีย (Pollution Prevention) ซึ่งมีหลักการพื้นฐานอยู่ที่การลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นแทนที่จะปล่อยให้เกิดของเสียแล้วทำการบำบัดภายหลัง หลักการนี้ถึงแม้ว่าเป็นการแก้ไขที่ต้นเหตุ แต่ในบางครั้งการปรับปรุงกระบวนการต้องการมุ่งเน้นเพียงเพื่อลดสารมลพิษที่เกิดขึ้นโดยตรง โดยไม่ได้คำนึงถึงสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น การใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงแทนการใช้ถ่านหินเนื่องจากก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาดซึ่งเมื่อมีการเผาไหม้แล้วทำให้เกิดก๊าซมลพิษ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยกว่าจากการเผาไหม้ถ่านหิน แต่ถ้าพิจารณาต่อไปอาจพบว่าในการได้มาของก๊าซธรรมชาตินั้นอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการทำเหมืองถ่านหิน เนื่องจากมีการบุกรุกและใช้ทรัพยากรทางทะเล และอาจส่งผลต่อระบบนิเวศน์เป็นบริเวณกว้างต่อไป ดังนั้นการศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ใด ๆ ควรศึกษาถึงผลกระทบทั้งหมดในช่วงของวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้อย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด เป็นผลให้การพัฒนาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพอันจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development)

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment, LCA) เป็นการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ รวมทั้งผลกระทบที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต และยังรวมถึงผลกระทบจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือที่เกิดขึ้นในช่วงวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เพื่อประเมินผลกระทบของอุตสาหกรรมต่อสิ่งแวดล้อม โดยเลือกวิเคราะห์อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะปูนซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเป็นปัจจัยการผลิตหลักของงานก่อสร้างที่เกี่ยวกับโครงสร้างการบริการพื้นฐาน และธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศ งานวิจัยนี้จึงหวังว่าผลที่ได้จากการทำวิจัยจะมีประโยชน์ต่อการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์นี้

1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่สำคัญดังนี้

1.2.1 ศึกษาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

1.2.2 พิจารณาหาดัชนีสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

1.2.3 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม และเพื่อหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่พิจารณาเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

1.3.2 ในงานวิจัยนี้พิจารณาการศึกษาวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้การศึกษาแบบ Cradle-to-Gate นั่นคือศึกษาวัฏจักรชีวิตเริ่มตั้งแต่กระบวนการ

ผลิตวัตถุดิบจนถึงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การผลิตไฟฟ้า การทำเหมืองถ่านหิน และการทำเหมืองหิน หินที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ คือ หินปูน ดินเหนียว ศิลาแลง แร่เหล็ก หินดินดาน และยิปซัม

1.3.3 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและใช้ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์เป็นข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data)

1.3.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างโดยใช้ภาษา Visual Basic

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

- พิจารณากำหนดขอบเขตของระบบที่จะศึกษา
- รวบรวมข้อมูลที่ต้องการภายในขอบเขตที่กำหนด อันได้แก่ ข้อมูลที่เป็นสิ่งที่ป้อนเข้าภายในระบบ และสิ่งที่ออกมาจากระบบทั้งชนิดและปริมาณ รวมถึงรายละเอียดของกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ และกระบวนการผลิตอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการผลิต
- คำนวณหาปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ และเปรียบเทียบกับผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพอากาศ

1.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบ

- กำหนดประเด็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม
- ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นของการผลิตปูนซีเมนต์
- บ่งชี้ประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ
- กำหนดดัชนีสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม

1.4.3 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

- พิจารณาหาวิธีการปรับปรุงในแต่ละขั้นตอนของการผลิตปูนซีเมนต์

- ปรับปรุงกระบวนการและพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงกระบวนการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อให้ได้ดัชนีสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับการผลิตปูนซีเมนต์

1.5.2 เพื่อให้ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้ในการคำนวณหาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม และสามารถหาสภาวะการดำเนินงานของการผลิตปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment, LCA) [5] เป็นวิธีการหนึ่งในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ กระบวนการและกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้วัตถุดิบและพลังงาน และผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปล่อยสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ยังเป็นวิธีการที่ใช้ประกอบการพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วย โดยการพิจารณาจะครอบคลุมลักษณะทางด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การบริโภค รวมไปถึงการกำจัดขั้นสุดท้าย

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนของการรวบรวมข้อมูล (Life Cycle Inventory)
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบ (Life Cycle Impact Analysis)
3. ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ (Life Cycle Improvement Analysis)

2.1.1 ขั้นตอนของการรวบรวมข้อมูล (Life Cycle Inventory)

ขั้นตอนของการรวบรวมข้อมูลเป็นการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตตลอดจนส่วนต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต การให้บริการ การใช้งาน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีรายละเอียดเกี่ยวกับความต้องการวัตถุดิบและพลังงานสำหรับกระบวนการผลิต รวมถึงอัตราการปล่อยสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม โดยวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการรวบรวมข้อมูลก็เพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูลในการประเมินและการคำนวณผลกระทบสิ่งแวดล้อม และเพื่อแสดงให้เห็นขั้นตอนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้น

แหล่งของข้อมูลที่ใช้ประกอบการศึกษา มี 2 แหล่ง คือ แหล่งข้อมูลปฐมภูมิ และแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ [38]

แหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Sources) – ข้อมูลที่ได้จากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิ จะได้จากโรงงานโดยตรง ซึ่งอาจเป็นรายงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตของโรงงาน ข้อมูลปริมาณการผลิตในแต่ละวัน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลเฉพาะของแต่ละโรงงาน และเป็นข้อมูลที่แสดงถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในปัจจุบัน

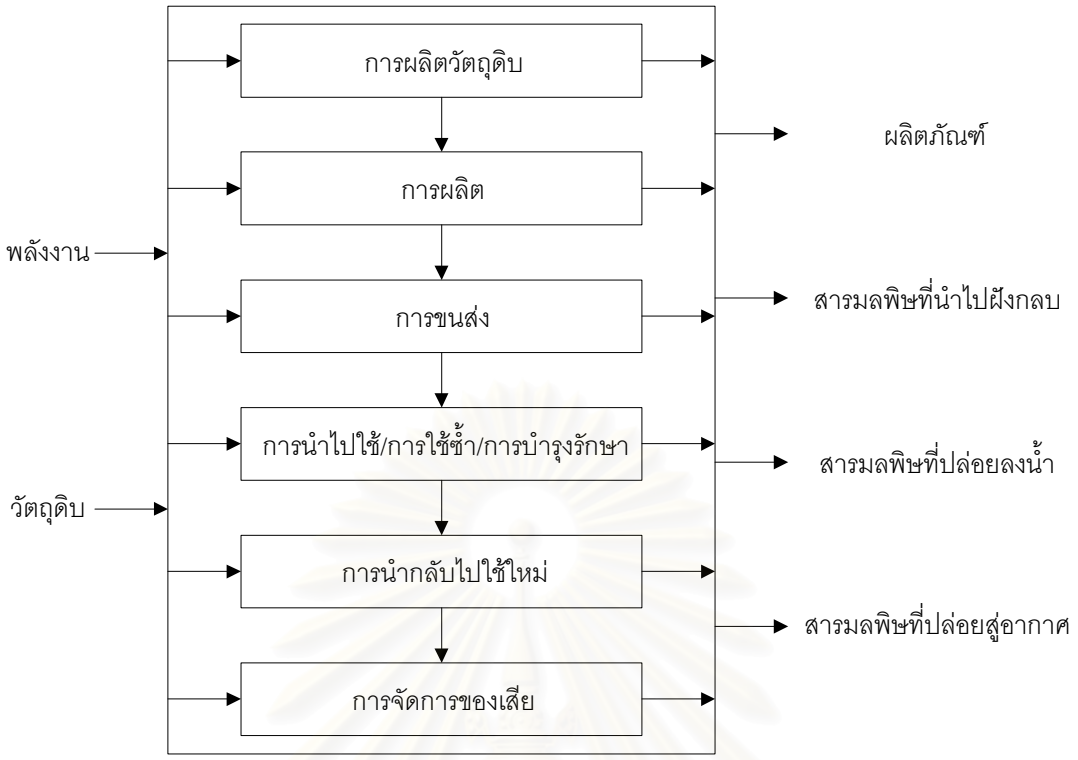
แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Sources) – เป็นแหล่งข้อมูลที่ประกอบด้วยฐานข้อมูลต่าง ๆ หนังสือ เอกสารหรือรายงานที่ที่ต้องเสนอให้แก่หน่วยงานราชการในแต่ละปี เป็นต้น ข้อมูลจากแหล่งทุติยภูมิเป็นข้อมูลทั่วไปที่ไม่เฉพาะเจาะจงเหมือนกับข้อมูลปฐมภูมิ แต่อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทำรายงานนั้น ๆ ในการศึกษาจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ จะต้องพิจารณาถึงช่วงเวลาของข้อมูลและแหล่งที่มาของข้อมูลด้วย

ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลประกอบไปด้วยขั้นตอนการทำงานย่อย 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1.1 **การกำหนดขอบเขตของระบบ** (System Boundary)

โดยทั่วไปขอบเขตของระบบในขั้นตอนของการรวบรวมข้อมูลประกอบด้วย การผลิตวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การนำไปใช้ การใช้ซ้ำ การบำรุงรักษา การนำกลับมาใช้ใหม่ และการจัดการของเสีย [5] ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1

จากขอบเขตของระบบที่พิจารณาแบบวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1) ที่เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบจนถึงขั้นตอนการกำจัด การกำหนดขอบเขตลักษณะนี้เป็นการศึกษาแบบ “Cradle-to-Grave” แต่ขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการผลิตบางครั้งอาจจำกัดขอบเขตเฉพาะขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและการผลิตเท่านั้น ลักษณะการพิจารณาแบบนี้เรียกว่าเป็นการศึกษาแบบ “Cradle-to- Gate”



รูปที่ 2.1 ขอบเขตของระบบสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เพราะคุณภาพ ความถูกต้อง และความละเอียดของข้อมูล จะแสดงถึงความน่าเชื่อถือของผลการประเมิน [9] ซึ่งข้อมูลที่รวบรวมนอกจากจะครอบคลุมทุกส่วนของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แล้วยังต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ข้อมูลต้องมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแหล่งที่มาของข้อมูล วิธีการที่ได้ข้อมูลหรือวิธีการตรวจวัด เป็นต้น
- ข้อมูลต้องมีความสมบูรณ์ (Completeness) เป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ทางสถิติ คือ มีค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น และสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดได้
- ช่วงเวลาที่ได้ข้อมูลต้องมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ทำการศึกษา คือ อาจเป็นเวลาเดียวกัน (ปีเดียวกัน) หรือใกล้เคียงกันก็ได้ เช่น ข้อมูลในส่วนของเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น

2.1.1.2 **การทำผังกระบวนการผลิต** (Process Flow Diagram)

การทำผังกระบวนการผลิตเป็นการระบุขั้นตอนของกระบวนการผลิตสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์โดยละเอียด รวมถึงสิ่งที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนไม่ว่าจะเป็นวัตถุดิบหรือสิ่งที่เข้ามาในกระบวนการนั้น (Inputs) หรือสิ่งที่ออกมาจากกระบวนการทั้งที่ต้องการและไม่ต้องการ (Outputs) ซึ่งเป็นการพิจารณาในระดับหน่วยกระบวนการ โดยในแต่ละหน่วยกระบวนการจะพิจารณาดังนี้ [4]

- วัตถุดิบและพลังงานที่ใส่เข้าไป
- ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลลัพธ์ของแต่ละกระบวนการ หรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป (Intermediate Product)
- การปล่อยมลพิษสู่น้ำ อากาศ ดิน และประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

2.1.2 **ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบ** (Life Cycle Impact Analysis)

การวิเคราะห์ผลกระทบเป็นการประเมินผลกระทบที่มีต่อคุณภาพของสภาวะแวดล้อมที่เกิดจากกิจกรรมการผลิตและการใช้งานของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้มาจากขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล แล้วประเมินหาผลกระทบที่เกิดขึ้น ดังนี้ [38]

1) ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม พิจารณาจากความเป็นพิษของสารมลพิษ การลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศ การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก การเกิด smog เป็นต้น
2) ผลกระทบที่มีต่อมนุษย์และสัตว์ พิจารณาจากความเป็นพิษของสารมลพิษ การกัดกร่อน การเกิดกลิ่น เสียง การแผ่รังสี เป็นต้น
3) ผลกระทบจากการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ พิจารณาจากการใช้พลังงาน การใช้ที่ดิน การใช้น้ำ เป็นต้น
4) ผลกระทบที่มีต่อสังคม พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงทางด้านวัฒนธรรม การดำรงชีวิต จำนวนประชากร เศรษฐกิจ เป็นต้น

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยดังนี้

2.1.2.1 **การกำหนดประเด็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม**

การกำหนดประเด็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เป็นการจำแนกประเภทของผลกระทบ ผลกระทบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ เช่น กำหนดประเภทของปัญหาทางสิ่งแวดล้อมออกเป็น ผลกระทบที่มีต่อการใช้ทรัพยากร ผลกระทบที่มีต่ออากาศ น้ำ และดิน เป็นต้น แต่โดยทั่วไปผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิตแบ่งได้ดังนี้ [38]

2.1.2.1.1 **ผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม**

1) การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก

ส่วนใหญ่เกิดจากสารมลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ทำให้ชั้นบรรยากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น อาจส่งผลให้ระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น และเกิดสภาวะแห้งแล้งได้

2) การลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศ

การลดลงของโอโซนใบชั้นบรรยากาศเป็นปรากฏการณ์ที่สารประกอบเคมีโดยเฉพาะสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) ไปทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศที่ช่วยป้องกันรังสีอุลตราไวโอเลตที่มาจากดวงอาทิตย์ ทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

3) การเกิดสภาพเป็นกรดของฝน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน

เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และแอมโมเนียที่ปนเปื้อนอยู่ในชั้นบรรยากาศทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นกรด ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งก่อสร้าง และพืชให้ได้รับความเสียหาย

4) Eutrophication และการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน

ปรากฏการณ์นี้ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มเจริญเติบโตของต้นพืชที่ไม่ต้องการ เช่น ผักตบชวา โดยเกิดจากมีปริมาณปุ๋ยหรือสารอาหารที่พืชต้องการมากเกินไป เช่น ไนเตรต ฟอสเฟต และโปแตสเซียม เป็นต้น

5) การเกิดปรากฏการณ์โฟโตเคมิคัล

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอโดรคาร์บอนกับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เป็นตัวการทำให้เกิดหมอกผสมกับควัน (smog) ไปบดบังแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังโลก

6) การฝังกลบกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต

ผลกระทบที่เกิดขึ้นพิจารณาจากคุณสมบัติของกากของเสียที่นำมาฝังกลบ เช่น ค่าความเป็นกรดด่าง และพิจารณาจากปริมาตรหรือน้ำหนักของกากของเสียที่นำมาฝังกลบ

2.1.2.1.2 **ผลกระทบต่อมนุษย์และสัตว์**

โดยทั่วไปพิจารณาจากความเป็นพิษของสารมลพิษที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ได้รับ เช่น ปริมาณของโลหะหนัก, dioxins, furans เป็นต้น โดยพิจารณาจากค่าความเข้มข้นของสารที่สามารถจะรับได้

2.1.2.1.3 **การลดลงของแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ**

การพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติพิจารณาจากความสำคัญของแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ความสามารถในการทดแทนแหล่งทรัพยากรธรรมชาติ ผลกระทบของน้ำใต้ดิน และผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสปีชีของสัตว์น้ำ เป็นต้น

2.1.2.1.4 **ผลกระทบต่อสังคม**

ผลกระทบที่มีต่อสังคมพิจารณาจากผลกระทบที่ส่งผลรบกวนต่อชุมชน เช่น การเกิดเสียงและกลิ่น อัตราความเสี่ยง และผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางด้านเศรษฐกิจ เป็นต้น

2.1.2.2 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเป็นการบ่งบอกถึงลำดับความสำคัญของประเด็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อม โดยการประเมินอาจประเมินในเชิงปริมาณหรือคุณภาพก็ได้ วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการประเมินผลกระทบ คือ การประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Risk Assessment) ซึ่งเป็นการประเมินที่ใช้เกณฑ์การพิจารณาจากโอกาสของการเกิดผลกระทบและความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้น

โอกาสของการเกิดผลกระทบหรือความเป็นไปได้ที่จะเกิดผลกระทบ สามารถพิจารณาได้จากความถี่ของเหตุการณ์ในอดีตที่ผ่านมา หรือพิจารณาจากวิธีการทำงาน หรือระบบป้องกันการเกิดเหตุการณ์ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ถ้ามีวิธีการทำงานที่ชัดเจน มีระบบการป้องกันที่ดี โอกาสของการเกิดผลกระทบก็น้อย โอกาสของการเกิดผลกระทบยังสามารถพิจารณาได้จากมาตรการติดตามตรวจสอบ เพราะถ้าหากมีการตรวจสอบอยู่เสมอก็จะทำให้ทราบปัญหาและสามารถหาทางแก้ไขและป้องกันได้ แต่ถ้าไม่มีการตรวจสอบเลยก็จะมีโอกาสเกิดปัญหาได้มาก นอกจากนั้นสถานะของสารยังสามารถบ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดผลกระทบได้อีกทางหนึ่ง โดยก๊าซจะมีโอกาสเกิดปัญหามากกว่าของเหลว และของแข็ง ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้น จะพิจารณาได้จากระดับความเป็นอันตรายของสารมลพิษ ปริมาณของสารมลพิษ และช่วงระยะเวลาที่ได้รับ ที่มีต่อผู้ที่ได้รับผลกระทบและต่อสิ่งแวดล้อม

จากหลักการของการประเมินความเสี่ยงสามารถกำหนดเป็นเกณฑ์การพิจารณาผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

	คะแนน
1. โอกาสที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	
1.1 ความเป็นไปได้ (L_1)	
- ไม่มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่ใช้วัตถุดิบ	1
- มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำหรือใช้วัตถุดิบเล็กน้อย	2
- มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมปานกลางหรือใช้วัตถุดิบปานกลาง	4
- มีความเป็นไปได้ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงหรือใช้วัตถุดิบค่อนข้างสูง	6
- ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในสภาวะการดำเนินงานปกติหรือใช้วัตถุดิบสูง	8

ตารางที่ 2.1 **(ต่อ)** เกณฑ์การพิจารณาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

	คะแนน
- การออกแบบกระบวนการส่งผลให้เกิดกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือใช้วัตถุดิบสูงมาก	10
2. ผลกระทบที่เกิดขึ้น 2.1 ผลกระทบต่อความปลอดภัยและสุขอนามัยของคนหรือสัตว์ที่เกี่ยวข้อง (C_1) - ไม่มีผลกระทบ - ไม่เป็นพิษแต่อาจก่อให้เกิดการระคายเคือง - มีการทำลายผิวหนังเล็กน้อย การทำลายเป็นไปอย่างช้า ๆ - ส่งผลกระทบอย่างช้า ๆ แต่มีความรุนแรงค่อนข้างมาก - ทำลายโครงสร้างของเซลล์ - อาจเป็นเหตุให้เสียชีวิต	 1 2 4 6 8 10
2.2 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (C_2) - ไม่มีผลกระทบ - ทำให้เกิดการปนเปื้อนในน้ำ อากาศ หรือดิน เพียงเล็กน้อย สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างรวดเร็ว - ระบบนิเวศวิทยาได้รับความเสียหายเพียงชั่วคราวและสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ - ระบบนิเวศวิทยาได้รับความเสียหายมาก ใช้เวลานานกว่าจะกลับคืนสู่สภาพเดิม - ถิ่นที่อยู่อาศัยของพืชหรือสัตว์ถูกทำลาย สามารถคืนสู่สภาพเดิมได้เพียงบางส่วน - ระบบนิเวศวิทยาถูกทำลายโดยสิ้นเชิง ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีกเลย	 1 2 4 6 8 10
2.3 ปริมาณที่ปล่อยออกมา (C_3) - ไม่มีการปล่อยสารอันตราย - ต่ำกว่าระดับมาตรฐานที่กฎหมายกำหนดตลอดระยะเวลาการทำงาน - ต่ำกว่าระดับมาตรฐานในสภาวะการทำงานปกติ แต่อาจสูงกว่าเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10 ของระดับมาตรฐาน)* ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ - ต่ำกว่าระดับมาตรฐานในสภาวะการทำงานปกติ แต่อาจสูงกว่ามาก (สูงกว่าร้อยละ 10 ของระดับมาตรฐาน)* ในสภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ - สูงกว่าระดับมาตรฐานเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10 ของระดับมาตรฐาน)* ในสภาวะการทำงานปกติ - สูงกว่าระดับมาตรฐานมาก (สูงกว่าร้อยละ 10 ของระดับมาตรฐาน)* ในสภาวะการทำงานปกติ	 1 2 4 6 8 10

* ค่าที่ใช้กำหนดขึ้นเพื่อใช้เฉพาะในงานวิจัยนี้เท่านั้น

การพิจารณาผลกระทบสิ่งแวดล้อม เป็นการพิจารณาขนาดความรุนแรงของผลกระทบควบคู่ไปกับโอกาสของการเกิดผลกระทบและปริมาณที่ได้รับ ดังนั้นการประเมินประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ จึงเกิดจากการให้คะแนนของทั้งสามส่วนดังนี้ [1]

$$S = (L_1)x(C_1+C_2)x(C_3)$$

โดยความสำคัญของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสำคัญของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม

ช่วงคะแนน	นัยสำคัญ
2 - 50	น้อยมาก
50 - 200	น้อย
200 - 400	ปานกลาง
400 - 1000	สูง
1000 - 2000	สูงมาก

2.1.3 **ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ** (Life cycle improvement analysis)

ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาวิธีการในการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยการลดผลกระทบดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ลดการใช้พลังงานและวัตถุดิบ หรือลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น การปรับปรุงกระบวนการต้องกำหนดเป้าหมายที่แน่ชัดก่อน จากนั้นจึงทำการหาวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสมและสอดคล้องกับเป้าหมายที่ได้กำหนดไว้

การปรับปรุงกระบวนการเป็นการพิจารณาที่มีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากจะต้องเข้าใจผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในทุกขั้นตอนของวัฏจักร การเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนหนึ่งอาจส่งผลต่อขั้นตอนอื่น ๆ ได้ เช่น ในการเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ อาจมีผลต่อขั้นตอนการผลิต ขั้นตอนการนำไปใช้ หรือขั้นตอนการบำรุงรักษาได้ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนของการปรับปรุงกระบวนการคล้ายกับการออกแบบกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง

แนวทางในการปรับปรุงกระบวนการ ได้แก่

- การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการใช้งานนานขึ้น

- การเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบหรือพลังงาน
- การเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้วัตถุดิบหรือพลังงาน
- การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต
- การปรับปรุงระบบการขนส่งหรือขนถ่ายผลิตภัณฑ์
- การปรับปรุงเทคนิคการจัดการของเสียที่เกิดขึ้น

2.2 ดัชนีด้านสิ่งแวดล้อม

ดัชนีด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Performance Indicators: EPIs) แบ่งได้เป็น 3 ประเภท [1] คือ

1. ดัชนีสิ่งแวดล้อมด้านการจัดการ (Management Performance Indicator: MPI) เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงระดับการบริหารงานด้านสิ่งแวดล้อมภายในโรงงาน เช่น การฝึกอบรมพนักงานในด้านสิ่งแวดล้อม การปฏิบัติตามนโยบายและแผนงานด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

2. ดัชนีสิ่งแวดล้อมระดับปฏิบัติการ (Operational Performance Indicator: OPI) เป็นดัชนีที่บ่งชี้ผลการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อมในระดับปฏิบัติการ เช่น ปริมาณการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิง ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยออกมา จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ใช้ซ้ำหรือรีไซเคิลได้ เป็นต้น

3. ดัชนีสภาวะแวดล้อม (Environmental Condition Indicator: ECI) เป็นดัชนีที่บ่งชี้สภาพสิ่งแวดล้อมในระดับท้องถิ่น ภูมิภาค ประเทศ และระดับโลก เพื่อช่วยให้องค์กรเข้าใจผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นหรือมีแนวโน้มว่าอาจเกิดขึ้นได้ได้ดีขึ้น เช่น ลักษณะและคุณภาพของแหล่งน้ำ คุณภาพของอากาศ ปริมาณและคุณภาพทรัพยากร การเกิดช่องโหว่ของโอโซน การเกิดปรากฏการณ์โลกร้อน เป็นต้น

การจัดทำดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบผลการปฏิบัติงานด้านสิ่งแวดล้อมขององค์กรในอดีตกับปัจจุบัน และใช้เป็นบรรทัดฐานให้กับโรงงานในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และใช้เป็นตัวแทนในการพิจารณาลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมด้วย [1] แต่เป้าหมายการหาดัชนีสิ่งแวดล้อมอาจมีความแตกต่างกันได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน

การกำหนดดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมจะพิจารณาจากสารมลพิษที่เกิดขึ้น ที่สามารถเป็นตัวแทนบ่งบอกคุณภาพของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมนั้นได้ เมื่อได้ดัชนีแล้ว จะต้องกำหนดหน่วยวัดเพื่อสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานในกลุ่มอุตสาหกรรมเดียวกันได้ เช่น การใช้วัตถุดิบ มีหน่วยวัดคือ ตันวัตถุดิบต่อตันผลิตภัณฑ์ ค่าบีโอดีที่แสดงคุณสมบัติของน้ำเสีย มีหน่วยวัดคือ มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น

2.3 การผลิตปูนซีเมนต์ การผลิตไฟฟ้า และการทำเหมือง

1) การผลิตปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ คือ สารผสมที่มีสัดส่วนพอเหมาะระหว่างสารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เมื่อนำปูนซีเมนต์มาผสมกับมวลรวมหยาบ (aggregate) เช่น หิน ทราย และน้ำ ในอัตราส่วนที่พอเหมาะจะเกิดการแข็งตัว ให้กำลังอัดที่สูงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยสรุปแล้วปูนซีเมนต์ก็คือสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้มวลรวมหยาบเกาะตัวกันแน่นขึ้นเพื่อประโยชน์ในการใช้เป็นวัสดุที่ต้องรับแรงอัดสูง

วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ คือ หินปูน (limestone) หินดินดาน (shale) แร่เหล็ก (hematite) ดินเหนียวหรือดินดำ (clay) ยิปซัม (gypsum) และถ่านหิน (coal) โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนที่ใช้คือ หินปูนใช้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ หินดินดานใช้ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ แร่เหล็กใช้ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนดังกล่าวนี้จะใช้แตกต่างมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบ ซึ่งจำเป็นต้องรู้องค์ประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของวัตถุดิบนั้น

1) หินปูน เป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญเพราะจำเป็นต้องใช้ในสัดส่วนที่มากกว่าวัตถุดิบอื่น โดยทั่วไปหินปูนควรมีองค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์เป็นอย่างต่ำ องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ไม่ควรเกิน 2 เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา (SiO_2) ควรต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) หรือ โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) ควรมีค่าต่ำมาก ๆ ไม่ควรเกิน 1 เปอร์เซ็นต์

2) หินดินดาน เป็นวัตถุดิบหลักที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งรองลงมาจากหินปูน โดยองค์ประกอบของหินดินดานที่ต้องการ คือ อะลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินา ซึ่งมีค่อนข้างสูงในหินดินดาน แต่ในขณะเดียวกันโดยธรรมชาติของหินดินดานจะมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้น หินดินดานคุณภาพดีที่ต้องการใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ จึงควรเป็นหินดินดานประเภทอะลูมินาเซล (Alumina shale) กล่าวคือ ควรมีอะลูมินาตั้งแต่ 18 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป และมีซิลิกาต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์

สำหรับในบางพื้นที่ที่ไม่อาจหาแหล่งหินดินดานที่อยู่ใกล้กับที่ตั้งโรงงานได้ อาจใช้ดินเหนียวทดแทนได้ เพราะดินเหนียวโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบของอะลูมินาอยู่สูงเช่นกัน แต่อาจต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำให้ดินแห้งเพิ่มขึ้น ในบางกรณีอาจใช้หินดินดานผสมกับดินเหนียวเพื่อให้ได้สัดส่วนของอะลูมินาและซิลิกาที่เหมาะสม

3) แร่เหล็ก เป็นวัตถุดิบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ถึงแม้ว่าจะใช้ในปริมาณที่น้อยก็ตาม เพราะองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์และอะลูมินา จะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการหลอมได้ง่ายหรือฟลักซ์ (fluxes) ในการเผา ช่วยให้มีความต้านทานต่อปฏิกิริยาของซัลเฟตและปฏิกิริยารวมตัวกับน้ำ (Hydration) ที่ระดับความร้อนต่ำ และช่วยเพิ่มความแข็งแกร่งของปูนซีเมนต์และสีด้วย

นอกจากแร่เหล็กแล้ว บางครั้งอาจมีการใช้ศิลาแลง (laterite) ทดแทนได้ หรืออาจมีการใช้เศษเหล็กทดแทนในกรณีที่ขาดแคลนแร่เหล็กก็ได้

4) ยิปซัม เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยบดผสมกับปูนเม็ด (clinker) เพื่อให้ซีเมนต์แข็งตัวช้า มีเวลาพอสำหรับการสร้างความแกร่งของคอนกรีต

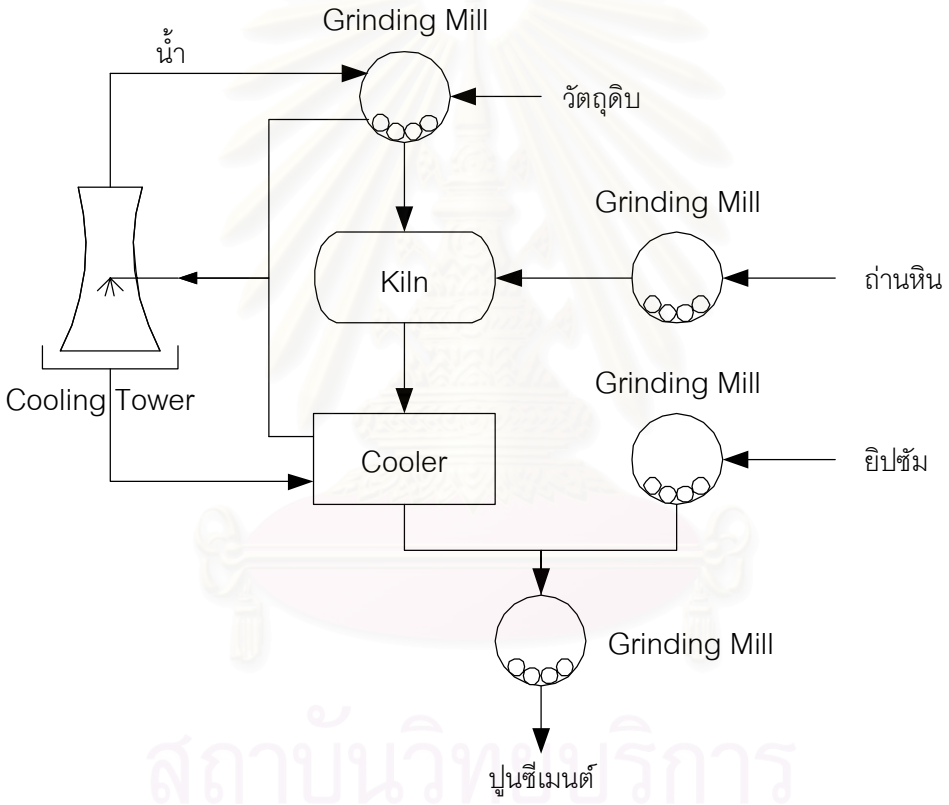
5) ถ่านหิน เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการเผาให้พลังงานความร้อนกับดินผง (raw meal) โดยถ่านหินที่ใช้มีทั้งลิกไนต์ (lignite) บิทูมินัส (bituminous) และแอนทราไซท์ (anthracite) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในแต่ละโรงงาน บางโรงงานมีการใช้ถ่านหินที่ผลิตในประเทศ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ บางโรงงานอาจใช้ถ่านหินนำเข้าจากต่างประเทศ

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

การผลิตปูนซีเมนต์ (ดังรูปที่ 2.2) ประกอบด้วยขั้นตอนหลักดังนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบทั้งหมด ได้แก่ หินปูน หินดินดาน ดินเหนียว แร่เหล็ก (ชนิดของวัตถุดิบและปริมาณอาจแตกต่างออกไปในแต่ละโรงงาน) จะผ่านการย่อยหยาบให้ได้ขนาดตามต้องการ แล้วนำไปเก็บในอาคารเก็บวัตถุดิบ เพื่อรอส่งต่อไปยังหม้อบดวัตถุดิบต่อไป ส่วนยิปซัมจะถูกย่อยและเก็บไว้เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการบดปูนซีเมนต์



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

2) การเตรียมดินผง (Raw Meal)

นำวัตถุดิบต่าง ๆ มาบดละเอียดผสมกันในหม้อบดวัตถุดิบให้ละเอียดเป็นผง โดยผสมกันในอัตราส่วนที่ต้องการจากนั้นนำไปเก็บไว้ในไซโลเก็บดินผง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) การเผาปูนเม็ด

ดินผงที่ได้จะถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 900 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) สลายตัวกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เกือบทั้งหมด จากนั้นจะให้ความร้อนต่อไปอีกจนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 1300 - 1450 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นปูนเม็ด (Clinker) แล้วร่วงลงไปในห้องเย็นให้เหลืออุณหภูมิประมาณ 80 — 90 องศาเซลเซียส

4) การบดปูนเม็ด

นำปูนเม็ดและยิปซัมมาบดผสมกันในหม้อบดปูนซีเมนต์ตามอัตราส่วนที่ต้องการ (ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนของปูนเม็ดต่อยิปซัมเท่ากับ 95 : 5) ปูนซีเมนต์ผงที่บดได้อาจถูกเก็บไว้ในไซโลเพื่อรอการบรรจุและจำหน่ายต่อไป

จะเห็นได้ว่าวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์จะเป็นวัตถุดิบประเภทหินหรือแร่ธาตุ และวัตถุดิบประเภทที่ให้พลังงาน ซึ่งการได้มาของวัตถุดิบเหล่านี้จะได้จากการทำเหมือง ทั้งการทำเหมืองหินและเหมืองถ่านหิน นอกจากนั้นในกระบวนการผลิตยังมีการใช้ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเดินเครื่องจักรด้วย ดังนั้นกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนซีเมนต์คือการทำเหมือง และการผลิตไฟฟ้า

2) การทำเหมือง

การทำเหมือง หมายถึง การดำเนินการเพื่อผลิตแร่หรือขุดแร่ออกจากแหล่งที่เกิดอยู่ตามธรรมชาติ เพื่อขายหรือใช้ประโยชน์อื่นๆ [6] ซึ่งตามหลักวิชาการจะแบ่งวิธีการทำเหมืองออกเป็น 2 วิธี คือ การทำเหมืองเปิดหรือการทำเหมืองแร่ผิวดิน (Surface Mining) และการทำเหมืองใต้ดิน (Underground Mining)

ประเทศไทย (ในปี 2540) มีพื้นที่ประทานบัตรและคำขอประทานบัตรทำเหมืองแร่ จำแนกออกเป็นชนิดแร่ได้ทั้งสิ้น 11 ชนิด ซึ่งใช้เทคโนโลยีด้านการทำเหมืองเปิดหรือการทำเหมืองแร่ผิวดินทั้งหมด โดยจะดำเนินการวิธีเหมืองหาบ ส่วนวิธีการทำเหมืองแร่ใต้ดินหรือเหมืองอุโมงค์ ยังไม่พบว่ามีการนำมาใช้แต่อย่างใด

การทำเหมืองหาบหรือเหมืองเปิดจะมีรูปแบบและวิธีการทำเหมืองที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดแร่และลักษณะภูมิประเทศ โดยมีรูปแบบการทำเหมืองหลัก ๆ ที่สำคัญ ดังนี้

1) การทำเหมืองแบบบ่อเหมือง (Open Pit) จะดำเนินการทำเหมืองในบริเวณที่มีสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบ หรือค่อนข้างราบ หรือเนินเขา โดยการเปิดเปลือกดินออกเป็นบ่อขุมเหมืองภายในขอบเขตพื้นที่ที่กำหนดไว้ โดยออกแบบความลาดเอียงของผนังบ่อเหมือง ตั้งแต่ปากบ่อเหมืองลงมาถึงก้นบ่อเหมืองให้มีความลาดเอียงไม่เกินมุมเสถียรภาพ เพื่อป้องกันการพังทลายของหน้าเหมือง โดยทั่วไปจะออกแบบให้หน้าเหมืองมีความลาดเอียงรวม (Overall Slope) ไม่เกิน 45 องศา และให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได การทำเหมืองแบบนี้จะแบ่งลักษณะการเปิดหน้าเหมืองออกเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 การทำเหมืองเปิดชั้นเหมืองเดี่ยว (Single-Bench) เป็นวิธีการทำเหมืองในบริเวณแหล่งแร่ที่ไม่ลึกจากผิวดินมากนัก ประมาณ 5-10 เมตร หรือแหล่งแร่บางแห่งที่ชั้นดินหรือหินมีความมั่นคงแข็งแรงมาก อาจจะออกแบบให้มีความลึกได้ถึง 20 เมตร

แบบที่ 2 การทำเหมืองเปิดชั้นเหมืองหลายชั้น (Multiple-Bench) เป็นการทำเหมืองในบริเวณแหล่งแร่ที่มีคุณสมบัติไม่แข็งแรง และจำเป็นต้องขุดเปิดหน้าเหมืองอยู่ในระดับลึก โดยจะออกแบบให้มีชั้นเหมืองหลายชั้น ในบางครั้งอาจต้องทำชั้นย่อยเพื่อให้หน้าเหมืองมีความมั่นคงหรือมีเสถียรภาพปลอดภัยจากการพังทลาย และสะดวกในการปฏิบัติงานตามชั้นต่าง ๆ การทำเหมืองแบบนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กับการทำเหมืองแร่ดินมาร์ล หินปูน หินอุตสาหกรรม หินดินดาน และการทำเหมืองแร่หินอ่อนหรือหินประดับ เป็นต้น

2) การทำเหมืองเปิดถมกลับ (Strip Mine) เป็นวิธีการทำเหมืองเปิดที่ปรับปรุงมาจากการทำเหมืองแบบบ่อเหมือง ทั้งแบบชั้นเหมืองเดี่ยวและหลายชั้นในบริเวณพื้นที่ราบ โดยการนำมูลดินหรือเศษหินที่เกิดจากการทำเหมืองทยอยถมกลับลงไปในบ่อเหมืองที่ผ่านการนำแร่ออกไปแล้ว

เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนถ่าย และสามารถปรับปรุงสภาพพื้นที่ไปพร้อมกับการเดินหน้าทำเหมือง

3) การทำเหมืองหินและการทำเหมืองตามไหล่เขา (Quarry Mine and Contour Mine) การทำเหมืองวิธีนี้ จะออกแบบหน้าเหมืองในลักษณะเดี่ยวกันกับการทำเหมืองแบบบ่อเหมือง โดยมีความลาดเอียงรวมไม่เกิน 45 องศา และมีลักษณะเป็นขั้นบันได แต่จะมีลักษณะที่แตกต่างกันที่ขอบเขตบ่อเหมืองไม่ครบรอบ เป็นเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศของแหล่งแร่เป็นภูเขาหรือเทือกเขาขนาดใหญ่ จึงสามารถเปิดทำเหมืองได้เฉพาะตามบริเวณไหล่เขา

โดยทั่วไปการทำเหมืองแร่จะมีกระบวนการผลิตที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การขุดและตัก

ขั้นตอนที่ 2 การขนถ่ายและขนส่ง

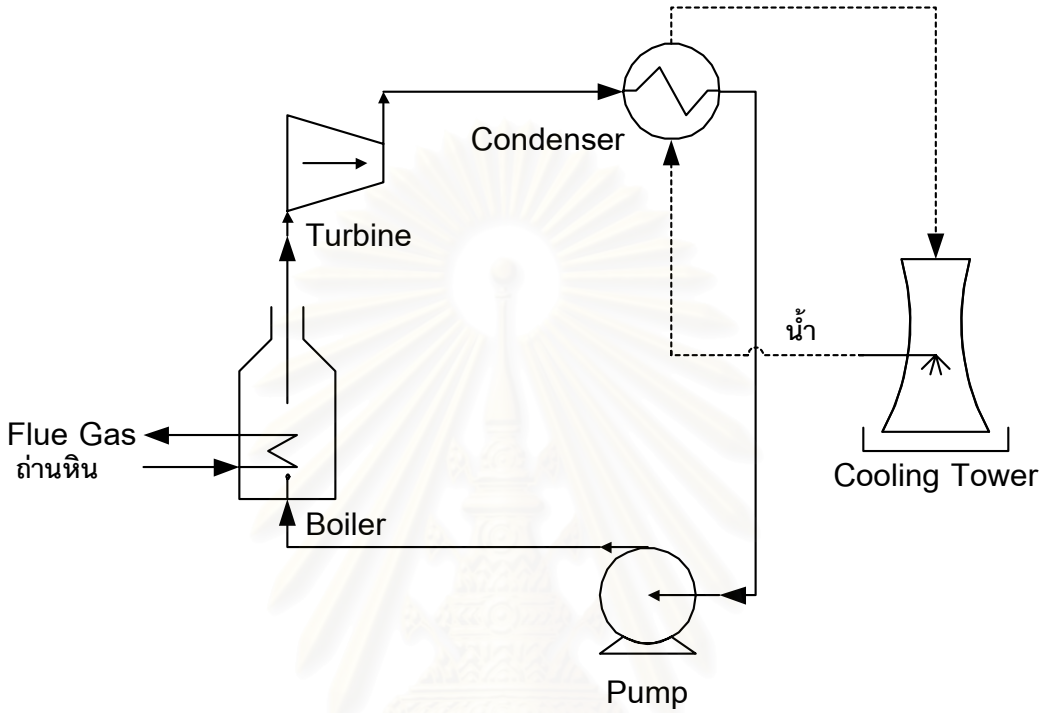
การขุด หมายถึง การนำเอาหินหรือแร่ออกจากแหล่งธรรมชาติเดิมที่ยังไม่เคยเกิดการทำเหมืองมาก่อน หรือบริเวณที่ผ่านการทำเหมืองมาแล้ว ซึ่งกระบวนการขุดเจาะจะมีวิธีการที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำแร่ออกมาใช้ประโยชน์ เช่น การใช้รถขุดแร่ในการทำเหมืองแร่ดินมาร์ล และการเจาะระเบิดในการทำเหมืองแร่หินปูนหรือหินอุตสาหกรรม เป็นต้น สำหรับการตักเป็นขั้นตอนการนำดิน หิน หรือแร่ จากบริเวณที่ถูกขุดออกมาเพื่อเตรียมการขนย้ายต่อไป

การขนถ่ายและขนส่ง เป็นขั้นตอนการขนย้ายดิน หิน หรือแร่ จากบริเวณที่ถูกขุดไปไว้ยังอีกบริเวณหนึ่ง โดยการขนถ่ายจะเป็นการขนย้ายดิน หิน แร่ ในระยะทางสั้นๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ภายในบริเวณพื้นที่ดำเนินการและบริเวณใกล้เคียง ส่วนการขนส่งจะหมายถึงการขนย้ายที่มีระยะทางไกลๆ เช่น การลำเลียงแร่จากหน้างานไปยังโรงโม่ที่อยู่ภายนอก รวมทั้งการจำหน่ายหินจากบริเวณโรงโม่ไปยังแหล่งรับซื้อด้วย

3) การผลิตไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังงานความร้อนจากถ่านหิน เริ่มจากการนำถ่านหินมาเผาในเตาเพื่อให้พลังงานความร้อนถ่ายเทไปยังน้ำในท่อรอบหม้อต้ม (Boiler) ขณะที่อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือด ไอน้ำก็จะเกิดขึ้นแล้วถูกส่งไปยังกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) เพื่อถ่ายเทพลังงาน

บางส่วนไปหมุนใบพัดของกังหันเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าออกมา จากนั้นไอน้ำดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องควบแน่น (Condenser) ที่บริเวณนี้ไอน้ำจะคายความร้อนกลายมาเป็นน้ำ แล้วถูกส่งกลับเข้าไปยังหม้อต้มหมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตไฟฟ้า

สำหรับการเผาไหม้ของเชื้อเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นในส่วนของหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปมี 3 ชนิดคือ

1) หม้อต้มไอน้ำที่มีการเผาในไซโคลน (Cyclone Furnace Fire) หม้อต้มไอน้ำชนิดนี้ใช้ถ่านหินขนาดประมาณ 4 – 5 มิลลิเมตร [28] และสามารถใช้ได้กับถ่านหินที่มีส่วนประกอบของขี้เถ้าและสารระเหยมากได้ เพราะขี้เถ้าและslag ที่เกิดขึ้นจะถูกเหวี่ยงในไซโคลนแล้วตกลงมาในถังเก็บ นอกจากนั้นขี้เถ้าที่เกิดขึ้นยังสามารถช่วยลดการกัดกร่อนและการปนเปื้อนบนพื้นผิวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกด้วย แต่หม้อต้มไอน้ำชนิดนี้มีข้อจำกัดของปริมาณซัลเฟอร์และเหล็กออกไซด์ที่ปนมากับถ่านหิน เพราะถ้ามีส่วนประกอบดังกล่าวมากเกินไป slag ที่เกิดขึ้นจะมี

ส่วนประกอบของเหล็กและเหล็กซัลไฟด์ที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ใช้ นอกจากนั้นหม้อต้มชนิดนี้ยังต้องการพลังงานในการเพิ่มแรงดันสูงและต้องการความร้อนสูงด้วย

2) หม้อต้มชนิดที่ใช้ถ่านหินบดละเอียดเป็นเชื้อเพลิง (Pulverized-Coal Boiler) เป็นหม้อต้มที่ใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สูญเสียความร้อนน้อยและใช้พลังงานน้อย เนื่องจากใช้ออกซิเจนส่วนเกินน้อย จึงสามารถลดพลังงานที่ให้กับพัดลมน้อยลง นอกจากนั้นหม้อต้มชนิดนี้ยังเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการบำรุงรักษาน้อยอีกด้วย แต่หม้อต้มชนิดนี้จะต้องมีส่วนของการบดถ่านหินให้ละเอียด และถ้าถ่านหินที่ป้อนเข้าไปในหม้อต้มมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิด slag และประสิทธิภาพของการเผาไหม้ลดลง

3) หม้อต้มไอน้ำแบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นหม้อต้มที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในระหว่างการดำเนินการเผาถ่านหิน เพื่อช่วยลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่อุณหภูมิไม่สูงมาก คือประมาณ 750 – 950 °C [28] ทำให้หม้อต้มไอน้ำชนิดนี้เกิดไนโตรเจนออกไซด์น้อยกว่าหม้อต้มไอน้ำชนิดอื่น แต่หม้อต้มชนิดนี้ก็มีข้อเสียเพราะในการเกิดปฏิกิริยาลดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแคลเซียมซัลเฟตขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกวิธีการผลิตไฟฟ้าที่หม้อต้มไอน้ำเป็นชนิด Pulverized-Coal Boiler เนื่องจากเป็นหม้อต้มไอน้ำที่ใช้อย่างแพร่หลายและเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมาก

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุตสาหกรรมหลายประเภทได้นำเอาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์มาประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น Anderson และคณะ [10] ได้ทำการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตซอสมะเขือเทศโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตแบบ Cradle to Gate ที่ประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ คือ การทำการเกษตร การผลิต (ซอส ไฟฟ้า และน้ำตาลดิบ) การขนส่ง การบรรจุหีบห่อ การบำบัดน้ำเสีย และการจัดการบรรจุภัณฑ์หีบห่อ ส่วนการผลิตอื่น ๆ เช่น การผลิตขวดใส่ซอส การผลิตหมึก การผลิตกาว และการผลิตสี ไม่ได้นำมาพิจารณา สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลที่ได้จากโรงงาน การสัมภาษณ์ และรายงานด้านสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการประเมินผลกระทบ Anderson และคณะ ได้แบ่งผลกระทบออกเป็น ผลกระทบที่ทำให้โลกร้อน (Global Warming) การลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone Depletion) การเกิดฝนกรด

(Acidification) ปรากฏการณ์ที่ทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Eutrophication) ปรากฏการณ์ Photochemical Oxidation และความเป็นพิษต่อมนุษย์ ซึ่งผลของการประเมินทางสิ่งแวดล้อมสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลกระทบต่อปรากฏการณ์ทำให้โลกร้อน ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการแปรรูปและการบรรจุหีบห่อเนื่องจากมีการใช้พลังงานมาก
2) การเกิดฝนกรด เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบวนการแปรรูป
3) ปรากฏการณ์ Photo-oxidant ส่วนใหญ่เกิดจากการปล่อยสารไอโดรคาร์บอน ในขั้นตอนการบรรจุหีบห่อ
4) ปรากฏการณ์ Eutrophication จะมีผลกระทบมากในส่วนของการเกษตร เพราะฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่ปล่อยสู่อากาศมาจากปุ๋ยที่ใช้ในการเกษตร
5) ความเป็นพิษต่อมนุษย์จะเกิดจากสารโลหะหนักที่ปนมากับปุ๋ยและอันตรายจากความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนของการผลิตไฟฟ้า

นอกจากนั้นในงานวิจัยของ Anderson และคณะ ยังกำหนดให้การใช้พลังงานเป็นดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมด้วย ซึ่งในส่วนของการเก็บรักษาภายในตู้เย็นเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมากที่สุด โดยการใช้พลังงานของการเก็บรักษาภายในตู้เย็นเป็นเวลา 1 ปีจะใช้พลังงานเท่ากับกระบวนการในส่วนของการบรรจุและกระบวนการแปรรูปรวมกัน

Hansen [11] ได้รวบรวมผลการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในประเทศนอร์เวย์และสวีเดน โดยแบ่งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ออกเป็น 5 กลุ่มตามลักษณะการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [11]

ในงานวิจัยของ Hansen นี้ ได้ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งผลกระทบออกเป็น การลดลงของแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถผลิตขึ้นใหม่ได้ การลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศ ปรากฏการณ์โลกร้อน การเกิดฝนกรด ปรากฏการณ์ Photochemical Oxidation ปรากฏการณ์ Nitrification ความเป็นพิษต่อคน และความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดย Hansen ได้สรุปผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์ และผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรชีวิต ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยผลการประเมินแสดงว่า ผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักร และในแต่ละกลุ่มของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกัน ขั้นตอนที่มีผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ การผลิตวัตถุดิบ การผลิต และการใช้ผลิตภัณฑ์ สำหรับการผลิตวัตถุดิบที่มีผลทำให้แหล่งพลังงานลดลง ทำให้เกิดปรากฏการณ์โลกร้อนและทำให้เกิดฝนกรด คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1, 2 และ 4 สำหรับการใช้ผลิตภัณฑ์กลุ่มที่ 1, 3 และ 5 จะทำให้เกิด Photochemical Oxidation โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่ม 1 และ กลุ่ม 3 ในส่วนของการขนส่งวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ พบว่าเกือบทุกกลุ่มที่ศึกษามีผลกระทบน้อย ยกเว้นในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 4 ซึ่งจะมีผลกระทบทำให้เกิดฝนกรด และทำให้เกิดปรากฏการณ์ Photochemical Oxidation สำหรับการบรรจุหีบห่อของเสียที่เกิดขึ้นจากการบรรจุหีบห่อมีผลกระทบน้อยมาก แต่ภายหลังการใช้งานแล้ว ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากหีบห่อของผลิตภัณฑ์กลุ่มที่ 4 จะมีผลกระทบมาก สำหรับขั้นตอนการจัดการของเสียจะเกิดกากของเสียทุกกลุ่มผลิตภัณฑ์เพราะกากของเสียที่สามารถนำกลับมาใช้ได้มีน้อย

ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทของผลิตภัณฑ์ตามลักษณะการใช้งาน [11]

กลุ่มที่	ลักษณะของกลุ่มผลิตภัณฑ์	ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษา
1	ผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในการใช้งาน	สีที่ใช้ในทะเล, สีทาภายในที่ใช้ตัวทำละลาย, สีทาภายในที่ใช้ตัวทำละลาย
2	ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายและไม่มีการใช้พลังงาน	สายไฟ, คอนกรีต, เก้าอี้ทำงาน
3	ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเคลื่อนย้ายและมีการใช้พลังงาน	แกนเหล็กของไดนาโม
4	ผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลื่อนย้ายและไม่มีการใช้พลังงาน	บรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์นม, บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากอลูมิเนียม, บรรจุภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม
5	ผลิตภัณฑ์ที่มีการเคลื่อนย้ายและมีการใช้พลังงาน	เรือยนต์ที่ทำจากพลาสติกเสริมใยแก้ว

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการผลิตปูนซีเมนต์มากมาย โดยเฉพาะเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณการใช้พลังงาน และลดสารมลพิษที่เกิดขึ้น ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ไม่ได้พิจารณาถึงการใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ตัวอย่างการลดพลังงาน เช่น การใช้สารเติมแต่ง (additives) ได้แก่ ขี้เถ้า ขี้โลหะ อิฐหัก บดผสมกับปูนเม็ดเพื่อลดพลังงานต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้ [12,13] การใช้กากของเสียเป็นเชื้อเพลิงเพื่อแทนที่การใช้ถ่านหินบางส่วน [14] และการลดอุณหภูมิของการเกิดปูนเม็ดเพื่อลดพลังงานที่ใช้ เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์แยกตามประเภทของผลิตภัณฑ์

ผลกระทบ	Fossil Fuel Depletion					Global Warming					Acidification					Photochemical Oxidation					Solid Waste				
กลุ่มของผลิตภัณฑ์	●	●	○	●	○	●	●	○	●	○	●	●	○	●	◐	◐	●	◐	◐	○	○	◐	◐	○	○
การได้มาของวัตถุดิบ	●	◐	○	◐	○	◐	◐	○	○	○	◐	◐	○	○	◐	◐	◐	●	●	○	◐	◐	○	○	○
การผลิต	◐	◐	○	◐	○	◐	◐	○	◐	○	●	◐	○	●	○	◐	○	○	●	○	●	○	○	○	○
การขนส่ง	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
การบรรจุหีบห่อ	○	◐	●	○	●	◐	○	●	○	●	◐	◐	●	○	●	●	◐	●	○	●	◐	◐	◐	○	○
การใช้ผลิตภัณฑ์	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◐	○	◐	●	◐	●	●
การจัดการของเสีย																									

● ผลกระทบมาก

◐ ผลกระทบปานกลาง

○ ผลกระทบน้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงาน Blue Circle Cauldon [55] ใช้เศษยางรถยนต์แทนปริมาณถ่านหินบางส่วน ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลงแล้ว ยังสามารถลดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ลงได้อีกด้วย สำหรับการลดอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาในเตาสามารถทำได้โดยเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ เช่น Sharp และคณะ [13] ใช้เบไลท์ (Ca_2SiO_4) แทนเอไลท์ (Ca_3SiO_5) เนื่องจากซิลิกา 1 โมล ในเอไลท์ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต 3 โมล แต่ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในเบไลท์ 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต 2 โมล และปฏิกิริยาการเกิดปูนเม็ดของเบไลท์ ใช้อุณหภูมิประมาณ 1200 °C ซึ่งน้อยกว่าการเกิดปฏิกิริยาของเอไลท์ ที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 1450 °C ทำให้พลังงานที่ใช้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการน้อยลงด้วย ซึ่งทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยลงเช่นกัน Raina และ Janakiraman [15] ใช้แคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) หรือยิปซัม ($CaSO_4$) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของปูนเม็ด และเป็นการลดอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาลงด้วย

การลดปริมาณฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต Hiroshi [52] ได้เสนอวิธีการลดฝุ่นโดยการเปลี่ยนกระบวนการให้เป็นระบบปิด และติดอุปกรณ์แยกฝุ่นจากก๊าซที่ปล่อยออกมา ปริมาณของฝุ่นซึ่งส่วนมากมาจากขั้นตอนการผสมวัตถุดิบ การเผา และการบดละเอียด สามารถลดได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์แยกฝุ่นที่เหมาะสมกับขนาดของฝุ่นที่แขวนลอยในก๊าซ วิธีการนี้สามารถลดปริมาณฝุ่นในก๊าซที่ออกจากหม้อเผาจาก 0.05 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในปี ค.ศ. 1970 ลงมาเหลือ 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในปี ค.ศ. 1994

นอกจากนั้น Hiroshi [52] ทำการลดการปล่อยสารมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมโดยการประหยัดพลังงานและทรัพยากรธรรมชาติ ดังนี้

1) การสร้างกระบวนการผลิตใหม่ เพื่อการอนุรักษ์พลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์สามารถทำได้โดย

- ขยายขนาดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้อัตราการผลิตใกล้เคียงกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่ตลาดต้องการ
- เปลี่ยนไปใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยขึ้น
- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยควบคุมการผลิต
- เลิกใช้อุปกรณ์ที่ล้าสมัย

วิธีการดังกล่าวสามารถลดการใช้พลังงานความร้อนลงจากประมาณ 5,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัมของปูนเม็ด (clinker) ในปี ค.ศ. 1960 ลงเหลือประมาณ 3,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัมของปูนเม็ดในปี ค.ศ. 1994 ส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ลดลงจาก 125 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันปูนซีเมนต์ ในปี ค.ศ. 1960 ลงเหลือประมาณ 100 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันปูนซีเมนต์ในปี ค.ศ. 1994

ในส่วนของการบดสามารถลดพลังงานที่ต้องใช้ลงโดยการปรับปรุงกระบวนการบด เช่น เพิ่ม pregrinder (roller mill) ก่อนที่จะทำการบดด้วย ball mill

2) การปรับปรุงกระบวนการที่มีอยู่ เพื่อลดพลังงานความร้อนที่ใช้สามารถโดยการปรับปรุงกระบวนการต่าง ๆ เช่น การลดความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีของปูนเม็ดและก๊าซร้อน การนำของเสียที่ได้กลับมาใช้ในกระบวนการ ซึ่งนอกจากจะลดพลังงานลงแล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตยังลดลงด้วย

3) การนำของเสียกลับมาใช้ในกระบวนการผลิต

หลักการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ของเสียที่จะนำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- มีราคาต่ำกว่าวัตถุดิบที่ใช้อยู่
- ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์
- ไม่ก่อให้เกิดสารมลพิษอื่น ๆ
- มีปริมาณเพียงพอตลอดระยะเวลาการดำเนินการ

ของเสียที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงสามารถป้อนเข้าได้สองทางคือป้อนเข้าทางหัวเผาหลัก และป้อนในส่วนของ precalcinator โดยของเสียที่นำมาใช้ร่วมกับวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงต้องนำมาผสมกับวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงหลักก่อน ของเสียที่ละเอียดและเผาไหม้ได้ง่ายป้อนพร้อมกับถ่านหินที่บดละเอียดแล้ว ส่วนของที่หยาบและติดไฟยาก เช่น ฝุ่นจากระบบบำบัดป้อนพร้อมกับถ่านหินก่อนนำไปบดละเอียด

สำหรับการลดปริมาณฝุ่นที่เกิดจากการผลิตซีเมนต์ Kessler [16] ได้แนะนำดังนี้

1) ทำการตรวจวัดหาแหล่งที่เกิดฝุ่น และทำการติดตั้งระบบควบคุม
2) เลือกวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์และคลอรีนน้อย หรือเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ

3) นำฝุ่นที่ดักได้มาป้อนเข้าเตาใหม่ แต่วิธีนี้อาจต้องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นด้วย

ส่วนในกรณีของการลดออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) McQueen และคณะ [17] ได้เสนอวิธีการลดไนโตรเจนออกไซด์ไว้ดังนี้

1) ดัดแปลงกระบวนการเผาไหม้ โดยลดปริมาณอากาศที่เกินพอ (Excess Air) เพิ่มก๊าซหมุนเวียน (Flue Gas Recirculation) หรือลดอัตราส่วน ความเร็ว และปริมาณออกซิเจนของอากาศที่เข้าเตาช่วงต้น (Primary Air)
2) ลดอุณหภูมิของเปลวไฟที่หัวเผา (Low NO_x Burner)
3) เพิ่มช่วงของการแคลไซน์ (Precalciner Firing Zone) วิธีการนี้สามารถลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ได้ แต่อาจเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเช่นกัน
4) ใส่แอมโมเนีย (NH_3) หรือยูเรีย ในช่วงอุณหภูมิ 1600-1900 °F เพื่อให้อนุมูลของแอมโมเนีย (NH_2 radical) ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์ หรือ ใส่แอมโมเนียในช่วงอุณหภูมิ 600-750 °F เพื่อทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์ ได้ก๊าซไนโตรเจนและน้ำ

ถึงแม้ว่าการปรับปรุงกระบวนการผลิตในงานวิจัยข้างต้นจะช่วยลดพลังงานและสารมลพิษลงได้ แต่เมื่อพิจารณาตามหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิตพบว่า การนำอุปกรณ์หรือวัตถุดิบใหม่เข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนอื่น ๆ ในช่วงวัฏจักรชีวิตของการผลิต ซึ่งมักจะหมายความถึงความต้องการทางด้านพลังงานและวัตถุดิบที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดสารมลพิษที่มากขึ้นด้วย ซึ่งสิ่งต่าง ๆ ที่เพิ่มขึ้นโดยอ้อมจากการปรับปรุงกระบวนการเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้โดยง่าย แต่ต้องพิจารณาเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย และการวิเคราะห์ผลการวิจัย

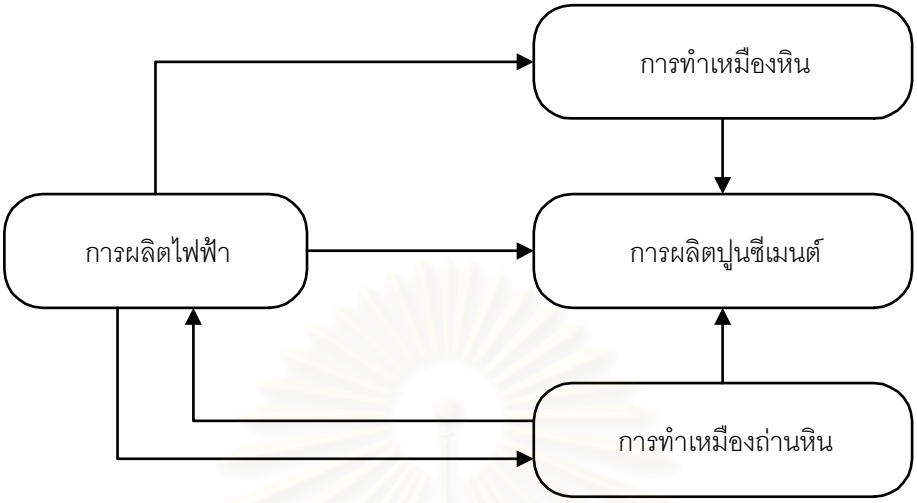
3.1 การรวบรวมข้อมูล

3.1.1 ขอบเขตของระบบ

ในการกำหนดขอบเขตของระบบต้องทำการศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เพื่อตรวจสอบหากระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเมื่อพิจารณาวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าการผลิตวัตถุดิบและพลังงานเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการทำเหมืองหิน การทำเหมืองถ่านหิน และการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งการศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบ “Cradle-to-Gate” โดยมีขอบเขตของระบบเฉพาะขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ สำหรับขั้นตอนการขนส่ง การนำไปใช้ การใช้ซ้ำ การบำรุงรักษา การนำกลับมาใช้ใหม่ และการจัดการของเสีย ไม่ได้นำมาพิจารณา ส่วนการประเมินผลกระทบที่มีต่อสภาวะแวดล้อม เช่น การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก การลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศ และการประเมินผลกระทบที่มีต่อสังคมไม่ได้พิจารณาเช่นกัน เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ประกอบการพิจารณายากต่อการรวบรวมและติดตาม สำหรับการผลิตวัตถุดิบและการผลิตปูนซีเมนต์ไม่ได้พิจารณาในส่วนของการบรรจุหีบห่อหรือกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการบรรจุหีบห่อ เช่น การผลิตกระดาษ การผลิตกาว การผลิตเชือก การผลิตสี เป็นต้น และไม่ได้พิจารณาถึงเชื้อเพลิงที่ใช้ในช่วงเดินเครื่องเริ่มต้น (Start Up) เนื่องจากมีปริมาณการใช้น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากนั้นขอบเขตของการทำวิจัยยังไม่ได้พิจารณาในส่วนของการผลิตสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีปริมาณน้อยเช่นกัน [8]

สำหรับข้อมูลที่รวบรวมนอกจากจะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองหิน การทำเหมืองถ่านหิน และการผลิตไฟฟ้าด้วย โดยข้อมูลที่รวบรวมจะประกอบไปด้วยวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต และผลการตรวจวัดสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในภาคผนวก ข เพื่อนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการคำนวณ และนำมาประกอบการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นข้อมูลบางส่วน เช่น ผลการตรวจวัดฝุ่นแขวนลอยในอากาศ จะ

นำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้



รูปที่ 3.1 ขอบเขตของระบบสำหรับการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์

ข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุดิบและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์สามารถหาได้จากข้อมูลปฐมภูมิของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์โดยตรง แต่เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับการสืบหาข้อมูล ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ใช้ประกอบการทำวิจัยในครั้งนี้ จึงเป็นข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ที่ได้มาจากรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment, EIA) และรายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม ของสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (ปี พ.ศ. 2541)

ในการเลือกกระบวนการผลิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีข้อสมมติดังนี้

1) การผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการผลิตแบบแห้ง และชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีอัตราส่วนผสมของปูนเม็ดต่อยิปซัมเป็น 95:5 เปอร์เซ็นต์
2) การผลิตไฟฟ้าเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้ถ่านหินบดละเอียดเป็นเชื้อเพลิง (Pulverized Coal Power Plant)
3) โรงงานที่ผลิตปูนซีเมนต์เป็นโรงงานที่มีการทำเหมืองหินอยู่บริเวณใกล้กับโรงงาน โดยระยะทางจากเหมืองหินไปยังโรงโม่ คือ 3 กิโลเมตร และระยะทางจากโรงโม่หินไปยังโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ คือ 2 กิโลเมตร
4) การทำเหมืองถ่านหินไม่คำนึงถึงผลกระทบจากการขนส่ง เนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่นำเชื้อเพลิงมาจากต่างประเทศ จึงไม่สามารถคิดระยะทางที่แน่นอนได้

3.1.2 ผังกระบวนการผลิต

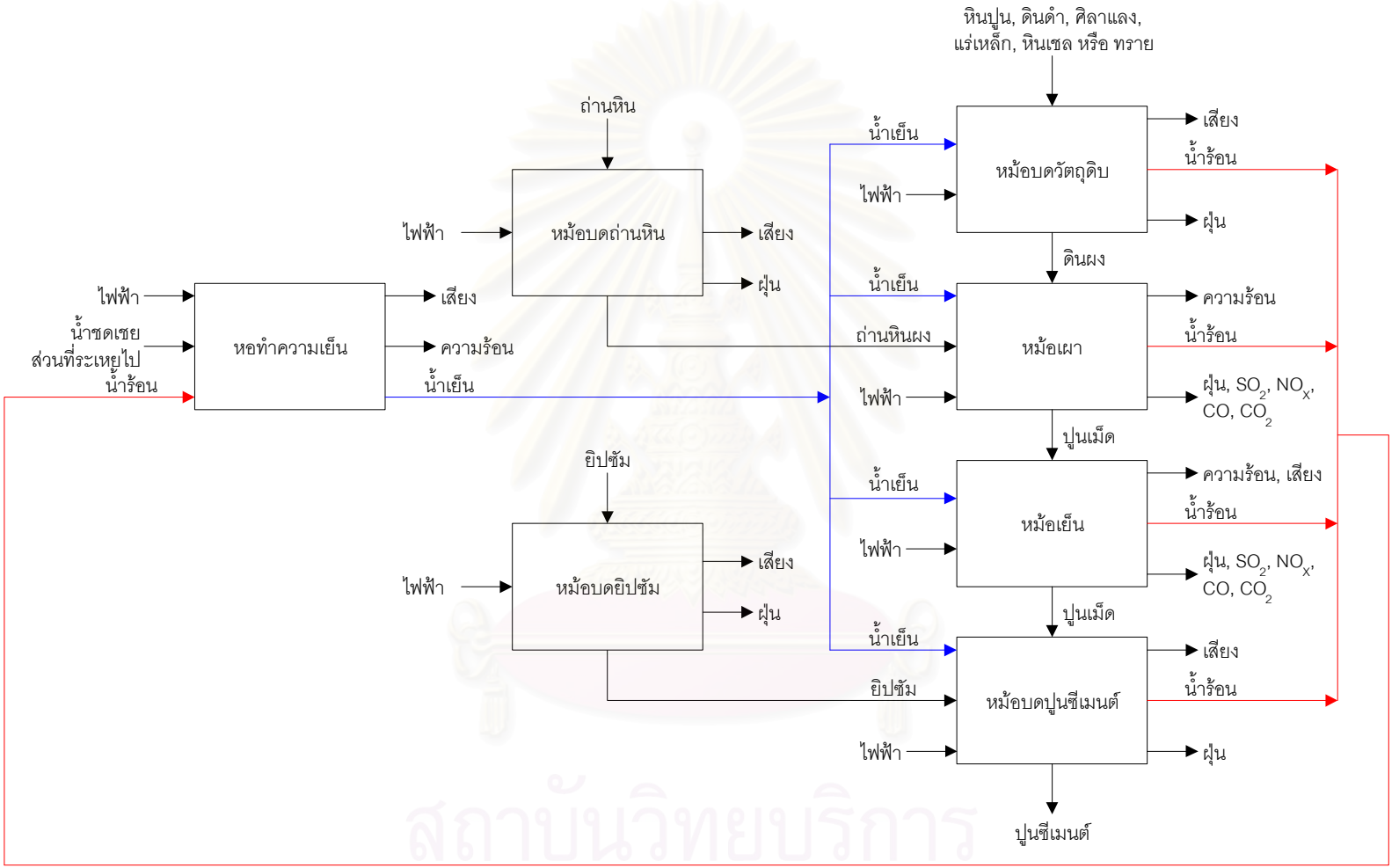
วัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ประกอบด้วย หิน และเชื้อเพลิง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตนอกจากจะได้ปูนซีเมนต์ตามที่ต้องการแล้ว ยังเกิดสารมลพิษออกมาด้วย โดยสารมลพิษที่สำคัญที่ปล่อยออกมาจากโรงงาน ประกอบไปด้วยฝุ่นละอองที่เกิดจากการบดย่อยวัตถุดิบและการบดปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังมีก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตปูนเม็ดด้วย นอกจากนี้ยังมีมลพิษทางด้านเสียงและความร้อนเกิดขึ้นจากการผลิตปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ในส่วนของการผลิตไฟฟ้า วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ถ่านหิน และน้ำ เมื่อถ่านหินเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดฝุ่นละออง ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกมาจากปล่องระบายอากาศของหม้อต้มไอน้ำ และเหลือขี้เถ้าในส่วนล่างของเตา สำหรับเสียงที่เกิดขึ้นจะมาจากหลาย ๆ อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น หม้อต้ม ปั้ม ท่อส่งไอน้ำ เป็นต้น ส่วนน้ำเสียที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าจะมาจาก 2 แหล่งใหญ่ คือ น้ำจากหม้อต้มไอน้ำ (Boiler Blow Down) และน้ำจากหอทำความเย็น (Cooling Tower Blow Down) [8] นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนของการผลิตไฟฟ้ายังเกิดจากอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ความร้อนที่สูญเสียจากหม้อต้ม จาก Turbine และหอทำความเย็น เป็นต้น

สำหรับการทำเหมืองไม่มีการใช้วัตถุดิบ นอกจากการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่ออำนวยความสะดวกในการดำเนินการ และการใช้เชื้อเพลิงเพื่อการขนส่ง ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัย

เมื่อพิจารณาจากกระบวนผลิตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ สามารถสรุปสิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิตและสิ่งที่ออกมาจากการผลิตโดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ผังกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 3.1 สิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และสิ่งที่ออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เมื่อพิจารณาแบบวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์

สิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิต (Inputs)	สิ่งที่ออกจากกระบวนการผลิต (Outputs)
- หิน (หินปูน หินดินดาน ดินเหนียว ศิลาแลง แร่เหล็ก หินเชล และทราย) - น้ำ - ไฟฟ้า - เชื้อเพลิง (ถ่านหิน) - อากาศ	- ปูนซีเมนต์ - ฝุ่นละออง - ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ - ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ - ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ - ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ - น้ำเสีย - เสียง - ความร้อน

3.1.3 การทำสมดุลมวลสารและการคำนวณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยพิจารณาจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ 4 โรง ที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยโรงงานที่ 1 โรงงานที่ 2 และโรงงานที่ 3 ใช้ชนิดของวัตถุดิบ ชนิดของอุปกรณ์การบด และกำลังการผลิตปูนเม็ดแตกต่างกัน ส่วนโรงงานที่ 3 และ โรงงานที่ 4 มีกระบวนการผลิตเหมือนกันแต่มีกำลังการผลิตปูนเม็ดต่างกัน สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของโรงงานทั้ง 4 แสดงอยู่ในภาคผนวก ข

การคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ ฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คำนวณจากการดุลมวลสาร และจาก Emission Factor ของสำนักงานป้องกันและรักษาสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency, USEPA) ดังแสดงในภาคผนวก ก ซึ่งค่า Emission Factor นี้ยังนำมาใช้ในการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากการกระบวนการผลิตอื่นในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ด้วย อันได้แก่ ปริมาณฝุ่นจากการระเบิดและการขนส่งในการทำเหมือง และปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำในการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในภาคผนวก ก.5.2 ถึง ภาคผนวก ก.5.3

ค่า Emission Factor ของสำนักงานป้องกันและรักษาสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา ที่นำมาใช้ในการคำนวณนี้เป็นค่าที่แสดงปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมหรืออุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ที่ปล่อยสารมลพิษนั้น [36] Emission Factor ส่วนใหญ่จะมีหน่วยเป็น น้ำหนักของสารมลพิษต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ หรือปริมาตร หรือระยะทางของกิจกรรมที่ปล่อยสารมลพิษ เช่น กิโลกรัมของฝุ่นต่อเมกกะกรัมของถ่านหินที่เผา โดย Emission Factor นี้เป็นค่าเฉลี่ยของสารมลพิษจากแหล่งกำเนิดสารมลพิษหลาย ๆ แหล่งในประเทศสหรัฐอเมริกา

ในงานวิจัยนี้นำค่า Emission Factor มาคำนวณหาปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์โดยกำหนดให้ระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง (Fabric Filter) มีประสิทธิภาพร้อยละ 99.9 ยกเว้นในกรณีของระบบจำจัดฝุ่นแบบถุงกรองที่ใช้กับหม้อบดวัตถุดิบละเอียดจะมีประสิทธิภาพร้อยละ 99.99 ดังนั้นค่า Emission Factor ที่ใช้สำหรับการคำนวณในงานวิจัยนี้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากหม้อบด

ชนิดของหม้อบด	Emission Factor (กิโลกรัม/ตันของวัตถุดิบ)
1. Jaw crusher หรือ Gyratory crusher	0.5
2. Cone crusher หรือ Hammer crusher	0.16
3. Impact crusher	0.16
4. Ball mill หรือ Tube mill	14
5. Loesche roller mill หรือ MPS roller mill	16

ตารางที่ 3.3 Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากหม้อเผา

ชนิดของหม้อเผา	Emission Factor (กิโลกรัม/ตันของปูนเม็ด)
1. Long Dry Kiln	100
2. Kiln with Dry Calcinator	100
3. Suspension Preheater Kiln	130

ตารางที่ 3.4 Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากหม้อเย็น

ชนิดของหม้อเย็น	Emission Factor (กิโลกรัม/ตันของปูนเม็ด)
Grate Cooler	68

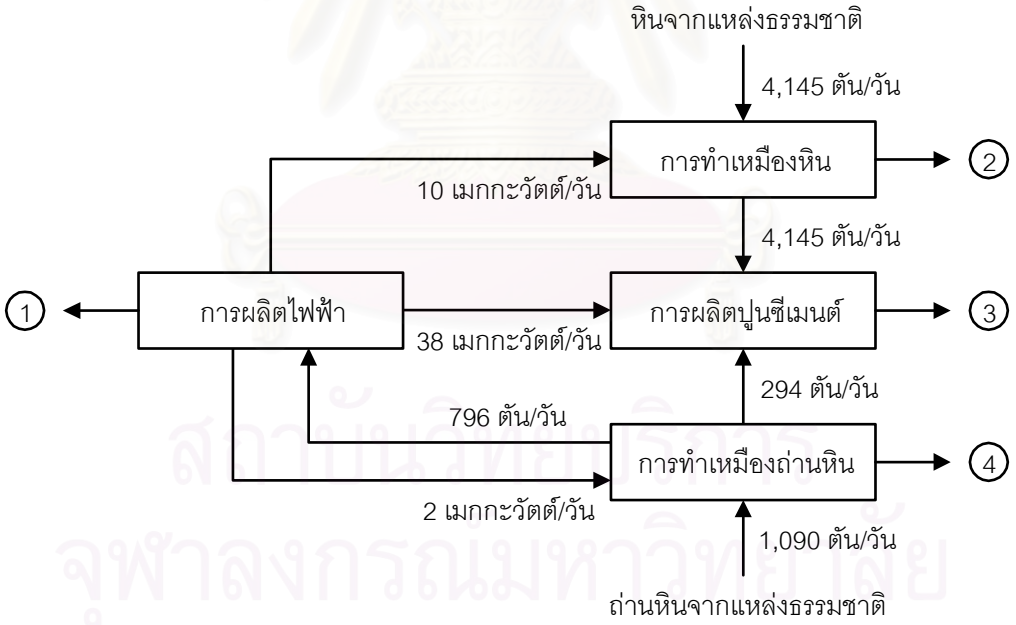
ตารางที่ 3.5 Emission Factor ของก๊าซที่ปล่อยออกจากหม้อเผา

ชนิดของหม้อเผา	Emission Factor (กิโลกรัม/ตันของปูนเม็ด)			
	SO_2	NO_x	CO	CO_2
1. Long Dry Kiln	4.9	3.0	0.11	900
2. Kiln with Dry Calcinator	0.54	2.1	1.8	900
3. Suspension Preheater Kiln	0.27	2.4	0.49	900

จากรายละเอียดของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานทั้ง 4 สามารถคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตได้ดังนี้

1) กรณีศึกษาโรงงานที่ 1

โรงงานที่ 1 มีกำลังการผลิต 2,700 ตันปูนเม็ด/วัน มีปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.3



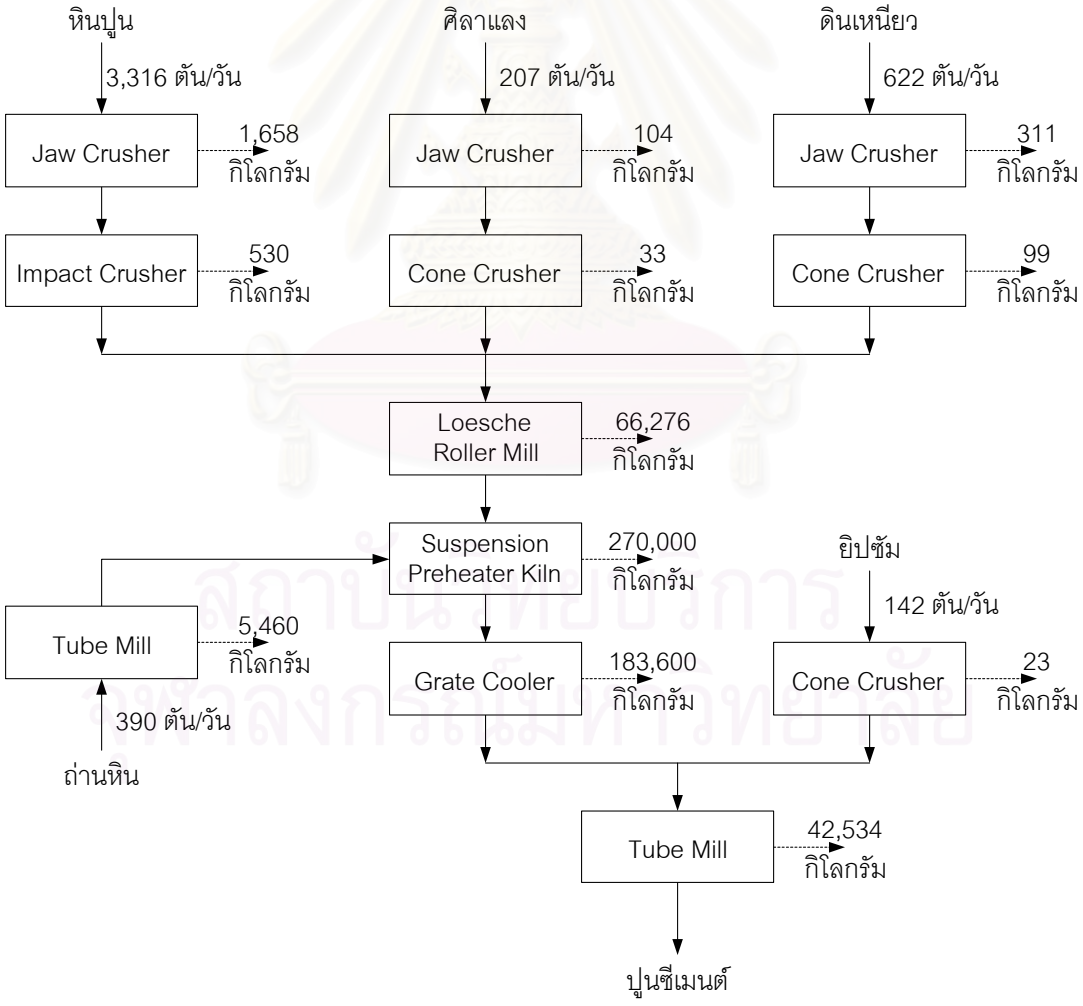
รูปที่ 3.3 ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1

สารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ภายในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ (ตามลูกศรหมายเลข 1 – 4 ในรูปที่ 3.3) แสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต
ภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 1

สารมลพิษ	หน่วย	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิต			
		ไฟฟ้า ①	หิน ②	ปูนซีเมนต์ ③	ถ่านหิน ④
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	31,822	601	570,628	133
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	7,558	-	1,458	-
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	8,751	-	5,670	-
คาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	2,430,000	-
คาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	4,860	-

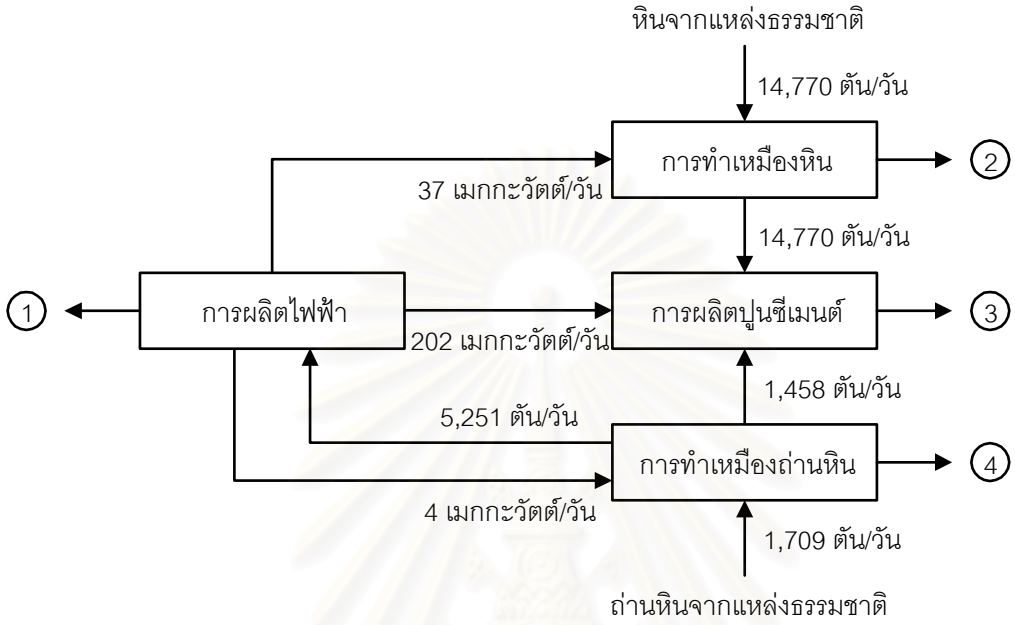
สำหรับผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1

2) กรณีศึกษาโรงงานที่ 2

โรงงานที่ 2 มีกำลังการผลิต 10,000 ตันปูนเม็ด/วัน มีปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.5

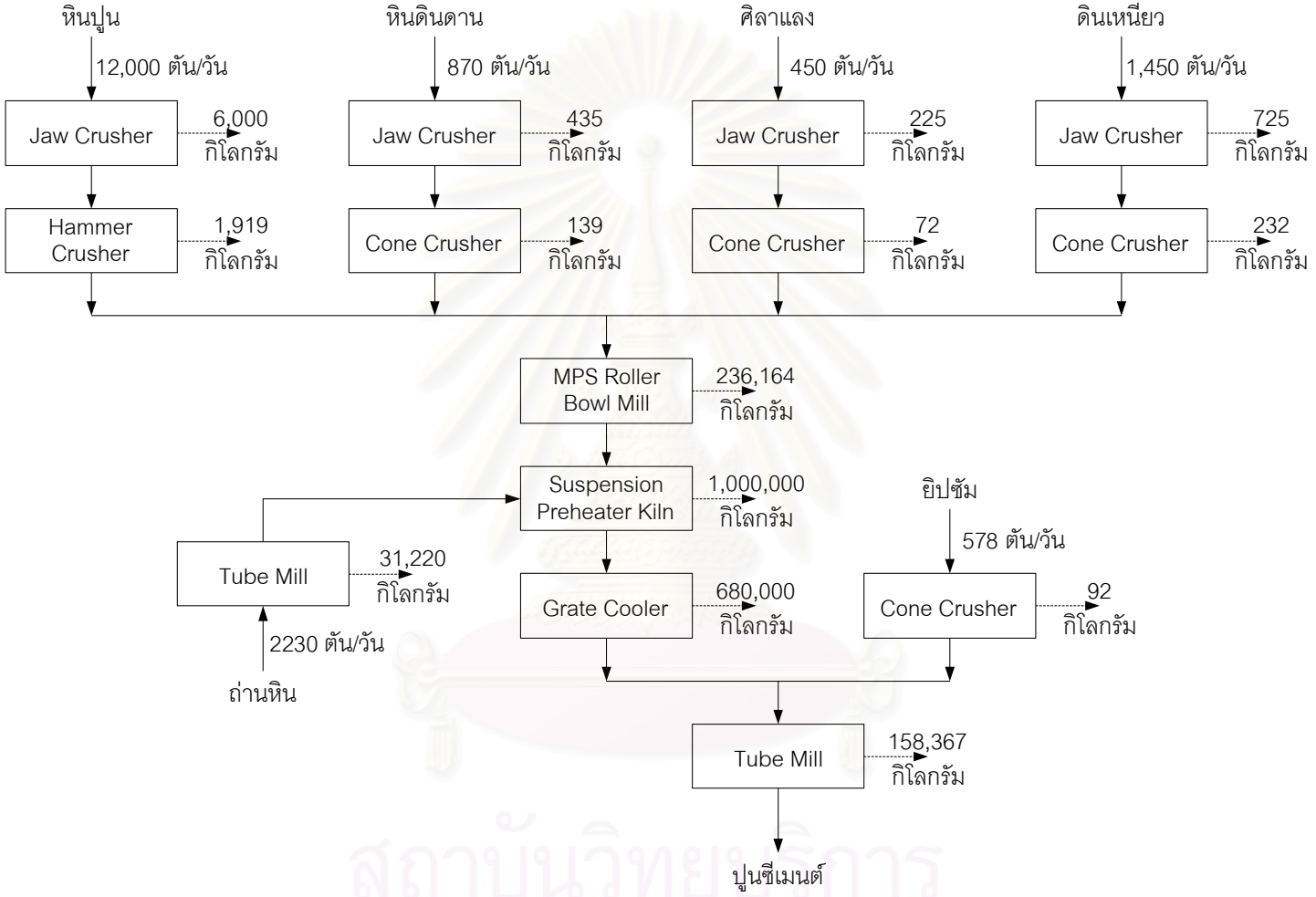


รูปที่ 3.5 ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2

สารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ภายในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ (ตามลูกศรหมายเลข 1 – 4 ในรูปที่ 3.5) แสดงในตารางที่ 3.7 สำหรับผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 2

สารมลพิษ	หน่วย	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิต			
		ไฟฟ้า ①	หิน ②	ปูนซีเมนต์ ③	ถ่านหิน ④
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	210,046	2156	2,115,590	816
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	199,543	-	5,400	-
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	57,763	-	21,000	-
คาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	9,000,000	-
คาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	18,000	-

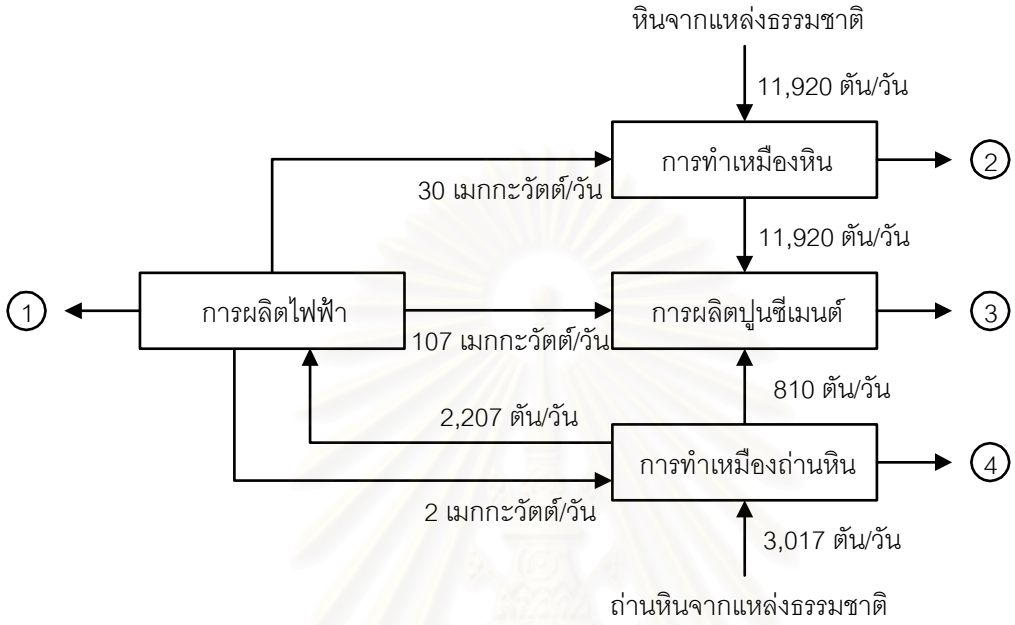


รูปที่ 3.6 ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) กรณีศึกษาโรงงานที่ 3

โรงงานที่ 3 มีกำลังการผลิต 7,500 ตันปูนเม็ด/วัน มีปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.7

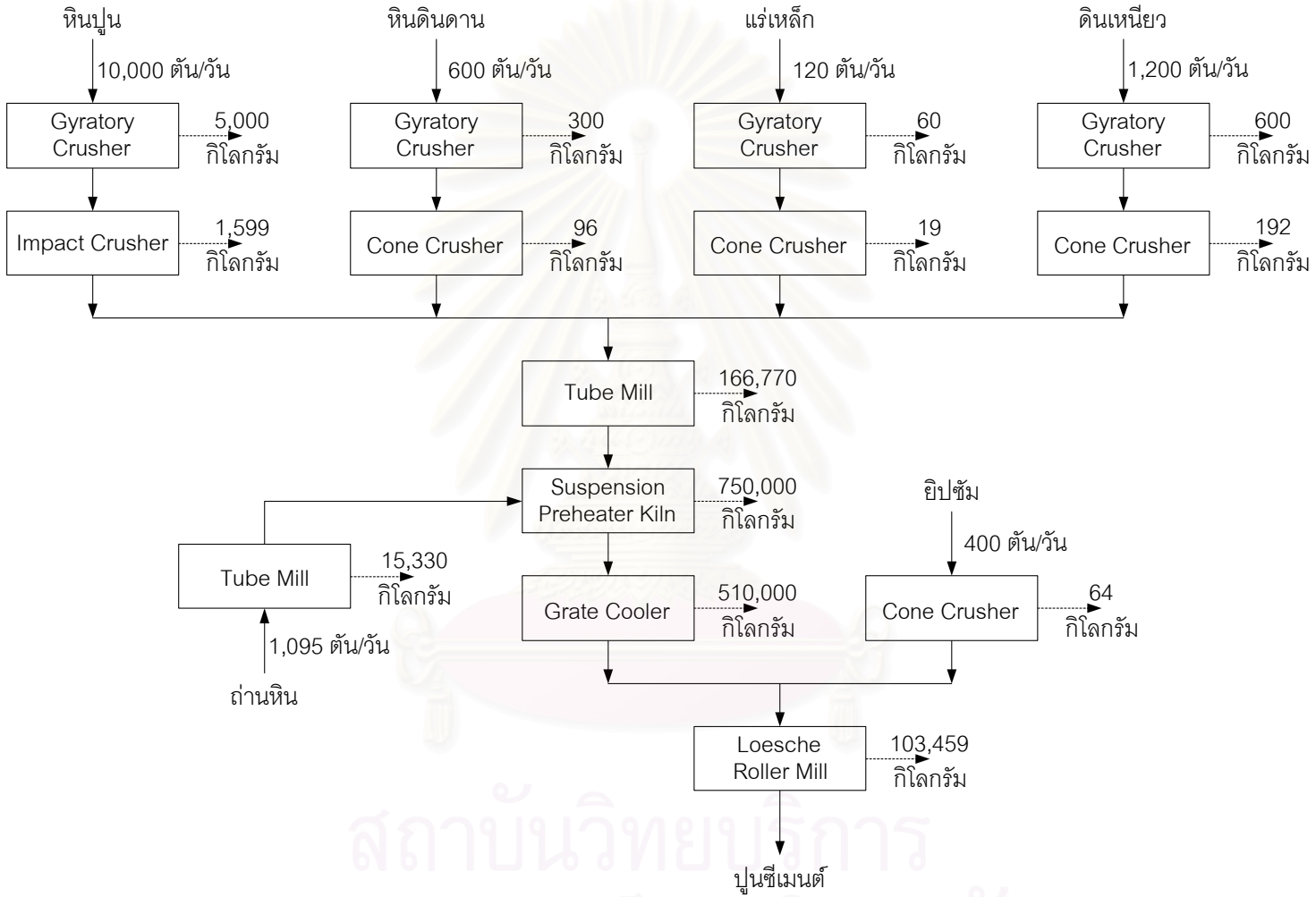


รูปที่ 3.7 ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3

สารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ภายในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ (ตามลูกศรหมายเลข 1 – 4 ในรูปที่ 3.7) แสดงในตารางที่ 3.8 สำหรับผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 3

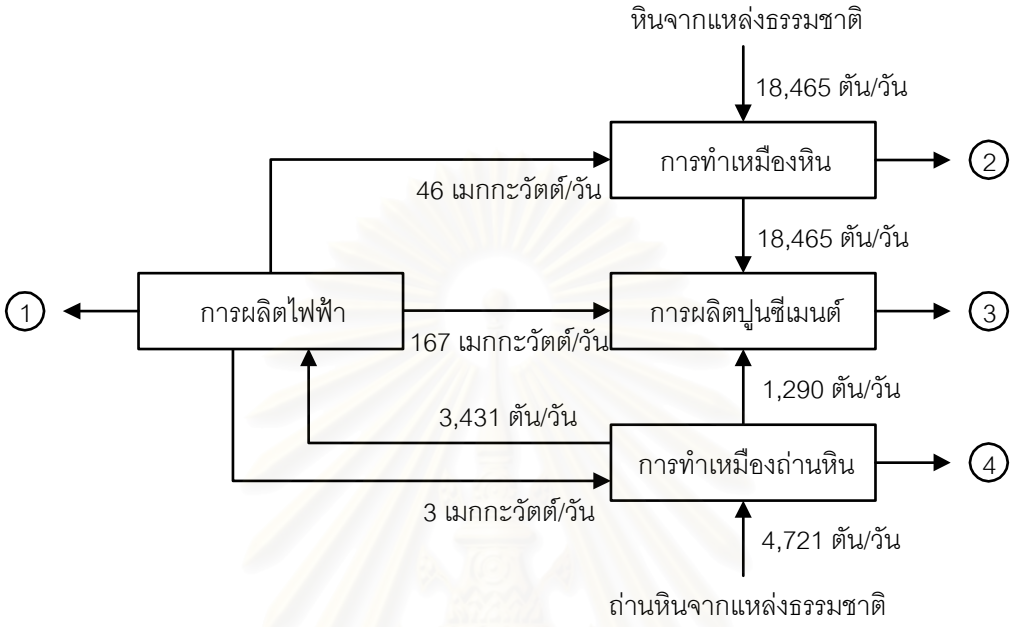
สารมลพิษ	หน่วย	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิต			
		ไฟฟ้า ①	หิน ②	ปูนซีเมนต์ ③	ถ่านหิน ④
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	88,286	1739	1,553,489	361
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	20,968	-	4,050	-
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	24,279	-	15,750	-
คาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	6,750,000	-
คาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	13,500	-



รูปที่ 3.8 ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3

4) กรณีศึกษาโรงงานที่ 4

โรงงานที่ 4 มีกำลังการผลิต 12,000 ตันปูนเม็ด/วัน มีปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.9

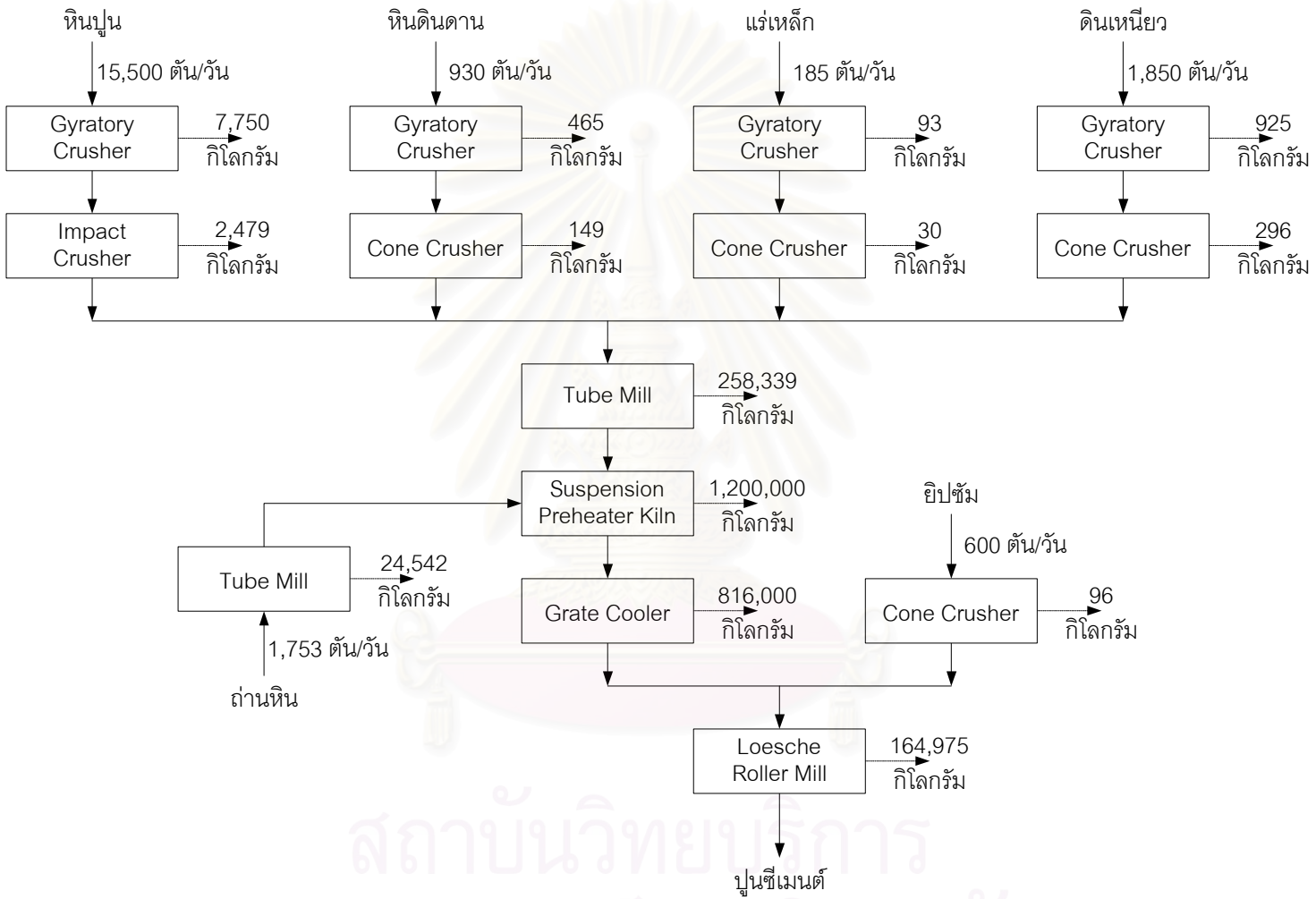


รูปที่ 3.9 ปริมาณวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4

สารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ภายในขอบเขตวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ (ตามลูกศรหมายเลข 1 – 4 ในรูปที่ 3.10) แสดงในตารางที่ 3.9 สำหรับผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แสดงในรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.9 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 4

สารมลพิษ	หน่วย	ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิต			
		ไฟฟ้า ①	หิน ②	ปูนซีเมนต์ ③	ถ่านหิน ④
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	137,243	2692	2,476,139	566
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	32,595	-	6,480	-
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	37,742	-	25,200	-
คาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	10,800,000	-
คาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	-	-	21,600	-



รูปที่ 3.10 ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การผลิตปูนซีเมนต์

ฐานการคำนวณ : 2,700 ตัน/วัน

สิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิต

พลังงาน		
ไฟฟ้า	38	เมกกะวัตต์
ถ่านหิน	390	ตัน

วัตถุดิบ		
หินปูน	3,316	ตัน
ศิลาแลง	207	ตัน
ดินเหนียว	622	ตัน

น้ำ		
น้ำใช้หมุนเวียน	1,555	ลูกบาศก์เมตร
น้ำชดเชยส่วนที่ระเหยไป	185	ลูกบาศก์เมตร

การผลิตไฟฟ้า

พลังงาน		
ถ่านหิน	796	ตัน

สารเคมี		
$Ca(OH)_2$, 85%	1	กิโลกรัม
CaOCl, Pure	82	กิโลกรัม
Bioside	50	กิโลกรัม
Organic Phosphate	35	กิโลกรัม

น้ำ		
น้ำใช้ในหม้อต้มไอน้ำ	2,500	ลูกบาศก์เมตร
น้ำชดเชยส่วนที่ระเหยไป	4,444	ลูกบาศก์เมตร

การทำเหมืองหิน

พลังงาน		
ไฟฟ้า	10	เมกกะวัตต์

การทำเหมืองถ่านหิน

พลังงาน		
ไฟฟ้า	2	เมกกะวัตต์

รูปที่ 3.11 สิ่งที่เข้ามาในกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์

การผลิตปูนซีเมนต์	การผลิตไฟฟ้า	การทำเหมืองหิน	การทำเหมืองถ่านหิน

สิ่งที่ออกจากกระบวนการผลิต

ผลิตภัณฑ์		
ปูนเม็ด	2,700	ตัน

ผลิตภัณฑ์		
ไฟฟ้า	50	เมกกะวัตต์

ผลิตภัณฑ์		
หินปูน	3,316	ตัน
ศิลาแลง	207	ตัน
ดินเหนียว	622	ตัน

ผลิตภัณฑ์		
ถ่านหิน	1,090	ตัน

น้ำเสียจากกระบวนการผลิต		
น้ำล้างย้อนปีละ 1 ครั้ง	185	ลบ.ม./ครั้ง

น้ำเสียจากกระบวนการผลิต		
น้ำจากหม้อไอน้ำ	56	ลบ.ม.
น้ำจากหอทำความเย็น	1,111	

ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ		
ฝุ่นแขวนลอย	514,298	กิโลกรัม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	1,458	กิโลกรัม
ไนโตรเจนออกไซด์	5,670	กิโลกรัม
คาร์บอนไดออกไซด์	2,430,000	กิโลกรัม
คาร์บอนมอนนอกไซด์	4,860	กิโลกรัม

ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ		
ฝุ่นแขวนลอย	31,822	กิโลกรัม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	7,558	กิโลกรัม
ไนโตรเจนออกไซด์	8,751	กิโลกรัม

ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ		
ฝุ่นแขวนลอย	601	กิโลกรัม

ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ		
ฝุ่นแขวนลอย	133	กิโลกรัม

รูปที่ 3.12 สิ่งที่ออกจากกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การผลิตปูนซีเมนต์

สิ่งที่ออกจากกระบวนการผลิต		
เสียง		
ห้องควบคุมหม้อบดปูนซีเมนต์	69 – 83	เดซิเบลเอ
ห้องควบคุมหม้อเผา	64 – 78	เดซิเบลเอ
ห้องควบคุมหม้อบดวัตถุดิบ	68 – 77	เดซิเบลเอ
บริเวณหม้อบดปูนซีเมนต์	101 - 105	เดซิเบลเอ
บริเวณหม้อบดวัตถุดิบ	83 – 96	เดซิเบลเอ
ห้อง Compressor	113	เดซิเบลเอ
อุณหภูมิ		
บริเวณระบบบำบัดฝุ่น	36 – 43	องศาเซลเซียส
บริเวณหน้าหม้อเผา	36	องศาเซลเซียส
ห้อง Blower Lignite	35	องศาเซลเซียส
ห้อง Live Ring	44 – 47	องศาเซลเซียส
บริเวณ Calciner	34	องศาเซลเซียส

การผลิตไฟฟ้า

เสียง		
ปั้ม	90	เดซิเบลเอ
ท่อส่งไอน้ำ	96	เดซิเบลเอ
หม้อต้มไอน้ำ	93 – 94	เดซิเบลเอ
อุณหภูมิ		
บริเวณท่อส่งไอน้ำ	32 - 38	องศาเซลเซียส
บริเวณหม้อต้มไอน้ำ	42 - 46	องศาเซลเซียส

การทำเหมืองหินและเหมืองถ่านหิน

เสียง		
การระเบิดหิน	60 - 63	เดซิเบลเอ
การทำงานของเครื่องจักร	106	เดซิเบลเอ
การเจาะรูระเบิด	109 - 113	เดซิเบลเอ
รถแทรกเตอร์ รถตัก รถขุด	108	เดซิเบลเอ

รูปที่ 3.12 **(ต่อ)** สิ่งที่ออกจากกระบวนการผลิตภายในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 เป็นตัวอย่างสรุปผลที่ได้จากการทำดุลมวลสารของโรงงานที่ 1 โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้อง และปริมาณสารมลมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล่านั้นได้จากการทำดุลมวลสาร แต่ปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและน้ำเสียจากกระบวนการผลิตได้จากข้อมูลทุติยภูมิ

3.1.3 **ความถูกต้องของผลการคำนวณ**

การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 3.10 ถึงตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.10 การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 1

	ปริมาณฝุ่นแขวนลอย (ตัน/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	571	-
ผลการตรวจวัด		
- กรกฎาคม พ.ศ. 2535	627	- 9
- กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536	493	+ 16
- กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2537	582	- 2
- ตุลาคม พ.ศ. 2537	745	- 23
- กรกฎาคม พ.ศ. 2538	647	- 12
- พฤศจิกายน พ.ศ. 2538	508	+ 12
	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (กิโลกรัม/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	1,458	-
ผลการตรวจวัด		
- กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2538	4,419	- 67
- ตุลาคม พ.ศ. 2537	18,269	- 92
- กรกฎาคม พ.ศ. 2538	18,269	- 92

ตารางที่ 3.11 การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 2

	ปริมาณฝุ่นแขวนลอย (ตัน/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	2,116	-
ผลการตรวจวัด		
- มกราคม ถึง มีนาคม พ.ศ. 2541	810	+ 161
- เมษายน ถึง มิถุนายน พ.ศ. 2541	2,788	- 24
- กรกฎาคม ถึง กันยายน พ.ศ. 2541	2,304	- 8
- ตุลาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2541	1,491	+ 42
	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (กิโลกรัม/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	5,400	-
ผลการตรวจวัด		
- มกราคม ถึง มีนาคม พ.ศ. 2541	2,069	+ 161
- เมษายน ถึง มิถุนายน พ.ศ. 2541	3,188	+ 69
- กรกฎาคม ถึง กันยายน พ.ศ. 2541	840	+ 543
- ตุลาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2541	669	+ 707
	ปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (กิโลกรัม/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	21,000	-
ผลการตรวจวัด		
- มกราคม ถึง มีนาคม พ.ศ. 2541	31,478	- 33
- เมษายน ถึง มิถุนายน พ.ศ. 2541	13,841	+ 52
- กรกฎาคม ถึง กันยายน พ.ศ. 2541	22,310	- 6
- ตุลาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2541	23,233	- 10

ตารางที่ 3.12 การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 3

	ปริมาณฝุ่นแขวนลอย (ตัน/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	1,553	-
ผลการตรวจวัด		
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	2,836	- 45
	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (กิโลกรัม/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	4,050	-
ผลการตรวจวัด		
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	247	+ 1,538

ตารางที่ 3.13 การเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์กับผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศของโรงงานที่ 4

	ปริมาณฝุ่นแขวนลอย (ตัน/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	2,476	-
ผลการตรวจวัด		
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	3,485	- 29
	ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (กิโลกรัม/วัน)	ความคลาดเคลื่อนของการคำนวณเทียบกับผลการตรวจวัด (ร้อยละ)
ผลการคำนวณ	6,480	-
ผลการตรวจวัด		
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	76	+ 8,413

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณเมื่อเทียบกับผลการตรวจวัดอาจเกิดจากสองส่วน คือ ค่า Emission Factor ที่นำมาใช้ในการคำนวณ และวิธีการตรวจวัด เนื่องจากค่า Emission Factor ที่นำมาใช้เป็นค่าเฉลี่ยของสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานในสหรัฐอเมริกา ซึ่งกระบวนการผลิตของแต่ละโรงงานในประเทศไทยมีความแตกต่างกัน เช่น ชนิดของวัตถุดิบ ชนิดของอุปกรณ์ สภาพแวดล้อมต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอาจเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ไม่ได้มาตรฐาน และจำนวนข้อมูลที่ทำการตรวจวัดในแต่ละครั้งมีไม่มากพอ จึงทำให้ค่าที่ได้เป็นข้อมูลเฉพาะในขณะใดขณะหนึ่ง เมื่อพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนของปริมาณฝุ่นแขวนลอยจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานทั้ง 4 ที่ได้จากการคำนวณด้วย Emission Factor เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 45 ยกเว้นปริมาณฝุ่นแขวนลอยของโรงงานที่ 2 ในเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม มีความคลาดเคลื่อนสูงถึงร้อยละ 161 สำหรับโรงงานที่ 1 มีความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณปริมาณฝุ่นแขวนลอยน้อย คือประมาณร้อยละ 2 ถึง ร้อยละ 23 ทั้งนี้เนื่องจากข้อมูลในส่วนกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 เป็นข้อมูลปฐมภูมิที่ได้จากโรงงานโดยตรง ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการคำนวณด้วย Emission Factor ดังนั้นผลการคำนวณจึงมีความใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด

ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเปรียบผลการตรวจวัดมีความใกล้เคียงกันน้อยมาก เนื่องจากปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการเผาปูนเม็ดส่วนหนึ่งทำปฏิกิริยากับหินปูนที่อยู่ในหม้อเผาเกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของปูนซีเมนต์ ทำให้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมามีปริมาณน้อยลง นอกจากนั้นปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นยังขึ้นอยู่กับปริมาณซัลเฟอร์ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิง แต่ในสมการการคำนวณปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ไม่ได้แสดงถึงส่วนประกอบของซัลเฟอร์นี้ และนอกจากนั้นอาจเกิดจากความผิดพลาดเนื่องจากวิธีการตรวจวัด สำหรับการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณและผลการตรวจวัด มีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 6 ถึงร้อยละ 52 ซึ่งผลการคำนวณส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด

3.2 การประเมินผลกระทบ

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การประเมินผลกระทบเบื้องต้นเพื่อหาประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม
2. การหาประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ

3.2.1 การประเมินผลกระทบเบื้องต้น

เมื่อพิจารณาสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการผลิต และผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากสารมลพิษเหล่านั้น สามารถประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นได้ดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นของการผลิตปูนซีเมนต์

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	วัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์	
	การผลิตวัตถุดิบ	การผลิตปูนซีเมนต์
การใช้ทรัพยากรธรรมชาติ	○	●
การใช้น้ำ	○	○
การใช้เชื้อเพลิง	●	●
การปนเปื้อนในอากาศ	●	●
การปนเปื้อนในน้ำ	◎	○
การปนเปื้อนในดิน	○	○
มลพิษทางเสียง	●	◎
ผลกระทบจากความร้อน	◎	◎

● ผลกระทบมาก ◎ ผลกระทบปานกลาง ○ ผลกระทบน้อย

3.2.1.1 **ผลกระทบจากขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบ**

ขั้นตอนก่อนการผลิตปูนซีเมนต์หรือขั้นตอนของการผลิตวัตถุดิบ ได้แก่ การผลิตไฟฟ้าและการทำเหมือง มีผลกระทบมากในส่วนของการใช้เชื้อเพลิงและการเกิดสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ โดยผลกระทบส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไฟฟ้า สำหรับผลกระทบดังกล่าวพิจารณาดังนี้

3.2.1.1.1 **ผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้า**

ผลกระทบจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

1) การใช้เชื้อเพลิง

การผลิตไฟฟ้าแบบกังหันไอน้ำเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนผลิตไอน้ำไปหมุนกังหันใบพัดเพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยไอน้ำต้องมีปริมาณมากและมีแรงดันเพียงพอที่สามารถหมุด

ใบพัดได้ และสำหรับการผลิตไอน้ำให้เพียงพอนั้นต้องใช้ความร้อนในปริมาณมากเช่นกัน จึงจำเป็นที่จะต้องเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดความร้อน ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจึงเป็นกระบวนการที่ใช้ถ่านหินเป็นจำนวนมาก

2) การใช้น้ำ

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้สำหรับผลิตไอน้ำและใช้แลกเปลี่ยนความร้อนในหอทำความเย็น ซึ่งน้ำที่ใช้ในการผลิตเป็นระบบหมุนเวียนนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ น้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จึงใช้สำหรับชดเชยน้ำส่วนที่ระเหยไปเนื่องจากความร้อน ดังนั้นน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงมีปริมาณน้อย

3) การใช้สารเคมี

ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าใช้สารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบผลิตไอน้ำและในระบบหล่อเย็น โดยปริมาณการใช้สารเคมีในในแต่ละวันมีปริมาณน้อย ทำให้ผลกระทบเนื่องจากการใช้สารเคมีมีน้อย

ผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ

ผลกระทบต่อคุณภาพอากาศจากการผลิตไฟฟ้ามีผลกระทบมากเนื่องจากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าใช้ถ่านหินในให้พลังงานความร้อน ซึ่งเมื่อถ่านหินเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดฝุ่นละออง ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ออกมาจากปล่องระบายอากาศของหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งสารมลพิษที่ปล่อยออกมานี้มีปริมาณมากและมีความรุนแรงของผลกระทบมาก

ผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ

น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าในส่วนของหม้อไอน้ำและหอทำความเย็น จะถูกระบายออกมาไหลไปรวมกันที่บ่อพักน้ำ เพื่อพักน้ำให้มีคุณภาพของน้ำที่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ [8] และเนื่องจากปริมาณของน้ำจากกระบวนการผลิตมีน้อย ทำให้ผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำมีไม่มาก

ผลกระทบจากเสียง

สำหรับเสียงที่เกิดขึ้นจะมาจากหลาย ๆ อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น หม้อต้ม ปั้ม ท่อส่งไอน้ำ เป็นต้น ความดังของเสียงที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตถึงแม้ว่ามีระดับความดังของเสียงมากเกินมาตรฐานกำหนด แต่ระยะเวลาที่พนักงานได้รับเสียงน้อยกว่า 1 ชั่วโมง และมีเครื่องป้องกันเสียง ผลกระทบที่เกิดจากเสียงจึงอยู่ในระดับปานกลาง

3.2.1.1.2 **ผลกระทบจากการทำเหมือง**

การทำเหมืองไม่มีการใช้วัตถุดิบแต่มีผลกระทบจาการทำเหมือง ดังนี้

ผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ

ผลกระทบต่อคุณภาพอากาศที่เกิดจากการทำเหมืองมีผลกระทบอยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากกิจกรรมในการทำเหมืองส่วนใหญ่ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นละออง เช่น การขุดเจาะและระเบิดหิน การขนส่งหิน เป็นต้น โดยการเจาะและการระเบิดหินจะก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นเพียงชั่วขณะหนึ่ง โดยเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณหน้าเหมืองและจะจางหายไปในที่สุด สำหรับการขนส่งฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจะเกิดจะเกิดมากในบริเวณที่รถวิ่งผ่านในช่วงเส้นทางลูกรัง ซึ่งจะก่อให้เกิดผลกระทบกับชุมชนบริเวณใกล้เคียงได้

ผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ

การดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ในการทำเหมืองหิน อาจก่อให้เกิดการชะล้างตะกอนต่าง ๆ ในช่วงหน้าฝนจากบริเวณที่ทำเหมืองลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติในบริเวณใกล้เคียงได้ นอกจากนั้นอาจทำให้แหล่งน้ำใต้ดิน เช่น น้ำจากบ่อน้ำตื้น น้ำบาดาล ไหลลงสู่ขุมเหมือง ทำให้ระดับน้ำระดับน้ำในบ่อลดลงและแห้งแล้งในที่สุด ซึ่งจากการพิจารณาคุณภาพของแหล่งน้ำที่ได้รับผลกระทบพบว่าผลกระทบต่อคุณภาพน้ำไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด ดังแสดงในภาคผนวก ข

ผลกระทบทางด้านเสียง

เสียงที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการทำเหมือง ได้แก่ เสียงจากการระเบิดหิน และเสียงจากเครื่องจักรกลต่าง ๆ โดยพบว่าการทำเหมืองมีระดับความดังของเสียงค่อนข้างสูง ประมาณ 75 -

105 เดซิเบล โดยค่ามาตรฐานกำหนดไว้ไม่เกิน 90 เดซิเบล ซึ่งที่ระดับความดังนี้ผู้ที่เกี่ยวข้องในการทำงานบริเวณดังกล่าวต้องใส่เครื่องป้องกันและไม่ควรได้รับเสียงเกิน 8 ชั่วโมง

ผลกระทบต่อคุณภาพของดิน

หลังจากได้หินตามที่ต้องการแล้ว เปลือกดินและเศษหินจะถูกถมกลับ ทำให้โครงสร้างและองค์ประกอบของดินเปลี่ยนไป เช่น มีเศษหินปะปนอยู่ในดินมากเกินไป ดินมีความเป็นด่างมากขึ้น เป็นต้น ผลกระทบดังกล่าวทำให้การใช้ประโยชน์จากดินหลังการทำเหมืองมีน้อยลง แต่พื้นที่ทำเหมืองส่วนใหญ่ไม่มีการใช้ประโยชน์จากที่ดินมาก่อนทำให้ผลกระทบจากส่วนนี้มีน้อย

3.2.1.2 **ผลกระทบจากการผลิตปูนซีเมนต์**

ผลกระทบจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

1) การใช้วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่เป็นหินที่ได้จากการทำเหมือง ผลกระทบจากการใช้วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ค่อนข้างมากเนื่องจาก การผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้หินปริมาณมาก คือประมาณ 1.5 – 1.9 เท่าของน้ำหนักปูนเม็ด และวัตถุดิบเหล่านี้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป

2) การใช้เชื้อเพลิง

ในขั้นตอนของการเผาปูนเม็ดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นขั้นตอนที่เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1450 องศาเซลเซียส) ดังนั้นจึงมีความต้องการเชื้อเพลิงปริมาณมาก โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ได้แก่ถ่านหินและน้ำมันเตา ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาปูนเม็ด สำหรับน้ำมันเตาจะใช้ในช่วงเริ่มเดินเครื่อง (Start Up) เท่านั้น ดังนั้นผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิง (ถ่านหิน) จึงมีผลกระทบค่อนข้างมาก

3) การใช้น้ำ

ผลกระทบจากการใช้น้ำในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์น้อย เนื่องจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นน้ำที่มีการหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ทำให้น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีปริมาณไม่มาก

ผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่มีผลกระทบกระทบต่อคุณภาพของอากาศมากเนื่องจากเกิดฝุ่นแขวนลอยและสารมลพิษปล่อยสู่อากาศมาก ดังนี้

1) ฝุ่นแขวนลอย

แหล่งที่ก่อให้เกิดฝุ่นแขวนลอยได้แก่ หม้อบดวัตถุดิบ หม้อบดปูนซีเมนต์ หม้อเย็น และอุปกรณ์การขนส่งวัตถุดิบ โดยฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 10 ไมครอน [18] เมื่อฝุ่นเหล่านี้เข้าสู่ระบบหายใจจะก่อให้เกิดโรคระบบทางเดินหายใจ และถ้าได้รับติดต่อกันเป็นเวลานานอาจเป็นอันตรายต่อชีวิตได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีปริมาณมาก ดังนั้นโอกาสที่ร่างกายจะรับฝุ่นละอองเหล่านี้เข้าระบบทางเดินหายใจจึงมีมาก

2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ปริมาณการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของซัลเฟอร์ในวัตถุดิบและเชื้อเพลิง และปริมาณเชื้อเพลิงและวัตถุดิบที่ถูกเผาไหม้ สำหรับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่ใช้เชื้อเพลิงปริมาณมาก ดังนั้นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จึงมีมาก

3) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เกิดได้ 2 ทาง คือ เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบ และเกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 1300 องศาเซลเซียส) การผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ปริมาณมาก

4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดจากการเผาไหม้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนเม็ด ซึ่งในวัตถุดิบมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบมาก คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีมาก โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้วัตถุดิบมีประมาณ 450 กิโลกรัมต่อตันปูนซีเมนต์ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินมีประมาณ 280 กิโลกรัมต่อตันปูนซีเมนต์ [50] ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิในบรรยากาศของโลกและทำให้โลกร้อนขึ้นด้วย

5) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการควบคุมก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อย

ผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำ

น้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากน้ำที่ผ่านการใช้งานแล้วจะถูกหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ ยกเว้นในกรณีที่มีการล้างย้อนระบบหล่อเย็น (Back Wash) ซึ่งทำประมาณเดือนละ 1 ครั้ง หรือปีละ 1 ครั้ง และน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนจากเครื่องจักรนั้น ไม่ได้สัมผัสกับส่วนของเครื่องจักรที่มีปนเปื้อนน้ำมันโดยตรง ทำให้คุณภาพของน้ำเสียที่ปล่อยออกมาอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดจึงสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้เลย [2]

ผลกระทบทางด้านเสียง

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นอกจากเกิดสารมลพิษแล้ว ยังเกิดเสียงปล่อยออกมาด้วย โดยเสียงที่เกิดขึ้นจากการดำเนินการผลิตเป็นเสียงที่มาจากการบดวัตถุดิบเป็นส่วนใหญ่ โดยในส่วนของกระบวนการผลิตที่มีเสียงจะมีผลกระทบต่อพนักงานที่เกี่ยวข้องน้อย เพราะถึงแม้ว่าจะมีเสียงดังมาก แต่กระบวนการผลิตดังกล่าวเป็นแบบอัตโนมัติ พนักงานที่จะเข้าไปทำงานในบริเวณนี้จึงมีน้อยและใช้เวลาในแต่ละบริเวณน้อยด้วย นอกจากนั้นพนักงานที่เข้าไปยังใส่เครื่องป้องกันอันตรายทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นมีอันตรายน้อยลง

ผลกระทบจากความร้อน

สำหรับความร้อนที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้น มาจากส่วนของการเผาปูนเม็ด การลดความร้อนของปูนเม็ดในหม้อเย็น และสิ่งอำนวยประโยชน์อื่น ๆ (utilities) เช่น หอทำความเย็น (Cooing Tower) เป็นต้น โดยในส่วนความร้อนจะมีผลกระทบต่อพนักงานที่เกี่ยวข้องน้อย เพราะพนักงานเข้าไปทำงานในบริเวณนี้ใช้เวลาในแต่ละบริเวณน้อยคือ พนักงานเข้าไปเพื่อตรวจเช็คอุปกรณ์เท่านั้น โดยใช้เวลาเข้าไปตรวจเช็คแต่ละครั้งประมาณ 5 – 10 นาที [18] ซึ่งองค์กร National Institute for Occupation Safety and Health (NIOSH) ได้กำหนดขีดจำกัดสูงสุดที่ยอมให้พนักงานทำงานสัมผัสกับความร้อน โดยถ้าอุณหภูมิความร้อนภายในร่างกาย (Wet Bulb Globe Temperature) มีค่าเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส จะสัมผัสกับความร้อนได้ไม่เกิน 20 นาที

3.2.1.4 ผลจากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น

จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นของการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้การประเมินแบบวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ สามารถกำหนดเป็นประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบมากได้ดังนี้ คือ

1) การใช้วัตถุดิบ
2) การใช้เชื้อเพลิง
3) การปนเปื้อนในอากาศ
4) มลพิษทางเสียง

3.2.2 หานัยสำคัญของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม

เมื่อกำหนดประเด็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมจากผลการประเมินผลกระทบเบื้องต้นแล้ว จำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ เพื่อนำมาใช้ในการกำหนดเป้าหมายในการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งการพิจารณาประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญนั้น ได้ใช้หลักการประเมินความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมในการให้คะแนนความสำคัญของประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาจากปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตที่ได้จากผลการคำนวณ รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม ผล

การติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมของโรงงานต่าง ๆ และความรุนแรงของผลกระทบ ซึ่งผลการให้คะแนนแสดงในตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 การประเมินประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ

ประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม	โอกาสที่จะเกิด	ผลกระทบ			ค่านัยสำคัญ	นัยสำคัญ
	L_1	C_1	C_2	C_3	$S = (L_1)x(C_1+C_2)x(C_3)$	
- การใช้วัตถุดิบ	8	2	6	4	256	ปานกลาง
- การใช้เชื้อเพลิง	8	10	6	6	768	สูง
- การปนเปื้อนในอากาศ	8	10	6	6	768	สูง
- มลพิษทางเสียง	8	4	2	8	386	ปานกลาง

จากการประเมินความเสี่ยงทางสิ่งแวดล้อม พบว่ากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และกระบวนการผลิตอื่น ๆ ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ คือ ผลกระทบจากการปนเปื้อนสารมลพิษในอากาศ และผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิง สำหรับผลกระทบที่มีนัยสำคัญรองลงมา คือ ผลกระทบจากเสียงที่เกิดจากกระบวนการผลิต และผลกระทบจากการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ตามลำดับ ดังนี้

3.2.2.1 **ผลกระทบจากการใช้วัตถุดิบ**

การผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่ใช้วัตถุดิบมาก ซึ่งวัตถุดิบนี้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป ส่งผลกระทบให้ระบบนิเวศน์ได้รับความเสียหายต้องใช้ระยะเวลานานกว่าที่ระบบนิเวศน์จะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ และการใช้วัตถุดิบเหล่านี้เกิดฝุ่นปริมาณมาก ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ โดยถ้าไม่มีการติดตั้งระบบกำจัดฝุ่นความเข้มข้นฝุ่นที่ปล่อยออกจากปล่องของโรงงานมีค่ามากกว่าระดับมาตรฐานมาก แต่เมื่อติดตั้งระบบกำจัดฝุ่นแล้วความเข้มข้นฝุ่นที่ปล่อยออกมาอยู่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด สำหรับการใช้วัตถุดิบของกระบวนการผลิตไฟฟ้ามีผลกระทบน้อย เนื่องจากปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีปริมาณน้อยและผลกระทบจากการใช้สารเคมีดังกล่าวน้อย ส่วนการทำเหมืองไม่มีการใช้วัตถุดิบในกระบวนการ

3.2.2.2 ผลกระทบจากการใช้เชื้อเพลิง

การใช้เชื้อเพลิงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดลอมมาก เนื่องจากทั้งกระบวนการผลิตไฟฟ้าและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่านหินเป็นจำนวนมาก และถ่านหินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนั้นในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินยังก่อให้เกิดสารมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม และมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นด้วย

3.2.2.3 ผลกระทบต่อคุณภาพของอากาศ

ขั้นตอนการผลิตวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อคุณภาพของอากาศมากโดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าและการผลิตปูซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าและการผลิตปูนซีเมนต์ไม่เพียงแต่จะก่อให้เกิดฝุ่นที่มีปริมาณมากแล้ว ยังเกิดสารมลพิษปล่อยสู่อากาศด้วย ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยสารมลพิษที่ปล่อยออกมาจากปล่องของโรงงานที่ยังไม่ผ่านระบบบำบัดส่วนใหญ่มีปริมาณมากกว่าค่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด (ฝุ่นแขวนลอย, ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์, และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์) สำหรับความรุนแรงของผลกระทบจากสารมลพิษเหล่านี้มีดังนี้

1) ผลกระทบจากฝุ่นแขวนลอย

ผลกระทบจากการได้รับฝุ่นแขวนลอยมักก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ แต่ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากกระบวนการผลิตส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน [18] ทำให้อนุภาคฝุ่นบางส่วนสามารถเข้าไปในถุงลมของปอดได้ อนุภาคเหล่านี้อาจทำให้ปอดเป็นแผลและอาจถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้ ฝุ่นแขวนลอยไม่เพียงแต่จะเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเท่านั้น ยังทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการมองเห็นด้วย เนื่องจากฝุ่นละอองสามารถหักเหและดูดกลืนคลื่นแสงที่เห็นได้ สำหรับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่สามารถสังเกตได้คือ การทำให้อาคาร เสื้อผ้า และสิ่งของเครื่องใช้ต่าง ๆ เกิดความสกปรก

2) ผลกระทบจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ผลกระทบจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตมีความรุนแรงมาก เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อเยื่อบุทางเดินหายใจ ทำให้แรงต้านในระบบทางเดินหายใจเพิ่มขึ้น และผลกระทบจะมีความรุนแรงมากขึ้นถ้ามีอนุภาคของสารอื่นถูกสูดหายใจเข้าไปด้วย เช่น อนุภาคฝุ่น เพราะอนุภาคเหล่านี้จะดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เอาไว้ ทำให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถผ่านเข้าสู่ทางเดินหายใจได้ลึกกว่าปกติ และถ้าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับนี้ถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดซัลฟุริก ส่งผลให้ผู้ที่ได้รับก๊าซนี้ได้รับผลกระทบรุนแรงถึงขั้นเสียชีวิตได้ สำหรับผลกระทบจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมถือว่ามีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อถูกแสงแดด จะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ และจะถูกดูดกลืนอย่างรวดเร็วโดยฝนหรือเมฆกลายเป็นกรดซัลฟุริกหรือซัลเฟต ที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสม็อก (smog) ซึ่งจะไปบังแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลก นอกจากนั้นกรดซัลฟุริกยังมีสมบัติเป็นกรดจึงทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดการชำรุดทรุดโทรม และกรดนี้จะกัดกร่อนวัตถุที่ทำด้วยโลหะ ทำให้โลหะขึ้นสนิมเร็วกว่าปกติด้วย

3) ผลกระทบจากก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

ผลกระทบจากก๊าซไนโตรเจนออกไซด์มีมาก เนื่องจากไนโตรเจนออกไซด์เป็นก๊าซที่สร้างความระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ถ้าร่างการได้รับก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดอาการบวมน้ำในเนื้อเยื่อปอด และทำให้เกิดอาการเลือดออกในปอดตามมาภายหลัง ถ้าก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในอากาศมีความเข้มข้นสูงถึง 100 ส่วนในล้านส่วน [51] อาจทำให้คนหรือสัตว์ตายได้ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดีมาก ดังนั้นเมื่อก๊าซไนโตรเจนออกไซด์สัมผัสกับละอองน้ำในอากาศ จะเกิดเป็นกรดไนตริกที่มีฤทธิ์กัดกร่อน จึงเป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับกรดซัลฟุริก

4) ผลกระทบจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการดูดซับแสงอาทิตย์ได้ดี ทำให้บรรยากาศที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มากมีอากาศร้อน ส่งผลให้โลกร้อนหรือที่เรียกว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก นอกจากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนกับวัสดุที่ทำด้วยหินได้ เนื่องจากถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำหรือไอน้ำจะมีฤทธิ์เป็นกรด สำหรับผลกระทบจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อสิ่งมีชีวิตมีผลกระทบน้อย เนื่องจากก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ไม่เป็นสารมลพิษ [37] แต่เป็นก๊าซที่มีประโยชน์ต่อพืชและสิ่งมีชีวิตอื่น เพราะทำให้พืชเกิดการสังเคราะห์แสงได้ก๊าซออกซิเจนที่มนุษย์และสัตว์ใช้ในการหายใจ

5) ผลกระทบจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ผลกระทบจากการได้รับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ก่อให้เกิดความระคายเคือง แต่เป็นก๊าซที่มีอันตรายต่อสุขภาพมาก เพราะเมื่อหายใจเอาก๊าซนี้เข้าไปในร่างกาย จะถูกปอดดูดซับและทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินหรือฮีโมโปรตีนในเลือดกลายเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์จะรวมตัวกับฮีโมโกลบินได้ดีกว่าออกซิเจนทำให้ร่างกายขาดออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกาย โดยปกติแล้วถ้ามนุษย์หายใจเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าสู่ร่างกาย ร่างกายจะทำการขับเพื่อให้เกิดความสมดุล แต่ถ้าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีมากกว่า 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศจะมีความเป็นพิษสูง [51] โดยอาการของผู้ที่หายใจเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เข้าสู่ร่างกายเริ่มแรกคือมีอาการเครียด หายใจเร็วกว่าปกติ เวียนศีรษะ กล้ามเนื้ออ่อนเพลีย ต่อมาจะมีอาการอาเจียน หน้ามืด ปวดชักกระตุก หมดสติ และอาจตายได้ แต่กระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์มีการควบคุมระดับความเข้มข้นของก๊าซนี้อยู่ตลอดเวลา ทำให้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกมามีผลกระทบไม่มาก

3.2.2.4 ผลกระทบจากเสียง

เสียงส่งผลกระทบต่อสุขภาพของพนักงานหรือผู้ที่อยู่รอบโรงงานโดยทำให้พนักงานเกิดความเครียดเมื่อได้ยินเสียงรบกวนอยู่ตลอดเวลาทำให้ขาดสมาธิ ระบบหูเสื่อม ความดันโลหิตสูง ปวดหู หูตึงหรือหูหนวกได้ อันตรายของเสียงขึ้นกับปัจจัย 3 ประการ คือ ขนาดของเสียงหรือความดังของเสียง ระยะเวลาที่ได้รับเสียง และความถี่ของเสียง สำหรับในกระบวนการผลิตวัตถุดิบและกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ถึงแม้ว่าเป็นกระบวนการที่ส่งผลให้เกิดเสียงที่มีความดังมากกว่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนดในสภาวะการทำงานปกติ แต่ระยะเวลาที่พนักงานได้รับเสียงน้อย ทำให้ผลกระทบจากเสียงมีน้อย

3.3 การปรับปรุงกระบวนการ

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมน้อยลงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน การเปลี่ยนชนิด

ของเชื้อเพลิงที่มีส่วนประกอบของซัลเฟอร์น้อยลง การเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์การผลิต เช่น ชนิดของหม้อบด ชนิดของเตา ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตเดิมและปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตใหม่ ดังนี้

3.3.1.1 การเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์

ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตที่แตกต่างกัน จะใช้พลังงานไฟฟ้าแตกต่างกันด้วย ดังนั้นการเปลี่ยนชนิดของอุปกรณ์จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดผลกระทบจากการใช้พลังงานได้

3.3.1.1.1 การเปลี่ยนชนิดของหม้อบด

จากการคำนวณพบว่าการบดวัตถุดิบเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด (ตารางที่ 3.16) ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนชนิดของหม้อบดดังนี้

ตารางที่ 3.16 ผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบดหินปูน ให้มีขนาดเท่ากันของหม้อบดแต่ละชนิด

ประเภทของหม้อบด	ชนิดของหม้อบด	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน)
หม้อบดปฐมภูมิ	- Jaw Crusher	2.809
	- Gyratory Crusher	0.685
หม้อบดทุติยภูมิ	- Hammer Crusher	2.780
	- Impact Crusher	0.039
	- Cone Crusher	0.072
หม้อบดละเอียด	- Ball Mill / Tube Mill	15.095
	- MPS Roller Bowl Mill	5.912
	- Loesche Roller Mill	5.452

ในการบดหินปูนที่กำหนดขนาดของวัตถุดิบให้เท่ากันในแต่ละชนิดของหม้อบด เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหม้อบด พบว่า Gyratory Crusher, Impact Crusher และ Roller Mill ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับหม้อบดแบบปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และหม้อบดละเอียด

ประเภทเดียวกันตามลำดับ แต่ในการเลือกชนิดของหม้อบดโดยพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อย่างเดียวนั้นอาจทำให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยรวมผิดพลาดได้ ซึ่งในการเปรียบเทียบหม้อบดทั้งสามประเภท นอกจากจะเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในการบดแล้ว อาจพิจารณาจากส่วนของกำลังการผลิตของหม้อบด ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ของหม้อบดแต่ละชนิดด้วย เช่น ในการเปรียบเทียบหม้อบดปฐมภูมิ ถึงแม้ว่า Gyratory Crusher จะใช้พลังงานน้อยกว่า และมีกำลังการผลิตสูงกว่า Jaw Crusher แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุน และเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงกว่าด้วย แต่สำหรับ Roller Mill นอกจากจะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า Ball Mill หรือ Tube Mill แล้ว ยังมีกำลังการผลิตสูงกว่าด้วย (ประมาณ 500 ตัน/ชั่วโมง) ซึ่งถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงกว่าประมาณร้อยละ 20 [40] แต่ค่าใช้ค่ายในการดำเนินการต่ำกว่าร้อยละ 20 เช่นกัน [40] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเลือกใช้ Roller Mill สำหรับการบดวัตถุดิบให้ละเอียด สำหรับผลกระทบจากการใช้หม้อบดแบบ Ball Mill หรือ Tube Mill และแบบ Roller Mill แสดงในตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 พลังงานไฟฟ้าและปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศที่เกิดจากหม้อบดละเอียดชนิดต่าง ๆ

	หน่วย	หม้อบดละเอียด		
		Ball Mill/ Tube Mill	Loesche Roller Mill	MPS Roller Mill
ในขอบเขตการผลิตปูนซีเมนต์				
พลังงานไฟฟ้า	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน	15.095	5.452	5.912
	กิโลวัตต์	55	38	39
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม	507,738	514,298	514,298
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม	1,458	1,458	1,458
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม	5,670	5,670	5,670
ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์				
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม	550,266	546,420	546,630
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม	11,559	9,016	9,137
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม	17,365	14,421	14,561

เมื่อพิจารณาสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าหม้อบดแต่ละชนิดก่อให้เกิดฝุ่นแขวนลอยแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยหม้อบดแบบ Roller Mill เกิดฝุ่นแขวนลอยมากกว่า

หม้อบดแบบ Ball Mill หรือ Tube Mill แต่เมื่อพิจารณาทั้งวัฏจักรของการผลิตปูนซีเมนต์พบว่าหม้อบดแบบ Roller Mill เกิดฝุ่นแขวนลอยน้อยกว่าหม้อบดแบบ Ball Mill หรือ Tube Mill มาก (ประมาณ 4 ตัน) และเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์น้อยกว่าด้วย ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตลดลง ทำให้สารมลพิษที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าและการทำเหมืองถ่านหินมีปริมาณลดลงด้วย

3.3.1.1.2 การเปลี่ยนชนิดของหม้อเผา

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหม้อเผาต่างชนิดกันก็มีความแตกต่างกัน เช่น ในการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหม้อเผาแต่ละชนิด และปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในหม้อเผา โดยกำหนดให้กำลังการผลิตปูนเม็ดเท่ากัน คือ 2700 ตัน/วัน พบว่าหม้อเผาแบบที่มีการแคลไซน์ประมาณร้อยละ 90 (Kiln with Calcinator) และ Suspension Preheater Kiln ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า Long Dry Kiln สำหรับพลังงานไฟฟ้าและปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากหม้อเผาทั้งสามที่มีกำลังการผลิตเท่ากันแสดงในตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหม้อเผาและสารมลพิษที่เกิดจากหม้อเผาแต่ละชนิด

	หน่วย	หม้อเผา		
		Long Dry Kiln	Suspension Preheater Kiln	Kiln with Dry Calcinator
ในขอบเขตการผลิตปูนซีเมนต์				
พลังงานไฟฟ้า	กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน	0.611	0.566	0.529
	กิโลวัตต์/วัน	38	38	38
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	514,298	595,298	514,298
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	13,230	729	1,458
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	8,100	6,480	5,670
ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์				
ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	546,179	627,147	546,420
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	20,802	8,293	9,016
ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	16,867	15,239	14,421

เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าของหม้อเผาทั้งสามพบว่าหม้อเผาแต่ละชนิดใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แต่สารมลพิษที่เกิดขึ้น ได้แก่ ปริมาณฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์แตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบโดยรวมพบว่า หม้อเผาแบบ Suspension Preheater Kiln และ Kiln with Dry Calcinator ส่งผลกระทบน้อยกว่า Long Dry Kiln เนื่องจากหม้อเผาทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมากกว่า ทำให้ปริมาณการใช้ถ่านหินน้อยกว่า ผลกระทบที่เกิดจากการทำเหมืองถ่านหินจึงลดลง และนอกจากนั้นยังส่งผลกระทบการผลิตไฟฟ้าทำให้สารมลพิษที่เกิดขึ้นน้อยลงด้วย

3.3.1.2 **การเปลี่ยนสภาวะการดำเนินงานของหม้อบด** (Operating Condition)

เนื่องจากหม้อบดเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในการผลตปูนซีเมนต์ การเปลี่ยนสถาวะการดำเนินงานของหม้อบดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดผลกระทบจากการใช้พลังงาน โดยจากกระบวนการบดวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ผ่านการบดหยาบในครั้งแรก (จากหม้อบดปฐมภูมิ) จะถูกส่งต่อไปไปยังหม้อบดทุติยภูมิ จากนั้นจะถูกส่งไปบดละเอียดครั้งสุดท้ายจนได้ขนาดที่ต้องการ ดังนั้นถ้าเปลี่ยนแปลงขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิให้เหมาะสม จะสามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้โดยไม่มีผลต่อคุณภาพของปูนเม็ด เนื่องจากวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดละเอียดมีขนาดเท่าเดิม ซึ่งนอกจากขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมจะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์น้อยลงแล้ว ยังเป็นผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลงด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณหาขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิดังกล่าว ซึ่งในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์นอกจากจะหาขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมแล้ว ยังทำการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ สารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ และสารมลพิษที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ด้วย ดังจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4

สำหรับผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิ ปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการผลิตของโรงงานเดิม และปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการผลิตโดยใช้ขนาดของวัตถุดิบใหม่ที่คำนวณได้จากการใช้พลังงานที่น้อยลง แสดงในตารางที่ 3.19 ถึง ตารางที่ 3.25

ตารางที่ 3.19 ผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 1 เดิม

ขนาดวัตถุดิบ (มม.)	กระบวนการผลิตเดิม			กระบวนการผลิตใหม่		
	หินปูน	ศิลาแลง	ดินเหนียว	หินปูน	ศิลาแลง	ดินเหนียว
- จากหม้อบดปฐมภูมิ	125	125	125	300	300	300
- จากหม้อบดทุติยภูมิ	30	30	30	100	100	100

ตารางที่ 3.20 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ ของโรงงานที่ 1

	หน่วย	กระบวนการผลิตเดิม	กระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว	ลดลง (%)
ในขอบเขตของการผลิตปูนซีเมนต์				
- พลังงานไฟฟ้า	เมกกะวัตต์/วัน	38	36	6.93
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	514,298	514,298	0
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	1,458	1,458	0
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	5,670	5,670	0
ในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์				
- ถ่านหิน	ตัน/วัน	1,089	1,047	3.86
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	546,854	545,139	0.31
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	9,016	8,610	4.50
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	14,421	13,951	3.26

ตารางที่ 3.21 ผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 2 เดิม

ขนาดวัตถุดิบ (มม.)	กระบวนการผลิตเดิม				กระบวนการผลิตใหม่			
	หินปูน	หินดินดาน	ศิลาแลง	ดินเหนียว	หินปูน	หินดินดาน	ศิลาแลง	ดินเหนียว
- จากหม้อบดปฐมภูมิ	75	75	75	75	300	300	300	300
- จากหม้อบดทุติยภูมิ	25	25	25	25	100	100	100	100

ตารางที่ 3.22 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ ของโรงงานที่ 2

	หน่วย	กระบวนการผลิตเดิม	กระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว	ลดลง (%)
พลังงานที่ต้องการ				
- พลังงานไฟฟ้า	เมกกะวัตต์/วัน	202	159	21.27
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	1,902,611	1,902,611	0
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	5,400	5,400	0
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	21,000	21,000	0
สารมลพิษที่เกิดขึ้น				
- ถ่านหิน	ตัน/วัน	6,709	5,779	13.86
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	2,115,629	2,078,338	1.76
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	204,943	169,624	17.23
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	78,763	68,539	12.98

ตารางที่ 3.23 ผลการคำนวณขนาดของวัตถุดิบที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบจากกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 3 และ 4 เดิม

ขนาดวัตถุดิบ (มม.)	กระบวนการผลิตเดิม				กระบวนการผลิตใหม่			
	หินปูน	หินดินดาน	แร่เหล็ก	ดินเหนียว	หินปูน	หินดินดาน	แร่เหล็ก	ดินเหนียว
- จากหม้อบดปฐมภูมิ	125	125	125	125	300	205	185	190
- จากหม้อบดทุติยภูมิ	80	80	50	80	100	100	75	80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.24 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ ของโรงงานที่ 3

	หน่วย	กระบวนการผลิตเดิม	กระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว	ลดลง (%)
พลังงานที่ต้องการ				
- พลังงานไฟฟ้า	เมกกะวัตต์/วัน	107	105	1.70
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	1,403,508	1,403,508	0
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	4,050	4,050	0
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	15,750	15,750	0
สารมลพิษที่เกิดขึ้น				
- ถ่านหิน	ตัน/วัน	3,018	2,989	0.96
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	1,493,901	1,492,742	0.08
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	25,018	24,744	1.10
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	40,029	39,711	0.79

ตารางที่ 3.25 การเปรียบเทียบพลังงานที่ต้องการและสารมลพิษที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและกระบวนการผลิตการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ ของโรงงานที่ 4

	หน่วย	กระบวนการผลิตเดิม	กระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว	ลดลง (%)
พลังงานที่ต้องการ				
- พลังงานไฟฟ้า	เมกกะวัตต์/วัน	167	164	1.69
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	2,243,681	2,243,681	0
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	6,480	6,480	0
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	25,200	25,200	0
สารมลพิษที่เกิดขึ้น				
- ถ่านหิน	ตัน/วัน	4,721	4,676	0.95
- ฝุ่นแขวนลอย	กิโลกรัม/วัน	2,384,191	2,382,395	0.08
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	39,075	38,650	1.09
- ไนโตรเจนออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	62,942	62,450	0.78

จากผลการคำนวณพบว่าสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตแบบเดิมและเมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิตแล้วมีปริมาณไม่แตกต่างกัน เนื่องจากหม้อบดประเภทเดียวกันเกิดฝุ่นแขวนลอยปริมาณใกล้เคียงกัน แต่สารมลพิษที่เกิดขึ้นเมื่อใช้การประเมินแบบวัฏจักรชีวิตสารมลพิษที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงมาก โดยเฉพาะปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากในการปรับปรุงขนาดของวัตถุดิบที่บดให้เหมาะสม ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ลดลง เป็นผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลงด้วย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจึงลดลงเช่นกัน ซึ่งในการปรับปรุงขนาดของวัตถุดิบนี้นอกจากจะทำให้สารมลพิษที่เกิดขึ้นน้อยลงแล้ว ยังมีส่วนช่วยในการลดค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดให้น้อยลงด้วย

สำหรับแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตอื่น ๆ ที่สามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมลงมี ได้แก่ การเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบที่ใช้พลังงานในการเผาไหม้น้อยกว่า การควบคุมการดำเนินการในหม้อเผา การติดตั้งระบบกำจัดฝุ่นที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบความเป็นไปได้สำหรับแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการ แต่ไม่ได้แสดงผลกระทบที่เกิดขึ้นเป็นรูปธรรม ดังนี้

3.3.1.3 การเปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ

วัตถุดิบแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ประกอบด้วย ธาตุแคลเซียม ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้จะมีอยู่ในวัตถุดิบแต่ละชนิดในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกชนิดของวัตถุดิบที่เหมาะสมจึงสามารถช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมลงได้ โดยต้องพิจารณาจากส่วนประกอบทางเคมีอื่น ๆ ด้วย คือต้องมีส่วนประกอบทางเคมีที่ไม่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาน้อย เช่น ซัลเฟอร์ อัลคาไล เป็นต้น สำหรับวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้แทนกันได้นั้น ได้แสดงในตารางที่ 3.26 [33] สำหรับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ต้องประกอบด้วยส่วนประกอบของสารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3.27 [34]

ตารางที่ 3.26 วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีใกล้เคียงกัน [33]

Calcareous[1]	Argillaceous[2]	Siliceous[3]	Ferrous[4]
หินปูน	ดินเหนียว	ทราย	แร่เหล็ก
ดินมาร์ล	หินดินดาน	หินทราย	ศิลาแลง
ชอร์ก	ขี้โลหะ	แทรปร็อค	แคลซีน
หินซีเมนต์	ขี้เถ้า	แคลเซียมซิลิเกต	ผงเหล็ก
ดินสอพอง	กากแร่อะลูมิเนียม	ควอตไซท์	ไพไรท์
เปลือกหอย	ดินขาว	ดินฟลูเลอร์	ตะกอนเหล็ก
หินอ่อน	กราโนดิโอไรท์	หินกรวดมน	เหล็กออกไซด์

[1]Calcareous เป็นวัตถุดิบที่มีมีสัดส่วนของแคลเซียมสูง

[2]Argillaceous เป็นวัตถุดิบที่ให้ Al_2O_3

[3]Siliceous เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของซิลิกาสูง

[4]Ferrous เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของเหล็กสูง

ตารางที่ 3.27 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยรวมที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ [34]

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	58 – 67
ซิลิกา (SiO_2)	16 - 26
อะลูมินา (Al_2O_3)	4 - 8
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	2 - 5
แมงกานีส (Mn_2O_3)	0 - 3
แมกนีเซีย (MgO)	1 – 5
อัลคาไล (K_2O+Na_2O)	0 - 1
ซัลเฟอร์ (SO_3)	0.1 – 2.5
ฟอสฟอรัส (P_2O_5)	0 – 1.5
อื่น ๆ	0.5 - 3

การเลือกชนิดของวัตถุดิบนอกจากจะพิจารณาจากส่วนประกอบทางเคมีแล้ว อาจต้องพิจารณาที่ค่าความแข็งของวัตถุดิบ ความชื้นของวัตถุดิบ และปริมาณของวัตถุดิบที่นำมาแทนด้วย เพราะค่าความแข็งของวัตถุดิบจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการบดวัตถุดิบ สำหรับ

ปริมาณความชื้นจะเกี่ยวข้องกับความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้และปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา ในการเผาวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง ต้องใช้ความร้อนมากกว่าวัตถุดิบที่มีความชื้นน้อยกว่า ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สูงขึ้นด้วย ส่วนปริมาณของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะเกี่ยวข้องในส่วนของการผลิตวัตถุดิบ ซึ่งก็คือการทำเหมือง ถ้าใช้วัตถุดิบมากขึ้นพลังงานที่ต้องใช้ในการผลิตวัตถุดิบเหล่านั้นก็จะมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนั้นการเลือกชนิดของวัตถุดิบที่เหมาะสมยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาได้ ทำให้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตน้อยลง ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงก็จะลดลงด้วย

การคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นการคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ ที่เป็นส่วนประกอบของวัตถุดิบ เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่สามารถทำให้วัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาและทำให้ปูนเม็ดมีคุณภาพดี โดยสมการการคำนวณมีดังนี้

1) **Lime Saturation Factor**

Lime Saturation Factor เป็นอัตราส่วนที่แสดงปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่อยู่ในปูนเม็ด โดยสมการการคำนวณ Lime Saturation Factor ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างอลูมินาและเหล็กออกไซด์

ถ้าอัตราส่วนระหว่างอลูมินาและเหล็กออกไซด์ที่ค่ามากกว่า 0.64 มีสมการการคำนวณดังสมการที่ 3.1 [3 4]

$$LSF = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3} \quad (3.1)$$

ถ้าอัตราส่วนระหว่างอลูมินาและเหล็กออกไซด์ที่ค่าน้อยกว่า 0.64 มีสมการการคำนวณดังสมการที่ 3.2 [3 4]

$$LSF = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3} \quad (3.2)$$

โดย LSF = Lime Saturation Factor

CaO = ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในวัตถุดิบ

SiO_2 = ร้อยละของซิลิกาในวัตถุดิบ

Al_2O_3 = ร้อยละของอลูมินาในวัตถุดิบ

Fe_2O_3 = ร้อยละของเหล็กออกไซด์ในวัตถุดิบ

2) Kind's Lime Saturation

เป็นอัตราส่วนที่แสดงปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่อยู่ในปูนเม็ดเช่นเดียวกับค่า Lime Saturation Factor แต่มีสมมติฐานที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ไม่สมบูรณ์ ดังสมการที่ 3.3 [34]

$$KS_K = \frac{CaO - (1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3)}{2.8SiO_2} \quad (3.3)$$

โดย KS_K = Kind's Lime Saturation, มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 – 0.95

3) Silica Ratio

Silica Ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างซิลิกากับอลูมินาและเหล็กออกไซด์ ดังสมการที่ 3.4 [34]

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (3.4)$$

โดย SR = Silica Ratio, มีค่าอยู่ระหว่าง 1.9 – 3.2

4) Alumina-Iron Ratio

Alumina-Iron Ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างอลูมินาและเหล็กออกไซด์ ดังสมการที่ 3.5 [34]

$$A/F = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3.5)$$

โดย A/F = Alumina-Iron Ratio, มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5) Burnability Factor

Burnability Factor เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเผาไหม้ ถ้ามีค่ามากแสดงว่าองค์ประกอบของวัตถุดิบมีความสามารถในการเผาไหม้น้อย Burnability Factor นี้มีสมการการคำนวณดังสมการที่ 3.6 [53]

$$BF = LSF + 10SR - 3(MgO + Alkalies) \quad (3.6)$$

โดย BF = Burnability Factor

MgO = ร้อยละของแมกนีเซียในวัตถุดิบ

6) **การคำนวณหาอัตราส่วนของวัตถุดิบสามชนิด**

กำหนดให้

วัตถุดิบชนิดที่ 1 มี	ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในวัตถุดิบ (CaO)	$= C_1$
	ร้อยละของซิลิกาในวัตถุดิบ (SiO_2)	$= S_1$
	ร้อยละของอลูมินาในวัตถุดิบ (Al_2O_3)	$= A_1$
	ร้อยละของเหล็กออกไซด์ในวัตถุดิบ (Fe_2O_3)	$= F_1$
วัตถุดิบชนิดที่ 2 มี	ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในวัตถุดิบ (CaO)	$= C_2$
	ร้อยละของซิลิกาในวัตถุดิบ (SiO_2)	$= S_2$
	ร้อยละของอลูมินาในวัตถุดิบ (Al_2O_3)	$= A_2$
	ร้อยละของเหล็กออกไซด์ในวัตถุดิบ (Fe_2O_3)	$= F_2$
วัตถุดิบชนิดที่ 3 มี	ร้อยละของแคลเซียมออกไซด์ในวัตถุดิบ (CaO)	$= C_3$
	ร้อยละของซิลิกาในวัตถุดิบ (SiO_2)	$= S_3$
	ร้อยละของอลูมินาในวัตถุดิบ (Al_2O_3)	$= A_3$
	ร้อยละของเหล็กออกไซด์ในวัตถุดิบ (Fe_2O_3)	$= F_3$

และ อัตราส่วนของ วัตถุชนิดที่ 1 : วัตถุชนิดที่ 2 : วัตถุชนิดที่ 3 = X : Y : 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้

$$a_1X + b_1Y = c_1$$
$$a_2X + b_2Y = c_2$$

โดย

$$a_1 = (2.8KS_K \cdot S_1 + 1.65A_1 + 0.35F_1) - C_1$$
$$b_1 = (2.8KS_K \cdot S_2 + 1.65A_2 + 0.35F_2) - C_2$$
$$c_1 = C_3 - (2.8KS_K \cdot S_3 + 1.65A_3 + 0.35F_3)$$

$$a_2 = SR(A_1 + F_1) - S_1$$
$$b_2 = SR(A_2 + F_2) - S_2$$
$$c_2 = S_3 - SR(A_3 + F_3)$$

ฉะนั้น X และ Y หาได้จากสมการที่ 3.7 และสมการ 3.8

$$X = \frac{c_1b_2 - c_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad (3.7)$$

$$Y = \frac{a_1c_2 - a_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad (3.8)$$

งานวิจัยนี้ทำการคำนวณหาอัตราส่วนของวัตถุดิบของการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 1 โดยทำการคำนวณอัตราส่วนของวัตถุดิบและราคาของวัตถุดิบจากส่วนประกอบของวัตถุดิบเดิมที่โรงงานใช้อยู่ และส่วนประกอบของวัตถุดิบชนิดใหม่ โดยเปลี่ยนจากดินเหนียวเป็นหินดินดาน และเปลี่ยนจากศิลาแลงเป็นแร่เหล็กที่มีส่วนประกอบและราคาของวัตถุดิบดังตารางที่ 3.28 และมีผลการคำนวณดังตารางที่ 3.29

สำหรับผลการคำนวณปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าเมื่อใช้หินดินดานแทนดินเหนียว หินดินดานมีส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถผลิตปูนซีเมนต์ได้ (สอดคล้องกับตารางที่ 3.27) แต่มีความสามารถในการเผาไหม้น้อยกว่าดินเหนียวเล็กน้อย เมื่อคำนวณหาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ พบว่าปริมาณของหินดินดานที่ใช้น้อยกว่าดินเหนียวและหินดินดานมีราคาถูกกว่าดินเหนียวเช่นกัน ทำให้ราคาของวัตถุดิบทั้งหมดต่อน้ำหนักของปูนเม็ดมีค่าน้อยลงด้วย แต่ที่สำคัญ

หินดินดานมีความชื้นน้อยกว่าดินเหนียวจึงต้องการพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำน้อยกว่าดินเหนียว เป็นผลให้ใช้เชื้อเพลิงในการผลิตน้อยกว่าและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า สำหรับผลการคำนวณเมื่อเปลี่ยนศิลาแลงเป็นแร่เหล็ก พบว่าปริมาณแร่เหล็กที่ใช้น้อยลงแต่แร่เหล็กมีราคาสูงกว่าศิลาแลงมาก ทำให้ราคาของวัตถุดิบทั้งหมดต่อน้ำหนักของปูนเม็ดมากขึ้น

ตารางที่ 3.28 ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยเฉลี่ย)	Calcareous	Argillaceous		Ferrous	
	หินปูน	ดินเหนียว	หินดินดาน[1]	ศิลาแลง	แร่เหล็ก[2]
CaO	45.02	4.84	0.32	0.37	2.02
SiO_2	1.03	59	61.69	51.36	10.42
Al_2O_3	0.06	19.33	17.96	10.96	4.07
Fe_2O_3	0.26	7.37	7.26	25.99	75.00
MgO	2.50	0.6	0.29	0.4	0.97
K_2O+ Na_2O	0.061	0.08	0.04	0.1	0.07
ความชื้น	9.1	19.27	9	10.44	8.06
Burnability Factor	39	20	23	12	2
ราคา (บาท/ตัน)[3]	85	550	90	15	400

[1]คุณสมบัติของหินดินดานโรงงานที่ 2

[2]คุณสมบัติของแร่เหล็กโรงงานที่ 3,4

[3]ราคาจากกรมทรัพยากรธรณี

ตารางที่ 3.29 ผลการคำนวณอัตราส่วนของปริมาณวัตถุดิบ และราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1

	วัตถุดิบชนิดเดิม[1]	เปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ	
		เปลี่ยนดินเหนียว[2]	เปลี่ยนศิลาแลง[3]
ส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยรวม (ร้อยละ)			
CaO	62	62	62
SiO_2	20	20	22
Al_2O_3	6	5	6
Fe_2O_3	4	5	3

ตารางที่ 3.29 **(ต่อ)** ผลการคำนวณอัตราส่วนของปริมาณวัตถุดิบ
และราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1

	วัตถุดิบชนิดเดิม[1]	เปลี่ยนชนิดของวัตถุดิบ	
		เปลี่ยนดินเหนียว[2]	เปลี่ยนศิลาแลง[3]
อัตราส่วนของวัตถุดิบ (ร้อยละ)			
หินปูน	80	81	80
ดินเหนียว	15	-	19
หินดินดาน	-	12	-
ศิลาแลง	5	7	-
แร่เหล็ก	-	-	1
ราคาวัตถุดิบทั้งหมด (บาท/ตันปูนเม็ด)	15	8	17.5

[1] วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ หินปูน ดินเหนียว ศิลาแลง

[2] วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ หินปูน หินดินดาน ศิลาแลง

[3] วัตถุดิบที่ใช้ ได้แก่ หินปูน ดินเหนียว แร่เหล็ก

3.3.1.4 **การควบคุมสภาวะการดำเนินงานของหม้อเผา**

การควบคุมสภาวะการดำเนินงานของหม้อเผาจะช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการ และสามารถลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้ โดยสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1) ควบคุมปริมาณออกซิเจนในหม้อเผา

ในการเผาปูนเม็ด ถ้าอัตราส่วนของออกซิเจนส่วนเกิน (excess air) มากจะทำให้สูญเสียความร้อนมาก และทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟลดลง โดยถ้าปริมาณออกซิเจนที่ออกมาเพิ่มขึ้น 1 % จะสูญเสียความร้อนประมาณ 0.4 % [35] นอกจากนั้นปริมาณของออกซิเจนส่วนเกินนี้ยังแสดงถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากหม้อเผาด้วย โดยถ้าปริมาณออกซิเจนมากพอปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นก็จะน้อย ดังนั้นในการควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ปล่อยออกมาพร้อมกับก๊าซอื่น ๆ ต้องกำหนดให้มีปริมาณเพียงพอไม่มากและไม่น้อยเกินไป โดยก๊าซที่ออกมาจากหม้อเผาต้องมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.70 - 3.5 % [35]

2) ควบคุมระยะเวลาในการ calcine

สิ่งที่มีผลกับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นอกจากอัตราส่วนของออกซิเจนในหม้อเผาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง และความเร็วรอบของหม้อเผา ซึ่งจะมีผลต่อระยะเวลาของการ calcine ถ้าช่วงของการ calcine สั้น จะทำให้เกิดการเผาไหม้ในส่วนของ burning zone ที่อยู่ช่วงถัดมาไม่สมบูรณ์ และเหลือวัตถุดิบที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ด้วย

3) ควบคุมลักษณะของเปลวไฟ

ลักษณะของเปลวไฟที่ดีต้องสั้นและมีอุณหภูมิสูง เพราะขนาดของเปลวไฟที่สั้นจะทำให้ส่วน calcining zone ยาว และทำให้กำลังการผลิตของเตามากขึ้น โดยลักษณะของเปลวไฟจะมีผลต่อคุณภาพของปูนเม็ด สารเคลือบผนังหม้อเผา การเกิดวงแหวนของปูนเม็ดรอบหม้อเผา และอายุการใช้งานของผนังหม้อเผา ความร้อนของเปลวไฟจะต้องมากพอที่จะทำให้วัตถุดิบเกิดการเผาไหม้จนหมด แต่ต้องไม่มากจนเกินไป เพราะไม่เพียงแต่จะสูญเสียความร้อนแล้ว ยังก่อให้เกิดความเสียหายในส่วนท้ายของหม้อเผา (Kiln Discharge End) อีกด้วย

ถึงแม้ว่าขนาดของเปลวไฟที่ดีจะต้องสั้น แต่ถ้าความยาวของเปลวไฟสั้นมากและอ้วนจนเกินไป จะทำให้สารเคลือบผิวที่เกิดจากปูนเม็ดที่เย็นตัวเกาะอยู่โดยรอบผนังหม้อเผาละลายออกมา ทำให้อายุการใช้งานของหม้อเผาสั้นลง

นอกจากนั้นลักษณะของเปลวไฟยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ดังนั้นถ้าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเปลี่ยนไป ปริมาณอากาศที่เข้ามาก็จะต้องเปลี่ยนตามไปด้วยเพื่อให้ความยาวของเปลวไฟคงที่ ถ้าปริมาณของอากาศน้อยเกินไปจะทำให้เปลวไฟมีความยาวมาก เพราะเชื้อเพลิงจะพุ่งไปหาออกซิเจนที่อยู่ด้านในหม้อเผา ขนาดของท่ออากาศก็มีผลต่อความยาวของเปลวไฟ ถ้าท่ออากาศมีขนาดเล็กลงเปลวไฟก็จะสั้นลง

4) ควบคุมระยะจุดติดไฟ (initial ignition)

ระยะห่างของจุดที่เกิดการติดไฟควรอยู่ใกล้กับหัวเผา โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศและขนาดเชื้อเพลิงที่เข้ามาในหม้อเผา ถ้าอุณหภูมิของอากาศลดลงจุดที่เกิดการติดไฟก็จะไกล

ออกไป ดังนั้นอากาศที่จะผ่านเข้ามาในหม้อเผาควรทำการให้ความร้อนเบื้องต้นก่อน สำหรับขนาดของเชื้อเพลิง ถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก (พื้นที่ผิวมาก) จะทำให้จุดที่ติดไฟสั้นลง นอกจากนั้นถ้าเชื้อเพลิงที่ไม่เกิดการเผาไหม้ไปติดอยู่บริเวณผนังของหม้อเผา จะทำให้ผนังหม้อเผามีอายุการใช้งานสั้นลงได้และคุณภาพของปูนเม็ดจะลดลง ดังนั้นลักษณะของเชื้อเพลิงที่ดีจะต้องมีขนาดเล็กและมีเวลาในการเผาไหม้มากพอ

5) ควบคุมอุณหภูมิในส่วนของ burning zone

อุณหภูมิในส่วนของ burning zone เกิดจากความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งความร้อนนี้จะเกี่ยวข้องกับอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณออกซิเจนและเชื้อเพลิง ถ้าออกซิเจนที่ออกมาจากหม้อเผามีปริมาณน้อย จะทำให้อุณหภูมิในส่วนของ burning zone ลดลง ดังนั้นควรทำการแก้ไขโดยเพิ่มปริมาณอากาศ ลดความเร็วรอบของหม้อเผา และลดอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ในการเพิ่มอุณหภูมิในส่วนของ burning zone นั้นเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของเปลวไฟนั่นเอง โดยการเพิ่มอุณหภูมิสามารถทำได้ดังนี้

- เพิ่มอุณหภูมิของอากาศทุติยภูมิที่เข้ามาในหม้อเผา
- ใช้อากาศปฐมภูมิให้น้อยลงเพื่อให้อากาศทุติยภูมิมีอุณหภูมิสูงขึ้น
- เพิ่มประสิทธิภาพของการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยทำการปรับปรุงที่หัวเผาและท่ออากาศ

6) ควบคุมปริมาณความร้อนสูญเสีย

การลดการสูญเสียความร้อนสามารถทำได้ดังนี้

- ออกแบบระบบให้มีการใช้อากาศได้มากที่สุด
- ลดอุณหภูมิของอากาศที่ออกมาจากหม้อเย็นให้น้อยลง
- ดำเนินการผลิตปูนเม็ดให้ใกล้เคียงกับกำลังผลิตที่มากที่สุด
- พยายามทำให้ส่วน burning zone สั้นที่สุด
- ควรควบคุมการเผาไหม้ให้คงที่ ให้มีปริมาณออกซิเจนออกมาไม่มากเกินไปและไม่น้อยเกินไป
- พยายามทำให้เปลวไฟสั้นเพราะจะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี

7) เพิ่มความสามารถในการเผาไหม้ (Burnability)

ถ้าวัตถุดิบเผาได้ง่ายจะทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการน้อยลง วัตถุดิบที่เผาง่ายจะต้องพิจารณาจากส่วนประกอบของวัตถุดิบเหล่านั้น ถ้าวัตถุดิบมีอัตราส่วนของซิลิกาสูงจะทำให้เผาได้ยาก แต่ถ้าวัตถุดิบมีอัตราส่วนของของเหลวสูงจะทำให้เผาได้ง่ายและช่วยให้เกิดสารเคลือบผิว ซึ่งของเหลวในวัตถุดิบจะประกอบด้วยอลูมินา เหล็ก แมกนีเซีย (MgO) และอัลคาไล แต่ถ้าวัตถุดิบมีอัตราส่วนของของเหลวมากเกินไป สารเคลือบผิวที่อยู่รอบหม้อเผาจะหลอมละลายจนมีลักษณะเป็นวงแหวน ทำให้อายุการใช้งานของผนังหม้อเผาลดลง

3.3.1.5 การเปลี่ยนชนิดและวิธีการจัดการของเสีย

ของเสียที่เกิดจากการผลิตที่มีปริมาณมากกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด จำเป็นจะต้องผ่านระบบบำบัดก่อนปล่อยออกนอกโรงงาน ซึ่งวิธีการจัดการของเสียเหล่านั้นมีหลายวิธี โดยการเลือกใช้ระบบบำบัดจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการกำจัด อุณหภูมิของก๊าซที่ผ่านระบบบำบัด การบำรุงรักษา ค่าลงทุนและค่าติดตั้ง เป็นต้น ในการลดปริมาณฝุ่นที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์และการผลิตไฟฟ้านิยมใช้ระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator) และระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง (Bag Filter) จากการศึกษาพบว่าระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์ช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง เนื่องจากระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์มีประสิทธิภาพการกำจัดฝุ่นใกล้เคียงกับระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง แต่มีขีดความสามารถมากกว่า และใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า (ดังตารางที่ 3.31) [49] ถึงแม้ว่าการลงทุนของระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์จะสูงกว่าระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่าดังแสดงในตารางที่ 3.30 [40]

ตารางที่ 3.30 ค่าใช้จ่ายของระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์และระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง [40]

	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (10^6 ECU)	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งหมด (ECU/ตันฝุ่น)
ระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์	2.1 – 4.6 (เฉลี่ย 3.4)	0.4 – 0.8 (เฉลี่ย 0.6)
ระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง	2.1 – 4.3 (เฉลี่ย 3.2)	0.5 – 0.9 (เฉลี่ย 0.7)

ตารางที่ 3.31 ข้อดีและข้อเสียของระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์และแบบถุงกรอง [49]

ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบกำจัดฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตย์ (ESP) - ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 99.9 และใช้พลังงานน้อย - การเก็บฝุ่นและการกำจัดเป็นแบบแห้ง - ความดันลดต่ำ ประมาณ 1-2 เซนติเมตรน้ำ - เป็นระบบแบบต่อเนื่องที่ต้องการการบำรุงรักษาน้อย - ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ - สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 700 องศาเซลเซียส) และช่วงความดันกว้าง (สุญญากาศ - 10 บรรยากาศ) - ใช้ได้กับอัตราการไหลของก๊าซที่สูง (ประมาณ 50,000 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)	- ใช้เงินลงทุนสูง (ประมาณ 160 ดอลลาร์สหรัฐต่อตารางเมตรของพื้นที่หน้าตัด) - อัตราการไหล อุณหภูมิ องค์ประกอบของก๊าซ ขนาดและปริมาณของฝุ่น มีผลต่อการดำเนินการสูง - เกิดปัญหาเมื่อฝุ่นมีความต้านทานสูงหรือต่ำมาก - ใช้เนื้อที่ในการติดตั้งอุปกรณ์มาก - อาจเกิดการระเบิดเมื่อใช้กับก๊าซหรือฝุ่นที่ติดไฟได้ - ต้องการบุคคลที่มีความรู้ความสามารถในการดำเนินการและบำรุงรักษา
ระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง - ประสิทธิภาพในการกำจัดฝุ่นสูง (ประมาณร้อยละ 99.9) - อัตราการไหล องค์ประกอบของก๊าซ ขนาดและปริมาณของฝุ่น มีผลต่อการดำเนินการน้อย - มีการหมุนเวียนของอากาศย้อนกลับ - การเก็บฝุ่นและการกำจัดเป็นแบบแห้ง - ไม่มีปัญหาการกัดกร่อน - การดำเนินการและการบำรุงรักษาทำได้ง่าย - สามารถปรับเปลี่ยนถุงกรองเพื่อใช้กับฝุ่นขนาดต่าง ๆ และฝุ่นที่มีลักษณะพิเศษอื่น ๆ เช่น ควัน และสิ่งเจือปนที่เป็นก๊าซ	- ต้องใช้ถุงกรองที่ทำจากวัสดุทนไฟหรือโลหะซึ่งมีราคาแพง เมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 290 องศาเซลเซียส) - ต้องมีการล้างถุงกรองเพื่อนำฝุ่นตกค้างออก - ต้องทำการบำรุงรักษาบ่อย ๆ - อาจเกิดการระเบิดเมื่อความเข้มข้นของฝุ่นสูง (ประมาณ 50 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) - อายุการใช้งานของถุงกรองสั้นลงเมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิสูง หรือในสภาวะที่เป็นกรดหรือด่าง เป็นต้น - การเปลี่ยนถุงกรองต้องมีการใส่เครื่องป้องกันระบบการหายใจ - ความดันลดปานกลาง อยู่ในช่วง 10-25 เซนติเมตรน้ำ

3.4 การกำหนดดัชนีสิ่งแวดล้อม

การทำวิจัยในครั้งนี้ได้พิจารณาดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมที่สอดคล้องในระดับปฏิบัติการ เพื่อเป็นตัวแทนในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เป็นดัชนีที่สามารถนำเสนอข้อมูลในรูปเชิงปริมาณและคุณภาพ ที่สามารถอธิบายการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อมของโรงงานได้ดี

2. เป็นดัชนีที่สามารถบ่งชี้ถึงระดับความรุนแรงของผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากโรงงาน

จากการประเมินผลการทบทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตปูนซีเมนต์ จะได้ว่าสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศและการใช้เชื้อเพลิงเป็นประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ (จากตารางที่ 3.15) ดังนั้นดัชนีทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตปูนซีเมนต์ คือ การใช้เชื้อเพลิง ปริมาณฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ถูกกำหนดให้เป็นดัชนีทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่เป็นผลกระทบโดยอ้อม เช่น การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งโดยปกติในกระบวนการผลิตจะมีการควบคุมการเผาไหม้อยู่แล้ว สำหรับดัชนีสิ่งแวดล้อมทั้งสามที่ได้กำหนดนี้ จะใช้เป็นแนวทางในการลดและควบคุมสารมลพิษที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นดัชนีทั้งสามยังแสดงถึงประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบดัชนีสิ่งแวดล้อมระหว่างโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ภายในประเทศ และเปรียบเทียบดัชนีสิ่งแวดล้อมของการผลิตปูนซีเมนต์ที่ผลิตในประเทศกับต่างประเทศ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งการเทียบเทียบนี้พิจารณาจากความเข้มข้นและปริมาณของสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์

ความเข้มข้นและปริมาณของสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 ถึงโรงงานที่ 4 แสดงในตารางที่ 3.32 และตารางที่ 3.33

ตารางที่ 3.32 ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานในประเทศไทย

	ความเข้มข้นของสารมลพิษ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร)					
	ฝุ่นแขวนลอย		ซัลเฟอร์ไดออกไซด์		ไนโตรเจนออกไซด์	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
โรงงานที่ 1	221 – 378	280	2 – 12	8	-	-
โรงงานที่ 2	95 – 340	206	65 – 333	167	1459 – 2622	2023
โรงงานที่ 3	108	-	10	-	-	-
โรงงานที่ 4	128	-	3	-	-	-

ตารางที่ 3.33 ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานในประเทศไทย

	ปริมาณสารมลพิษ (กิโลกรัม/ตันปูนเม็ด)					
	ฝุ่นแขวนลอย		ซัลเฟอร์ไดออกไซด์		ไนโตรเจนออกไซด์	
	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
โรงงานที่ 1	1.03 –1.55	1.25	1.8 – 7.6	8.4	-	-
โรงงานที่ 2	0.09 – 0.31	0.21	0.07 – 0.35	0.19	1.5 – 3.5	2.5
โรงงานที่ 3	0.33	-	0.04	-	-	-
โรงงานที่ 4	0.22	-	0.01	-	-	-

เมื่อพิจารณาสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานทั้ง 4 พบว่า โรงงานที่ 1 ปล่อยฝุ่นละอองออกจากโรงงานมากกว่าโรงงานอื่น ๆ ทั้งความเข้มข้นและปริมาณ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานมีประสิทธิภาพต่ำกว่า คือมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยร้อยละ 99.5 ส่วนโรงงานที่ 2 มีประสิทธิภาพของระบบกำจัดฝุ่นประมาณร้อยละ 99.9 สำหรับโรงงานที่ 3 และโรงงานที่ 4 มีประสิทธิภาพของระบบกำจัดฝุ่นประมาณร้อยละ 99.9 ถึง ร้อยละ 99.99 ดังแสดงในภาคผนวก ข สำหรับความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 โรงงานที่ 3 และโรงงานที่ 4 มีค่าต่ำกว่าโรงงานที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากโรงงานที่ 2 ใช้ถ่านหินที่มีปริมาณซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบสูง และถ่านหินของโรงงานที่ 2 มีค่าความร้อนน้อยจึงใช้ถ่านหินในปริมาณมากกว่าโรงงานอื่น ๆ

สำหรับความเข้มข้นและปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ในต่างประเทศแสดงในตารางที่ 3.34 และ ตารางที่ 3.35

ตารางที่ 3.34 ความเข้มข้นของสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานต่างประเทศ

	ความเข้มข้นของสารมลพิษ (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร)		
	ฝุ่นแขวนลอย	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ไนโตรเจนออกไซด์
Holderbank[1]	13 - 25	139 - 185	577 - 620
CEMBUREAU[2]	20 - 200	10 - 2500	500 - 2000

[1] ความเข้มข้นของสารมลพิษของบริษัท Holderbank เป็นค่าเฉลี่ยของโรงงานในเครือทั้งหมด 5 โรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 – พ.ศ. 2541 [5 4]

[2] ความเข้มข้นของสารมลพิษของบริษัท CEMBUREAU เป็นช่วงความเข้มข้นของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ทั้งหมดในกลุ่มทวีปยุโรป [4 9]

ตารางที่ 3.35 ปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยจากปล่องโรงงานผลิตปูนซีเมนต์หลังผ่านระบบกำจัดฝุ่นของโรงงานต่างประเทศ

	ปริมาณสารมลพิษ (กิโลกรัม/ตันปูนซีเมนต์)		
	ฝุ่นแขวนลอย	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ไนโตรเจนออกไซด์
Aberthaw[1]	0.52	1.67	2.18
Barnstone[1]	0.18	6.31	1.07
Caudon[1]	0.39	0.42	1.92
Dunbar[1]	0.48	6.73	2.25
Hope[1]	0.21	2.48	3.52
Holderbank	-	0.26	0.61

[1] ปริมาณสารมลพิษเป็นค่าเฉลี่ยของโรงงานในปี พ.ศ. 2542 [5 5]

เมื่อเปรียบเทียบกับโรงงานในต่างประเทศพบว่าสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศทั้งความเข้มข้นและปริมาณส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าโรงงานจากต่างประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่ในต่างประเทศมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นทดแทนถ่านหินที่ใช้อยู่ เช่น บริษัท Holderbank ใช้ยางรถยนต์ สลัดจ์ พลาสติก น้ำมันหล่อลื่นตัวทำละลาย และไขมันสัตว์ เป็นเชื้อเพลิงประมาณร้อยละ 28 – 29 โรงงาน Aberthaw ใช้ถ่านหิน

ผสมกับ petroleum coke เป็นเชื้อเพลิง โรงงาน Cauldon ใช้ถ่านหินผสมกับเศษยางรถยนต์เป็นเชื้อเพลิง โรงงาน Dunbar ใช้ถ่านหินกับตัวทำละลาย สี ยาง และน้ำยาล้างแปรง เป็นเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้มีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันทำให้อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลงปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้จึงน้อยลง เป็นผลให้สารมลพิษที่ปล่อยออกมาต่ำกว่ากระบวนการผลิตภายในประเทศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรม LCA – Cement จัดทำขึ้นเพื่อช่วยในการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ สารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ สารมลพิษที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ และหาขนาดของวัตถุดิบที่ออกจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสม ซึ่งสารมลพิษที่เกิดขึ้นจะคำนวณเฉพาะสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศ ได้แก่ ฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

สำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ในโปรแกรมนี้สามารถสรุปได้ในรูปที่ 4.1 โดยมีขั้นตอนการคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. การคำนวณพลังงานไฟฟ้าและสารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์

2. การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงและสารมลพิษในขอบเขตของวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ (รูปที่ 4.2)

3. การคำนวณหาขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสม (รูปที่ 4.3)

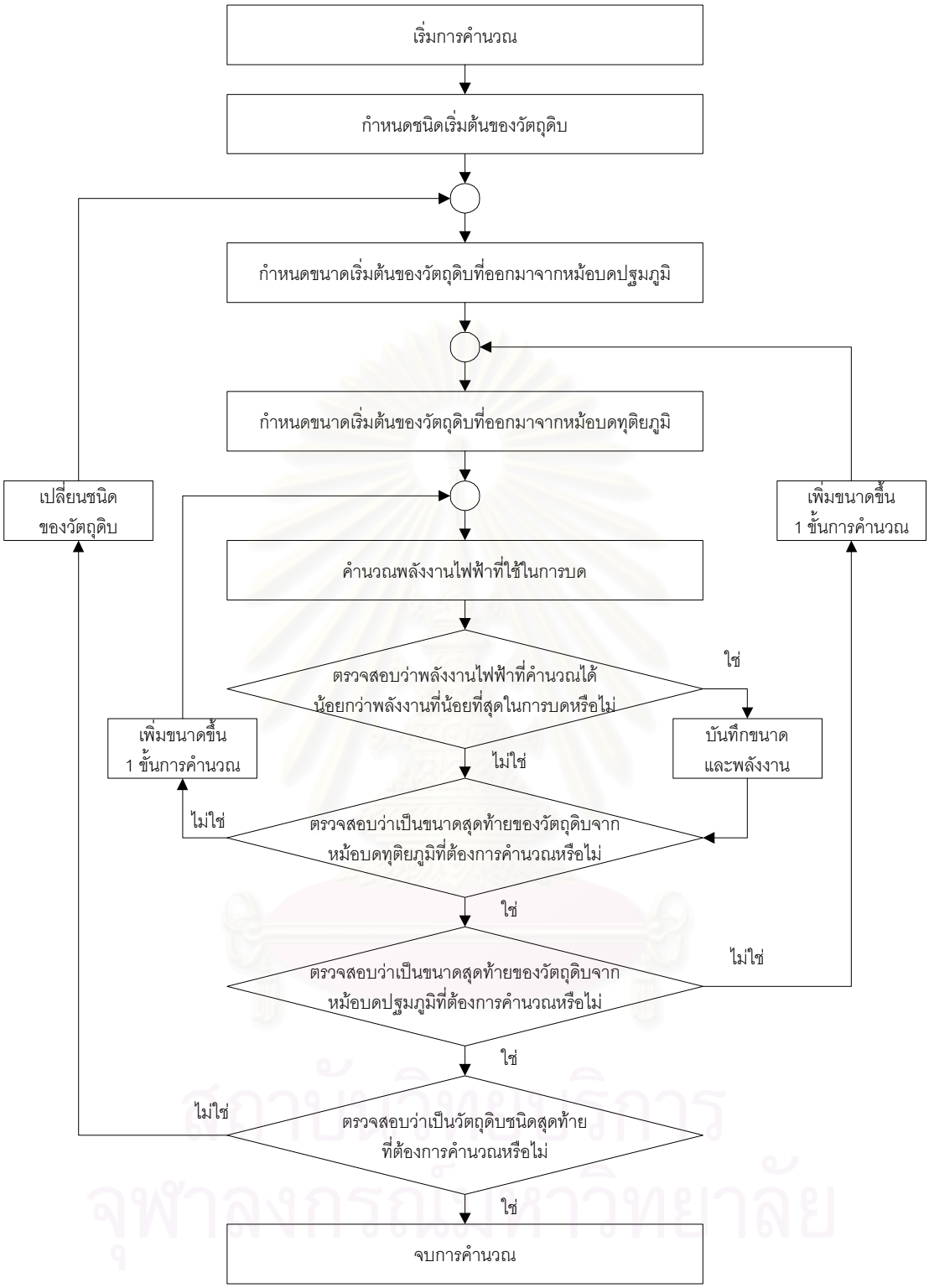
โดยเมื่อเริ่มการใช้งานจะเข้าสู่หน้าจอเริ่มต้น (รูปที่ 4.4) และเข้าสู่หน้าจอวัตถุดิบ (รูปที่ 4.5)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทำงานหลักของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

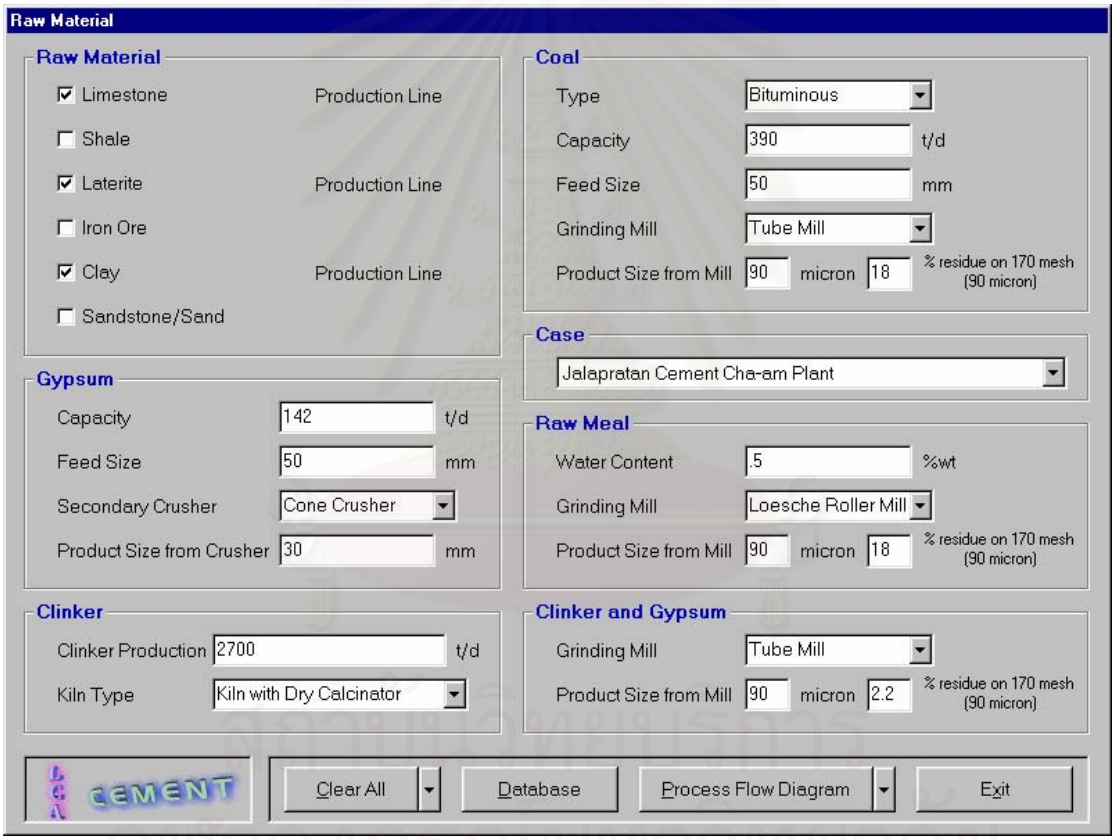
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการคำนวณสารมลพิษโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของวัตถุดิบ
ที่ออกมาจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิที่เหมาะสม

รูปที่ 4.4 หน้าจอเริ่มต้น

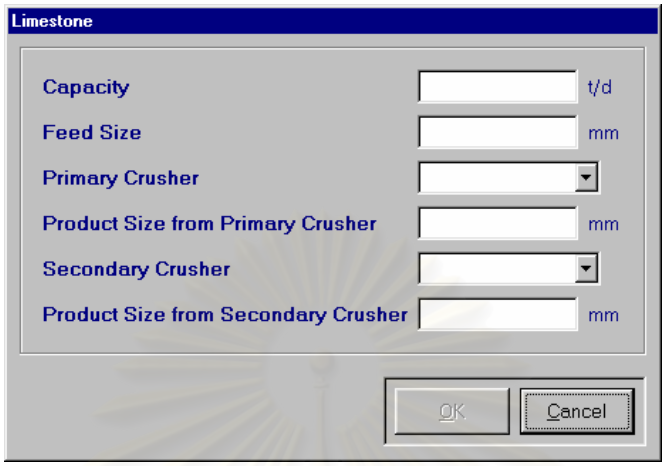


รูปที่ 4.5 หน้าจอวัตถุดิบ

หน้าจอวัตถุดิบแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- **ชนิดของวัตถุดิบ** (Raw Material) สามารถเลือกชนิดของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต โดยเมื่อเลือกวัตถุดิบแล้วจะเข้าสู่หน้าจอย่อย (รูปที่4.6) เพื่อ

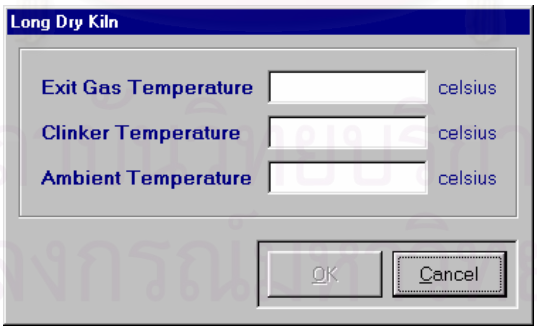
กำหนดปริมาณที่ใช้ ชนิดของหม้อบดปฐมภูมิและทุติยภูมิ และขนาดของวัตถุดิบที่เข้าและออกจากหม้อบดปฐมภูมิและทุติยภูมิ



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างหน้าจอย่อยเมื่อเลือกชนิดของวัตถุดิบ

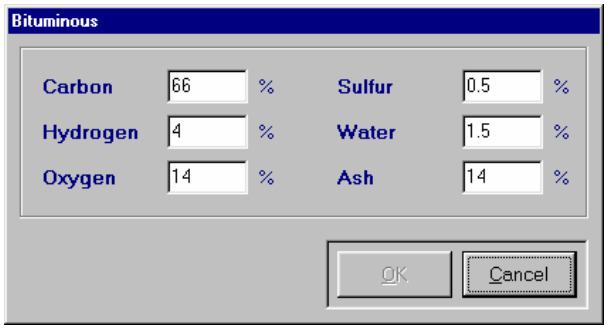
- **ยิปซัม** (Gypsum) ทำการกำหนดปริมาณที่ใช้ ชนิดของหม้อบด และขนาดของยิปซัมที่เข้าและออกจากหม้อบด

- **การเผาปูนเม็ด** (Clinker) กำหนดปริมาณปูนเม็ดที่ต้องการ และเลือกชนิดของเตาเผา เมื่อเลือกชนิดของเตาเผาจะเข้าสู่หน้าจอย่อยเพื่อกำหนดอุณหภูมิของก๊าซที่ปล่อยออกมา อุณหภูมิของปูนเม็ด และอุณหภูมิของบรรยากาศ (รูปที่ 4.7)



รูปที่ 4.7 ตัวอย่างหน้าจอย่อยเพื่อกำหนดอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกับหม้อเผา

- **ถ่านหิน** (Coal) เลือกชนิดของถ่านหิน กำหนดปริมาณถ่านหินที่ใช้ ชนิดของหม้อบด และขนาดของถ่านหินที่เข้าและออกจากหม้อบด โดยเมื่อเลือกชนิดของถ่านหินแล้วจะเข้าสู่หน้าจอย่อยแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของถ่านหิน (รูปที่ 4.8) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ



รูปที่ 4.8 หน้าจอย่อยแสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของถ่านหิน

- **ดินผง** (Raw Meal) กำหนดปริมาณความชื้นก่อนเข้าหม้อเผา เลือกชนิดของหม้อบด และกำหนดขนาดของดินผงที่ออกจากหม้อบด

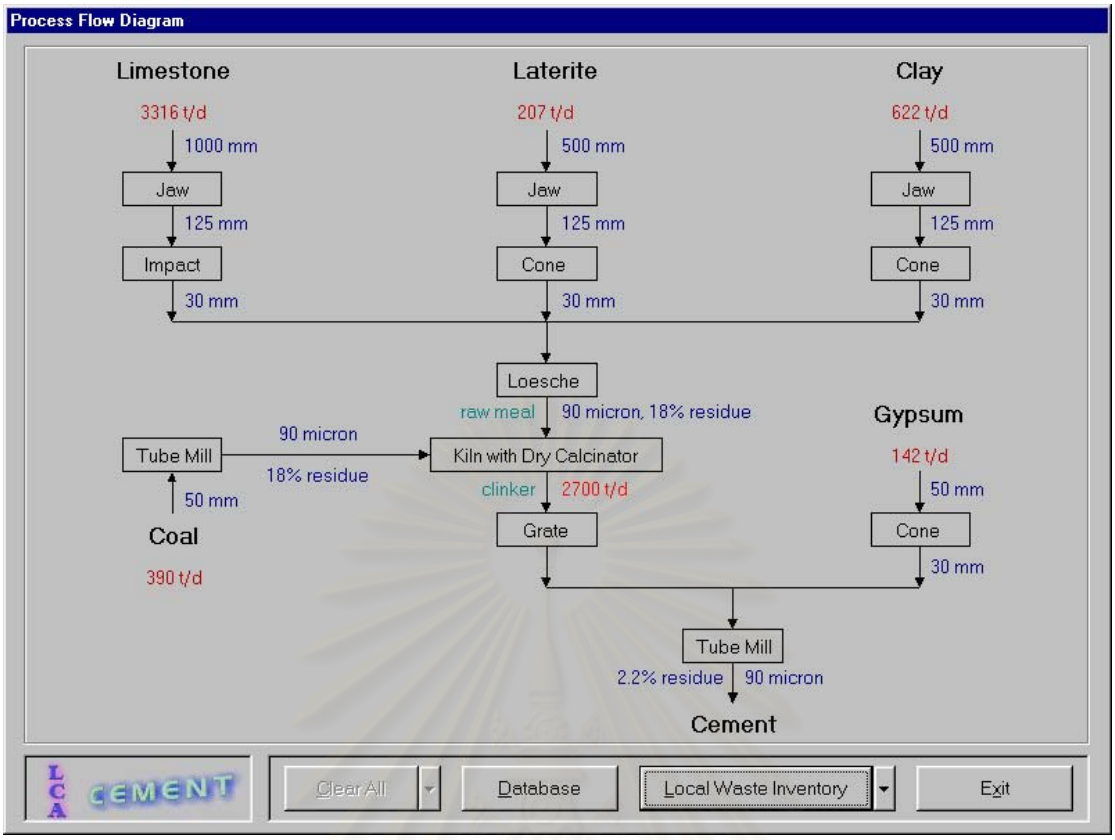
- **การบดปูนซีเมนต์** (Clinker and Gypsum) เลือกชนิดของหม้อบด และกำหนดขนาดของปูนซีเมนต์ที่ออกจากหม้อบด

- **กรณีศึกษา** (Case) เลือกกรณีศึกษาที่ได้รวบรวมข้อมูล และกำหนดค่าต่าง ๆ ไว้

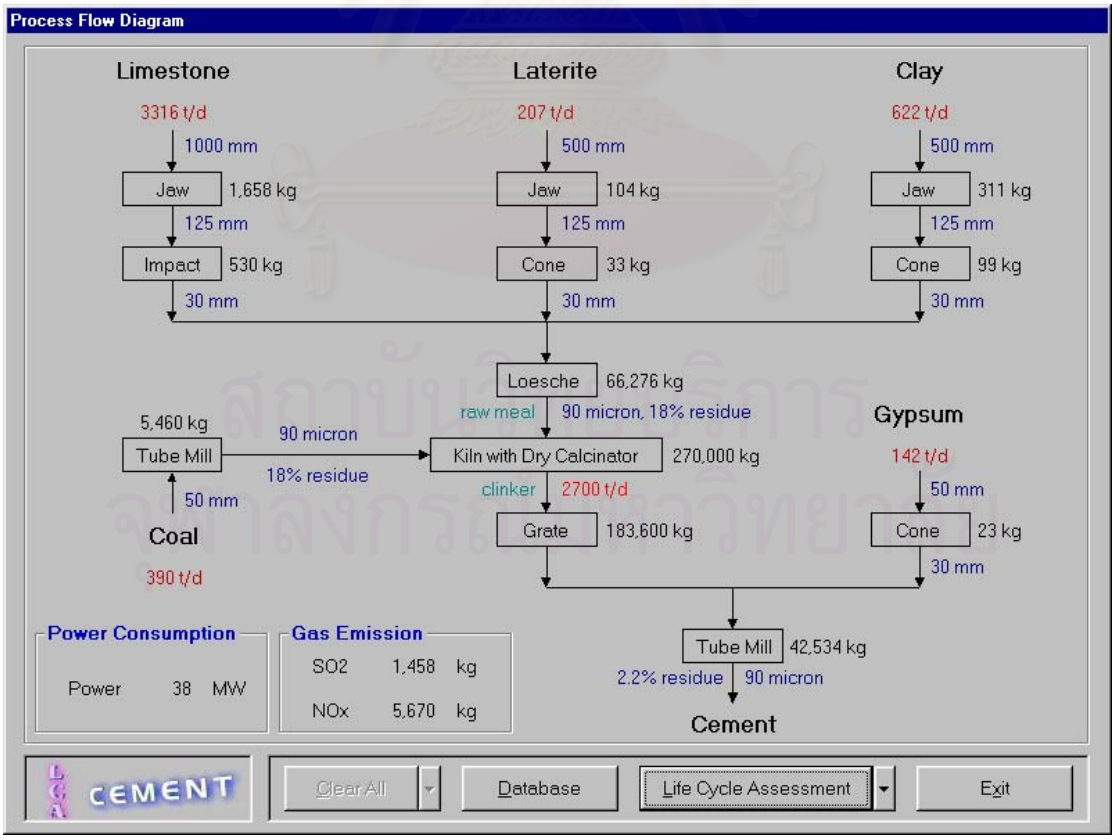
นอกจากนี้ สามารถลบข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้โดยกดปุ่ม Clear All หรือบันทึกข้อมูลไว้ในกรณีศึกษาใหม่ทำได้โดยกดปุ่ม Save การแก้ไขข้อมูลของกรณีศึกษาที่ได้กำหนดไว้แล้วทำได้โดยการแก้ไขข้อมูลที่ต้องการ แล้วกดปุ่ม Save เช่นเดียวกัน และยังสามารถเรียกข้อมูลของกรณีศึกษาที่ถูกบันทึกไว้ล่าสุดโดยปุ่ม Default

เมื่อทำการกำหนดข้อมูลต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วกดปุ่ม Process Flow Diagram เพื่อเข้าสู่หน้าจอผังกระบวนการผลิตต่อไป (รูปที่ 4.9)

หน้าจอผังกระบวนการผลิตแสดงถึงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จากข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้กำหนดไว้ เมื่อตรวจสอบว่าข้อมูลต่าง ๆ ถูกต้องแล้วกดปุ่ม Local Waste Inventory เพื่อแสดงปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (รูปที่ 4.10) ซึ่งได้แก่ ฝุ่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ รวมทั้งแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิตทั้งหมด ถ้าต้องการแก้ไขข้อมูลที่กำหนดไว้สามารถกดปุ่ม Raw Material เพื่อย้อนกลับสู่หน้าจอวัตถุดิบแล้วทำการแก้ไขข้อมูลต่อไป

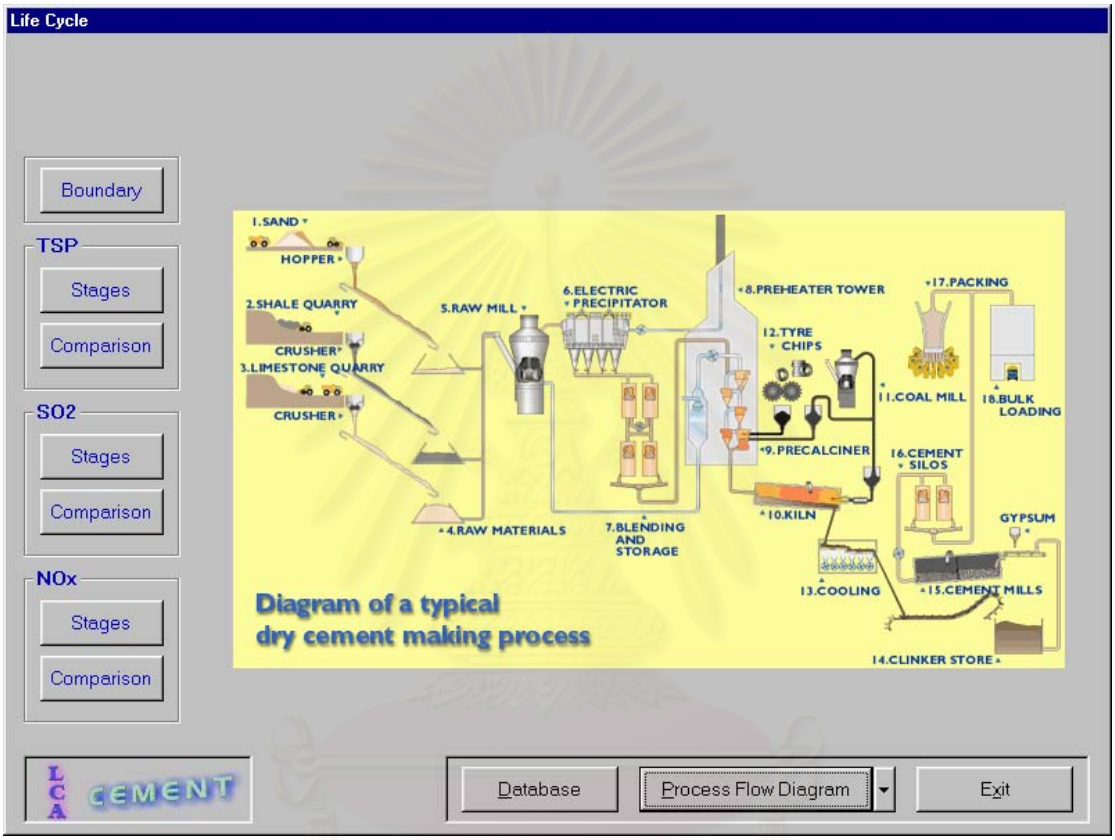


รูปที่ 4.9 หน้าจอผังกระบวนการผลิต



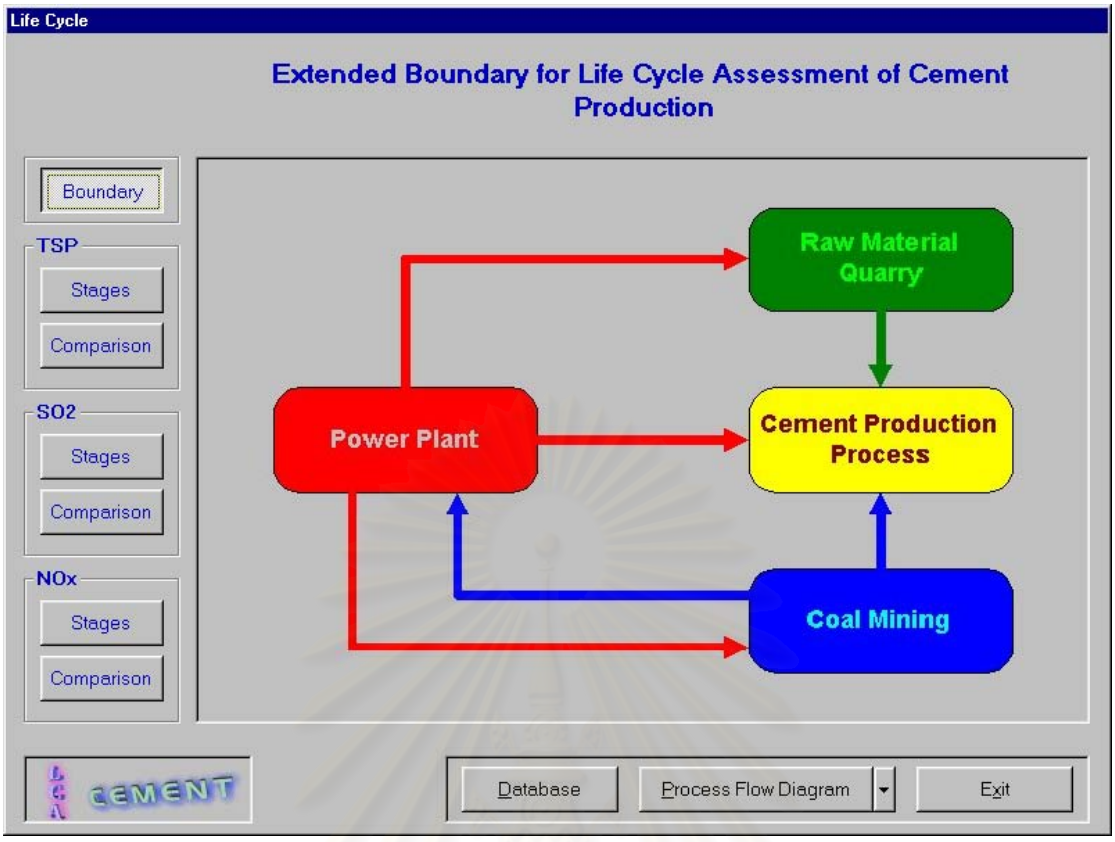
รูปที่ 4.10 หน้าจอแสดงปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

เมื่อต้องการดูปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ ให้กดปุ่ม Life Cycle Assessment เพื่อเข้าสู่หน้าจอวัฏจักรชีวิต (รูปที่ 4.11) ต่อไป ที่หน้าจอวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์นี้ สามารถดูขอบเขตของวัฏจักรชีวิตที่พิจารณาได้จากปุ่ม Boundary (รูปที่ 4.12) ซึ่งขอบเขตของวงจรชีวิตประกอบด้วยกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ การทำเหมืองหิน การทำเหมืองถ่านหิน และกระบวนการผลิตไฟฟ้า

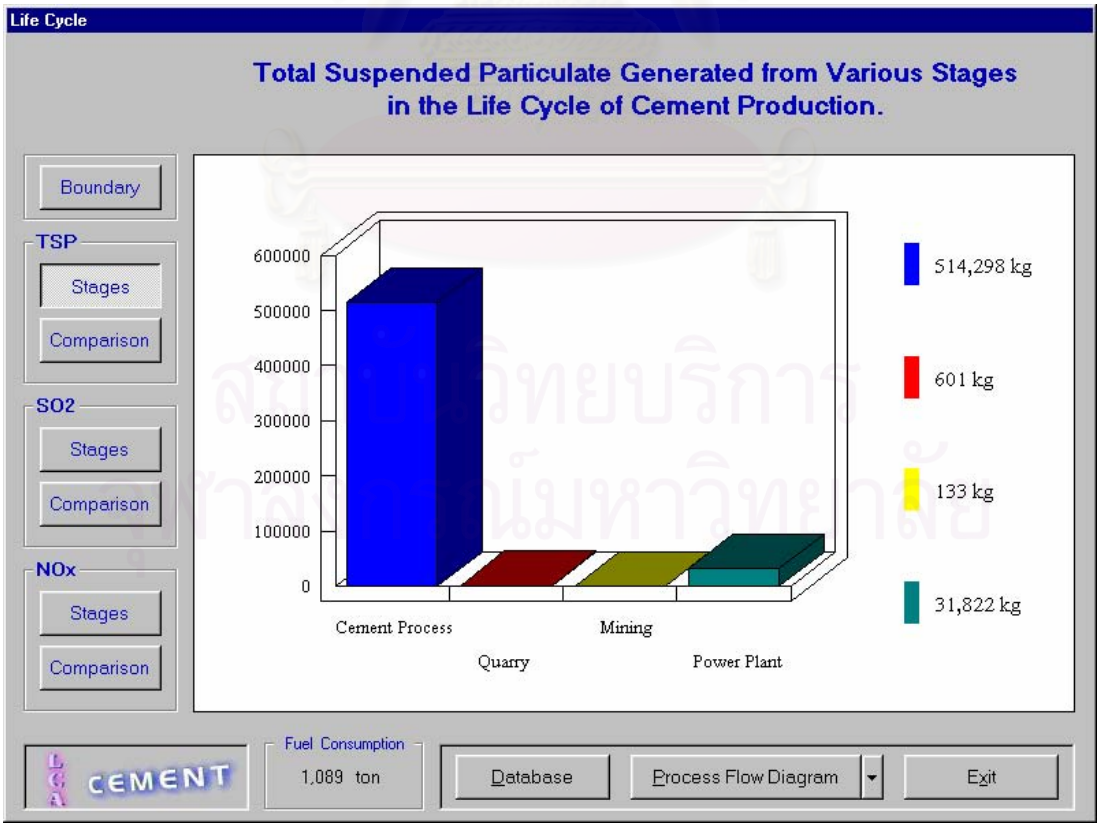


รูปที่ 4.11 หน้าจอวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์

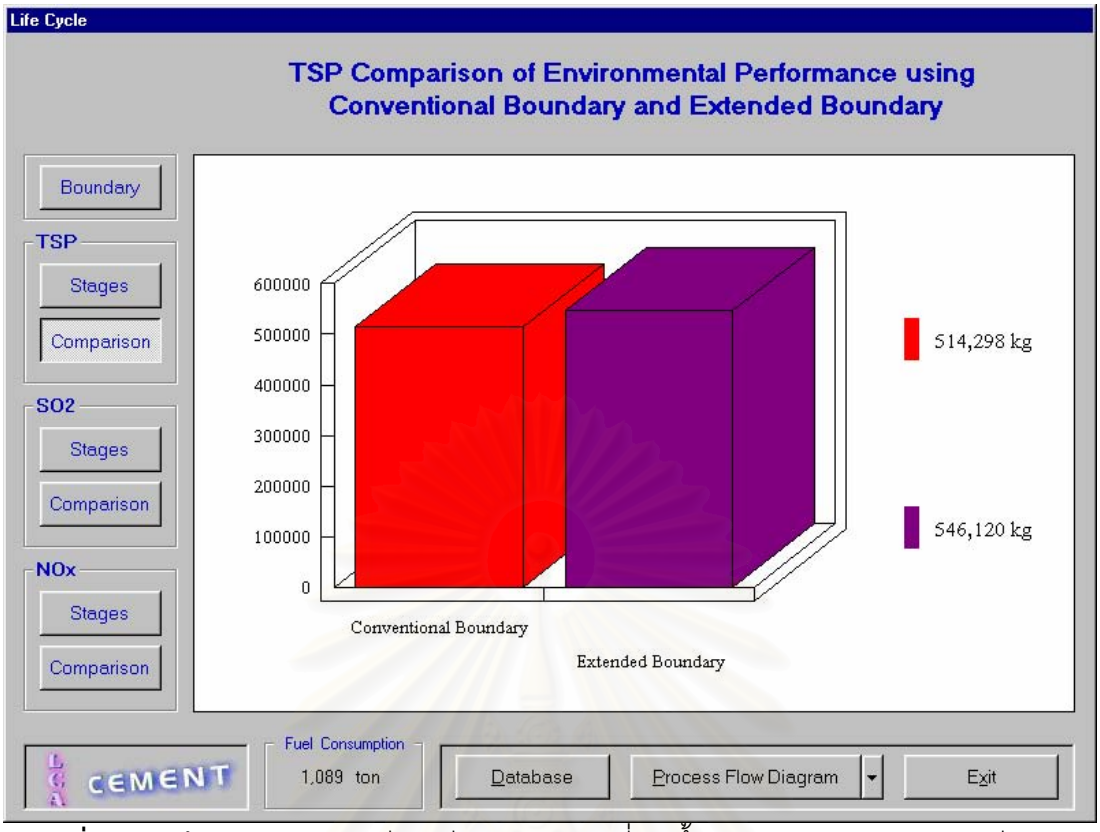
สำหรับปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ สามารถดูได้โดยกดปุ่ม Stage ซึ่งมีการแสดงแผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้น (รูปที่ 4.13) และเมื่อต้องการเปรียบเทียบปริมาณสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์กับปริมาณสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในวัฏจักรชีวิตทำได้โดยกดปุ่ม Comparison (รูปที่ 4.14) โดยในโปรแกรม LCA – Cement นี้ได้จัดทำการเปรียบเทียบสารมลพิษได้แก่ ฝุ่นแขวนลอย (TSP) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x)



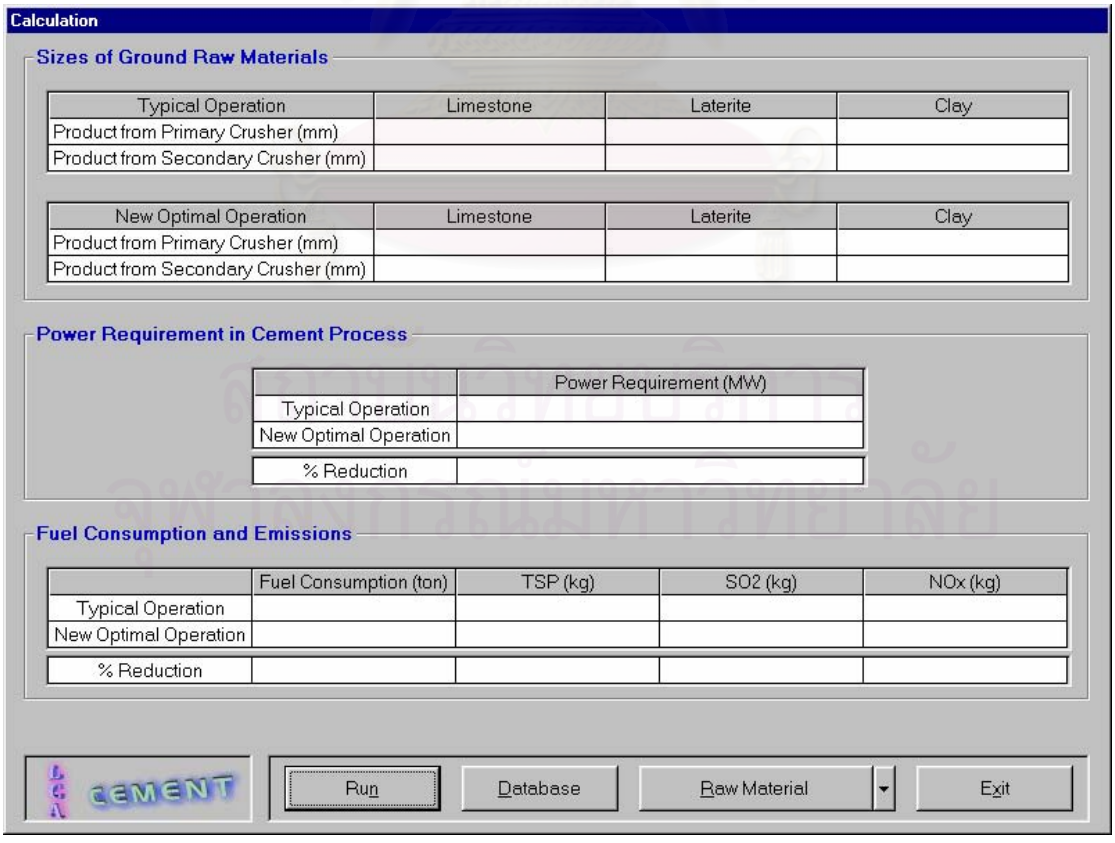
รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงขอบเขตของวัฏจักรชีวิตที่พิจารณา



รูปที่ 4.13 หน้าจอแสดงสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในขอบเขตวัฏจักรชีวิต



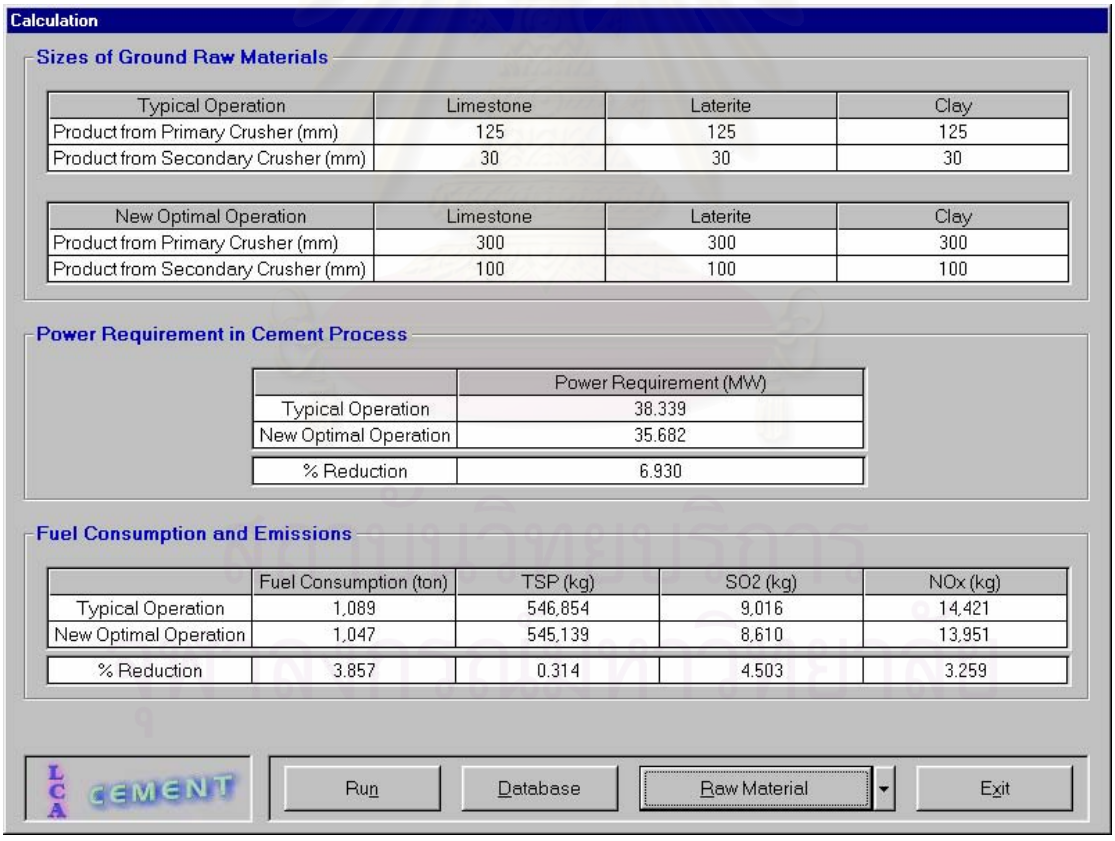
รูปที่ 4.14 หน้าจอแสดงการเปรียบเทียบสารมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และสารมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตในขอบเขตของวัฏจักรชีวิต



รูปที่ 4.15 หน้าจอการคำนวณ

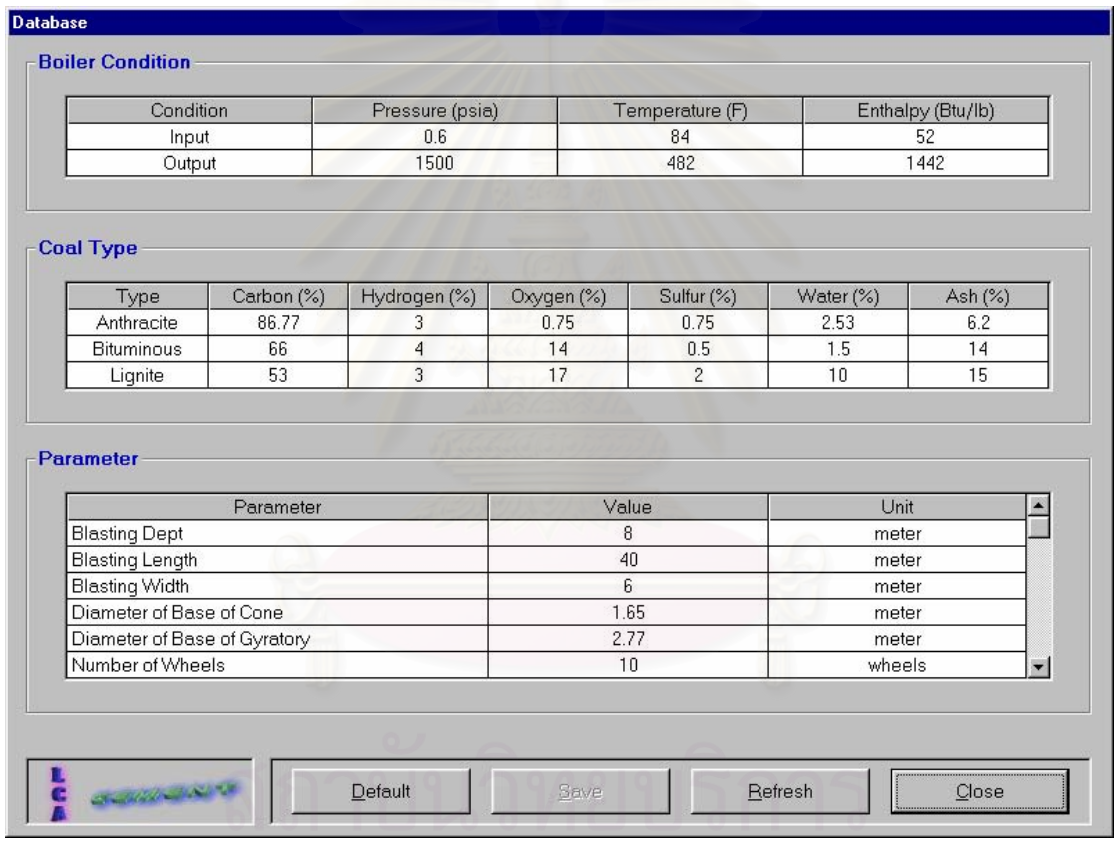
เมื่อต้องการหาขนาดของการบดวัตถุดิบที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตสามารถทำได้โดยกดปุ่ม Calculation เพื่อเข้าสู่หน้าจอการคำนวณ (รูปที่ 4.15) หลังจากนั้นกดปุ่ม Run เพื่อทำการคำนวณ ระหว่างการคำนวณจะมีภาพเคลื่อนไหว (รูปที่ 4.16) เพื่อแสดงว่าอยู่ในระหว่างการคำนวณ เมื่อทำการคำนวณเสร็จจะแสดงขนาดของการบดของกระบวนการที่กำหนดข้อมูลไว้และขนาดของการบดที่เหมาะสมในการบดวัตถุดิบแต่ละชนิด พลังงานไฟฟ้า ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและปริมาณสารมลพิษของกระบวนการผลิตเดิมและกระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว รวมทั้งแสดงร้อยละของพลังงานไฟฟ้า ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และปริมาณสารมลพิษที่ลดลงด้วย (รูปที่ 4.17)

รูปที่ 4.16 ภาพเคลื่อนไหวขณะที่โปรแกรมทำการคำนวณ



รูปที่ 4.17 หน้าจอแสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตเดิมและกระบวนการผลิตที่ปรับปรุงแล้ว

ปุ่ม Database ใช้เมื่อต้องการทราบหรือแก้ไขข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อกดปุ่มจะเข้าสู่หน้าจอฐานข้อมูล (รูปที่ 4.18) โดยข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ สภาวะการทำงานของหม้อต้มไอน้ำ ส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหินชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ เช่น ขนาดของโคนของหม้อบดแบบ Cone Crusher และ Gyratory Crusher ความหนาของหม้อเผา ขนาดของหลุมที่ได้จากการระเบิดหิน และระยะทางในการขนส่งหิน เป็นต้น เมื่อทำการแก้ไขแล้วสามารถบันทึกข้อมูลใหม่ได้โดยกดปุ่ม Save และเรียกข้อมูลที่ตั้งค่าไว้โดยกดปุ่ม Default สำหรับปุ่ม Refresh ไว้ใช้เรียกข้อมูลที่ได้ทำการเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้าย ส่วนการกลับเข้าสู่หน้าจอเดิมให้กดปุ่ม Close



รูปที่ 4.18 หน้าจอฐานข้อมูล

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ผลที่ได้จากการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยใช้วิธีการประเมินแบบวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ และผลจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิต สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้การประเมินแบบวัฏจักรชีวิตพบว่า สารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศและการใช้เชื้อเพลิงเป็นประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญ โดยสารมลพิษดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง และการใช้พลังงานไฟฟ้า ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์และกระบวนการผลิตไฟฟ้า

2) ดัชนีทางสิ่งแวดล้อมของการผลิตปูนซีเมนต์ ได้แก่ การใช้เชื้อเพลิง ฝุ่นแขวนลอย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

3) การลดขนาดของวัตถุดิบที่ออกจากหม้อบดปฐมภูมิและหม้อบดทุติยภูมิ สามารถช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าลดลง และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยสารมลพิษสู่อากาศลดลงด้วย

4) การลดผลกระทบที่มีต่อปริมาณสารมลพิษที่ปล่อยสู่อากาศสามารถทำได้โดยใช้ Roller Mill แทน Ball Mill หรือ Tube Mill ในการบดวัตถุดิบให้ละเอียด และใช้ Suspension Preheater Kiln และ Kiln with Dry Calcinator แทน Long Dry Kiln ในการเผาปูนเม็ด

5) ในการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยใช้วิธีการประเมินแบบวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เป็นการประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยมีขอบเขตที่กว้าง สามารถนำมาประกอบการพิจารณาเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เพื่อให้การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ควรขยายขอบเขตของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์เป็นแบบ “Cradle-to-Grave” คือจะต้องพิจารณาถึงการผลิตวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่ง การบำรุงรักษา การนำไปใช้ การนำกลับมาใช้ใหม่ และการจัดการของเสีย ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตปูนซีเมนต์

2) ในส่วนของการปรับปรุงกระบวนการผลิต ควรพิจารณาค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับปรุงเพื่อประกอบการพิจารณาศึกษาความเป็นไปได้ของการปรับปรุงในแต่ละครั้ง

3) ควรเพิ่มกรณีศึกษาเพื่อให้ผลจากการคำนวณและการประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมีความแม่นยำมากขึ้น

4) ในการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นควรมีการติดต่อประสานงานกับโรงงานที่ใช้ในการศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลปฐมภูมิที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณและการพิจารณาให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5) Emission Factor ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากสำนักงานป้องกันและรักษาสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (EPA) [42-48] ซึ่งในการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงความผิดพลาดที่อาจเกิดจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมระหว่างประเทศไทยกับประเทศสหรัฐอเมริกา ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรพิจารณากำหนดค่า Emission Factor ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการคำนวณหาสารมลพิษทางอากาศในประเทศไทย

6) งานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาสารมลพิษที่เกิดจากการขนส่งถ่านหินจากเหมืองถ่านหินไปยังโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่ซื้อถ่านหินจากต่างประเทศ

ดังนั้นควรพิจารณาสารมลพิษที่เกิดจากการขนส่งถ่านหินนี้ด้วย เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาลดสารมลพิษที่เกิดจากการทำเหมืองถ่านหิน

7) ขั้นตอนการผสมวัตถุดิบอาจมีผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์โดยรวม และควรนำมาประกอบการพิจารณาในวัฏจักรชีวิตของการผลิตปูนซีเมนต์ แต่เนื่องจากโรงงานตัวอย่างที่ให้ข้อมูลที่จำเป็นต่องานวิจัยนี้ไม่ได้แยกขั้นตอนนี้ออกจากขั้นตอนการขนถ่ายผงวัตถุดิบด้วยลม (pneumatic conveyor) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ได้พิจารณาส่วนนี้อย่างละเอียด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3 โครงการจัดทำดัชนีด้านสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม เสนอต่อกรมควบคุมมลพิษ, กันยายน 2542.
2. บริษัททีมคอนซัลติ้งเอนจิเนียร์จำกัด. รายงานการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อม บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน), เมษายน 2541.
3. บริษัทเอสทีเอส เอนจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์จำกัด. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (รายงานฉบับสมบูรณ์) โครงการปรับปรุงเครื่องจักรและขยายกำลังการผลิตโรงงานปูนซีเมนต์ชะอำ ต.ชะอำ อ.ชะอำ จ.เพชรบุรี ของบริษัทชลประทานซีเมนต์จำกัด (มหาชน), ตุลาคม 2539.
4. เทวินทร์ สิริโชคชัยกุล. ISO 14001 ระบบการจัดการสิ่งแวดล้อม, 2542.
5. SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. A technical framework for life cycle assessment: workshop report (1990): August 18-23.
6. สำนักนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. แผนการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรแร่ จ.สระบุรี.
7. สง่า ตั้งชวาล. การระเบิดหินและผลกระทบ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
8. รายงานสรุปโครงการโรงไฟฟ้าไทยอะคลีลิคไฟเบอร์ ต.ตาลเดี่ยว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี, ธันวาคม 2540.
9. Weidema, P. B., and Wesnaes, S. M. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. Journal of Cleaner Production 4 (1996): 167-174.
10. Andersson, K.; Ohlsson, T.; and Olsson, P. Screening Life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. Journal of Cleaner Production 6 (1998): 277-288.
11. 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. Journal of Cleaner Production 6 (1998): 299-311.

12. Das, A., and Kandpal, T. C., Energy-Environment Implications of Cement Manufacturing in India: a Scenario Analysis. International Journal of Energy Research 21 (1997): 299-308.

13. Sharp, J.H.; Lawrence, C.D.; and Yang, R. Calcium Sulfoaluminate Cements — Low-Energy Cements, Special. Advances in Cement Research 11 (1999): 3-13.

14. Schneider, M., and Kuhlmann, K. Environmental Relevance of the Use of Secondary Constituents in Cement Production. ZKG International 50 (1997): 10-19.

15. Raina, K., and Janakiraman, L.K. Use of mineralizer in black meal process for improved clinkerization and conservation of energy. Cement and Concrete Research 28 (1998): 1093-1099.

16. Kessler, G.r. Cement Kiln Dust (CKD) Methods for Reduction and Control. IEEE Transactions on Industry Applications 31 (1995): 407-412.

17. McQueen, A.T., et al. Cement Kiln NO_x Control. IEEE Transactions on Industry Applications 31 (1995): 36-43.

18. บริษัทเทสโก้จำกัด. รายงานฉบับสมบูรณ์การศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการขอใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานปูนซีเมนต์เขาวง หม้อเผาที่ 2 ต.เขาวง อ.พระพุทธบาท จ.สระบุรี ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทยจำกัด (มหาชน), กันยายน 2539.

19. ผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนซีเมนต์เทา เขาวง 1 โรงงานปูนซีเมนต์ขาว เขาวง (หม้อเผา 1 และ 2), กรกฎาคม — ธันวาคม 2541.

20. บริษัทเอสทีเอส เอนจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์จำกัด. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม (รายงานฉบับสมบูรณ์) โครงการขยายกำลังผลิตโรงงานปูนซีเมนต์ทีพีไอ อ.แก่งคอย และ อ.มวกเหล็ก จ.สระบุรี ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), กุมภาพันธ์ 2539.

21. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนโรงที่ 1 ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), พฤศจิกายน 2540 — มิถุนายน 2541.

22. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนโรงที่ 1 ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), กรกฎาคม — ธันวาคม 2541.

23. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนโรงที่ 2 ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), พฤศจิกายน 2540 — มิถุนายน 2541.

24. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนโรงที่ 2 ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), กรกฎาคม – ธันวาคม 2541.
25. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนโรงที่ 3 ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), พฤศจิกายน 2540 – มิถุนายน 2541.
26. รายงานผลการติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมโรงงานปูนโรงที่ 3 ของบริษัททีพีไอโพลีนจำกัด (มหาชน), กรกฎาคม – ธันวาคม 2541.
27. รายงาน การจัดทำรายงานผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อม บริเวณเหมืองแร่ลิกไนท์ (LP 2) / (BP-1 และ BP-2) อ.สบปราบ จ.ลำปาง ตุลาคม 2541 / อ.ลี้ จ.ลำพูน ตุลาคม 2541.
28. El-Wakil, M.M. Powerplant Technology. New York: McGraw-Hill, 1984.
29. รายงานรายละเอียดความก้าวหน้าของการปฏิบัติตามมาตรการลดผลกระทบและติดตามตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 2 ในระยะดำเนินการปีที่ 4 โครงการเหมืองแร่หินปูน บริษัทปูนซีเมนต์เอเชียจำกัด (มหาชน), มีนาคม 2540.
30. รายงานผลการดำเนินงานตามมาตรการป้องกันแก้ไขและลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการดำเนินโครงการเหมืองแร่ยิปซัม ต.ทุ่งทอง อ.หนองบัว จ.นครสวรรค์, กุมภาพันธ์ 2541.
31. รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการทำเหมืองแร่หินดินดานเพื่ออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์โดยวิธีเหมืองหาบ ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) อ.แม่ทะ จ.ลำปาง พฤศจิกายน, 2541.
32. รายงานฉบับร่างสมบูรณ์การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม โครงการโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ซึ่งเป็นระบบสาธารณูปโภคส่วนหนึ่งของโครงการศูนย์อุตสาหกรรมระยองของบริษัทอุตสาหกรรมปิโตรเคมีคัลไทยจำกัด ต.เชิงเนิน อ.เมือง จ.ระยอง, เมษายน 2536.
33. รศ. วัชรินทร์ วิทยกุล. วัสดุการทาง Highway Materials. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2537.
34. Duda, W. H. Cement Data Book. Berlin: Bauverlag, 1985.
35. Perry, E. K. and Waddell, J. J. The Rotary Cement Kiln. New York: Chemical Publishing, 1972.
36. Introduction to Emission Factors. Available from: http://www.epa.gov/oar/oaqps/efactors.html

37. ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์, พัฒนา มูลพฤกษ์, และ ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ. การป้องกันและควบคุมมลพิษ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.

38. Canadian Standard Association. Z760-94 Life Cycle Assessment Environmental Technology, Canada, 1994.

39. Labahn, O. Cement Engineers' Handbook. Wieshaden: Bauverlag, 1971.

40. CEMBUREAU. Best Available Techniques for the Cement Industry. The European Cement Association,1999.

41. Hartman, L. H. SME Mining Engineering Handbook. Volume 1. 2nd ed. Colorado: Inc. Littleton, 1992.

42. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 11.6, Portland Cement Manufacturing. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

43. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 11.9, Western Surface Coal Mining. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

44. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 13.2.1, Paved Roads. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

45. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 13.2.2, Unpaved Roads. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

46. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 1.1, Bituminous and Subbituminous Coal Combustion. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

47. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 1.2, Anthracite Coal Combustion. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

48. US.EPA. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Section 1.7, Lignite Combustion. Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.

49. World Bank Group. Pollution Prevention Abatement Handbook. July, 1998.

50. CEMBUREAU. Alternative Fuel in Cement Manufacture: Technical and Environmental Review. April, 1997.

51. มูลนิธิโลกสีเขียว ในพระบรมราชูปถัมภ์ของสมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอ เจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราช. การวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บริษัทมายด์พับลิชชิ่ง จำกัด, 2538.

52. Uchikawa, H. Cement Industry as Environmentally Compatible and Waste Recyclling System. รายงานการประชุมทางวิชาการประจำปี 2539 สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2539.

53. Perry, K. E. Cement Manufacturer's Handbook. New York: Chemical Publishing, 1979.

54. HCB "Holderbank" Cement and Concrete. Environmental Protection in Construction Materials Production: objectives, measures, achievements. Environmental Report. Switzerland, 1998.

55. Environmental Report. Available from: http://cement.bluecircle.co.uk

56. Hosokawa Micron Corporation, Thailand Representative Office. Innovation for Powder Processing Technology. Thailand, 1998.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

ก.1 หม้อบดวัตถุดิบ

ก.1.1 ประเภทของหม้อบด

วัตถุดิบขนาดใหญ่จะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงตามความต้องการโดยใช้หม้อบดที่เหมาะสมดังนี้ [34]

1. หม้อบดที่ลดขนาดวัตถุดิบให้มีช่วงขนาดหยาบหรือหม้อบดหยาบปฐมภูมิ (Primary Crusher) เป็นหม้อบดที่สามารถลดขนาดวัตถุดิบให้เล็กลงจนมีขนาดประมาณ 7.5 – 30 เซนติเมตร โดยมีลักษณะการทำงานแบบอัด (compressive) หม้อบดชนิดนี้ ได้แก่

- Jaw Crushers
- Gyratory Crushers

2. หม้อบดหยาบทุติยภูมิ (Secondary Crusher) เป็นหม้อบดที่มีลักษณะการทำงานแบบอัดและแบบกระแทก (impact) ซึ่งสามารถลดขนาดวัตถุดิบให้เล็กลงจนกระทั่งมีขนาดประมาณ 2.5 – 10 เซนติเมตร ได้แก่

- Hammer Crushers
- Cone Crushers
- Impact Crushers

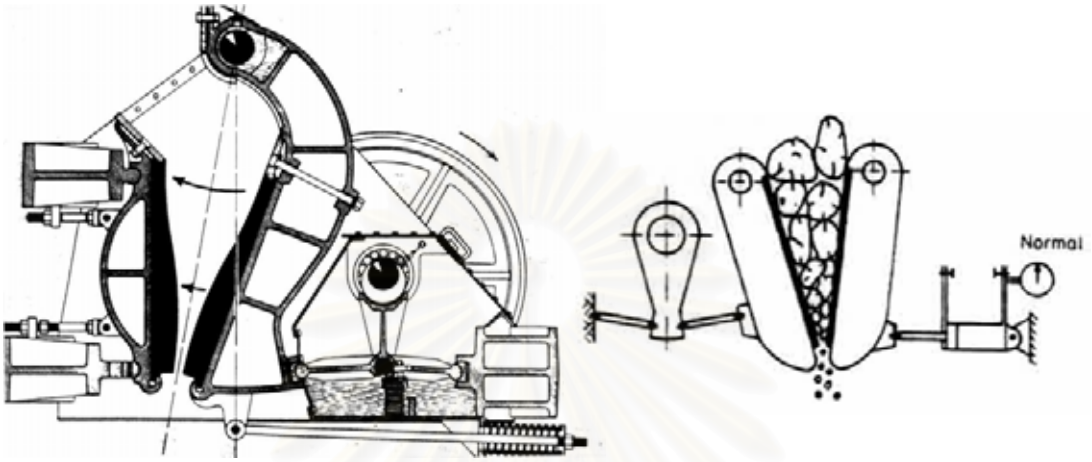
3. หม้อบดที่ลดขนาดวัตถุดิบให้มีช่วงขนาดละเอียด เป็นหม้อบดที่มีลักษณะการทำงานแบบกระแทก วัตถุดิบที่ผ่านหม้อบดชนิดนี้จะถูกบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.5 เซนติเมตร หม้อบดชนิดนี้ ได้แก่

- Ball Mills หรือ Pebble Mills
- Roller Mills
- Tube Mills

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1.2 ลักษณะทั่วไปและสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกำลังไฟฟ้าจำเพาะของหม้อบดชนิดต่าง ๆ

1) Jaw Crusher



รูปที่ ก.1 Jaw Crusher [34]

Jaw Crusher (รูปที่ ก.1) เป็นหม้อบดที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีความแข็งตั้งแต่น้อยจนถึงมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะฟันของหม้อบด โดยมีขีดความสามารถ (capacity) มากถึง 500 ตัน/ชั่วโมง และอัตราส่วนการลดขนาด (reduction ratio) ประมาณ 4:1 ถึง 6:1 ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Power Requirement) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Lewenson (สมการที่ ก.1) [34]

สมการของ *Lewenson*

$$W = \frac{(d_1^{\,2} - d_2^{\,2})}{51 \cdot s \cdot d_2 \cdot \mu \cdot \gamma} \cdot 0.746 \qquad \text{(ก.1)}$$

โดย W = กำลังไฟฟ้าจำเพาะ, กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตัน

d_1 = ขนาดเฉลี่ยของวัตถุดิบที่ป้อน, เมตร

d_2 = ขนาดเฉลี่ยของวัตถุดิบที่ผ่านการบดแล้ว, เมตร

s = ช่วงการเหวี่ยงของ jaw (amplitude of the swing jaw), เมตร

μ = แฟกเตอร์ของแรงกระทำของวัตถุดิบที่ถูกบด (loading factor) โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.25 - 0.50 ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ

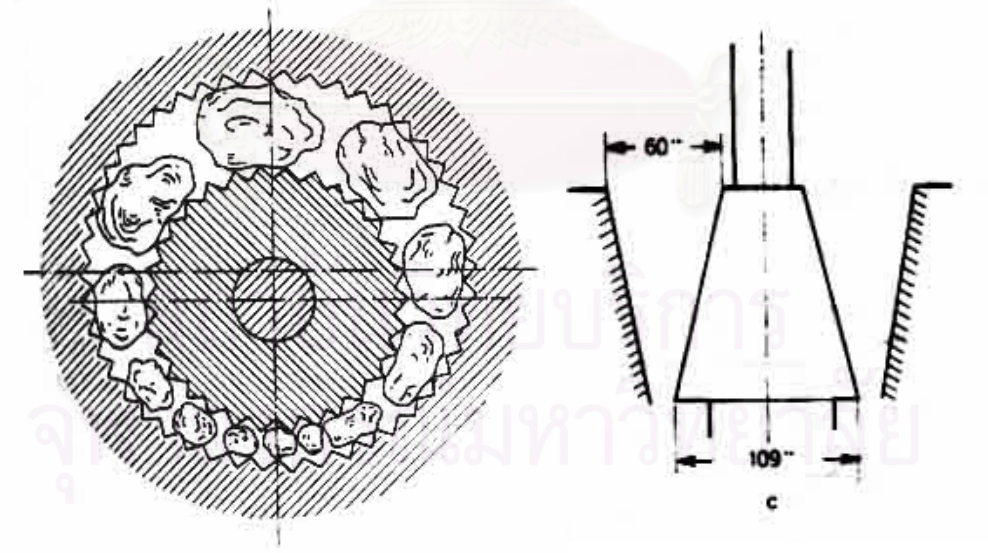
γ = ความถ่วงจำเพาะของวัตถุดิบที่ป้อน, ตัน/ลบ.ม.

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ช่วงการเหวี่ยงของ jaw มีค่าเท่ากับ 0.045 เมตร และแฟกเตอร์ของแรงที่กระทำมีความสัมพันธ์กับดัชนีงานเป็นแบบเส้นตรง ดังตารางที่ ก.1 [34]

ตารางที่ ก.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ แฟกเตอร์ของแรงกระทำ และดัชนีงานของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ [34]

วัตถุดิบ	ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	แฟกเตอร์ของแรงกระทำ	ดัชนีงาน
ดินเหนียว, หินดินดาน	2.23	0.24	7.10
ยิปซัม	2.69	0.27	8.16
หินปูน	2.68	0.34	10.18
ถ่านหิน	1.63	0.38	11.37
ทราย	2.68	0.38	11.53
ศิลาแลง, แร่เหล็ก	2.39	0.40	12.16
ปูนเม็ด	3.09	0.45	13.49
ดินผง	2.67	0.35	10.57

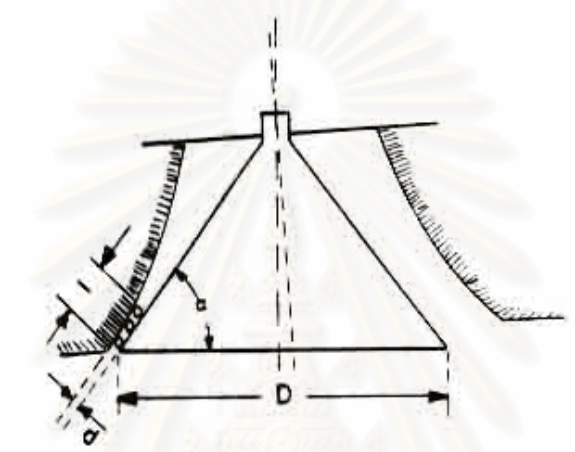
2) Gyratory Crusher **หรือ** Gates-Crusher



รูปที่ ก.2 Gyratory Crusher [34]

Gyratory Crusher (รูปที่ ก.2) นิยมใช้กับวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่และต้องการขีดความสามารถสูง ซึ่งถ้าเปรียบเทียบโดยให้วัตถุดิบที่เข้าหม้อบดกับผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีขนาดเท่ากัน Gyratory Crusher จะให้ขีดความสามารถมากกว่า Jaw Crusher ประมาณ 2-3 เท่า โดยมีขีดความสามารถสูงสุดมากถึง 5000 ตัน/ชั่วโมง และมีอัตราส่วนการลดขนาดประมาณ 7:1 – 15:1

3) Cone Crusher หรือ Symons-Crusher



รูปที่ ก.3 Cone Crusher [34]

Cone Crusher (รูปที่ ก.3) มีลักษณะคล้ายกับ Gyratory Crusher แต่ขนาดของโคนเล็กกว่า และมีขีดความสามารถบดวัตถุดิบได้ประมาณ 375 - 790 ตัน/ชั่วโมง ขนาดของวัตถุดิบที่นำมาบดมีขนาดมากที่สุด 300 มิลลิเมตร สำหรับสมการการคำนวณกำลังไฟฟ้าจำเพาะของ Gyratory Crusher และ Cone Crusher เป็นสมการเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันที่ขนาดของโคน ดังสมการที่ ก.2 [34]

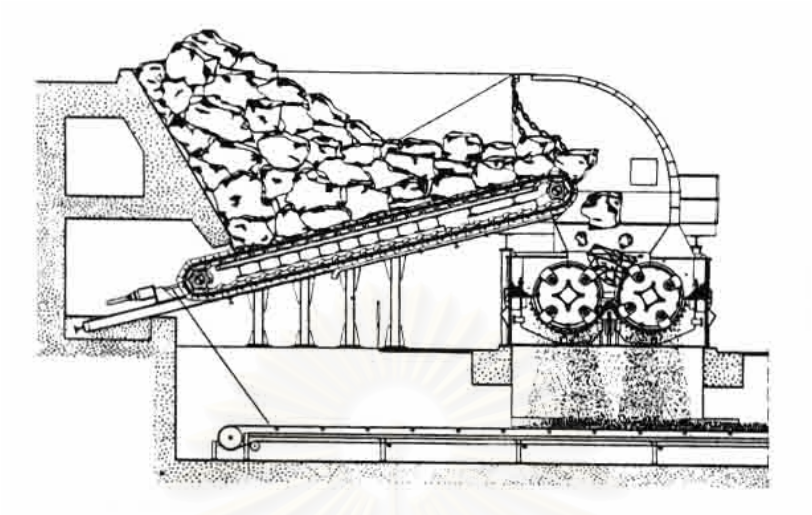
$$W = \frac{(d_1^{\,2} - d_2^{\,2})}{1.36 \cdot D \cdot d_2 \cdot \eta \cdot \gamma} \cdot 0.746 \qquad \text{(ก.2)}$$

โดย D = ขนาดของโคน, เมตร

η = ประสิทธิภาพการขับเคลื่อนของมอเตอร์

งานวิจัยนี้กำหนดให้ประสิทธิภาพการขับเคลื่อนของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 85 % โคนของ Gyratory Crusher มีขนาดเท่ากับ 2.77 เมตร และโคนของ Cone Crusher มีขนาดเท่ากับ 1.65 เมตร

4) Hammer Crusher

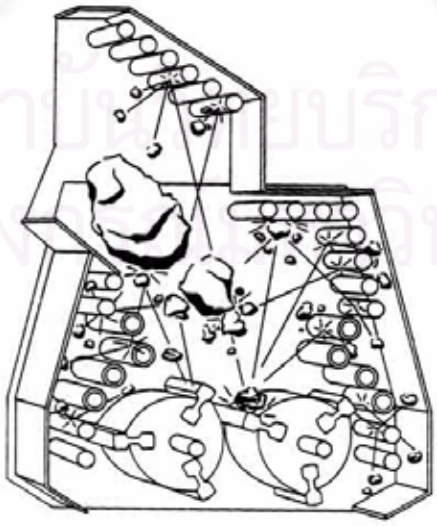


รูปที่ ก.4 Hammer Crusher [34]

Hammer Crusher (รูปที่ ก.4) เป็นหม้อบดที่นิยมใช้กับหินปูนที่แข็งถึงแข็งปานกลาง และบางครั้งนิยมใช้กับการบดดินมาร์ล โดยมีอัตราส่วนการลดขนาด น้อยกว่า 80:1 สำหรับกำลังไฟฟ้าจำเพาะคำนวณได้จากสมการที่ ก.3 [34]

$$W = \frac{2\,d_1}{3\,d_2} \qquad \text{(ก.3)}$$

5) Impact Crusher



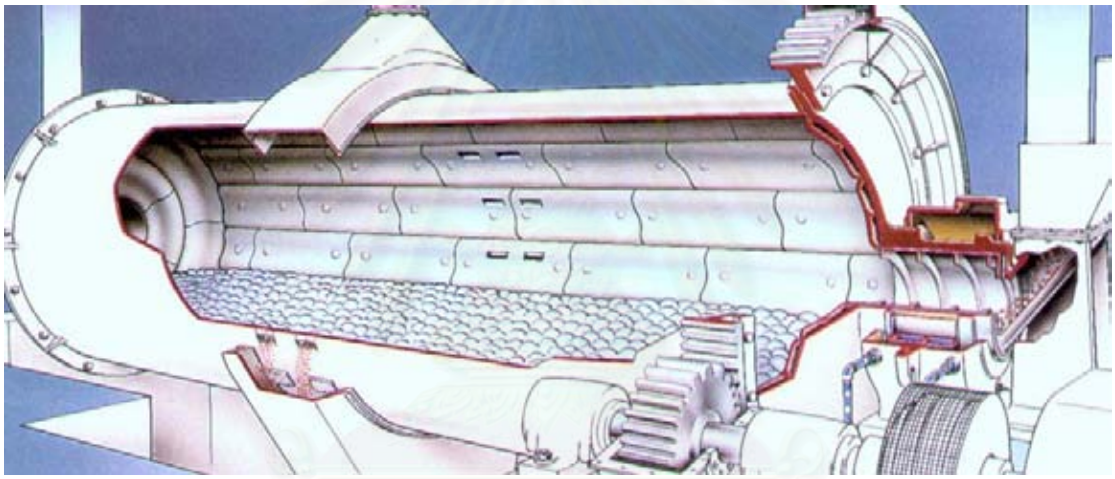
รูปท ก.5 Impact Crusher [34]

Impact Crusher (รูปที่ ก.5) เป็นหม้อบดที่มีลักษณะการทำงานแบบกระแทก โดยขนาดของวัตถุดิบที่ผ่านการบดแล้ว จะมีขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่ขึ้นอยู่กับความเร็วเส้นรอบวงของโรเตอร์ ถ้าต้องการให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลงโรเตอร์จะต้องมีความเร็วเพิ่มขึ้น การคำนวณกำลังไฟฟ้าจำเพาะคำนวณจากสมการของ KHD Humboldt Wedag AG [34] (สมการที่ ก.4)

สมการของ *KHD Humboldt Wedag AG*

$$W = \frac{0.0102}{9.81}\left[24 - \frac{21(d_2 - 60)}{55}\right] \qquad (ก.4)$$

6) Ball Mill และ Tube Mill



รูปที่ ก.6 Ball Mill [56]

ลักษณะการทำงานของ Ball Mill และ Tube Mill จะคล้ายกัน แต่ Ball Mill เป็นหม้อบดที่ใช้ลูกบอลเป็นตัวบดวัตถุดิบดังรูปที่ ก.6 สำหรับ Tube Mill จะมีตัวบดที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังนั้นสมการการคำนวณกำลังไฟฟ้าของ Ball Mill และ Tube Mill จึงเป็นสมการเดียวกัน ซึ่งสมการนี้ได้จากทฤษฎีข้อที่สามของ Bond ดังสมการที่ ก.5 [34]

$$W = \frac{w_i}{0.0907}\left[\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}}\right] \qquad (ก.5)$$

โดย w_i = ดัชนีงาน (work index) ที่สอดคล้องกับทฤษฎีของ Bond ดัชนีงานของวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ดูได้จากตารางที่ ก.1

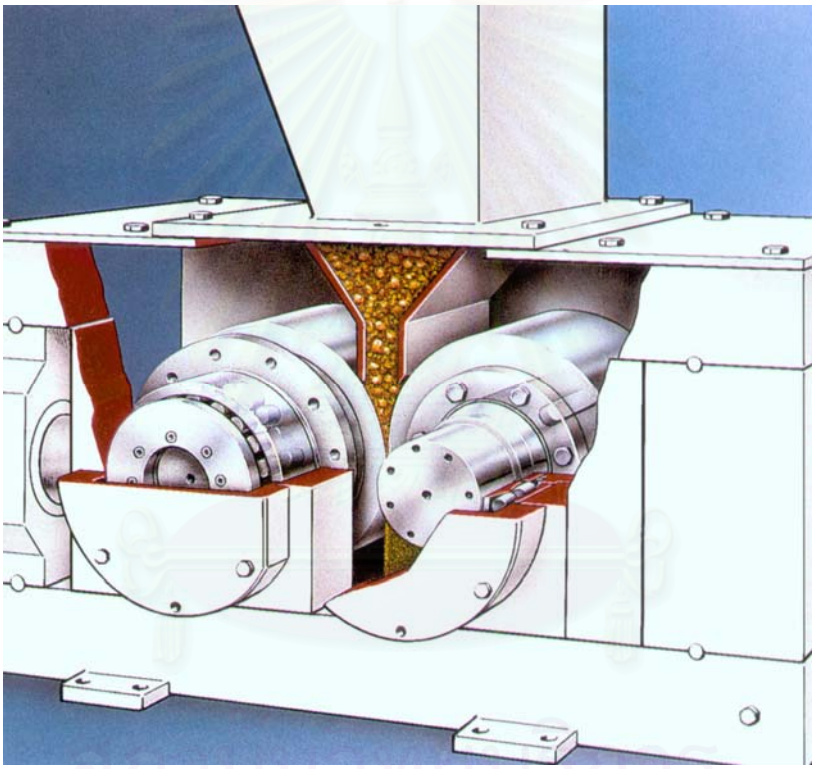
<u>หมายเหตุ</u> :

1. ถ้าเป็นการบดที่ใช้ความร้อนอบแบบปิด (closed circuit) ต้องคูณดัชนีงานด้วย 1.30

2. ถ้าขนาดผลิตภัณฑ์ (d_2) เล็กกว่า 70 ไมครอน กำลังไฟฟ้าจำเพาะที่คำนวณได้ ต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ A ซึ่งหาได้จากสมการที่ ก.6 [34]

$$A = \frac{d_2 + 10.3}{1.145 d_2} \qquad \text{(ก.6)}$$

7) Roller Mill



รูปที่ ก.7 Roller Mill [56]

Roller Mill (รูปที่ ก.7) เป็นหม้อบดที่ใช้ลูกกลิ้งอย่างน้อย 2 ลูก บีบอัดวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลง Roller Mill ที่นิยมใช้มี 2 ชนิด คือ

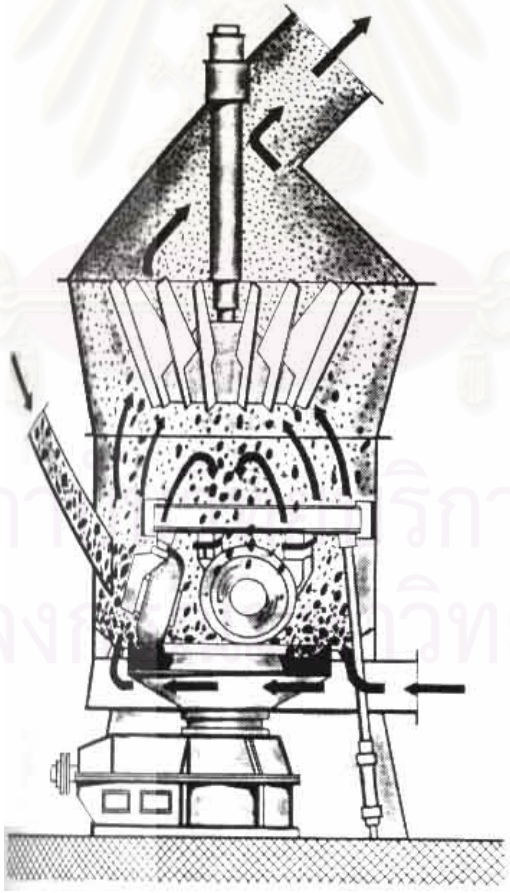
- **MPS Roller Bowl Mill**

MPS Roller Bowl Mill (รูปที่ ก.8) เป็นหม้อบดที่มีขีดความสามารถมากถึง 500 ตัน/ชั่วโมง สามารถบดวัตถุดิบที่มีขนาด 140 – 250 มิลลิเมตร ให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 170 mesh (4-40 % residue on 170 mesh) กำลังไฟฟ้าจำเพาะของหม้อบดชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัตถุดิบโดยถ้า

1) วัตถุดิบที่มีความแข็งน้อย เช่น หินดินดาน ดินเหนียว ยิปซัม เป็นต้น กำลังไฟฟ้าจำเพาะคำนวณได้จากสมการที่ ก.7

$$W = -0.8207 \ln x + 6.0784 \qquad (ก.7)$$

โดย x = ร้อยละของวัตถุดิบที่ยังคงค้างอยู่บนตะแกรง 170 เมส (% residue on 170 mesh)



รูปที่ ก.8 MPS Roller Bowl Mill [34]

2) วัตถุดิบที่มีความแข็งปานกลาง เช่น หินปูน ทราย ดินผง ถ่านหิน เป็นต้น ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะคำนวณได้จากสมการที่ ก.8

$$W = -0.8862 \ln x + 8.4731 \quad \text{(ก.8)}$$

3) วัตถุดิบที่มีความแข็งมาก เช่น ปูนเม็ด ศิลาแลง แร่เหล็ก เป็นต้น กำลังไฟฟ้าจำเพาะคำนวณได้จากสมการที่ ก.9

$$W = -1.1048 \ln x + 12.29 \quad \text{(ก.9)}$$

- **Loesche Roller Mill**

Loesche Roller Mill สามารถบดวัตถุดิบที่มีความชื้นมากสุด 20% มีขีดความสามารถมากกว่า 500 ตัน/ชั่วโมง และสามารถบดวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กประมาณ 170 mesh (6-20 % residue on 170 mesh) ค่ากำลังไฟฟ้าจำเพาะคำนวณได้จากสมการที่ ก.10

$$W = -4.1326 \ln x + 17.397 \quad \text{(ก.10)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

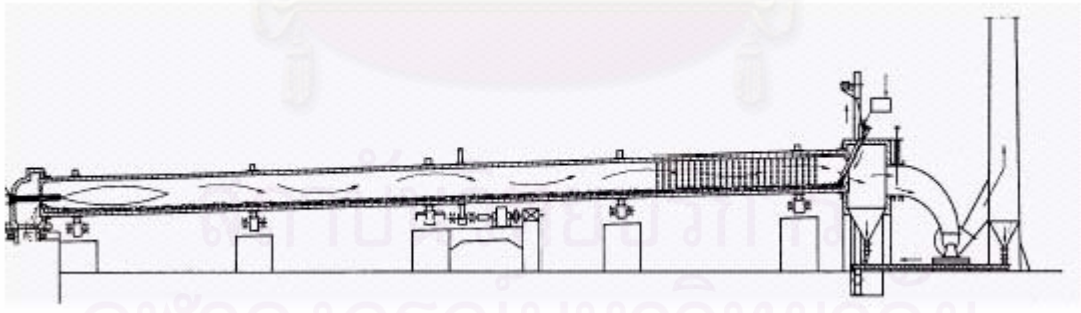
ก.2 หม้อเผา (Kiln)

ก.2.1 ประเภทของของหม้อเผา

ชนิดของหม้อเผาที่ใช้สำหรับการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process) [39] มีดังนี้

1) Long Dry Kiln

หม้อเผาชนิดนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ก.9 วัตถุดิบที่ป้อนเข้าหม้อเผาในกระบวนการผลิตแบบแห้งจะอยู่ในรูปของผงแห้งโดยจะไหลสวนทางกับลมร้อนที่ออกมาจากหม้อเผา ขนาดของหม้อเผาชนิดนี้จะมีอัตราส่วนของความยาวของหม้อเผาต่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 : 1 ถึง 50 : 1 โดยในช่วงแรกหม้อเผาชนิดนี้จะมีความยาวมาก ต่อมามีการพัฒนาให้หม้อเผาชนิดนี้สูญเสียความร้อนน้อยลง โดยติดตั้งม่านโซ่ที่ทางเข้าของวัตถุดิบเพื่อถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่วัตถุดิบก่อนที่จะปล่อยลมร้อนออกจากหม้อเผา ลมร้อนที่ผ่านม่านโซ่จะมีอุณหภูมิประมาณ 800 °C และออกจากหม้อเผาที่อุณหภูมิ 450 °C วัตถุดิบจะเคลื่อนที่สวนกับทิศทางของลมร้อน โดยมีอุณหภูมิก่อนเข้าม่านโซ่ 50 °C หลังจากผ่านม่านโซ่แล้ว จะมีอุณหภูมิประมาณ 730 °C หม้อเผาชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะม่านโซมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูงและยากต่อการซ่อมแซม แต่ข้อได้เปรียบของหม้อเผาชนิดนี้คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจากหม้อเผามีอุณหภูมิสูงมาก สามารถนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าได้



รูปที่ ก.9 Long Dry Kiln [55]

2) Suspension Preheater Kiln

หม้อเผาชนิดนี้จะมีไซโคลนต่ออยู่ดานหน้าดังแสดงในรูปที่ ก.10 เพื่ออุ่นวัตถุดิบให้มีอุณหภูมิประมาณ 810-830 °C และทำให้วัตถุดิบบางส่วนเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นแคลเซียมออกไซด์ (calcine) ประมาณร้อยละ 30 โดยการถ่ายเทความ

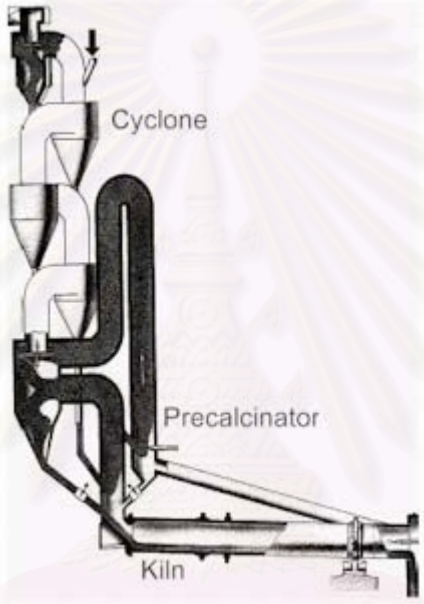
ร้อนระหว่างลมร้อนและวัตถุดิบจะเกิดขึ้นขณะที่วัตถุดิบลอยตัวอยู่ในลมร้อนภายในไซโคลน ซึ่งไซโคลนที่ใช้จะถูกออกแบบให้ต่อขนานกันประมาณ 4-5 ตัว ถ้าใช้ระบบไซโคลน 4 ตัว อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจากไซโคลนตัวบนสุดจะมีอุณหภูมิประมาณ 340 °C ถ้าใช้ระบบไซโคลน 5 ตัว อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจากไซโคลนตัวบนสุดจะมีอุณหภูมิประมาณ 200 °C หม้อเผาชนิดนี้นิยมนำมาใช้ในการเผาปูนเม็ดเนื่องจากสามารถนำความร้อนสูญเสียกลับมาใช้ในการให้ความร้อนกับวัตถุดิบได้มาก แต่หม้อเผาชนิดนี้ก็มีข้อเสียคือถ้าภายในหม้อเผามีความเข้มข้นของอัลคาไล ซัลเฟอร์ และคลอไรด์สูง จะทำให้เกิดการอุดตันของไซโคลนตัวล่างสุดและบริเวณก่อนเข้าหม้อเผา ด้วยเหตุผลนี้จึงมักติดตั้งระบบ bypass เพื่อดักเอาสารดังกล่าวออกมาบางส่วน ซึ่งนอกจากจะสามารถป้องกันการอุดตันได้แล้ว ยังเป็นการควบคุมไม่ให้อัลคาไลมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดด้วย

ระบบ bypass มีการปล่อยก๊าซประมาณร้อยละ 5-15 [40] ออกจากท่อที่อยู่ระหว่างหม้อเผากับ preheater โดยก๊าซที่ปล่อยออกมาจะมีฝุ่นออกมาด้วย และเมื่อถูกทำให้เย็นลงด้วยอากาศสารประกอบที่ระเหยง่ายเหล่านั้นจะควบแน่นปนออกมากับฝุ่นแล้วถูกดักไว้ด้วย dust filter

รูปที่ ก.10 Suspension Preheater Kiln [55]

3) Kiln with Dry Calcinator

หม้อเผาชนิดนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ก.11 โดยมีลักษณะคล้ายกับหม้อเผาแบบ Suspension Preheater Kiln แต่จะแบ่งความร้อนที่ให้กับหัวเผา (burner) ประมาณ 60–65% ไปให้ความร้อนกับดินผงเพื่อทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตแตกตัวกลายเป็นแคลเซียมออกไซด์ประมาณ 90-95% ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่หม้อเผา โดยลมที่ผ่านเข้ามาในระบบ Precalciner สำหรับหม้อเผาชนิดนี้จะมาจาก 2 แหล่ง คือ ลมที่มาจากหม้อเผา (kiln exit gas) และลมที่มาจากแหล่งอื่น (tertiary air) เช่น จากหม้อเย็น เป็นต้น



รูปที่ ก.11 Kiln with Dry Calcinator [55]

ก.2.2 การคำนวณปริมาณเชื้อเพลิง

1) การคำนวณค่าความร้อนของถ่านหิน (Heating Value)

องค์ประกอบของถ่านหินส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ น้ำ และขี้เถ้า โดยค่าความร้อนของถ่านหินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.11 [39]

$$Hu = 8100 \cdot C + 29000\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500 \cdot S - 600 \cdot W \qquad (ก.11)$$

โดย Hu = ค่าความร้อนของถ่านหิน, กิโลแคลอรี/กิโลกรัมของถ่านหิน

C = คาร์บอน, ร้อยละ

H = ไฮโดรเจน, ร้อยละ

O = ออกซิเจน, ร้อยละ

S = ซัลเฟอร์, ร้อยละ

W = น้ำ, ร้อยละ

<u>กำหนดให้</u>

ดินผง 1 กิโลกรัม ประกอบด้วยน้ำ	X	กิโลกรัม
ดินผง 1 กิโลกรัม ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต	Y	กิโลกรัม
ปูนเม็ด 1 กิโลกรัม ต้องการดินผง	Z	กิโลกรัม

สำหรับ X, Z และ Y คำนวณจากสมการที่ ก.12 สมการที่ ก.13 และสมการที่ ก.14 ตามลำดับ

$$X = \frac{\text{เปอร์เซนต์ความชื้นในดินผง (\%water content)}}{100 - \text{เปอร์เซนต์ความชื้นในดินผง}} \qquad \text{(ก.12)}$$

$$Z = \frac{\text{น้ำหนักดินผง(ตัน)}}{\text{น้ำหนักปูนเม็ด(ตัน)}} \qquad \text{(ก.13)}$$

$$Y = \frac{1}{0.37}\left(0.93 - \frac{1}{Z}\right) \qquad \text{(ก.14)}$$

2) การคำนวณปริมาณความร้อนทั้งหมดในการผลิตปูนเม็ด [39]

- ความร้อนที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ด (Heat for Formimg Clinker)

437 กิโลแคลอรี/น้ำหนักปูนเม็ด (กิโลกรัม)

- ความร้อนที่สูญเสียไปกับคาร์บอนไดออกไซด์จากดินผง คำนวณได้จากสมการที่ ก.15

$$0.44 \cdot Y \cdot Z \cdot [0.19 + 0.00011 \cdot (t_g - t_a)] \cdot (t_g - t_a) \qquad \text{(ก.15)}$$

- ความร้อนที่สูญเสียจากปูนเม็ด (Clinker Waste Heat) คำนวณจากสมการที่ ก.16

$$1 \cdot [0.181 + 0.000071 \cdot (t_{cl} - t_a)] \cdot (t_{cl} - t_a) \qquad \text{(ก.16)}$$

- ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (Evaporation) คำนวณจากสมการที่ ก.17

$$636 \cdot X \cdot Z \qquad \text{(ก.17)}$$

- ความร้อนที่สูญเสียไปกับไอน้ำ (Superheating of Water Vapor) คำนวณจากสมการที่ ก.18

$$X \cdot Z \cdot [0.42 + 0.000185 \cdot (t_g - 100)] \cdot (t_g - 100) \qquad \text{(ก.18)}$$

- ความร้อนที่สูญเสียไปกับการแผ่รังสี (Radiation Losses)

275 กิโลแคลอรี/น้ำหนักปูนเม็ด (กิโลกรัม)

- ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซ (Heat Lost in Combustion Gases) คำนวณจากสมการที่ ก.19

$$2.25 \cdot [0.23 + 0.00005 \cdot (t_g - t_a)] \cdot (t_g - t_a) \qquad \text{(ก.19)}$$

โดย t_g = อุณหภูมิของก๊าซที่ออกจากหม้อเผา, องศาเซลเซียส

t_a = อุณหภูมิของอากาศ (อุณหภูมิห้อง), องศาเซลเซียส

t_{cl} = อุณหภูมิของปูนเม็ด, องศาเซลเซียส

ดังนั้นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ด (T) จึงได้จากการนำปริมาณความร้อนทั้งหมดมารวมกัน โดยมีหน่วยเป็น กิโลแคลอรี/น้ำหนักปูนเม็ด (กิโลกรัม)

2) การคำนวณปริมาณถ่านหิน

อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินต่อน้ำหนักปูนเม็ดคำนวณได้จากสมการที่ ก.20 [39]

$$K = \frac{T}{Hu} \qquad \text{(ก.20)}$$

โดย K = อัตราส่วนของน้ำหนักถ่านหินต่อน้ำหนักปูนเม็ด

T = ผลรวมของปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ด, กิโลแคลอรี/น้ำหนักปูนเม็ด (กิโลกรัม)

ดังนั้นปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดคำนวณได้จากสมการที่ ก.21 [39]

$$N = K \cdot Q_{cl} \quad \text{(ก.21)}$$

โดย N = น้ำหนักของถ่านหิน, ตัน

Q_{cl} = น้ำหนักของปูนเม็ด, ตัน

ก.2.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าจำเพาะ

1) ความเร็วแก๊สที่ออกจากเตาเผา (v_g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.22 หรือสมการที่ ก.23 ขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อเผาดังนี้

- Long Dry Kiln คำนวณค่าความเร็วแก๊สได้จากสมการที่ ก.22 [39]

$$v_g = 0.001Q + 3.3 \quad \text{(ก.22)}$$

- Kiln with Dry Calcinator หรือ Suspension Preheater Kiln คำนวณหาความเร็วแก๊สได้จากสมการที่ ก.23 [39]

$$v_g = 0.001Q + 2.7 \quad \text{(ก.23)}$$

โดย v_g = ความเร็วแก๊สที่ออกจากเตาเผา, เมตร/วินาที

Q = กำลังการผลิตปูนเม็ด, ตัน/วัน

2) การคำนวณ Thermal Loading (s)

- Long Dry Kiln คำนวณ Thermal Loading ได้จากสมการที่ ก.24 [39]

$$s = 1887.76Q + 1724490 \quad \text{(ก.24)}$$

- Kiln with Dry Calcinator หรือ Suspension Preheater Kiln คำนวณ Thermal Loading ได้จากสมการที่ ก.25 [39]

$$s = 1887.76Q + 1880102 \quad \text{(ก.25)}$$

โดย s = Thermal Loading, กิโลแคลอรี/ตร.ม.-ชั่วโมง

3) ค่า Specific Output (I_s) ของหม้อเผาแต่ละชนิดแสดงอยู่ในตารางที่ ก.2 [39]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ค่า Specific Output (I_s) ของหม้อเผาแต่ละชนิด [39]

Dry Process Kilns	I_s (t/d-m^3)
Long Dry Kiln	1.6
Kiln with Dry Calcinator	2.1
Suspension Preheater Kiln	1.9

4) การคำนวณปริมาตรของหม้อเผา (J) คำนวณจากสมการที่ ก.26 [39]

$$J = \frac{Q}{I_s} \qquad \text{(ก.26)}$$

โดย J = ปริมาตรของหม้อเผา, ลบ.ม.

5) การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของหม้อเผา (F)

- การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของหม้อเผาที่พิจารณาจากความเร็วแก๊สที่ออกจากหม้อเผา คำนวณได้จากสมการที่ ก.27 [39]

$$F_g = \frac{4000 \cdot Q \cdot (t + 273)}{23{,}587{,}200 \cdot V_g} \qquad \text{(ก.27)}$$

- การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของหม้อเผาที่พิจารณาจาก Thermal Loading คำนวณได้จากสมการที่ ก.28 [39]

$$F_w = \frac{1{,}000 \cdot Q \cdot T}{24 \cdot S} \qquad \text{(ก.28)}$$

การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของหม้อเผาคำนวณได้จากสมการที่ ก.29 [39]

$$F = \frac{F_g + F_w}{2} \qquad \text{(ก.29)}$$

โดย F = พื้นที่หน้าตัดของเตาเผา, ตร.ม.

6) การคำนวณความยาวของหม้อเผา (L) คำนวณได้จากสมการที่ ก.30 [39]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$L = \frac{J}{F} \quad \text{(ก.30)}$$

โดย L = ความยาวของหม้อเผา, เมตร

7) การคำนวณเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหม้อเผา (D) คำนวณได้จากสมการที่ ก.33 [39]

$$d_g = \sqrt{\frac{4 \cdot F_g}{\pi}} \quad \text{(ก.31)}$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4 \cdot F_w}{\pi}} \quad \text{(ก.32)}$$

$$D = \frac{d_g + d_w}{2} + 2R \quad \text{(ก.33)}$$

โดย D = เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของเตาเผา , เมตร

R = ความหนาของหม้อเผา, เมตร

8) การคำนวณแฟกเตอร์ของพลังงานที่ต้องการ (K_d) คำนวณได้จากสมการที่ ก.34 [39]

$$K_d = 4 \times 10^{-8} (D \cdot L)^2 - 0.0003(D \cdot L) + 0.359 \quad \text{(ก.34)}$$

โดย K_d = แฟกเตอร์ของพลังงานที่ต้องการ

9) การคำนวณกำลังไฟฟ้าจำเพาะ (W) คำนวณได้จากสมการที่ ก.35 [39]

$$W = \frac{24 \cdot 0.736 \cdot D \cdot L \cdot K_d}{Q} \quad \text{(ก.35)}$$

โดย W = กำลังไฟฟ้าจำเพาะ, กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน

ก.3 การคำนวณไฟฟ้าที่ใช้ในการทำเหมือง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทำเหมืองหินและเหมืองถ่านหินใช้ไฟฟ้าดังสมการที่ ก.36 และสมการที่ ก.37 ดังนี้ [41]

$$W_s = 2.5 \cdot Q_s \qquad \text{(ก.36)}$$

$$W_c = 2.6 \cdot Q_c \qquad \text{(ก.37)}$$

โดย W_s = กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำเหมืองหิน, กิโลวัตต์
Q_s = ปริมาณหิน, ตัน
W_c = กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำเหมืองถ่านหิน, กิโลวัตต์
Q_c = ปริมาณถ่านหิน, ตัน

ก.4 การคำนวณปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า

กำหนดให้ ในการผลิตไฟฟ้าแต่ละครั้งต้องใช้ไฟฟ้าในการผลิตประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ ของไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งหมด ดังนั้นถ้าต้องการผลิตไฟฟ้า W เมกกะวัตต์ จะต้องผลิตไฟฟ้าทั้งหมดดังสมการที่ ก.38

$$W_A = \frac{W}{1-0.08} \qquad \text{(ก.38)}$$

โดย W_A = กำลังไฟฟ้าทั้งหมด, เมกกะวัตต์

และไอน้ำที่ต้องใช้ในการผลิตไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ ก.39

$$m = W_A \cdot 115 \qquad \text{(ก.39)}$$

โดย m = น้ำหนักของไอน้ำ, ตัน

สำหรับความร้อนที่ให้กับหม้อต้ม คำนวณจากสมการที่ ก.40

$$H = \frac{m \cdot (h_i - h_o) \cdot 252}{0.453593} \qquad \text{(ก.40)}$$

โดย H = ความร้อนที่ให้กับหม้อต้ม, กิโลแคลอรี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

h_i = เอนทาลปีของน้ำก่อนเข้าหม้อต้ม, Btu/lb

h_o = เอนทาลปีของน้ำที่ออกจากหม้อต้ม, Btu/lb

ดังนั้นปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าคำนวณได้จากสมการที่ ก.41

$$N = \frac{H}{Hu \cdot 1{,}000} \qquad \text{(ก.41)}$$

โดย N = ปริมาณถ่านหิน, ตัน

ก.5 การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดจากขั้นตอนการผลิต

ก.5.1 การผลิตปูนซีเมนต์

สมการการคำนวณความเข้มข้นฝุ่นและก๊าซที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ ได้มาจาก Emission Factor ของ USEPA [42] โดยแบ่งตามชนิดของอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ ก.3 ถึงตารางที่ ก.4 ดังนี้

ตารางที่ ก.3 Emission Factor ของฝุ่นแขวนลอยที่ปล่อยสู่บรรยากาศที่เกิดจากการบดและการทำปูนเม็ดให้เย็นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์*

กระบวนการ	PM**
Raw Mill Feed Belt with Fabric Filter	0.0016
Finishing Grinding Mill Air Separator with Fabric Filter	0.014
Primary Limestone Crushing with Fabric Filter	0.00050
Secondary Limestone Screening and Crushing with Fabric Filter	0.00016
Clinker Cooler with Fabric Filter	0.068

* มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตันวัตถุดิบ

** PM = Particulate Matter

ตารางที่ ก.4 Emission Factor ของสารมลพิษที่ปล่อยสู่บรรยากาศ
ที่เกิดจากการเผาวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์*

กระบวนการ	PM	SO_2	NO_X	CO	CO_2
Dry Process Kiln with Fabric Filter	0.10	4.9	3.0	0.11	900
Preheater Kiln	130	0.27	2.4	0.49	900
Preheater/precalcinator Process Kiln	0.10	0.54	2.1	1.8	900

* ค่า Emission Factor ของสารมลพิษนี้ไม่ผ่านระบบบำบัด มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตันปูนเม็ด

ก.5.2 การทำเหมือง

ฝุ่นที่เกิดจากการทำเหมืองส่วนใหญ่เกิดจากการระเบิดและการขนส่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงคำนวณฝุ่นเฉพาะการระเบิดและการขนส่งที่ได้สมการคำนวณจาก Emission Factor ดังนี้

1) การคำนวณฝุ่นที่เกิดจากการระเบิด

ฝุ่นที่เกิดจากการระเบิดในแต่ละครั้งคำนวณได้จากสมการที่ ก.42 [43]

$$TSP_{b1} = 0.00022(A)^{1.5} \qquad (ก.42)$$

ในการระเบิด 1 ครั้งจะได้วัตถุดิบหนัก $\rho \cdot (a \cdot b \cdot h)$ กิโลกรัม ดังนั้นฝุ่นที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักวัตถุดิบคำนวณได้จากสมการที่ ก.43

$$TSP_{b2} = \frac{0.22 \cdot (a \cdot b)^{0.5}}{\rho \cdot h} \qquad (ก.43)$$

โดย TSP_{b1} = ฝุ่นจากการระเบิด, กิโลกรัมกรัม/การระเบิด 1 ครั้ง

TSP_{b2} = ฝุ่นจากการระเบิด, กิโลกรัมกรัม/ตันวัตถุดิบ

a = ความกว้างของหลุม, เมตร

b = ความยาวของหลุม, เมตร

h = ความลึกของหลุม, เมตร

ρ = ความหนาแน่นของวัตถุดิบ, กิโลกรัม/ลบ.ม.

2) การคำนวณฝุ่นที่เกิดจากการขนส่ง

การขนส่งทางรถยนต์โดยทั่วไปจะผ่านถนน 2 ประเภท คือ ถนนลูกรังที่อยู่บริเวณเหมืองและถนนลาดยางที่ใช้ขนส่งจากโรงบดไปยังฝ่ายการผลิต

การคำนวณฝุ่นจากถนนลาดยาง คำนวณจากสมการที่ ก.44 [44]

$$TSP_{pr} = 2.4\left(\frac{sL}{2}\right)^{0.65}\left(\frac{w}{3}\right)^{1.5} \qquad (ก.44)$$

โดย TSP_{pr} = ฝุ่นจากถนนลาดยาง, กรัม/ระยะทางที่รถวิ่ง

sL = ความหนาแน่นฝุ่นบนถนน, กรัม/ตร.ม.

W = น้ำหนักเฉลี่ยของรถบรรทุกทั้งขาไปและขากลับ, ตัน

VkT = vehicle kilometer traveled

สำหรับฝุ่นจากถนนลูกรัง คำนวณจากสมการที่ ก.45 [45]

$$TSP_{ur} = 1.7\left[\frac{s}{12}\right]\left[\frac{S}{48}\right]\left[\frac{W}{2.7}\right]^{0.7}\left[\frac{w}{4}\right]^{0.5} \qquad (ก.45)$$

โดย TSP_{ur} = ฝุ่นจากถนนลูกรัง, กิโลกรัม/ระยะทางที่รถวิ่ง

s = ความหนาแน่นฝุ่นบนถนน, เปอร์เซ็นต์

S = ความเร็วเฉลี่ยของรถ, กิโลเมตร/ชั่วโมง

W = น้ำหนักเฉลี่ยของรถบรรทุกทั้งขาไปและขากลับ, ตัน

w = จำนวนล้อของรถ

ก.5.3 การผลิตไฟฟ้า

การคำนวณความเข้มข้นของฝุ่นและก๊าซจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในหม้อต้ม คำนวณจากสมการในตารางที่ ก.5 [46]

ตารางที่ ก.5 Emission Factors ของการเผาไหม้ถ่านหิน

ในหม้อต้มแบบ Pulverized Coal Boiler [46]

ความเข้มข้นฝุ่น (กิโลกรัม/ตันของถ่านหิน)	Bituminous Coal	Anthracite Coal	Lignite
TSP	5A[a]	5A	2.6A
SO_x	19S[b]	19.5S	15S
NO_x	11	9	5.6
CO	0.25	ND[c]	0.13

[a] A = ร้อยละของขี้เถ้าในถ่านหิน

[b] S = ร้อยละของซัลเฟอร์ในถ่านหิน

[c] ND = ไม่มีข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

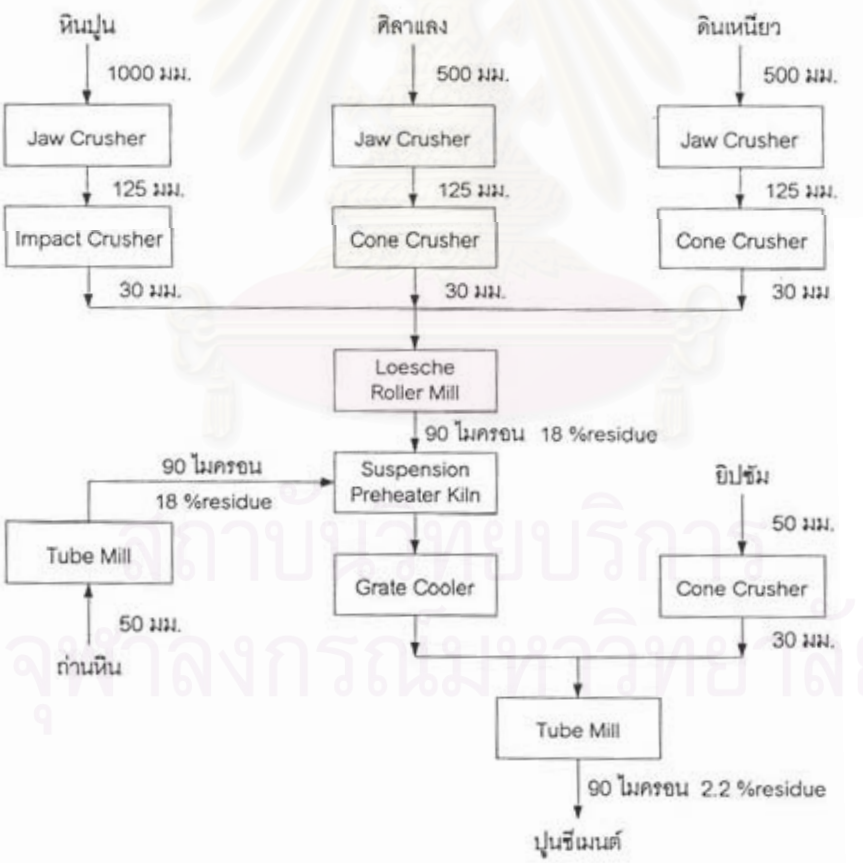
ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ใช้ประกอบการคำนวณและการประเมินผลกระทบ

ข.1 รายละเอียดของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

ข.1.1 รายละเอียดของโรงงานที่ 1

โรงงานที่ 1 มีกำลังการผลิตปูนเม็ดสูงสุด 2,700 ตัน/วัน มีกระบวนการผลิตดังรูปที่ ข.1 [3] และมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังตารางที่ ข.1 ถึง ตารางที่ ข.6 [3]



รูปที่ ข.1 กระบวนการผลิตของโรงงานที่ 1 [3]

ตารางที่ ข.1 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 1 [3]

วัตถุดิบ	หน่วย	ปริมาณการใช้
1. หินปูน (limestone)	ตัน/วัน	3316
2. ดินดำ (clay)	ตัน/วัน	622
3. ศิลาแลง (laterite)	ตัน/วัน	207
4. ยิปซัม (gypsum)	ตัน/วัน	135
5. ถ่านหิน (bituminous coal)	ตัน/วัน	390
6. น้ำที่ใช้หมุนเวียนในกระบวนการผลิต	ลบ.ม./วัน	1220
7. Make Up Water	ลบ.ม./วัน	140
8. ไฟฟ้า	กิโลวัตต์-ชั่งโมง/ปี	104,500,000

ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 1 [3]

คุณสมบัติของถ่านหิน	ปริมาณ
ส่วนประกอบของถ่านหิน (%)	
- ความชื้น (total moisture)	1.5
- ขี้เถ้า (ash content)	13
- สารระเหย (volatile matter)	37.5
- ซัลเฟอร์	0.5
ค่าความร้อน (gross calorific values), kcal/kg	6000

ตารางที่ ข.3 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 1 [3]

รายละเอียด	หม้อบดวัตถุดิบ/เตา	หม้อบดถ่านหิน	หม้อบดปูนซีเมนต์	หม้อเย็น
1. ประสิทธิภาพของระบบบำบัด (%)	99.99	99.98	99.9	99.99
2. ความเร็วก๊าซ (m/s)	13.6	20	6.7	15.2
3. เส้นผ่าศูนย์กลางปล่อง (m)	3.6	1.4	1.2	3.0
4. ความสูงของปล่อง (m)	70	45	10	29

ตารางที่ ข.4 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่น ของโรงงานที่ 1 ปี พ.ศ. 2535 — 2538 [3]

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ปริมาณสารมลพิษ (mg/m^3)						ค่ามาตรฐาน*
	ก.ค. 2535	ก.พ. 2536	ก.พ. 2537	ต.ค. 2537	ก.ค. 2538	พ.ย. 2538	
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบและเตา							
- ฝุ่นแขวนลอย	194	154	155	81.5	216	109.14	≤400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	-	1.04	-	4.3	4.3	-	≤1300
ปล่องหม้อเย็น							
- ฝุ่นแขวนลอย	88	67	114	296.4	70	132.78	≤400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	-	1.04	-	4.3	4.3	6.47	≤1300
ประสิทธิภาพของระบบบำบัดขณะทำการตรวจวัด (%)	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

ตารางที่ ข.5 ผลการตรวจวัดระดับเสียง จากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 ปี พ.ศ. 2535 — 2538 [3]

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ระดับเสียง (dB_A)						ค่ามาตรฐาน*
	ก.พ. 2536	ก.ย. 2536	ก.พ. 2537	ต.ค. 2537	ก.ค. 2538	พ.ย. 2538	
ห้องควบคุมหม้อบดปูนซีเมนต์	69.8	80	74.3	71.4	68.7	83.1	≤ 90
ห้องควบคุมหม้อเผา	67.8	78.2	68.9	63.5	-	-	≤ 90
ห้องควบคุมหม้อบดวัตถุดิบ	67.8	77.2	69	65.9	70	74.8	≤ 90
บริเวณหม้อบดปูนซีเมนต์	100.5	101.9	-	-	102.1	104.5	≤ 90
บริเวณหม้อบดวัตถุดิบ	94.1	-	95.6	92.5	93	82.8	≤ 90
ห้อง COMPRESSOR	112.7	-	-	-	-	-	≤ 90

* ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงหมาดไทย

ตารางที่ ข.6 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะน้ำทิ้ง

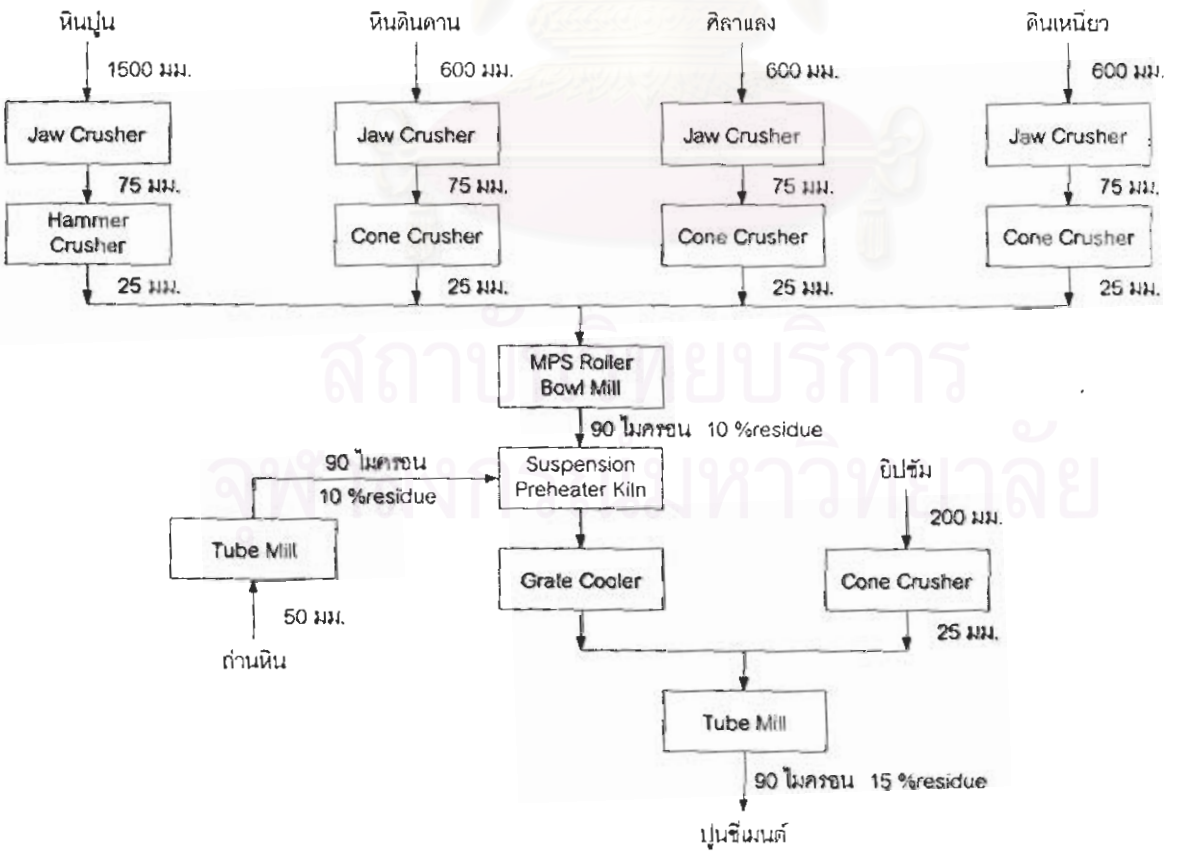
จากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1 ปี พ.ศ. 2535 – 2538 [3]

คุณลักษณะน้ำทิ้ง	Unit	ก.ค. 2535	ก.พ. 2536	ก.ย. 2536	ก.พ. 2537	ต.ค. 2537	ก.ค. 2538	พ.ย. 2538	ค่ามาตรฐาน*
อุณหภูมิ	°C	30.0	27.0	29.5	30.5	29.0	31.5	30.0	≤ 40
pH		8.17	8.06	8.63	7.84	7.63	6.8	6.1	5 - 9
SS	mg/l	7	46	11	24	15	45	36	≤ 50
BOD	mg/l	7	8	8	11	< 4	2	3	≤ 20
Oil & Grease	mg/l	< 3	< 3	< 3	5	< 3	< 3	< 3	≤ 5
ปริมาณน้ำเสีย	185 ลูกบาศก์เมตร/ครั้ง (ประมาณปีละ 1 ครั้ง)								

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ข.1.2 รายละเอียดของโรงงานที่ 2

โรงงานที่ 2 มีกำลังการผลิตปูนเม็ดสูงสุด 10000 ตัน/วัน มีกระบวนการผลิตดังรูปที่ ข.2 และมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังตารางที่ ข.7 ถึง ตารางที่ ข.14



รูปที่ ข.2 กระบวนการผลิตของโรงงานที่ 2

ตารางที่ ข.7 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 2 [18]

วัตถุดิบ	หน่วย	ปริมาณการใช้
1. หินปูน (limestone)	ตัน/วัน	15062
2. ดินดำ (clay)	ตัน/วัน	1450
3. หินดินดาน (shale)	ตัน/วัน	870
4. ดินลูกรัง (laterite)	ตัน/วัน	450
5. ยิปซัม (gypsum)	ตัน/วัน	500
6. ถ่านหิน (lignite coal)	ตัน/วัน	2230
7. ไฟฟ้า	กิโลวัตต์-ชั่งโมง/เดือน	36,100,000

ตารางที่ ข.8 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 2

คุณสมบัติของถ่านหิน	ปริมาณ
ส่วนประกอบของถ่านหิน (%)	
- ความชื้น (total moisture)	10
- ขี้เถ้า (ash content)	15
- สารระเหย (volatile matter)	40
- ซัลเฟอร์	2
ค่าความร้อน (gross calorific values), kcal/kg	4500

ตารางที่ ข.9 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 2

รายละเอียด	หม้อบด	หม้อบดถ่านหิน			หม้อบดปูนซีเมนต์			หม้อเย็น	
	วัตถุดิบ	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2
1. ประสิทธิภาพของระบบบำบัด (%)	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
2. ความเร็วก๊าซ(m/s)	27.98	14.87	15.12	15.55	16.67	16.78	15.30	20.61	26.73
3. เส้นผ่าศูนย์กลางของปล่อง(m)	3.82	2.42	2.42	2.42	1.02	1.02	1.02	3.5	3.5
4. อัตราการไหลของก๊าซ (m^3/min)	14861	3623	3721	3802	645	655	599	7600	9544

ตารางที่ ข.10 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่น ของโรงงานที่ 2 ระหว่างปี พ.ศ. 2536 – พ.ศ. 2538

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	จำนวนตัวอย่าง	ปริมาณสารมลพิษ (mg/m^3)			
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบและเตา					
- ฝุ่นแขวนลอย	33	95.86	8.10	25.98	25.96
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	36	33.20	-	4.61	8.02
ปล่องหม้อบดลิกไนต์ No.1					
- ฝุ่นแขวนลอย	30	59.26	2.4	14.92	14.18
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	33	41.29	-	4.57	9.60
ปล่องหม้อบดลิกไนต์ No.2					
- ฝุ่นแขวนลอย	30	35.87	5.54	15.03	6.41
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	33	27.38	-	4.59	8.01
ปล่องหม้อบดลิกไนต์ No.3					
- ฝุ่นแขวนลอย	30	42.60	4.05	12.67	9.61
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	33	32.31	-	6.81	8.97
ปล่องหม้อเย็น No.1					
- ฝุ่นแขวนลอย	30	103.90	10.66	37.40	23.88
ปล่องหม้อเย็น No.2					
- ฝุ่นแขวนลอย	30	127.94	10.93	41.77	34.87
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.1					
- ฝุ่นแขวนลอย	33	54.52	3.84	12.17	12.33
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.2					
- ฝุ่นแขวนลอย	33	115.52	7.97	20.32	24.58
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.3					
- ฝุ่นแขวนลอย	33	83.20	3.93	20.52	24.72

ตารางที่ ข.11 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบกำจัดฝุ่น ของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2541 [19]

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ปริมาณสารมลพิษ (mg/m^3)				ค่ามาตรฐาน*
	ม.ค. — มี.ค. 2541	เม.ย. — มิ.ย. 2541	ก.ค. — ก.ย. 2541	ต.ค. — ธ.ค. 2541	
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบและเตา					
- ฝุ่นแขวนลอย	9.093	38.348	10.529	15.653	≤400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	39.408	54.496	19.364	12.795	≤1300
- ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	726.855	208.333	493.670	491.258	≤940
ปล่องหม้อบดลิกไนต์ No.1					
- ฝุ่นแขวนลอย	13.248	14.988	23.488	19.186	≤400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	69.449	90.11	17.359	16.301	≤1300
- ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	975.116	200.867	434.008	467.315	≤940
ปล่องหม้อบดลิกไนต์ No.2					
- ฝุ่นแขวนลอย	12.340	33.116	20.524	7.385	≤400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	53.467	113.526	16.903	24.749	≤1300
- ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	641.162	640.607	539.521	601.919	≤940
ปล่องหม้อบดลิกไนต์ No.3					
- ฝุ่นแขวนลอย	11.774	85.427	23.897	5.293	≤400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	39.719	75.032	16.008	11.271	≤1300
- ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	279.023	409.679	457.259	524.963	≤940
ปล่องหม้อเย็น No.1					
- ฝุ่นแขวนลอย	7.806	23.387	46.857	32.969	≤400
ปล่องหม้อเย็น No.2					
- ฝุ่นแขวนลอย	7.229	16.269	33.361	8.962	≤400
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.1					
- ฝุ่นแขวนลอย	22.493	30.912	13.117	9.350	≤400
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.2					
- ฝุ่นแขวนลอย	4.420	60.128	12.964	28.158	≤400
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.3					
- ฝุ่นแขวนลอย	6.719	37.076	25.522	53.714	≤400

ตารางที่ ข.12 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในสถานที่ปฏิบัติงานของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2537

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่ามาตรฐาน*
บริเวณระบบบำบัดฝุ่น	35.9 – 42.68	≤ 45
บริเวณหน้าหม้อเผา	35.71	≤ 45
บริเวณสายพาน	27.32 – 30.63	≤ 45
ห้อง Blower Lignite	34.77	≤ 45
ห้อง Live Ring	44.22 – 47.04	≤ 45
ห้องมอเตอร์หมุนหม้อเผา	34.50	≤ 45
บริเวณ Calciner	33.46 – 33.79	≤ 45

* ค่ามาตรฐานความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม

ตารางที่ ข.13 ผลการตรวจวัดเสียงในสถานที่ปฏิบัติงานเขตเครื่องจักร ของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2539 – 2541

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ระดับเสียง (dB_A)			ค่ามาตรฐาน*
	ปี พ.ศ. 2539	ปี พ.ศ. 2540	ปี พ.ศ. 2541	
บริเวณหม้อบดหินปูน	96.90	99.00	101.2	≤ 90
บริเวณหม้อบดหินดินดาน	84.20	86.30	83.90	≤ 90
บริเวณหม้อบดยิปซัม	86.60	90.60	84.40	≤ 90
ห้อง COMPRESSOR	79.80	80.40	85.60	≤ 90
อาคารหม้อบดวัตถุดิบ	90.55	91.80	96.80	≤ 90
อาคารหม้อเย็น	97.25	97.40	96.90	≤ 90
อาคารหม้อบดลิกไนต์	90.00	92.80	90.80	≤ 90
อาคารหม้อบดปูนซีเมนต์	93.09	92.50	93.70	≤ 90
อาคาร HOPPER	86.10	80.40	87.10	≤ 90
BLENDING SILO	78.60	76.55	77.50	≤ 90
ROTARY BLOWER	83.00	103.70	102.70	≤ 90
โรงผลิตถุงกระดาษ	82.60	85.90	67.60	≤ 90

* ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงหมาดไทย

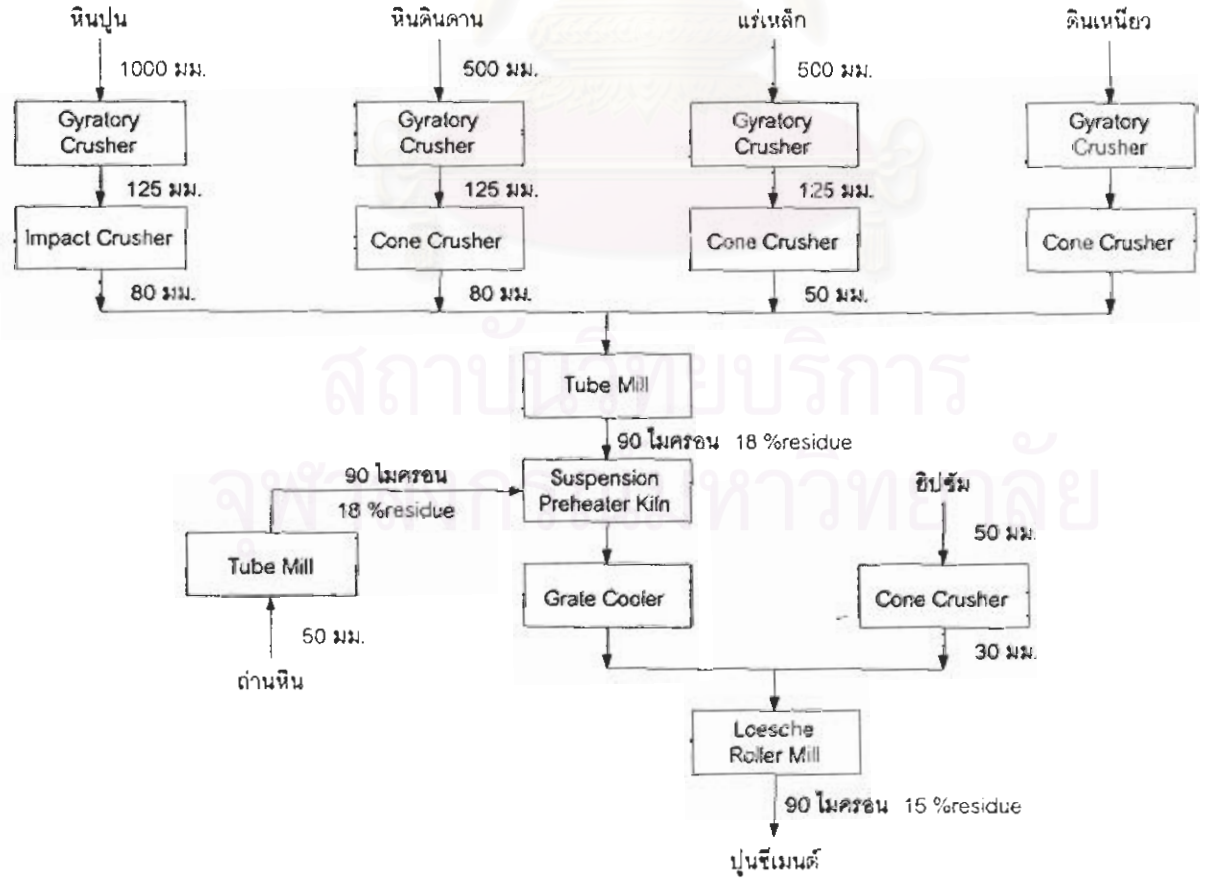
ตารางที่ ข.14 ผลการตรวจวัดเสียงในสถานที่ปฏิบัติงานเขตมีพนักงานประจำของโรงงานที่ 2 ปี พ.ศ. 2539 – 2541

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ระดับเสียง (dB_A)			ค่ามาตรฐาน*
	ปี พ.ศ. 2539	ปี พ.ศ. 2540	ปี พ.ศ. 2541	
ห้องควบคุมหม้อบดวัตถุดิบ	73.53	79.98	73.08	≤ 90
ห้องควบคุมหม้อบดปูนซีเมนต์	76.01	72.77	83.32	≤ 90
ห้องทำงานช่างบริเวณหม้อเย็น	83.41	78.75	66.13	≤ 90
ห้องทำงานช่างบริเวณหม้อบดวัตถุดิบ 1	68.82	79.51	68.53	≤ 90
ห้องทำงานช่างบริเวณหม้อบดวัตถุดิบ 2	86.93	76.17	70.05	≤ 90

* ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงหมาดไทย (Leq 8 hr)

ข.1.3 รายละเอียดของโรงงานที่ 3

โรงงานที่ 3 มีกำลังการผลิตปูนเม็ดสูงสุด 7500 ตัน/วัน มีกระบวนการผลิตดังรูปที่ ข.3 และมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังตารางที่ ข.15 ถึง ตารางที่ ข.20



รูปที่ ข.3 กระบวนการผลิตของโรงงานที่ 3 และโรงงานที่ 4

ตารางที่ ข.15 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 3 [20]

ชนิด	หน่วย	ปริมาณการใช้
1. หินปูน (limestone)	ตัน/วัน	10000
2. ดินดำ (clay)	ตัน/วัน	1200
3. หินเชล (shale)	ตัน/วัน	600
4. แร่เหล็ก (iron ore)	ตัน/วัน	120
5. ยิปซัม (Gypsum)	ตัน/วัน	375
6. ถ่านหิน (bituminous)	ตัน/วัน	1095
7. Make Up Water	ลบ.ม./วัน	400

ตารางที่ ข.16 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 3

คุณสมบัติของถ่านหิน	ปริมาณ
ส่วนประกอบของถ่านหิน (%)	
- ความชื้น (total moisture)	14
- ขี้เถ้า (ash content)	17
- สารระเหย (volatile matter)	30
- ซัลเฟอร์	0.65
ค่าความร้อน (gross calorific values), kcal/kg	6400

ตารางที่ ข.17 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 3

รายละเอียด	หม้อบดวัตถุดิบ	หม้อบดปูนซีเมนต์	หม้อเผา/หม้อเย็น
	No. 1-2	No. 1-2	No. 1
1. ประสิทธิภาพ (%)	99.93	99.99	99.9
2. ความเร็วก๊าซ (m/s)	12.5	11	12.7
3. เส้นผ่าศูนย์กลางปล่อง (m)	5	1.5	5.5
4. อัตราการไหลของก๊าซ (m^3/s)	246.1	19.5	303.5

ตารางที่ ข.18 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบบำบัดของโรงงานที่ 3 [21, 22]

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ปริมาณสารมลพิษ (mg/m^3)		ค่ามาตรฐาน*
	มีนาคม — เมษายน ปี พ.ศ. 2541	กันยายน — ตุลาคม ปี พ.ศ. 2541	
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบ No.1			
- ฝุ่นแขวนลอย	56.73	29.3	≤ 400
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบ No.2			
- ฝุ่นแขวนลอย	41.98	12.5	≤ 400
ปล่องหม้อเผา/หม้อเย็น No.1			
- ฝุ่นแขวนลอย	309.92	49.7	≤ 400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	-	9.48	≤ 1300
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.1			
- ฝุ่นแขวนลอย	40.28	4.4	≤ 400
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.2			
- ฝุ่นแขวนลอย	37.76	11.9	≤ 400

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

ตารางที่ ข.19 ผลการตรวจวัดความดังเสียงในสถานที่ทำงานโรงงานที่ 3

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ระดับเสียง (dB_A)			ค่ามาตรฐาน*
	พฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2540 - ธันวาคม ปี พ.ศ. 2541			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
อาคารหม้อบดวัตถุดิบ No.1, 2	-	83.2	79.0	≤ 90
เครื่องระบายความร้อน No.1	77.44	86.6	-	≤ 90
อาคารหม้อบดปูนซีเมนต์ No.1, 2	78.64	66.6	69.7	≤ 90
อาคารบรรจุปูนเม็ด	73.60	73.8	-	≤ 90
ห้อง COMPRESSOR	82.44	83.6	81.3	≤ 90

* ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงหมาดไทย (Leq 8 hr)

ตารางที่ ข.20 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะน้ำทิ้งจากการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานโรงงานที่ 3 ปี พ.ศ. 2541

คุณลักษณะน้ำทิ้ง	Unit	มีนาคม พ.ศ. 2541	กันยายน พ.ศ. 2541	ค่ามาตรฐาน*
pH		7.71	6.93	5 - 9
BOD	mg/l	12	9.5	≤ 20
COD	mg/l	25	56	≤120
Oil & Grease	mg/l	< 0.1	< 0.1	≤ 5
ปริมาณน้ำเสีย	ลบ.ม./ครั้ง	50 (ประมาณเดือนละ 1 ครั้ง)		

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ข.1.4 รายละเอียดโรงงานที่ 4

โรงงานที่ 4 มีกำลังการผลิตปูนเม็ด (clinker) สูงสุด 12000 ตัน/วัน มีกระบวนการผลิตดังรูปที่ ข.3 และมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังตารางที่ ข.21 – ตารางที่ ข.26

ตารางที่ ข.21 ปริมาณการใช้วัตถุดิบและพลังงานของโรงงานที่ 4

ชนิด	หน่วย	ปริมาณการใช้ (ตัน/วัน)
1. หินปูน (limestone)	ตัน/วัน	15500
2. ดินเหนียว (clay)	ตัน/วัน	1850
3. หินดินดาน (shale)	ตัน/วัน	930
4. แร่เหล็ก (iron ore)	ตัน/วัน	185
5. ยิปซัม (gypsum)	ตัน/วัน	600
6. ถ่านหิน (bituminous coal)	ตัน/วัน	1753
7. Make Up Water	ลบ.ม./วัน	250

ตารางที่ ข.22 คุณสมบัติของถ่านหินที่ใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ 4

คุณสมบัติของถ่านหิน	ปริมาณ
ส่วนประกอบของถ่านหิน (%)	
- ความชื้น (total moisture)	14
- ขี้เถ้า (ash content)	17
- สารระเหย (volatile matter)	30
- ซัลเฟอร์	0.65
ค่าความร้อน (gross calorific values), kcal/kg	6,400

ตารางที่ ข.23 รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัดฝุ่นของโรงงานที่ 4

รายละเอียด	หม้อบดวัตถุดิบและเตา	หม้อบดถ่านหิน	หม้อบดปูนซีเมนต์	หม้อเผา/หม้อเย็น
	No.6-8	No.5-6	No.6-7	No.3
1. ประสิทธิภาพของระบบบำบัด (%)	99.93	99.93	99.99	99.9
3. ความเร็วก๊าซ (m/s)	12.5	8.7	11	12.7
4. เส้นผ่าศูนย์กลางปล่อง (m)	5	2.5	1.5	5.5
5. อัตราการไหลของก๊าซ (m3/s)	246.1	43.1	19.5	303.5

ตารางที่ ข.24 ผลการตรวจวัดปริมาณสารมลพิษหลังผ่านระบบบำบัดของโรงงานที่ 4 [25, 26]

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ปริมาณสารมลพิษ (mg/m^3)		ค่ามาตรฐาน*
	มีนาคม – พฤษภาคม ปี พ.ศ. 2541	กันยายน – ตุลาคม ปี พ.ศ. 2541	
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบ No.6			
- ฝุ่นแขวนลอย	31.66	10.4	≤ 400
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบ No.7			
- ฝุ่นแขวนลอย	31.46	11.9	≤ 400
ปล่องหม้อบดวัตถุดิบ No.8			
- ฝุ่นแขวนลอย	351.85	81.3	≤ 400
ปล่องหม้อบดถ่านหิน No.5			
- ฝุ่นแขวนลอย	8.66	2.3	≤ 400
ปล่องหม้อบดถ่านหิน No.6			
- ฝุ่นแขวนลอย	25.65	7.7	≤ 400
ปล่องหม้อเผา/หม้อเย็น No.3			
- ฝุ่นแขวนลอย	75.89	5.4	≤ 400
- ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	-	2.92	≤ 1300
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.6			
- ฝุ่นแขวนลอย	6.08	4.0	≤ 400
ปล่องหม้อบดปูนซีเมนต์ No.7			
- ฝุ่นแขวนลอย	7.94	5.1	≤ 400

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

ตารางที่ ข.25 ผลการตรวจวัดความดังเสียงในสถานที่ทำงานโรงงานที่ 4

ตำแหน่งที่ตรวจวัด	ความดังเสียง (dB_A)				ค่ามาตรฐาน*
	พฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2540 - ธันวาคม ปี พ.ศ. 2541				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
บริเวณหม้อบดหินปูน	80.53	66.97	72.7	73.8	≤ 90
บริเวณหม้อบดหินดินดาน	64.60	61.70	71.0	73.4	≤ 90
อาคารหม้อบดวัตถุดิบ No.6, 7, 8	89.10	88.57	88.0	83.0	≤ 90
อาคารหม้อบดถ่านหิน No.5, 6	88.60	89.52	83.7	78.4	≤ 90
เครื่องระบายความร้อน No.3	88.70	89.30	88.7	85.7	≤ 90
อาคารหม้อบดปูนซีเมนต์ No.6, 7	80.90	70.67	67.9	74.2	≤ 90
ห้อง COMPRESSOR	89.40	89.60	83.4	82.2	≤ 90

* ค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงหมาดไทย (Leq 8 hr)

ตารางที่ ข.26 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะน้ำทิ้งจากการผลิตปูนซีเมนต์โรงงานที่ 4 ปี พ.ศ. 2541

คุณลักษณะน้ำทิ้ง	Unit	มีนาคม พ.ศ. 2541	เมษายน พ.ศ. 2541	กันยายน พ.ศ. 2541	พฤศจิกายน พ.ศ. 2541	ค่ามาตรฐาน
pH		7.71	7.62	6.93	7.31	5 - 9
BOD	mg/l	12	1.7	9.5	5.4	≤ 20
COD	mg/l	-	-	56	43	≤ 120
Oil & Grease	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	≤ 5
DO	mg/l	4.0	5.6	3.3	1.4	> 4
TS	mg/l	450	419	596	342	≤ 3000
SS	mg/l	14.2	4.2	30.4	2.2	≤ 50
ปริมาณน้ำเสีย	ลบ.ม./ครั้ง	33 (ประมาณเดือนละ 1 ครั้ง)				

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ข.2 ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการทำเหมือง

ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการทำเหมืองแร่หินปูน แสดงในตารางที่ ข.27 ถึง ตารางที่ ข.29 [29]

ตารางที่ ข.27 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่หินปูน [29]

จุดตรวจ	ความเข้มข้นฝุ่น (มก./ลบ.ม.)			ค่ามาตรฐาน*
1	103.45	89.88	89.88	≤ 300
2	58.44	64.88	64.88	≤ 300
3	79.64	126.90	126.90	≤ 300
4	163.89	301.15	301.15	≤ 300
5	196.13	175.20	175.20	≤ 300
6	69.24	104.18	104.18	≤ 300
7	52.5	105.66	105.66	≤ 300
8	72.22	80.22	96.45	≤ 300

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ตารางที่ ข.28 ผลการตรวจวัดระดับเสียงบริเวณเหมืองแร่หินปูน [29]

ระยะห่างจากจุดระเบิด (เมตร)	ระดับเสียง (Leq, dB_A)	ค่ามาตรฐาน*
4	51-65.9	≤ 90
1	58.3	≤ 90
3	50.9	≤ 90
3.5	47.7	≤ 90

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

ตารางที่ ข.29 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่หินปูน [29]

คุณภาพน้ำ	Unit	ผลการวิเคราะห์	ค่ามาตรฐาน*
PH	-	7.83	5 - 9
SS	mg/l	42	≤ 50

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการทำเหมืองแร่ลิกไนต์ แสดงในตารางที่ ข.30 ถึง ตารางที่ ข.31 [27]

ตารางที่ ข.30 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่ลิกไนต์ [27]

ความเข้มข้น (มก./ลบ.ม.)	จุดตรวจ จ.ลำปาง				จุดตรวจ จ.ลำพูน			ค่ามาตรฐาน*
	1	2	3	4	1	2	3	
ฝุ่น	0.179	0.175	0.266	0.152	0.126	0.177	0.103	≤ 0.330
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	<0.001	0.008	0.013	0.012	0.210	3.44	<0.001	≤ 0.3
ไนโตรเจนไดออกไซด์	<0.001	0.003	0.001	0.005	<0.001	0.011	0.003	≤ 0.17

* ค่ามาตรฐานจากประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2538)

ตารางที่ ข.31 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่ลิกไนท์

คุณภาพน้ำ	Unit	จุดตรวจ จ.ลำปาง	จุดตรวจ จ.ลำพูน	ค่ามาตรฐาน*
PH	-	7.8	7.6	5 - 9
SS	mg/l	4	12	≤ 50

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการทำเหมืองแร่ยิปซัม แสดงในตารางที่ ข.32 ถึง ตารางที่ ข.33 [30]

ตารางที่ ข.32 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่ยิปซัม [30]

ระยะทางจากจุดที่ตรวจวัดห่างจากขอบถนนรอบโรงาน (เมตร)	**ความเข้มข้นของฝุ่น**เฉลี่ย 48 ชั่วโมง (มก./ลบ.ม.)	ค่ามาตรฐาน*
110	156.1	≤ 400
150	125.9	≤ 400

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ตารางที่ ข.33 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่ยิปซัม [30]

คุณภาพน้ำ	Unit	บ่อเหมือง	บ่อน้ำชุมชน	ค่ามาตรฐาน*
PH	-	7.64	8.26	5 - 9
BOD	mg/l	11	14	≤ 20
SS	mg/l	2	8	≤ 50

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการทำเหมืองโครงการทำเหมืองแร่หินดินดาน แสดงในตารางที่ ข.34 ถึง ตารางที่ ข.35 [31]

ตารางที่ ข.34 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศบริเวณเหมืองแร่หินดินดาน [31]

ฝุ่นแขวนลอยในช่วงเวลาที่ทำการตรวจวัด (มก./ลบ.ม.)		ค่ามาตรฐาน*
ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	
28.07	236.68	≤ 400
38.28	198.93	≤ 400
33.85	236.68	≤ 400

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ตารางที่ ข.35 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณเหมืองแร่หินดินดาน

คุณภาพน้ำ	Unit	ก่อนผ่านบริเวณที่ทำเหมือง	หลังผ่านบริเวณที่ทำเหมือง	ค่ามาตรฐาน*
PH	-	7.6	7.6	5 - 9
BOD	mg/l	0.8	0.8	≤ 20
SS	mg/l	6.2	4	≤ 50

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

ข.3 ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของการผลิตไฟฟ้า

ผลการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าแบบ Pulverize Coal Boiler แสดงในตารางที่ ข.36 ถึง ตารางที่ ข.37 [8]

ตารางที่ ข.36 ผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศหลังผ่านระบบบำบัดของโรงไฟฟ้า [8]

	Unit	ปริมาณสารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน*
ฝุ่น	mg/m^3	43.827	≤ 120
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ppm	256.52	≤ 640
ไนโตรเจนไดออกไซด์	ppm	83.16	≤ 350
คาร์บอนมอนอกไซด์	ppm	24.98	≤ 870

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

ตารางที่ ข.37 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงไฟฟ้า

คุณภาพน้ำ	Unit	น้ำที่ปล่อยจากหม้อไอน้ำ	น้ำที่ปล่อยจากหอทำน้ำเย็น	ค่ามาตรฐาน*
pH	-	9.2 – 10.8	6.5 – 9	5 - 9
SS	mg/l	-	15 (มากสุด)	≤ 50

* ค่ามาตรฐานจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2525)

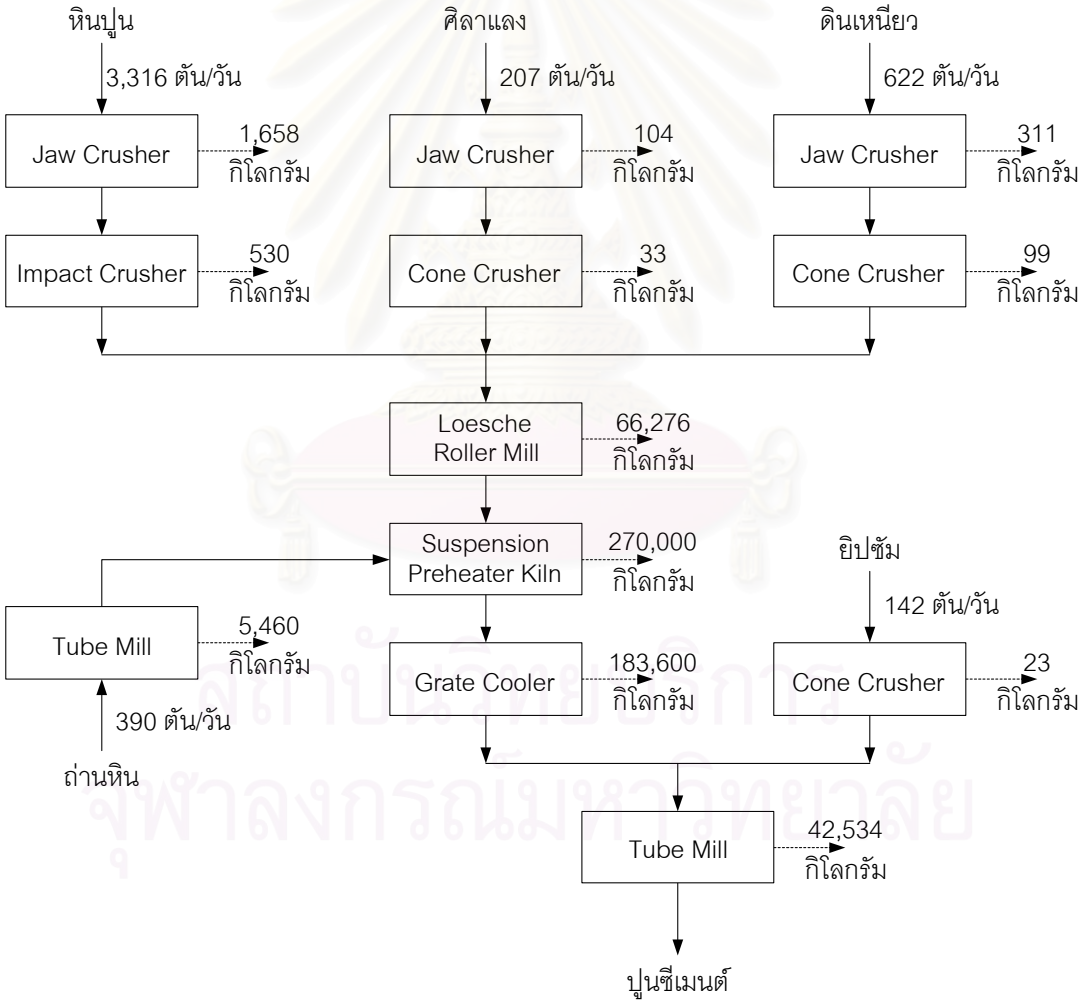
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

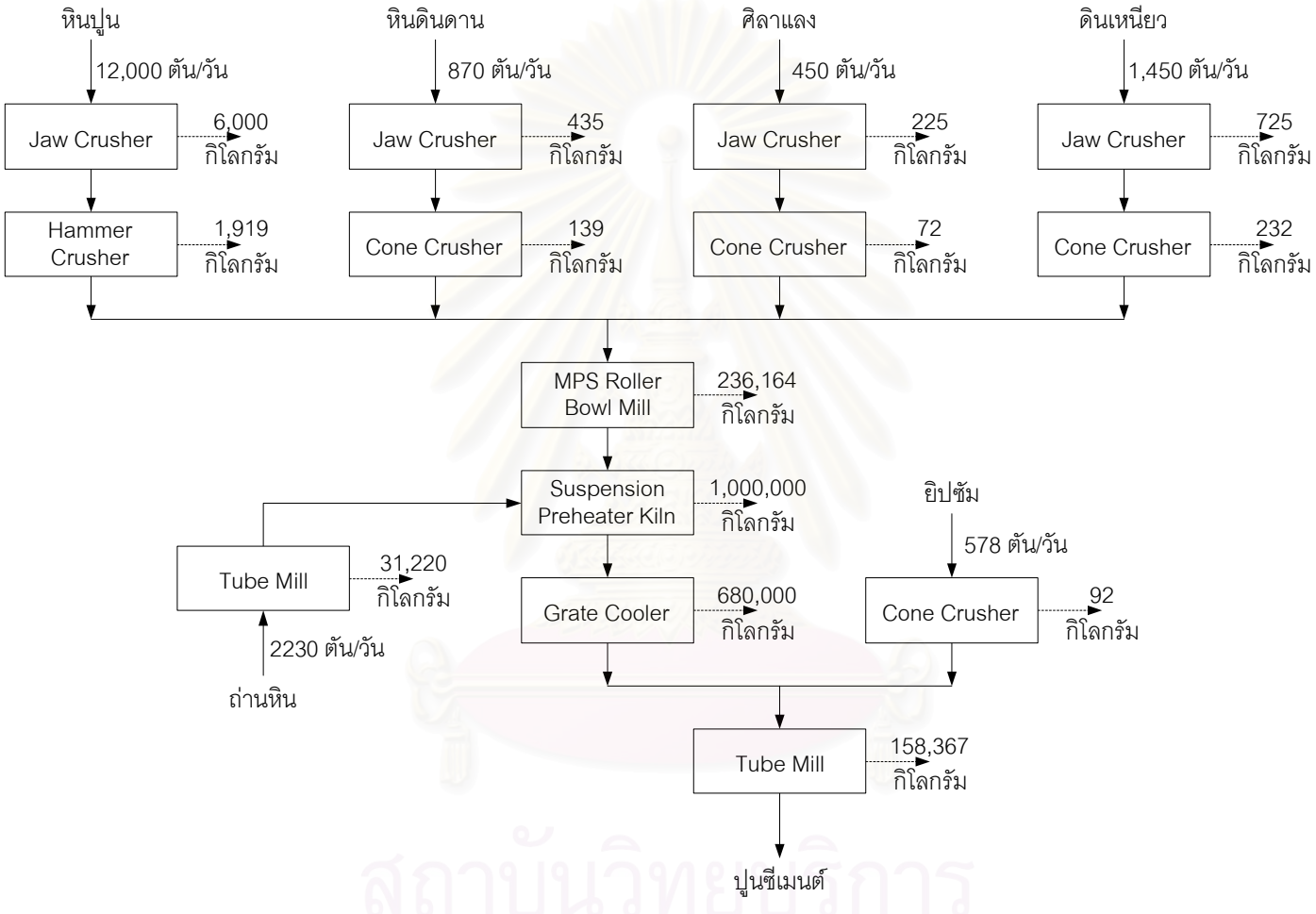
ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากขั้นตอนต่าง ๆ ของการผลิตปูนซีเมนต์

ฝุ่นแขวนลอยที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ ค. 1 ถึง รูปที่ ค.4

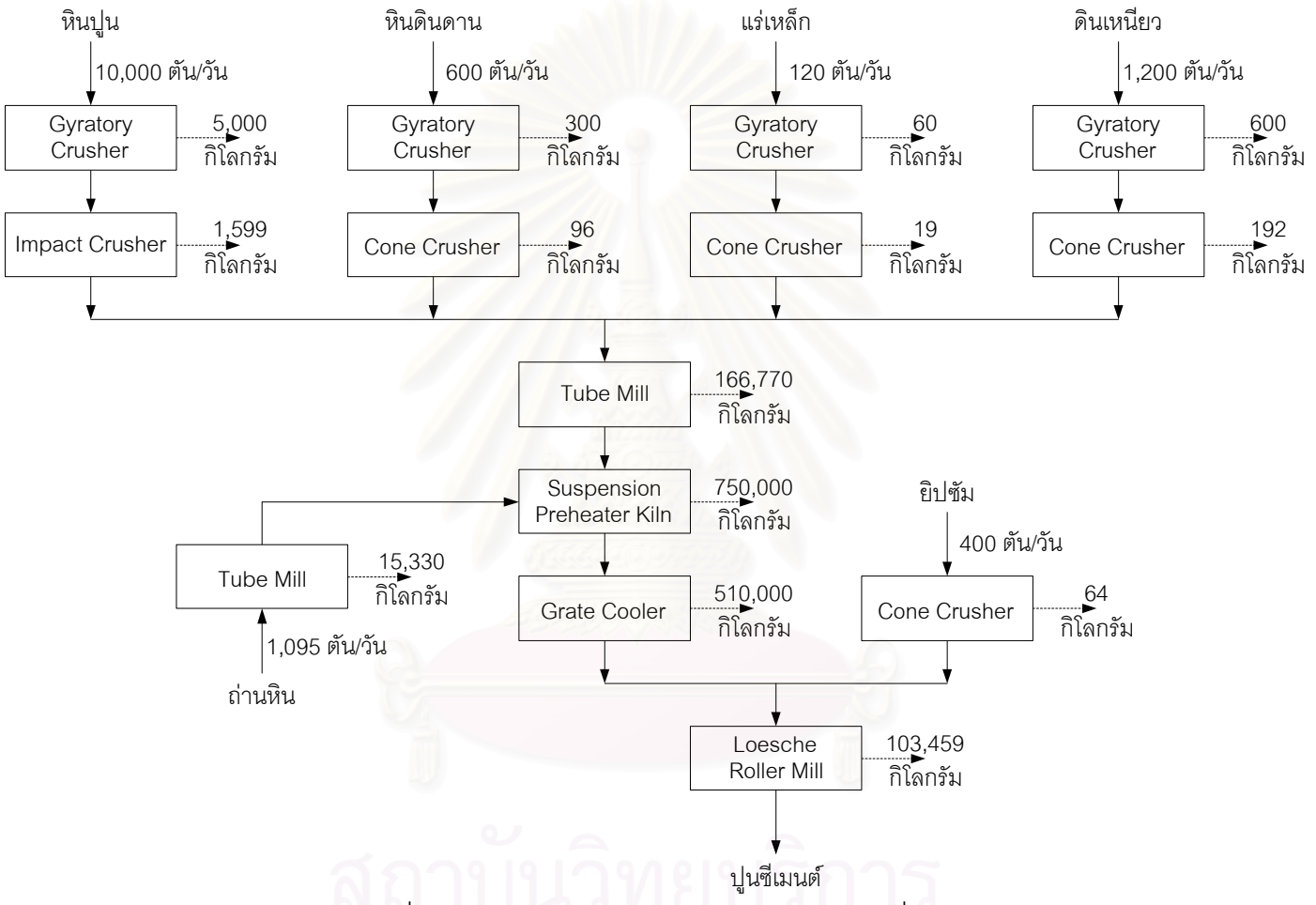


รูปที่ ค.1 ผลการคำนวณปริมาณสารมลพิษของโรงงานที่ 1



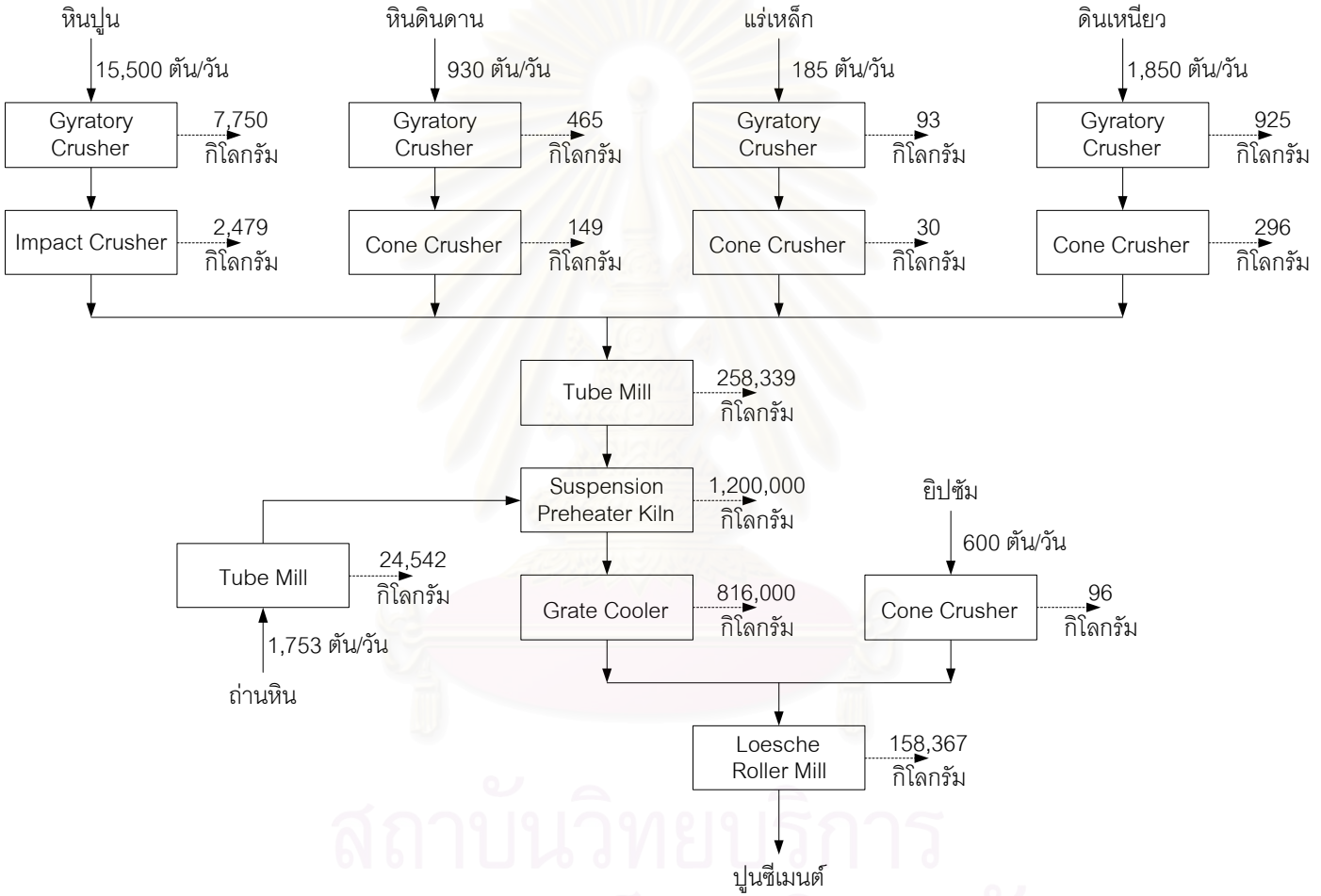
รูปที่ ค.2 ผลการคำนวณฝุ่นแขวนลอยของโรงงานที่ 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.3 ผลการคำนวณฝุ่นแขวนลอยของโรงงานที่ 3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.4 ผลการคำนวณฝุ่นแขวนลอยของโรงงานที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับผลการคำนวณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศจากการผลิตปูนซีเมนต์ แสดงไว้ในตารางที่ ค.1 ถึง ตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.1 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศ
จากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1

	หน่วย	ผลการคำนวณ
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	1,458
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	5,670
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	2,430,000
ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	4,860

ตารางที่ ค.2 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศ
จากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2

	หน่วย	ผลการคำนวณ
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	5,400
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	21,000
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	9,000,000
ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	18,000

ตารางที่ ค.3 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศ
จากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3

	หน่วย	ผลการคำนวณ
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	4,050
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	15,750
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	6,750,000
ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	13,500

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณปริมาณก๊าซที่ปล่อยสู่บรรยากาศ
จากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4

	หน่วย	ผลการคำนวณ
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	6,480
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	25,200
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	กิโลกรัม/วัน	10,800,000
ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์	กิโลกรัม/วัน	21,600

สำหรับผลการคำนวณสารมลพิษที่ได้จากผลการตรวจวัด แสดงไว้ในตารางที่ ค.5 ถึง ตารางที่ ค.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.5 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 1

	Unit	raw mill/kiln	cooler	Total
รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัด				
ความเร็วก๊าซ	m/s	13.6	15.2	
เส้นผ่าศูนย์กลางของปล่อง	m	3.6	3.0	
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/s	138	107	
การคำนวณสารมลพิษจากรายงานผลการตรวจวัด				
ประสิทธิภาพของระบบบำบัดขณะทำการตรวจวัด		99.5	99.5	
ปริมาณฝุ่นแขวนลอย				
- กรกฎาคม พ.ศ. 2535	mg/m^3	194	88	
	ton	464	163	**627**
- กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536	mg/m^3	154	67	
	ton	368	124	**493**
- กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2537	mg/m^3	155	114	
	ton	371	212	**582**
- ตุลาคม พ.ศ. 2537	mg/m^3	81.5	296.4	
	ton	195	550	**745**
- กรกฎาคม พ.ศ. 2538	mg/m^3	216	70	
	ton	517	130	**647**
- พฤศจิกายน พ.ศ. 2538	mg/m^3	109.14	132.78	
	ton	261	247	**508**
ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์				
- กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2536	mg/m^3	1.04	1.04	
	kg	2488	1931	**4419**
- ตุลาคม พ.ศ. 2537	mg/m^3	4.3	4.3	
	kg	10286	7983	**18269**
- กรกฎาคม พ.ศ. 2538	mg/m^3	4.3	4.3	
	kg	10286	7983	**18269**

ตารางที่ ค.6 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 2

	Unit	raw mill	cooler 1	cooler 2	coal mill 1	coal mill 2	coal mill 3	cement mill 1	cement mill 2	cement mill 3	Total
รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัด											
ประสิทธิภาพของระบบบำบัด	%	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	
ความเร็วก๊าซ	m/s	27.98	20.61	26.73	14.87	15.12	15.55	16.67	16.78	15.30	
เส้นผ่าศูนย์กลางของปล่อง	m	3.82	3.5	3.5	2.42	2.42	2.42	1.02	1.02	1.02	
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/s	321	198	257	68	70	72	14	14	13	
การคำนวณสารมลพิษจากรายงานผลการตรวจวัด											
ปริมาณฝุ่นแขวนลอย											
- ม.ค. ถึง มี.ค. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	9.093	7.806	7.229	13.248	12.34	11.774	22.493	4.42	6.719	
	ton	252	134	161	78	74	73	26	5	7	**810**
- เม.ย. ถึง มิ.ย. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	38.348	23.387	16.269	14.988	33.116	85.427	30.912	60.128	37.076	
	ton	1062	401	361	89	199	528	36	71	40	**2788**
- ก.ค. ถึง ก.ย. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	10.529	46.857	33.361	23.488	20.524	23.897	13.117	12.964	25.522	
	ton	292	803	741	139	123	148	15	15	28	**2304**
- ต.ค. ถึง ธ.ค. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	15.653	32.969	8.962	19.186	7.385	5.293	9.35	28.158	53.714	
	ton	434	565	199	113	44	33	11	33	58	**1491**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมต์ของโรงงานที่ 2

ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์											
- ม.ค. ถึง มี.ค. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	39.408			69.449	53.467	39.719				
	kg	1092			410	321	245				2069
- เม.ย. ถึง มิ.ย. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	54.496			90.110	113.526	75.032				
	kg	1510			532	682	464				3188
- ก.ค. ถึง ก.ย. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	19.364			17.359	16.903	16.008				
	kg	537			103	102	99				840
- ต.ค. ถึง ธ.ค. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	12.795			16.301	24.749	11.271				
	kg	355			96	149	70				669
ปริมาณก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์											
- ม.ค. ถึง มี.ค. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	727			975	641	279				
	kg	20138			5762	3853	1724				31478
- เม.ย. ถึง มิ.ย. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	208			201	641	491				
	kg	5772			1187	3849	3032				13841
- ก.ค. ถึง ก.ย. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	494			434	540	457				
	kg	13678			2565	3242	2826				22310
- ต.ค. ถึง ธ.ค. ปี พ.ศ. 2541	mg/m^3	491			467	602	525				
	kg	13611			2762	3617	3244				23233

ตารางที่ ค.7 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 3

	Unit	raw mill 1	raw mill 2	cooler 1	cement mill 1	cement mill 2	Total
รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัด							
ประสิทธิภาพของระบบบำบัด	%	99.93	99.93	99.90	99.99	99.99	
ความเร็วก๊าซ	m/s	12.5	12.5	12.7	11	11	
เส้นผ่าศูนย์กลางของปล่อง	m	5.0	5.0	5.5	1.5	1.5	
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/s	245	245	302	19	19	
การคำนวณสารมลพิษจากรายงานผลการตรวจวัด							
ปริมาณฝุ่นแขวนลอย							
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	mg/m^3	29.3	12.5	49.7	4.4	11.9	
	ton	888	379	1296	74	200	**2836**
ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์							
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	mg/m^3			9.48			
	kg			247			**247**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.8 ผลการคำนวณสารมลพิษที่เกิดจากการผลิตปูนซีเมนต์ของโรงงานที่ 4

ตำแหน่ง	Unit	raw mill 6	raw mill 7	raw mill 8	cooler 3	coal mill 5	coal mill 6	cement mill 6	cement mill 7	Total
รายละเอียดของปล่องและระบบบำบัด										
ประสิทธิภาพของระบบบำบัด	%	99.93	99.93	99.93	99.90	99.93	99.93	99.99	99.99	
ความเร็วก๊าซ	m/s	12.5	12.5	12.5	12.7	8.7	8.7	11	11	
เส้นผ่าศูนย์กลางของปล่อง	m	5.0	5.0	5.0	5.5	2.5	2.5	1.5	1.5	
อัตราการไหลของก๊าซ	m^3/s	245	245	245	302	43	43	19	19	
การคำนวณสารมลพิษจากรายงานผลการตรวจวัด										
ปริมาณฝุ่นแขวนลอย										
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	mg/m^3	10.4	11.9	81.3	5.4	2.3	7.7	4.0	5.1	
	ton	315	360	2463	141	12	41	67	86	**3485**
ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์										
- กันยายน ถึง ตุลาคม พ.ศ. 2541	mg/m^3				2.92					
	kg				76					**76**

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นางสาวธิดา ทัศนราพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2518 ที่ อ. เมือง จ.สุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนสิรินธร จ.สุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี ที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย