

การพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติเพื่อทำนายการระบายมลพิษอากาศ
จากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

นางสาวเจติยา ขวัญมา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**DEVELOPMENT OF STATISTICAL MODELS FOR
PREDICTION OF AIR POLLUTANT EMISSION RATES
FROM CEMENT FACTORY**

Jetiya Khwunma

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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

การพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติเพื่อทำนายการระบายมลพิษอากาศ
จากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร. วุฒิ ด้านกิตติกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. สุจิตต์ กรุจิต)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร. จิรียา ยี่มรัตน์บวร)

กรรมการ

(อ. ดร. ภัทรเพชร ยศพล)

กรรมการ

(ศ. ดร. ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร. วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจดिया ขวัญมา : การพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติเพื่อทำนายการระบายมลพิษอากาศจาก
โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ (DEVELOPMENT OF STATISTICAL MODELS FOR
PREDICTION OF AIR POLLUTANT EMISSION RATES FROM CEMENT
FACTORY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต กระจิต, 156 หน้า

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของมลพิษอากาศจำพวกฝุ่นละอองและก๊าซ
ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน งานวิจัยนี้เลือกโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัท
ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ในจังหวัดสระบุรี ในการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิง
สถิติที่ใช้ปัจจัยด้านองค์ประกอบวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตเป็นตัวทำนายการระบายมลพิษอากาศ

การวิจัยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิต รวบรวมข้อมูลและสร้างฐานข้อมูลของตัวแปรที่
กำหนดขึ้น โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายวันของโรงงานในปี 2550 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลด้านวัตถุดิบ
เชื้อเพลิงถ่านหิน เชื้อเพลิงกากอุตสาหกรรมอันตราย กระบวนการผลิต และการปล่อยมลพิษอากาศ
เป็นตัวแปรในแบบจำลอง โดยพัฒนาแบบจำลองด้วยวิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (MR) และ
วิธีโครงข่ายประสาทประคิษฐ์ (ANN) และเปรียบเทียบความสามารถของแบบจำลอง

แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุสำหรับทำนาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP มีค่า
Adjusted R^2 อยู่ในช่วง 0.25-0.61 ส่วนแบบจำลองโครงข่ายประสาทประคิษฐ์มีค่า R^2 อยู่ในช่วง
0.37-0.98 จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุมีค่า R IA และ
RMSE อยู่ในช่วง 0.29-0.83, 0.53-0.94 และ 1.67-11.17 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองโครงข่าย
ประสาทประคิษฐ์มีค่าอยู่ในช่วง 0.45-0.83, 0.60-0.91 และ 1.62-20.70 ตามลำดับ พบว่าตัวแปร
อิสระที่มีอิทธิพลสูงอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทั้งสอง ได้แก่ ปริมาณดินเหนียว ปริมาณหินปูน
ชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุดิบ เชื้อเพลิงทดแทน ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา และปริมาณ
ปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน แบบจำลองโครงข่ายประสาทประคิษฐ์มีประสิทธิภาพดีกว่า
แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ โดยแบบจำลองสำหรับ NO_2 สามารถอธิบายความแปรปรวนของ
มลพิษได้มากที่สุดและมีความถูกต้องสูงที่สุด ส่วนแบบจำลอง TSP มีคุณสมบัติทั้งสองจำกัด
แบบจำลองที่ได้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการจัดการการระบายมลพิษจากโรงงาน อาทิ
การเลือกสภาวะการผลิตหรือสัดส่วนการใช้วัตถุดิบที่สามารถลดการปล่อยมลพิษ หรือการทำนาย
มลพิษที่จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

JETIYA KHWUNMA : DEVELOPMENT OF STATISTICAL MODELS
FOR PREDICTION OF AIR POLLUTANT EMISSION RATES FROM
CEMENT FACTORY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUDJIT
KARUCHIT, Ph.D., 156 PP.

CEMENT/ AIR POLLUTION/ PREDICTION/ NEURAL NETWORK/
REGRESSION/ MODEL

Cement industry is a major source of air pollution such as dust and gases that affect people's health and quality of life. This study selected Siam City Cement in Saraburi Province to develop statistical models for predicting the pollutant emission using raw material components and manufacturing processes data as predictors.

The research started from studying the manufacturing processes, collecting the data, and building the database of the variable. The recorded daily average data of raw materials, coal fuels, hazardous waste fuels, production processes, and air pollutant emission in 2007 were used as variables for developing multiple regression (MR) and artificial neural network (ANN) models. The resulted models were evaluated and compared for their performances.

The MR models for predicting NO₂, SO₂, CO₂, HCl and TSP, have the Adjusted R² values in the range of 0.25-0.61. The ANN models have the R² values in the range of 0.37-0.98. The model validation for the MR models shows the values of R, IA and RMSE in the range of 0.29-0.83, 0.53-0.94 and 1.67-11.17, respectively. The corresponding values for the ANN models are in the range of 0.45-0.83, 0.60-0.91 and 1.62-20.70, respectively. It is also found that the independent variables that

have significant effect on both types of model are quantity of clay, quantity of limestone, raw mill running time, alternative fuels, kiln running time, and quantity of clinker. Overall, the ANN models perform slightly better than the MR models. The NO₂ models have the highest prediction ability and validity, while the TSP models have limited ability. The models are beneficial tools for managing the plant emission, such as selecting production condition or raw material ratio to reduce pollution emission, or predicting future emission in different scenarios.

School of Environmental Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินการวิจัย ซึ่งได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต คุรุจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาส คำปรึกษา แนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงาน วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อ. ดร. วุฒิ ด้านกิตติคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จริยา ยี่มรัตน์บวร อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมา โดยตลอด

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเงินทุนทางการศึกษาแก่ผู้วิจัยอย่างดียิ่งมาโดยตลอดจนได้ทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) บุคลากรทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และความรู้ ในการทำวิจัยนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณณารี กลิ่นกลาง ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาการ จัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และคอยให้คำแนะนำปรึกษาในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีต และปัจจุบันที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และคอยเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เจติยา ขวัญมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทย.....	5
2.1.1 กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก.....	5
2.1.2 กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง.....	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	9
2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	9
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติ.....	9
2.3 การวิเคราะห์ความถดถอย.....	10
2.3.1 ประเภทของการวิเคราะห์ความถดถอย.....	10
2.3.2 การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง.....	11
2.3.3 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	12
2.4 โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks).....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 แนวคิดพื้นฐานของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์.....	13
2.4.2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์.....	15
2.4.3 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์.....	17
2.4.4 โครงข่ายประสาทแบบหลายชั้น (Multilayer Network).....	17
2.4.5 วิธีการแพร่กระจายกลับ (Back - Propagation Algorithm).....	18
2.5 การควบคุมคุณภาพของข้อมูล.....	19
2.6 มลพิษที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้.....	19
2.6.1 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Oxide of Sulfur).....	19
2.6.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen).....	20
2.6.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide).....	20
2.6.4 ฝุ่นละออง (Particulate Matter).....	20
2.6.5 ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen Chloride).....	20
2.6.6 สารประกอบระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds).....	21
2.6.7 แคดเมียม (Cadmium).....	21
2.6.8 ไดออกซิน (Dioxins).....	21
2.7 เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitators).....	23
2.7.1 การทำงานของเครื่อง.....	23
2.7.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการเก็บของเครื่อง.....	26
2.7.3 ตัวอย่างการใช้เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรม.....	27
2.8 ระบบการตรวจวัดมลพิษอากาศอย่างต่อเนื่อง (CEMS).....	28
2.8.1 ส่วนประกอบของระบบ CEMS.....	28
2.8.2 ประเภทของระบบ CEMS.....	28
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.9.1 การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการทำนายมลพิษอากาศ.....	30
2.9.2 มลพิษจากการเผาของเสีย.....	33
2.9.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1	การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	40
3.1.1	ศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์.....	40
3.1.2	กำหนดตัวแปร (Variable).....	40
3.1.3	รวบรวมข้อมูลของตัวแปร.....	42
3.2	การสร้างฐานข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
3.3	การคัดเลือกตัวแปร และการคัดเลือกตัวแปร.....	43
3.3.1	การควบคุมคุณภาพของข้อมูล.....	43
3.3.2	การคัดเลือกตัวแปร.....	44
3.4	การสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ.....	45
3.4.1	การสร้างแบบจำลอง.....	45
3.4.2	การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน.....	45
3.4.3	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	47
3.5	การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทประคิษฐ์.....	47
3.5.1	การเตรียมข้อมูล.....	47
3.5.2	การออกแบบโครงข่าย.....	49
3.5.3	การสอนโครงข่าย.....	52
3.5.4	การตรวจสอบความถูกต้องของโครงข่าย.....	52
3.6	การเปรียบเทียบความสามารถของแบบจำลอง.....	53
4	ผลการศึกษา.....	55
4.1	ผลการศึกษากระบวนการผลิต.....	55
4.1.1	ผลการศึกษากระบวนการเผาปูนซีเมนต์.....	55
4.1.2	กลไกการเกิด และปัจจัยที่มีผลต่อมลพิษอากาศจากเตาเผาปูนซีเมนต์.....	58
4.1.3	กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 สถิติพรรณนาของข้อมูล.....	69
4.2.1 ข้อมูลวัตถุดิบ.....	69
4.2.2 ข้อมูลเชื้อเพลิง.....	69
4.2.3 ข้อมูลสภาพของกระบวนการผลิต.....	76
4.2.4 มลพิษอากาศ.....	78
4.2.5 สรุปผลการศึกษาสถิติพรรณนาของข้อมูล.....	78
4.3 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และการคัดเลือกตัวแปร.....	79
4.3.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	79
4.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษอากาศและตัวแปรอื่น.....	84
4.4 ผลการตรวจสอบความผิดปกติของการระบายมลพิษ.....	86
4.5 ผลการศึกษาแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ.....	91
4.5.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง.....	91
4.5.2 แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุที่เหมาะสม.....	94
4.5.3 อิทธิพลของตัวแปรอิสระ.....	95
4.6 ผลการศึกษาแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์.....	101
4.6.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง.....	101
4.6.1.1 การสร้างแบบจำลอง.....	101
4.6.1.2 การตรวจสอบความถูกต้อง และการคัดเลือกแบบจำลอง ที่เหมาะสม.....	105
4.6.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสม.....	107
4.6.3 อิทธิพลของตัวแปรอิสระ.....	107
4.7 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง.....	112
5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ.....	123
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	123
5.1.1 ผลการศึกษาสถิติพรรณนาของข้อมูล.....	123

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	124
5.1.3 แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุสำหรับทำนายการระบายมลพิษอากาศ.....	125
5.1.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์สำหรับทำนายการระบาย มลพิษอากาศ.....	126
5.1.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง.....	126
5.1.6 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง.....	126
5.1.7 สรุปข้อดี และข้อด้อยของแบบจำลองที่ใช้.....	127
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	127
รายการอ้างอิง.....	129
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน.....	133
ภาคผนวก ข. ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณี.....	143
ภาคผนวก ค. รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	156

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบแบบจำลอง MR และ ANN.....10
2.2	มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบในการผลิต.....22
2.3	ค่าความเร็ว (Effective Migration Velocity) ของฝุ่น.....26
2.4	ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่อง EP ชนิดเก็บฝุ่นแห้ง และขั้วโคโรนาลบ.....27
2.5	สรุปประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 35
3.1	ค่าพารามิเตอร์ในโครงข่าย..... 52
4.1	ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตัวแปรมลพิษ..... 66
4.2	การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 5..... 70
4.3	การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 6..... 72
4.4	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมลพิษอากาศและตัวแปรอิสระที่ศึกษาที่มีความ สัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 5 อันดับแรก..... 80
4.5	สรุปค่าความคลาดเคลื่อนยินยอมที่ 95% และ 99% ของมลพิษทั้ง 5..... 87
4.6	ตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับ NO ₂ ของเตาหมายเลข 5..... 91
4.7	สมการถดถอยเชิงพหุสำหรับ NO ₂ จากเตาหมายเลข 5..... 92
4.8	ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของเตาหมายเลข 5..... 93
4.9	สมการถดถอยเชิงพหุที่เหมาะสมสำหรับมลพิษจากเตาเผาหมายเลข 5..... 94
4.10	สมการถดถอยเชิงพหุที่เหมาะสมสำหรับมลพิษจากเตาเผาหมายเลข 6..... 95
4.11	อิทธิพลของกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อการทำนายมลพิษทั้ง 5 ของแบบจำลอง MR..... 101
4.12	ค่าพารามิเตอร์ในโครงข่าย..... 102
4.13	ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ NO ₂ ของเตาหมายเลข 5..... 106
4.14	แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสมสำหรับเตาหมายเลข 5..... 107
4.15	แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสมสำหรับเตาหมายเลข 6..... 107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.16 อิทธิพลของกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อการทำนายมลพิษทั้ง 5 ของแบบจำลอง ANN.....	112
4.17 ผลเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับเตาหมายเลข 5.....	120
4.18 ผลเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับเตาหมายเลข 6.....	120
4.19 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง.....	121
ก1 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง SO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	134
ก2 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง CO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	135
ก3 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5.....	136
ก4 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5.....	137
ก5 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง NO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	138
ก6 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง SO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	139
ก7 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง CO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	140
ก8 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6.....	141
ก9 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5.....	142
ข1 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ SO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	144
ข2 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ CO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	144
ข3 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ HCl ของเตาหมายเลข 5.....	144
ข4 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ TSP ของเตาหมายเลข 5.....	144
ข5 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ NO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	145
ข6 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ SO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	145
ข7 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ CO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	145
ข8 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ HCl ของเตาหมายเลข 6.....	145
ข9 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ TSP ของเตาหมายเลข 6.....	146

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์..... 6
2.2	การเผาปูนเม็ด..... 8
2.3	โครงสร้างหลักของเซลล์สมอง 1 เซลล์..... 14
2.4	แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบเซลล์สมอง 1 เซลล์..... 14
2.5	การกำหนดน้ำหนักของข้อมูลแต่ละชุด..... 15
2.6	โครงสร้างโครงข่ายใยประสาทประดิษฐ์..... 16
2.7	โครงสร้างโครงข่ายใยประสาทประดิษฐ์แบบหลายชั้น..... 18
2.8	เครื่อง EP แบบเก็บฝุ่นแห้ง และ โคอโรน่าลบ..... 25
3.1	ขั้นตอนการศึกษา..... 41
3.2	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ..... 46
3.3	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทประดิษฐ์..... 48
3.4	โครงข่ายใยประสาทประดิษฐ์ที่มี 3 ชั้น..... 50
4.1	เส้นทางของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์จากการเผาปูนเม็ด..... 55
4.2	เส้นทางการระบายมลพิษอากาศจากเตาเผาซีเมนต์..... 57
4.3	ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์..... 60
4.4	ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์..... 61
4.5	ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์..... 62
4.6	ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์..... 64
4.7	ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของการระบายมลพิษของเตาหมายเลข 5..... 87
4.8	ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของการระบายมลพิษของเตาหมายเลข 6..... 89
4.9	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ NO ₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5..... 93
4.10	อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO ₂ ของเตาหมายเลข 5..... 96
4.11	อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO ₂ ของเตาหมายเลข 5..... 96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	97
4.13 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5.....	97
4.14 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5.....	97
4.15 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	98
4.16 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	98
4.17 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	98
4.18 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6.....	99
4.19 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 6.....	99
4.20 โครงข่ายแบบ 3 ชั้นของเตาหมายเลข 5.....	102
4.21 จุดสิ้นสุดการหยุดสอน.....	105
4.22 แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายการระบาย NO ₂ จากเตาหมายเลข 5.....	106
4.23 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	108
4.24 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	108
4.25 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO ₂ ของเตาหมายเลข 5.....	109
4.26 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5.....	109
4.27 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5.....	109
4.28 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	110
4.29 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	110
4.30 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO ₂ ของเตาหมายเลข 6.....	110
4.31 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6.....	111
4.32 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 6.....	111
4.33 แผนภูมิแท่งแสดงผลการเปรียบเทียบค่า R IA และ RMSE ระหว่างแบบจำลอง ความถดถอยเชิงพหุ และแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์.....	114
4.34 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ของเตาหมายเลข 5.....	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ของเตาหมายเลข 6..... 118
ก1	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ SO ₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5..... 134
ก2	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ CO ₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5.....135
ก3	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ HCl สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5.....136
ก4	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ TSP สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5.....137
ก5	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ NO ₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6.....138
ก6	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ SO ₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6..... 139
ก7	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ CO ₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6.....140
ก8	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ HCl สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6.....141
ก9	แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูป มาตรฐานของ TSP สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6.....142

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

α	=	โมเมนต์
β	=	สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน
ε	=	ความคลาดเคลื่อนอย่างส่วน
η	=	อัตราการเรียนรู้
Σ	=	ฟังก์ชันผลรวม
f	=	ฟังก์ชันซิกมอยด์
%	=	ร้อยละ
Lime	=	หินปูน
ShaleS	=	หินดินดานที่มีซิลิกา
ShaleA	=	หินดินดานที่มีลูมิน่า
Clay	=	ดินเหนียว
AR	=	วัตถุคิบทดแทน
KD	=	ดินกลางดง
LB	=	หินลูกรังชนิด B
Other	=	วัตถุคิบบอื่น ๆ
Coal_B	=	ถ่านหิน (บิทูมินัส ที่มีค่าความร้อนมากกว่า 5,000 แคลอรี/กรัม)
Coal_C	=	ถ่านหิน (บิทูมินัส ที่มีค่าความร้อนน้อยกว่า 5,000 แคลอรี/กรัม)
Lig	=	ลิกไนต์
Ant	=	แอนทราไซต์
R_90	=	เปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุคิบบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 90 ไมครอน
R_200	=	เปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุคิบบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน
HVA	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String A
HVB	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String B
HVC	=	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String C
T	=	อุณหภูมิในเตาเผา
KT	=	กำลังหมุนของเตา

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

O2	=	ปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา
Moist_RM	=	ความชื้นของวัตถุดิบ
Moist_F	=	ความชื้นของเชื้อเพลิง
CaO	=	ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา
KR	=	ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา
RM	=	ชั่วโมงการทำงานของ Raw Mill (รวม 2 หม้ออบค)
CM	=	ชั่วโมงการทำงานของ Coal Mill (รวม 2 หม้ออบค)
CK	=	ปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน
W_01	=	ของเหลวที่เหลือจากระบวนการกลั่น
W_02	=	น้ำหล่อเย็นเครื่องจักร
W_03	=	น้ำจากระบวนการล้าง การผลิต การบำบัด
W_04	=	เชื้อเพลิงทดแทนเหลวสังเคราะห์
W_05	=	ของเหลวที่เป็นตัวทำละลาย
W_06	=	น้ำมันใช้แล้ว
W_07	=	ของเหลวที่ไม่ใช่แล้วชนิดอื่น ๆ
W_08	=	กากตะกอนปิโตรเลียมจากการผลิต และซ่อมบำรุง
W_09	=	กากตะกอนปิโตรเลียมก้นถัง
W_10	=	กากตะกอนจากการขุดเจาะน้ำมัน
W_11	=	กากตะกอนจากการขุดเจาะน้ำ
W_12	=	กากตะกอนไขน้ำมัน
W_13	=	กากที่มีลักษณะหนืด ของเสีย ไม่ได้ใช้งาน
W_14	=	ตะกอนจากการกรองแยกน้ำมันที่ใช้แล้ว
W_15	=	กากตะกอนปิโตรเลียมจากเครื่องแยกน้ำ/น้ำมัน
W_16	=	ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส
W_17	=	กากตะกอนอื่น ๆ
W_18	=	สลัดที่มีค่าความร้อนจากระบวนการขึ้นรูปเหล็ก
W_19	=	กาก จากผลิตผลทางการเกษตร
W_20	=	แกลบ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

W_21	=	กากมันสำปะหลัง
W_22	=	วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของไม้
W_23	=	ขี้เลื่อย และขี้กบ
W_24	=	กากตะกอนขจัดสี และวานิช
W_25	=	ของแข็งที่เหลือจากการขจัดสีหรือวานิช
W_26	=	ดินกรอง/ดูดซับสี และสารปลอมปนในไขมัน จารบี และน้ำมัน
W_27	=	ไคอะทอไมต์ที่ใช้แล้ว
W_28	=	ตัวเร่งปฏิกิริยาหมดอายุ (Spent Catalyst)
W_29	=	ถ่านคาร์บอนมีประจุที่ใช้แล้ว
W_30	=	วัสดุที่ใช้ดูดซับเพื่อทำความสะอาดก๊าซ
W_31	=	ถ่านคาร์บอนดำ
W_32	=	เถ้าน้ำมัน (Oil Ash)
W_33	=	ไอออนเอ็กเชนจ์เรซินที่ใช้แล้ว
W_34	=	เชื้อเพลิงทดแทนแข็งสังเคราะห์
W_35	=	เชื้อเพลิงวัสดุเหลือจากการหมักขยะชุมชน
W_36	=	พอลิเมอร์ และมอนอเมอร์ (ผง เม็ด)
W_37	=	วัสดุขึ้นรูปที่เป็นองค์ประกอบพลาสติก
W_38	=	กากของเสียอื่น ๆ
W_39	=	วัสดุของแข็งมีค่าความร้อนจาก โรงงานผลิตซีเมนต์
W_40	=	แผ่นโลหะบด
W_41	=	เชื้อเพลิงทดแทนบด
W_42	=	เชื้อเพลิงทดแทนผสม
W_43	=	กากตะกอนผสม
W_44	=	กระดาษ
W_45	=	พลาสติก
W_46	=	ผ้า เศษผ้า
NO ₂	=	ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์
SO ₂	=	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
CO ₂	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

HCI	=	ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์
TSP	=	ฝุ่นละออง
Adjusted R ²	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้
ANN	=	แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์
COV	=	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน
IA	=	ดัชนีการยอมรับ
MR	=	แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ
MAPE	=	ค่าร้อยละสัมบูรณ์ความผิดพลาดเฉลี่ย
RMSE	=	ค่ารากที่สองของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย
R	=	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
R ²	=	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
N	=	จำนวนข้อมูล
w	=	ค่าถ่วงน้ำหนัก
x	=	ตัวแปรอิสระ
y	=	ตัวแปรตาม
มก.	=	มิลลิกรัม
ลบ.ม.	=	ลูกบาศก์เมตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

จังหวัดสระบุรีเป็นที่ตั้งของสถานประกอบการโรงงาน โม่บด ข่อยหิน เหมืองหิน และโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ขนาดใหญ่หลายแห่ง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของมลพิษอากาศจำพวกฝุ่นละออง และส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในพื้นที่ (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 7, 2550) การแก้ไขปัญหาหมอกควันมลพิษอากาศในพื้นที่จังหวัดสระบุรี จึงจำเป็นต้องมีการร่วมมือกันในทุกภาคส่วน ในส่วนของผู้ประกอบการนั้น มีแนวทางเลือกในการจัดการคุณภาพอากาศ 3 แนวทางหลัก ได้แก่ การสนับสนุนการกระจายมลพิษ การปรับปรุงด้านกระบวนการผลิตเพื่อลดการระบายมลพิษ และการควบคุมการระบายมลพิษด้วยเครื่องควบคุมมลพิษ (De Nevers, 2000) โดยผู้มีอำนาจตัดสินใจ ควรพิจารณาทางเลือกในทุกแนวทาง และเลือกใช้ประกอบกันอย่างเหมาะสมกับกรณีของตน

การศึกษานี้เลือกโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ในจังหวัดสระบุรี เป็นกรณีศึกษาเพื่อการจัดการด้านการระบายมลพิษอากาศของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โดยปัจจุบันทางโรงงานใช้เครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator, EP) เพื่อดักจับฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ และมีระบบการตรวจวัดปริมาณฝุ่นจากปล่องระบายแบบต่อเนื่อง (Continuous Emission Monitoring System, CEMS) รวมทั้งการรายงานผลผ่านระบบออนไลน์ (บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), 2550) ซึ่งถือว่าเป็นระบบการควบคุมมลพิษอากาศประเภทฝุ่นละอองที่ได้มาตรฐาน

อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลพิษมีความแปรปรวนไปตามลักษณะ และองค์ประกอบของมลพิษที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงในด้านวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตอีกต่อหนึ่ง ในกรณีของโรงงานปูนซีเมนต์นครหลวง วัตถุดิบที่มีส่วนเกี่ยวข้องสำคัญกับการเกิดมลพิษอากาศแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ประเภทของหินที่ใช้ผลิต และประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้กับเตาเผาซีเมนต์ โดยกลุ่มหลังนี้เป็นการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกต่าง ๆ ที่มาจากของเสียอุตสาหกรรม อาทิ น้ำมันหล่อลื่น ตัวทำละลาย ขางรถยนต์ และสารละลายทางเคมี ความแตกต่างในแต่ละช่วงเวลาของวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และสภาวะในกระบวนการผลิตดังกล่าว มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของเครื่อง EP ต่ำกว่าที่ออกแบบได้เนื่องจากฝุ่นที่เกิดขึ้นอาจมี

ความเร็วเข้าหาแผ่นเก็บ (Drift Velocity) ต่ำกว่าค่าที่ใช้ออกแบบซึ่งจะถูกกำจัดออกได้น้อยลง นอกจากนั้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฝุ่นที่เปลี่ยนแปลงไปก็มีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่ำลงได้เช่นกัน (Noll, 1999; นภาพร พานิช และคณะ, 2547)

นอกจากฝุ่นละอองแล้ว การเผาไหม้ยังก่อให้เกิดมลพิษประเภทก๊าซซึ่งไม่ได้ถูกควบคุมโดยเครื่อง EP ดังนั้นการระบายมลพิษจะสัมพันธ์กับเชื้อเพลิงที่ใช้ และวิธีการเผาไหม้ โดยงานวิจัยของ Giannopoulos et. al. (2007) ชี้ว่าการระบายก๊าซ NO_x CO และ VOCs ของโรงงานปูนซีเมนต์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางเลือกประเภทน้ำมันหล่อเย็น (Cutting Oil) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงลักษณะการฉีดเชื้อเพลิง และองค์ประกอบของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่ใช้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Gabel and Tillman (2005) สร้างแบบจำลองกระบวนการวงจรชีวิต (Life Cycle Process Model) ของกระบวนการผลิตซีเมนต์ในประเทศสวีเดน และจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมของการผลิตเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสรุปว่าการจัดการที่เหมาะสมในส่วนของเชื้อเพลิงทางเลือกจากของเสีย และการนำวัตถุดิบกลับมาใช้ใหม่ อาจสามารถลดการระบายมลพิษอากาศทั้งประเภทก๊าซ และฝุ่นละอองลงได้ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 80

จากข้อมูล และเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเสนอทางเลือกเพื่อเสริมประสิทธิภาพการดำเนินงานของเครื่องควบคุมมลพิษที่มีอยู่ในปัจจุบัน บนพื้นฐานของแนวทางการปรับปรุงด้านกระบวนการผลิตเพื่อลดการระบายมลพิษ โดยการศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างข้อมูลด้านองค์ประกอบวัตถุดิบ และกระบวนการผลิต กับการระบายมลพิษอากาศชนิดต่าง ๆ จากปล่องของโรงงาน และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติที่สามารถนำปัจจัยด้านองค์ประกอบวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตมาใช้ในการทำนายการระบายมลพิษอากาศจากปล่องของโรงงานได้ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression, MR) และวิธีโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Network, ANN) ทั้งนี้ แบบจำลอง MR และ ANN เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยเพื่อทำนายค่ามลพิษอากาศจากข้อมูลด้านแหล่งกำเนิด และด้านอณูนิยมนิยาม อาทิ Fuller et al. (2002); Slini et al. (2006); Corani (2005); Perez and Reyes (2006) โดย ANN มีจุดเด่นที่เหนือกว่า MR ที่ไม่จำกัดอยู่ที่สมมุติฐานเชิงเส้น และสามารถทำนายตัวแปรตามได้มากกว่า 1 ตัวแปร อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทั้งสองแบบเพื่อทำนายการระบายมลพิษจากโรงงานปูนซีเมนต์

แบบจำลองที่ได้จากการศึกษาจะเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการด้านคุณภาพอากาศของโรงงานที่ศึกษา ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ และพัฒนาแบบจำลองจะเป็นข้อมูลวิชาการที่มีประโยชน์ต่อการจัดการคุณภาพอากาศของโรงงานปูนซีเมนต์ทั่วไป และสามารถเป็นตัวอย่างสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่จะนำแนวคิด และวิธีการไปใช้ต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างข้อมูลด้านองค์ประกอบวัตถุติด และกระบวนการผลิต กับการระบายมลพิษอากาศชนิดต่าง ๆ จากปล่องของโรงงาน

1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงสถิติที่ใช้ปัจจัยด้านองค์ประกอบวัตถุติด และกระบวนการผลิตเป็นตัวทำนายการระบายมลพิษอากาศจากปล่องของโรงงาน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ และวิธีโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การศึกษานี้พิจารณาโรงงานที่ 3 ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดย ประกอบด้วยเตาเผา 2 เตา คือ เตาหมายเลข 5 และหมายเลข 6

1.3.2 ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ใช้ข้อมูลย้อนหลังที่โรงงานมีบันทึกไว้ในช่วง 1 ปี คือ ปี 2550

1.3.3 มลพิษอากาศที่ทำนาย คือ ฝุ่นละออง (TSP) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl)

1.3.4 ทำการศึกษาพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงสถิติสำหรับการทำนาย โดยใช้วิธีทางสถิติ ดังต่อไปนี้

1) ใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ 2 แบบ คือ แบบสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) และแบบสมการถดถอยไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) โดยทำการคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการความถดถอยเชิงพหุด้วยวิธี Stepwise ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งหมดจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Windows 13

2) ใช้วิธีโครงข่ายประสาทประดิษฐ์แบบไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed Forward) และใช้วิธีการสอนแบบแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error back – propagation algorithm) ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งหมดใช้โปรแกรม NeuroShell

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา

1.4.1 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ในการทำนายความเข้มข้นของ ฝุ่นละออง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ จากกระบวนการผลิตซีเมนต์ เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับประกอบการตัดสินใจ เกี่ยวกับการจัดการเพื่อรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมด้านคุณภาพอากาศของโรงงาน อาทิ การปรับปรุง หรือเปลี่ยนแปลงด้านวัตถุติด และประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ การปรับเปลี่ยนด้านกระบวนการผลิต

เพื่อลดการระบายมลพิษ หรือเพื่อหลีกเลี่ยงสถานะของตัวแปรต่าง ๆ ที่จะก่อให้เกิดการระบายมลพิษสูง

1.4.2 ข้อมูลความสัมพันธ์ และช่วงค่าที่ควรจะเป็นของการระบายมลพิษอากาศ สามารถใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดปกติของกระบวนการ รวมทั้งช่วยในการพิจารณาสาเหตุ และแนวทางควบคุมมลพิษอากาศประเภทก๊าซที่เกิดขึ้น อาทิ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งไม่ได้ถูกบำบัดด้วยเครื่อง EP ด้วย

1.4.3 ผลการศึกษา และพัฒนาแบบจำลองสามารถใช้เป็นข้อมูลวิชาการที่มีประโยชน์กับการศึกษาในกรณีอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศไทย

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ (Cement Manufacturing Process) จำแนกตามลักษณะของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตเป็น 2 วิธีด้วยกัน ได้แก่ กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process) และกรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) (บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด, 2548)

2.1.1 กรรมวิธีการผลิตแบบเปียก (Wet Process)

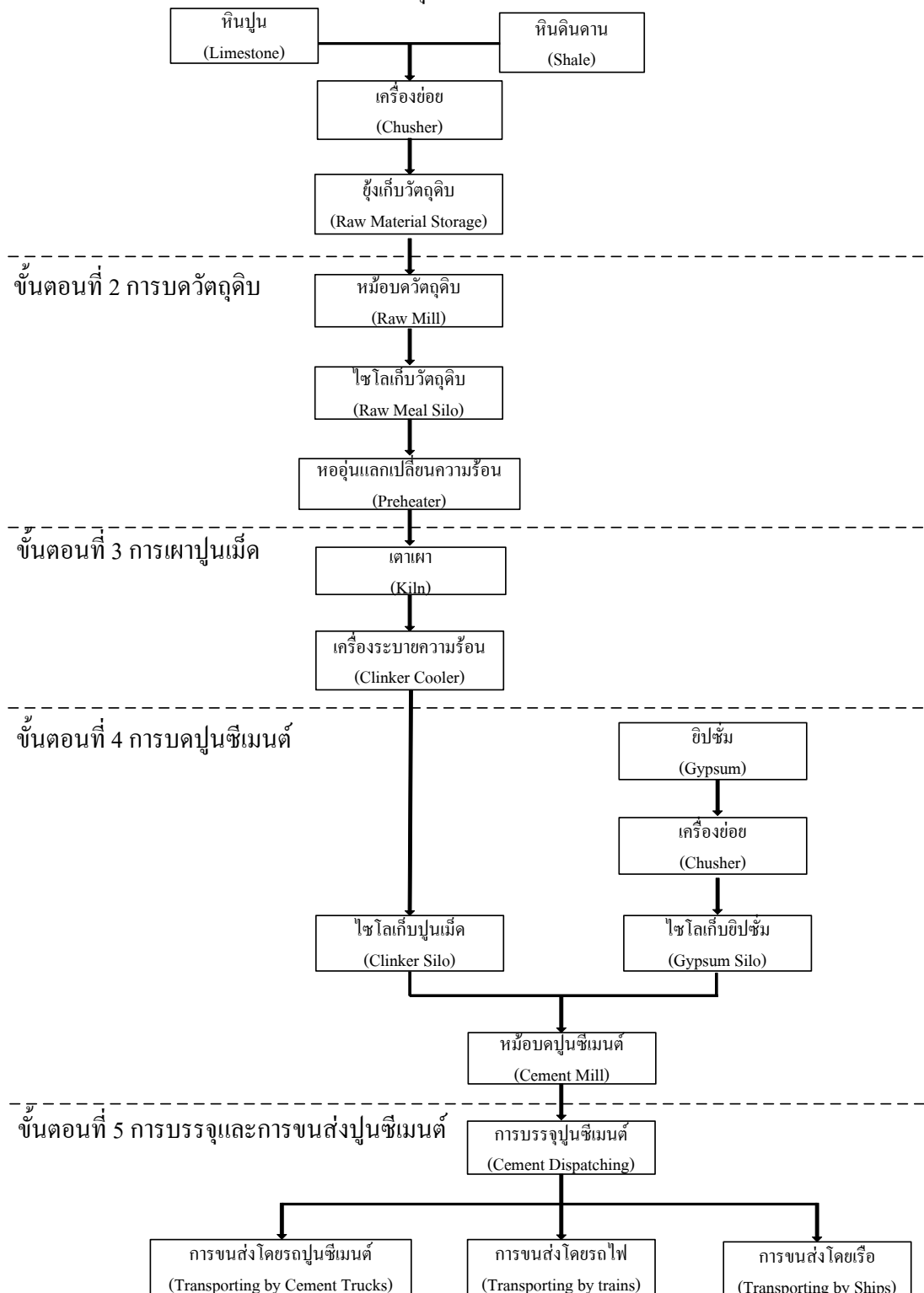
กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูง เช่น ดินขาว (Marl) และดินเหนียว (Clay) มาบดผสมกันในสภาพที่เปียก และเติมน้ำเพิ่มลงไปให้อัตรารส่วนที่พอเหมาะ เพื่อช่วยในการบดผสม วัตถุดิบที่เตรียมเสร็จจะมีน้ำเป็นส่วนผสมประมาณ 30-40% มีลักษณะเหลวและไหลได้เรียกว่า Slurry หลังจากนั้นนำไป ป้อนเข้า หม้อเผา ในสภาพที่มีความชื้นสูง หม้อเผาในกรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง เนื่องจากต้องใช้ความร้อนไล่ความชื้นใน Slurry ออกให้หมดก่อนที่จะเผาต่อเพื่อให้ได้ปูนเม็ดออกมา

2.1.2 กรรมวิธีการผลิตแบบแห้ง (Dry Process)

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติ เช่น หินปูน (Limestone) หินดินดาน (Shale) หินลูกรัง (Laterite) และทราย (Sand) มาบดผสมในสภาพที่แห้ง และในระหว่างการบดจะใช้ลมร้อนที่เหลือจากระบบหม้อเผาช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ วัตถุดิบที่เตรียมเสร็จแล้วจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ (Raw Meal) หลังจากนั้นนำไปป้อนเข้าหม้อเผา ในสภาพที่แห้งเพื่อให้ได้ปูนเม็ดออกมา

กรรมวิธีการผลิตแบบเปียกถือว่าเป็นวิธีที่ล้าสมัย เพราะต้องใช้พลังงานความร้อนสูงจึงเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอย่างมาก ในปัจจุบัน โรงงานปูนซีเมนต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ จึงใช้กรรมวิธีการผลิตแบบแห้งซึ่งเป็นวิธีที่ทันสมัยกว่า เพราะเป็นวิธีที่ใช้พลังงานความร้อนต่ำกว่า จึงช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในการเผาได้ดีกว่า และยังสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ได้ง่ายกว่า จึงทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอมากกว่า นอกจากนี้ ยังมีระบบควบคุมคุณภาพทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ เพื่อความมั่นใจว่าจะสามารถผลิตปูนซีเมนต์ที่มีคุณภาพดี สม่ำเสมอ และได้มาตรฐาน โดยขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังรูปที่ 2.1

ขั้นตอนที่ 1 การทำเหมืองและการเตรียมวัตถุดิบ



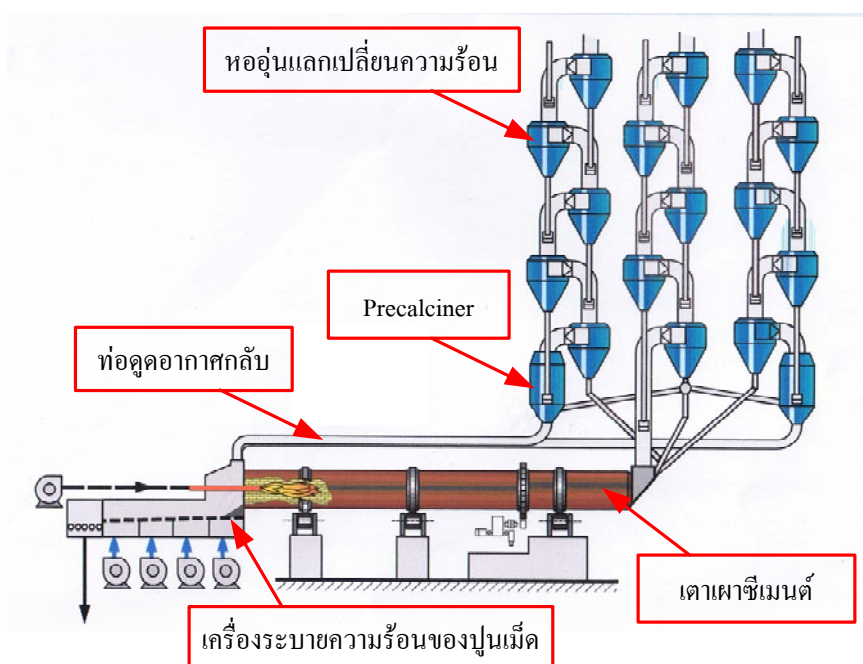
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตปูนซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 1 การทำเหมือง และการเตรียมวัตถุดิบ หินปูน และหินดินดานที่ได้จากการทำเหมืองจะถูกลำเลียงไปยังโรงงาน วัตถุดิบดังกล่าวมีขนาดใหญ่ และขนาดเล็กปะปนกัน วัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่อาจจะมีขนาดใหญ่กว่า 1 เมตร จะต้องนำมาย่อยให้มีขนาดเล็กลง โดยผ่านเครื่องย่อย (Crusher) เพื่อทำให้มีขนาดเล็กลงเหมาะสมกับการใช้ที่หม้อบดวัตถุดิบ (Raw Mill) การย่อยวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลง และมีขนาดใกล้เคียงกันจะทำให้วัตถุดิบแต่ละประเภทมีคุณภาพสม่ำเสมอขึ้น วัตถุดิบที่ผ่านการย่อยแล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บในถังหินปูน ถังหินดินดาน กรณีที่วัตถุดิบจากเหมืองมีคุณภาพเปลี่ยนแปลงมาก และมีสิ่งเจือปน ทำให้คุณภาพไม่แน่นอน ถังวัตถุดิบจะเป็นตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพให้สม่ำเสมอยิ่งขึ้นโดยใช้วิธีการ โปรรยกอง และนำกลับมาใช้ด้วยเครื่องจักรที่ได้รับการออกแบบไว้เฉพาะสำหรับการกองเก็บ ซึ่งจะทำให้วัตถุดิบที่มีคุณภาพต่างกันถูกกระจายออกตามจุดต่าง ๆ ของกองตามรูปแบบที่กำหนด และจะมีเครื่องจักรที่ออกแบบสำหรับโกยวัตถุดิบจากกองออกมาใช้ในลักษณะที่จะช่วยให้เกิดการคลุกเคล้าของวัตถุดิบที่มีคุณภาพต่าง ๆ กันสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้มีคุณภาพสม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่ 2 การบดวัตถุดิบ วัตถุดิบจากกองเก็บวัตถุดิบจะถูกลำเลียงเข้าสู่ถังเก็บ (Hopper) ของหม้อบดวัตถุดิบ วัตถุดิบที่ป้อนเข้าหม้อบดจะต้องควบคุมส่วนผสมโดยใช้เครื่องป้อน (Feeder) วัตถุดิบให้มีส่วนผสมโดยน้ำหนักให้ถูกต้องตามข้อกำหนดแล้วผ่านเข้ากระบวนการบดให้ละเอียด ในระหว่างการบดจะใช้ลมร้อนประมาณ 300 องศาเซลเซียสช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ หม้อบดวัตถุดิบที่ใช้แบบตั้ง (Vertical Mill) จะมีส่วนดีเกี่ยวกับสถานะของลมร้อนที่สามารถปรับให้เหมาะกับการจับฝุ่นในเครื่องจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) นอกจากนั้นยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการด้วย วัตถุดิบที่ผ่านการบด และตรวจสอบคุณภาพเรียบร้อยแล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล (Homogenizing Silo) เพื่อคลุกเคล้าส่วนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในไซโล และพร้อมที่จะนำไปเผาในกระบวนการถัดไป ส่วนวัตถุดิบที่ผ่านการบด และมีขนาดใหญ่มากเกินไป จะถูกเครื่องแยกออกมาเพื่อนำไปทำการบดใหม่อีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 3 การเผาปูนเม็ด (รูปที่ 2.2) จะมีการใช้หม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ผงวัตถุดิบ (Raw Meal) ที่ผสมสัดส่วนถูกต้อง และมีขนาดละเอียดตามต้องการแล้วจะถูกลำเลียงผ่านลมร้อนที่มาจากเตาเผาปูนเม็ด โดยลมร้อนจะวิ่งสวนทางกับผงวัตถุดิบ และถ่ายเทความร้อนให้กับผงวัตถุดิบ และเมื่อพ้นจากส่วนที่เรียกว่าหออุ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Preheater) นี้แล้ว จะมีอุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียสจากนั้นจะผ่านเข้าเตาเผาปูนเม็ดต่อไปจนมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1400–1600 องศาเซลเซียส ในขั้นนี้ผงวัตถุดิบดังกล่าวจะสุก และกลายเป็นปูนเม็ดในที่สุด ปูนเม็ดที่ออกมาจากเตาเผาจะมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,370 องศาเซลเซียส และถูกทำให้เย็นลงในห้องระบายความร้อนของปูนเม็ดด้วยอากาศซึ่งเรียกว่า เครื่องระบายความร้อนของปูนเม็ดซึ่งมี

ลักษณะเป็นห้องต่อกับภายในมีแผ่นตะแกรงเคลื่อนที่เพื่อลำเลียงปูนเม็ดให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยแผ่นตะแกรงจะมีรูพรุนเพื่อให้ลมเย็นผ่านไประบายความร้อนอากาศบางส่วนที่ผ่านชั้นปูนเม็ดซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 800-900 องศาเซลเซียสจะถูกนำกลับไปช่วยในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่อไป อุณหภูมิของปูนเม็ดที่ออกมาจากเครื่องระบายความร้อน จะควบคุมให้มีค่าไม่เกิน 65 องศาเซลเซียสเหนืออุณหภูมิบรรยากาศ



รูปที่ 2.2 การเผาปูนเม็ด

ขั้นตอนที่ 4 การบดปูนซีเมนต์ ปูนเม็ดที่ผ่านการเผา และทำให้เย็นตัวจะผ่านเครื่องย่อยเพื่อย่อยให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 25 มิลลิเมตร แล้วลำเลียงไปยังถังเก็บของหม้อบดปูนซีเมนต์เพื่อบดให้ละเอียดต่อไปในระหว่างการบดจะผสมยิปซัมประมาณ 3-6% เพื่อควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ให้มีคุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด ปูนเม็ด และยิปซัมจากถังเก็บโดยผ่านเครื่องป้อนเพื่อควบคุมน้ำหนักให้ได้ตามที่ต้องการ และมีปริมาณที่พอเหมาะกับการบดของหม้อบด หม้อบดปูนซีเมนต์ที่ใช้มีเครื่องแยก (Separator) เป็นส่วนประกอบเพื่อแยกส่วนที่ละเอียดและส่วนที่หยาบออกจากกัน ส่วนที่หยาบจะถูกส่งกลับเข้าหม้อบดเพื่อบดร่วมกับปูนเม็ด และยิปซัมอีกครั้งหนึ่ง สำหรับส่วนที่ละเอียดจะเป็นปูนซีเมนต์ส่งไปเก็บเพื่อบรรจุ และจำหน่ายต่อไป

ขั้นตอนที่ 5 การบรรจุ และการขนถ่ายปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่ผ่านการบดแล้วจะลำเลียงไปยังถังเก็บปูนซีเมนต์ และพร้อมที่จะจำหน่ายให้กับลูกค้าต่อไป ปูนซีเมนต์จากถังเก็บจะถูกลำเลียง

มาเข้าที่เครื่องบรรจุเพื่อจ่ายให้กับลูกค้าที่ต้องการปูนซีเมนต์สูง ส่วนลูกค้าที่ต้องการปูนซีเมนต์ผก จะรับปูนซีเมนต์ผกได้จากยู่กเก็บปูนซีเมนต์ได้โดยตรง

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ ชุดของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ซึ่งในเรื่องของมลพิษอากาศ มักใช้อธิบายถึงการกระจายตัวของสารมลพิษจากแหล่งกำเนิด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มักจะพบบ่อย ๆ จะอยู่ในรูปแบบของแบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical Model) และแบบจำลองเชิงการทดลอง (Empirical Model) ซึ่งแบบหลังนี้ มักจะอยู่ในรูปของแบบจำลองเชิงสถิติ (Statistical Model) ที่สร้างขึ้นจากสมการถดถอย (Regression Models) ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้คาดคะเนตัวแปรตาม (Dependent Variables) เมื่อกำหนดได้ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) เปลี่ยนแปลงไปในปริมาณต่าง ๆ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีบทบาทสำคัญในการจัดการด้านคุณภาพอากาศ นิยมใช้ในการทำนายความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ เมื่อสารมลพิษทางอากาศถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปพิจารณาวางแผน และกำหนดมาตรการที่เหมาะสมสำหรับการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น พื้นฐานทางทฤษฎีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมลพิษอากาศ มีหลักการที่สำคัญ 2 ประเภท คือ แบบจำลองแบบกล่อง (Box-Model Approach) และแบบจำลองการฟุ้งกระจายของสารมลพิษทางอากาศ (Air Quality Dispersion Model) หรือแบบจำลองของเกาส์เซียน (Gaussian) โดยหลักการในการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ การพยายามที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เคลื่อนที่ และฟุ้งกระจายไปตามอิทธิพลของสภาพทางอุตุนิยมวิทยา กับการปล่อยสารมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิด (วราวุธ เสือดี, 2543)

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติหมายถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้อง โดยแบบจำลองทางสถิติสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) วิธี Neural Network วิธี Principal component Analysis (PCA) วิธี Cluster Analysis เป็นต้น โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Model) เป็นการ

วิเคราะห์ในรูปแบบเชิงเส้นซึ่งเป็นที่นิยมโดยทั่วไป และวิธี Neural Network เป็นการวิเคราะห์ขั้นสูงที่ไม่จำกัดอยู่ที่สมมติฐานเชิงเส้น ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ที่แสดงผลออกมาในรูปแบบฟังก์ชันหรือรูปแบบความสัมพันธ์หรือสมการ เพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา โดยอาศัยความรู้หรือมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับค่าของตัวแปรอิสระเดียวหรือหลายตัว ซึ่งสมการที่ต้องการนั้นควรเป็นสมการที่ค่อนข้างง่าย และสามารถประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านั้นให้ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบความสามารถของแบบจำลองทั้ง 2 ได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบแบบจำลอง MR และ ANN (Zhang, 2003)

MR	ANN
เหมาะกับชุดข้อมูลอนุกรมเวลาแบบเชิงเส้น	เหมาะกับชุดข้อมูลอนุกรมเวลาแบบไม่เชิงเส้น
ความสามารถในการทำนายต่ำ	ความสามารถในการทำนายสูง
ต้องการการแก้ไขเกี่ยวกับค่าที่ผิดปกติ	ใช้กับค่าที่มีการรบกวน และค่าที่ผิดปกติได้ดี
ไม่ต้องการความต่อเนื่องกันของข้อมูลในอดีต	ไม่ต้องการความต่อเนื่องกันของข้อมูลในอดีต

2.3 การวิเคราะห์ความถดถอย

การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะประมาณหรือพยากรณ์ค่าของตัวแปรหนึ่งจากตัวแปรอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์ โดยต้องมีการกำหนดหรือทราบตัวแปรอื่น ๆ ก่อน (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2546)

2.3.1 ประเภทของการวิเคราะห์ความถดถอย

1) การวิเคราะห์ความถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือ ตัวแปรอิสระหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว โดยที่ต้องทราบค่าของตัวแปรอิสระล่วงหน้า โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (2.1)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + e \quad (2.1)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X

X	คือ	ตัวแปรอิสระ
β_0	คือ	ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y เมื่อ X มีค่าเป็นศูนย์
β_1	คือ	ความชันของเส้นตรง หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย
e	คือ	ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

2) การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน หรือเชิงพหุ (Multiple Regressions Analysis)

เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรหลายตัว นั่นคือ ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปสมการเชิงเส้น ดังสมการที่ (2.2)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (2.2)$$

โดยที่ Y	คือ	ตัวแปรตาม เนื่องจากค่าของ Y ขึ้นอยู่กับค่าของ X
X	คือ	ตัวแปรอิสระ
β_0	คือ	ส่วนตัดแกน Y เมื่อ X_1, X_2, \dots, X_k มีค่าเป็นศูนย์
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$	คือ	สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน
e	คือ	ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม

2.3.2 การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ปกติในการวิเคราะห์การถดถอย จะพิจารณาความแตกต่างของค่าที่ทำนายกับค่าจริงที่ได้โดยผลของความแตกต่างดังกล่าว คือ ค่าคลาดเคลื่อน (Residual) ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนจะช่วยให้ผู้ที่นำแบบจำลองไปใช้งานมีความมั่นใจมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเกี่ยวกับค่าคลาดเคลื่อน โดยในการตรวจสอบมี 4 ประเด็นหลัก ๆ คือ

1) ค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนจะต้องเท่ากับศูนย์

2) การตรวจสอบค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนโดยการพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลาดเคลื่อนกับค่า Y ซึ่งหากพบว่า

- ค่าคลาดเคลื่อนกระจายอยู่รอบ ๆ ศูนย์หรือค่าคลาดเคลื่อนมีค่าช่วงใดช่วงหนึ่งแคบ ๆ ไม่ว่า Y จะเปลี่ยนไปอย่างไรในกรณีนี้ถือว่าค่าคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่ และมีความสัมพันธ์กับ Y แบบจำลองที่ได้จึงมีความเหมาะสม

- กรณีที่ค่า Y เพิ่มขึ้นหรือลดลงค่าความคลาดเคลื่อนก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วยแสดงว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนมากหรือค่าความคลาดเคลื่อนไม่คงที่ ดังนั้นแบบจำลองที่ได้จึงไม่เหมาะสม

- 3) ค่าความคลาดเคลื่อนต้องเป็นอิสระกัน
- 4) ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

2.3.3 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

Law and Kelton (1991) อ้างถึงใน ศิวพันธ์ ชูอินทร์ (2544) ที่อธิบายว่าการทดสอบความถูกต้องเป็นการพิสูจน์ถึงความเชื่อมั่นของแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับระบบที่เกิดขึ้นจริงซึ่งวิธีที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้มีอยู่หลายวิธี อาทิ

- 1) การพิสูจน์ยืนยัน (Verification) เป็นการทำให้แน่ใจว่าแบบจำลองมีพฤติกรรมอย่างที่คุณสร้างต้องการหรือตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ เช่น การถามความเห็นจากผู้เชี่ยวชาญหรือการทดลองทางสถิติ เป็นต้น
- 2) การทดสอบความถูกต้อง (Validation) เป็นการทดสอบความสอดคล้องระหว่างพฤติกรรมของแบบจำลองกับพฤติกรรมของข้อมูลจริง โดยอาศัยการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลในอดีต

2.4 โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks)

โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (Artificial Neural Networks : ANN) เป็นแบบจำลองการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะของโครงข่ายเชื่อมโยงกันระหว่างหน่วย ซึ่งสามารถที่จะรับรู้ข้อมูล และปรับตัวเข้ากับสถานการณ์หรือสิ่งแวดล้อมที่กำลังเผชิญอยู่นักวิจัยหลายคนเชื่อว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้ในการสร้างระบบคอมพิวเตอร์อัจฉริยะอย่างได้ผล (Intelligent Computer System) นอกจากนี้ ANN ยังเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ และการจดจำ เช่น การจำแนกข้อมูล (Data Classification) การทำนายเหตุการณ์ (Forecasting) การบีบอัดข้อมูล (Data Compression) การกรองสัญญาณเสียง (Noise Filtering) เป็นต้น ในทางคณิตศาสตร์ ANN อาจมองในแง่ของการเป็น Universal Approximator เนื่องจากความสามารถในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของข้อมูลป้อนเข้า และผลลัพธ์ ซึ่งทำให้สามารถแก้ปัญหาที่ยาก และสลบซับซ้อนได้ (French, 1992)

โครงข่ายประสาทเป็นโครงสร้างเชิงเลียนแบบโครงสร้างของมนุษย์ เป็นความพยายามที่จะทำความเข้าใจในการทำงาน และความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของสมองมนุษย์ การวิจัย ANN ได้เริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1943 แต่ก่อนข้างมีปัญหาในการพัฒนาช่วงแรก จากนั้นในปี ค.ศ. 1956 ถือว่าเป็นจุดเริ่มการใช้งานอย่างเป็นทางการอย่างแท้จริงขึ้น นับจากนั้นได้มีนักวิจัยหลายคนพัฒนาโครงข่ายประสาทขึ้นมาหลายแบบจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1980 ได้เกิดทฤษฎี Back-propagation ขึ้น

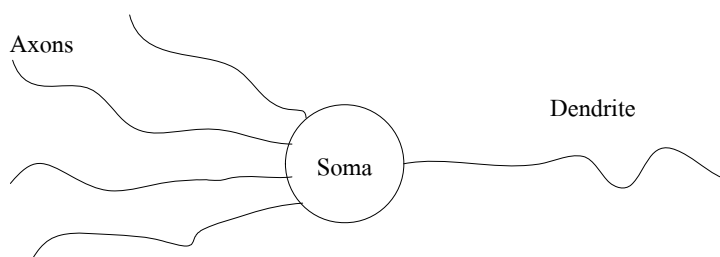
ซึ่งใช้กระบวนการคิดค้นแบบ Multilayer Perceptron (Rumelhart, 1986) ทำให้งานวิจัยทางโครงข่ายประสาทได้รับความนิยมมากขึ้นที่สามารถทำให้หาความสัมพันธ์ของสมการที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้ ซึ่งเหมาะสมกับการจำลองพฤติกรรมที่แปรเปลี่ยนกับเวลา และยังสามารถใช้ได้ดีกับพฤติกรรมที่ไม่จำเป็นจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์ทางกายภาพของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง แต่ไม่ได้หมายความว่าโครงข่ายประสาทไม่คำนึงถึงพื้นฐานความรู้หรือข้อมูลจากประสบการณ์ของระบบ ในทางตรงข้ามโครงข่ายประสาทจะลดความยุ่งยากในการใช้แบบจำลอง ซึ่งสามารถระบุรูปแบบของความสัมพันธ์ที่กำลังค้นหาได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว

สรุปแล้วแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ พัฒนาจากการสร้างระบบสมการคำนวณแบบไม่เป็นเชิงเส้นรวมกันอยู่หลายชั้น ซึ่งสามารถเรียนรู้จากกระบวนการประมวลผลซ้ำ ๆ โดยอาศัยข้อมูลที่ป้อนเข้า และการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละครั้ง (Chester, 1993) โครงข่ายประสาทเป็นกระบวนการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ และกระจายข้อมูลด้วยความเท่าเทียมกัน ระบบมีวิธีที่แน่นอนเหมือนสมองมนุษย์ ใช้ในการประมาณค่าซึ่งระบบจะมีความสามารถในการจดจำการกำหนดความสัมพันธ์ของตัวแปรป้อนเข้า และผลลัพธ์โครงข่ายประสาทสามารถแก้ไขปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมาก ๆ ได้ สรุปข้อดีของการใช้งานระบบโครงข่ายประสาทที่เห็นชัดเจนก็คือ ความสามารถในการแก้ไขปัญหาที่ไม่จำเป็นต้องมีนิยามที่เด่นชัดเหมือนปัญหาเชิงคณิตศาสตร์ทั่วไป ในทางตรงข้ามระบบโครงข่ายประสาทจะแก้ไขปัญหาที่เพียงแต่มีการรวบรวมชุดของตัวอย่างของปัญหา และคำตอบ ระบบจะพยายามปรับปรุงข้อมูลความรู้ภายใน แต่ก็เป็นการยากในการเลือกค่าพารามิเตอร์ เช่น จำนวนของโหนด (Node) ในชั้นซ่อน (Hidden Nodes) อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) และค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) เริ่มต้น ไม่มีทฤษฎีที่จะสามารถบอกได้ว่าจะมีจำนวนโหนดในชั้นซ่อน (Hidden Layer) เท่าไร ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการประมาณค่าเริ่มต้นต่าง ๆ

2.4.1 แนวคิดพื้นฐานของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

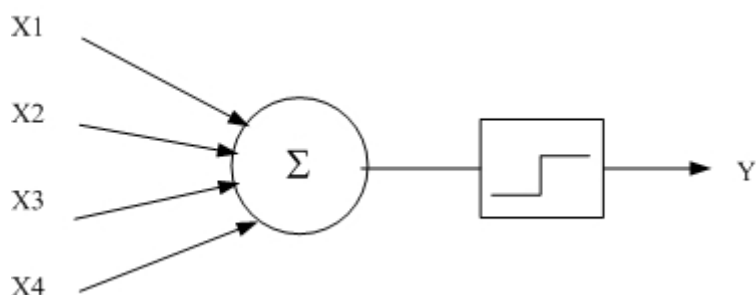
โครงข่ายประสาทหรือนิวรอนเน็ตเวิร์ก เป็นสาขาหนึ่งในด้านการเรียนรู้ของเครื่องที่มีความน่าสนใจ และถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย การทำงานของนิวรอนเน็ตเวิร์กจะอาศัยการเลียนแบบโครงข่ายสมองของมนุษย์ มีส่วนของปลายประสาทรับรู้สัญญาณไฟฟ้า (Dendrite) ตัวรวบรวมข้อมูลที่ได้จากปลายประสาทรับรู้สัญญาณไฟฟ้า (Soma หรือ Cell Body) และท่อส่งข้อมูลเพื่อไปยังปลายประสาทรับรู้สัญญาณไฟฟ้าตัวอื่น ๆ (Axon) ดังรูปที่ 2.3 กล่าวคือ ส่วนของปลายประสาทรับรู้สัญญาณไฟฟ้า เปรียบเสมือนอินพุต (Input) ที่เป็นตัวรับข้อมูลเข้ามา ส่วนของตัวรวมข้อมูลที่ได้จากปลายประสาทรับรู้สัญญาณไฟฟ้าหลาย ๆ ตัวเข้ามา

และส่วนของท่อส่งข้อมูลเพื่อไปยังปลายประสาทรับรู้สัญญาณไฟฟ้าตัวอื่น ๆ ในโครงข่ายต่อไป
ลักษณะของโครงข่ายสมองมนุษย์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างหลักของเซลล์สมอง 1 เซลล์ (ไกรสร จิตธรรม, 2547)

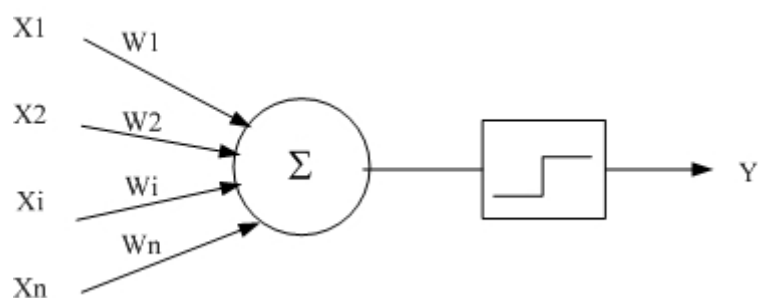
การทำงานของเซลล์สมองนั้นแท้จริงแล้วก็คือ การทำการรับ และส่งสัญญาณ ซึ่งอาจจะมีการแปลงสัญญาณระหว่างทางที่ Soma แล้วจึงสัญญาณไปยังเซลล์สมองอื่น ๆ ต่อไป จากความรู้นี้ก็เพียงพอที่จะนำมาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เลียนแบบเซลล์สมอง 1 เซลล์ (ไกรสร จิตธรรม, 2547)

จากรูปที่ 2.4 แนวคิดของแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเริ่มต้นที่การมีสัญญาณนำเข้า (Input) คือ X จำนวนหนึ่ง (เช่น n สัญญาณ) เข้ามารวมกันอยู่ในที่ ๆ หนึ่ง (ซึ่งแสดงด้วยเครื่องหมาย Sum) แล้วก่อนที่จะยิงสัญญาณนั้นออกไปก็อาจจะมีการแปลงสัญญาณ ซึ่งการแปลงสัญญาณนี้อาจจะกระทำผ่านฟังก์ชันบางอย่าง (ในตัวอย่างแสดงด้วยฟังก์ชันทำนบ) แล้วจึงจะออกมาเป็นสัญญาณส่งออก (Output) คือ Y ที่จะส่งไปยังเป็น Input ของเซลล์สมองตัวต่อไป ต่อมาเมื่อได้แบบจำลองเซลล์สมองแล้ว ก็อาจจะพิจารณาได้ว่าในบรรดาข้อมูลนำเข้าทั้งหลายนั้น

(X) ข้อมูลแต่ละเรื่องอาจมีความสำคัญมากน้อยต่างกัน จึงมีการกำหนดค่าน้ำหนัก (W) ให้กับแต่ละข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้



รูปที่ 2.5 การกำหนดน้ำหนักของข้อมูลแต่ละชุด (ไกรสร จิตธรรม, 2547)

ดังนั้นหลังจากการรวมสัญญาณนำเข้าซึ่งทำการให้น้ำหนักของความสำคัญของข้อมูลแล้วเมื่อนำมารวมกันเข้าทุกข้อมูลก็จะได้เป็นผลลัพธ์ออกมา ดังสมการที่ (2.3)

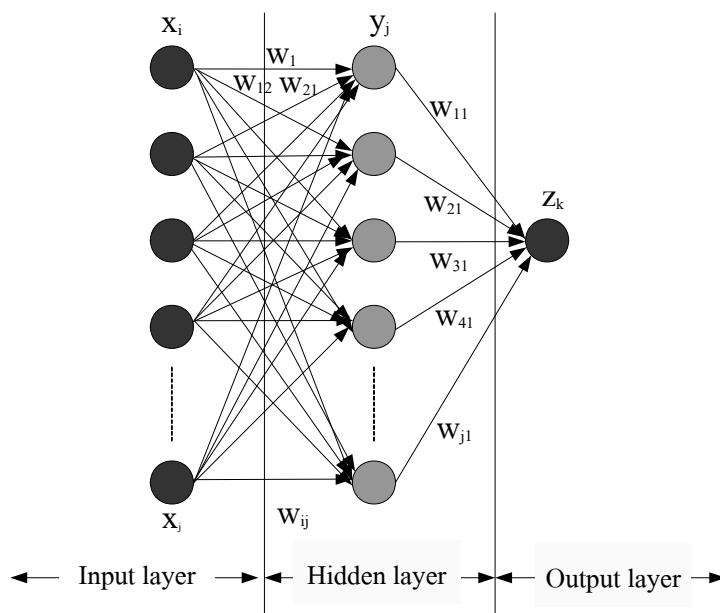
$$w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n = \sum_{i=1}^n w_ix_i = F(x) \quad (2.3)$$

ผลลัพธ์ที่ได้จะต้องนำมาแปลงสัญญาณก่อนที่จะส่งต่อออกไป การแปลงสัญญาณนี้มีเหตุผลอย่างน้อยสองประการ คือ *หนึ่ง* เพื่อที่จะสะท้อนการตัดสินใจบางอย่าง เช่น การสั่งการให้ทำ หรือ ไม่ทำ และ *สอง* เพื่อที่จะจัดระเบียบของสัญญาณนำเข้า ที่เซลล์อื่นจะได้รับต่อไป การเลือกรับ และส่งสัญญาณเป็นเลข 0 กับ 1 ดังนั้นหาก ANN สามารถประมวลผลสัญญาณ 0 และ 1 ได้แล้ว ก็หมายความว่า ANN สามารถที่จะจำลองเอาสรรพสิ่งในโลกจริงเข้ามาประมวลผลได้ทั้งหมด

2.4.2 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

รูปแบบของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (ดังรูปที่ 2.6) จะประกอบด้วยโหนดในแต่ละชั้น และการเชื่อมต่อกันภายในระหว่างชั้น Layer ดังนี้

1) ชั้นข้อมูลป้อนเข้า (Input Layer) จะมีเพียงชั้นเดียว จำนวนโหนด จะมีเท่ากับจำนวนของข้อมูลป้อนเข้า (Input Data) การคำนวณในชั้น Input Node จะเป็นเพียงการแปลงค่าข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เนื่องจากข้อมูลดิบจะเป็นตัวเลขที่มีค่ามาก และหน่วยของข้อมูลมีรูปแบบที่ไม่เหมือนกันจึงต้องแปลงให้อยู่ในรูปแบบ และช่วงของข้อมูลเดียวกัน



รูปที่ 2.6 โครงสร้างโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

2) ชั้นซ่อนหรือชั้นแอบแฝง (Hidden Layer) โดยทั่วไปจำนวนชั้น และจำนวน โหนดจะเป็นเท่าใดไม่มีข้อจำกัดแน่นอนตายตัว แต่ถ้ามีจำนวนชั้น และจำนวน โหนดมาก ๆ จะทำให้การคำนวณช้ามาก (Over Fitting) และผลที่ได้ดีหรือไม่ดีไม่อาจจะทราบได้ และถ้ามีจำนวนชั้น และจำนวน โหนดน้อยเกินไป จะทำให้ผลการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนไม่ลู่เข้าจุดต่ำสุด (Convergent) และผลลัพธ์ที่ได้จะไม่ถูกต้อง ต้องทำการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่าง Neural Network ที่มีจำนวนชั้น Hidden Layer ต่าง ๆ กัน และจำนวน โหนดในชั้น Hidden Layer นั้น ๆ ว่ามีจำนวนเท่าไรจะทำให้การคำนวณได้ผลดีกว่ากัน

3) ชั้นผลลัพธ์ (Output Layer) จะมีชั้นเดียว และจะมีจำนวน โหนดเท่ากับจำนวน Output ที่ต้องการ

การคำนวณของ Artificial Neural Network (ANN) จะอยู่ที่โหนดในชั้น Hidden Layer และชั้น Output Layer เป็นหลัก สำหรับโหนดในชั้น Input Layer จะเป็นเพียงกระบวนการปรับข้อมูล (Data Processing) เท่านั้น โดย Input จะมารวมเข้ากันที่โหนด แล้วผ่านขั้นตอนความสัมพันธ์ ซึ่งมี Connection Weight และค่า Bias ร่วมด้วย

2.4.3 การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

ในการนำ ANN มาประยุกต์ใช้งานนั้นแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการฝึกหัด (Training) หรือเรียนรู้ (Learning) และขั้นตอนการทดสอบ (Testing) หรือใช้งานจริง ซึ่งในขั้นตอนการเรียนรู้นั้นมีการพัฒนา และเสนอรูปแบบจำลองการเรียนรู้ออกมามากมาย ซึ่งพอจะแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1) การเรียนรู้แบบมีครูสอน (Supervised Learning)

การเรียนรู้แบบมีครูสอนต้องมีชุดของตัวอย่างในการปรับสอน (Training Set) เพื่อแสดงพฤติกรรมที่แท้จริงของเครือข่ายประสาทนั้น ๆ เมื่อใส่ตัวแปรป้อนเข้าให้กับ ANN ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกบันทึกไว้ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ต้องการ ว่ามีค่าความผิดพลาดมากน้อยเพียงไร ถ้ามีความผิดพลาดสูงอยู่ จะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก และทำการสอนต่อไปจนกว่าค่าตัวแปรด้านออกมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ต้องการจึงหยุดการสอน โดยการเรียนรู้แบบมีครูสอนจะใช้วิธีการแพร่กระจายกลับ (Back-Propagation) ภายในโครงข่ายประสาทแบบหลายชั้น

2) การเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน (Unsupervised Learning)

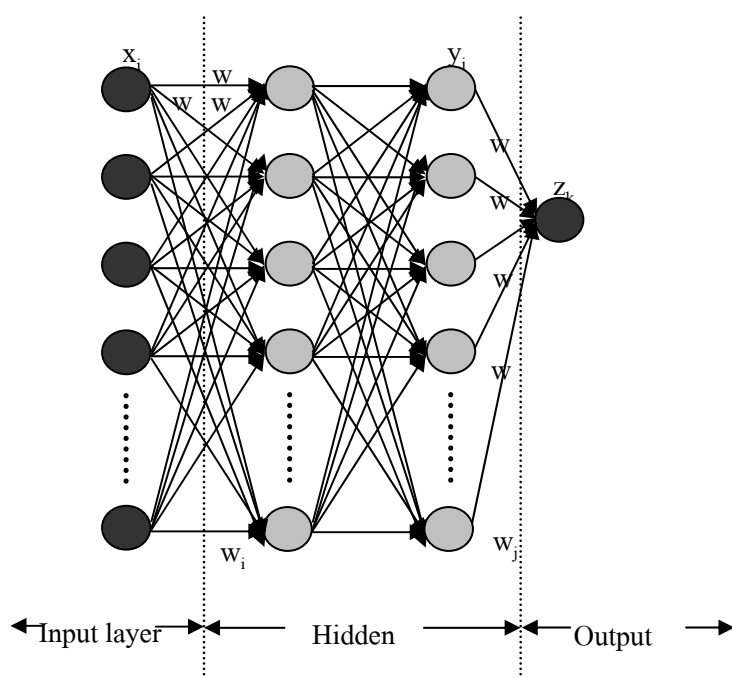
การเรียนรู้แบบไม่มีครูสอนนี้ ค่าถ่วงน้ำหนักจะถูกปรับให้สอดคล้องกับตัวแปรป้อนเข้าเท่านั้น ไม่ต้องใช้ค่าผลลัพธ์ที่ต้องการ ส่วนมากใช้ในงานแบ่งกลุ่ม (Clustering Operation or Network Classifier) ตัวอย่างเช่น มีกลุ่มคนอยู่ 10,000 คน ซึ่งต้องการแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ โดยที่ไม่ทราบว่า จะแบ่งด้วยเกณฑ์อะไรดี ปัญหาอย่างนี้เหมาะกับการเรียนรู้แบบไม่มีครูสอนเป็นอย่างยิ่ง นั่นคือ มีเฉพาะค่าอินพุตเท่านั้น ส่วนเอาต์พุต ANN จะต้องเป็นผู้ระบุให้ เป็นต้น

3) การเรียนรู้แบบเสริม (Reinforcement Learning)

การเรียนรู้แบบเสริมนี้คล้ายกับการเรียนรู้แบบมีครูสอน ยกเว้นแทนที่จะปรับค่าผลลัพธ์ให้เท่ากับผลลัพธ์ที่ต้องการในแต่ละตัวแปรป้อนเข้า แต่จะปรับให้อยู่ในระดับคะแนน (Grade) ที่ต้องการแทนโดยใช้ตัวประเมินผลเป็นตัวปรับค่าผิดพลาด การปรับสอนแบบนี้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานระบบควบคุม

2.4.4 โครงข่ายประสาทแบบหลายชั้น (Multilayer Network)

โครงข่ายประสาทแบบหลายชั้นเป็นโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่สำคัญแบบหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนข้อมูล ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่าชั้นตัวแปรป้อนเข้า (Input Layer) มีส่วนการคำนวณ (Computation Nodes) เรียกว่าชั้นซ่อนหรือชั้นแอบแฝง (Hidden Layers) ซึ่งจะมากมีหนึ่งชั้น และมีส่วนส่งข้อมูลออกจากส่วนการคำนวณเรียกว่าชั้นผลลัพธ์ (Output Layer) และมีรูปแบบการสอนในแบบทิศทางเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Feed forward Network) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโครงข่ายประสาทประคิษฐ์แบบหลายชั้น

โครงข่ายประสาทแบบหลายชั้นได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน และปัญหาที่ไม่คุ้นเคย (Diverse Problems) ด้วยการปรับสอน (Training) ของโครงข่ายประสาทแบบชั้นเดียวได้ วิธีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ วิธีการแพร่กระจายกลับ (Error Back-Propagation Algorithm) ซึ่งวิธีนี้ขึ้นอยู่กับกฎการเรียนรู้เพื่อปรับค่าความผิดพลาด (Error-Correction Learning Rule)

2.4.5 วิธีการแพร่กระจายกลับ (Back - Propagation Algorithm)

วิธีการแพร่กระจายกลับเป็นการแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ ซึ่งประกอบด้วย การส่งผ่านสองแบบระหว่างชั้นของโครงข่ายประสาท คือ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Forward Pass) และการเคลื่อนที่แบบย้อนกลับ (Backward Pass) ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าข้อมูลจะถูกป้อนเข้าสู่โครงข่ายประสาทในชั้นตัวแปรด้านเข้าเคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นแอบแฝงเพื่อคำนวณจนได้ผลลัพธ์ออกมาที่ชั้นตัวแปรด้านออก เมื่อมีตัวแปรด้านเข้าเข้าสู่โครงข่ายประสาทในระหว่างการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อกันระหว่างชั้นของตัวแปรในโครงข่ายประสาททั้งหมดยังคงที่ และระหว่างการเคลื่อนที่ย้อนกลับจะตรงข้ามกัน คือ ค่าของตัวถ่วงน้ำหนักระหว่างชั้นของโครงข่ายประสาทจะถูกปรับเปลี่ยนค่าไปตามกฎการปรับเปลี่ยนค่าความผิดพลาด (Error-Correction Rule) โดยที่ค่าผลลัพธ์ที่ได้ของโครงข่ายประสาทไปลบกับผลลัพธ์ที่ต้องการ (Desired หรือ Target) คือ ค่าความผิดพลาด (Error) ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้จะแพร่กระจายกลับไปยังโครงข่ายตามทิศทางของ

การเชื่อมต่อ ดังนั้นจึงได้ชื่อว่า การแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error Back-Propagation) ค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมต่อไปจะถูกปรับเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายเข้าใกล้ผลลัพธ์ที่ต้องการ

2.5 การควบคุมคุณภาพของข้อมูล

คุณภาพของข้อมูลเป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับการนำข้อมูลมาใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ ดังนั้นในการนำข้อมูลต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ควรจะต้องใช้ความระมัดระวัง เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากที่สุด จึงมีการนำความรู้ทางสถิติเข้ามาช่วยในการควบคุมคุณภาพของข้อมูล เช่น แผนการยอมรับ (Acceptance) แผนควบคุม (Control Chart) โดยแผนการยอมรับจะมีการตั้งเกณฑ์ในการยอมรับหรือปฏิเสธ ส่วนการสร้างแผนควบคุม สามารถทำได้โดยการสร้างแผนภูมิควบคุม ซึ่งแผนภูมิควบคุมทางสถิติจะทำโดยการสร้างขอบเขต นั่นคือข้อมูลที่ไม่ได้มาตรฐานควรจะอยู่ในขอบเขตที่กำหนด การสร้างแผนควบคุม คือ การหาขอบเขตควบคุมบน (Upper Control Limit : UCL) และขอบเขตควบคุมล่าง (Lower Control limit : LCL) ซึ่งข้อมูลที่อยู่นอกขอบเขตของแผนควบคุม (Outlier) จะไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เพราะจะทำให้การวิเคราะห์เกิดความผิดพลาดได้

2.6 มลพิษที่เกิดจากระบวนการเผาไหม้

2.6.1 ออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Oxide of Sulfur)

ออกไซด์ของซัลเฟอร์มักเกิดจากการสันดาปเชื้อเพลิงหรือวัสดุที่มีซัลเฟอร์เจือปนอยู่ เช่น ถ่านหิน น้ำมัน เป็นต้น ปริมาณออกไซด์ของซัลเฟอร์ในบรรยากาศจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง และปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาป ออกไซด์ของซัลเฟอร์ที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ซัลเฟอร์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนให้เปลวไฟสีน้ำเงินเกิดเป็นออกไซด์ของซัลเฟอร์ซึ่งตามปกติแล้วจะเกิดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่าซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในสัดส่วน 40-80 ต่อ 1 หรือประมาณ 95% ของทั้งหมด การเกิดซัลเฟอร์ไตรออกไซด์นั้นมักเกิดในกรณีที่เกิดการสันดาปเชื้อเพลิงไม่ปกติ และเมื่อเกิดขึ้นแล้วมักจะอยู่ในสถานะเป็นแอโรซอลมากกว่าที่จะเป็นก๊าซ แหล่งที่ทำให้เกิดออกไซด์ของซัลเฟอร์ที่สำคัญ ได้แก่ การสันดาปเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์ประกอบอยู่ เช่น ถ่านหิน น้ำมันดีเซล เป็นต้น โรงงานทำกรด โรงงานถลุงโลหะ โรงกลั่นน้ำมัน การหลอมแร่ เป็นต้น (พัฒนา มูลพฤกษ์, 2545)

2.6.2 ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen)

ออกไซด์ของไนโตรเจนประกอบด้วย ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไนตริกออกไซด์ (NO) ไดไนโตรเจนไดรอกไซด์ (N_2O_3) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ไดไนโตรเจนไดออกไซด์ (N_2O_2) ไดไนโตรเจนเตตราออกไซด์ (N_2O_4) และ ไดไนโตรเจนเพนต็อกไซด์ (N_2O_5) ซึ่งส่วนหนึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ก๊าซ ถ่านหิน ฟืน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของออกไซด์ของไนโตรเจนซับซ้อนมาก และขึ้นอยู่กับสารมลพิษอื่น ๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน โอโซน สารประกอบซัลเฟอร์ เป็นต้น รวมทั้งสภาวะทางธรรมชาติ เช่น แสงอาทิตย์ ก็เป็นองค์ประกอบตัวหนึ่งเช่นกัน (นพภาพร พาณิช และคณะ, 2547)

2.6.3 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide)

ข้อมูลจากสถาบันสิ่งแวดล้อมไทย อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ (2550) รายงานว่า ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทย มาจากอุตสาหกรรมซีเมนต์มากเป็นอันดับหนึ่ง คิดเป็นสัดส่วนถึงร้อยละ 75 ซึ่งหมายความว่า ถ้าลดการผลิตซีเมนต์ได้บางส่วน จะสามารถช่วยลดปริมาณการผลิต CO_2 ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ด้วยการผลิตซีเมนต์จำเป็นต้องใช้พลังงานในขั้นตอนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการระเบิด การโม่ และบดหิน

2.6.4 ฝุ่นละออง (Particulate Matter)

ฝุ่นละออง หมายถึง อนุภาคของแข็ง และหยดละอองของเหลวที่แขวนลอยกระจายในอากาศ อนุภาคที่กระจายในอากาศนี้บางชนิดมีขนาดใหญ่ และมีสีดำจนมองเห็นเป็นเขม่า และควัน แต่บางชนิดมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ฝุ่นละอองที่แขวนลอยในบรรยากาศโดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมา ฝุ่นละอองสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ พืช เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือน ทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญต่อประชาชน บดบังทัศนวิสัย ทำให้เกิดอุปสรรคในการคมนาคม ขนส่ง

แหล่งที่มาของฝุ่นละอองในบรรยากาศ โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Natural Particle) ซึ่งเกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านตามธรรมชาติทำให้เกิดฝุ่น เช่น ดิน ทราย ละอองน้ำ เขม่าควันจากไฟฟ้า ฝุ่นเกลือจากทะเล และฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Man-made Particle) ได้แก่ การคมนาคมขนส่ง การก่อสร้าง โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.6.5 ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen Chloride)

เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้สารที่มีองค์ประกอบของคลอรีนที่มีสภาพเป็นกรด เช่น พลาสติก ยาง เป็นต้น รู้จักกันในชื่อสูตรว่า HCl เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ และเยื่อผนังของระบบทางเดินหายใจ และในกรณีที่รุนแรงจะก่อให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ระบบหายใจ

ลึ้มเหลว และอาจเสียชีวิตได้ เป็นก๊าซมีพิษ เมื่อสัมผัสความชื้นจะเกิดควันสีขาว ควันนี้จะประกอบด้วย กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ ไฮโดรเจนคลอไรด์ละลายในน้ำ

2.6.6 สารประกอบระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)

สารประกอบระเหยง่าย (VOCs) ถือเป็น สารมลพิษปฐมภูมิซึ่งเกิดจากการสันดาปเชื้อเพลิงโดยตรง เกิดปฏิกิริยาในชั้นโทรโปสเฟียร์ทำให้เกิดสารมลพิษทุติยภูมิ เช่น โอโซน VOCs ทุกชนิดมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ซึ่งถือเป็นธาตุพื้นฐานที่พบในสิ่งมีชีวิต การที่สารเคมีมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่นั้นเรียกว่า สารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ระเหยออกไปสู่บรรยากาศได้ง่าย

แหล่งที่มาของ VOCs นั้นมักจะเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (เช่น ก๊าซโซลีน น้ำมัน ไม้ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ) เกิดจากสารทำลาย เกิดจากกาวสี (Paint Glue) หรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในบ้านเรือนหรือสำนักงาน รถยนต์ถือว่าเป็นแหล่งก่อให้เกิดสารประกอบระเหยง่ายที่พบบ่อยของ VOCs ได้แก่ เบนซีน ทูโลอิน เมทิลีนคลอไรด์ และ เมทิลคลอโรฟอร์ม

2.6.7 แคดเมียม (Cadmium)

แคดเมียมเป็นธาตุโลหะหนักที่มีสีเงินแกมขาว มีคุณสมบัติเบา อ่อน คัดโค้งได้ง่าย และทนต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้แคดเมียมยังเป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เจือจาง ซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อคนแบบเฉียบพลันเมื่อกินเข้าไป โดยทั่วไปจะไม่ค่อยพบแคดเมียมในรูปของแคดเมียมบริสุทธิ์ แต่มักจะพบในรูปของสารประกอบของเกลือ เช่น แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) แคดเมียมไนเตรต (CdNO_3) แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl_2) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และละลายได้ดีในน้ำ และแคดเมียมยังสามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้

แคดเมียมถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศจากแหล่งธรรมชาติแหล่งใหญ่ คือ ภูเขาไฟ และจากกิจกรรมมนุษย์ ซึ่งแหล่งจากกิจกรรมมนุษย์ คือ การผลิตโลหะ เช่น การทำให้สังกะสีเข้มข้นขึ้นด้วยการอบให้แห้ง การหลอม และการกลั่นสินแร่ที่มีแคดเมียมปนอยู่ตามด้วยการเผาของเสีย และแหล่งอื่น ๆ การสันดาปเชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้มีไอของแคดเมียมออกมาได้ในระหว่างกระบวนการที่มีการให้ความร้อน และไอของแคดเมียมในอากาศจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วไปเป็นแคดเมียมออกไซด์ (CdO) นอกจากนี้แคดเมียมยังเกิดจากฝุ่นจากกระบวนการอุตสาหกรรมบางชนิด เช่น การผลิตซีเมนต์

2.6.8 ไดออกซิน (Dioxins)

ไดออกซิน (Dioxins) เป็นผลิตภัณฑ์ทางเคมีที่เกิดขึ้นมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2550) เป็นสารประกอบในกลุ่มคลอรีเนตเตอะโรมาติก (Chlorinated Aromatic Compounds) ที่มีออกซิเจน (O) และคลอรีน (Cl) เป็นองค์ประกอบ 1 ถึง 8 อะตอม

ไดออกซินมีชื่อเรียกเต็ม คือ โพลีคลอริเนตเตท ไดเบนโซ พาราไดออกซิน (Polychlorinated Dibenzo-para-Dioxins : PCDDs) สารในกลุ่มไดออกซินมีทั้งหมด 75 ชนิด สารประกอบที่คล้ายคลึงกับกลุ่มไดออกซินอีกกลุ่มหนึ่ง คือ ฟูแรน (Furans) หรือมีชื่อเรียกเต็มว่า โพลีคลอริเนตเตท ไดเบนโซฟูแรน (Polychlorinated Dibenzo Furans : PCDFs) มีอยู่ 135 ชนิด สารฟูแรน (PCDFs) แตกต่างจากกลุ่มไดออกซิน (PCDDs) ก็โดยมีออกซิเจนน้อยกว่าอยู่ 1 อะตอม

การสร้างหรือผลิต PCDDs/PCDFs จากการเผาไหม้จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-550 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นสูงสุดของ PCDDs/PCDFs จะมีอยู่ในก๊าซ และเถ้า (Ash) ที่อยู่ในปล่องที่อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นจะลดลงต่ำสุดเมื่ออุณหภูมิลดลงหรือเพิ่มขึ้นที่ประมาณ 275 และ 420 องศาเซลเซียส ตามลำดับแต่ก็ยังมีสารนี้อยู่ในปริมาณต่ำในช่วง 200-275 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 420-550 องศาเซลเซียส โมเลกุลของ PCDDs/PCDFs จะเริ่มถูกทำลาย (Break Down) เมื่ออุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสขึ้นไป และจะถูกทำลายเกือบสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิขึ้นไปถึง 1,100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วินาที อย่างไรก็ตาม PCDDs/PCDFs จะไม่ถูกทำลายอย่างสิ้นเชิงเพราะเมื่ออุณหภูมิลดลงก็จะสร้างขึ้นใหม่อีก

อากาศเสียที่ปล่อยทิ้งจากหม้อเผาปูนของโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบในการผลิต ต้องมีค่าไม่เกินมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากปล่องระบายอากาศตามที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบในการผลิต

ประเภทของอากาศเสียที่ปล่อยทิ้ง และหน่วยวัด	ประเภทของโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็น เชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบในการผลิต	
	โรงงานปูนซีเมนต์เก่า	โรงงานปูนซีเมนต์ใหม่
1. ฝุ่นละออง (TSP) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	120	80
2. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	50	30
3. ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of Nitrogen as NO ₂) (ส่วนในล้านส่วน)	500	500
4. ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen Chloride) (ส่วนในล้านส่วน)	9	9

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือวัสดุคูลิบบในการผลิต (ต่อ)

ประเภทของอากาศเสียที่ปล่อยทิ้งและหน่วยวัด	ประเภทของโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัสดุคูลิบบในการผลิต	
	โรงงานปูนซีเมนต์เก่า	โรงงานปูนซีเมนต์ใหม่
5. ก๊าซไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (hydrogen Fluoride) (ส่วนในล้านส่วน)	3	3
6. สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดในรูปของคาร์บอน (Total Organic Carbon) (ส่วนในล้านส่วน)	30	30
7. สารประกอบไดออกซิน (Dioxin) (นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร I-TEQ)	0.5	0.5
8. ปรอท (Mercury) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	0.1	0.1
9. แคดเมียม (Cadmium) และตะกั่ว (Lead) รวมกัน (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	0.2	0.2
10. พลวง (Antimony) สารหนู (Arsenic) เบริลเลียม (Beryllium) โครเมียม (Chromium) โคบอลต์ (Cobalt) ทองแดง (Copper) แมงกานีส (Manganese) นิกเกิล (Nickel) และวานาเดียม (Vanadium) รวมกัน (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1	1

ที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัสดุคูลิบบในกระบวนการผลิต ลงวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2549 ประกาศใน ราชกิจจานุเบกษาฉบับทั่วไป เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 129ง ลงวันที่ 15 ธันวาคม 2549

2.7 เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitators)

2.7.1 การทำงานของเครื่อง

เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (เรียกย่อว่า ESP/EP) ใช้ในการทำความสะดวกก๊าซที่มีปริมาณการไหลสูง หลักการทำงานในการแยกอนุภาคจากก๊าซด้วยการใช้ไฟฟ้าสถิต แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 1) การใส่ประจุไฟฟ้าให้กับอนุภาค
- 2) การเก็บอนุภาคที่มีประจุโดยใช้แรงไฟฟ้าสถิตจากสนามไฟฟ้า

3) การแยกฝุ่นออกจากขั้วเก็บในเครื่อง EP ไปยังถังพัก

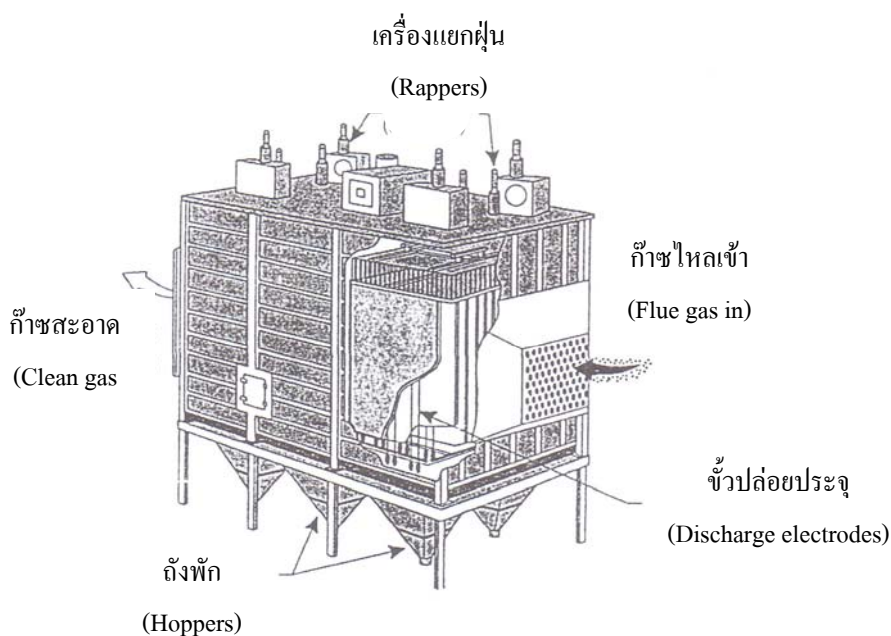
ในการทำงานก๊าซจะไหลทางแนวอนผ่านแถวของแผ่นขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ขนานกัน ตรงกลางระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าแต่ละชุดนั้นจะมีเส้นลวดที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งหุ้มฉนวนไว้ เมื่อความต่างศักย์ระหว่างเส้นลวดถ่ายประจุ (Discharging Electrode) และแผ่นเก็บประจุ (Collecting Electrode) มีค่ามากพอ

ก๊าซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นจะแตกตัวเป็นไอออน ไอออนที่มีประจุลบนี้จะเคลื่อนที่ไปสู่แผ่นเก็บ ขณะที่ไอออนจะชนกับอนุภาคแล้วทำให้อนุภาคนั้นมีประจุลบ เนื่องจากไอออนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคมาก และมีจำนวนมาก เมื่ออนุภาคทั้งหมดผ่านจะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าลบ อนุภาคที่มีประจุลบแล้วนี้จะเคลื่อนที่ไปสู่แผ่นเก็บแล้วถูกยึดอยู่ที่แผ่นเก็บด้วยไฟฟ้าสถิต อนุภาคจะจับกันเป็นชั้นบนแผ่นเก็บ และจะค่อย ๆ ถ่ายประจุลบไปสู่แผ่นเก็บ เมื่อชั้นอนุภาคทับถมขึ้นเรื่อย ๆ ประจุของอนุภาคที่เก็บใหม่จะต้องถ่ายผ่านชั้นของอนุภาคเก่าซึ่งมีความต้านทานอนุภาคที่อยู่ใกล้กับแผ่นเก็บมากที่สุดจะเสียประจุไปเกือบทั้งหมดทำให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างแผ่นเก็บกับอนุภาคเหล่านี้อ่อนลง สุดท้ายชั้นอนุภาคจะถูกทำให้หลุดออกโดยการเกาะแล้วหล่นลงไปถังเก็บ

EP มีประสิทธิภาพสูงในการเก็บอนุภาคฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพถึง 99.5% หรือสูงกว่า ความดันสูญเสียมีค่าต่ำ สามารถรับก๊าซร้อนในปริมาณมากได้ ปัจจุบันใช้ EP อย่างแพร่หลายในการควบคุมมลพิษอากาศของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่ โรงจักรไฟฟ้า และหม้อน้ำ (Boiler) โรงหล่อหลอม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี โรงหล่อหลอมเหล็ก และเหล็กกล้า โรงปูนซีเมนต์ ยิปซัม โรงงานผลิตสารเคมี เช่น กรดซัลฟูริก กรดฟอสฟอริก และอื่น ๆ (นภาพร พาณิช และคณะ, 2547)

ในปัจจุบันเครื่อง EP ที่ใช้มากในอุตสาหกรรม เป็น EP ซึ่งใช้โคโรน่าเป็นขั้วลบ และเก็บฝุ่นแบบแห้ง ซึ่งเป็น Single-Stage Precipitator คือ ขั้วโคโรน่า และขั้วเก็บอยู่ในหน่วยเดียวกัน กรณีนี้เป็นเครื่องที่เก็บฝุ่นแบบแห้ง และใช้ขั้วโคโรน่าเป็นขั้วลบ ส่วน EP แบบเปียกนั้นใช้น้ำเป็นสารชะฝุ่นที่เก็บได้ สำหรับ EP ที่ใช้โคโรน่าเป็นขั้วบวก และเก็บฝุ่นแบบเปียก หรือ Two-Stage Precipitator แยกขั้นตอนการใส่ประจุให้อนุภาคอยู่ใน Preionizer Section ส่วนการเก็บอนุภาคจะอยู่ใน section ถัดไป

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเครื่องดักฝุ่นที่เป็นแบบเก็บฝุ่นแห้ง และใช้โคโรน่าลบ (Dry, Negative Corona) เท่านั้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่อง EP แบบเก็บฝุ่นแห้ง และโคโรนาลบ (นภาพพร พาณิช และคณะ, 2547)

เครื่อง EP มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วน คือ

- 1) ขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrodes) มีลักษณะเป็นเส้นลวด ส่วนใหญ่เป็นเส้นลวดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.25 ซม. ถ่วงด้วยน้ำหนัก เรียงเป็นแนวตรง กึ่งกลางระหว่างขั้วเก็บ (Collection Electrodes) ที่เป็นแผ่นหรือท่อ แล้วใส่แรงดันไฟฟ้าสูง (High Voltage) ให้แก่ขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrodes) เพื่อให้เกิดการแตกตัวเป็น โคโรนา
- 2) ขั้วเก็บ (Collection Electrodes) ส่วนใหญ่ใช้เป็นแผ่น (Plate) เนื่องจากทำให้รับปริมาณของก๊าซได้มาก และได้ประสิทธิภาพสูง
- 3) เครื่องแยกฝุ่น (Rapper) ใช้สำหรับเอาฝุ่นออกจากแผ่นเก็บ (Collection Plate) โครงของขั้วปล่อยประจุ (Discharge Electrode Frame) และจากแผ่นที่ใช้กระจายการไหลของก๊าซ (Gas Distribution Plate) Rapper มี 2 ชนิด คือ ชนิดติดตั้งบนหลังคา (Roof-Mounter Rappers) และแบบติดตั้งบนด้านข้าง (Side-Mounted Rappers)
- 4) ถังพัก (Hopper) ปกติจะมีความชันมาก เพื่อให้ฝุ่นไหลไปที่วาล์วระบายฝุ่น (Solids Discharge Valve) และเข้าสู่ Pneumatic Line ตรงกลางถังพักมีแผ่น (Plate) เพื่อป้องกันมิให้กระแสก๊าซที่ไม่ได้รับการบำบัดไหลผ่านส่วนบนของถังพัก แผ่นนี้เรียกว่า Anti-Sneakage Hopper Baffle นอกจากนี้มี Heater สำหรับทำให้ฝุ่นร้อน เพื่อช่วยในการถ่ายทิ้ง และมี Anti-Sneakage Baffle ที่ผนังด้านข้างของเครื่อง EP ด้วยเพื่อป้องกันก๊าซที่ไม่ได้บำบัดไหลผ่านผนังด้านข้างของ EP

2.7.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการเก็บของเครื่อง EP

พารามิเตอร์ที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการเก็บของเครื่อง EP ได้แก่

- สภาพต้านทางไฟฟ้า (Resistivity) เป็นค่าต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของชั้นฝุ่นที่สะสมอยู่บนผิวของขั้วเก็บ

- ค่าความเร็ว (Effective Migration Velocity) ของฝุ่น เป็นค่าความเร็วของอนุภาคฝุ่นที่เคลื่อนที่เข้าหาแผ่นเก็บ ดังตารางที่ 2.3

- ค่าพื้นที่ผิวของแผ่นเก็บต่ออัตราการไหลของก๊าซผ่านเครื่อง EP ในสภาพการใช้งานจริง (Specific Collection Area : SCA)

- จำนวน Section หรือ Field
- อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูงของแผ่นเก็บ (Aspect Ratio)
- ความเร็วของก๊าซ
- ระยะห่างระหว่างแผ่นเก็บ
- ระยะเวลาในเครื่อง (Treatment Time)

ค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่อง EP แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็ว (Effective Migration Velocity) ของฝุ่น

ชนิดของฝุ่น	ความเร็ว (Effective Migration Velocity) ม./วินาที
Utility Coal-Fired Boiler	4.0-20.4
Pulp and Paper Mill	6.4-9.5
Sulfuric Acid Mist	5.8-7.6
Cement (Wet Process)	10.1-11.3
Cement (Dry Process)	5.8-7.0
Gypsum	15.8-19.5
Open-Hearth Furnace	4.9-5.8
Blast Furnace	6.1-14.0

ที่มา : Theodore and Buonicore (1976) อ้างถึงใน นภาพร พาณิช และคณะ (2547)

ตารางที่ 2.4 ค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่อง EP ชนิดเก็บฝุ่นแห้ง และขั้วโคโรน่าลบ

พารามิเตอร์	ช่วงค่า
ค่าพื้นที่ผิวของแผ่นเก็บต่ออัตราการไหลของก๊าซในสภาพการใช้งานจริง (ลบ.ม./ลบ.ม. ต่อนาที)	1.4-3.5
จำนวน Field	4-10
ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูงของแผ่นเก็บ	1-1.5
ความเร็วของก๊าซ (ม./วินาที)	0.9-1.8
ระยะห่างระหว่างแผ่นเก็บ (ซม.)	9-16

ที่มา : นภาพร พาณิช และคณะ (2547)

2.7.3 ตัวอย่างการใช้เครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรม

1) โรงไฟฟ้าหินกรูด (บริษัท ยูเนียน เพาเวอร์ ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด, 2550)

โรงไฟฟ้าใช้เครื่องกำจัดฝุ่น แบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitators, EP) จำนวน 2 ตัว จะรองรับไอเสียจากหม้อน้ำ แล ออกแบบมาเพื่อกำจัดฝุ่นให้ได้ประสิทธิภาพ 99.25% ฝุ่นที่ออกปล่องจะมีปริมาณไม่เกิน 108 มก./ลบ.ม. ซึ่งดีกว่ามาตรฐาน 120 มก./ลบ.ม. เครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตแต่ละตัวประกอบด้วย โครงหุ้มภายนอกเสริมพิเศษเพื่อให้สามารถทนต่อแรงดันก๊าซซึ่งอาจเป็นบวกหรือลบ และรักษาน้ำหนักเครื่องให้ปิดสนิท ไม่มีก๊าซเล็ดลอดออกมา เครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิตจะจัดเรียงเพื่อให้ไอเสียจากการเผาไหม้ผ่านทางแนวนอน เข้าไปในชุดสนามไฟฟ้าสถิตซึ่งประกอบด้วยแผ่นจ่ายประจุ และแผ่นดักจับฝุ่นวางสลับขนานกันทำงานโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 65 กิโลโวลต์ สนามไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างแผ่นจ่ายประจุลบ และแผ่นดักจับฝุ่น โดยไอออนของก๊าซที่เกิดขึ้นใหม่จะไปกับก๊าซ และจับกับอนุภาคฝุ่นของเข้ได้จากถ่านหินอนุภาคฝุ่นจะได้รับประจุแล้วถูกดูดไปจับกับแผ่นดักจับฝุ่นที่มีประจุบวก มีฉนวนเกาะที่ฐานของแผ่นดักจับฝุ่นแต่ละแผ่นเป็นจังหวะ เพื่อให้ฝุ่นร่วงหล่นลงไปเก็บในถังสำหรับขนไปทิ้งต่อไป

2) บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) (บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), 2550)

บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) ได้ติดตั้งอุปกรณ์ในการดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิตที่เกิดจากการปล่อยออกทางปล่อง (Stack) เพื่อทำการดักจับฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ก่อนที่จะทำการปล่อยสู่บรรยากาศ โดยประสิทธิภาพการทำงานของ EP อยู่ที่ประมาณ 99.95% และได้ติดตั้งระบบการตรวจวัดปริมาณฝุ่นจากปล่องระบายแบบต่อเนื่อง และรายงานผลผ่านระบบออนไลน์ หรือที่เรียกว่า Continuous Emission Monitoring System (CEMS)

ซึ่งมลพิษอากาศที่ระบบ CEMS ทำการตรวจวัดมี 9 ชนิด คือ ฝุ่นละออง (TSP) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO) ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) สารประกอบระเหยง่าย (VOCs) โดยจุดประสงค์หลักของการติดตั้ง CEMS ก็เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของ EP

2.8 ระบบการตรวจวัดมลพิษอากาศอย่างต่อเนื่อง (CEMS)

ระบบการตรวจวัดมลพิษอากาศอย่างต่อเนื่อง (Continuous Emission Monitoring System: CEMS) อาจเป็นระบบ Hardware หรือ Software ก็ได้ ในที่นี้จะอ้างอิงข้อมูลจาก นพภาพร พาณิช และคณะ (2547)

2.8.1 ส่วนประกอบของระบบ CEMS

- 1) ส่วนการเก็บ และส่งตัวอย่าง (Sampling Interface/Sample Delivery System)
- 2) ส่วนการวิเคราะห์ (Analyzer) แบ่งออกเป็น
 - แบบดึงก๊าซไปวิเคราะห์ (Extractive)
 - แบบวิเคราะห์ที่จุดเก็บตัวอย่าง (In-situ)
 - แบบวิเคราะห์ระยะไกล (Remote)
- 3) ส่วนการจัดการข้อมูล (Data Acquisition System)

2.8.2 ประเภทของระบบ CEMS

- 1) ระบบดึงก๊าซไปวิเคราะห์ (Extractive CEMS system)

ระบบนี้เป็นเครื่องมือตรวจวัดประเภทแรกที่ได้รับการพัฒนาในสหรัฐอเมริกา และยุโรป อีกทั้งยังเป็นระบบที่ยังได้รับความนิยมสูงสุดจากโรงงานต่าง ๆ ในระบบนี้ก๊าซจากปล่องควันจะถูกเก็บ และส่งไปสู่เครื่องวิเคราะห์เพื่อวัดความเข้มข้นของมลพิษ หัวใจสำคัญของระบบนี้คือ สภาพของก๊าซตัวอย่างก่อนถูกส่งเข้าเครื่องวิเคราะห์ เครื่องวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ได้ถูกต้องแม่นยำเพียงใดขึ้นอยู่กับสภาพของก๊าซตัวอย่างที่ต้องไม่มีฝุ่นละอองรบกวนการวิเคราะห์ ความชื้นในก๊าซจะต้องถูกกำจัดออก และอุณหภูมิของก๊าซจะต้องลดลงให้เหมาะกับเครื่องมือวิเคราะห์ ฉะนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ ได้แก่ กระจาดกรอง ปั๊มดูดอากาศ เครื่องทำความเย็น เป็นต้น ระบบนี้อาจมีทั้งทำให้ก๊าซเจือจางก่อนทำการวิเคราะห์หรือวิเคราะห์โดยตรงที่ความเข้มข้นก๊าซนั้น

- การทำให้ก๊าซเจือจาง (Dilution CEMS System)

การทำให้ก๊าซเจือจาง เป็นระบบ CEMS แบบแรกที่ได้รับการพัฒนาระบบนี้ในระยะแรก ๆ ใช้เครื่องวัดอัตราไหล (Rota Meter) เพื่อเจือจางก๊าซที่รวบรวมได้ แล้วใช้

เครื่องมือวิเคราะห์อากาศในบรรยากาศ สิ่งสำคัญของระบบนี้ คือ ความคงที่ของอัตราการเจือจางก๊าซ ปัญหานี้ได้รับการปรับปรุงโดยใช้ Dilution Probe ก๊าซจะถูกดึงเข้าสู่ Probe ด้วยอัตราการไหลต่ำกว่า อัตราไหลในปล่อง ประมาณ 100 เท่า ด้วยการเจือจางระดับนี้จะลดปัญหาเกี่ยวกับความชื้น และฝุ่นละอองในก๊าซ Probe ชนิดอื่น ๆ เช่น Internal Coarse Filter หรือ Inertial Filter มีจุดประสงค์เพื่อลดการรบกวนการวิเคราะห์เนื่องจากฝุ่นละอองด้วยการกรองด้วยความเฉื่อย ก๊าซตัวอย่างจะถูกดึงเข้าไปใน Filter Probe ทำมุมกับการไหลของก๊าซในปล่องแรงเฉื่อยของฝุ่นละอองจะทำให้ฝุ่นละอองเปลี่ยนทิศทางออกจากกระแสก๊าซ

- การดึงก๊าซไปวิเคราะห์โดยไม่เจือจาง (Source-Level CEMS System)

ระบบนี้จะดึงก๊าซจากปล่องโดยตรงผ่านกระดาดกรองเพื่อกรองฝุ่นก๊าซที่ผ่านกระดาดกรองจะเข้าส่วนวิเคราะห์โดยตรง วิธีนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

- Hot-Wet System ระบบนี้ท่อส่งตัวอย่างไปยังส่วนวิเคราะห์จะถูกทำให้ร้อน มีกระดาดกรองหยابที่ Probe เพื่อกรองฝุ่นก่อนเข้าส่วนวิเคราะห์ ระบบนี้นิยมใช้สำหรับก๊าซที่ละลายน้ำได้ เช่น HCl และ NH₃ ข้อควรระวังของระบบนี้ คือ ต้องไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในท่อส่งตัวอย่างนี้

- Cool-Dry System ระบบนี้ใช้กระดาดกรอง และเครื่องแยกความชื้น รวมทั้งมีระบบควบคุมอุณหภูมิให้ก๊าซที่จะส่งไปวิเคราะห์มีลักษณะเย็น และแห้ง ระบบปรับสภาพก๊าซนี้อาจติดตั้งอยู่ใน Probe หรือที่ส่วนวิเคราะห์ ระบบปรับสภาพก๊าซที่ Probe จะช่วยให้ลดความจำเป็นที่ต้องใช้ท่อส่งตัวอย่างที่ร้อน

2) ระบบวิเคราะห์ที่จุดเก็บตัวอย่าง (In-Situ CEMS System)

ระบบนี้จะเป็นการวิเคราะห์ ณ จุดเก็บตัวอย่างหรือที่ปล่องโดยตรง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการเก็บก๊าซ (Extraction) การเจือจาง (Dilution) และปัญหาการควบคุมสถานะก๊าซที่จะนำไปวิเคราะห์ ซึ่งพบใน Extractive CEMS เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัด จะออกแบบให้ตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซในขณะที่มีฝุ่นละออง และความชื้น In-Situ CEMS ประกอบด้วยส่วนวิเคราะห์ที่มีตัวรับสัญญาณ (Sensor) สำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซในปล่องโดยตรง หรือแสงจากตัวกำเนิดแสงจะถูกส่องผ่านตลอดหน้าต่างปล่องเพื่อตรวจวัดก๊าซในปล่อง เครื่องตรวจวัด แบบ In-Situ จำแนกได้เป็นแบบ Point Monitor และ Path Monitor

ระบบ In-Situ มีข้อได้เปรียบ และข้อจำกัด คือ วิธีนี้เหมาะสำหรับการตรวจวัดก๊าซมลพิษที่ความเข้มข้นมากกว่า 500 ส่วนในล้านส่วน วิธี Single-Path ใช้ในการตรวจวัดก๊าซหลายชนิดพร้อมกันได้ แต่ก็ถูกจำกัดด้วยราคา ที่แพงกว่าระบบ Extractive 3-4 เท่า

3) Predictive Emission Monitoring System (PEMS)

ระบบนี้ถูกนำออกมาใช้งานเมื่อเร็ว ๆ นี้ ซึ่งเป็นการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ (Neural Net) ในการคาดการณ์ประมาณมลพิษที่เกิดขึ้น โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยมลพิษ และข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิต ระบบนี้เป็นการติดตามตรวจวัดมลพิษที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิด เนื่องจากใช้หลักการความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างสัญญาณบันทึกข้อมูลการผลิต และพยากรณ์ความเข้มข้นของก๊าซในปล่องโดยตรง โดยเทคโนโลยีนี้ พัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว รูปแบบของเทคนิคนี้เกิดใหม่ ๆ ทุกปี ทำให้ระบบ PEMS กำลังเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อใช้แทนระบบ CEMS

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ในการทำนายมลพิษอากาศ

Brunelli et al. (2006) ได้ทำการใช้โครงข่ายประสาทในการจำลองสถานการณ์ในการปล่อยมลพิษทางการจราจรในเมือง Palermo ประเทศอิตาลี โดยนำโครงข่ายประสาท 2 วิธี มาใช้เปรียบเทียบกัน คือ วิธี Multilayer Perceptron (MLP) และวิธี Elman Neural Network โดยใช้ข้อมูลจากค่าความเข้มข้นสูงสุดประจำวันของ SO_2 , O_3 , PM_{10} , NO_2 และ CO จากจุดตรวจวัด 8 จุด ในเมือง Palermo ในช่วงเวลาระหว่าง 1 มกราคม 2003 ถึง 31 ธันวาคม 2004 มาเป็นตัวทำนายในแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดจริงจากจุดตรวจวัด โดยใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) Mean Absolute Error (MAE) และ Mean Square Error (MSE) และช่วงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.72-0.97 ในการทำนายมลพิษ จากผลการทำนายพบว่า แบบจำลอง Multilayer Perceptron (MLP) นั้นให้ค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการตรวจวัดจริงจากจุดตรวจวัดในช่วงเวลาเดียวกันมาก แบบจำลอง Multilayer Perceptron (MLP) จึงเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญมากสำหรับระบบการจัดการมลพิษเป็นอย่างมาก

Grivas and Chaloulakou (2005) ได้พัฒนา Neural Network เพื่อทำนายค่าระดับ PM_{10} เป็นรายชั่วโมงใน Greater Athens Area (GAA) ประเทศกรีซ ซึ่งมีการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่แบบจำลอง 3 ลักษณะ โดยใช้ Genetic Algorithm มาช่วยในการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสม และได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Multiple Regression พบว่า ค่าสถิติทดสอบ r^2 และ Index of Agreement สำหรับ Neural Network มีค่าอยู่ในช่วง 0.50-0.67 และ 0.80-0.89 ตามลำดับ ส่วนค่า r^2 สำหรับ Multiple Regression พบว่าอยู่ในช่วง 0.29-0.35

Hooyberghs et al. (2005) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นเฉลี่ยรายวันของ PM_{10} ในประเทศเบลเยียม โดยใช้โครงข่ายประสาทแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนเป็น

เครื่องมือในการทำนายระดับความเข้มข้น PM_{10} เฉลี่ยรายวันในวันถัดไปโดยใช้ข้อมูลในปี 1997-2001 ของสถานีตรวจวัด 10 สถานี โดยมีข้อมูลความเข้มข้นของ PM_{10} เฉลี่ยรายวัน และข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา และอยู่ภายใต้ขอบเขตความเข้มข้นของ PM_{10} เฉลี่ยรายวันที่ 100 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยได้ออกแบบแบบจำลองเป็น 2 แบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน และเปรียบเทียบกับแบบจำลองปกติ โดยแบบจำลองปกติจะใช้ข้อมูลเฉพาะค่าความเข้มข้นของ PM_{10} เฉลี่ยรายวันจากการตรวจวัด แบบจำลองที่ 1 ใช้ค่าความเข้มข้นของ PM_{10} เฉลี่ยรายวันจากการตรวจวัดกับสภาพอากาศจากการทำนาย ส่วนแบบจำลองที่ 2 ใช้ค่าความเข้มข้นของ PM_{10} เฉลี่ยรายวันจากการตรวจวัด กับทิศทางลม ปริมาณเมฆ สภาพอากาศจากการทำนาย และวันของสัปดาห์ ใช้ในการทำนาย ผลจากการศึกษาพบว่า Correlation Coefficient (R) ของแบบจำลองที่ 2 สูงกว่า แบบจำลองที่ 1 และสูงกว่าแบบจำลองปกติ และค่า Root Mean Square Error (RMSE) ของแบบจำลองที่ 2 ต่ำกว่าแบบจำลองที่ 1 และต่ำกว่าแบบจำลองปกติ Success Index (SI) แบบจำลองที่ 2 สูงกว่าแบบจำลองที่ 1 และสูงกว่าแบบจำลองปกติ สรุปได้ว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับสภาพทางอุตุนิยมวิทยา และแหล่งกำเนิดของมลพิษ

Jiang et al. (2003) ได้พัฒนา Neural Network แบบ Multilayer Perceptron โดยมีวิธีการเรียนรู้แบบ Backpropagation สำหรับการนำมาใช้ในการทำนายดัชนีมลพิษอากาศ (Air Pollution Index, API) เป็นรายวันในกรุงเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน โดยที่ข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลองจะเป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา คือ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ทิศทางลม และปริมาณน้ำฝน ซึ่งสามารถทำนายค่า PM_{10} , SO_2 และ NO_2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ 0.6056, 0.6993 และ 0.6300 ตามลำดับ

Kukkonen et al. (2003) ได้ทำนายการเกิด NO_2 และ PM_{10} ที่เมืองเฮลซิงกิ ประเทศฟินแลนด์ โดยใช้ Neural Network การศึกษาจะใช้ข้อมูลทุติยภูมิ คือ ปริมาณการจราจรในพื้นที่ และข้อมูลทางด้านอุตุนิยมวิทยา ในช่วงปี 1996 ถึง 1999 และใช้ค่าทางสถิติเป็นตัววัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง คือ Index of Agreement (IA) The Squared Correlation Coefficient (R^2) และ Fractional Bias ซึ่งพบว่า การใช้ Neural Network สามารถให้ค่า IA และ Standard Deviations อยู่ในช่วง $0.867+0.02$ ถึง $0.917+0.01$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้ Neural Network เหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาแบบจำลองในการทำนายค่าระดับมลพิษอากาศในเขตเมือง

Li and Shue (2004) ได้ประยุกต์ใช้ Neural Network ในการศึกษาการหารูปแบบการกระจายตัวของมลพิษอากาศเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขนโยบายการจัดการมลพิษอากาศในประเทศไต้หวัน พบว่าสามารถศึกษารูปแบบการกระจายตัวของ PM_{10} ได้ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 7 กลุ่ม

กระจายอยู่ทั่วสภาพทางภูมิศาสตร์ของประเทศ จากการเก็บรวบรวมข้อมูลในระยะเวลา 1 ปี จากสถานีตรวจวัดเป็นจำนวน 71 สถานีทั่วประเทศ

Slini et al. (2005) ได้ทำการทำนายความเข้มข้นของ PM_{10} เมือง Thessaloniki ประเทศกรีซ ซึ่งเป็นเมืองที่มีระดับมลพิษทางอากาศสูงในเขตเมือง เนื่องจากมีปริมาณการจราจรและกิจกรรมด้านอุตสาหกรรมคับคั่ง โดยการศึกษาได้ประยุกต์ใช้วิธีทางสถิติสร้างแบบจำลองสำหรับทำนาย PM_{10} ณ สถานีตรวจวัดแบบถาวร โดยเปรียบเทียบวิธีทางสถิติ คือ วิธี Classification And Regression Trees (CART) วิธี Neural Network (NN) วิธี Linear Regression Analysis (LRA) และวิธี Principal Component Analysis (PCA) โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดความเข้มข้นของ PM_{10} ในปี 1994-2000 จากผลการทำนาย พบว่า ค่าความเข้มข้นที่ได้มีความแปรปรวนสูง อาจเนื่องจากค่าความเข้มข้น PM_{10} มีความแปรปรวนสูงมาก จึงทำให้ผลการทำนายของแต่ละวิธีมีแตกต่างกันมาก ซึ่งวิธี Neural Network เป็นวิธีที่ทำนายได้แม่นยำมากที่สุด แต่หากนำวิธีต่าง ๆ มาใช้ร่วมกัน จะทำให้ได้ผลการทำนายที่แม่นยำมากกว่าการแยกวิธีทำนาย

ศรัลย์ ปานศรีพงษ์ (2550) ได้ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์แบบไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed Forward) โดยใช้วิธีการสอนแบบแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error back – propagation algorithm) และแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ เพื่อทำนายความเข้มข้นของ PM_{10} ในเขตกรุงเทพมหานคร และในเขตเทศบาลนครนครราชสีมา โดยใช้ข้อมูลมลพิษทางอากาศ และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจวัดบริเวณพื้นที่ทั่วไปในเขตกรุงเทพมหานคร 4 สถานี และในเขตเทศบาลนครนครราชสีมา 1 สถานี ในช่วงปี 2543-2547 เพื่อทำนายค่าความเข้มข้นของ PM_{10} ในวันรุ่งขึ้น ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้วิธีทางสถิติ 4 วิธี คือ วิธี Root mean square error (RMSE) วิธี Correlation (R) วิธี Factor of two และวิธี Index of Agreement (IA) จากผลการศึกษาพบว่า ผลการทำนายด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์สามารถให้ผลทำนายที่แม่นยำกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ

Diaz-Robles et al. (2008) ทำการทำนายอนุภาคฝุ่นในพื้นที่เมืองของเมืองเทมูโก ประเทศชิลี โดยการศึกษาได้ประยุกต์ใช้วิธี Auto regressive Integrated Moving Average (ARIMA) Multi linear regression (MLR) Artificial neural networks (ANN) และ ARIMA ร่วมกับ ANN (hybrid model) ซึ่ง ARIMA และ MLR ถูกประยุกต์ใช้ในการทำนายคุณภาพอากาศในเมือง แต่มีความแม่นยำที่จำกัดในการทำนายผลที่ผิดปกติ ส่วน ANN สามารถทำนายข้อมูลไม่เชิงเส้นที่ผิดปกติได้ ผลการศึกษาพบว่า hybrid model มีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด แม้จะข้อจำกัดด้านคุณภาพอากาศ และข้อมูลทางภูมิศาสตร์

Cai et al. (2009) ประยุกต์ใช้ ANN เพื่อทำนายความเข้มข้นมลพิษอากาศรายชั่วโมง ใกล้เคียง ๆ กับทางหลวง ในกวางเจา ประเทศจีน โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาแยกออกเป็น 4 กลุ่ม คือ ความหนาแน่นของการจราจร ความเข้มข้นเดิม อุณหภูมิอากาศ และลักษณะทางภูมิศาสตร์ โดยข้อมูลที่ใช้เป็นค่าเฉลี่ยทุก ๆ ชั่วโมง จาก 3 จุดตรวจวัด ใกล้เคียงกับทางหลวงหลัก เพื่อทำนายความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ อนุภาคฝุ่น และ โอโซน โดยแบบจำลองที่ใช้คือ Artificial Neural Network (ANN) Multiple linear regression Models (MR) และ California line source dispersion model (CL4) จากการศึกษพบว่า ความเข้มข้นมลพิษอากาศใกล้ทางหลวงหลัก มีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่าง ๆ และ ANN มีความแม่นยำมากกว่า MR และ CL4 ซึ่ง ANN ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึง ความทนทาน และแปลงค่าได้ดี ให้ผลการทำนายที่ดี

2.9.2 มลพิษจากการเผาของเสีย

Gabel and Tillman (2005) ได้ทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองกระบวนการวงจรชีวิต (Life Cycle Process Model) ของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จากโรงงานปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในสวีเดน มีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์หาทางเลือกของแบบจำลองที่เหมาะสมในการพัฒนาอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในอนาคต และเพื่อวิเคราะห์ทางเลือกที่เหมาะสมของการผลิตเพื่อลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยทำการจำลองสถานการณ์ขึ้นมา 9 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบกันระหว่าง รูปแบบที่ใช้ปกติ กับอีก 8 รูปแบบ ที่ได้จากการนำของเสียมาใช้ร่วมเป็น วัตถุดิบทดแทน เชื้อเพลิงทางเลือก และส่วนผสมทดแทนที่เพิ่มในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มาใช้เป็นข้อมูลในการศึกษา และใช้สมการการผสม 3 สมการคือ Lime saturation factor = $(100CaO)/(2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3)$, Silica ratio = $(SiO_2)/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ และ Alumina ratio = $(Al_2O_3)/(Fe_2O_3)$ เป็นปัจจัยช่วยในการศึกษา ผลจากการศึกษาสรุปว่าการจัดการที่เหมาะสมในส่วนของเชื้อเพลิงทางเลือกจากของเสีย และการนำวัตถุดิบกลับมาใช้ใหม่อาจสามารถลดการระบายมลพิษอากาศทั้งประเภทก๊าซ CO_2 , NO_x , SO_2 , CO , VOCs, CH_4 และฝุ่นละอองลงได้ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 80

Giannopoulos et al. (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำของเสีย คือ น้ำมันหล่อเย็น (Cutting oil emulsions) มาเผาไหม้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ ต้องการหาผลกระทบด้านมลพิษอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันหล่อเย็นที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยขอบเขตของงานวิจัยจะให้ความสำคัญกับ NO_x เป็นมลพิษหลัก และมลพิษอื่น ๆ เช่น CO และ VOC ที่มีความสัมพันธ์ควบคู่กับเชื้อเพลิง และกระบวนการเผาไหม้ โดยใช้แบบจำลองจลศาสตร์ของเตาปฏิกรณ์แบบหมุนสมบูรณ์ (Perfectly Stirred Reactor, PSR) แบบเตาเดี่ยว โดยกำหนดสถานะการเผาไหม้ของการเผาไหม้ในเตาเผาซีเมนต์ และ Precalciner ตลอดจนกำหนดสถานะเชื้อเพลิงเป็นแบบเชื้อเพลิงผสม โดยผสมถ่านหิน Petcoke และน้ำมันหล่อเย็น

ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการเผา น้ำมันหล่อเย็นร่วมไปในกระบวนการผลิตแล้ว ทำให้ระดับของ NO_x ลดลงมากถึง 50% ส่วน CO และ VOCs กลับไม่ได้รับผลกระทบกับการใช้น้ำมันหล่อเย็น แต่จะขึ้นอยู่กับเตาเผา และสภาวะที่เผา นั่นคือ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงลักษณะการฉีดเชื้อเพลิง และองค์ประกอบของไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่ใช้

นอกจากนั้น Giannopoulos et al. (2007) ยังได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำน้ำมันหล่อเย็น มาเผาพร้อมในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์อีก 1 งาน โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการหาการเกิดสารก่อมะเร็ง ที่เกิดจากการเผาของน้ำมันหล่อเย็นที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยจะให้ความสำคัญกับสารก่อมะเร็งจำพวก Polychlorinated Dibenzop-Dioxins (PCDD) Polychlorinated Dibenzofurans (PCDF) และทั้งโลหะหนัก โดยเริ่มจากการสำรวจหาแหล่งกำเนิดในสารแต่ละอย่างในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ แล้วนำมาทำนายหาการก่อตัว โดยการทำนายการก่อตัวของสารจำพวก Dioxins นั้นใช้แบบจำลองจลศาสตร์ในการก่อตัวของสารเคมีจำพวก dioxins ที่เกิดขึ้นใน Precalciner และการทำนายการก่อตัวของ Furans ใช้การพยากรณ์จากอัตราการใช้เชื้อเพลิงกับอุณหภูมิ ทำนายการก่อตัวของ PCDD/F ในต่อมลำดับที่ 3 ส่วนโลหะหนักนั้นทำนายจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับน้ำมันที่ใช้มาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ปล่อยออกจากปล่องของเตาเผาปูนซีเมนต์ จากผลการวิจัยทำให้รู้ว่า การใช้น้ำมันหล่อเย็นในการเผาร่วมนั้นมีผลกระทบต่อสารก่อมะเร็งจำพวก Dioxins Furans และโลหะหนักซึ่งสารเหล่านี้มีอันตรายต่อคน สัตว์ และพืชที่อยู่ใกล้เคียงกับโรงงานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์

2.9.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ทำการศึกษาสรุปงานหลักที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.5 โดยพบว่า ในขั้นตอนของกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ซึ่งมีการใช้วัตถุดิบทดแทน และเผาของเสียร่วมด้วย เช่น ยางรถยนต์ พลาสติก น้ำมันใช้แล้ว เป็นต้น ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพหลายชนิด อาทิ SO_2 , CO_2 , NO_2 , CH_4 , ฝุ่นละออง, VOCs, Dioxins/Furans, โลหะหนัก เป็นต้น และพบว่า มีการนำ Neural Network และ Multiple Regression Analysis ไปประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เช่น การนำ Neural Network และ Multiple Regression Analysis ทำนายมลพิษอากาศในบรรยากาศชนิดต่าง ๆ แต่เนื่องจากผู้วิจัยยังไม่พบงานวิจัยใดที่นำทั้งสองวิธีนี้ไปใช้ในการทำนายการระบายมลพิษอากาศจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นเป้าหมายของงานวิจัยนี้ แต่จากงานวิจัยอื่นที่ทำการศึกษา สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาถึงวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย และสามารถแก้ปัญหาที่ต้องการได้

ตารางที่ 2.5 สรุปประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	จุดเด่นของงานวิจัย	ผลการศึกษา
1	Giannopoulos,D., Kolaitis,D.I., Togkalidu A., Skevis, G., and Founti, M.A. (2007)	Quantification of emissions from the co-incineration of cutting oil emulsions in cement plants – Part I: NO _x , CO and VOC	1. ศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการ ใช้น้ำมันหล่อเย็น (Cutting Oil) ในการ เผาไหม้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 2. เน้นที่มลพิษอากาศพวก NO _x CO และ VOCs ที่ปล่อยออกมา	1. การเผาน้ำมันหล่อเย็นร่วม ไปในกระบวนการผลิตแล้ว ทำให้ระดับของ NO _x ลดลง มากถึง 50% 2. ส่วน CO และ VOCs ไม่ได้ รับผลกระทบกับการใช้ น้ำมันหล่อเย็น แต่จะขึ้นอยู่กับ เตาเผา และสภาวะที่เผา
2	Giannopoulos,D., Kolaitis,D.I., Togkalidou, A.,Skevis,G., and Founti, M.A. (2007)	Quantification of emissions from the co-incineration of cutting oil emulsions in cement plants – Part II: Trace species	1. ศึกษาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการ ใช้น้ำมันหล่อเย็นในการเผาไหม้ใน กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ 2. เน้นที่มลพิษอากาศจำพวกสารที่ก่อให้เกิด มะเร็งพวก Polychlorinated Dioxin (PCDD) กับ Polychlorinated Furans (PCDF) และ Volatile Heavy Metal 3. ใช้แบบจำลองจลศาสตร์ในการก่อตัว ของสารเคมีจำพวก dioxins	การใช้น้ำมันหล่อเย็นในการเผา ไหม้ร่วมนั้นมีผลกระทบต่อการศึกษา สารจำพวก Dioxins/Furans และ โลหะหนัก

ตารางที่ 2.5 สรุปประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	จุดเด่นของงานวิจัย	ผลการศึกษา
	Giannopoulos,D., Kolaitis,D.I., Togkalidu A., Skevis, G., and Founti, M.A. (2007)	Quantification of emissions from the co-incineration of cutting oil emulsions in cement plants – Part II: Trace species	4. ใช้การพยากรณ์จากอัตราการไหลกับ อุณหภูมิ ทำนายการก่อตัวของ PCDD/F 5. ใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับน้ำมันที่ใช้มา วิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักที่ปล่อย ออก	
3	Gabel,K. and Tillman, A. (2005)	Simulating operational alternatives for future cement production	1. สร้างแบบจำลองกระบวนการวงจรชีวิต ของกระบวนการผลิตซีเมนต์ 2. ทำการจำลองสถานการณ์ขึ้นมา 9 รูปแบบ โดยเปรียบเทียบกันระหว่างรูปแบบที่ ใช้ปกติ กับอีก 8 รูปแบบ ที่ได้จากการ นำของเสียมาใช้ร่วมเป็น	การจัดการที่เหมาะสมในส่วน ของเชื้อเพลิงทางเลือกจากของ เสีย และการนำวัสดุคืบกลับมา ใช้ใหม่อาจสามารถลดการ ระบายนมลพิษอากาศทั้งประเภท ก๊าซ CO ₂ NO _x SO ₂ CO VOCs CH ₄ และฝุ่นละอองลง ได้ระหว่างร้อยละ 30 ถึง 80

ตารางที่ 2.5 สรุปประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	จุดเด่นของงานวิจัย	ผลการศึกษา
4	Hooyberghs,J., Mensink, C.,Dumont,G., Fierens,F., and Brasseur, O. (2005)	A neural network forecast for daily average PM10 concentrations in Belgium	<ol style="list-style-type: none"> ศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นเฉลี่ยรายวันของ PM₁₀ ใช้โครงข่ายประสาทแบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนเป็นเครื่องมือในการทำนายระดับความเข้มข้น PM₁₀ ใช้ข้อมูลความเข้มข้นของ PM₁₀ เฉลี่ยรายวัน และข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยา 	ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับสภาพทางอุตุนิยมวิทยาและแหล่งกำเนิดของมลพิษ
5	Slini, T., Kaprara, A., Karatzas, K., and Moussiopoulos, N. (2006)	PM ₁₀ Forcasting for Thessaloniki, Greece	<ol style="list-style-type: none"> ทำการทำนายความเข้มข้นของ PM₁₀ เปรียบเทียบวิธีทางสถิติ 4 วิธี คือ วิธี Classification And Regression Trees (CART) วิธี Neural Network (NN) วิธี Linear Regression Analysis (LRA) และ วิธี Principal Component Analysis (PCA) ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดความเข้มข้นของ PM₁₀ ในปี 1994-2000 	<ol style="list-style-type: none"> วิธี Neural Network เป็นวิธีที่ทำนายได้แม่นยำมากที่สุด หากนำวิธีต่าง ๆ มาใช้ร่วมกัน จะทำให้ได้ผลการทำนายที่แม่นยำมากกว่าการแยกวิธีทำนาย

ตารางที่ 2.5 สรุปประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	จุดเด่นของงานวิจัย	ผลการศึกษา
6	Grivas, G. and Chaloulakou, A. (2006)	Artificial Neural Network Models for Prediction of PM ₁₀ Hourly Concentrations in Greater Area of Athens, Greece	<ol style="list-style-type: none"> 1. ได้พัฒนา Neural Network เพื่อทำนายค่าระดับ PM₁₀ เป็นรายชั่วโมง ศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มข้นเฉลี่ยรายวันของ PM₁₀ เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Multiple Regression 2. ใช้ Genetic Algorithm มาช่วยในการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสม 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าสถิติทดสอบ r² และ Index of Agreement (IA) สำหรับ ANN มีค่าอยู่ในช่วง 0.50-0.67 และ 0.80-0.89 ตามลำดับ 2. ส่วนค่า r² สำหรับ MR พบว่าอยู่ในช่วง 0.29-0.35
7	ศรัลย์ ปานศรีพงษ์ (2550)	การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ และแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ เพื่อทำนายความเข้มข้นของ PM ₁₀ ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และเทศบาลนครนครราชสีมา	<ol style="list-style-type: none"> 1. ได้พัฒนาโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ (ANN) แบบมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอน และแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ (MR) เพื่อทำนายค่าระดับ PM₁₀ 2. คัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมโดยการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับมลพิษทางอากาศ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ค่าสถิติทดสอบ r และ Index of Agreement (IA) สำหรับ ANN มีค่าอยู่ในช่วง 0.908-0.967 และ 0.913-0.981 ตามลำดับ 2. ส่วนค่า r และ IA สำหรับ MR พบว่าอยู่ในช่วง 4.0.854-0.942 และ 0.867-0.969 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 สรุปประเด็นหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	จุดเด่นของงานวิจัย	ผลการศึกษา
8	Diaz-Robles, L.A., Ortega, J.C., Fu, J.S., Reed, G.D., Chow, J.C., Watson, J.G., and Moncada-Herrera, J.A. (2008)	A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile	<ol style="list-style-type: none"> ทำนายอนุภาคฝุ่นในพื้นที่เมือง ประยุกต์ใช้วิธี Auto regressive Integrated Moving Average (ARIMA) Multi linear regression (MLR) Artificial neural networks (ANN) และ ARIMA ร่วมกับ ANN (hybrid model) ซึ่ง 	<ol style="list-style-type: none"> ARIMA และ MLR มีความแม่นยำที่จำกัดในการทำนายผลที่ผิดปกติ ANN สามารถทำนายข้อมูลไม่เชิงเส้นที่ผิดปกติได้ hybrid model มีความแม่นยำในการทำนายมากที่สุด
9	Cai, M., Yin, Y., and Xie, M. (2009)	Prediction of hourly air pollutant concentrations near urban arterials using artificial neural network approach	<ol style="list-style-type: none"> ทำนายความเข้มข้นของ CO₂, NO₂, TSP และ O₃ ใกล้กับทางหลวงหลัก แบบจำลองที่ใช้คือ Artificial neural network (ANN) Multiple linear regression Models (MR) และ California line source dispersion model (CL4) 	<ol style="list-style-type: none"> ANN มีความแม่นยำมากกว่า MR และ CL4 ANN ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความทนทาน และแปลงค่าได้ดี ให้ผลการทำนายที่ดี

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยสำหรับการทำนายการระบายมลพิษจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

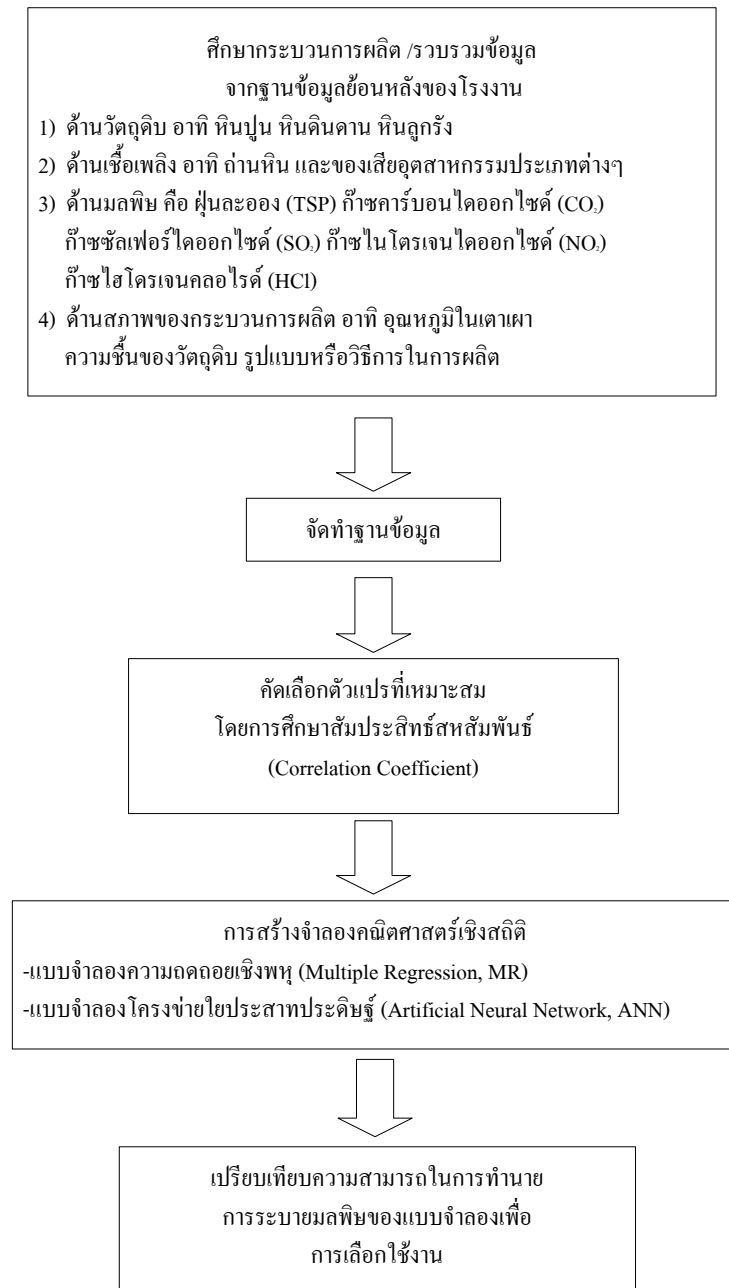
ศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยเน้นที่กระบวนการเผาปูนเม็ด ซึ่งเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดมลพิษอากาศที่ศึกษารวมทั้งระบบควบคุมมลพิษ ซึ่งในการศึกษารุ่นนี้พื้นที่ศึกษา คือ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ในจังหวัดสระบุรี โดยเลือกศึกษาเตาเผาปูนหมายเลข 5 และ 6 ของโรงงานที่ 3 เป็นกรณีศึกษา เนื่องจากมีข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองครบถ้วนที่สุด อีกทั้งยังเป็นการตรวจสอบตัวแปรที่มีผลต่อการระบายมลพิษที่เกิดขึ้น เมื่อกำลังการผลิตของทั้งสองเตาใกล้เคียงกัน ปูนเม็ดที่ผลิตเป็นชนิดเดียวกัน และสภาพของกระบวนการผลิตใกล้เคียงกัน โดยผู้วิจัยได้เข้าประชุมเพื่อชี้แจงรายละเอียดงานวิจัยร่วมกับบุคลากรของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โรงงานสระบุรี โดยได้แนะนำความเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ผลที่คาดว่าจะได้รับ วิธีการดำเนินงาน และแผนการดำเนินงาน รวมทั้งได้แลกเปลี่ยนข้อคิดเห็นกับทางบริษัทฯ เพื่อนำมาประกอบการปรับปรุงแผนการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เข้าศึกษากระบวนการผลิต และกลไกการเกิดมลพิษในลักษณะการเป็นนักศึกษาฝึกงานที่ฝ่ายมาตรฐานคุณภาพ และสิ่งแวดล้อม เป็นเวลา 1 เดือน ตั้งแต่วันที่ 14 มกราคม ถึง 15 กุมภาพันธ์ 2551 และมีการประชุมร่วมกับบุคลากรของบริษัทฯ วันที่ 14 สิงหาคม 2551 เพื่อนำเสนอความก้าวหน้า และแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็น เกี่ยวกับงานวิจัย เป็นต้น

3.1.2 กำหนดตัวแปร (Variable)

กำหนดตัวแปรของกระบวนการ ซึ่งเน้นที่วัตถุดิบ เชื้อเพลิง และมลพิษที่เข้าหรือออกระบบ และสภาพกระบวนการผลิต โดยตัวแปรหลักที่กำหนดมีดังนี้

- 1) ตัวแปรด้านวัตถุดิบ อาทิ หินปูน หินดินดาน หินลูกรัง
- 2) ตัวแปรด้านเชื้อเพลิง อาทิ ถ่านหิน และของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ

- 3) ตัวแปรด้านมลพิษ คือ ฝุ่นละออง (TSP) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl)
- 4) ตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิต อาทิ อุณหภูมิในเตาเผา ความชื้นของวัตถุดิบ และรูปแบบหรือวิธีการในการผลิต



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

3.1.3 รวบรวมข้อมูลของตัวแปร

รวบรวมข้อมูลของตัวแปรโดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยรายวันย้อนหลัง 1 ปี คือ ปี 2550 จำนวน 365 วัน ที่โรงงานมีบันทึกไว้ โดยข้อมูลเกี่ยวกับการใช้วัตถุดิบ เชื้อเพลิง และข้อมูลด้านสภาพของกระบวนการผลิตขอจากฝ่ายที่รับผิดชอบดูแล ส่วนข้อมูลการปล่อยมลพิษรวบรวมจากระบบ CEMS ที่บันทึกไว้

3.2 การสร้างฐานข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล

สร้างฐานข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์สถิติ SPSS for Windows version 13 โดยจัดข้อมูลให้คอมพิวเตอร์เป็นตัวแปรแต่ละตัว และให้แถวเป็นเวลาที่เกิดข้อมูลนั้น และทำการวิเคราะห์ข้อมูลในประเด็นต่าง ๆ คือ

1) วิเคราะห์สถิติพรรณนาของข้อมูลแต่ละตัวแปรเพื่อดูลักษณะการแจกแจง หรือค่าที่สูงหรือต่ำผิดปกติ

2) วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพื่อสังเกตความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตัวแปร อาทิ ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุดิบชนิดหนึ่ง ๆ กับการระบายมลพิษ เพื่อสามารถวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดมลพิษสูงในบางช่วงเวลาได้

3) วิเคราะห์ตรวจสอบความผิดปกติของการระบายมลพิษ

การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความผิดปกติของการระบายมลพิษ สามารถทำได้โดยการสร้างแผนภูมิควบคุม (Control Chart) ซึ่งในที่นี้จะใช้ช่วงค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (Tolerance intervals) ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตที่ครอบคลุมสัดส่วนของประชากรในช่วงต่าง ๆ ที่สนใจ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การทดสอบแจกแจงของข้อมูล

นำข้อมูลมาทำการทดสอบการแจกแจงด้วย Kolmogorov-Smirnov test ซึ่งเป็นสถิติทดสอบที่ใช้ทดสอบการแจกแจงของประชากรว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ หลักการของการเปรียบเทียบนี้ คือ เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลตัวอย่างกับค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลภายใต้สมมติฐานว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2550) โดยทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

- สร้างแผนควบคุม

การสร้างแผนควบคุม สามารถทำได้โดยการสร้างแผนภูมิควบคุม ซึ่งแผนภูมิควบคุมทางสถิติจะทำโดยการสร้างขอบเขต นั่นคือ ข้อมูลที่ไม่ได้มาตรฐานควรจะอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ในการศึกษาทำการวิเคราะห์ช่วงค่าที่ควรจะเป็นของตัวแปรด้านมลพิษทั้ง 5 ของเตา

หมายเลข 5 และ 6 โดยการสร้างแผนภูมิควบคุม (Berthouex and Brown, 2002) โดยในที่นี้ ทำการศึกษาที่ค่าคลาดเคลื่อนยินยอม (Tolerance limits : TL) 95% และ 99% ซึ่งค่าซึ่งในการศึกษานี้จะพิจารณาช่วงค่าสูงผิดปกติโดยจะใช้ค่าคลาดเคลื่อนยินยอมบน (Upper Tolerance limits : UTL) เป็นขอบเขต โดย UTL หาได้จากสมการ $UTL = \text{ค่าเฉลี่ย} + (k \times SD)$ (Mcbean and Rovers, 1998) เมื่อ k คือ tolerance factors ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่า $k = 1.6448$ และที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่า $k = 2.3267$ โดยข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบ Log-normal จะหาค่าต่าง ๆ และสร้างแผนภูมิในรูปของ ลอการิทึมก่อน หลังจากนั้นจึงแปลงค่าต่าง ๆ ในรูปปกติแล้วจึงสร้างแผนภูมิ

- ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average : MA)

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เป็นส่วนสำคัญในการแยกความผันแปรของข้อมูลอนุกรมเวลา (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2549) การคำนวณหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่จะต้องหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ใหม่โดยการนำข้อมูลใหม่เข้ามาคำนวณเพิ่ม 1 ค่า ในขณะที่เดียวกันจะตัดข้อมูลที่ล้าสมัยที่สุดออกไป 1 ค่า เพื่อที่จะให้ข้อมูลที่นำมาเฉลี่ยยังคงเท่าเดิม ในการศึกษาที่กำหนดจำนวนข้อมูลในการเฉลี่ยแต่ละครั้ง ยอมให้ขาดได้ไม่เกินร้อยละ 25 เช่น ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 30 วัน ต้องมีจำนวนข้อมูลอย่างน้อย 23 วัน หากน้อยกว่านั้นจะไม่นำมาใช้งาน และทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของข้อมูลการระบายมลพิษอากาศที่ระยะเวลาเฉลี่ย 3 ค่า คือ 7, 15 และ 30 วัน ทั้งนี้เพื่อให้เห็นแนวโน้ม (Trend) ของข้อมูลว่ามีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงในช่วงเวลาใด

3.3 การควบคุมคุณภาพของข้อมูล และการคัดเลือกตัวแปร

3.3.1 การควบคุมคุณภาพของข้อมูล

คุณภาพของข้อมูลเป็นสิ่งที่จำเป็นมากสำหรับการนำข้อมูลมาใช้ในการศึกษา วิเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ ดังนั้นในการนำข้อมูลต่าง ๆ ไปวิเคราะห์ควรจะต้องใช้ความระมัดระวัง เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องมากที่สุด จึงมีการนำความรู้ทางสถิติเข้ามาช่วยในการควบคุมคุณภาพของข้อมูล การศึกษานี้มีการควบคุมคุณภาพของข้อมูล โดยตรวจสอบข้อมูลที่มีค่าสูงผิดปกติ (Outlier) และตัดออกก่อนนำข้อมูลไปใช้ โดยในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์ช่วงค่าที่ควรจะเป็นของตัวแปรด้านมลพิษทั้ง 5 ของเตาหมายเลข 5 และ 6 ด้วยวิธี Standard normal test of outlier (Mcbean and Rovers, 1998) ดังสมการที่ (3.1)

$$T_n = \frac{|X - \bar{X}|}{SD} \quad (3.1)$$

โดยที่ T_n	คือ	ค่าสถิติจากการคำนวณ หากมีค่ามากกว่า 3 ถือข้อมูลนั้นเป็น Outlier
X	คือ	ค่าของข้อมูล
\bar{X}	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
SD	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.3.2 การคัดเลือกตัวแปร

ในการคัดเลือกตัวแปรจะทำโดยการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับมลพิษทางอากาศ จะใช้เทคนิควิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อย และเป็นการทดสอบว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในรูปเชิงเส้นหรือไม่ รวมถึงการทดสอบว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกันหรือไม่ โดยจะใช้สัญลักษณ์ R แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งถ้าผลการศึกษาที่ได้พบว่า R เป็นลบ แสดงว่าตัวแปรที่ศึกษามีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน แต่ถ้า R เป็นบวก แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน และถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 1 (ไม่พิจารณาที่เครื่องหมาย) แสดงว่าตัวแปรที่ศึกษามีความสัมพันธ์กันมาก และในทางกลับกันถ้า R มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรมีความสัมพันธ์กันน้อย แต่ถ้าหาก R มีค่า เท่ากับ 0 แสดงว่า ตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กันเลย โดยค่า R สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$R = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2)}} \quad (3.2)$$

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้แยกกรณีศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระ โดยแยกออกเป็น 4 กรณีย่อย ดังนี้

- 1) ตัวแปรอิสระกับ CO_2 SO_2 NO_2 TSP HCl
- 2) ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Log) ของตัวแปรอิสระ กับ CO_2 SO_2 NO_2 TSP HCl
- 3) ตัวแปรอิสระ กับ Natural Log ของ CO_2 SO_2 NO_2 TSP HCl
- 4) Natural Log ของตัวแปรอิสระ กับ Natural Log ของ CO_2 SO_2 NO_2 TSP HCl

เมื่อทำการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกรณีศึกษาแบบต่าง ๆ แล้ว จะทำการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองต่อไป โดยตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับการระบายมลพิษอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกตัว จะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรอิสระตั้งต้นในการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการระบายมลพิษอากาศในขั้นต่อไป

3.4 การสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ ในการศึกษาอ้างอิงจาก กัลยา วาณิชย์บัญชา (2546) โดยขั้นตอนหลัก ได้แก่ การคัดเลือกตัวแปรอิสระ การคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการเพื่อสร้างแบบจำลอง การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน การตรวจสอบความถูกต้อง และการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม โดยในการศึกษานี้จะใช้วิธี Stepwise ในการคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการ ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ แสดงดังรูปที่ 3.2 และมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 การสร้างแบบจำลอง

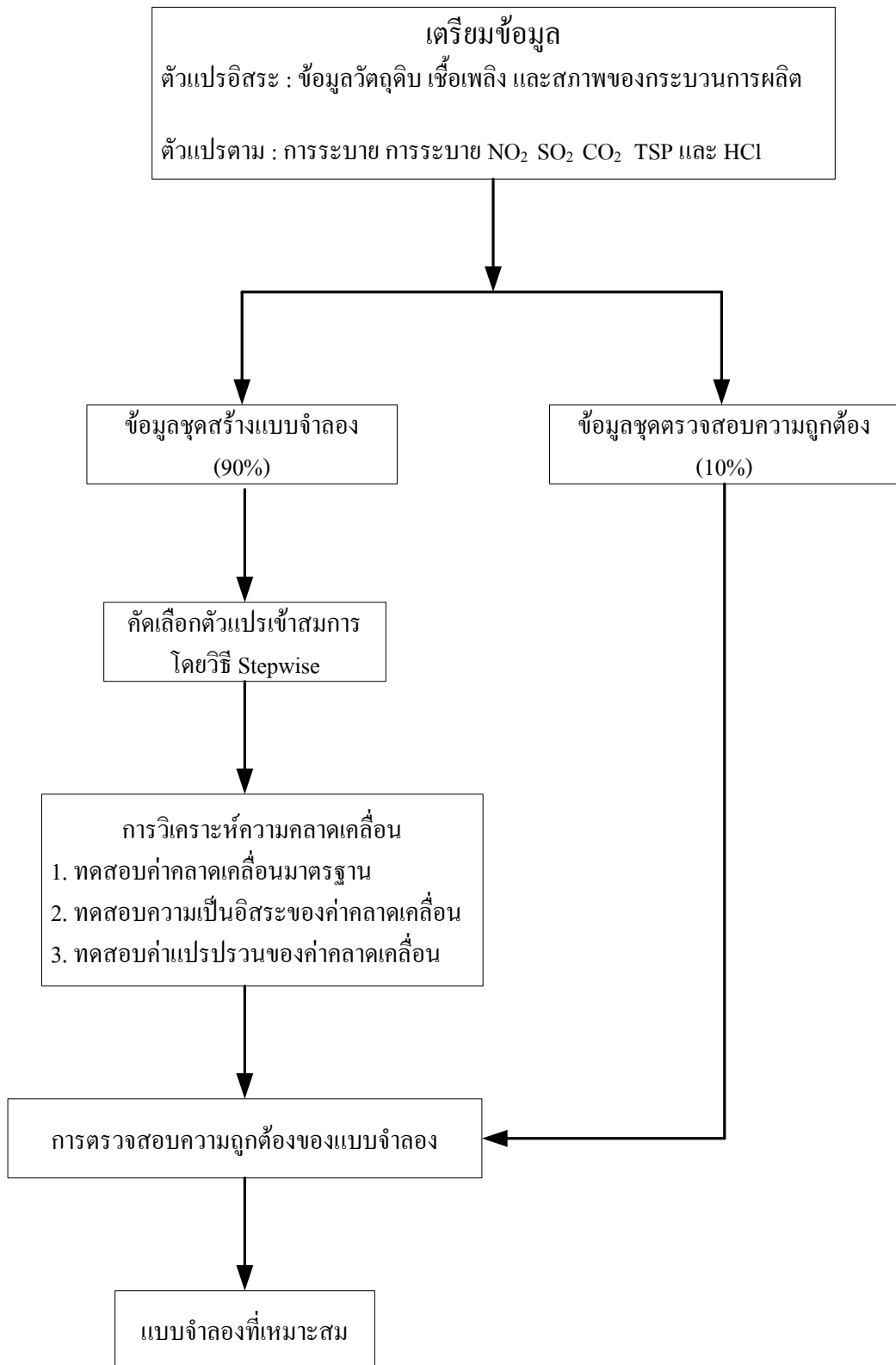
การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตาม Y และตัวแปรอิสระ X หลาย ๆ ตัว โดยกำหนดให้ค่าการระบายนผลพืษที่สนใจเป็นตัวแปรตาม Y และตัวแปรที่เหลือ คือ ตัวแปรด้านวัตถุดิบ ตัวแปรด้านเชื้อเพลิง ตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิต เป็นตัวแปรอิสระ X โดยตัวแปรอิสระที่จะนำมาใช้ในสมการจะได้มาจากการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมจากหัวข้อ 3.3 ซึ่งจะแบ่งการศึกษาเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

- 1) รูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรง เป็นรูปแบบที่เขียนได้ในแบบเส้นตรงของพารามิเตอร์ (linear in parameter)
- 2) รูปแบบการถดถอยไม่เชิงเส้นตรง เป็นรูปแบบที่เขียนไม่ได้ในแบบเส้นตรงของพารามิเตอร์ (nonlinear in parameter) ซึ่งบางรูปแบบสามารถแปลงให้เป็นรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกใช้วิธีการแปลงให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ (Natural logarithm)

3.4.2 การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) ในการวิเคราะห์การถดถอยสามารถพิจารณาได้หลายชนิดกรณี ในการศึกษานี้จะเลือกใช้การวิเคราะห์ดังนี้

- 1) การพิจารณาค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้สถิติทดสอบ Durbin-Watson โดยจะพิจารณาจากค่า Durbin-Watson โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0-4 สำหรับค่า DW ที่ใกล้เคียงกับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน (กัลยา วาณิชย์บัญชา, 2550)
- 3) การทดสอบค่าแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน โดยควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณีเมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปมาตรฐาน



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ

3.4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ทำการทดสอบความถูกต้องของสมการความถดถอย เพื่อทดสอบผลต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างค่าจริงที่ได้จากการตรวจวัด และค่าที่ได้จากการทำนาย โดยพิจารณาจากค่า R ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงว่ามีความถูกต้องสูง

3.5 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

ขั้นตอนหลักของการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย การเตรียมข้อมูล การออกแบบโครงข่าย การสอนโครงข่าย และการทดสอบโครงข่าย โดยในการศึกษานี้จะออกแบบโครงข่ายแบบไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed Forward : MLFF) และวิธีการสอนโครงข่ายแบบ Error Back-Propagation Algorithm (Grivas and Chaloulakou, 2006)

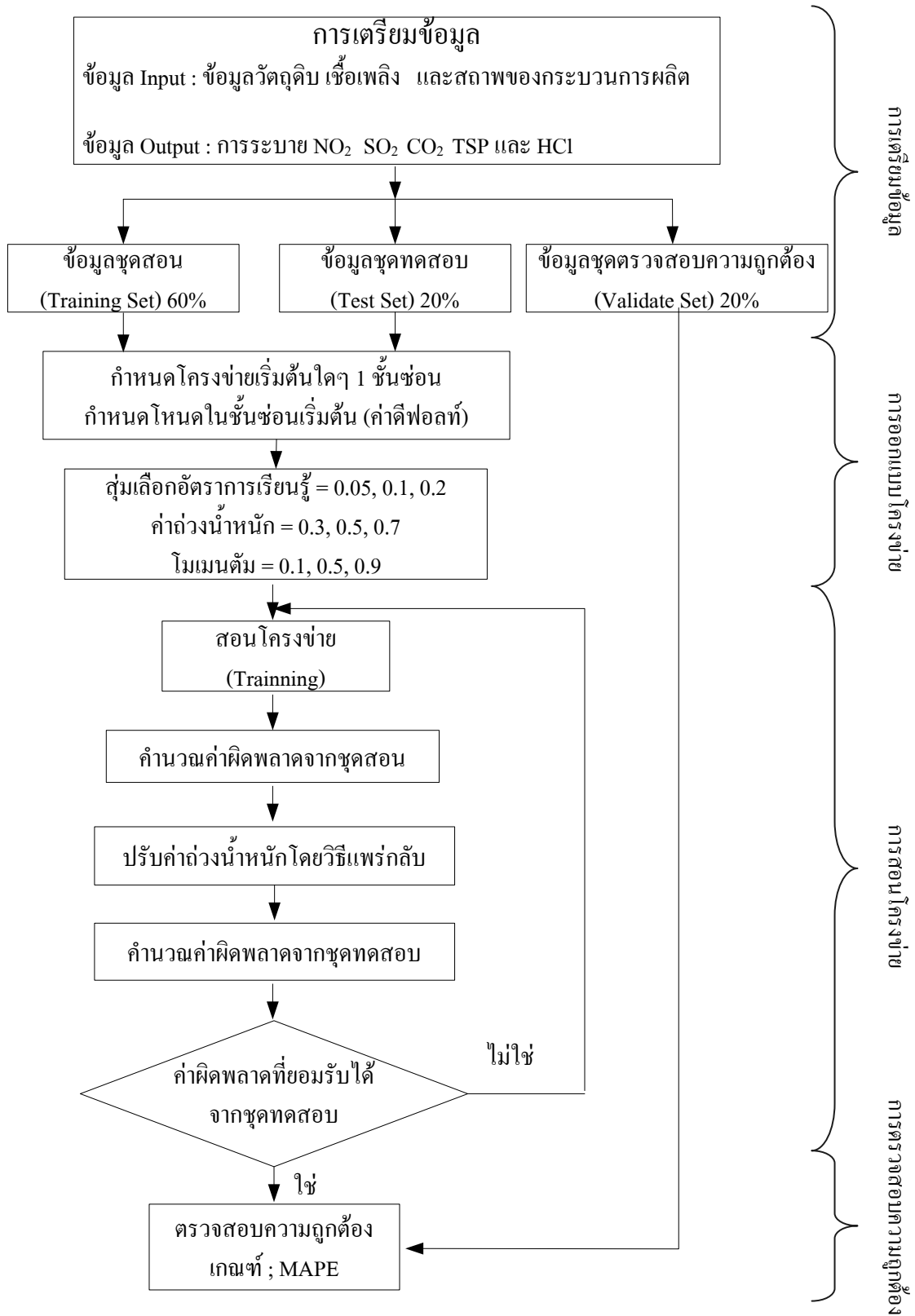
การประมาณค่าระดับมลพิษโดยใช้โครงข่ายประสาทประดิษฐ์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 4 ขั้นตอน คือ การเตรียมข้อมูล การออกแบบโครงข่าย การสอนโครงข่าย และการทดสอบโครงข่าย ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยเตรียมข้อมูลด้านวัตถุดิบ ข้อมูลด้านเชื้อเพลิง และข้อมูลทางด้านสภาพของกระบวนการผลิตเป็นตัวแปรอิสระ และการระบายมลพิษอากาศชนิดต่าง ๆ จากปล่องของโรงงานเป็นตัวแปรตาม

ทั้งนี้ขั้นตอน วิธีการ และค่าที่กำหนด ในการสร้างแบบจำลองของการศึกษานี้อ้างอิงจากงานของ Patterson (1996); Kartalopoulos (1996); ศรีลย์ ปานศรีพงษ์ (2550)

3.5.1 การเตรียมข้อมูล

เตรียมข้อมูลด้านวัตถุดิบ ข้อมูลด้านเชื้อเพลิง และข้อมูลทางด้านสภาพของกระบวนการผลิต เป็นตัวแปรอิสระ และการระบาย NO_2 SO_2 CO_2 TSP และ HCl จากปล่องของโรงงานที่ 3 เป็นตัวแปรตาม โดยเรียงข้อมูลตามวันที่ของปี 2550 หรือ 365 วัน หรือ 365 ชุดข้อมูล (Patterns) หลังจากนั้นจะแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 3 ชุด คือ ข้อมูลชุดสอน (training set) ข้อมูลชุดทดสอบ (test set) และข้อมูลชุดตรวจสอบความถูกต้อง (validate set) โดยแบ่งออกเป็นร้อยละ 60, 20 และ 20 ตามลำดับ (Niska et al., 2005; Ionescu and Candau, 2007)

หลังจากนั้นทำการออกแบบโครงข่ายโดยกำหนดให้เป็นแบบไปข้างหน้าหลายชั้น (MLFF) ซึ่งเป็นระบบแบบมีครูสอน โดยจะใช้วิธีการสอนแบบแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error back – propagation algorithm) และคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่โครงข่ายโดยพิจารณาจากหัวข้อที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

เนื่องจากข้อมูลที่น่ามาสร้างแบบจำลองมีพิสัยที่ต่างกัน ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าของข้อมูล (Normalize) ให้อยู่ในช่วงพิสัยที่เหมาะสม ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้พิสัยของข้อมูลอยู่ในช่วงระหว่าง 0 และ 1 (Elkamel et al., 2001) ดังสมการที่ (3.3)

$$x_{norm} = \frac{x_n - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3.3)$$

โดยที่	x_{norm}	คือ	ข้อมูลที่ได้รับการ Normalize แล้ว
	x_n	คือ	ข้อมูลที่ต้องการ Normalize
	x_{min}	คือ	ข้อมูลที่มีค่าต่ำที่สุด
	x_{max}	คือ	ข้อมูลที่มีค่าสูงที่สุด

3.5.2 การออกแบบโครงข่าย

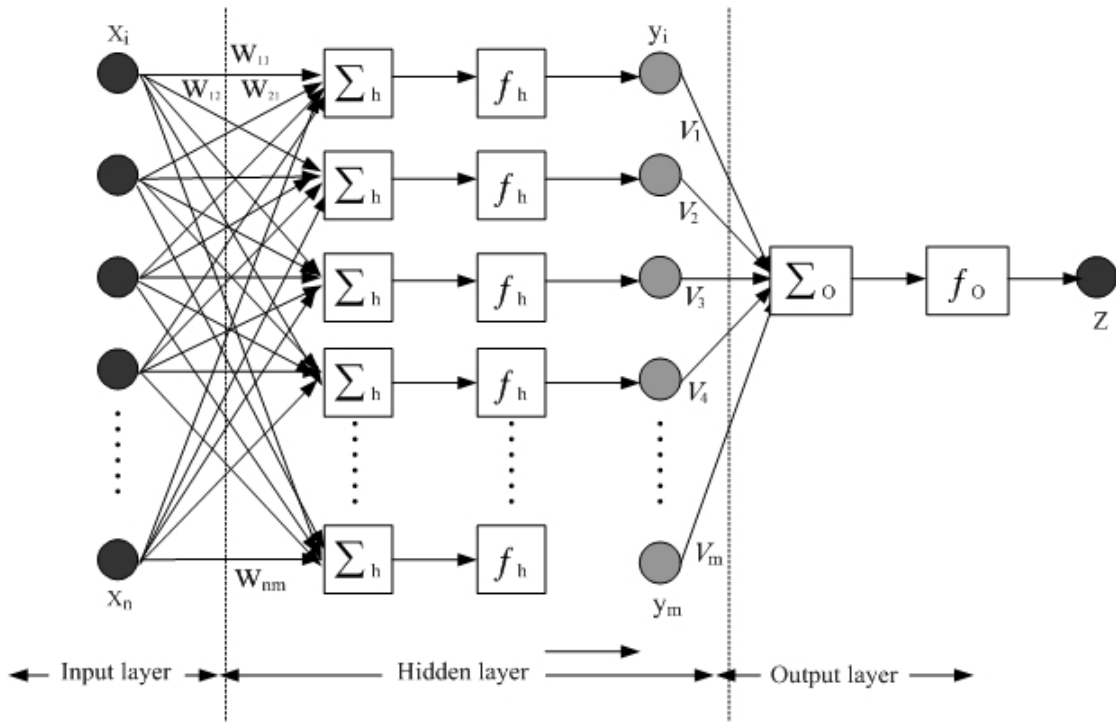
ในการออกแบบโครงข่ายจะพิจารณาจากจำนวนข้อมูลป้อนเข้าโครงข่าย จำนวนชั้นซ่อน จำนวนโหนดในชั้นซ่อน และจำนวนผลลัพธ์เป็นหลัก ซึ่งจะต้องทำการหาค่าที่เหมาะสมกับโครงข่ายมากที่สุด

1) การหาจำนวนข้อมูลป้อนเข้าที่เหมาะสม

ข้อมูลป้อนเข้าที่เหมาะสมต้องพิจารณาหลายๆแบบด้วยกัน เพื่อทดสอบว่าโครงข่ายแบบใดที่ได้ออกแบบไว้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ดังหัวข้อที่ 3.3

2) การหาจำนวนชั้นซ่อนที่เหมาะสม

ในการศึกษาครั้งนี้ ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลด้านวัตถุดิบ ข้อมูลด้านเชื้อเพลิง ข้อมูลด้านมลพิษทางอากาศ และข้อมูลทางด้านสภาพของกระบวนการผลิต ซึ่งมีความซับซ้อนไม่มากนัก ดังนั้นจึงเลือกใช้โครงข่ายประสาทประดิษฐ์แบบ 3 ชั้น ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นข้อมูลป้อนเข้า 1 ชั้น (1 Input layer) ชั้นซ่อน 1 ชั้น (1 hidden layer) และชั้นผลลัพธ์ 1 ชั้น (1 output layer) ดังรูปที่ 3.4 และสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.4)-(3.7)



รูปที่ 3.4 โครงข่ายใยประสาทประดิษฐ์ที่มี 3 ชั้น

$$\sum_h = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} x_i = (net_j)_h \quad (3.4)$$

$$f_h = \frac{1}{1 + \exp((-net_j)_h)} = f((net_j)_h) \quad (3.5)$$

$$\sum_o = \sum_{j=1}^m v_j y_j = (net_j)_o \quad (3.6)$$

$$f_o = \frac{1}{1 + \exp((-net_j)_o)} = f((net_j)_o) \quad (3.7)$$

โดยที่ w คือ ค่าถ่วงน้ำหนักชั้นซ่อน (hidden layer)
 v คือ ค่าถ่วงน้ำหนักชั้นผลลัพธ์ (output layer)
 h คือ ชั้นซ่อน (hidden layer)

o คือ ชั้นผลลัพธ์ (output layer)
 x คือ ข้อมูลป้อนเข้า (input data) คือ ตัวแปรอิสระด้านวัตถุดิบ ด้านเชื้อเพลิง และด้านสภาพของกระบวนการผลิต อาทิ ค่าเฉลี่ยรายวันของหินปูน หินดินดาน หินลูกรัง ถ่านหิน ของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ อุณหภูมิในเตาเผา ความชื้นของวัตถุดิบ เป็นต้น

n คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

m คือ จำนวนโหนดในชั้นซ่อน

y คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากชั้นซ่อนชั้นสุดท้าย

z คือ ผลลัพธ์ (output data) คือ ค่าการระบายมลพิษที่โครงข่ายคำนวณได้

3) การหาจำนวนโหนดในชั้นซ่อนที่เหมาะสม

การกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อน ไม่มีกฎเกณฑ์ หรือทฤษฎีที่แน่นอน เพราะเมื่อกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนมาก จะทำให้เสียเวลาในการสอนมาก เนื่องจากจำนวนการเชื่อมต่อของแต่ละโหนดมีจำนวนมาก แต่ในทางกลับกันถ้ากำหนดให้มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนน้อยจนเกินไป โครงข่ายอาจจะไม่สามารถเรียนรู้จนพบคำตอบที่แท้จริงได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเริ่มต้นตามค่าดีฟอลต์ของโปรแกรม (NeuroShell@2) คือ

$$\text{จำนวนโหนดในชั้นซ่อน} = 1/2 (\text{Inputs} + \text{Outputs}) + \sqrt{\text{จำนวนของ patterns ที่ใช้ในการสอน}}$$

4) การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (อัตราการเรียนรู้ โมเมนตัม ค่าถ่วงน้ำหนัก)

การกำหนดค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าโมเมนตัมจะมีอิทธิพลต่อการเกิดค่าคลาดเคลื่อนของโครงข่ายได้ โดยค่าถ่วงน้ำหนักไม่ควรเป็นค่าที่ใหญ่มากนัก จะเป็นผลทำให้ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันการแปลงค่าแบบฟังก์ชันซิกมอยด์มีค่าเล็กมาก เรียกว่าอยู่ในย่านของการอิ่มตัว (Saturation Region) แต่ถ้าค่าน้ำหนักมีค่าเล็กเกินไป จะทำให้ค่าที่จะส่งไปยังโหนดในชั้นซ่อน หรือโหนดในชั้นผลลัพธ์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้การเรียนรู้ทำได้ช้า ในกรณีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักนั้น หากกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 0.5 หมายถึงการให้โปรแกรมสุ่มค่าระหว่าง -0.5 ถึง 0.5 (หรือ ระหว่าง -1 ถึง 1 ตามความเหมาะสม) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ในโครงข่าย

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น	ช่วงการปรับเปลี่ยน
อัตราการเรียนรู้ (η)	0.05	0.1, 0.2
ค่าถ่วงน้ำหนัก (w)	0.5	0.3, 0.7
โมเมนต์ (α)	0.1	0.5, 0.9

3.5.3 การสอนโครงข่าย

1) วิธีการสอน

ในขั้นตอนการสอนโครงข่ายนี้จะใช้วิธีการแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ (Error back – propagation algorithm) โดยใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ เป็นฟังก์ชันการแปลงค่า (Transfer Function) เนื่องจากฟังก์ชันการแปลงค่ามีความสำคัญมากในโครงข่ายแบบแพร่กระจายความผิดพลาดกลับ ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ควรมีความต่อเนื่อง ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ และง่ายต่อการคำนวณ ซึ่งค่าอนุพันธ์สามารถเขียนในรูปเทอมของฟังก์ชันนั้นดังสมการที่ (3.8)

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (3.8)$$

2) การหยุดการสอน

ในแต่ละรอบของการสอน โครงข่ายจะทำการตรวจสอบค่าผิดพลาดด้วยชุดทดสอบไปพร้อมกัน เพื่อแก้ปัญหการเกิด Over Fitting โดยในการศึกษาครั้งนี้จะตั้งข้อกำหนดในการหยุดการสอน เมื่อโครงข่ายเรียนรู้ได้ 20,000 รอบ หรือค่าความผิดพลาดที่ชุดทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.005

3.5.4 การตรวจสอบความถูกต้องของโครงข่าย

การประเมินผลจากการทำนายโดยใช้โครงข่ายไฮประสาทประดิษฐ์ สามารถใช้สถิติในการทดสอบความถูกต้อง ซึ่งสถิติที่ใช้ในการวัดความผิดพลาดระหว่างผลการทำนาย และข้อมูลจริงจากชุดตรวจสอบความถูกต้อง (Validate set) คือ ค่าร้อยละสัมบูรณ์ความผิดพลาดเฉลี่ย (Mean absolute percentage error, MAPE) ค่าร้อยละสัมบูรณ์ความผิดพลาดเฉลี่ย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.9)

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\text{Predict}_i - \text{Actual}_i}{\text{Actual}_i} \right| \times 100 \quad (3.9)$$

โดยที่ Actual คือ ข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัด

Predict คือ ข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

N คือ จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ในการพิจารณาเลือกโครงข่าย คือ เลือกโครงข่ายที่มีค่าร้อยละสัมบูรณ์ความผิดพลาดเฉลี่ย (MAPE) น้อยที่สุด

3.6 การเปรียบเทียบความสามารถของแบบจำลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบด้านวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และกระบวนการผลิต เพื่อช่วยในการทำนายการระบายมลพิษอากาศชนิดต่าง ๆ จากปล่องของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ โดยในขั้นตอนการศึกษานี้ได้นำผลของข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ และโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งในการประเมินความสามารถของแบบจำลอง 3 แบบ คือ จะใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, R) และดัชนีการยอมรับ (Index of Agreement, IA) เป็นค่าที่แสดงความแม่นยำของแบบจำลอง และใช้ค่ารากที่สองของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) แสดงค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง

1) ดัชนีการยอมรับ (Index of Agreement, IA) ซึ่งค่า IA ที่สูง แสดงถึงความสามารถในการทำนายสูง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.10)

$$\text{I.A.} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Predict}_i - \text{Actual}_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\left| \text{Predict}_i - \overline{\text{Actual}} \right| + \left| \text{Actual}_i - \overline{\text{Actual}} \right| \right)^2} \quad (3.10)$$

2) ค่ารากที่สองของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งค่า RMSE ที่ต่ำ แสดงถึงความสามารถในการทำนายสูง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Predict}_i - \text{Actual}_i)^2} \quad (3.11)$$

โดยที่	Actual	คือ	ข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัด
	Predict	คือ	ข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทประดิษฐ์
	N	คือ	จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
	$\overline{\text{Actual}}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัด

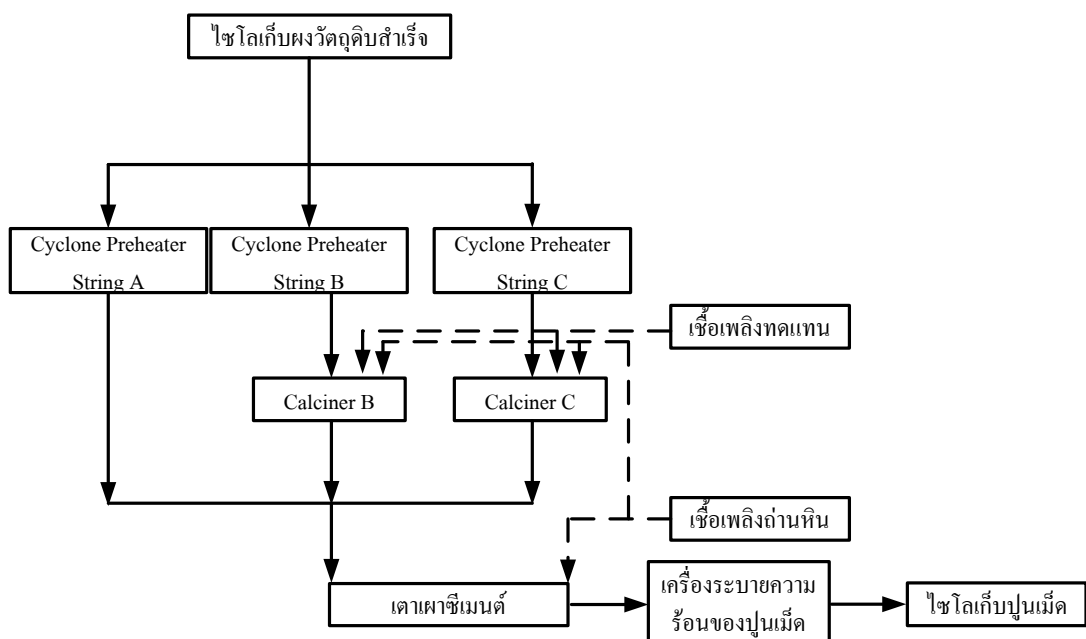
บทที่ 4

ผลการศึกษา

4.1 ผลการศึกษาระบวนการผลิต

4.1.1 ผลการศึกษาระบวนการเผาปูนซีเมนต์

บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จ.สระบุรี ประกอบด้วย 3 โรงงาน โดยในการศึกษารั้งนี้ใช้โรงงานที่ 3 เป็นกรณีศึกษา และผลการศึกษากระบวนการเผาปูนเม็ด (Clinker Burning) สามารถสร้างแผนภูมิเส้นทางของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์จากการเผาปูนเม็ดได้ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเริ่มจากการลำเลียงวัตถุดิบสำเร็จที่ได้เข้าสู่ระบบเตาเผา ซึ่งก่อนจะป้อนวัตถุดิบสำเร็จเข้าสู่เตาเผาจะต้องป้อนวัตถุดิบสำเร็จผ่าน Preheater ซึ่งมีทั้งหมด 3 String คือ String A String B และ String C โดย String B และ String C จะมีถึง Calciner อยู่ถัดจากถึง Preheater และอยู่ก่อนเข้าเตาเผา เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนจะป้อนเข้าสู่ “Burning Zone” ภายในเตาเผา (Kiln) อุณหภูมิในเตาเผาสูงสุดประมาณ 1450 °C

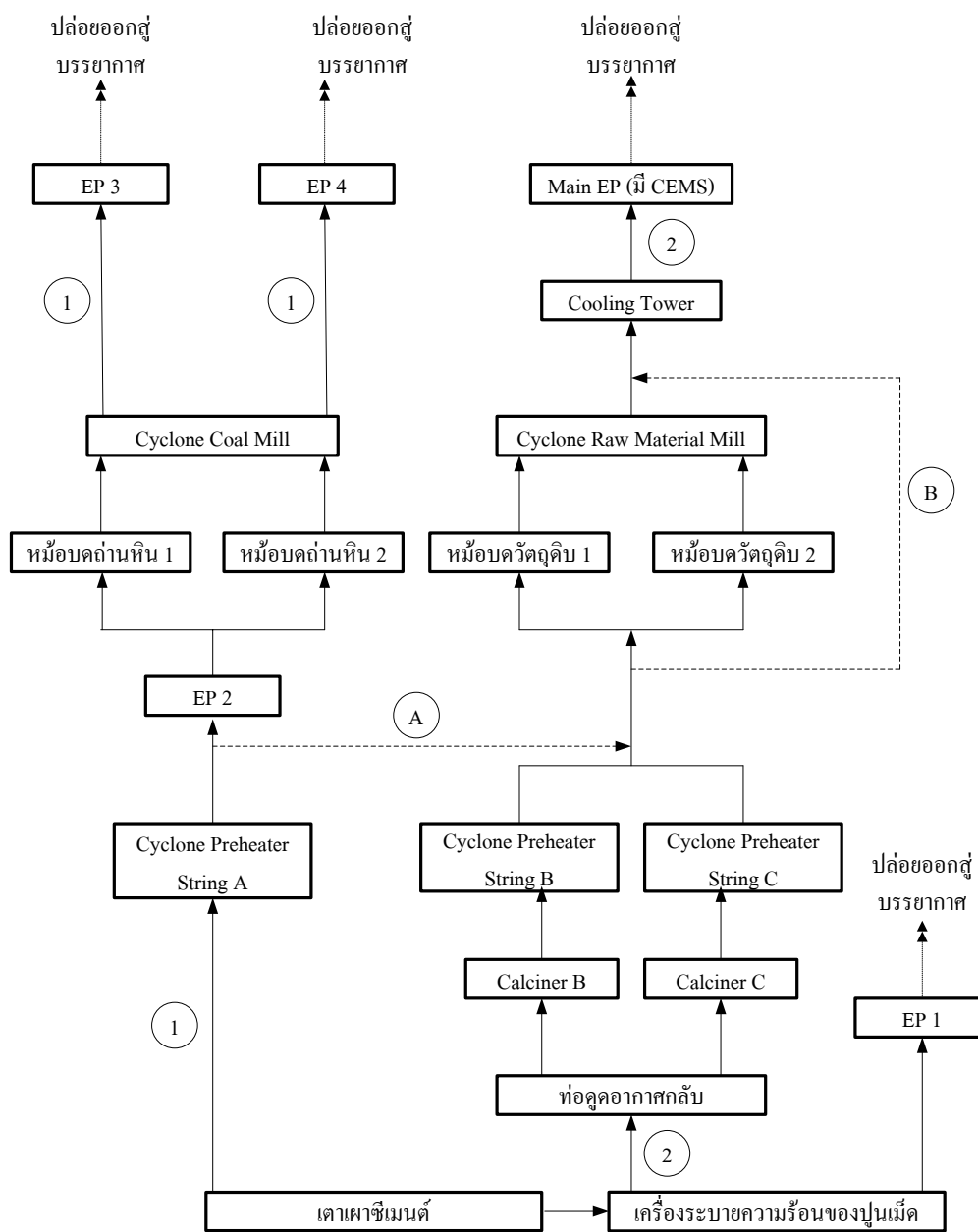


รูปที่ 4.1 เส้นทางของวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์จากการเผาปูนเม็ด

นอกจากวัตถุดิบ และเชื้อเพลิงประเภทถ่านหินแล้ว ในกระบวนการผลิตปูนเม็ดยังมีการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกจากกากของเสียหลายชนิดซึ่งแบ่งเป็นกลุ่มได้ประมาณ 46 กลุ่ม อาทิเช่น กากตะกอนขจัดสี และวานิช กากตะกอนจากระบบบำบัด ไขมันน้ำ ผงคาร์บอน เศษพลาสติก กระดาษ และเศษยางอุตสาหกรรม อันเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดมลพิษอากาศประเภทต่าง ๆ เพิ่มเติมจากมลพิษจากระบวนการผลิตปกติ กากของเสียทั้งชนิดของแข็ง และของเหลวจะถูกลำเลียงมาป้อนเข้าสู่ถัง Calciner วัตถุดิบสำเร็จที่ถูกละลาย จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ดังสมการที่ (4.1)-(4.4) เกิดเป็นปูนเม็ด (Clinker) และถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในบริเวณที่เรียกว่า “Cooling Zone” โดยการเป่าผ่านปูนเม็ดที่ร้อนจัดเพื่อดึงความร้อนดังกล่าวออกไป ปูนเม็ดที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนค่อนข้างกลมสีเทาเข้ม ปูนเม็ดที่ผ่านการเผา และการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วของระบบเตาเผาแล้ว จะถูกลำเลียงผ่านเครื่องย่อย เพื่อย่อยปูนเม็ดให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นจะถูกลำเลียงไปเก็บยังไซโลเก็บปูนเม็ด



จากการศึกษาพบว่าโรงงานที่ 3 ประกอบด้วยเตาเผา 2 เตา คือ เตาหมายเลข 5 และหมายเลข 6 โดยกระบวนการผลิตของแต่ละเตามีลักษณะเหมือนกัน มีอัตราการผลิตปูนเม็ด 10,000 ตันต่อวัน ซึ่งกระบวนการผลิตปูนเม็ดเป็นกระบวนการที่มีก๊าซจากการเผาไหม้ และฝุ่นเกิดขึ้นสูงจากการศึกษาโดยละเอียดพบว่า ก๊าซ และฝุ่นที่เกิดขึ้นจากเตาเผาที่ยังมีอุณหภูมิสูงจะถูกดึงกลับไปใช้ในการไล่ความชื้นในกระบวนการบดวัตถุดิบ และถ่านหิน โดยมีเส้นทางดึงความร้อนกลับมาใช้ประโยชน์ 2 เส้นทาง และมีจุดระบายอากาศจากระบบการออกสู่บรรยากาศโดยผ่านเครื่อง EP 4 จุด ได้แก่ EP1 EP3 EP4 และ Main EP ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เส้นทางการระบายมลพิษอากาศจากเตาเผาซีเมนต์

เส้นทางที่ 1 คือความร้อนจากเตาเผาถั่วขึ้นไปยัง Cyclone Preheater String A เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผงวัสดุดิบ หลังจากนั้นจะดึงความร้อนไปยังเครื่อง EP2 เพื่อเป็นการดักฝุ่นผงวัสดุดิบที่มากับลมร้อนออกก่อนที่จะนำลมร้อนไปใช้ในการไล่ความชื้นให้กับถ่านหินในหม้ออบถ่านหิน ถ่านหินที่ผ่านการอบจะถูกนำไปกับลม และถูกแยกที่ไซโคลน ผงถ่านหินจะถูกนำไปเก็บยังไซโล ส่วนลมที่ผ่านจากไซโคลน ซึ่งมีผงถ่านหินหลงเหลือจะผ่าน EP3 และ EP4

เพื่อเป็นการนำผงถ่านหินกลับมาในระบบอีกครั้ง ลมที่ผ่าน EP3 และ EP4 จะปล่อยผ่านปล่องออกสู่บรรยากาศโดยไม่ผ่านระบบ CEMS ตามเส้นทางหมายเลข 1 แต่ในกรณีที่หม้อบดถ่านหินหยุด ลมร้อนจะถูกดึงไปใช้ที่หม้อบดวัตถุดิบแล้วปล่อยผ่านปล่องออกสู่บรรยากาศโดยผ่านระบบ CEMS ตามเส้นทางย่อย A แต่ในกรณีที่หม้อบดถ่านหิน และหม้อบดวัตถุดิบหยุด ลมร้อนจะถูกปล่อยผ่านปล่องออกสู่บรรยากาศโดยผ่านระบบ CEMS ตามเส้นทางย่อย B

เส้นทางที่ 2 ดึงความร้อนจากปูนที่ผ่านการเผาซึ่งมีลักษณะเป็นลาวาที่ร้อนจัดไปยัง Calciner B และ Calciner C ซึ่งจุดนี้จะมีการใส่เชื้อเพลิงพวกถ่านหิน และเชื้อเพลิงทดแทน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Calcination ดียิ่งขึ้น แล้วดึงความร้อนไปยัง Cyclone Preheater String B และ C เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผงวัตถุดิบ หลังจากนั้นจะดึงความร้อนไปยังหม้อบดวัตถุดิบ เพื่อใช้ในการไล่ความชื้นให้กับวัตถุดิบ ผงวัตถุดิบที่ผ่านการบดจะถูกนำไปกับลม และถูกแยกที่ไซโคลน ผงวัตถุดิบจะถูกนำไปเก็บยังไซโล ส่วนลมที่ผ่านจากไซโคลนจะผ่าน Main EP ซึ่งมีระบบ CEMS บันทึกข้อมูลมลพิษอากาศที่ระบายออก และปล่อยผ่านปล่องออกสู่บรรยากาศ และในกรณีที่หม้อบดวัตถุดิบหยุดความร้อนจะถูกดึงออกสู่ Main EP โดยตรง ตามเส้นทางย่อย B

นอกจากนี้ยังมีการระบายลมร้อนจากปูนเม็ดที่หลงเหลืออยู่ โดยมีการดึงลมร้อนไปยังเครื่อง EP1 และปล่อยผ่านปล่องออกสู่บรรยากาศ

กระบวนการผลิตปูนเม็ดเป็นกระบวนการที่มีก๊าซจากการเผาไหม้ และฝุ่นเกิดขึ้นสูง จึงเป็นจุดสนใจของงานวิจัยนี้ ดังนั้นการศึกษานี้จะพิจารณากระบวนการผลิตปูนเม็ดของโรงงานที่ 3 โดยในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เตาเผาหมายเลข 5 และเตาหมายเลข 6 เป็นกรณีศึกษาเกี่ยวกับการทำนายการระบายมลพิษอากาศของโรงงานที่ 3 และพบว่า EP1 EP2 EP3 และ EP4 ทั้งหมดไม่มีระบบ CMES บันทึกข้อมูลมลพิษที่ระบายออก มีเพียง Main EP เท่านั้นที่มีระบบ CMES การวิจัยนี้จึงกำหนดขอบเขตของการทำนายมลพิษอากาศครอบคลุมกระบวนการเผาในเตาเผา และกระบวนการบดวัตถุดิบ ซึ่งมีข้อมูลการระบายมลพิษผ่าน Main EP แล้วปล่อยออกสู่บรรยากาศ

4.1.2 กลไกการเกิด และปัจจัยที่มีผลต่อมลพิษอากาศจากเตาเผาปูนซีเมนต์

มลพิษอากาศจากเตาเผาปูนซีเมนต์ที่ศึกษาในครั้งนี้ มีปัจจัยสำคัญด้านกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อมลพิษที่เกิดขึ้นทุกประเภทเหมือนกัน ได้แก่

1) การเดิน และไม่เดินระบบของ Raw Mill เนื่องจากมีการนำลมร้อนบางส่วนไปใช้ในการไล่ความชื้นในการบดวัตถุดิบ ทำให้มลพิษเกิดขึ้นเล็กน้อยต่างกัน กล่าวคือ เมื่อเดินระบบ Raw Mill มลพิษบางส่วนอาจจะถูกดูดซับด้วยผงวัตถุดิบทำให้มลพิษที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ น้อยลง นอกจากนี้การเดิน และไม่เดินระบบของ Raw Mill มีผลทำให้ค่าอัตราการไหล

ของก๊าซ ไม่เท่ากัน ทำให้การระบายมลพิษมีค่าเล็กน้อยแตกต่างกัน คือ ค่าอัตราการไหลมาก มลพิษที่เกิดขึ้นก็มากด้วย

2) การเดิน และไม่เดินระบบของ Coal Mill เนื่องจากการนำลมร้อนบางส่วน ไปใช้ในการไล่ความชื้นในการบดถ่านหิน และปล่อยออกโดยไม่ผ่านเครื่อง Main EP ที่มีระบบ CEMS แต่เมื่อหยุด Coal Mill ลมร้อนทั้งหมดจะเข้าสู่ Raw Mill แต่เมื่อ Raw Mill หยุด ลมร้อน ทั้งหมดจะเข้าสู่ Cooling Tower และปล่อยออกสู่ Main EP ที่มีระบบ CEMS

นอกจากนี้มลพิษอากาศแต่ละประเภทยังมีกลไกการเกิด และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกศึกษาตามมลพิษที่เกิดขึ้น ดังนี้

1) การเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

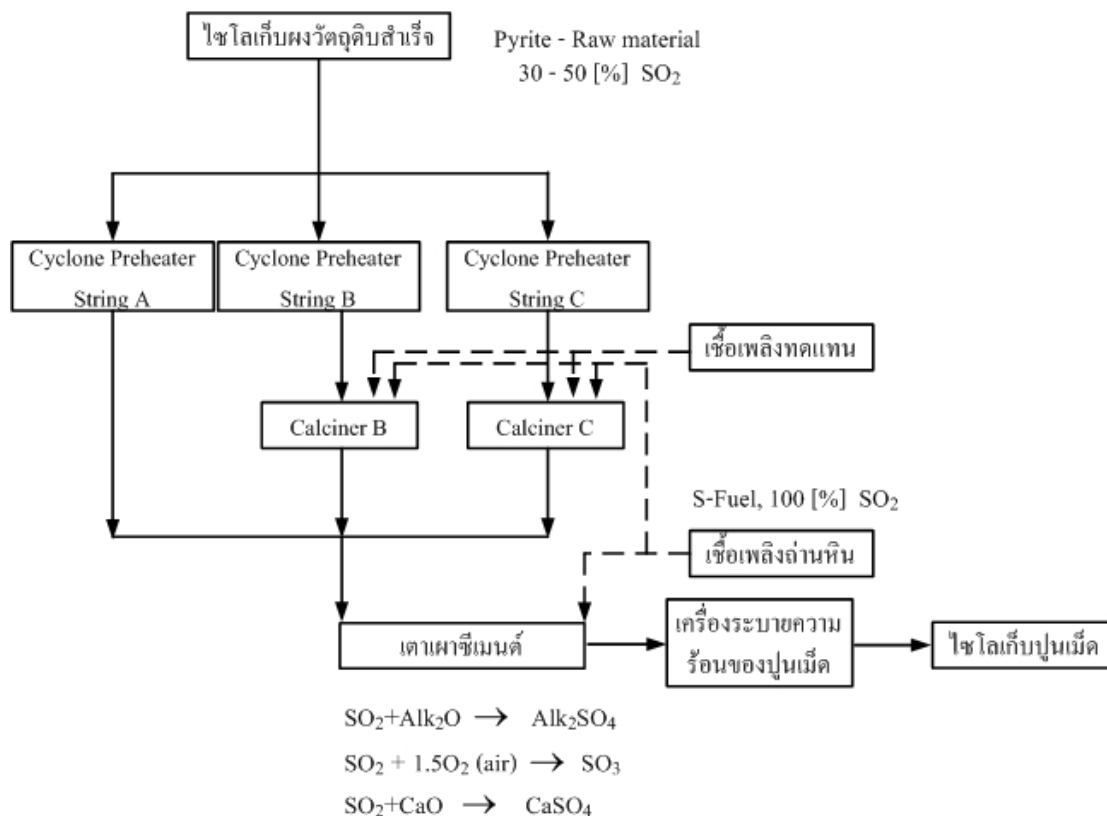
จากรูป 4.3 เมื่อนำผงวัตถุดิบสำเร็จที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบไปเข้าสู่ กระบวนการเผาไหม้ที่ Cyclone Preheater Calciner และเตาเผาซีเมนต์ จะเกิดเป็นก๊าซ SO₂ ประมาณ 30-50% ซึ่งสารประกอบซัลเฟอร์ที่มีในวัตถุดิบ ได้แก่ Pyrite (FeS₂) Sulfides (CaS) Sulfites (CaSO₃) Sulfates (CaSO₄) นอกจากนี้ในเชื้อเพลิงถ่านหินที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่ Calciner และเตาเผาซีเมนต์ จะเกิดเป็น SO₂ ได้ประมาณ 100% ดังสมการที่ (4.5) ซึ่งก๊าซ SO₂ จะถูกดูดกลับตามเส้นทางที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.2



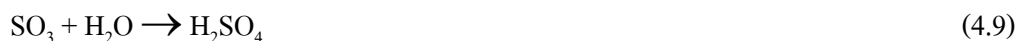
SO₂ บางส่วนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ CaO และ Alk₂O ซึ่งเป็นวัตถุดิบได้ ปูนเม็ดที่มีองค์ประกอบของ CaSO₄ และ Alk₂SO₄ ดังสมการ 4.6 และ 4.7 CaSO₄ และ Alk₂SO₄ จะ ถูกลำเลียงไปเก็บที่ไซโลเก็บปูนเม็ด



นอกจากนี้ SO₂ ประมาณ 0.5-2.0 % จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซ SO₃ ได้ดังสมการที่ (4.8) ซึ่งก๊าซ SO₃ จะถูกระบายออกทางปล่อง และบางส่วนจะละลายในน้ำใน Cooling Tower กลายเป็นกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) แล้วระบายออกในรูปของน้ำเสีย ดังสมการที่ (4.9)



รูปที่ 4.3 ปฏิกริยาการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

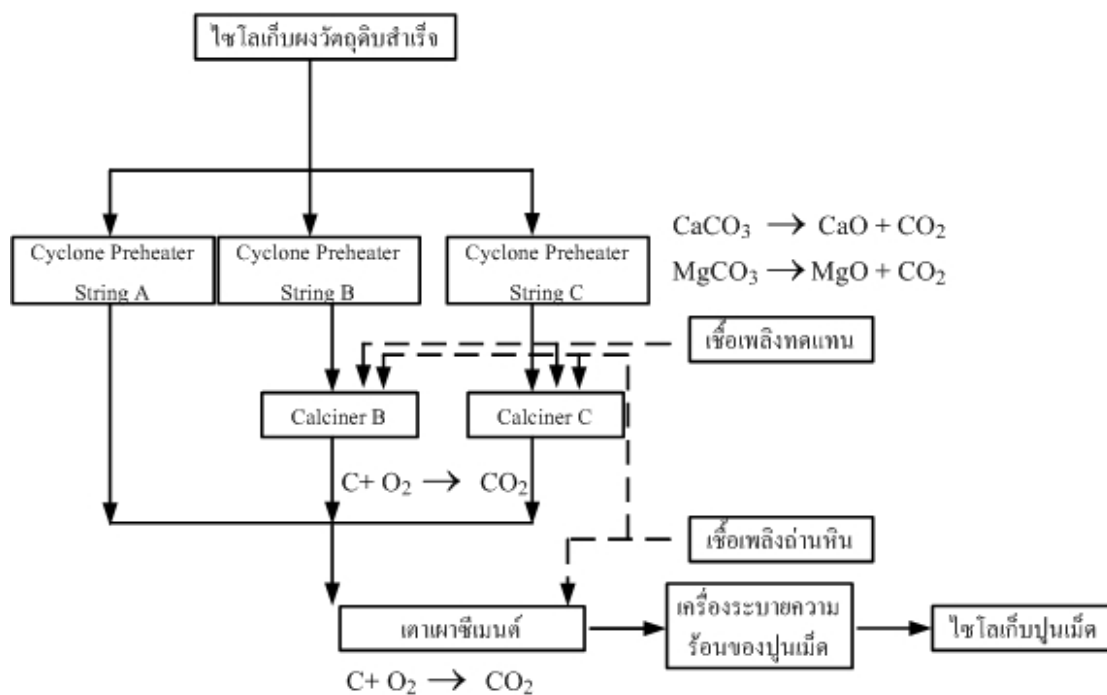


ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย มีสาเหตุสำคัญมาจาก

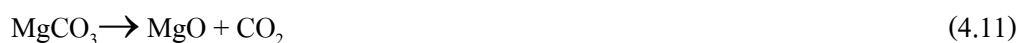
- ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งมีปริมาณของซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน
- เชื้อเพลิงที่ใช้ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ เป็นต้น ซึ่งมีปริมาณของซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน
- เชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้อาจมีซัลเฟอร์เจือปนอยู่

2) การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูป 4.4 การเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Calcination) เกิดขึ้นใน Cyclone Preheater และ Calciner ดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) แล้ว CO₂ จะถูกระบายออกจาก Cyclone Preheater ตามเส้นทางที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ปฏิกริยาการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเกิดขึ้นเมื่อมีการเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งการเผาไหม้เกิดที่ Calciner และเตาเผาซีเมนต์ จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.12) แล้ว CO_2 จะถูกระบายออกทางท่อสู่อากาศกลับตามเส้นทางที่ 2 ดังรูปที่ 4.2



ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย มีสาเหตุสำคัญมาจาก

- ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่แตกต่างกัน

- เชื้อเพลิงที่ใช้ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ เป็นต้น

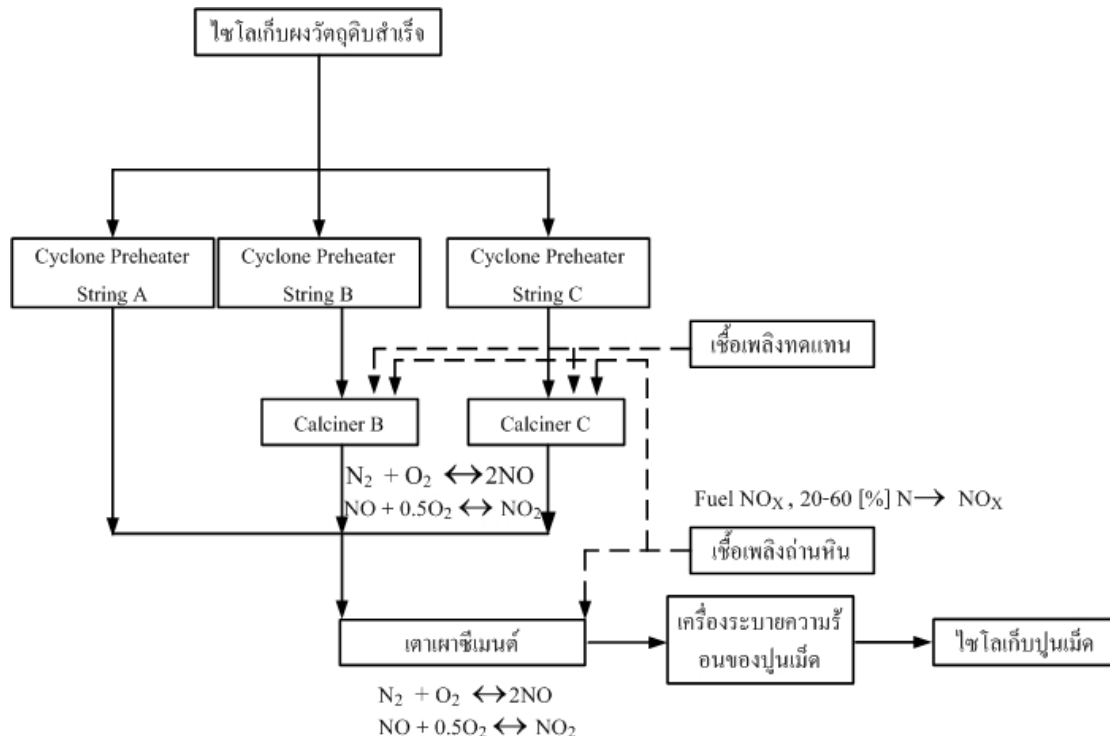
- เชื้อเพลิงทดแทนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่แตกต่างกัน

3) การเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

จากรูป 4.5 การเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์สามารถเกิดได้จากการนำเชื้อเพลิงมาเผาในอากาศ ซึ่งจะเกิดที่ Calciner และเตาเผาซีเมนต์ ซึ่งออกซิเจน และไนโตรเจนในอากาศบางส่วนจะรวมตัวกันเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในสมการที่ (4.13)



ปฏิกิริยาที่แสดงในสมการที่ 4.13 เป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับแต่อัตราที่ NO จะกลายมาเป็นโมเลกุลของไนโตรเจน และออกซิเจนนั้นจะเกิดขึ้นช้ามาก NO จะสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็น NO₂ ได้ในบริเวณที่อุณหภูมิการเผาไหม้สูง ดังสมการที่ (4.14)



รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์

นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่ Calciner และเตาเผาซีเมนต์ ประมาณ 20-60% ของไนโตรเจนจะถูกออกไซด์ไปเป็น NO และ NO₂ ได้เช่นกัน ซึ่ง NO และ NO₂ ที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกตามเส้นทางการระบายมลพิษเส้นทางที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.2

ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย มีสาเหตุสำคัญมาจาก

- เชื้อเพลิงที่ใช้ เช่น ถ่านหิน ลิกไนต์ เป็นต้น ซึ่งจะให้ค่าความร้อนที่แตกต่างกัน และมีผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาเผา

- เชื้อเพลิงทดแทนที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนที่แตกต่างกัน
- ปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา
- ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา ซึ่งจะเกิดเมื่ออุณหภูมิในเตาดำเนินไปจะเกิด CaO สูง และ CaO จะไปทำปฏิกิริยากับก๊าซไนโตรเจนในเตาเผา

- อุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาเผาซึ่งมีผลต่อการเกิด Thermal NO_x

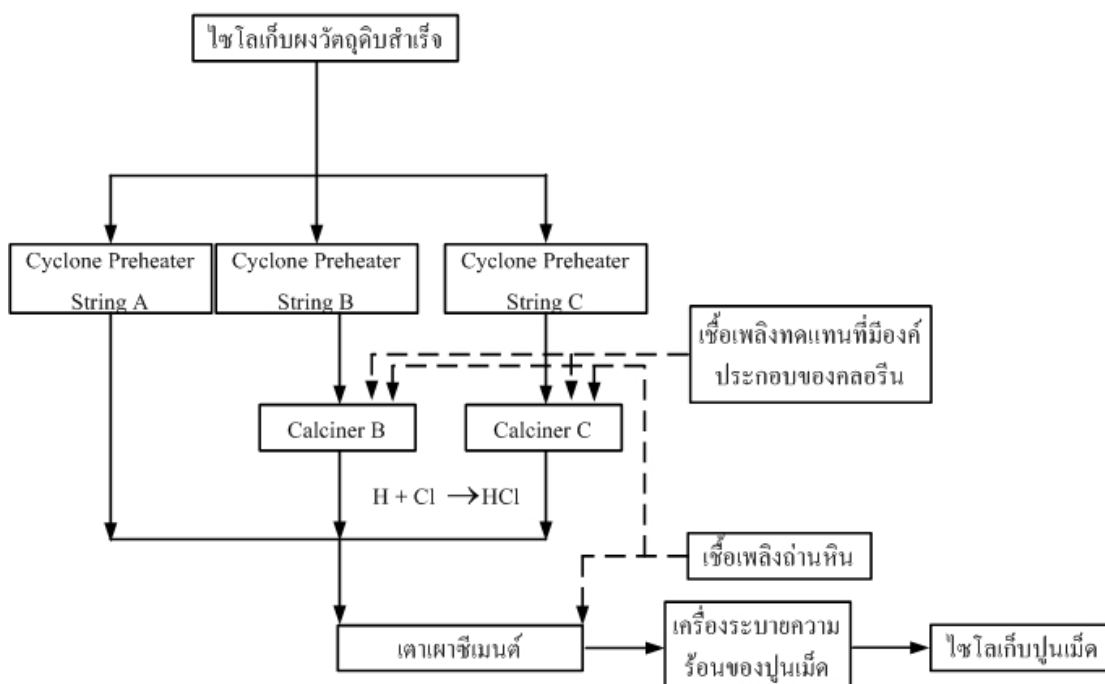
4) การเกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

จากรูปที่ 4.6 ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์สามารถเกิดได้จากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง และวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของคลอรีน เช่น พลาสติก ยาง เป็นต้น ซึ่งเกิดที่ Calciner ซึ่งคลอรีนจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนในอากาศทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ดังสมการที่ (4.15) ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์จะถูกระบายออก Cyclone Preheater



ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย มีสาเหตุสำคัญมาจาก

- วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของคลอรีน
- เชื้อเพลิงทดแทนที่มีส่วนประกอบของคลอรีน
- อุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาเผาซึ่งมีผลต่อการทำลายคลอรีน



รูปที่ 4.6 ปฏิบัติการเกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์

5) การเกิดฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในเตาเผาซีเมนต์ เกิดจากผงวัตถุดิบ และเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ที่ถูกดูดไปกับลมร้อนที่ Preheater ซึ่งจะเกิดขึ้นมากหรือน้อย มีสาเหตุสำคัญมาจาก

- ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต
- ความหยาบหรือความละเอียดของผงวัตถุดิบ ซึ่งวัตถุดิบที่มีความละเอียดมากบางส่วนจะถูกดูดออกจาก Preheater ไปกับลมร้อนที่ระบายออก ส่วนวัตถุดิบที่หยาบเกินไปจะไม่ทำปฏิกิริยาเมื่อเกิดการเผาไหม้ และปะปนไปกับเม็ดปูน
- เชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณฝุ่นละออง คือ ประสิทธิภาพของเครื่อง EP ที่ใช้ในการบำบัดฝุ่น ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของฝุ่นที่เกิดขึ้น ถ้าอนุภาคมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำจะถูกไล่ประจุได้ง่าย และเสียประจุได้ง่าย ดังนั้นเมื่อเกาะที่ขั้วเก็บแล้วจะสูญเสียประจุเร็ว ทำให้ฝุ่นฟุ้งกลับเข้ากระแสดำชอีก

4.1.3 กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากการศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และมลพิษที่เกิดขึ้น สามารถสรุปตัวแปรที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการระบายมลพิษของกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ดังนี้

1) ตัวแปรด้านวัตถุดิบ คือ วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ หินปูน และวัตถุดิบรอง ได้แก่ หินดินดาน หินลูกรัง ดินเหนียว ดินกลางดง วัตถุดิบทดแทน และวัตถุดิบอื่น ๆ

2) ตัวแปรด้านเชื้อเพลิง คือ ถ่านหินบิทูมินัส ลิกไนต์ และแอนทราไซต์ เชื้อเพลิงทั้ง 3 เป็นเชื้อเพลิงหลัก และของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ 46 ประเภท เป็นเชื้อเพลิงทดแทน

3) ตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิต คือ

- ความหนาหรือความละเอียดของผงวัตถุดิบ วัดในรูปของเปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุดิบเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 90 ไมครอน และ 200 ไมครอน

- ความชื้นของวัตถุดิบ

- ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของฝุ่นที่เกิดขึ้น

- อุณหภูมิในเตาเผา

- กำลังหมุนของเตา

- ความชื้นของเชื้อเพลิง

- ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

- ปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา

- ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา

- ระยะเวลาในการเผาปูนเม็ด

- ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา

- การเดิน และไม่เดินระบบของ Raw Mill ในรูปของชั่วโมงการทำงาน

- การเดิน และไม่เดินระบบของ Coal Mill ในรูปของชั่วโมงการทำงาน

- ปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

- สัดส่วนของเชื้อเพลิงทดแทนต่อเชื้อเพลิงหลัก

4) ตัวแปรด้านสภาพของเครื่องบำบัดมลพิษ คือ ประสิทธิภาพของเครื่อง EP ความเร็วของฝุ่นที่เข้าแผ่นเก็บ อัตราไหล พื้นที่แผ่นเก็บ แรงดันไฟฟ้า

จากตัวแปรที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการระบายมลพิษอากาศดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงกำหนดตัวแปรอิสระที่จะใช้ในการวิเคราะห์ดังสรุปในตารางที่ 4.1 โดยตัวแปรที่ตัดออก คือ

- 1) ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของฝุ่นที่เกิดขึ้น มีเพียงค่าที่วิเคราะห์ปีละ 1 ครั้ง ซึ่งน้อยเกินไป
- 2) ระยะเวลาในการเผาปูนเม็ด ไม่มีข้อมูลที่เก็บบันทึก
- 3) ตัวแปรด้านสภาพของเครื่องบำบัดมลพิษ เนื่องจากไม่มีข้อมูล และทราบจากทางบริษัทว่าได้ควบคุมสภาพการทำงานของเครื่อง EP ให้คงที่มากที่สุด
- 4) สัดส่วนของเชื้อเพลิงทดแทนต่อเชื้อเพลิงหลัก เนื่องจากไม่ได้เป็นปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต ทั้งนี้ทางโรงงานจะพิจารณาองค์ประกอบของเชื้อเพลิงทดแทนแต่ละชนิดที่จะใช้ในครั้งหนึ่ง ๆ เป็นหลัก โดยไม่ได้ควบคุมที่สัดส่วน

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตัวแปรมลพิษ

ตัวแปร	รายละเอียด	หน่วย
วัตถุดิบ		
Lime	หินปูน	ตัน/วัน
ShaleS	หินดินดานที่มีซิลิกา	ตัน/วัน
ShaleA	หินดินดานที่มีอลูมิน่า	ตัน/วัน
Clay	ดินเหนียว	ตัน/วัน
AR	วัตถุดิบทดแทน	ตัน/วัน
KD	ดินกลางดง	ตัน/วัน
LB	หินลูกรังชนิด B	ตัน/วัน
Other	วัตถุดิบอื่น ๆ	ตัน/วัน
เชื้อเพลิง		
Coal_B	ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพสูง (ที่มีค่าความร้อนมากกว่า 5,000 แคลอรี/กรัม)	ตัน/วัน
Coal_C	ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพต่ำ (ที่มีค่าความร้อนน้อยกว่า 5,000 แคลอรี/กรัม)	ตัน/วัน
Lig	ลิกไนต์	ตัน/วัน
Ant	แอนทราไซท์	ตัน/วัน
W_01	ของเหลวที่เหลือจากระบวนการกลั่น	ลบ.ม./วัน
W_02	น้ำหล่อเย็นเครื่องจักร	ลบ.ม./วัน
W_03	น้ำจากกระบวนการล้าง การผลิต การบำบัด	ลบ.ม./วัน
W_04	เชื้อเพลิงทดแทนเหลวสังเคราะห์	ลบ.ม./วัน
W_05	ของเหลวที่เป็นตัวทำละลาย	ลบ.ม./วัน
W_06	น้ำมันใช้แล้ว	ลบ.ม./วัน
W_07	ของเหลวที่ไม่ใช่แล้วชนิดอื่น ๆ	ลบ.ม./วัน
W_08	กากตะกอนปิโตรเลียมจากการผลิต และซ่อมบำรุง	ตัน/วัน

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตัวแปรมลพิษ (ต่อ)

ตัวแปร	รายละเอียด	หน่วย
เชื้อเพลิง (ต่อ)		
W_09	กากตะกอนปิโตรเลียมก้นถัง	ตัน/วัน
W_10	กากตะกอนจากการขุดเจาะน้ำมัน	ตัน/วัน
W_11	กากตะกอนจากการขุดเจาะน้ำ	ตัน/วัน
W_12	กากตะกอนไขน้ำมัน	ตัน/วัน
W_13	กากที่มีลักษณะหนืด ของเสีย ไม่ได้ใช้งาน	ตัน/วัน
W_14	ตะกอนจากการกรองแยกน้ำมันที่ใช้แล้ว	ตัน/วัน
W_15	กากตะกอนปิโตรเลียมจากเครื่องแยกน้ำ/น้ำมัน	ตัน/วัน
W_16	ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอเอส	ตัน/วัน
W_17	กากตะกอนอื่น ๆ	ตัน/วัน
W_18	สลัดที่มีค่าความร้อนจากกระบวนการขึ้นรูปเหล็ก	ตัน/วัน
W_19	กาก จากผลิตผลทางการเกษตร	ตัน/วัน
W_20	แกลบ	ตัน/วัน
W_21	กากมันสำปะหลัง	ตัน/วัน
W_22	วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของไม้	ตัน/วัน
W_23	ขี้เลื่อย และขี้กบ	ตัน/วัน
W_24	กากตะกอนขจัดสี และวานิช	ตัน/วัน
W_25	ของแข็งที่เหลือจากการขจัดสีหรือวานิช	ตัน/วัน
W_26	ดินกรอง/คูซิปส์ และสารปลอมปนในไขมัน จารบี และน้ำมัน	ตัน/วัน
W_27	ไคอะทอไมด์ที่ใช้แล้ว	ตัน/วัน
W_28	ตัวเร่งปฏิกิริยาหมดอายุ (Spent Catalyst)	ตัน/วัน
W_29	ถ่านคาร์บอนมีประจุที่ใช้แล้ว	ตัน/วัน
W_30	วัสดุที่ใช้ดูดซับเพื่อทำความสะอาดก๊าซ	ตัน/วัน
W_31	ถ่านคาร์บอนดำ	ตัน/วัน
W_32	เถ้าน้ำมัน (Oil Ash)	ตัน/วัน
W_33	ไอออนเอ็กเชนเจอร์อินที่ใช้แล้ว	ตัน/วัน
W_34	เชื้อเพลิงทดแทนแข็งสังเคราะห์	ตัน/วัน
W_35	เชื้อเพลิงวัสดุเหลือจากการหมักขยะชุมชน	ตัน/วัน
W_36	พอลิเมอร์ และมอนอเมอร์ (ผง เม็ด)	ตัน/วัน
W_37	วัสดุขึ้นรูปที่เป็นองค์ประกอบพลาสติก	ตัน/วัน
W_38	กากของเสียอื่น ๆ	ตัน/วัน
W_39	วัสดุของแข็งมีค่าความร้อนจากโรงงานผลิตซีเมนต์	ตัน/วัน

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ และตัวแปรมลพิษ (ต่อ)

ตัวแปร	รายละเอียด	หน่วย
เชื้อเพลิง (ต่อ)		
W_40	แผ่นโลหะบด	ตัน/วัน
W_41	เชื้อเพลิงทดแทนบด	ตัน/วัน
W_42	เชื้อเพลิงทดแทนผสม	ตัน/วัน
W_43	กากตะกอนผสม	ตัน/วัน
W_44	กระดาษ	ตัน/วัน
W_45	พลาสติก	ตัน/วัน
W_46	ผ้า เศษผ้า	ตัน/วัน
สภาพของกระบวนการผลิต		
R_90	เปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุบดเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 90 ไมครอน	เปอร์เซ็นต์
R_200	เปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุบดเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน	เปอร์เซ็นต์
HVA	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String A	แคลอรี/กรัม
HVB	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String B	แคลอรี/กรัม
HVC	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String C	แคลอรี/กรัม
T	อุณหภูมิในเตาเผา	องศาเซลเซียส
KT	กำลังหมุนของเตา	เปอร์เซ็นต์
O2	ปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา	เปอร์เซ็นต์
Moist_RM	ความชื้นของวัตถุดิบ	เปอร์เซ็นต์
Moist_F	ความชื้นของเชื้อเพลิง	เปอร์เซ็นต์
CaO	ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา	เปอร์เซ็นต์
KR	ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา	ชั่วโมง/วัน
RM	ชั่วโมงการทำงานของ Raw Mill (รวม 2 หม้อบด)	ชั่วโมง/วัน
CM	ชั่วโมงการทำงานของ Coal Mill (รวม 2 หม้อบด)	ชั่วโมง/วัน
CK	ปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน	ตัน/วัน
มลพิษอากาศ		
NO ₂	ก๊าซ NO ₂	มก./ลบ.ม.
SO ₂	ก๊าซ SO ₂	มก./ลบ.ม.
CO ₂	ก๊าซ CO ₂	เปอร์เซ็นต์
HCl	ก๊าซ HCl	มก./ลบ.ม.
TSP	ฝุ่นละออง	มก./ลบ.ม.

4.2 สถิติพรรณนาของข้อมูล

4.2.1 ข้อมูลวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์สถิติพรรณนาของข้อมูลวัตถุดิบเฉลี่ยรายวัน ช่วงปี พ.ศ. 2550 ของเตาหมายเลข 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าวัตถุดิบที่ใช้มากที่สุด คือ หินปูน (Lime) คิดเป็นร้อยละ 80 ของวัตถุดิบทั้งหมด รองลงมา คือ หินดินดานที่มีซิลิกา (ShaleS) ดินเหนียว (Clay) และหินดินดานที่มีอลูมินา (ShaleA) คิดเป็นร้อยละ 7, 4 และ 2.5 ของวัตถุดิบทั้งหมด ตามลำดับ

จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูลวัตถุดิบ พบว่าจำนวนข้อมูลที่มีข้อมูลของเตาหมายเลข 5 และ 6 มี 314 และ 313 ตัวอย่าง ตามลำดับ ข้อมูลที่ขาดไปมี 15 และ 16 ตัวอย่าง ตามลำดับ พบว่าตัวแปรวัตถุดิบทั้ง 7 มีความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) ที่น้อยกว่า 1 ยกเว้นหินลูกรังชนิด B (LB) ที่มีความแปรปรวนของข้อมูลสูง มีค่า COV เท่ากับ 1.13 ในเตาหมายเลข 5 และ 1.25 ในเตาหมายเลข 6 และจากการศึกษาลักษณะการกระจายของข้อมูล โดยพิจารณาค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง (Kurtosis) โดยใช้เกณฑ์ คือ ค่าความเบ้ของการแจกแจงแบบปกติมีค่าเท่ากับศูนย์ หากมีค่าบวก แสดงการเบ้ขวาหรือมีหางยาวทางด้านขวา ส่วนค่าลบแสดงการเบ้ซ้ายหรือการมีหางยาวทางด้านซ้าย ส่วนค่าความโด่ง เป็นค่าที่บอกการกระจุกตัวหรือกระจายตัวของข้อมูล ค่าบวกแสดงการกระจุกตัวหรือการมียอดกราฟแหลม และหางสองข้างเรียวยาว ค่าลบแสดงการมียอดกราฟแป้น และหางสองข้างหนา พบว่าตัวแปรหินปูน และหินดินดานที่มีซิลิกา มีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัว ส่วนตัวแปรดินเหนียว และหินดินดานที่มีอลูมินา มีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และข้อมูลมีการกระจายตัว และจากการทบทวนข้อมูลไม่พบความผิดปกติของข้อมูล

4.2.2 ข้อมูลเชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์สถิติพรรณนาของข้อมูลเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายวัน ช่วงปี พ.ศ. 2550 ของเตาหมายเลข 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเชื้อเพลิงที่ใช้มากที่สุด คือ ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพสูง (Coal_B) และ ลิกไนต์ (Lig) คิดเป็นร้อยละ 45 และ 44 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด ตามลำดับ รองลงมา คือ เชื้อเพลิงทดแทน คิดเป็นร้อยละ 6 และ 8 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด ของเตาหมายเลข 5 และ 6 ตามลำดับ โดยที่เชื้อเพลิงทดแทนที่ใช้มากที่สุด คือ น้ำจากกระบวนการล้าง การผลิต การบำบัด (W_03) สำหรับของเตาหมายเลข 5 คิดเป็นร้อยละ 2.5 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด และเชื้อเพลิงวัสดุเหลือจากการหมักขยะชุมชน (W_35) สำหรับของเตาหมายเลข 6 คิดเป็นร้อยละ 3.5 ของเชื้อเพลิงทั้งหมด

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 5

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่ป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
วัตถุดิบ										
Lime	314	15	18	0.00	12958.19	10565.95	3370.79	0.32	-2.34	4.31
ShaleS	314	15	18	0.00	1718.03	891.55	387.42	0.43	-0.50	0.20
ShaleA	314	15	18	0.00	712.09	340.86	212.29	0.62	0.20	-1.04
Clay	314	15	18	0.00	1144.51	538.28	318.66	0.59	0.20	-0.93
AR	314	15	18	0.00	519.96	256.46	125.16	0.49	0.08	-0.20
KD	314	15	18	0.00	424.60	208.24	102.42	0.49	0.12	-0.20
LB	314	15	137	0.00	149.53	29.60	33.54	1.13	1.13	1.38
Other	314	15	18	0.00	289.57	142.83	62.40	0.44	-0.16	0.91
เชื้อเพลิง										
Coal_B	307	22	0	14.02	1082.83	694.16	172.63	0.25	-0.93	1.24
Coal_C	307	22	220	0.00	503.47	49.51	104.19	2.10	2.35	5.21
Lig	307	22	0	21.74	1130.18	686.12	168.65	0.25	-0.62	1.03
Ant	307	22	296	0.00	109.00	2.20	12.65	5.74	6.37	43.01
W_01	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_02	329	0	274	0.00	85.53	4.36	12.97	2.98	3.75	15.18
W_03	329	0	103	0.00	164.00	49.29	45.86	0.93	0.47	-1.03
W_04	329	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_05	329	0	324	0.00	15.11	0.15	1.26	8.39	9.03	86.74
W_06	329	0	306	0.00	45.00	1.17	4.96	4.25	5.21	31.25
W_07	329	0	296	0.00	150.00	4.37	16.96	3.88	5.19	31.73
W_08	329	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_09	329	0	271	0.00	10.68	1.17	2.71	2.32	2.24	3.94
W_10	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_11	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_12	329	0	327	0.00	5.00	0.03	0.39	12.81	12.77	161.98
W_13	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_14	329	0	328	0.00	0.92	0.00	0.05	18.14	18.14	329.00
W_15	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_16	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_17	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_18	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_19	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 5 (ต่อ)

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่เป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
เชื้อเพลิง (ต่อ)										
W_20	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_21	329	0	309	0.00	52.00	1.40	6.37	4.56	5.30	30.56
W_22	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_23	329	0	328	0.00	26.00	0.08	1.43	18.14	18.14	329.00
W_24	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_25	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_26	329	0	326	0.00	7.20	0.05	0.55	10.61	10.91	121.84
W_27	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_28	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_29	329	0	271	0.00	10.00	1.19	2.76	2.32	2.25	3.90
W_30	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_31	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_32	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_33	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_34	329	0	305	0.00	16.86	0.46	1.81	3.92	4.83	28.61
W_35	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_36	329	0	326	0.00	10.00	0.07	0.77	11.04	11.69	139.94
W_37	329	0	328	0.00	6.00	0.02	0.33	18.14	18.14	329.00
W_38	329	0	315	0.00	15.00	0.59	2.93	4.93	4.75	20.68
W_39	329	0	316	0.00	14.28	0.38	1.97	5.14	5.21	26.40
W_40	329	0	318	0.00	35.00	0.46	2.88	6.23	8.11	78.43
W_41	329	0	327	0.00	10.00	0.05	0.62	13.50	14.57	222.23
W_42	329	0	154	0.00	100.00	15.72	20.83	1.32	1.58	2.47
W_43	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_44	329	0	316	0.00	11.00	0.43	2.15	4.94	4.75	20.68
W_45	329	0	316	0.00	11.00	0.43	2.15	4.94	4.75	20.68
W_46	329	0	316	0.00	10.00	0.40	1.95	4.94	4.75	20.68
สภาพของกระบวนการผลิต										
R_90	329	0	0	12.10	15.00	12.79	0.50	0.04	1.38	2.47
R_200	329	0	0	1.28	1.60	1.31	0.05	0.04	3.07	9.19
HVA	307	22	0	4631.00	5766.00	5279.97	198.50	0.04	-0.29	0.18
HVB	306	23	0	4728.00	5874.00	5295.27	195.26	0.04	-0.24	0.45

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 5 (ต่อ)

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่ป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
สภาพของกระบวนการผลิต (ต่อ)										
HVC	302	27	0	4722.00	5827.00	5297.08	192.79	0.04	-0.24	0.12
T	325	4	0	721.39	1169.85	1073.29	63.08	0.06	-1.95	4.65
KT	328	1	18	0.00	99.27	62.47	19.08	0.31	-2.13	4.77
O2	311	18	0	2.13	10.00	3.30	0.71	0.21	3.55	27.10
Moist_R M	294	35	0	0.31	0.67	0.48	0.07	0.15	0.07	-0.40
Moist_F	307	22	0	3.81	8.34	6.25	0.76	0.12	-0.42	0.63
CaO	308	21	0	0.45	3.81	1.24	0.24	0.19	4.08	44.46
KR	329	0	19	0.00	24.00	21.90	6.15	0.28	-3.01	7.58
RM	329	0	22	0.00	48.00	28.52	13.75	0.48	-0.23	-0.60
CM	329	0	23	0.00	38.50	26.36	8.90	0.34	-1.98	3.19
CK	329	0	20	0.00	10330.0	8832.76	2744.59	0.31	-2.44	4.77
มลพิษอากาศ										
NO ₂	306	23	0	5.10	72.40	37.80	10.86	0.29	0.53	2.26
SO ₂	286	43	0	0.17	157.64	36.67	33.12	0.90	1.48	1.85
CO ₂	300	29	0	6.92	18.77	12.50	1.60	0.13	0.76	1.84
HCl	306	23	0	0.48	11.13	4.13	2.08	0.50	0.87	0.63
TSP	304	25	0	12.10	47.18	26.44	5.26	0.20	1.53	3.70

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 6

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่ป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
วัตถุดิบ										
Lime	313	16	43	0.00	13705.92	10097.70	4395.87	0.44	-1.67	1.11
ShaleS	313	16	43	0.00	1714.10	894.63	470.24	0.53	-0.51	-0.30
ShaleA	313	16	43	0.00	728.61	341.31	221.88	0.65	0.13	-0.97
Clay	313	16	43	0.00	1151.18	493.37	333.91	0.68	0.25	-0.92
KD	313	16	60	0.00	497.64	222.63	157.35	0.71	-0.04	-1.27
LB	313	16	142	0.00	157.24	35.78	44.58	1.25	1.32	1.04
Other	313	16	43	0.00	331.01	148.66	81.98	0.55	-0.14	0.02

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 6 (ต่อ)

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่ป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
เชื้อเพลิง										
Coal_B	283	46	0	98.07	1070.98	655.65	164.03	0.25	-0.60	-0.02
Coal_C	283	46	182	0.00	506.79	53.23	98.04	1.84	2.08	3.93
Lig	283	46	0	53.33	1004.01	642.93	140.83	0.22	-0.39	1.11
Ant	283	46	272	0.00	95.99	2.57	13.48	5.25	5.48	30.02
W_01	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_02	329	0	307	0.00	69.51	1.74	8.03	4.60	5.47	32.44
W_03	329	0	187	0.00	150.00	29.65	41.86	1.41	1.20	0.24
W_04	329	0	327	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_05	329	0	328	0.00	8.75	0.03	0.48	18.14	18.14	329.00
W_06	329	0	324	0.00	8.78	0.10	0.81	8.19	8.38	71.59
W_07	329	0	313	0.00	83.91	1.56	8.43	5.39	6.75	51.15
W_08	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_09	329	0	269	0.00	13.23	1.12	2.56	2.29	2.34	4.99
W_10	329	0	327	0.00	6.60	0.04	0.49	12.82	12.81	163.49
W_11	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_12	329	0	327	0.00	5.00	0.03	0.39	12.81	12.77	161.98
W_13	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_14	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_15	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_16	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_17	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_18	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_19	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_20	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_21	329	0	318	0.00	20.00	0.25	1.61	6.43	8.31	81.51
W_22	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_23	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_24	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_25	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_26	329	0	324	0.00	7.50	0.08	0.67	8.22	8.50	74.42
W_27	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_28	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 6 (ต่อ)

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่เป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
เชื้อเพลิง (ต่อ)										
W_29	329	0	267	0.00	13.38	1.24	2.80	2.26	2.24	4.06
W_30	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_31	329	0	328	0.00	0.09	0.00	0.00	18.14	18.14	329.00
W_32	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_33	329	0	328	0.00	2.85	0.01	0.16	18.14	18.14	329.00
W_34	329	0	311	0.00	10.00	0.33	1.44	4.36	4.66	22.60
W_35	329	0	159	0.00	179.50	32.18	40.87	1.27	1.27	1.07
W_36	329	0	285	0.00	15.00	1.02	3.07	3.00	3.22	9.59
W_37	329	0	328	0.00	6.41	0.02	0.35	18.14	18.14	329.00
W_38	329	0	318	0.00	25.00	0.53	2.91	5.48	5.57	31.36
W_39	329	0	311	0.00	13.51	0.54	2.28	4.21	4.06	14.88
W_40	329	0	164	0.00	165.00	30.32	38.00	1.25	1.03	0.16
W_41	329	0	322	0.00	15.00	0.17	1.28	7.46	8.50	78.47
W_42	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_43	329	0	329	0.00	0.00	0.00	0.00			
W_44	329	0	319	0.00	11.00	0.31	1.80	5.83	5.77	31.62
W_45	329	0	318	0.00	11.69	0.37	1.99	5.39	5.22	25.39
W_46	329	0	319	0.00	10.00	0.30	1.72	5.66	5.50	28.38
สภาพของกระบวนการผลิต										
R_90	290	39	0	12.67	16.00	14.44	0.33	0.02	-1.04	4.67
R_200	290	39	0	1.31	1.66	1.46	0.05	0.04	-0.91	0.92
HVA	283	46	0	4717.00	6183.00	5297.11	199.64	0.04	-0.17	1.27
HVB	281	48	0	4660.00	5758.00	5293.65	192.55	0.04	-0.39	0.15
HVC	283	46	0	4735.00	5804.00	5295.98	183.96	0.03	-0.30	0.19
T	329	0	0	752.55	1280.72	1115.99	98.52	0.09	-0.95	0.37
KT	329	0	40	0.00	95.66	59.77	25.70	0.43	-1.51	1.17
O2	288	41	0	2.14	10.00	3.23	0.67	0.21	4.91	43.29
Moist_RM	329	0	59	0.00	0.69	0.41	0.20	0.49	-1.32	0.27
Moist_F	283	46	0	3.39	7.78	6.03	0.70	0.12	-0.64	0.65
CaO	286	43	0	0.63	4.52	1.22	0.32	0.27	5.31	45.47
KR	329	0	43	0.00	24.00	20.24	8.24	0.41	-1.95	1.98
RM	329	0	45	0.00	48.00	26.59	15.19	0.57	-0.25	-0.83

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลสถิติเบื้องต้นของข้อมูลตัวแปรของเตาเผาหมายเลข 6 (ต่อ)

ตัวแปร	จำนวนข้อมูล	ข้อมูลที่ขาดไป	จำนวนข้อมูลที่ป็นศูนย์	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	COV	Skewness	Kurtosis
สภาพของกระบวนการผลิต (ต่อ)										
CM	329	0	47	0.00	37.00	22.21	10.08	0.45	-1.39	0.69
CK	329	0	43	0.00	10350.00	8242.29	3484.26	0.42	-1.76	1.38
มลพิษอากาศ										
NO ₂	284	45	0	2.38	79.72	38.75	10.50	0.27	1.01	2.95
SO ₂	271	58	0	0.90	122.16	23.95	24.25	1.01	2.28	5.02
CO ₂	281	48	0	10.05	32.16	22.83	2.75	0.12	-0.96	4.41
HCl	286	43	0	0.12	64.47	21.57	13.61	0.63	0.90	0.03
TSP	286	43	2	0.00	51.82	29.95	7.14	0.24	0.38	1.99

ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูลเชื้อเพลิงหลัก พบว่าจำนวนข้อมูลที่มีข้อมูลของเตาหมายเลข 5 และ 6 มี 307 และ 283 ตัวอย่าง ตามลำดับ ข้อมูลที่ขาดไปมี 22 และ 46 ตัวอย่างตามลำดับ และพบว่าข้อมูล Coal_B และ Lig มีความแปรปรวนน้อย ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัว ส่วนตัวแปรถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพต่ำ (Coal_C) และ แอนทราไซท์ (Ant) มีความแปรปรวนสูง ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และมีการกระจายตัวมาก

ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูลเชื้อเพลิงทดแทน (W_01 ถึง W_46) พบว่าจำนวนข้อมูลที่มีข้อมูลของเตาหมายเลข 5 และ 6 เท่ากับ 329 ตัวอย่าง และมีจำนวนตัวแปรที่มีข้อมูลทั้งหมดเป็นศูนย์ในเตาหมายเลข 5 และ 6 เท่ากับ 23 และ 22 ตัวแปร ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงไม่มีการใช้เชื้อเพลิงชนิดนั้นในปี 2550 ส่วนตัวแปรอื่น ๆ ก็มีข้อมูลที่เป็นศูนย์มาก แสดงถึงมีการใช้เชื้อเพลิงชนิดนั้นน้อยหรือใช้เป็นบางครั้ง ทำให้มีผลกับลักษณะการแจกแจงข้อมูล และมีผลกับการวิเคราะห์สมการความถดถอย จากการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรที่ข้อมูลไม่เป็นศูนย์ทั้งหมด ข้อมูลมีความแปรปรวนสูง ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และมีการกระจายตัวมาก

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของเชื้อเพลิงทดแทนต่อเชื้อเพลิงหลัก ของเตาหมายเลข 5 และ 6 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.06 : 1 และ 0.09 : 1 และสัดส่วนสูงสุดที่ใช้เท่ากับ 0.20 : 1 และ 0.26 : 1 ตามลำดับ และสัดส่วนของเชื้อเพลิงทดแทนต่อเชื้อเพลิงหลักมีความแปรปรวนค่อนข้างต่ำ

4.2.3 ข้อมูลสภาพของกระบวนการผลิต

ผลการวิเคราะห์สถิติพรรณนาของข้อมูลสภาพของกระบวนการผลิตเฉลี่ยรายวัน ช่วงปี พ.ศ. 2550 ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 สามารถแยกอธิบาย ในประเด็นที่สำคัญ คือ

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุคิบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 90 และ 200 ไมครอน (R_90 และ R_200) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่าจำนวนข้อมูลที่มีข้อมูลของ เตาเผาหมายเลข 5 และ 6 มี 329 และ 290 ตัวอย่าง ตามลำดับ เตาเผาหมายเลข 5 ไม่มีข้อมูลที่ขาด เตาเผาหมายเลข 6 ข้อมูลที่ขาดไปมี 39 ตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยของ R_90 ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 เท่ากับ 12.79 และ 14.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยของ R_200 ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 เท่ากับ 1.31 และ 1.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงปกติที่โรงงานกำหนด คือ R_90 ควบคุมในช่วง 1-2 เปอร์เซ็นต์ และ R_200 ควบคุมในช่วง 12-14 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าข้อมูลของ R_90 และ R_200 มีความแปรปรวนน้อยมาก ลักษณะการกระจายของข้อมูล R_90 และ R_200 ของเตาเผาหมายเลข 5 มีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และข้อมูลมีการกระจุกตัว ส่วนเตาเผาหมายเลข 6 มีลักษณะการกระจาย เบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัว

ข้อมูลค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ String A String B และString C (HVA HVB และ HVC) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยของ HVA HVB และ HVC ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ อยู่ในช่วง 5,280-5,297 แคลอรี/กรัม และพบว่าข้อมูล HVA HVB และ HVC มีความแปรปรวนมีน้อยมาก ลักษณะการกระจายของข้อมูล HVA HVB และ HVC มีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัว

ข้อมูลอุณหภูมิในเตาเผา (T) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่าข้อมูลอยู่ในช่วง 720-1280 องศาเซลเซียส และค่าเฉลี่ย T ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ ประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส และพบว่าข้อมูลมีความแปรปรวนมีน้อยมาก ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และมีการกระจุกตัว

ข้อมูล Kiln Torque (KT) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่าข้อมูลอยู่ในช่วง 0-99 เปอร์เซ็นต์ และค่าเฉลี่ย KT ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 เท่ากับ 62.5 และ 60 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าข้อมูลมีความแปรปรวนมีน้อย ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และมีการกระจุกตัว

ข้อมูลปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา (O2) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยของ O2 ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 3.30 และ 3.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าข้อมูล O2 มีความแปรปรวนมีน้อย ข้อมูลมีลักษณะการกระจาย เบ้ขวา และมีการกระจุกตัวมาก

ข้อมูลความชื้นของวัตถุดิบ และเชื้อเพลิง (Moist_RM และ Moist_F) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ Moist_RM ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 0.48 และ 0.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงปกติที่โรงงานกำหนด คือ น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และ Moist_F ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.25 และ 6.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงปกติที่โรงงานกำหนด คือ น้อยกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าข้อมูล Moist_RM และ Moist_F มีความแปรปรวนมีน้อย ลักษณะการกระจายของข้อมูล Moist_RM ของเตาหมายเลข 5 มีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และข้อมูลมีการกระจายตัวเล็กน้อย ส่วนเตาหมายเลข 6 มีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัวเล็กน้อย และ Moist_F มีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัวเล็กน้อย

ข้อมูลปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา (CaO) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่าข้อมูลอยู่ในช่วง 0.45-4.52 และมีค่าเฉลี่ยของ CaO ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 1.24 และ 1.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งโดยภาพแล้วอยู่ในช่วงปกติที่โรงงานกำหนด คือ 1-1.5 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าข้อมูล CaO มีความแปรปรวนมีน้อย ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และมีการกระจายตัวมาก

ข้อมูลชั่วโมงการทำงานของเตาเผา หม้ออบตัววัตถุดิบ และหม้ออบถ่านหิน (KR RM และ CM) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ KR ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 21.90 และ 20.24 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย RM ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 28.52 และ 26.59 ชั่วโมง (รวมสองหม้ออบ) ตามลำดับ และค่าเฉลี่ย CM ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 26.36 และ 22.21 ชั่วโมง (รวมสองหม้ออบ) ตามลำดับ และข้อมูลของทั้ง 3 ตัวแปร มีความแปรปรวนมีค่อนข้างน้อย ลักษณะการกระจายของข้อมูลของ KR และ CM มีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจุกตัว ส่วน RM มีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และข้อมูลมีการกระจายตัวเล็กน้อย

ข้อมูลปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน (CK) ลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูล พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ CK ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 8,833 และ 8,242 ตัน ตามลำดับ และข้อมูลมีความแปรปรวนมีค่อนข้างน้อย ข้อมูลมีลักษณะการกระจายเบ้ซ้าย และมีการกระจุกตัว และจากการทบทวนข้อมูลไม่พบความผิดปกติของข้อมูล

4.2.4 มลพิษอากาศ

ผลการวิเคราะห์สถิติพรรณนาของมลพิษอากาศเฉลี่ยรายวัน ช่วงปี พ.ศ. 2550 ของเตาหมายเลข 5 และ 6 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 โดยพบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ NO_2 , SO_2 และ TSP ของเตาหมายเลข 5 เท่ากับ 37.80, 36.67 และ 26.44 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ NO_2 , SO_2 และ TSP ของเตาหมายเลข 6 เท่ากับ 38.75, 23.95 และ 29.9 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานการปล่อยอากาศเสียจากโรงปูนซีเมนต์ ส่วนค่าเฉลี่ยความเข้มข้น CO_2 และ HCl ของเตาหมายเลข 5 เท่ากับ 12.50 เปอร์เซ็นต์ และ 4.13 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ CO_2 และ HCl ของเตาหมายเลข 6 เท่ากับ 22.83 เปอร์เซ็นต์ และ 21.57 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ ข้อมูล NO_2 , CO_2 , HCl และ TSP มีความแปรปรวนค่อนข้างน้อย ส่วน SO_2 ในเตาหมายเลข 5 แม้จะมีค่าต่ำกว่า 1 แต่ก็มีความแปรปรวน และพบว่ามลพิษทั้ง 5 มีลักษณะการกระจายเบ้ขวา และข้อมูลมีการกระจุกตัวเล็กน้อย

4.2.5 สรุปผลการศึกษาสถิติพรรณนาของข้อมูล

ข้อมูลวัตถุดิบเฉลี่ยรายวัน ส่วนใหญ่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ขวา และข้อมูลกระจายตัว ข้อมูลส่วนใหญ่มีความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างต่ำ

ข้อมูลเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายวัน ส่วนใหญ่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ขวาและข้อมูลกระจุกตัว และมีความแปรปรวนสูง โดยเฉพาะข้อมูลของเชื้อเพลิงทดแทน ส่วนข้อมูลที่มีความแปรปรวนต่ำ ได้แก่ ถ่านหินที่มีคุณภาพสูง และลิกไนต์

ข้อมูลสภาพของกระบวนการผลิตเฉลี่ยรายวัน ส่วนใหญ่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ซ้าย และข้อมูลกระจุกตัว โดยนอกจากนี้ข้อมูลทุกตัวแปรมีความแปรปรวนต่ำ และข้อมูลที่โรงงานมีเกณฑ์ควบคุม พบว่าอยู่ในช่วงปกติที่ควบคุม ได้แก่ เปอร์เซ็นต์คั้งของผงวัตถุดิบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 90 และ 200 ไมครอน ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา ความชื้นของวัตถุดิบ และเชื้อเพลิง

ข้อมูลมลพิษอากาศเฉลี่ยรายวัน พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ NO_2 , SO_2 และ TSP มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานการปล่อยอากาศเสียจากโรงปูนซีเมนต์ ข้อมูลมลพิษทุกตัวมีความแปรปรวนมีค่อนข้างน้อย มีลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ขวา และข้อมูลมีการกระจุกตัวเล็กน้อย

4.3 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และการคัดเลือกตัวแปร

ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างมลพิษอากาศ และข้อมูลองค์ประกอบวัตถุดิบเชื้อเพลิง และกระบวนการผลิต โดยตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับการระบายมลพิษอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้กำหนดเป็นตัวแปรอิสระตั้งต้นในการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองโดยในการศึกษาได้แบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี ได้แก่ 1) กรณีตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม 2) กรณี Log ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม 3) กรณีตัวแปรอิสระกับ Log ของตัวแปรตาม และ 4) กรณี Log ของตัวแปรอิสระกับ Log ของตัวแปรตาม

4.3.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์โดยแยกเป็น 4 กรณี โดยการแปลงค่าตัวแปรให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของลอการิทึมนั้น ส่วนใหญ่ไม่ส่งผลต่อรูปแบบความสัมพันธ์ของมลพิษ กับตัวแปรอิสระต่าง ๆ มากนัก แต่มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของบางตัวแปรมีค่าเพิ่มมากขึ้น และบางตัวแปรมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย ยกเว้นในบางกรณีที่น่าสังเกต ได้แก่ ShaleS Other และ Coal_B ไม่มีความสัมพันธ์กับ NO_2 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อไม่ได้แปลงค่าตัวแปร แต่เมื่อทำการแปลงค่าตัวแปรกลับมีความสัมพันธ์กับ NO_2 อย่างมีนัยสำคัญ

สรุปตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปรตาม 5 อันดับแรก ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และใช้กรณีที่ไม่มีการแปลงค่าตัวแปรเป็นตัวแทนในการอธิบาย ได้ดังนี้

ผลการศึกษาค่าการระบาย NO_2 ของเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ Clay Lime W_38 W_44 W_45 และ W_46 ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.371-0.644 ส่วน NO_2 ของเตาหมายเลข 6 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ Clay R_200 KD W_45 และ W_46 โดย Clay W_45 และ W_46 มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.406-0.623 ส่วน R_200 และ KD มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.426-0.530 ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรสอดคล้องกับเตาหมายเลข 5 คือ Clay W_45 และ W_46

ค่าการระบาย SO_2 ของเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ W_36 Lime Lig Clay และ Coal_B ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.185-0.220 ส่วน SO_2 ของเตาหมายเลข 6 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ W_36 W_39 Moist_RM HVB และ Coal_C โดย W_36 และ W_39 มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.272-0.357 ส่วน Moist_RM HVB และ Coal_C มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.219-0.260 ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรของเตาหมายเลข 5 เตาหมายเลข 6 ไม่สอดคล้องกัน

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมลพิษอากาศ และตัวแปรอิสระที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 5 อันดับแรก

กรณีศึกษา	ตัวแปรตาม	เตาหมายเลข 5		เตาหมายเลข 6	
		ตัวแปรอิสระ	R	ตัวแปรอิสระ	R
ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	NO ₂	Clay	0.644	Clay	0.623
		Lime	0.386	R_200	-0.530
		W_38	0.371	KD	-0.426
		W_44	0.371	W_45	0.416
		W_45	0.371	W_46	0.406
		W_46	0.371		
	SO ₂	W_36	0.220	W_36	0.357
		Lime	0.203	W_39	0.272
		Lig	0.198	Moist_RM	-0.260
		Clay	0.191	HVB	-0.224
		Coal_B	0.185	Coal_C	-0.219
	CO ₂	W_38	0.451	CK	0.454
		W_44	0.450	Lime	0.419
		W_45	0.450	T	0.361
		W_46	0.450	KR	0.298
		RM	-0.379	W_44	0.298
	HCl	RM	-0.408	RM	-0.317
		W_38	0.239	Clay	0.295
		W_44	0.238	R_200	-0.292
		W_45	0.238	W_36	0.264
		W_46	0.238	W_45	0.227
	TSP	Clay	-0.318	W_41	0.296
		ShaleA	-0.268	AR	0.293
		ShaleS	0.177	W_35	0.291
		RM	-0.171	W_03	0.250
		HVB	0.135	Moist_RM	0.242

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมลพิษอากาศ และตัวแปรอิสระที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 5 อันดับแรก (ต่อ)

กรณีศึกษา	ตัวแปรตาม	เตาหมายเลข 5		เตาหมายเลข 6	
		ตัวแปรอิสระ	R	ตัวแปรอิสระ	R
Log ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม	NO ₂	Log_Clay	0.591	Log_Clay	0.539
		Log_LB	0.448	Log_R_200	-0.529
		Log_W_44	0.371	Log_KD	-0.483
		Log_W_45	0.371	Log_LB	0.436
		Log_W_46	0.371	Log_W_45	0.417
	SO ₂	Log_Coal_C	-0.229	Log_W_36	0.334
		Log_W_36	0.204	Log_Moist_RM	-0.280
		Log_Lig	0.188	Log_W_39	0.276
		Log_HVA	-0.185	Log_HVB	-0.231
		Log_R_200	0.175	Log_Coal_C	-0.227
	CO ₂	Log_W_38	0.455	Log_CK	0.418
		Log_W_44	0.450	Log_Lime	0.400
		Log_W_45	0.450	Log_T	0.361
		Log_W_46	0.450	Log_ShaleS	0.337
		Log_RM	-0.337	Log_W_44	0.297
	HCl	Log_RM	-0.329	Log_R_200	-0.292
		Log_W_38	0.241	Log_Clay	0.291
		Log_W_44	0.238	Log_LB	0.288
		Log_W_45	0.238	Log_W_36	0.274
		Log_W_46	0.238	Log_AR	0.256
TSP	Log_ShaleA	-0.314	Log_AR	0.359	
	Log_Clay	-0.265	Log_W_41	0.323	
	Log_RM	-0.195	Log_Lime	0.308	
	Log_W_03	-0.139	Log_ShaleS	0.294	
	Log_HVB	-0.134	Log_CK	0.293	
				Log_O2	-0.293

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมลพิษอากาศ และตัวแปรอิสระที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 5 อันดับแรก (ต่อ)

กรณีศึกษา	ตัวแปรตาม	เตาหมายเลข 5		เตาหมายเลข 6	
		ตัวแปรอิสระ	R	ตัวแปรอิสระ	R
ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	Log_NO ₂	Clay	0.582	Clay	0.540
		Lime	0.504	R_200	-0.449
		CK	0.480	K	0.405
		KR	0.421	T	0.394
		CM	0.407	CK	0.334
	Log_SO ₂	Lig	0.258	W_38	-0.308
		Ant	-0.236	W_45	-0.308
		HVA	-0.212	W_46	-0.308
		LB	-0.204	W_44	-0.303
		Lime	0.203	Coal_C	-0.288
	Log_CO ₂	W_38	0.414	CK	0.461
		W_44	0.412	Lime	0.427
		W_45	0.412	T	0.340
		W_46	0.412	KR	0.304
		RM	-0.375	ShaleS	0.291
	Log_HCl	RM	-0.368	KR	0.372
		W_38	0.216	Clay	0.330
		W_44	0.216	CK	0.316
		W_45	0.216	R_200	-0.294
		W_46	0.216	Lime	0.292
	Log_TSP	Clay	-0.302	O2	-0.551
		ShaleA	-0.286	KR	0.398
		ShaleS	0.221	Lime	0.338
		AR	0.164	Moist_RM	0.320
		KD	0.158	AR	0.312
			CK	0.312	

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของมลพิษอากาศ และตัวแปรอิสระที่ศึกษาที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% 5 อันดับแรก (ต่อ)

กรณีศึกษา	ตัวแปรตาม	เตาหมายเลข 5		เตาหมายเลข 6	
		ตัวแปรอิสระ	R	ตัวแปรอิสระ	R
Log ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	Log_NO ₂	Log_Clay	0.640	Log_Clay	0.599
		Log_Lime	0.492	Log_Lime	0.483
		Log_CK	0.487	Log_KR	0.472
		Log_KR	0.462	Log_CK	0.472
		Log_KT	0.455	Log_AR	0.462
	Log_SO ₂	Log_Ant	-0.253	Log_KD	0.378
		Log_Lig	0.231	Log_W_38	-0.308
		Log_HVA	-0.212	Log_W_44	-0.308
		Log_HVC	-0.196	Log_W_45	-0.308
		Log_R_200	0.190	Log_W_46	-0.308
	Log_CO ₂	Log_W_38	0.417	Log_CK	0.427
		Log_W_44	0.412	Log_Lime	0.409
		Log_W_45	0.412	Log_T	0.340
		Log_W_46	0.412	Log_ShaleS	0.332
		Log_RM	0.335	Log_ShaleA	0.288
	Log_HCl	Log_RM	-0.271	Log_Clay	0.466
		Log_W_42	0.235	Log_AR	0.449
		Log_W_38	0.218	Log_Lime	0.427
		Log_W_44	0.216	Log_KR	0.420
		Log_W_45	0.216	Log_CK	0.419
		Log_W_46	0.216		
	Log_TSP	Log_ShaleA	-0.315	Log_Lime	0.766
		Log_Clay	-0.236	Log_CK	0.753
		Log_RM	-0.156	Log_ShaleS	0.692
		Log_HVB	-0.123	Log_AR	0.684
Log_W_03		-0.113	Log_KR	0.647	

ค่าการระบาย CO₂ ของเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ W_38 W_44 W_45 W_46 และ RM โดย W_38 W_44 W_45 และ W_46 มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.450-0.451 ส่วน RM มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.379 ส่วน CO₂ ของเตาหมายเลข 6 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ CK Lime T KR และ W_44 ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.298-0.454 ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรของเตาหมายเลข 5 เตาหมายเลข 6 สอดคล้องกันเพียงตัวแปรเดียว คือ W_44

ค่าการระบาย HCl ของเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ RM W_38 W_44 W_45 และ W_46 โดย W_38 W_44 W_45 และ W_46 มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.238-0.239 ส่วน RM มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.408 ส่วน HCl ของเตาหมายเลข 6 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ RM Clay R_200 W_36 และ W_45 โดย Clay W_36 และ W_45 มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.227-0.295 ส่วน RM และ R_200 มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.292-0.317 ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรของเตาหมายเลข 5 เตาหมายเลข 6 สอดคล้องกันสองตัวแปร คือ RM และ W_45

ค่าการระบาย TSP ของเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ Clay ShaleA ShaleS RM และ HVB โดย ShaleS และ HVB มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.135-0.177 ส่วน Clay ShaleA และ RM มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.171-0.318 ส่วน TSP ของเตาหมายเลข 6 มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปร 5 อันดับแรก คือ W_41 AR W_35 W_03 และ Moist_RM โดยมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.242-0.296 ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวแปรของเตาหมายเลข 5 เตาหมายเลข 6 ไม่สอดคล้องกัน

4.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมลพิษอากาศและตัวแปรอื่น

จากผลการศึกษาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่เป็นตัวบ่งชี้ระดับความเข้มข้นของมลพิษได้ดีหรือมีศักยภาพที่สำคัญ ซึ่งสรุปได้จากผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างความเข้มข้นของมลพิษกับตัวแปรได้ดังต่อไปนี้

NO₂ มีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณดินเหนียว หินปูน และเชื้อเพลิงทดแทนในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ก้างของผงวัตถุดิบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน และดินกลางดง ในทิศทางตรงข้ามกัน เนื่องมาจากปริมาณของไนโตรเจนที่อยู่

ในดิน ประมาณ 200-5,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Essington, 2004) ซึ่งเมื่อมีการใช้ดินเหนียวในปริมาณมากทำให้เกิด NO_2 มาก ส่วนเปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุดับเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอนมีความสัมพันธ์กับ NO_2 ในทิศทางตรงข้าม เนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุดับสูงแสดงว่าผงวัตถุดับหยาบมากจึงไม่ทำปฏิกิริยาเมื่อถูกเผาไหม้ และอาจจะดูดซับไนโตรเจนที่เกิดขึ้น อาจมีผลให้เกิด NO_2 ลดน้อยลง

SO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน หินปูน ลิกไนต์ ดินเหนียว และถ่านหินที่มีคุณภาพสูง ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับความชื้นของผงวัตถุดับ ค่าความร้อน และถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ ในทิศทางตรงข้ามกัน เนื่องจากปริมาณของซัลเฟอร์ที่อยู่ในดิน ประมาณ 30-1,600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Essington, 2004) ซึ่งเมื่อมีการใช้ดินเหนียวในปริมาณมากทำให้เกิด SO_2 มาก ส่วนหินปูนซึ่งมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เมื่อมีการใช้ในปริมาณมากทำให้เกิด SO_2 มากเช่นกัน ส่วนเชื้อเพลิงถ่านหิน ลิกไนต์ ซึ่งมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เมื่อมีการใช้ในปริมาณมากทำให้เกิด SO_2 มากเช่นกัน เมื่อผงวัตถุดับมีความชื้นสูงการนำลมร้อนกลับมาใช้ในการไล่ความชื้นอาจทำให้ซัลเฟอร์ที่มากับลมร้อนบางส่วนถูกดูดซับด้วยผงวัตถุดับ จึงทำให้เกิด SO_2 น้อยลง

CO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน หินปูน ปูนเม็ดที่ผลิต ชั่วโมงการทำงาน of เต้าเผา และอุณหภูมิในเต้าเผา ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงาน of Raw Mill ในทิศทางตรงข้ามกัน เนื่องจากเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนมากขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูงขึ้นทำให้เกิด CO_2 มากขึ้น ส่วนปริมาณหินปูน ปูนเม็ดที่ผลิต ชั่วโมงการทำงาน of เต้าเผา ปูนเม็ดที่ผลิต ชั่วโมงการทำงาน of เต้าเผา แสดงให้เห็นถึงอัตราการผลิต คือ ยิ่งผลิตมากก็ทำให้เกิด CO_2 มากขึ้น ส่วนมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงาน of Raw Mill ในทิศทางตรงข้ามกันนั้นอาจเป็นไปได้ว่าการเดินระบบ Raw mill มีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านการผลิตอื่นซึ่งส่งผลต่อการลดลงของมลพิษอีกต่อหนึ่ง ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้จากการศึกษา

HCl มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน และดินเหนียว ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงาน of Raw Mill และเปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุดับเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน ในทิศทางตรงข้ามกัน อาจเนื่องมาจากปริมาณของไฮโดรเจน และคลอไรด์ ที่อยู่เชื้อเพลิงทดแทน และดินเหนียว เมื่อมีปริมาณการใช้สูงขึ้น HCl จึงเกิดสูงขึ้น ส่วนมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงาน of Raw Mill ในทิศทางตรงข้ามกันนั้นอาจเป็นไปได้ว่าการเดินระบบ Raw mill มีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านการผลิตอื่นซึ่งส่งผลต่อการลดลงของมลพิษอีกต่อหนึ่ง ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้จากการศึกษา ส่วนเปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุดับเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้าม เนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์

คงค้างของผงวัตถุบดสูงแสดงว่าผงวัตถุบดหยาบมากจึงทำปฏิกิริยาได้ไม่ดีเมื่อถูกเผาไหม้ และอาจมีผลต่อการป้อนเชื้อเพลิงลดลงกว่าปกติ ทำให้เกิด HCl ลดน้อยลง

TSP มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน วัตถุบดทดแทน ความชื้นของผงวัตถุบด และหินดินดานที่มีซิลิกา ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของ Raw Mill ในทิศทางตรงข้ามกัน อาจเนื่องมาจากเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงทดแทน วัตถุบดทดแทน และหินดินดานที่มีซิลิกา ในปริมาณสูงขึ้น และการที่วัตถุบดมีความชื้นอาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้จึงทำให้เกิด TSP สูงขึ้น ส่วนมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของ Raw Mill ในทิศทางตรงข้ามกันนั้นเนื่องมาจากการนำลมร้อนบางส่วนไปใช้ในการไล่ความชื้นในการบดวัตถุบดซึ่งในลมร้อนจะมีฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นปะปนไปด้วย ทำให้ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นยังหมุนเวียนอยู่ในระบบ

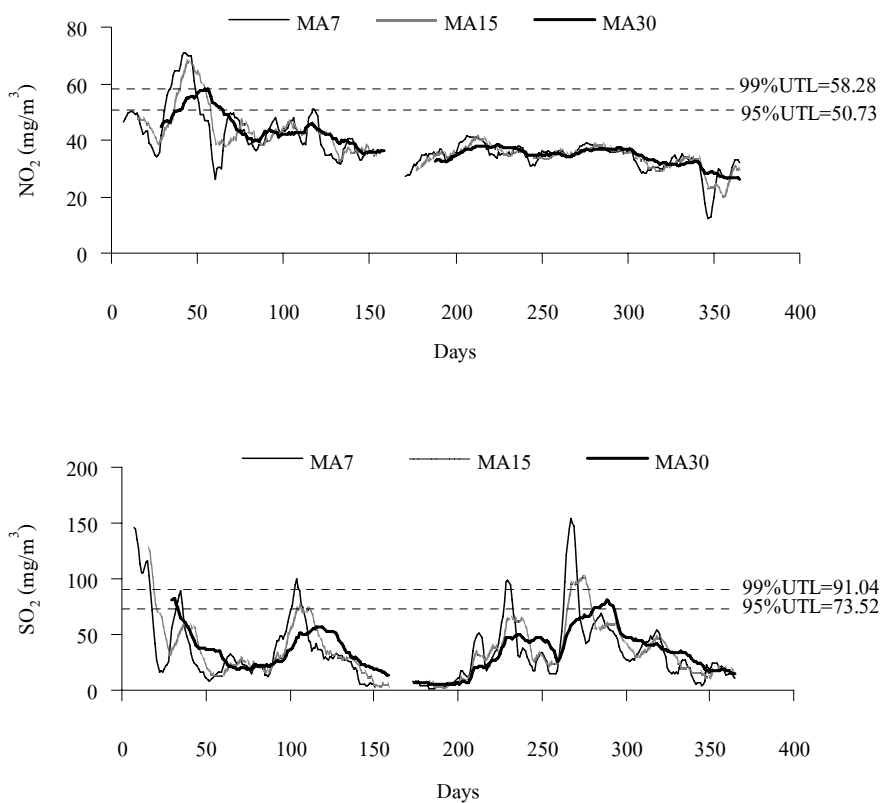
จากผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐานของการศึกษา คือ ถ้าการระบายมลพิษจากเตาเผาซีเมนต์ มีความสัมพันธ์กับข้อมูลองค์ประกอบวัตถุบด เชื้อเพลิง และกระบวนการผลิต โดยตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับการระบายมลพิษอากาศอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทุกตัวจะถูกนำไปใช้เป็นตัวแปรอิสระตั้งต้นในการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการระบายมลพิษอากาศในขั้นต่อไป

4.4 ผลการตรวจสอบความผิดปกติของการระบายมลพิษ

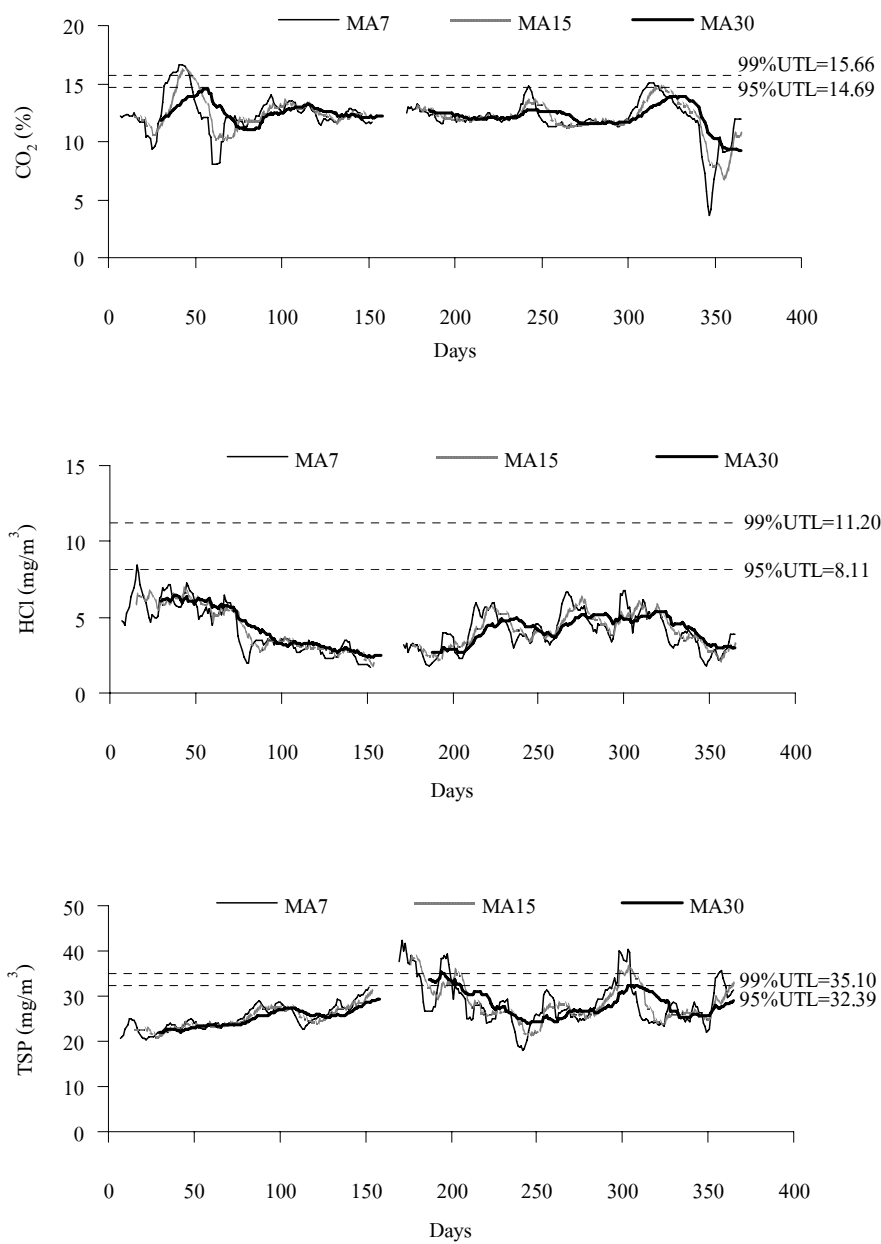
ผลการทดสอบแจกแจงของข้อมูลมลพิษที่ศึกษาพบว่า SO_2 , CO_2 และ TSP จากเตาเผาหมายเลข 5 และ NO_2 , CO_2 และ TSP จากเตาเผาหมายเลข 6 มีการแจกแจงแบบ normal ส่วน NO_2 HCl จากเตาเผาหมายเลข 5 และ SO_2 กับ HCl จากเตาเผาหมายเลข 6 มีการแจกแจงแบบ Log-normal และผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อตรวจสอบความผิดปกติของการระบายมลพิษโดยใช้แผนภูมิควบคุม และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ได้ผลการคำนวณช่วงค่าคาดเคลื่อนยินยอมที่ 95% และ 99% ของมลพิษทั้ง 5 ชนิด ดังตารางที่ 4.5 และแผนภูมิควบคุมสำหรับเตาหมายเลข 5 และ 6 ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับที่ 95% และ 99% ของมลพิษทั้ง 5

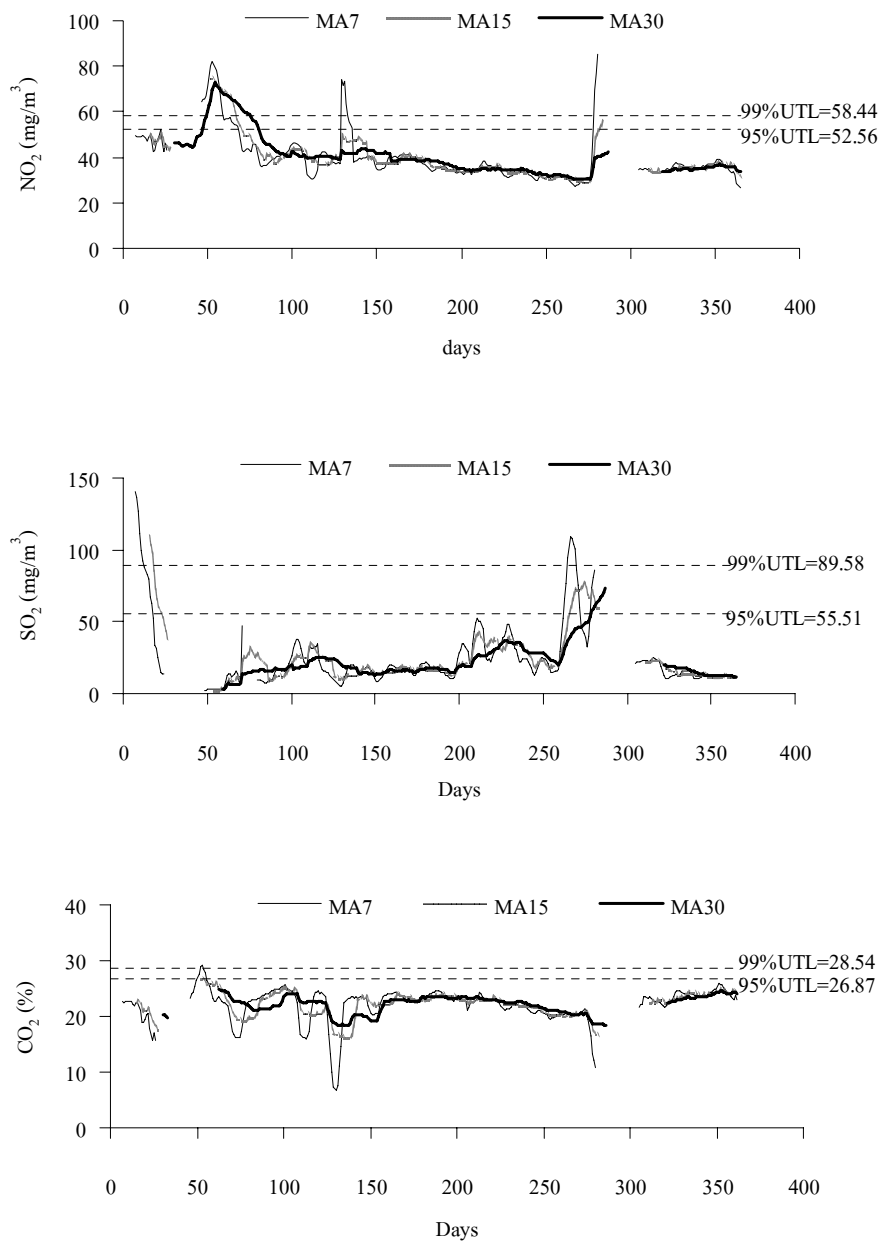
เตาเผา	มลพิษ	ค่าเฉลี่ย	95% UTL	99% UTL
เตาหมายเลข 5	NO ₂ (mg/m ³)	36.31	50.73	58.28
	SO ₂ (mg/m ³)	31.26	73.52	91.04
	CO ₂ (%)	12.36	14.69	15.66
	HCl (mg/m ³)	3.73	8.11	11.20
	TSP (mg/m ³)	25.83	32.39	35.10
เตาหมายเลข 6	NO ₂ (mg/m ³)	38.35	52.56	58.44
	SO ₂ (mg/m ³)	17.50	55.51	89.58
	CO ₂ (%)	22.83	26.87	28.54
	HCl (mg/m ³)	17.70	49.71	76.26
	TSP (mg/m ³)	29.48	39.18	43.19



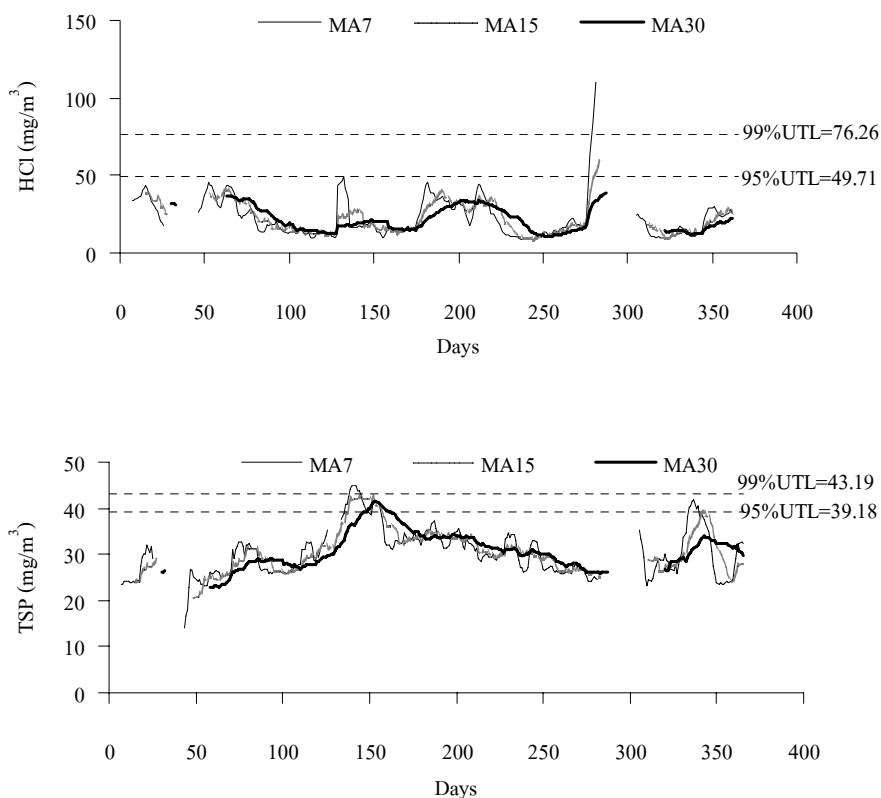
รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของการระบายมลพิษของเตาหมายเลข 5



รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของการระบายมลพิษของเตาหมายเลข 5 (ต่อ)



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของการระบายมลพิษของเตาหมายเลข 6



รูปที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของการระบายมลพิษของเตาหมายเลข 6 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นได้ว่ากราฟค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สามารถช่วยให้เห็นแนวโน้มของข้อมูล และภาพรวมของประสิทธิภาพการบำบัดมลพิษของระบบ ซึ่งค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ช่วยลดความไวของการเปลี่ยนแปลงข้อมูล ทำให้เกิดการผิดปกติในเวลาสั้น ๆ ลดลง ช่วยลดผลกระทบของการผันแปรในช่วงสั้น ๆ และจะเห็นว่าเมื่อใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 30 วันจะทำให้เห็นแนวโน้มของข้อมูลระยะยาวได้ดีกว่า 7 วัน และ 15 วัน

กรณีที่น่าสนใจเกี่ยวกับช่วงของการระบายมลพิษบางตัวที่น่าสังเกต คือ

- CO₂ มีค่าค่อนข้างคงที่มากที่สุด
- TSP มีค่าไม่ค่อยคงที่ แม้จะมีเครื่อง EP ควบคุม ทั้ง 2 เตาเผา
- NO₂ ช่วงวันที่ 50-75 มีค่าสูงกว่าช่วงอื่น ทั้ง 2 เตาเผา

ทั้งนี้จากการตรวจสอบข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลของการศึกษานี้ ยังไม่สามารถระบุที่มาของความผิดปกติของข้อมูลดังกล่าวข้างต้นได้ อย่างไรก็ตาม ข้อสังเกตเหล่านี้สามารถใช้เป็นประโยชน์ได้ต่อไป

4.5 ผลการศึกษาแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ

4.5.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง

ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างแบบจำลองสำหรับทำนายการระบาย NO_2 ของเตาหมายเลข 5 มาอภิปรายเป็นตัวอย่าง ส่วนการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายการระบาย TSP CO_2 SO_2 NO_2 และ HCl ที่เหลือทั้งหมดเป็นวิธีการเดียวกัน

แบบจำลองสำหรับทำนายการระบาย NO_2 ของเตาหมายเลข 5 ใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับ NO_2 โดยจำนวนตัวแปรอิสระกรณีตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมี 27 ตัวแปร กรณี Log ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมี 29 ตัวแปร กรณีตัวแปรอิสระกับ Log ของตัวแปรตามมี 26 ตัวแปร และ Log ของตัวแปรอิสระกับ Log ของตัวแปรตามมี 29 ตัวแปร จากตัวแปรเชิงปริมาณตั้งต้นทั้งหมดจำนวน 73 ตัวแปร ซึ่งได้จากขั้นตอนการทดสอบสหสัมพันธ์ก่อนหน้านี้ (หัวข้อ 4.3) ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับ NO_2 ของเตาหมายเลข 5

กรณี	ตัวแปรอิสระ(R)
ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม	Lime(0.386) ShaleA(0.184) Clay(0.644) AR(0.167) KD(0.168) LB(0.325) Coal_C(0.135) Lig(0.252) R_90(0.157) R_200(0.210) T(0.246) KT(0.221) Moist_RM(0.243) CaO(0.154) KR(0.298) CM(0.317) CK(0.363) W_03(0.142) W_23(0.177) W_34(0.136) W_38(0.371) W_42(0.117) W_44(0.371) W_45(0.371) W_46(0.371) O2(-0.213) W_02(-0.115)
Log ของตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม	Log_Lime(0.333) Log_ShaleS(0.206) Log_ShaleA(0.294) Log_Clay(0.591) Log_AR(0.308) Log_KD(0.310) Log_LB(0.448) Log_Other(0.170) Log_Coal_B(0.118) Log_Coal_C(0.173) Log_Lig(0.279) Log_R_90(0.157) Log_R_200(0.210) Log_T(0.253) Log_KT(0.290) Log_Moist_RM(0.245) Log_CaO(0.150) Log_KR(0.312) Log_CM(0.277) Log_CK(0.327) Log_W_03(0.234) Log_W_23(0.177) Log_W_34(0.113) Log_W_38(0.369) Log_W_42(0.243) Log_W_44(0.371) Log_W_45(0.371) Log_W_46(0.371) Log_O2(-0.198)
ตัวแปรอิสระกับ Log ของตัวแปรตาม	Lime(0.504) ShaleA(0.170) Clay(0.582) AR(0.235) KD(0.237) LB(0.308) Coal_C(0.132) Lig(0.305) R_90(0.160) R_200(0.180) T(0.319) KT(0.351) Moist_RM(0.243) CaO(0.148) KR(0.421) CM(0.407) CK(0.480) W_03(0.187) W_23(0.115) W_34(0.114) W_38(0.264) W_42(0.122) W_44(0.264) W_45(0.264) W_46(0.264) O2(-0.260)
Log ของตัวแปรอิสระกับ Log ของตัวแปรตาม	Log_Lime(0.492) Log_ShaleS(0.380) Log_ShaleA(0.341) Log_Clay(0.640) Log_AR(0.445) Log_KD(0.446) Log_LB(0.410) Log_Other(0.303) Log_Coal_B(0.192) Log_Coal_C(0.163) Log_Lig(0.357) Log_R_90(0.160) Log_R_200(0.180) Log_T(0.328) Log_KT(0.455) Log_Moist_RM(0.245) Log_CaO(0.153) Log_KR(0.462) Log_RM(0.213) Log_CM(0.376) Log_CK(0.487) Log_W_03(0.280) Log_W_23(0.115) Log_W_38(0.263) Log_W_42(0.231) Log_W_44(0.264) Log_W_45(0.264) Log_W_46(0.264) Log_O2(-0.245)

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุด้วยโปรแกรม SPSS และคัดเลือกตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับ NO_2 ทุกตัวเข้าสู่สมการด้วยวิธี Stepwise ผลการวิเคราะห์ที่ได้สมการดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้ (Adjusted R^2) อยู่ในช่วง 0.437-0.570 ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวแปรอิสระในสมการสามารถอธิบายความแปรปรวนของมลพิษที่ศึกษาได้ร้อยละ 43.7 ถึง 57

ตารางที่ 4.7 สมการถดถอยเชิงพหุสำหรับ NO_2 จากเตาหมายเลข 5

กรณี	สมการ	N	Adj. R^2	RMSE
ตัวแปรอิสระ กับ ตัวแปรตาม	$\text{NO}_2 = -51.686 + 0.020\text{Clay} + 1.445\text{W}_{46} + 0.062\text{T} + 1.093\text{W}_{23} + 20.584\text{Moist}_{\text{RM}} + 41.917\text{R}_{200} - 0.007\text{ShaleA} - 2.907\text{R}_{90} - 2.101\text{O2} - 0.111\text{KT}$	289	0.570	7.045
Log ของตัวแปรอิสระ กับ ตัวแปรตาม	$\text{NO}_2 = -467.325 + 6.747\text{Log}_{\text{Clay}} + 5.667\text{Log}_{\text{W}_{38}} + 53.019\text{Log}_{\text{T}} + 9.671\text{Log}_{\text{W}_{23}} - 7.929\text{Log}_{\text{Other}} + 0.859\text{Log}_{\text{W}_{42}} + 22.299\text{Log}_{\text{Moist}_{\text{RM}}} + 53.130\text{Log}_{\text{R}_{200}} + 12.642\text{Log}_{\text{Lime}} - 9.627\text{Log}_{\text{KT}}$	289	0.519	7.296
ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	$\text{Log}_{\text{NO}_2} = 2.334 + 0.00038\text{Clay} + 0.00025\text{Lime} + 0.00013\text{ShaleA} + 0.033\text{W}_{46} + 0.00022\text{CK} + 0.018\text{W}_{34} + 0.641\text{R}_{200} - 0.023\text{KR} + 0.001\text{LB}$	291	0.437	7.729
Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	$\text{Log}_{\text{NO}_2} = -8.801 + 0.149\text{Log}_{\text{Clay}} + 0.950\text{Log}_{\text{T}} + 0.123\text{Log}_{\text{W}_{38}} - 0.092\text{Log}_{\text{RM}} - 0.293\text{Log}_{\text{Other}} + 2.816\text{Log}_{\text{Lime}} - 2.282\text{Log}_{\text{CK}} + 1.423\text{Log}_{\text{R}_{200}} + 0.163\text{Log}_{\text{W}_{23}} + 0.019\text{Log}_{\text{W}_{42}}$	291	0.484	7.108

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (residual analysis) เพื่อตรวจสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความถดถอย โดยพิจารณาจากค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด หลังจากนั้นทำการทดสอบความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้สถิติทดสอบ Durbin-Watson (DW) โดยจะพิจารณาจากค่าที่อยู่ในช่วง 0-4 สำหรับผลทดสอบที่มีค่า DW ที่ใกล้กับ 2 จะเป็นกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนไม่มีสหสัมพันธ์ต่อเนื่องกัน สุดท้ายทำการทดสอบค่าแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ซึ่งจะต้องมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับค่าตัวแปรตาม โดยพิจารณาจากการพล็อตค่าระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน และค่าประมาณ Y ในรูปมาตรฐาน (Standardized Predicted values)

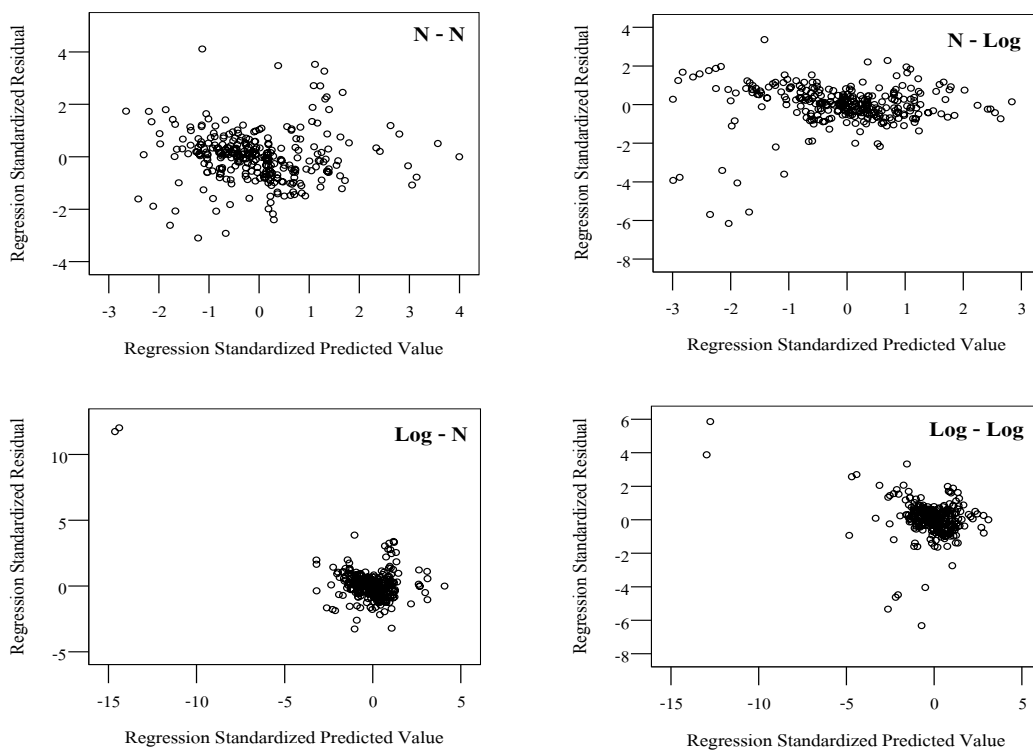
ซึ่งจากผลวิเคราะห์ทั้ง 4 สมการของ NO_2 แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 สมการที่ผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยทั้ง 3 เงื่อนไข ได้แก่ กรณีตัวแปร

อิสระกับตัวแปรตาม โดยมีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.012 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.991 และค่าแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนเล็กน้อย

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 5

มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
NO ₂	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.012	0.991	1.647	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.014	0.983	1.536	✓	ไม่คงที่
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.036	1.078	1.205	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.105	1.552	1.009	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด
²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั้นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน
³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ 4.9 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ NO₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5

ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับทำนายการระบาย NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP ที่เหลือทั้งหมดเป็นวิธีการเดียวกัน แสดงในภาคผนวก ก.

4.5.2 แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุที่เหมาะสม

จากการคัดเลือกสมการที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า Adjusted R² และการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายแต่ละมลพิษที่ระบายออกจากเตาหมายเลข 5 ดังตารางที่ 4.9 และมีค่า Adjusted R² ของ NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP เท่ากับ 0.570, 0.387, 0.520, 0.397 และ 0.249 ตามลำดับ

หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ผ่านการคัดเลือกทั้ง 5 มลพิษ โดยใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามที่ได้แยกออกจากชุดข้อมูลตั้งต้นทั้งหมดร้อยละ 10 ก่อนจะนำข้อมูลที่เหลือทั้งหมดไปใช้สร้างแบบจำลอง โดยแทนค่าตัวแปรอิสระในสมการที่ได้เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า มลพิษจากการตรวจวัดจริงกับค่ามลพิษจากการทำนายด้วยวิธีความถดถอยเชิงพหุ โดยพิจารณาค่า R ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงว่ามีความถูกต้องสูง

จากตารางที่ 4.9 พบว่าผลจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ของแบบจำลองสำหรับเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์กันโดยมีค่า R ของมลพิษที่ตรวจวัด NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP คือ 0.630, 0.744, 0.440, 0.600 และ 0.342 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 สมการถดถอยเชิงพหุที่เหมาะสมสำหรับมลพิษจากเตาเผาหมายเลข 5

ตัวแปรตาม	สมการ	N	Regression		Validation
			Adj. R ²	RMSE	R
NO ₂	NO ₂ = -51.686 + 0.020Clay + 1.445W ₄₆ + 0.062T + 1.093W ₂₃ + 20.584Moist_RM + 41.917R ₂₀₀ - 0.007ShaleA - 2.907R ₉₀ - 2.101O ₂ - 0.111KT	289	0.570	7.045	0.630
SO ₂	Log_SO ₂ = -9.160 + 0.445Log_Lig - 0.316Log_Ant - 0.060Log_Coal_C + 8.546Log_R ₂₀₀ + 0.067Log_W ₄₂ + 0.406Log_Clay - 0.115Log_LB	270	0.387	29.992	0.744
CO ₂	CO ₂ = 19.308 + 1.172Log_W ₃₈ - 1.141Log_RM + 1.277Log_W ₂₃ - 0.618Log_KD + 0.113Log_W ₀₃ - 0.082Log_Coal_C	283	0.520	1.266	0.440
HCl	HCl = 55.418 - 1.966Log_RM + 0.687Log_W ₃₈ - 5.281Log_HVA - 0.168Log_Coal_C + 0.118Log_W ₀₃ + 0.189Log_W ₄₂ + 0.471Log_W ₃₄ - 0.290Log_Ant + 0.953Log_W ₃₆	289	0.397	1.631	0.600
TSP	Log_TSP = 3.253 + 7.12E-5ShaleS + 0.006AR + 1.53E-4Clay - 0.002RM - 0.007KD	289	0.249	8.410	0.342

แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายแต่ละมลพิษที่ระบายออกจากเตาหมายเลข 6 ดังตารางที่ 4.10 และมีค่า Adjusted R² ของ NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP เท่ากับ 0.606, 0.406, 0.533, 0.559 และ 0.383 ตามลำดับ

ในส่วนของการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับเตาหมายเลข 6 ดังตารางที่ 4.10 พบว่าค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง มีความสัมพันธ์กัน โดยมีค่า R ของมลพิษที่ตรวจวัด NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP คือ 0.687, 0.348, 0.830, 0.709 และ 0.286 ตามลำดับ

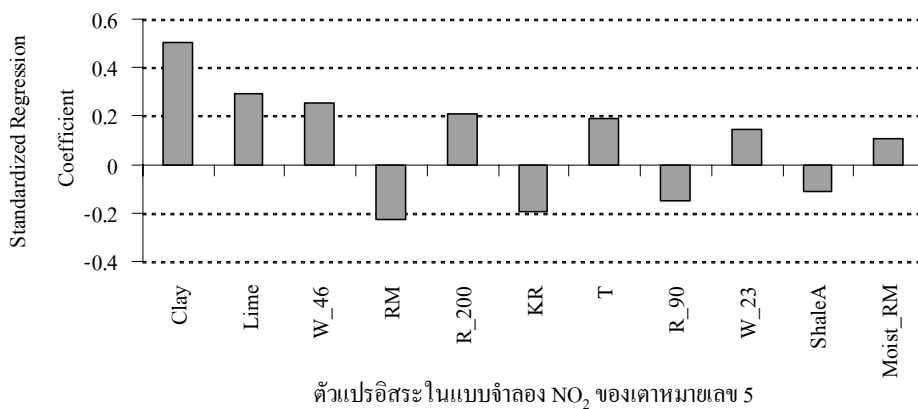
ตารางที่ 4.10 สมการถดถอยเชิงพหุที่เหมาะสมสำหรับมลพิษจากเตาหมายเลข 6

ตัวแปรตาม	สมการ	N	Regression		Validation
			Adj. R ²	RMSE	R
NO ₂	NO ₂ = -31-4.243Log_KD+0.611Log_W_35 +11.536Log_Lime-0.716Log_W_03+0.850Log_LB -8.951Log_Moist_F	259	0.606	6.488	0.687
SO ₂	Log_SO ₂ = 25.580+0.271Log_KD+0.326Log_W_36 +0.537Log_W_10+0.062Log_W_40 -0.061Log_Coal_C-2.837Log_HVA	249	0.406	18.319	0.348
CO ₂	CO ₂ = -102.873+11.249Log_CK+1.722Log_W_44 -12.111Log_KR+8.145Log_T+0.237Log_W_35 +0.367Log_W_02+0.994Log_CM	281	0.533	2.136	0.830
HCl	Log_HCl = 7.453-3.794Log_R_200 -0.549Log_ShaleS+0.464Log_W_06 +0.303Log_AR+0.180Log_W_38+0.276Log_CM +0.040Log_W_35	269	0.559	11.129	0.709
TSP	Log_TSP = 3.709-0.001T+0.002W_35+0.796R_200 +0.025W_41-0.018KR-0.055O2	284	0.383	8.182	0.286

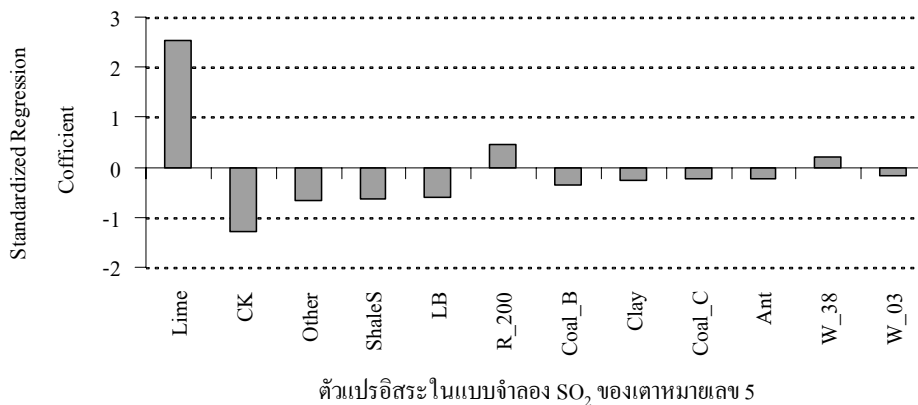
4.5.3 อิทธิพลของตัวแปรอิสระ

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำนายการระบายมลพิษ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐาน (Standardized Regression Coefficient or Beta) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลอง คือ ถ้าตัวแปรใดมีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรอิสระนั้นจะมีน้ำหนักของความสำคัญ หรืออิทธิพลต่อมลพิษมากกว่าตัวแปรอิสระที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยมาตรฐานน้อย ผลการวิเคราะห์แสดงรูปที่ 4.10-4.19 โดยจะพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ NO₂

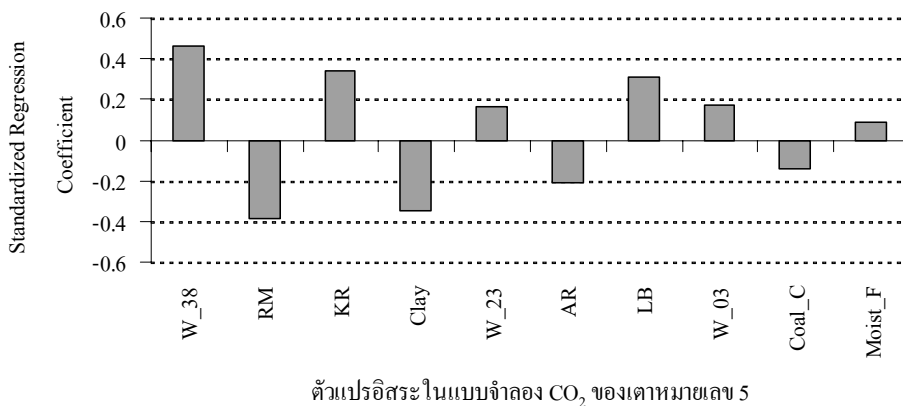
SO₂ CO₂ HCl และ TSP มากที่สุดในเตาเผาหมายเลข 5 คือ Clay Clay W_38 RM และ AR ตามลำดับ ส่วนในเตาเผาหมายเลข 6 คือ KD KD CK ShaleS และ W_35 ตามลำดับ



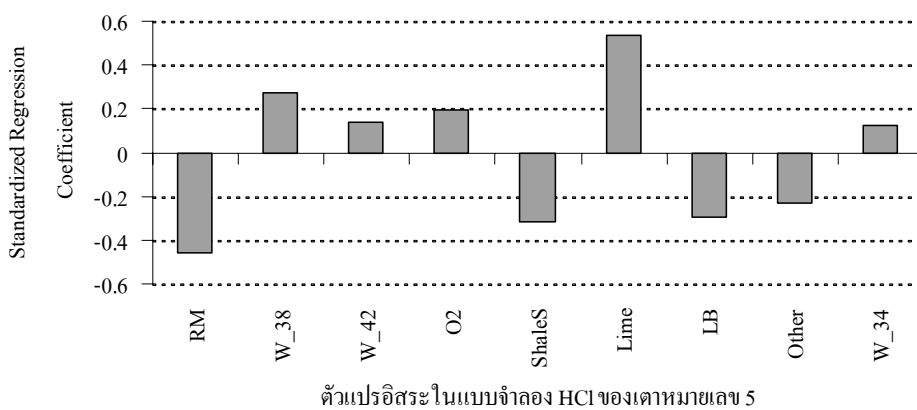
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 5



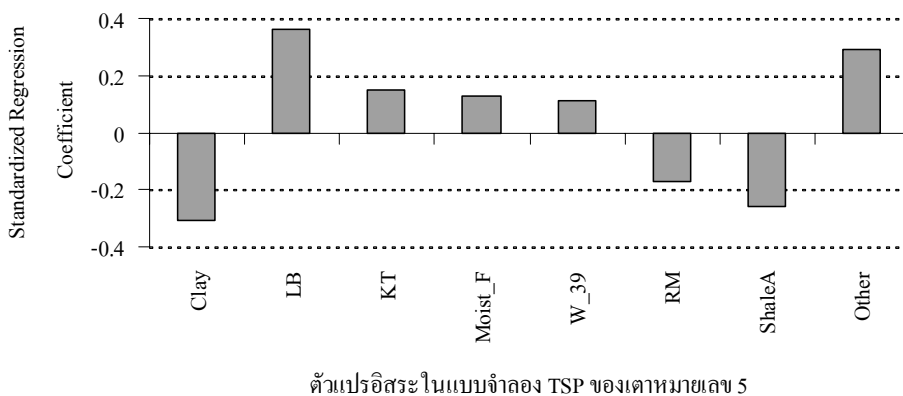
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 5



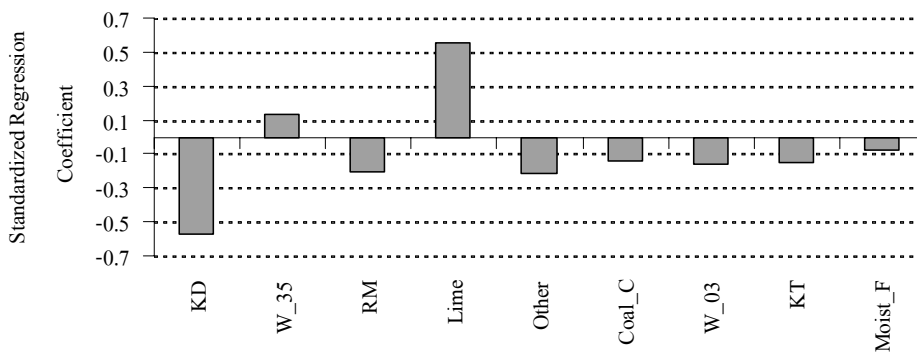
รูปที่ 4.12 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 5



รูปที่ 4.13 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5

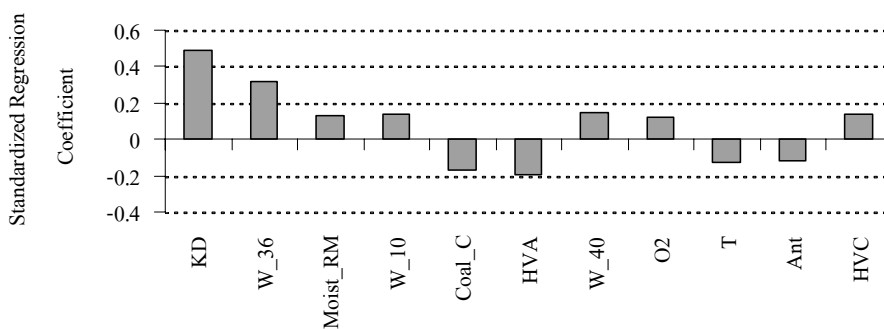


รูปที่ 4.14 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5



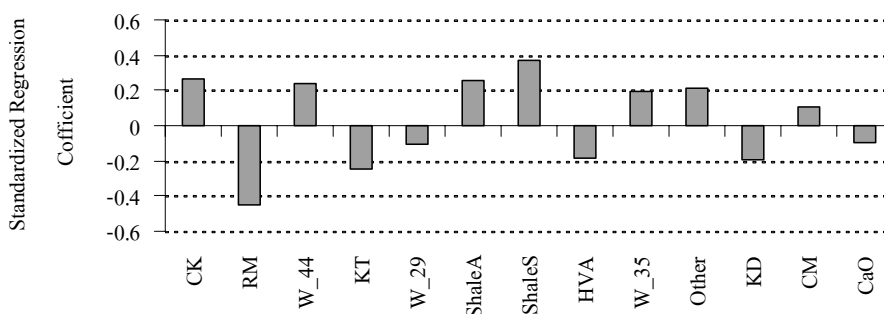
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.15 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 6



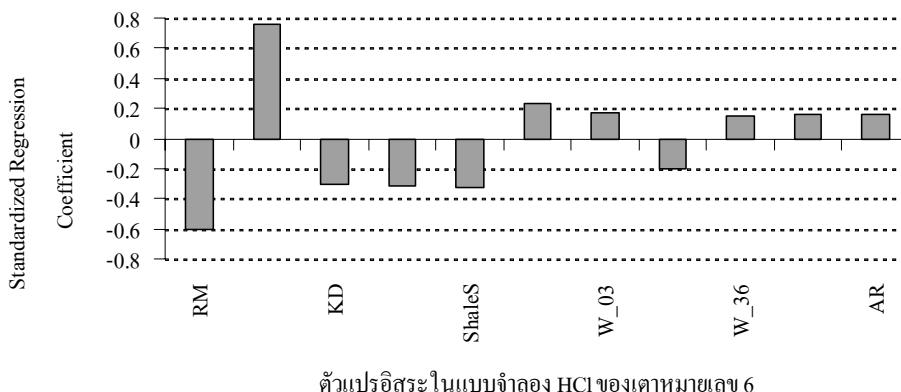
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.16 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 6

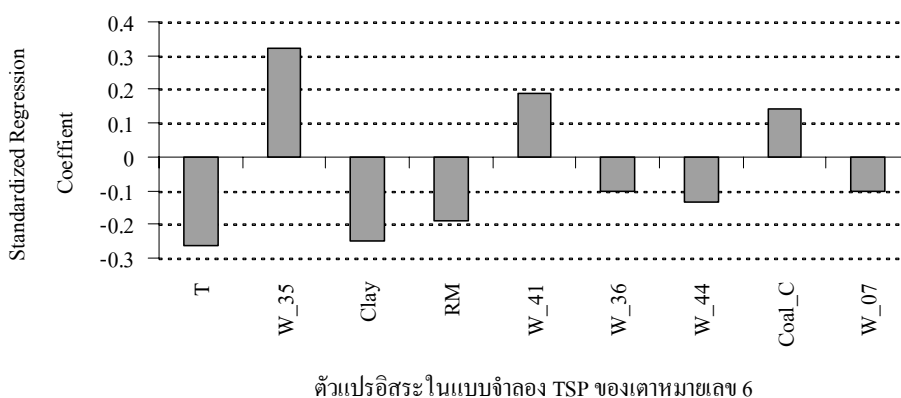


ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.17 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 6



รูปที่ 4.18 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 6

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระ พบว่าทิศทางของการเกิดมลพิษมีความสัมพันธ์กับวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และกระบวนการผลิต เช่น เมื่อ Clay ซึ่งเป็นตัวแปรวัตถุดิบมีค่าสูงนั้นแสดงถึง มีอัตราการผลิตสูง มลพิษที่เกิดขึ้นย่อมสูงขึ้นด้วย เมื่อ W_35 และ W_38 ซึ่งเป็นตัวแปรด้านเชื้อเพลิงมีค่าสูง มลพิษที่เกิดขึ้นก็สูงขึ้นด้วย และเมื่อ CK ซึ่งเป็นตัวแปรด้านกระบวนการผลิตมีค่าสูง มลพิษที่เกิดขึ้นก็สูงขึ้นด้วย ซึ่งผลเป็นไปตามที่คาดไว้ แต่ก็มีบางตัวแปรที่ไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ เช่น ตัวแปร Coal_B Coal_C และ Ant ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ น่าจะมีอิทธิพลต่อ SO₂ ในลำดับแรก ๆ กลับมีอิทธิพลค่อนข้างน้อย จากการศึกษานี้ยังไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากกระบวนการระบายมลพิษมีเส้นทางค่อนข้างซับซ้อน คือ มีการนำ

ลมร้อนจากกระบวนการเผาปูนเม็ดไปใช้ในกระบวนการบดวัตถุดิบและถ่านหิน ก่อนที่จะปล่อยไปยังเครื่อง EP ที่มีระบบ CEMS ตรวจวัดมลพิษ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าตัวแปรด้านเชื้อเพลิงทดแทนในแบบจำลองของมลพิษทั้ง 5 ทั้งเตาหมายเลข 5 และ 6 มีอิทธิพลสูงต่อการระบายมลพิษแม้ปริมาณในการใช้จะน้อย

โดยพบว่าชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุดิบ (RM) มีอิทธิพลต่อการระบาย CO₂ HCl และ TSP ในทิศทางตรงข้ามกัน นั่นคือ เมื่อหม้อบดวัตถุดิบทำงานเพิ่มขึ้น จะมีการนำลมร้อนจากเตาเผาปูนซีเมนต์ไปใช้ในการไล่ความชื้นให้ผงวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าหม้อบดวัตถุดิบ มีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยด้านการผลิตอื่น ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของมลพิษอีกต่อหนึ่ง ทำให้สามารถนำความสัมพันธ์ที่พบนี้ไปใช้ประโยชน์ คือ ปรับเปลี่ยนช่วงเวลาการเดินระบบของหม้อบดวัตถุดิบให้เป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการเผาปูน และยังพบว่าเปอร์เซ็นต์คั่งค้างของผงวัตถุดิบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน (R_200) มีอิทธิพลต่อการระบาย NO₂ SO₂ และ TSP ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งอาจนำความสัมพันธ์ที่พบนี้ไปใช้ประโยชน์ในแง่ของการพิจารณาบดวัตถุดิบให้มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผา

นอกจากนี้ยังพบว่าวัตถุดิบจากแหล่งกลางดง (KD) มีอิทธิพลต่อการระบาย NO₂ CO₂ และ HCl ในลำดับแรก ๆ ในทิศทางตรงข้ามกัน ถึงแม้จะมีปริมาณในการใช้น้อย ประมาณ 1.78% ซึ่งอาจนำไปใช้ประโยชน์ในแง่ของการพิจารณาเพิ่มปริมาณการใช้วัตถุดิบจากแหล่งกลางดงให้มากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของปูนเม็ด

จากการศึกษาสามารถสรุปอิทธิพลของตัวแปร โดยพิจารณาตามกลุ่มของตัวแปรที่มีผลต่อ NO₂ SO₂ CO₂ HCl และ TSP จากเตาหมายเลข 5 และ 6 ดังตารางที่ 4.11 คือ ตัวแปรกลุ่มวัตถุดิบ เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงทดแทน และสภาพของกระบวนการผลิต จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรที่อยู่ในแบบจำลองจะให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อาทิ กรณี HCl จากเตาหมายเลข 5 มีความสัมพันธ์กับ W_38 W_44 W_45 และ W_46 ในลำดับแรก ๆ และเมื่อพิจารณาตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงในแบบจำลอง พบว่ามีจำนวนของตัวแปรกลุ่มเชื้อเพลิงทดแทนมากที่สุด ได้แก่ W_38 W_42 W_34 W_03 และ W_36 จึงทำให้ตัวแปรกลุ่มเชื้อเพลิงทดแทนมีอิทธิพลสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากลไกการเกิด คือ ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ มีสาเหตุหนึ่งเนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงทดแทนที่มีองค์ประกอบของคลอรีน เป็นต้น

นอกจากนี้การคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการด้วยวิธี Stepwise จะไม่เลือกตัวแปรที่มีส่วนช่วยในการทำนายน้อยเข้าสมการ จึงทำให้แบบจำลอง MR มีจำนวนตัวแปรอิสระน้อยเมื่อเทียบกับแบบจำลอง ANN และมีความแตกต่างของอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรในกรณีต่าง ๆ ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4.11 อิทธิพลของกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อการทำนายมลพิษทั้ง 5 ของแบบจำลอง MR

กลุ่มตัวแปร	มลพิษ	วัตถุดิบ	เชื้อเพลิง	เชื้อเพลิงทดแทน	สภาพกระบวนการผลิต
		(%)	(%)	(%)	(%)
NO ₂	เตา K5	32.86	0.00	19.44	47.70
	เตา K6	72.24	0.00	20.77	6.99
SO ₂	เตา K5	37.02	37.51	8.86	16.62
	เตา K6	32.82	13.32	43.97	9.90
CO ₂	เตา K5	11.47	8.99	54.57	24.98
	เตา K6	0.00	0.00	26.33	73.67
HCl	เตา K5	0.00	19.36	46.14	34.50
	เตา K6	37.57	0.00	39.56	22.88
TSP	เตา K5	98.22	0.00	0.00	1.78
	เตา K6	0.00	0.00	39.76	60.24

4.6 ผลการศึกษาแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์

4.6.1 ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง

ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างแบบจำลองสำหรับทำนายการระบาย NO₂ สำหรับเตาเผาหมายเลข 5 กรณีตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามเป็นค่าปกติ มาอภิปรายเป็นตัวอย่าง ส่วนการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายการระบาย NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP ที่เหลือทั้งหมดเป็นวิธีการเดียวกัน โดยมีขั้นตอนการสร้างโครงข่ายดังนี้

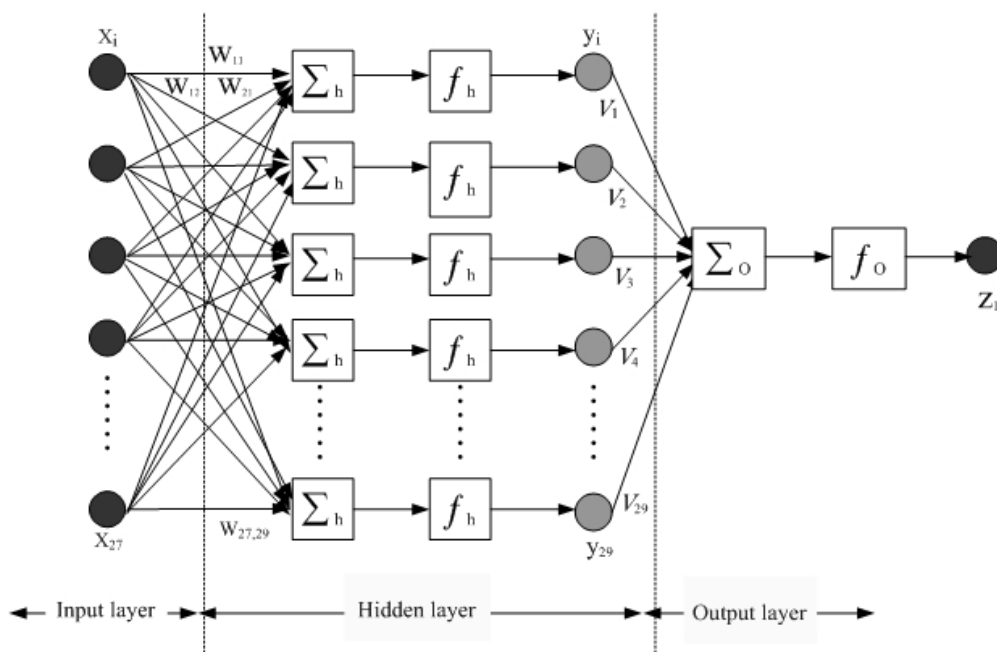
4.6.1.1 การสร้างแบบจำลอง

1) ในการออกแบบขั้นตอนกำหนดให้โครงข่ายมี 3 ชั้น และมีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนตามค่าดีฟอลท์ของโปรแกรม (NeuroShell®2) ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$\text{จำนวน โหนดในชั้นซ่อน} = 1/2 (\text{Inputs} + \text{Outputs}) + \sqrt{\text{จำนวนของ patterns ที่ใช้ในการสอน}}$$

โดยชุดข้อมูลตัวแปรอิสระป้อนเข้า (Input) มีจำนวน 27 ตัวแปร ส่วนผลลัพธ์ (Output) ที่ต้องการ คือ ค่า NO₂ มีจำนวน 1 ตัวแปร และจำนวน patterns ที่ใช้ในการสอนร้อยละ 60 ของจำนวน patterns ทั้งหมด คือ $365 \times 60\% = 219$ patterns ดังนั้น จำนวนโหนดในชั้นซ่อน คือ $1/2 (27+1) + \sqrt{219} = 29$ โหนด นั่นคือ มีจำนวนอินพุต (ตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์

กับตัวแปรตาม) 27 โหนด และจำนวนเอาต์พุต (ตัวแปรตาม) 1 โหนด จะได้โครงข่ายที่ออกแบบ คือ 27-29-1 ดังแสดงในรูป 4.20



รูปที่ 4.20 โครงข่ายแบบ 3 ชั้นของเตาเผาหมายเลข 5

2) การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในโครงข่าย คือ อัตราการเรียนรู้ (η) โมเมนตัม (α) และค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้น (w) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 สรุปดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ในโครงข่าย

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น	ช่วงการปรับเปลี่ยน
อัตราการเรียนรู้ (η)	0.05	0.1, 0.2
ค่าถ่วงน้ำหนัก (w)	0.5	0.3, 0.7
โมเมนตัม (α)	0.1	0.5, 0.9

3) เริ่มทำการสอนโครงข่ายโดยนำชุดสอนโครงข่ายที่ได้แบ่งไว้ 60% (219 ชุดข้อมูล โดยเลือกมา 1 ชุดข้อมูลต่อการสอน 1 รอบ) กำหนดหาค่าแทนของแต่ละโหนดในชั้นซ่อนที่ 1 จากการใช้ฟังก์ชันผลรวม (Summation function = Σ) และหลังจากนั้นทำการแปลงค่า

โดยใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function = f) ซึ่งจะทำให้ได้ค่า y_1, y_2, \dots, y_{29} ของชั้นซ่อน (ตัวอย่างการคำนวณหาค่า y_1 จะแสดงให้เห็นในสมการที่ (4.16) และ (4.17))

$$(net_1)_h = \sum_{i=1}^{27} \sum_{j=1}^{29} w_{ij} x_i = \sum_h \quad (4.16)$$

$$y_1 = \frac{1}{1 + \exp((-net_1)_h)} = f_h \quad (4.17)$$

4) คำนวณค่าเนตของโหนดในชั้นเอาต์พุต และหลังจากนั้นทำการแปลงค่าโดยใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า z ของชั้นเอาต์พุต (ตัวอย่างการคำนวณหาค่า z_1 จะแสดงให้เห็นในสมการที่ (4.18) และ (4.19))

$$(net_1)_o = \sum_{j=1}^{29} v_j y_j = \sum_o \quad (4.18)$$

$$z_1 = \frac{1}{1 + \exp((-net_1)_o)} = f_o \quad (4.19)$$

5) จากนั้นนำชุดทดสอบที่ได้แบ่งไว้ 20% (73 ชุดข้อมูล) มาทดสอบความคลาดเคลื่อน (E_{tot}) ดังสมการที่ (4.20)

$$E_{tot} = \frac{1}{73} \sum_{p=1}^{73} E_p \quad \text{โดยที่} \quad E_p = \frac{1}{2} (t_p - z_p)^2 \quad (4.20)$$

หากค่าคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้ยังไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.005 จึงคำนวณเทอมผิดพลาดในชั้นเอาต์พุต (δ_o) เพื่อนำกลับไปปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนัก โดยใช้ชุดข้อมูลเดิมที่ได้จากการสอนในรอบที่ผ่านมา มาคำนวณเทอมผิดพลาด (ตัวอย่างการคำนวณ δ_o ในรอบแรก แสดงดังสมการที่ (4.21))

$$\delta_o = (z_1 - t_1) f'_o((net_1)_o) \quad (4.21)$$

โดยที่ t_1 คือ ค่าจริง (Actual data) หรือค่าการระบายมลพิษจากการตรวจวัด และ z_1 คือ ค่าผลลัพธ์ (Output data) หรือค่าที่คำนวณได้จากโครงข่าย ของข้อมูลชุดที่ 1

6) หลังจากนั้นคำนวณเทอมผิดพลาดในชั้นซ่อน ($\delta_{h,j}$) สำหรับแต่ละ โหนด j ดังสมการที่ (4.22)

$$\delta_{h,j} = f'_h((net_j)_h) \sum_{j=1}^{29} \delta_o v_j \quad (4.22)$$

7) จากนั้นเริ่มทำการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักก่อนที่จะเริ่มทำการสอนในรอบที่ 2 โดยเริ่มปรับแก้จากชั้นเอาต์พุตก่อน ดังสมการที่ (4.23)

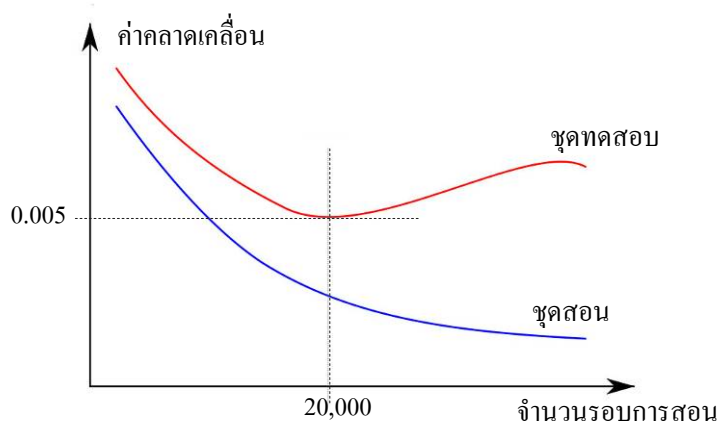
$$v_{(t+1),j} = \alpha v_{t,j} + \eta \delta_o y_{t,j} \quad (4.23)$$

โดยที่ t คือ จำนวนรอบการสอนโครงข่าย ($t = 1, 2, 3, \dots, n$) ส่วน α และ η คือ โมเมนตัม และอัตรา การเรียนรู้ ที่เลือกไว้ตามลำดับ

8) หลังจากนั้นจึงปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นซ่อน ดังสมการที่ (4.24)

$$w_{(t+1),ij} = \alpha w_{t,ij} + \eta \delta_{h,j} x_i \quad (4.24)$$

หลังจากทำการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักในชั้นเอาต์พุต และชั้นซ่อนแล้ว จึง กลับไปเริ่มสอนโครงข่ายในรอบต่อไปตามขั้นตอนที่ 3 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จนกระทั่งค่าความ คลาดเคลื่อนจากการนำชุดทดสอบที่ได้แบ่งไว้ 20% (73 ชุดข้อมูล) ที่นำมาทดสอบใน แต่ละรอบ ของการสอนโครงข่ายมีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.005 หรือสอนโครงข่ายได้ 20,000 รอบ (กรณีใด กรณีหนึ่ง) ดังรูปที่ 4.21 จึงจะหยุดสอนโครงข่าย



รูปที่ 4.21 จุดสิ้นสุดการหยุดสอน

หลังจากนั้นทำการสร้างโครงข่ายอีกครั้งโดยใช้ค่ากำหนดที่เปลี่ยนไป คือ กำหนดให้โครงข่ายหนึ่ง ๆ มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสอนโครงข่าย คือ อัตราการเรียนรู้ ค่าถ่วงน้ำหนัก และ โมเมนตัม หลังจากสิ้นสุดการสอนโครงข่ายแล้ว ให้ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 เป็นดังนี้ อัตราการเรียนรู้ (ปรับค่า 3 ครั้ง) โมเมนตัม (ปรับค่า 3 ครั้ง) และ ค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้น (ปรับค่า 3 ครั้ง)

สำหรับการออกแบบ และสร้างโครงข่ายสำหรับ NO_2 ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการสอนโครงข่ายครบทุกโครงข่ายที่ได้ทำการสร้างขึ้นมา จะทำให้มีโครงข่ายที่ต้องทำการคัดเลือกของแต่ละมลพิษในแต่ละเตาเผาทั้งสิ้น 108 โครงข่าย (3 ค่าอัตราการเรียนรู้ \times 3 ค่าถ่วงน้ำหนัก \times 3 ค่าโมเมนตัม \times 1 จำนวนโหนดในชั้นซ่อน \times 1 ชั้นซ่อน \times 4 กรณีการแปลงค่าตัวแปร)

4.6.1.2 การตรวจสอบความถูกต้อง และการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม

ทำการคัดเลือกโครงข่ายที่เหมาะสม จากกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณี (แต่ละกรณี 27 โครงข่าย) โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าสูงที่สุดของโครงข่ายในแต่ละกรณี จะได้โครงข่าย 4 โครงข่ายจากทั้ง 4 กรณี จากนั้นนำข้อมูลที่เหลือจำนวนร้อยละ 20 (validate set) มาตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยมีดัชนีตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง คือ Mean absolute percentage error (MAPE) เพื่อเลือกโครงข่ายที่มีค่าเฉลี่ยของดัชนีตรวจสอบความถูกต้อง MAPE ที่น้อยที่สุด ได้ผลดังตารางที่ 4.13

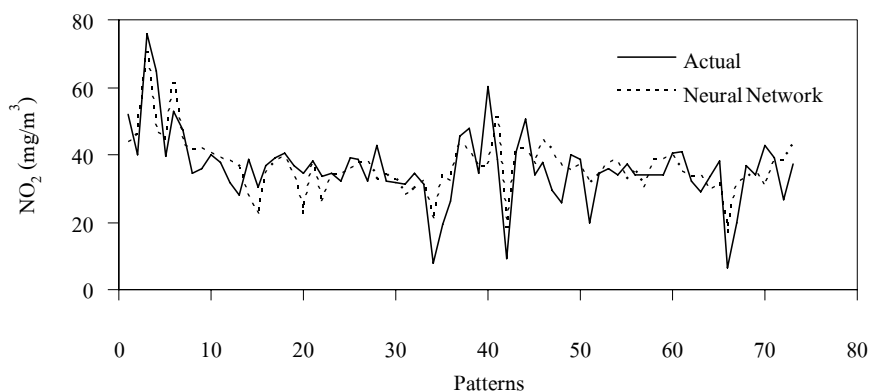
ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ NO_2 ของเตาหมายเลข 5

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	27-29-1	29	21.234
Log-Normal	29-30-1	30	30.498
Normal-Log	26-28-1	28	28.938
Log-Log	29-30-1	30	28.761

เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ย MAPE พบว่า กรณีที่ให้ค่าเฉลี่ยของดัชนีตรวจสอบความถูกต้อง MAPE ที่น้อยที่สุด คือ กรณีไม่แปลงค่าตัวแปร ซึ่งมีค่าเฉลี่ย MAPE เท่ากับ 21.234 และเป็นโครงข่ายที่เหมาะสมที่สามารถทำนายค่า NO_2 ได้ดีที่สุด โดยแบบจำลองมีโครงสร้างโครงข่ายแบบ 27-29-1 ซึ่งเป็นโครงข่ายแบบ 3 ชั้น มีจำนวนข้อมูลป้อนเข้า 27 ตัวแปร มีจำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อน 29 โหนด โดยมีค่าอัตราการเรียนรู้ ค่าถ่วงน้ำหนัก และค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายนี้ คือ 0.2, 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ โดยจะเป็นลักษณะเฉพาะของข้อมูลตัวแปรของแต่ละเตาเผา

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับทำนายการระบาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ที่เหลือทั้งหมดเป็นวิธีการเดียวกัน แสดงในภาคผนวก ข.

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของผลการทำนายค่า NO_2 ที่ได้จากโครงข่ายกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงของเตาหมายเลข 5 โดยมีโครงข่ายที่เหมาะสม คือ 27-29-1 มีค่าอัตราการเรียนรู้ ค่าถ่วงน้ำหนัก และโมเมนตัมเริ่มต้น คือ 0.2, 0.7 และ 0.9 ตามลำดับ พบว่าได้ผลทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ดังรูปที่ 4.22 โดยมีค่า MAPE ร้อยละ 21.234



รูปที่ 4.22 แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายการระบาย NO_2 จากเตาหมายเลข 5

4.6.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสม

จากการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.4.1 ทำให้ได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสม สำหรับการทำนายการระบาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ของเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 ดังตารางที่ 4.14 และ 4.15

ตารางที่ 4.14 แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสมสำหรับเตาหมายเลข 5

มลพิษ	แปลงค่า	โครงสร้าง	โหนด ในชั้นซ่อน	N	ค่าพารามิเตอร์			ค่าสถิติ	
					η	w	α	R^2	MAPE
NO_2	Normal-Normal	27-29-1	29	73	0.2	0.5	0.9	0.438	21.234
SO_2	Normal-Log	18-24-1	24	73	0.1	0.7	0.1	0.371	71.298
CO_2	Normal-Normal	13-22-1	22	73	0.2	0.5	0.5	0.658	15.344
HCl	Normal-Log	19-25-1	25	73	0.05	0.3	0.9	0.645	25.271
TSP	Normal-Log	7-19-1	19	73	0.2	0.3	0.9	0.607	15.200

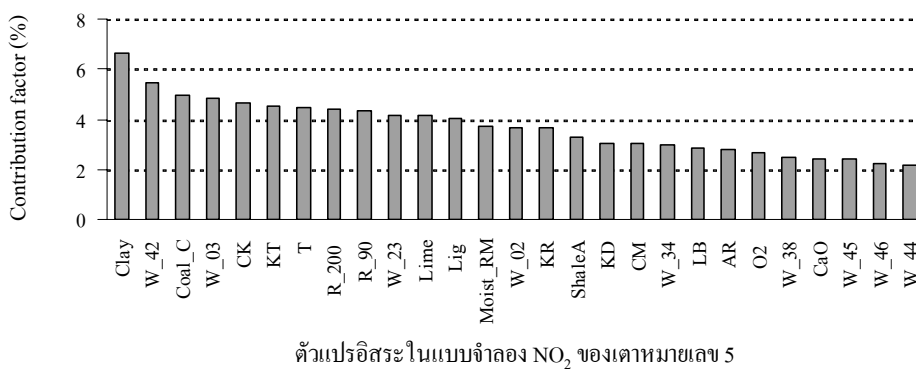
ตารางที่ 4.15 แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ที่เหมาะสมสำหรับเตาหมายเลข 6

มลพิษ	แปลงค่า	โครงสร้าง	โหนด ในชั้นซ่อน	N	ค่าพารามิเตอร์			ค่าสถิติ	
					η	w	α	R^2	MAPE
NO_2	Normal-Log	31-30-1	30	73	0.1	0.7	0.1	0.871	21.352
SO_2	Log-Log	28-29-1	29	73	0.05	0.5	0.9	0.444	56.721
CO_2	Normal-Log	25-27-1	27	73	0.2	0.7	0.9	0.983	9.510
HCl	Normal-Log	23-27-1	27	73	0.2	0.5	0.9	0.854	45.903
TSP	Log-Log	23-27-1	27	73	0.2	0.7	0.9	0.980	18.461

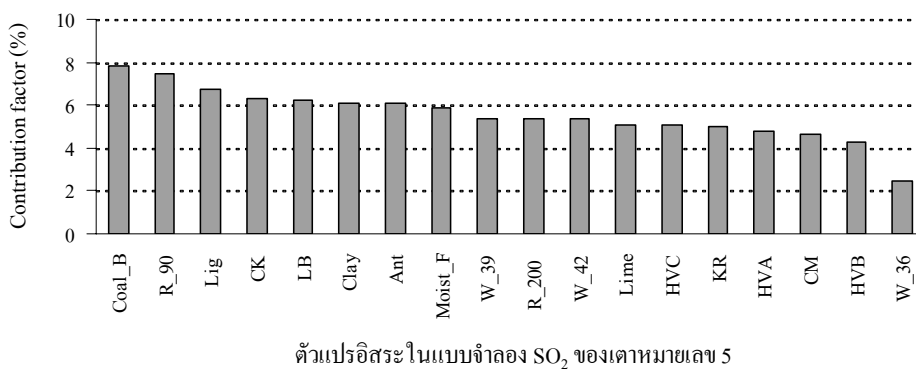
4.6.3 อิทธิพลของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระที่มีความสำคัญต่อโครงข่ายในการทำนายค่าการระบาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP จะบ่งชี้ถึงความสำคัญของตัวแปรแต่ละตัวออกมาในรูปแบบของดัชนีที่คำนวณมาจากค่าถ่วงน้ำหนักที่ถูกปรับแก้แล้ว เรียกว่า Contribution factor โดยตัวแปรที่มีค่า Contribution factor สูงก็จะมีผลสำคัญที่ช่วยในการทำนายสูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0-100 ค่าที่ได้ในแต่ละโครงข่ายจะสามารถเปรียบเทียบกันได้เฉพาะในเตาเผาเดียวกันเท่านั้น เนื่องจากสร้างมาจากชุดข้อมูลของเตาเผาเดียวกัน

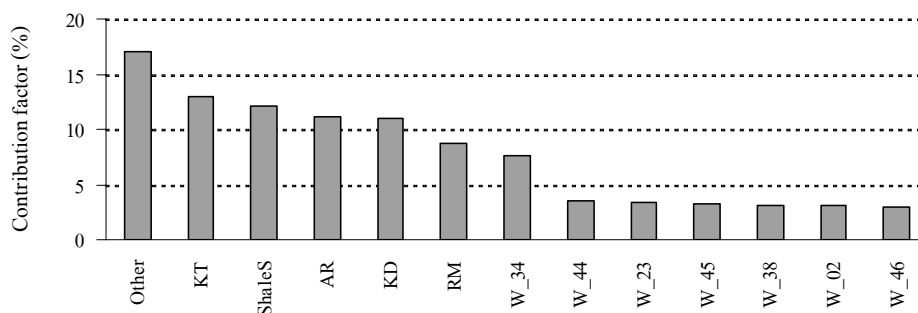
ผลการศึกษา พบว่าในเตาเผาหมายเลข 5 และ 6 มีตัวแปรอิสระที่มีค่า Contribution factor มากที่สุด และมีค่าโดดเด่นกว่าตัวแปรอื่น ๆ โดยพิจารณาตามกลุ่มของตัวแปรที่มีผลต่อ NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ดังแสดงในรูปที่ 4.23-4.32



รูปที่ 4.23 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO_2 ของเตาหมายเลข 5

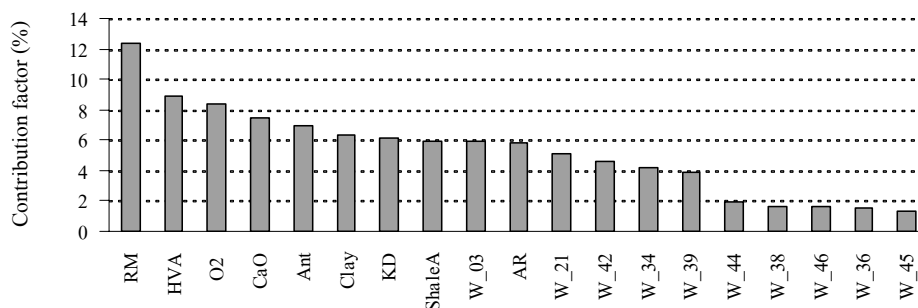


รูปที่ 4.24 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO_2 ของเตาหมายเลข 5



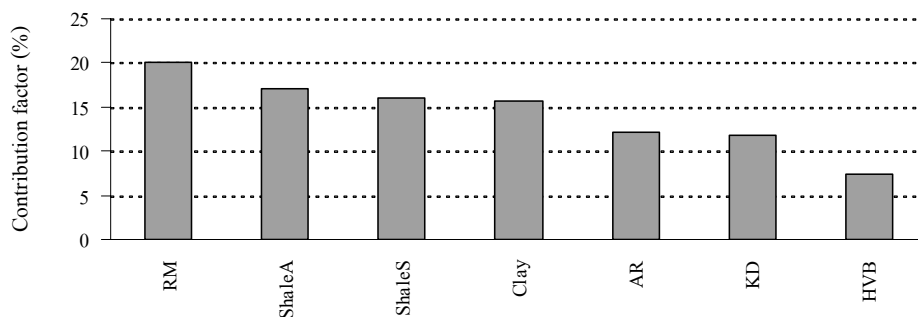
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 5

รูปที่ 4.25 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 5



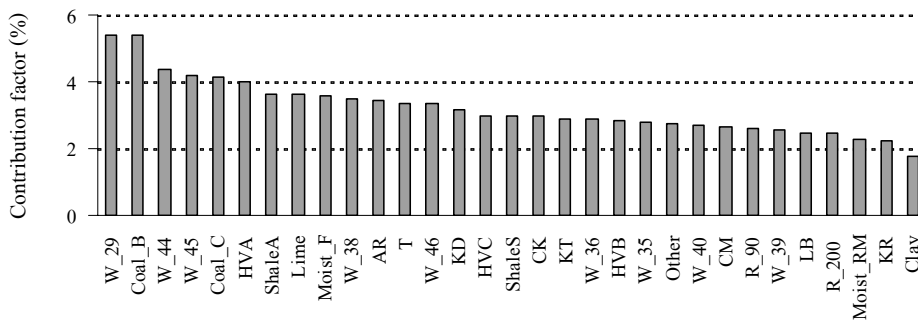
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5

รูปที่ 4.26 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5



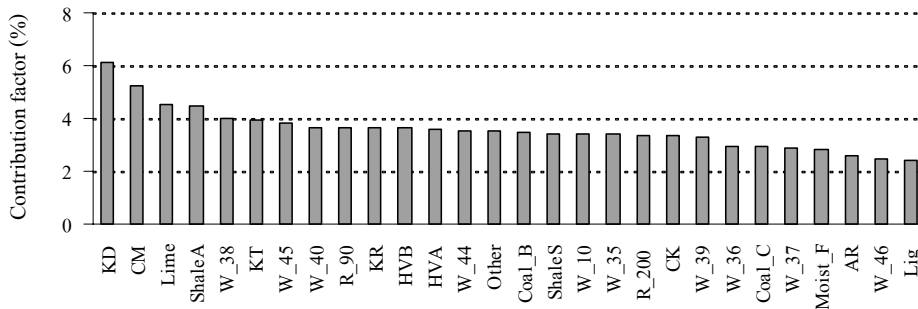
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5

รูปที่ 4.27 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5



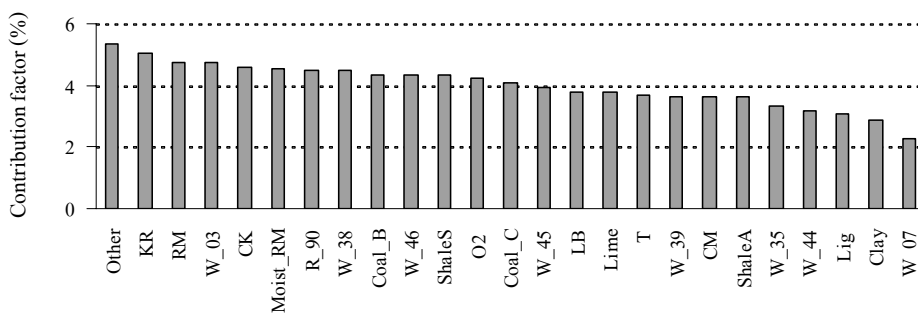
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.28 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 6



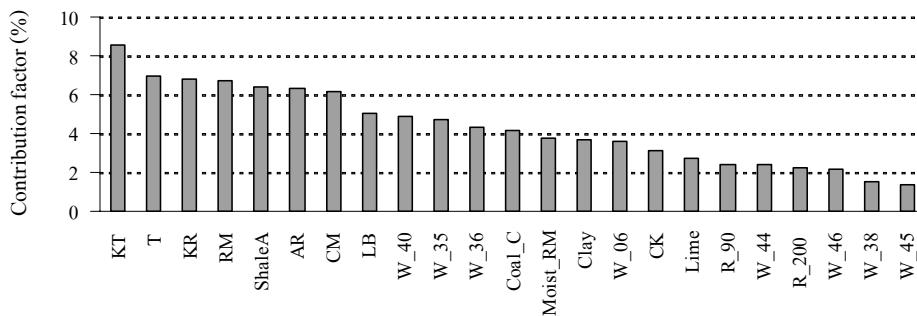
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.29 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 6



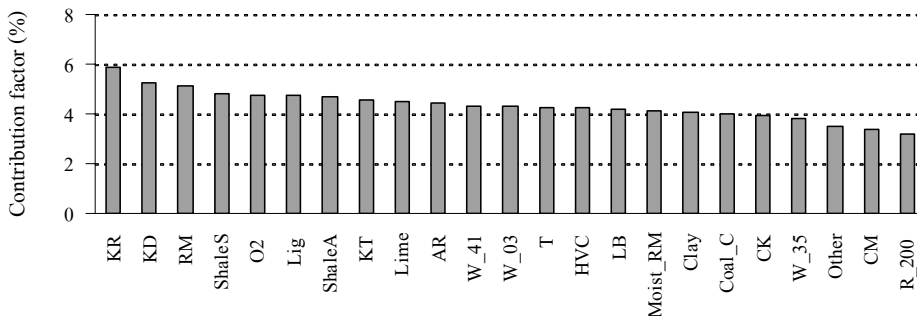
ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.30 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 6



ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.31 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6



ตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 6

รูปที่ 4.32 อิทธิพลของตัวแปรอิสระในแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 6

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระจะเห็นได้ว่า ตัวแปรด้านเชื้อเพลิงทดแทนในแบบจำลองของมลพิษทั้ง 5 ทั้งเตาหมายเลข 5 และ 6 มีอิทธิพลค่อนข้างสูงต่อการระบายมลพิษ แม้ปริมาณในการใช้จะน้อย

สามารถสรุปอิทธิพลของตัวแปร โดยพิจารณาตามกลุ่มของตัวแปรที่มีผลต่อ NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP จากเตาหมายเลข 5 และ 6 ดังตารางที่ 4.16 คือ ตัวแปรกลุ่มวัตถุดิบเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงทดแทน และสภาพของกระบวนการผลิต จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาอิทธิพลของกลุ่มตัวแปรที่อยู่ในแบบจำลองจะได้ว่า กลุ่มของตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิตจะมีอิทธิพลสูงที่สุดต่อการระบายมลพิษ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ อาทิ กรณี NO₂, SO₂ และ HCl ของเตาหมายเลข 5 และ 6 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิตหลายตัว ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษากฎการเกิด เช่น มีปัจจัยสำคัญจากการเดิน และไม่เดินระบบของ Raw Mill การเดิน และไม่เดินระบบของ Coal Mill อุณหภูมิในเตาเผา ปริมาณปูนเม็ด

ที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในเตา เป็นต้น (ดังได้กล่าวในหัวข้อ 4.1.2)

อีกประเด็นหนึ่งที่มีผลต่ออิทธิพลของกลุ่มตัวแปร คือ จำนวนตัวแปรอิสระที่อยู่ในแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลอง ANN จะใช้ตัวแปรอิสระที่นำมาสร้างแบบจำลองทุกตัว และจะเห็นว่าจำนวนตัวแปรในกลุ่มของสภาพของกระบวนการผลิตมากกว่าตัวแปรในกลุ่มอื่น ๆ

ตารางที่ 4.16 อิทธิพลของกลุ่มตัวแปรที่มีผลต่อการทำนายมลพิษทั้ง 5 ของแบบจำลอง ANN

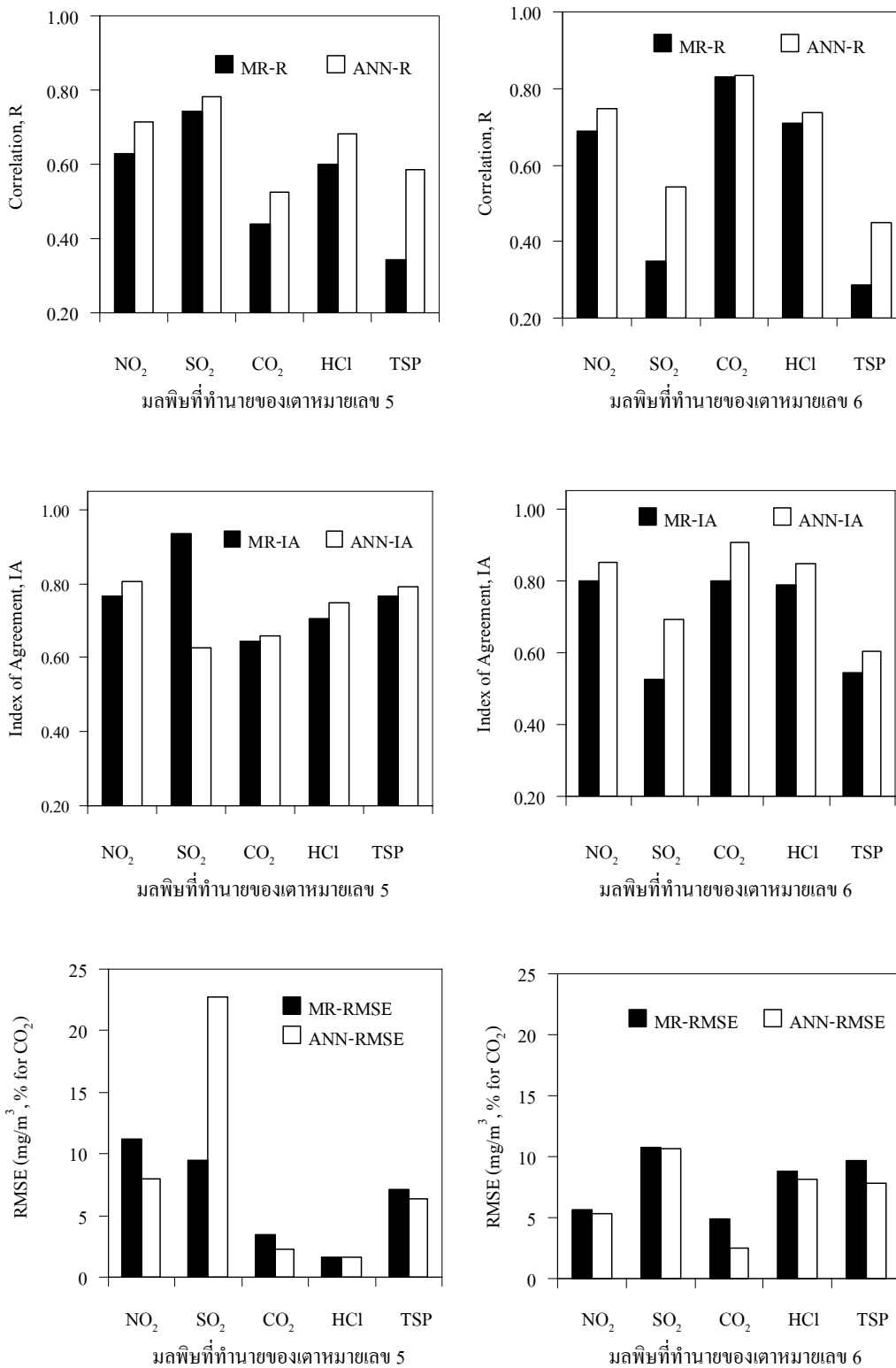
กลุ่มตัวแปร \ มลพิษ		วัตถุดิบ	เชื้อเพลิง	เชื้อเพลิงทดแทน	สภาพกระบวนการผลิต
		(%)	(%)	(%)	(%)
NO ₂	เตา K5	22.71	8.98	30.42	37.89
	เตา K6	23.81	9.51	31.82	34.86
SO ₂	เตา K5	17.47	20.67	13.20	48.66
	เตา K6	24.57	8.80	33.44	33.19
CO ₂	เตา K5	51.30	0.00	26.91	21.79
	เตา K6	23.74	11.52	29.86	34.88
HCl	เตา K5	24.21	6.90	31.80	37.09
	เตา K6	24.21	4.19	24.91	46.69
TSP	เตา K5	72.61	0.00	0.00	27.39
	เตา K6	35.46	8.71	12.40	43.43

4.7 การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

หลังจากได้แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการระบายมลพิษจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ และแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายของการวิเคราะห์คือ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งสอง โดยนำข้อมูลที่สุ่มแยกออกไว้ร้อยละ 10 จำนวน 36 ชุดข้อมูล ซึ่งเป็นชุดเดียวกันกับที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ มาประเมิน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้วิธีทางสถิติ ได้แก่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ดัชนีการยอมรับ (IA) และค่ารากที่สองของค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ได้ผลดังรูป 4.33

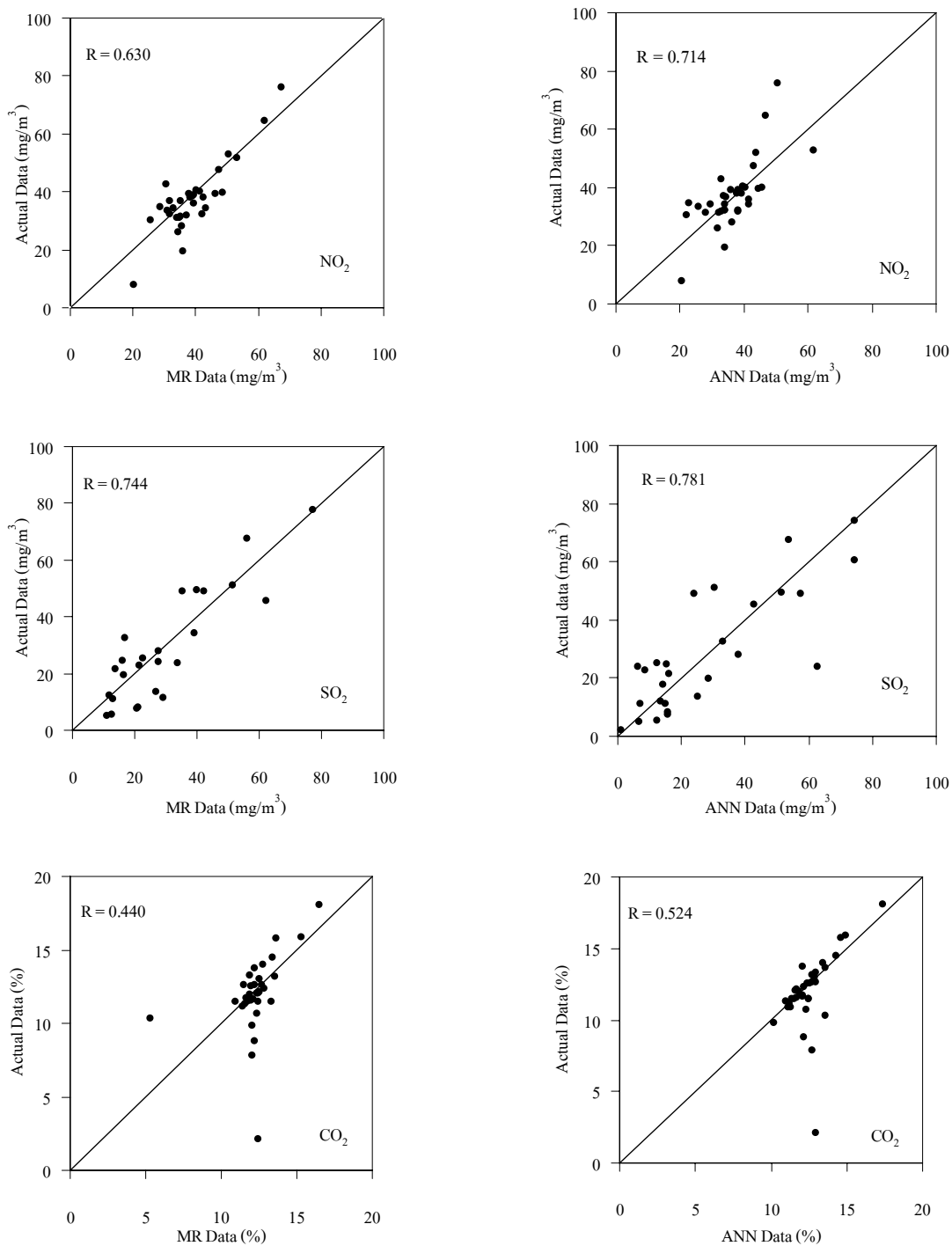
จากรูปที่ 4.33 แสดงผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายการระบาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ของเตาหมายเลข 5 และเตาหมายเลข 6 ซึ่งพบว่าเตาหมายเลข 5 มีค่า RMSE จากการทำนาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์เท่ากับ 8.026, 22.703, 2.214 (%), 1.615 และ 6.381 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ ส่วนการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุมีค่าเท่ากับ 11.166, 9.444, 3.497 (%), 1.668 และ 7.114 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์มีค่า RMSE น้อยกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ ส่วนเตาหมายเลข 6 มีค่า RMSE จากการทำนาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์เท่ากับ 5.356, 10.633, 2.488(%), 8.132 และ 7.825 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ ส่วนการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุมีค่าเท่ากับ 5.599, 10.708, 4.881(%), 8.785 และ 9.623 มก./ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์มีค่า RMSE น้อยกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ให้ผลการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ

นอกจากนี้ยังพบว่าจากการประเมินด้วยวิธี IA ผลที่ได้จากการทำนาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ของเตาหมายเลข 5 ด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์มีค่า IA เท่ากับ 0.807, 0.627, 0.658, 0.748 และ 0.791 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ มีค่าเท่ากับ 0.767, 0.936, 0.644, 0.707 และ 0.766 ตามลำดับ ส่วนเตาหมายเลข 6 มีค่า IA เท่ากับ 0.851, 0.690, 0.907, 0.847 และ 0.603 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ มีค่าเท่ากับ 0.800, 0.525, 0.799, 0.787 และ 0.542 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า โดยส่วนใหญ่แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์มีค่า IA มากกว่าการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์มีประสิทธิภาพดีกว่าเช่นกัน

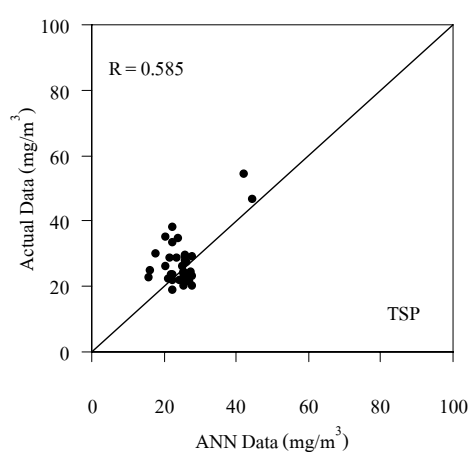
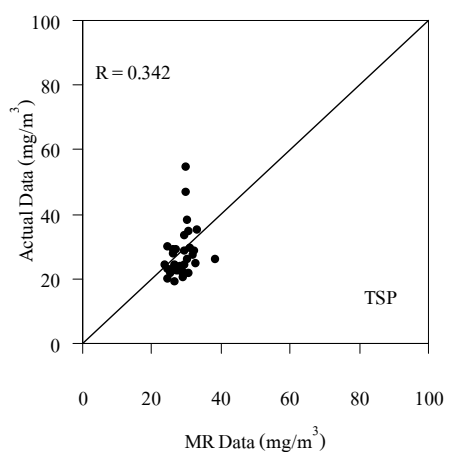
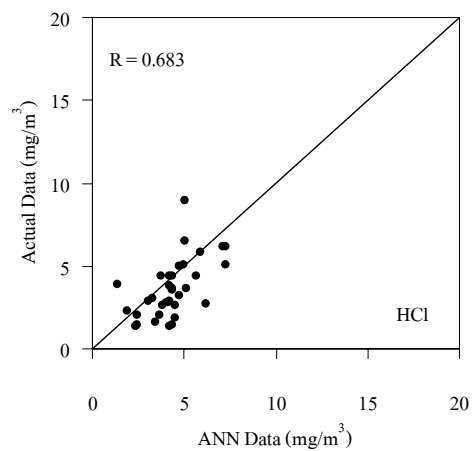
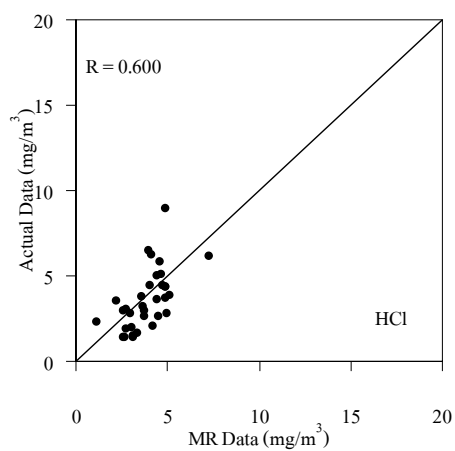


รูปที่ 4.33 แผนภูมิแท่งแสดงผลการเปรียบเทียบค่า R IA และ RMSE ระหว่างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ และแบบจำลองโครงข่ายใยประสาทประดิษฐ์

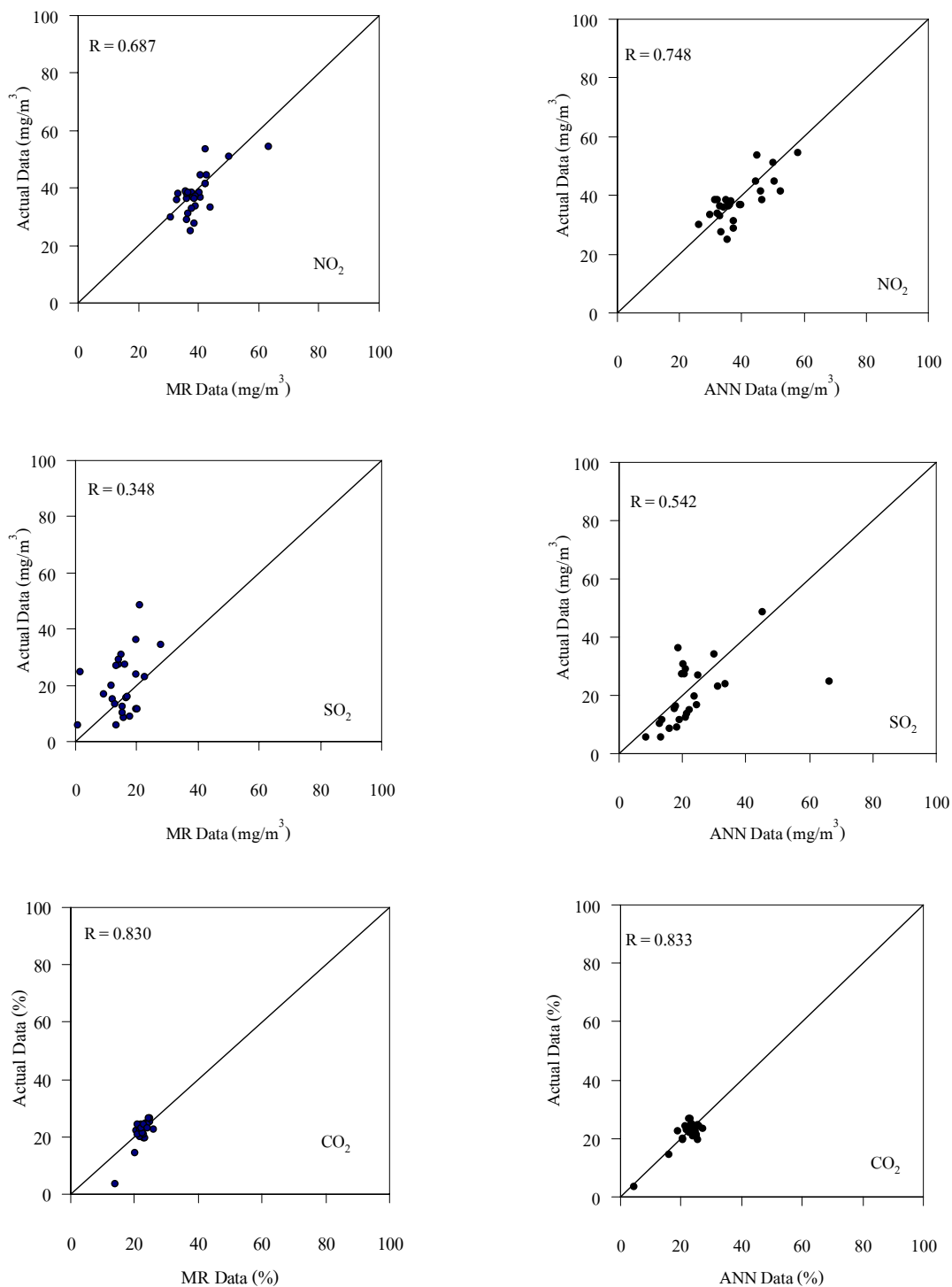
เมื่อพิจารณาค่า R ซึ่งแสดงค่าในรูปกราฟแท่งในรูปที่ 4.33 และแสดงการกระจายในรูปที่ 4.34-4.35 โดยเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการทำนายจากแบบจำลอง และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยที่แกนในแนวนอนแสดงค่าที่ได้จากการทำนาย แกนในแนวตั้งแสดงค่าจากการตรวจวัดจริง และมีเส้นอ้างอิงแสดงความเท่ากัน (Equality line) โดยแบบจำลองที่มีความสามารถในการทำนายสูงจะมีค่าเรียงกันอยู่บนเส้นอ้างอิง ซึ่งพบว่าผลการทำนายด้วยแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุมีการกระจายตัวอยู่บนเส้นความเท่ากัน แต่พบว่าผลทำนายด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์สามารถให้ผลทำนายที่แม่นยำกว่าโดยมีผลทำนายส่วนใหญ่เกาะกลุ่มแน่นอยู่บนเส้นอ้างอิง ส่งผลให้ค่า R จากการทำนาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ของเตาหมายเลข 5 มีค่าเท่ากับ 0.714, 0.781, 0.524, 0.683 และ 0.585 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุที่มีค่า R เท่ากับ 0.630, 0.744, 0.440, 0.600 และ 0.342 ตามลำดับ ส่วนค่า R จากการทำนาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ของเตาหมายเลข 6 มีค่าเท่ากับ 0.748, 0.542, 0.833, 0.737 และ 0.449 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุที่มีค่า R เท่ากับ 0.687, 0.348, 0.830, 0.709 และ 0.286 ตามลำดับ และพบว่าแบบจำลองทั้งสองให้ผลทำนายส่วนใหญ่สูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงเมื่อพิจารณาจากเส้นแนวโน้มของข้อมูล โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์จะให้ผลทำนายที่ใกล้เคียงค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากกว่า เนื่องจากเส้นแนวโน้มมีความชันใกล้เคียงกับเส้นความเท่ากันมากกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ให้ผลการทำนายที่ดีกว่า



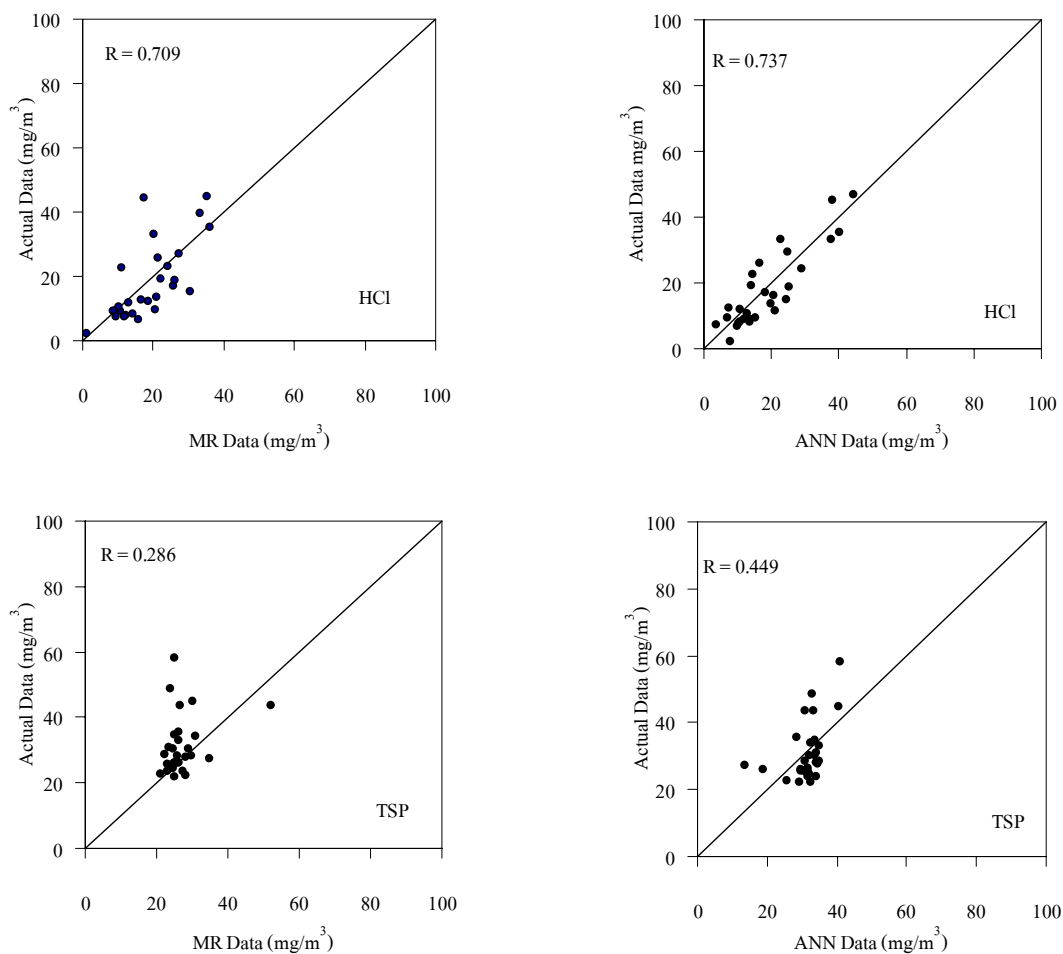
รูปที่ 4.34 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง
ของเตาหมายเลข 5



รูปที่ 4.34 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง
ของเตาหมายเลข 5 (ต่อ)



รูปที่ 4.35 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง
ของเตาหมายเลข 6



รูปที่ 4.35 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าจากการทำนาย และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง
ของเตาหมายเลข 6 (ต่อ)

สรุปผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการทดสอบด้วยตัวชี้วัดทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 4.17 และ 4.18 พบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งให้ผลทดสอบไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Corani (2005); Grivas and Chaloulakou (2006); Slini et al. (2006); ศรีลย์ ปานศรีพงษ์ (2550); Cai et al. (2009) ที่ได้ทำการศึกษาการทำนายความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศในบรรยากาศโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย ดังตารางที่ 4.19 โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ที่ศึกษาการทำนายระบายนมลพิษอากาศจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.17 ผลเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับตัวแปร 5

มลพิษ	R		IA		RMSE (mg/m ³)	
	MR	ANNs	MR	ANNs	MR	ANNs
NO ₂	0.630	0.714	0.767	0.807	11.166	8.026
SO ₂	0.744	0.781	0.936	0.627	9.444	22.703
CO ₂	0.440	0.524	0.644	0.658	3.497 (%)	2.214 (%)
HCl	0.600	0.683	0.707	0.748	1.668	1.615
TSP	0.342	0.585	0.766	0.791	7.114	6.381

ตารางที่ 4.18 ผลเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับตัวแปร 6

มลพิษ	R		IA		RMSE (mg/m ³)	
	MR	ANNs	MR	ANNs	MR	ANNs
NO ₂	0.687	0.748	0.800	0.851	5.599	5.356
SO ₂	0.348	0.542	0.525	0.690	10.708	10.633
CO ₂	0.830	0.833	0.799	0.907	4.881 (%)	2.488 (%)
HCl	0.709	0.737	0.787	0.847	8.785	8.132
TSP	0.286	0.449	0.542	0.603	9.623	7.825

จากตารางที่ 4.19 ซึ่งทำการเปรียบเทียบงานวิจัยอื่นกับงานวิจัยนี้ โดยใช้ค่าตัวชี้วัดทางสถิติ คือ ค่า R IA และ RMSE เพื่อวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ศึกษา พบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งให้ผลทดสอบไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Corani (2005); Grivas and Chaloulakou (2006); Slini et al. (2006); ศรีลย์ ปานศรีพงษ์ (2550); Cai et al. (2009) ที่ได้ทำการศึกษาการทำนายความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศในบรรยากาศ และพบว่าแบบจำลองที่ได้จากการศึกษานี้มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงกว้างกว่างานวิจัยอื่น ทั้งนี้เนื่องจากมลพิษที่ศึกษาครั้งนี้มีมากถึง 5 มลพิษ ทำให้ประสิทธิภาพอยู่ในช่วงกว้าง แต่เมื่อพิจารณาตามชนิดของมลพิษที่ศึกษา พบว่าประสิทธิภาพของแบบจำลองเพื่อทำนายฝุ่นละออง มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Slini et al. (2006) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้เครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงถึง 99.95% ทำให้ระดับฝุ่นที่ระบายออกทางปล่องมีสหสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระด้านวัตถุดิบและกระบวนการผลิตน้อย ส่วนประสิทธิภาพของแบบจำลองเพื่อทำนาย NO₂ CO₂ ใกล้เคียงและสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น เนื่องมาจากมีการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผา

ตารางที่ 4.19 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

อ้างอิง	เรื่องที่ทำการศึกษา	วิธีศึกษา และการสร้างแบบจำลอง		ตัวชี้วัด		
		วิธีศึกษา	การสร้างแบบจำลอง	R	IA	RMSE
Corani (2005)	ทำนายความเข้มข้นของ PM ₁₀	Linear model	-	-	-	-
		ANN	Multilayer feed forward	0.90	0.90-0.94	-
Grivas and Chaloulakou (2006)	ทำนายค่าระดับ PM ₁₀	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Stepwise	0.53-0.59	0.64-0.72	17.06-35.14
		ANN	Multilayer feed forward	0.70-0.82	0.80-0.89	12.35-26.06
Slini et al. (2006)	ทำนายการเกิด PM ₁₀	Linear model	-	0.297	0.446	11.24
		ANN	Multilayer feed forward	0.249	0.515	7.13
สร้อย ปานศรีพงษ์ (2550)	ทำนายการเกิด PM ₁₀	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Backward และ Stepwise	0.85-0.94	0.87-0.97	6.46-10.28
		ANN	Multilayer feed forward	0.91-0.97	0.91-0.98	5.58-8.20
Cai et al. (2009)	1. ทำนายความเข้มข้น CO ₂	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Backward	0.68-0.88	-	266.1-497.9
		ANN	Multilayer feed forward	0.81-0.87	-	276.2-388.8
	2. ทำนายความเข้มข้น NO ₂	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Backward	0.89-0.94	-	19.9-29.1
		ANN	Multilayer feed forward	0.93-0.94	-	21.1-35.6
	3. ทำนายความเข้มข้นอนุภาคฝุ่น	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Backward	0.89-0.97	-	17.9-40.5
		ANN	Multilayer feed forward	0.91-0.96	-	10.3-57.5
งานวิจัยนี้	1. ทำนายการระบาย NO ₂	Linear model	คัดเลือกตัวแปร วิธี Stepwise	0.63-0.69	0.77-0.80	5.60-11.17
		ANN	Multilayer feed forward	0.71-0.75	0.81-0.85	5.36-8.03

ตารางที่ 4.19 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง (ต่อ)

อ้างอิง	เรื่องที่ทำการศึกษา	วิธีศึกษา และการสร้างแบบจำลอง		ตัวชี้วัด		
		วิธีศึกษา	การสร้างแบบจำลอง	R	IA	RMSE
งานวิจัยนี้ (ต่อ)	2. ทำนายการระบาย SO ₂	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Stepwise	0.35-0.74	0.53-0.94	9.44-10.71
		ANN	Multilayer feed forward	0.54-0.78	0.63-0.69	10.63-22.70
	3. ทำนายการระบาย CO ₂	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Stepwise	0.44-0.83	0.64-0.80	3.50-4.88
		ANN	Multilayer feed forward	0.52-0.83	0.66-0.91	2.21-2.49
	4. ทำนายการระบาย HCl	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Stepwise	0.60-0.71	0.71-0.79	1.67-8.79
		ANN	Multilayer feed forward	0.68-0.74	0.75-0.85	1.62-8.13
	5. ทำนายการระบาย TSP	MR	คัดเลือกตัวแปร วิธี Stepwise	0.29-0.34	0.54-0.77	7.11-9.62
		ANN	Multilayer feed forward	0.45-0.59	0.60-0.79	6.38-7.83

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ เริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเน้นที่ตัวแปรด้านวัตถุดิบ เชื้อเพลิง สภาพกระบวนการผลิต และมลพิษที่เกิดขึ้น ตัวแปรด้านวัตถุดิบ ได้แก่ หินปูน หินดินดานที่มีซิลิกา หินดินดานที่มีลูมิน่า หินลูกรัง ดินเหนียว ดินกลางดง วัตถุดิบทดแทน และวัตถุดิบอื่น ๆ ตัวแปรด้านเชื้อเพลิง ได้แก่ ถ่านหิน บิทูมินัสคุณภาพสูง ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพต่ำ ลิกไนต์ แอนทราไซต์ และของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ 46 ประเภท ตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิต ได้แก่ ความหยาบหรือความละเอียดของผงวัตถุดิบ วัดในรูปของเปอร์เซ็นต์ก้างของผงวัตถุดิบเมื่อร้อนผ่านตะแกรงขนาด 90 ไมครอน และ 200 ไมครอน ความชื้นของวัตถุดิบ ความชื้นของเชื้อเพลิง อุณหภูมิในเตาเผา กำลังหมุนของเตา ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาเผา แคลไซเนอร์บี และแคลไซเนอร์ซี ปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา การเดิน และไม่เดินระบบของหม้อบดวัตถุดิบในรูปของชั่วโมงการทำงาน การเดิน และไม่เดินระบบของหม้อบดถ่านหินในรูปของชั่วโมงการทำงาน และปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน และตัวแปรด้านมลพิษที่ทำนาย ได้แก่ NO_2 SO_2 CO_2 HCl และ TSP โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายวันของโรงงานที่มีบันทึกไว้ปี 2550 ของโรงงาน 3 ซึ่งประกอบด้วยเตาหมายเลข 5 และเตาหมายเลข 6 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สถิติพรรณนา และสหสัมพันธ์ของตัวแปรเพื่อสังเกตความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตัวแปร และนำผลการศึกษาไปใช้สร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ และแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ เพื่อทำนายค่าการระบาย NO_2 SO_2 CO_2 HCl และ TSP จากเตาหมายเลข 5 และเตาหมายเลข 6 จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้ เพื่อนำไปใช้งาน โดยสามารถสรุปผลการศึกษาที่สำคัญตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา และขั้นตอนของการศึกษาที่ตั้งไว้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาสถิติพรรณนาของข้อมูล

ข้อมูลวัตถุดิบเฉลี่ยรายวัน ส่วนใหญ่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ขวา และข้อมูลกระจายตัว ข้อมูลส่วนใหญ่มีความแปรปรวนของข้อมูลค่อนข้างต่ำ

ข้อมูลเชื้อเพลิงเฉลี่ยรายวัน ส่วนใหญ่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ขวา และข้อมูลกระจุกตัว และมีความแปรปรวนสูง โดยเฉพาะข้อมูลของเชื้อเพลิงทดแทน ส่วนข้อมูลที่มีความแปรปรวนต่ำ ได้แก่ ถ่านหินที่มีคุณภาพสูง และลิกไนต์

ข้อมูลสภาพของกระบวนการผลิตเฉลี่ยรายวัน ส่วนใหญ่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ซ้าย และข้อมูลกระจุกตัว โดยนอกจากนี้ข้อมูลทุกตัวแปรมีความแปรปรวนต่ำ และข้อมูลที่โรงงานมีเกณฑ์ควบคุม พบว่าอยู่ในช่วงปกติที่ควบคุม ได้แก่ เเปอร์เซ็นต์คังค้ำของผงวัตถุดิบเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 90 และ 200 ไมครอน ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา ความชื้นของวัตถุดิบ และเชื้อเพลิง

ข้อมูลมลพิษอากาศเฉลี่ยรายวัน พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ NO_2 , SO_2 และ TSP มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานการปล่อยอากาศเสียจากโรงปูนซีเมนต์ ข้อมูลมลพิษทุกตัวมีความแปรปรวนมีค่อนข้างน้อย มีลักษณะการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเบ้ขวา และข้อมูลมีการกระจุกตัวเล็กน้อย

5.1.2 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ตัวแปรที่เป็นตัวบ่งชี้ระดับความเข้มข้นของมลพิษได้ดีหรือมีศักยภาพที่สำคัญ ซึ่งสรุปได้จากผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ระหว่างความเข้มข้นของมลพิษกับตัวแปรได้ดังต่อไปนี้

1) NO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณดินเหนียว หินปูน และเชื้อเพลิงทดแทน ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์คังค้ำของผงวัตถุดิบเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน และดินกลางดง ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่า R อยู่ในช่วง 0.371-0.644

2) SO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน หินปูน ลิกไนต์ ดินเหนียว และถ่านหินที่มีคุณภาพสูง ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับความชื้นของผงวัตถุดิบ ค่าความร้อน และถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่า R อยู่ในช่วง 0.185-0.357

3) CO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน หินปูน ชั่วโมงการทำงานของ Coal Mill ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา และอุณหภูมิในเตาเผา ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุดิบในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่า R อยู่ในช่วง 0.298-0.454

4) HCl มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน และดินเหนียว ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุดิบ และเปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุดิบเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่า R อยู่ในช่วง 0.227-0.408

5) TSP มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน วัตถุดิบทดแทน ความชื้นของผงวัตถุดิบ และหินดินดานที่มีซิลิกา ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุดิบ ดินเหนียว และหินดินดานที่มีอลูมินา ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยมีค่า R อยู่ในช่วง 0.135-0.318

จากการแปลงค่าตัวแปรให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของลอการิทึมธรรมชาติทั้ง 4 กรณีพบว่าส่วนใหญ่ไม่ส่งผลต่อรูปแบบความสัมพันธ์ของมลพิษ กับตัวแปรอิสระต่าง ๆ มากนัก แต่มีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของบางตัวแปรมีค่าเพิ่มมากขึ้น และบางตัวแปรมีค่าลดลงเล็กน้อย

5.1.3 แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุสำหรับทำนายการระบายมลพิษอากาศ

ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการระบาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้วิธีความถดถอยเชิงพหุ สรุปได้ว่าแบบจำลองที่ให้ค่า Adjusted R^2 ที่ดีที่สุด และผ่านการทดสอบค่าคลาดเคลื่อน (Residual analysis) คือ แบบจำลองที่มีการแปลงค่าตัวแปรและไม่มีการแปลงค่าตัวแปร ซึ่งไม่มีลักษณะที่แน่นอน โดยแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายแต่ละมลพิษที่ระบายออกจากเตาหมายเลข 5 มีค่า Adjusted R^2 ของ NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP เท่ากับ 0.570, 0.387, 0.520, 0.397 และ 0.249 ตามลำดับ ส่วนเตาหมายเลข 6 มีค่า Adjusted R^2 ของ NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP เท่ากับ 0.606, 0.406, 0.533, 0.559 และ 0.383 ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของมลพิษได้มากที่สุด คือ แบบจำลองสำหรับ NO_2 ส่วนแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงสุด คือ แบบจำลองสำหรับ NO_2 ส่วนแบบจำลองสำหรับ TSP สามารถอธิบาย และมีความถูกต้องน้อยที่สุด ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการใช้เครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูง ทำให้ระดับฝุ่นที่ระบายออกทางปล่องมีสหสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระด้านวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตน้อยกว่ามลพิษประเภทก๊าซ และตัวแปรส่วนใหญ่ที่ผ่านการคัดเลือก และพบในแบบจำลองบ่อยครั้ง คือ ปริมาณดินเหนียว ปริมาณหินปูน ชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุดิบ เชื้อเพลิงทดแทน ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา และปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน

5.1.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์สำหรับทำนายการระบายมลพิษอากาศ

ผลการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าการระบาย NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ พบว่าแบบจำลองที่ให้ค่าความผิดพลาดในรูปของค่า MAPE น้อยที่สุดส่วนใหญ่ต้องทำการแปลงค่าของตัวแปรตามให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ ก่อนที่จะนำมาสร้างแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ดีที่สุดของเตาหมายเลข 5 มีค่า MAPE ที่ร้อยละ 21.23, 71.30, 15.34, 25.27 และ 15.20 สำหรับ NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองที่ดีที่สุดของเตาหมายเลข 6 มีค่า MAPE ที่ร้อยละ 21.35, 56.72, 9.51, 45.90 และ 18.46 ตามลำดับ

5.1.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งสอง โดยนำข้อมูลที่สุ่มแยกออกไว้ร้อยละ 10 จำนวน 36 ชุดข้อมูล มาประเมิน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้วิธีทางสถิติ พบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ให้ผลการทำนายที่มีความถูกต้องสูงกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ ยกเว้นกรณีเดียว คือ การทำนายการระบาย SO_2 ของเตาหมายเลข 5 ที่แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุให้ผลการทำนายที่มีความถูกต้องสูงกว่า

5.1.6 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

ผลจากการสร้างแบบจำลองพบว่า การระบายมลพิษอากาศมีความสัมพันธ์กับตัวแปรด้านวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และสภาพของกระบวนการผลิต ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองที่ได้มาเสริมประสิทธิภาพการดำเนินงานของเครื่องควบคุมมลพิษที่มีอยู่ในปัจจุบัน บนพื้นฐานของแนวทางการปรับปรุงด้านกระบวนการผลิตเพื่อลดการระบายมลพิษออกจากปล่องของโรงงานได้ และสามารถใช้แบบจำลองเพื่อติดตามตรวจสอบความผิดปกติของการทำงานของเครื่องควบคุมมลพิษและระบบตรวจวัดมลพิษได้ นอกจากนี้แบบจำลองที่ได้จากการศึกษาจะเป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการด้านคุณภาพอากาศของโรงงาน และผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ และพัฒนาแบบจำลองจะเป็นข้อมูลวิชาการที่มีประโยชน์ต่อการจัดการคุณภาพอากาศของโรงงานปูนซีเมนต์ทั่วไป และสามารถเป็นตัวอย่างสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่จะนำแนวคิด และวิธีการไปใช้ต่อไปได้

5.1.7 สรุปข้อดี และข้อด้อยของแบบจำลองที่ใช้

จากผลการศึกษาค้นคว้าพบว่า แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ เป็นแบบจำลองที่สร้างได้ง่าย และรวดเร็ว จำนวนตัวแปรอิสระที่อยู่ในแบบจำลองน้อยกว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ ซึ่งเป็นข้อดีในเรื่องของการเก็บข้อมูลตัวแปรที่น้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุยังมีข้อจำกัด คือ เหมาะกับข้อมูลที่มีลักษณะเชิงเส้น ทำให้ข้อมูลที่มีความซับซ้อน และไม่เป็นเชิงเส้น มีความสามารถในการทำนายต่ำลง

ส่วนแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์เป็นแบบจำลองที่ให้ผลการทดสอบทางสถิติจากการใช้ชุดข้อมูลที่ไม่เคยพบมาก่อนมีความถูกต้องสูง มีความสามารถในการทำนายสูง ใช้กับข้อมูลที่มีความผิดปกติ และมีการรบกวนได้ดี อีกทั้งยังสามารถใช้กับข้อมูลที่มีลักษณะไม่เชิงเส้นได้ดี แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์เป็นเทคนิคที่ต้องใช้การทดลองผิดลองถูกในการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ได้โครงข่ายที่ดีที่สุด จึงต้องใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองที่นาน และยุ่งยาก และจำนวนของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองมากกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ ทำให้ต้องเก็บข้อมูลของตัวแปรมากกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) แบบจำลองที่ได้ มีความสามารถในการทำนายในระดับปานกลางถึงต่ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวแปรด้านมลพิษที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในรูปของความเข้มข้น ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซ ดังนั้นจึงควรเปลี่ยนตัวแปรด้านมลพิษที่ใช้ในการศึกษาให้อยู่ในรูปของอัตราการระบาย คือ กรัมต่อวัน กรัมต่อนาที หรือมิลลิกรัมต่อวินาที เป็นต้น ทั้งนี้ในการศึกษานี้ไม่สามารถรวบรวมข้อมูลอัตราไหลของก๊าซได้ เนื่องจากข้อจำกัดของการเก็บข้อมูลของโรงงาน

2) แบบจำลองสำหรับทำนายการระบายมลพิษอากาศ ควรเพิ่มตัวแปรในส่วนเครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต เช่น อัตราไหล พื้นที่แผ่นเก็บ ความเร็วของฝุ่นที่เข้าแผ่นเก็บ ตามที่ออกแบบ แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น ทั้งนี้ในการศึกษานี้ไม่สามารถรวบรวมข้อมูลในส่วนเครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต เนื่องจากข้อจำกัดของการเก็บข้อมูลของโรงงาน

3) แนวคิดการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เชิงสถิติจากวิธีการวิเคราะห์ความถดถอย และวิธีโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ในการศึกษานี้ เป็นต้นแบบในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายการระบายมลพิษอากาศจากโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ได้ นอกจากนี้ การศึกษาในอนาคตอาจเลือกเทคนิคการวิเคราะห์ทางสถิติอื่น ๆ อาทิ วิธี Principal component

Analysis (PCA) วิธี Cluster Analysis มาใช้ในการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

4) แนวคิด และการพัฒนาสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์ และแบบจำลองความถดถอยในการศึกษาครั้งนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อ โรงงานผลิตปูนซีเมนต์อื่น ๆ ในแง่ของการจัดการเพื่อลดการระบายนมลพิษอากาศ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้

5) ควรมีการตรวจวัดสารพิษอื่น ๆ แบบต่อเนื่อง ที่เกิดจากการนำกากของเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบ และเชื้อเพลิงทดแทน ได้แก่ โลหะหนัก เช่น ปรอท แคดเมียม เป็นต้น เนื่องจากยังไม่มี การตรวจวัด เพื่อเป็นการเฝ้าระวังมลพิษที่เกิดขึ้น และควบคุมคุณภาพของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ควรมี การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมทั้งก่อน และหลังสิ้นอายุการใช้งาน

รายการอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2550). ความสำเร็จในการจัดการมลพิษของประเทศไทย [ออนไลน์]. ได้จาก http://www.pcd.go.th/Info_serv/pol_suc_ash.html.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2550). การใช้ SPSS for windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2549). การวิเคราะห์สถิติ: สถิติสำหรับการบริหารและวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2546). หลักสถิติ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไกรสร จิตธรรม. (2547). เอกสารประกอบการบรรยายวิชา Neural Networks. ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นภาพร พานิช แสงสันต์ พาณิช วงศ์พันธ์ ติมปเสนีย์ วิจิตรา จงวิศาล และวราวุธ เสือดี. (2547). ตำรา ระบบบำบัดมลพิษอากาศ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.
- บริษัท ปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด. (2548). กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.siamcement.com/th/>.
- บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน). (2550). เอกสารการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมและความรับผิดชอบต่อชุมชน [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.siamcitycement.com>.
- บริษัท ยูเนี่ยน เพาเวอร์ ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด. (2550). มาตรการแก้ไข และป้องกัน: การกำจัดฝุ่นละออง [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.2fellows.com/portfolio/link/updc/protect/air2.htm>.
- ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียเป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ลงวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2549 ประกาศใน ราชกิจจานุเบกษาฉบับทั่วไป เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 129ง ลงวันที่ 15 ธันวาคม 2549.
- พัฒนา มุลพฤษย์. (2545). การป้องกันและควบคุมมลพิษ. กรุงเทพฯ: ชิกม่า ดีไซน์กราฟฟิก.
- วราวุธ เสือดี. (2543). ความรู้เบื้องต้นมลพิษทางอากาศ มลพิษทางเสียง และการตรวจวัดวิเคราะห์. ในเอกสารประกอบการอบรมวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- ศรัลย์ ปานศรีพงษ์. (2550). การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทประดิษฐ์และแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุ เพื่อทำนายความเข้มข้นของ PM_{10} ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและเทศบาลนครนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ศิวพันธ์ ชูอินทร์. (2544). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน ในถนนที่มีลักษณะคล้ายอุโมงค์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 7. (2550). สถานการณ์คุณภาพอากาศเขตควบคุมมลพิษ ต.หน้าพระลาน อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี ปี 2549 [ออนไลน์]. ได้จาก <http://www.enc7.com/page1.htm>.
- Berthouex, P.M. and Brown, L.C. (2002). **Statistics for Environmental Engineers**. 2nd ed. Lewis publishing.
- Brunelli, U., Piazza, V., Pignato, L., Sorbello, F., and Vitabile, S. (2007). Two-days ahead prediction of daily maximum concentrations of SO_2 , O_3 , PM_{10} , NO_2 , CO in the urban area of Palermo. **Atmospheric Environment**. 41: 2967-2995.
- Cai, M., Yin, Y., Xie, M. (2009). Prediction of hourly air pollutant concentrations near urban arterials using artificial neural network approach. **Transportation Research**. Part D 14: 32-41.
- Chaloulakou, A., Grivas, G., and Spyrellis, N. (2003). Neural Network and Multiple Regression Models for PM_{10} Prediction in Athens: A Comparative Assessment. **Air & Waste Management Association**. 53: 1183-1190.
- Chester, M. (2003). **Neural Networks: A Tutorial**. Prentice-Hall.
- Corani, G. (2005). Air Quality Prediction in Milan: Feed-forward Neural Networks. Pruned Neural Networks and Lazy Learning. **Ecological Modelling**. 185: 513-529.
- De Nevers, N. (2000). **Air Pollution Control Engineering**. 2nd ed. McGraw-Hill.
- Diaz-Robles, L.A., Ortega, J.C., Fu, J.S., Reed, G.D., Chow, J.C., Watson, J.G., Moncada-Herrera, J.A. (2008). A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile. **Atmospheric Environment**. 42: 8331-8340.

- Elkamel, A., Abdul-Wahab, S., Bouhamra, W., Alper, E. (2001). Measurement and prediction of ozone levels around a heavily industrialized area: a neural network approach. **Advances in Environmental Research**. 5: 47-59.
- Essington, M.E. (2004). **Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach**. CRC Press.
- French, M.N., Krajewski, W.F. and Cuykendall, R.R. (1992). Rainfall Forecasting in Space and Time Using a Neural Network. **Journal of Hydrology**. 137: 1-31.
- Fuller, G.A., Carslaw, D.C., and Lodge, H.W. (2002). An Empirical Approach for The Prediction of Daily Mean PM₁₀ Concentrations. **Atmospheric Environment**. 36: 1431-1441.
- Gabel, K. and Tillman, A. (2005). Simulating Operational Alternatives for Future Cement Production. **Journal of Cleaner Production**. 13: 1246-1257.
- Giannopoulos, D., Kolaitis, D.I., Togkalidou, A., Skevis, G., and Founti, M.A. (2007). Quantification of Emissions From The Co-incineration of Cutting Oil Emulsions in Cement Plants-Part I: NO_x, CO, and VOC. **Fuel**. 86: 1144-1152.
- Giannopoulos, D., Kolaitis, D.I., Togkalidou, A., Skevis, G., and Founti, M.A. (2007). Quantification of emissions from the co-incineration of cutting oil emulsions in cement plants – Part II: Trace species. **Fuel**. 86: 2491–2501
- Grivas, G. and Chaloulakou, A. (2006). Artificial Neural Network Models for Prediction of PM₁₀ Hourly Concentrations in Greater Area of Athens, Greece. **Atmospheric Environment**. 40: 1216-1229.
- Hooyberghs, J., Mensink, C., Dumont, G., Fierens, F., and Brasseur, O. (2005). A neural network forecast for daily average PM₁₀ concentrations in Belgium. **Atmospheric Environment**. 39: 3279-3289.
- Ionescu, A. and Candau, Y. (2007). Air pollutant emissions prediction by process modelling – Application In the iron and steel industry in the case of a re-heating furnace. **Environmental Modelling & Software**. 22: 1362-1371.
- Jiang, D., Zhang, Y., Hu, X., Zeng, Y., Tan, J., and Shao D. (2004). Progress in developing an ANN model for air pollution index forecast. **Atmospheric Environment**. 40: 7055-7064.
- Kukkonen, J., Partanen, L., Karppinen, A., Ruuskanen, J., Junninen, H., Kolehmainen, M., Niska, H., Dorling S., Chatterton, T., Foxall, R., Cawley, G. (2003). Extensive evaluation of

- neural network models for the prediction of NO₂ and PM₁₀ concentrations, compared with a deterministic modelling system and measurements. **Atmospheric Environment**. 37: 4539–4550.
- Kartalopoulos, S.V. (1996). **Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic: Basic concepts and Applications**. New York. IEEE Press.
- Li, S. and Shue, L. (2004), Data mining to aid policy making in air pollution management. **Expert Systems with Applications**. 27: 331-340.
- McBean, E. A. And Rovers, F. A. (1998). **Statistical procedures for analysis of environmental monitoring data and risk assessment**. Prentice-Hall. Inc.
- Niska, H., Rantamaki, M., Hiltunen, T., Karppinen, A., Kukkonen, J., Ruuskanen, J., Kolehmainen, M. (2005). Evaluation of an integrated modeling system containing a multi-layer perceptron model and the numerical weather prediction model HIRLAM for the forecasting of urban airborne pollutant concentrations. **Atmospheric Environment**. 39: 6524-6536.
- Noll, K. E. (1999). **Fundamentals of Air Quality Systems: Design of Air Pollution Control Devices**. American Academy of Environmental Engineers.
- Patterson, D.W. (1996). **Artificial Neural Networks: Theory and Applications**. PRENTICE HALL.
- Perez, P. and Reyse, J. (2006). An Integrated Neural Network Model for PM₁₀ Forecasting. **Atmospheric Environment**. 40: 2845-2851.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J. (1986). “**Learning**” representations by back propagation errors. *Nature* 323, 533-536.
- Slini, T., Kaprara, A., Karatzas, K., and Moussiopoulos, N. (2006). PM₁₀ Forecasting for Thessaloniki, Greece. **Environmental Modelling & Software**. 21: 559-565.
- Willmott, C.J. (1981). On the validation of models. **Physical Geography**. 2: 184-194.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, M.C. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geographical Research**. 90: 8995-9005.
- Zhang, G.P. (2003). Time series forecasting using a hybrid ARIMA and Neural network model. **Neurocomputing**. 50: 159-175.

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

ตารางที่ ก1 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 5

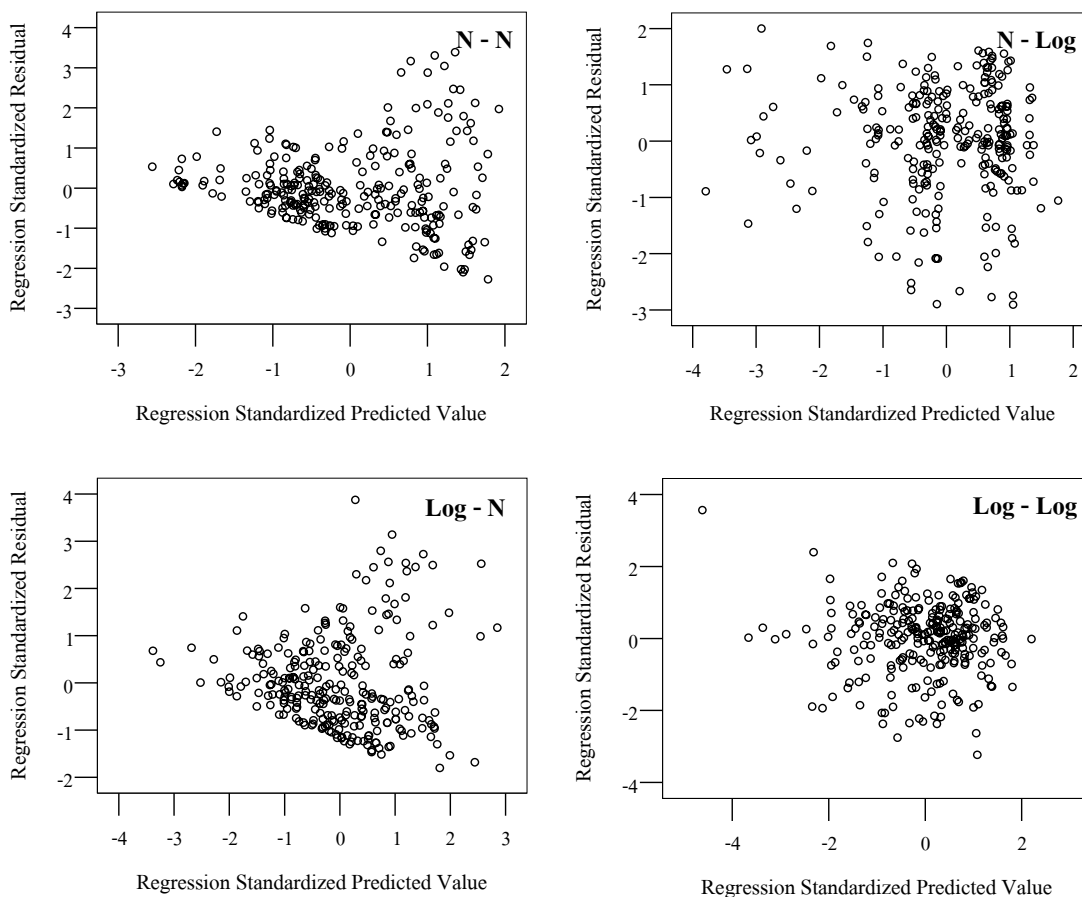
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
SO ₂	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.003	0.983	0.902	×	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.003	0.986	0.726	×	ไม่คงที่
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.000	0.987	0.984	×	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.005	1.000	1.182	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก1 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ SO₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5

ตารางที่ ก2 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 5

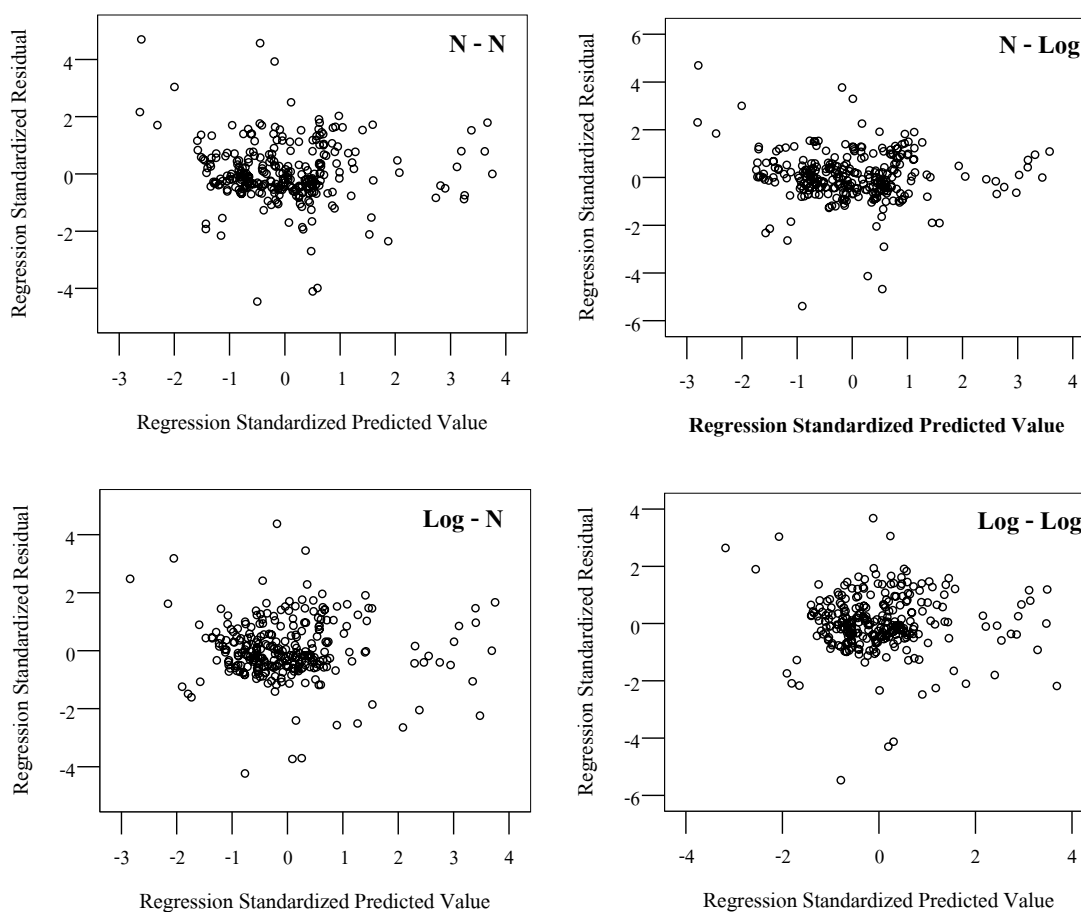
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวน ของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
CO ₂	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.039	1.070	1.219	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.032	1.023	1.380	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.036	1.054	1.313	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.030	1.017	1.439	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก2 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐาน
ของ CO₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5

ตารางที่ ก3 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 5

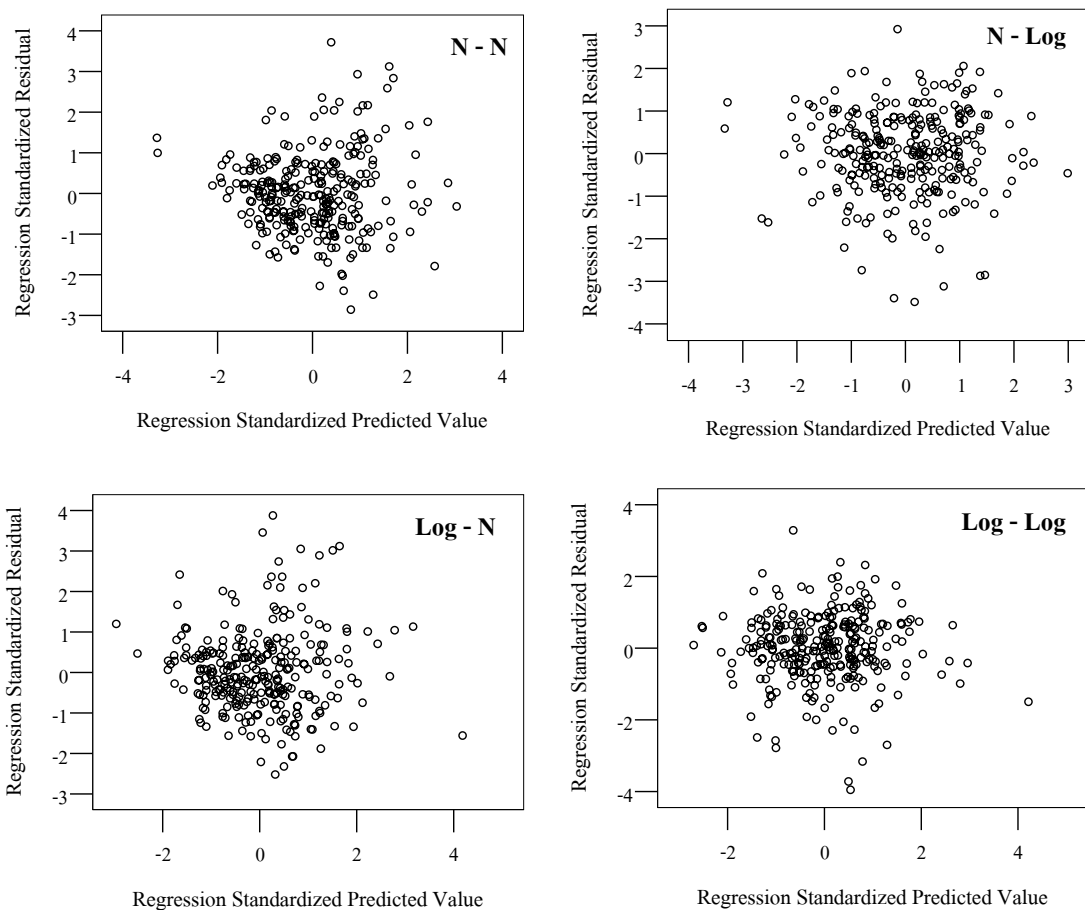
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
HCl	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.007	0.985	1.239	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.005	1.007	1.238	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.007	0.984	1.128	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.004	0.985	1.142	✓	ไม่คงที่

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก3 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ HCl สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5

ตารางที่ ก4 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 5

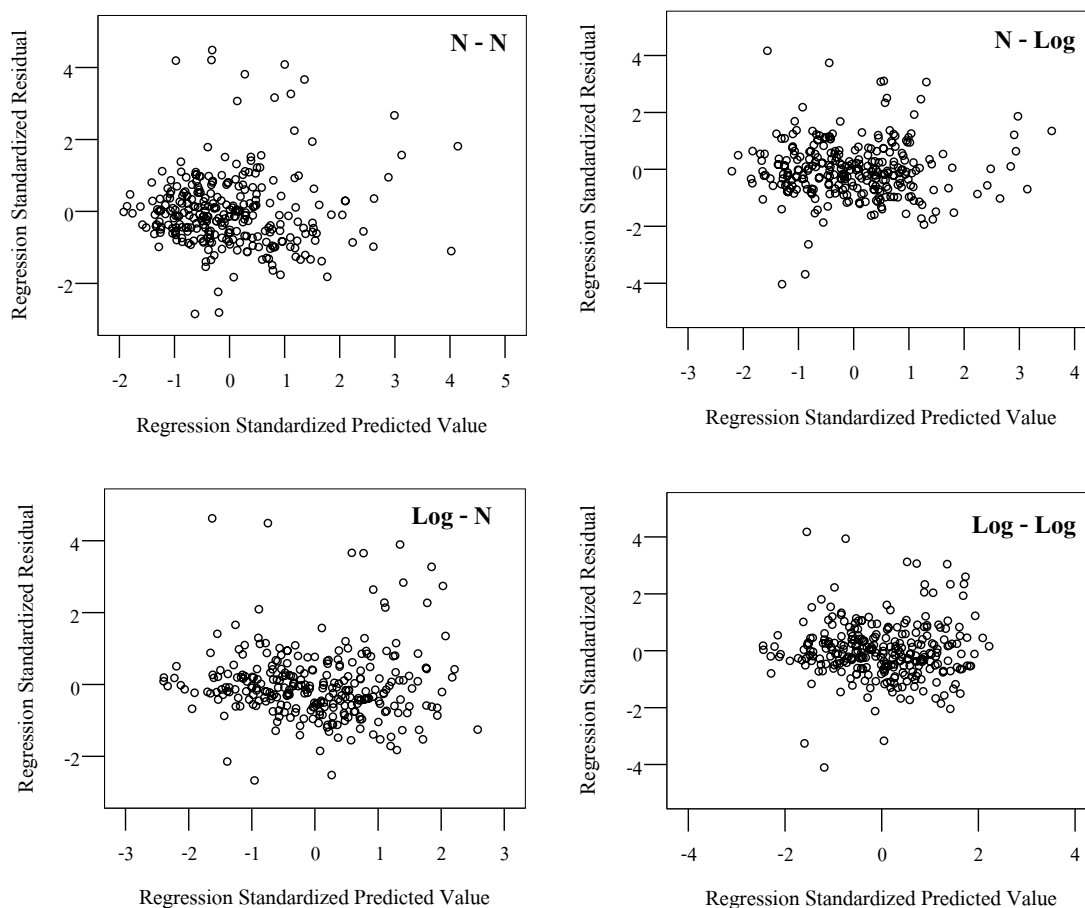
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
TSP	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.017	1.045	1.305	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.014	0.991	1.348	✓	ไม่คงที่
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.004	0.994	1.254	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.013	0.996	1.261	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก4 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ TSP สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 5

ตารางที่ ก5 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง NO₂ ของเตาหมายเลข 6

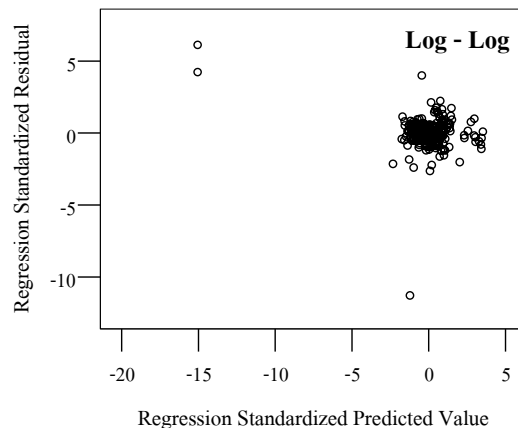
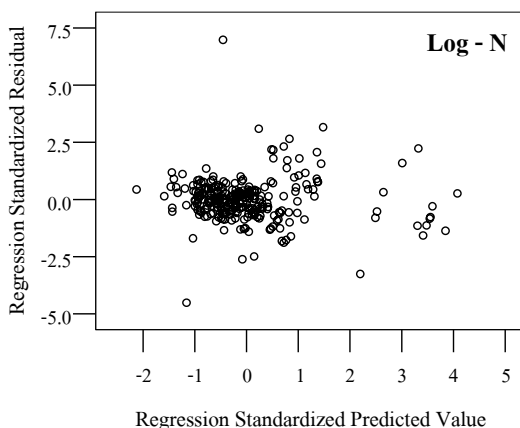
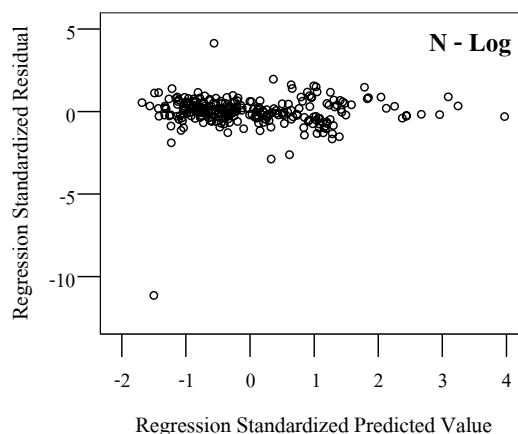
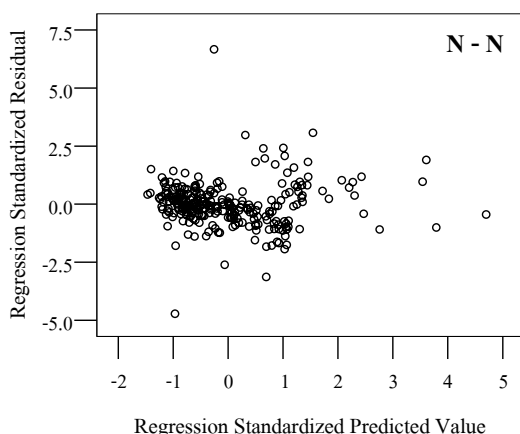
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
NO ₂	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.009	0.982	1.247	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.011	1.000	1.617	✓	ไม่คงที่
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.006	0.985	1.293	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.020	1.104	1.265	✓	ไม่คงที่

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก5 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ NO₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง SO₂ ของเตาหมายเลข 6

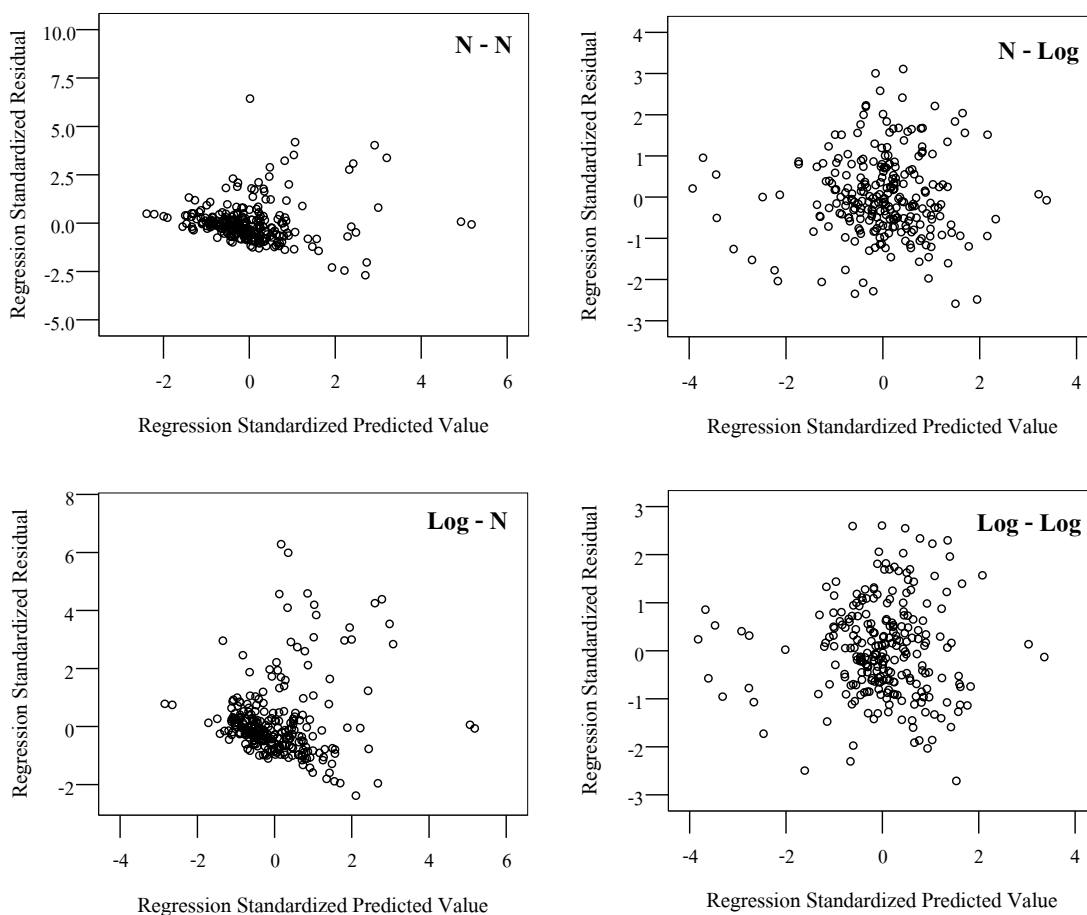
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
SO ₂	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.023	1.062	0959	×	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.150	1.282	0.814	×	ไม่คงที่
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.016	0.995	1.050	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.013	0.982	1.233	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ 6 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ SO₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6

ตารางที่ ก7 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง CO₂ ของเตาหมายเลข 6

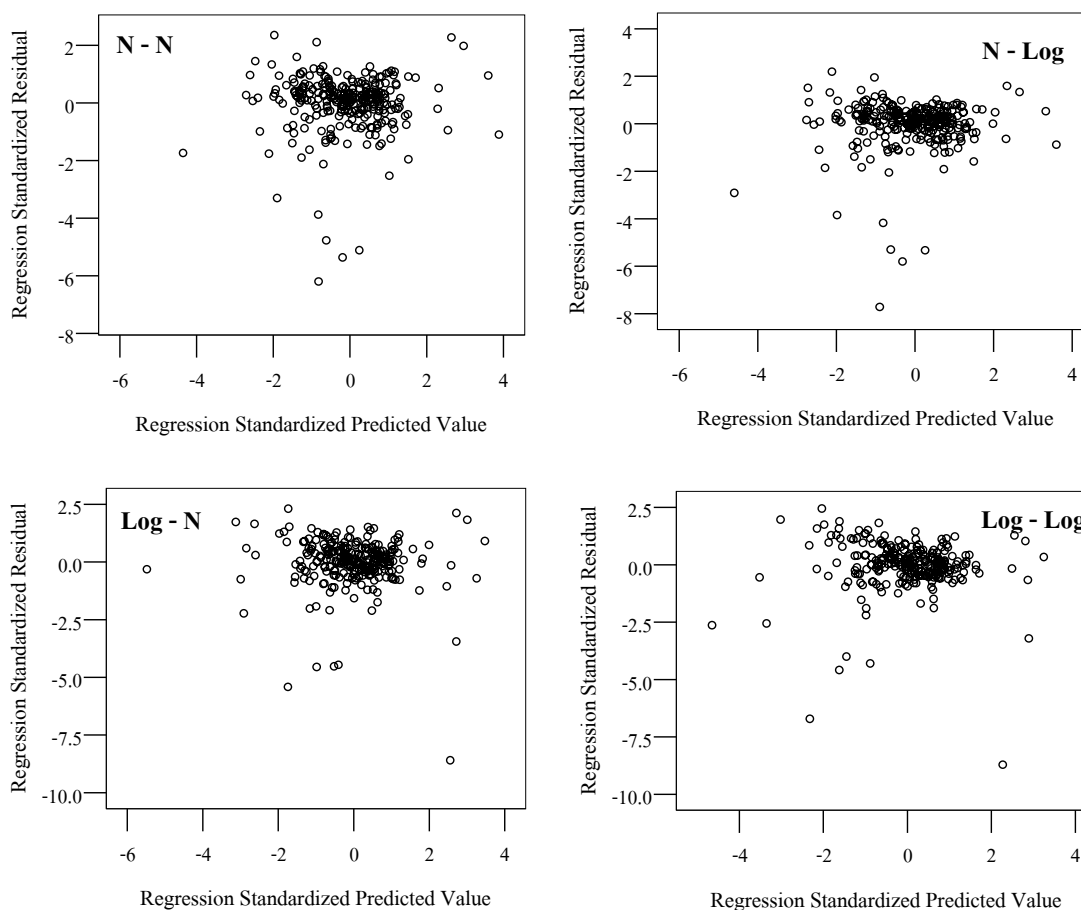
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวน ของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
CO ₂	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.027	1.023	1.243	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.027	1.012	1.425	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.032	1.041	1.267	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.031	1.121	1.449	✓	ไม่คงที่

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก7 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐาน
ของ CO₂ สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6

ตารางที่ ก8 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง HCl ของเตาหมายเลข 6

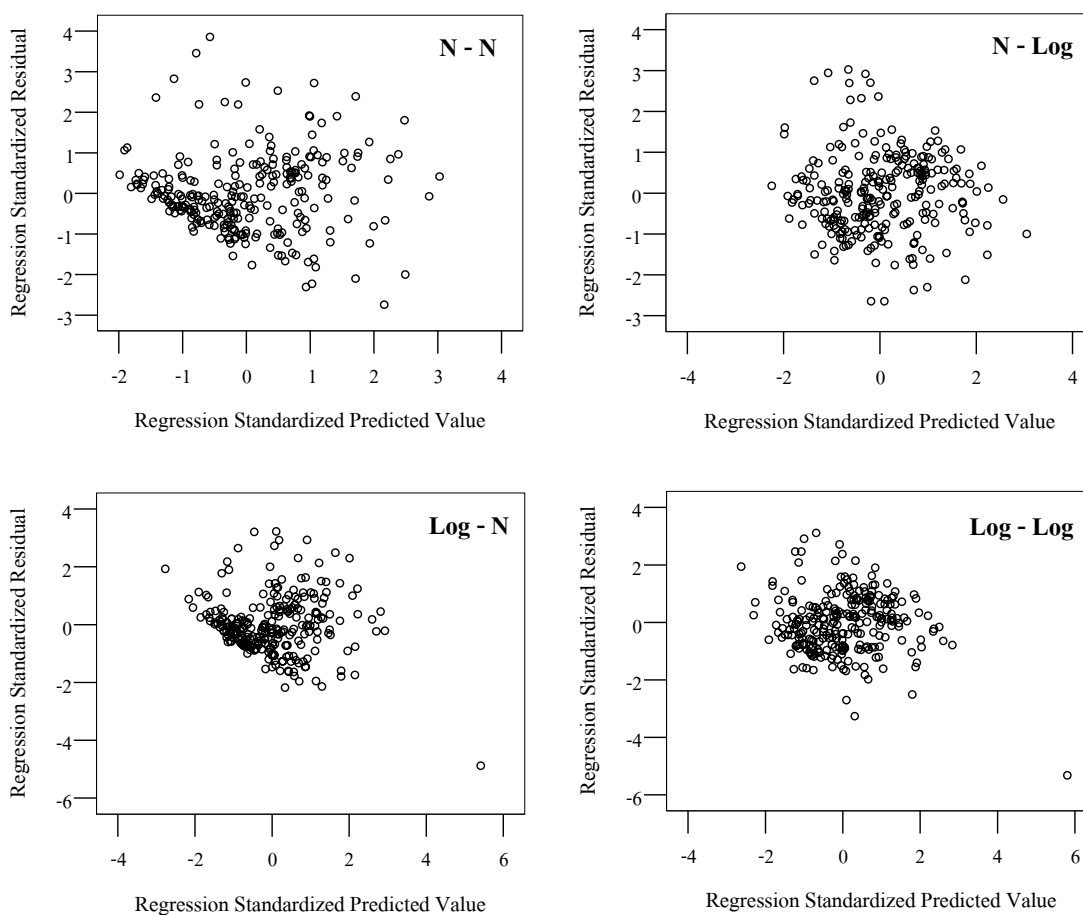
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
HCl	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.006	0.981	0.915	×	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.027	1.024	1.134	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.009	0.979	1.039	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	-0.013	1.020	1.213	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก8 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ HCl สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6

ตารางที่ ก9 ผลการทดสอบค่าคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง TSP ของเตาหมายเลข 6

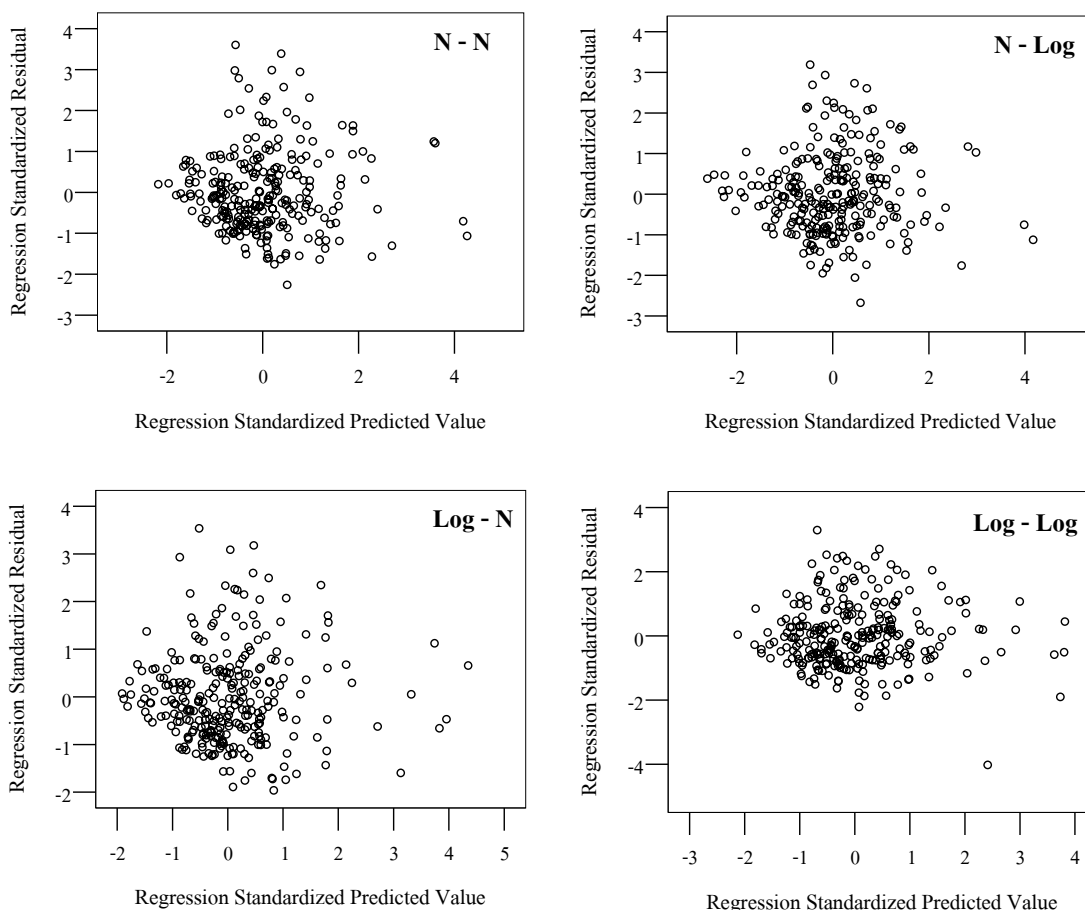
มลพิษ	กรณี	St. Residual ¹		Durbin-Watson ²		ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ³
		Mean	S.D			
TSP	ตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	0.015	1.002	1.320	✓	ไม่คงที่
	Log ของตัวแปรอิสระ กับตัวแปรตาม	-0.017	0.986	1.299	✓	ไม่คงที่
	ตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.013	0.994	1.255	✓	แปรปรวนเล็กน้อย
	Log ของตัวแปรอิสระ กับ Log ของตัวแปรตาม	0.015	1.019	1.320	✓	แปรปรวนเล็กน้อย

หมายเหตุ : ¹ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) โดยสมการถดถอยควรมีค่าเฉลี่ยของค่าคลาดเคลื่อน

มาตรฐานใกล้เคียง 0 มากที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคลาดเคลื่อนใกล้เคียง 1 มากที่สุด

²ค่า Durbin-Watson โดยค่าที่ใกล้กับ 2 นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 2.5 จะเป็นกรณีที่ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน

³ความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน ควรมีค่าคงที่ในทุก ๆ กรณี เมื่อเทียบกับค่าจากการประมาณตัวแปรตามในรูปแบบมาตรฐาน



รูปที่ ก9 แผนภาพการกระจายระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าประมาณ Y ในรูปแบบมาตรฐานของ TSP สำหรับสร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุของเตาหมายเลข 6

ภาคผนวก ข

ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณี

ตารางที่ ข1 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ SO₂ ของเตาหมายเลข 5

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	20-25-1	25	160.376
Log-Normal	14-22-1	22	175.581
Normal-Log	18-24-1	24	71.298
Log-Log	14-22-1	22	92.302

ตารางที่ ข2 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ CO₂ ของเตาหมายเลข 5

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	13-22-1	22	15.344
Log-Normal	11-21-1	21	16.985
Normal-Log	10-20-1	20	19.657
Log-Log	10-20-1	20	28.596

ตารางที่ ข3 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ HCl ของเตาหมายเลข 5

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	19-25-1	25	46.413
Log-Normal	15-23-1	23	59.822
Normal-Log	19-25-1	25	25.271
Log-Log	20-25-1	25	40.890

ตารางที่ ข4 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ TSP ของเตาหมายเลข 5

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	8-19-1	19	16.067
Log-Normal	6-18-1	18	18.230
Normal-Log	7-19-1	19	15.200
Log-Log	5-18-1	18	27.681

ตารางที่ ข5 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ NO₂ ของเตาหมายเลข 6

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	30-30-1	30	25.239
Log-Normal	32-31-1	31	27.111
Normal-Log	31-30-1	30	21.352
Log-Log	32-31-1	31	27.263

ตารางที่ ข6 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ SO₂ ของเตาหมายเลข 6

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	19-25-1	25	96.630
Log-Normal	19-25-1	25	92.634
Normal-Log	21-26-1	26	103.782
Log-Log	28-29-1	29	56.721

ตารางที่ ข7 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ CO₂ ของเตาหมายเลข 6

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	26-28-1	28	15.004
Log-Normal	28-29-1	29	13.580
Normal-Log	25-27-1	27	9.510
Log-Log	25-28-1	28	17.633

ตารางที่ ข8 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ HCl ของเตาหมายเลข 6

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	23-27-1	27	50.165
Log-Normal	25-28-1	28	49.284
Normal-Log	23-27-1	27	45.903
Log-Log	23-27-1	27	50.600

ตารางที่ ข9 ค่าเฉลี่ย MAPE ของโครงข่ายแต่ละกรณีสำหรับ TSP ของเตาหมายเลข 6

กรณี	โครงสร้าง	โหนดในชั้นซ่อน	ค่าเฉลี่ย MAPE
Normal-Normal	21-26-1	26	24.174
Log-Normal	26-28-1	28	20.858
Normal-Log	20-25-1	25	24.379
Log-Log	23-27-1	27	18.461

ภาคผนวก ค

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

แบบจำลองความถดถอยสำหรับการระบาย
NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP จากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์
Regression Models for NO₂, SO₂, CO₂, HCl and TSP
Emission from Cement Incineration Process

เจติยา ขวัญมา¹ และ สุดจิต กระจิ๊ด^{2*}

Jetya Khwunma¹ and Sudjit Karuchit^{2*}

¹นิสิตบัณฑิตศึกษา ; ²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

*โทรศัพท์ : 0-4422-4451, 0-4422-4450, โทรสาร : 0-4422-4606, E-mail : sudjit@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ความถดถอยและสร้างแบบจำลองสำหรับการระบายมลพิษอากาศจากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายวันของโรงงานในปี 2550 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลด้านวัตถุดิบ เชื้อเพลิงถ่านหิน เชื้อเพลิงกากอุตสาหกรรมอันตราย กระบวนการผลิต และการปล่อยมลพิษอากาศเป็นตัวแปรในแบบจำลอง การวิจัยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิต การรวบรวมข้อมูลและสร้างฐานข้อมูลของตัวแปรที่กำหนดขึ้น การสร้างแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ และการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการศึกษาได้แบบจำลองความถดถอยเชิงพหุที่มีความสามารถในการทำนาย ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) และฝุ่นรวม (TSP) ในระดับปานกลางถึงดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้ (Adjusted R²) อยู่ในช่วง 0.25-0.61 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอยู่ในช่วง 0.32-0.74 โดยแบบจำลอง NO₂ มีความสามารถในการทำนายและความถูกต้องสูงสุด

คำสำคัญ : มลพิษอากาศ; ปูนซีเมนต์; การเผา; การวิเคราะห์ความถดถอย; แบบจำลองเชิงสถิติ



Abstract

This paper presents the results of the regression analysis and model development for air pollutants emission from the cement incineration process of Siam City Cement Public Company Limited, Saraburi Province. It used the recorded daily average data of raw materials, coal fuels, hazardous waste fuels, production processes, and air pollutant emission in 2007 as variables in the models. The research started from studying the manufacturing processes, collecting the data and building the database of the variable, developing models using Multiple Regression analysis, and validating the models. The multiple regression models obtained have low to moderate prediction ability for NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl, and TSP, with the Adjusted R^2 values in the range of 0.25–0.61. The R values from the model validation are in the range of 0.32–0.74. The NO_2 model has the highest prediction ability and validity.

Keywords : air pollutant; cement; incineration; regression analysis; statistical model

บทนำ

การเผาไหม้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดทั้งฝุ่นรวมและมลพิษประเภทก๊าซ ซึ่งมลพิษประเภทก๊าซไม่ได้ถูกควบคุมโดยเครื่องควบคุมแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator, EP) โดยปัจจุบันทางโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ใช้เครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต เพื่อดักจับฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาก่อนปล่อยออกสู่อากาศ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลพิษมีความแปรปรวนไปตามลักษณะและองค์ประกอบของมลพิษที่เข้าสู่ระบบ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงในด้านวัตถุดิบ เชื้อเพลิงและกระบวนการผลิตอีกต่อหนึ่ง ในกรณีของโรงงานปูนซีเมนต์นครหลวง มีการใช้เชื้อเพลิงทางเลือกต่างๆ ที่มาจากของเสียอุตสาหกรรม อาทิ น้ำมันหล่อลื่น ตัวทำละลาย ขางรถยนต์ และสารละลายทางเคมี ความแตกต่างในแต่ละช่วงเวลาของวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และสถานะในกระบวนการผลิตดังกล่าวมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดของเครื่อง EP ต่ำกว่าที่ออกแบบได้ [1, 2] ดังนั้นการระบายมลพิษจึงน่าจะสัมพันธ์กับเชื้อเพลิงที่ใช้และวิธีการเผาไหม้ โดยเฉพาะปัจจุบันมีการนำกากอุตสาหกรรมประเภทอันตรายมากำจัดโดยใช้เป็น “เชื้อเพลิงทางเลือก” ในการเผาปูนซีเมนต์มากขึ้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องชี้ว่าการระบายก๊าซ NO_x , CO , และ VOCs ของโรงงานปูนซีเมนต์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทางเลือกประเภทน้ำมันหล่อลื่น มีค่าแปรเปลี่ยนตามลักษณะการฉีดเชื้อเพลิงและองค์ประกอบของในโตรเจนในเชื้อเพลิงที่ใช้ [3] และการศึกษาแบบจำลองวงจรชีวิตของกระบวนการผลิตซีเมนต์ได้ข้อสรุปว่า การจัดการที่เหมาะสมในส่วน of เชื้อเพลิงทางเลือกจากของเสียและการนำวัตถุดิบกลับมาใช้ใหม่อาจสามารถลดการระบายมลพิษอากาศลงได้ร้อยละ 30 ถึง 80 [4]

จากข้อมูลการศึกษาข้างต้นได้นำมาสู่งานวิจัยเพื่อเสริมประสิทธิภาพการจัดการการระบายมลพิษของการผลิตปูนซีเมนต์บนพื้นฐานหลักการเทคโนโลยีสะอาด กรณีศึกษาของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสถิติที่สามารถนำไปจัดอันดับองค์ประกอบวัตถุดิบและกระบวนการผลิตมาใช้ทำนายการระบายมลพิษอากาศจากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression, MR) ทั้งนี้ แบบจำลอง MR เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยเพื่อทำนายค่ามลพิษอากาศจากข้อมูลด้านแหล่งกำเนิดและด้านอุคณิยวิทยา [5, 6, 7]

แผนการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตและกำหนดตัวแปร (variable) ของกระบวนการ ซึ่งเน้นที่วัตถุดิบ เชื้อเพลิง และมลพิษที่เข้าหรือออกระบบ และสภาพกระบวนการผลิต โดยตัวแปรที่กำหนดมีดังนี้

1) ตัวแปรด้านวัตถุดิบ คือ วัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ หินปูน(Lime) และวัตถุดิบรอง ได้แก่ หินดินดานที่มีซิลิกา (Shales) หินดินดานที่มีลูมิ่น่า (ShaleA) หินลูกรัง (LB) ดินเหนียว (Clay) ดินกลางคง (KD) วัตถุดิบทดแทน (AR) และวัตถุดิบอื่นๆ (Other)

2) ตัวแปรด้านเชื้อเพลิง คือ ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพสูง (Coal_B) ถ่านหินบิทูมินัสคุณภาพต่ำ (Coal_C) ลิกไนต์ (Lig) และแอนทราไซต์ (Ant) เชื้อเพลิงทั้ง 4 เป็นเชื้อเพลิงหลัก และของเสียอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ 46 ประเภท เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ของเสียอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการเผาปูนซีเมนต์

1) ของเหลวที่เหลือจากระบวนการกลั่น (W_01)	24) กากตะกอนขจัดสีและวานิช (W_24)
2) น้ำหล่อเย็นเครื่องจักร (W_02)	25) ของแข็งที่เหลือจากการขจัดสีหรือวานิช (W_25)
3) น้ำจากกระบวนการล้าง,การผลิต,การบำบัด (W_03)	26) ดินกรอง/ลูดซับสีและสารประกอบอินทรีย์ในไขมัน,จารบี และน้ำมัน (W_26)
4) เชื้อเพลิงทดแทนเหลวสังเคราะห์ (W_04)	27) โละเอาไนด์ที่ใช้แล้ว (W_27)
5) ของเหลวที่เป็นตัวทำละลาย (W_05)	28) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้ว (W_28)
6) น้ำมันใช้แล้ว (W_06)	29) ถ่านคาร์บอนมีประจุที่ใช้แล้ว (W_29)
7) ของเหลวที่ไม่ใช่แล้วชนิดอื่น ๆ (W_07)	30) วัสดุที่ใช้ดูดซับเพื่อทำความสะอาดก๊าซ (W_30)
8) กากตะกอนปีโตรเลียมจากการผลิตและซ่อมบำรุง (W_08)	31) ถ่านคาร์บอนดำ (W_31)
9) กากตะกอนปีโตรเลียมก้นถัง (W_09)	32) เถ้าน้ำมัน (W_32)
10) กากตะกอนจากการขุดเจาะน้ำมัน (W_10)	33) ไอ-ออนเอ็กเชนเจอร์ชั้นที่ใช้แล้ว (W_33)
11) กากตะกอนจากการขุดเจาะน้ำ (W_11)	34) เชื้อเพลิงทดแทนแข็งสังเคราะห์ (W_34)
12) กากตะกอนไขมันน้ำมัน (W_12)	35) เชื้อเพลิงวัสดุเหลือจากการหมักขยะชุมชน (W_35)
13) กาวที่มีลักษณะหนืด, ของเสีย, ไม้ใช้ใช้งาน (W_13)	36) พอลิเมอร์และมอนอเมอร์)ผง,เม็ด((W_36)
14) ตะกอนจากการกรองแยกน้ำมันที่ใช้แล้ว (W_14)	37) วัสดุขึ้นรูปที่เป็นองค์ประกอบพลาสติก (W_37)
15) กากตะกอนปีโตรเลียมจากเครื่องแยกน้ำ /น้ำมัน (W_15)	38) กากของเสียอื่นๆ (W_38)
16) ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบเอออส (W_16)	39) วัสดุของแข็งมีค่าความร้อนจากโรงงานผลิตซีเมนต์ (W_39)
17) กากตะกอนอื่นๆ (W_17)	40) แผ่นโลหะบัด (W_40)
18) สลัดที่มีค่าความร้อนจากกระบวนการขึ้นรูปเหล็ก (W_18)	41) เชื้อเพลิงทดแทนบด (W_41)
19) กากจากผลิตผลทางการเกษตร (W_19)	42) เชื้อเพลิงทดแทนผสม (W_42)
20) แกลบ (W_20)	43) กากตะกอนผสม (W_43)
21) กากมันสำปะหลัง (W_21)	44) กระดาษ (W_44)
22) วัสดุที่เป็นองค์ประกอบของไม้ (W_22)	45) พลาสติก (W_45)
23) ขี้เลื่อย และขี้กบ (W_23)	46) ผ้า ,เศษผ้า (W_46)



3) ตัวแปรด้านมลพิษ คือ ฝุ่นรวม (TSP) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl)

4) ตัวแปรด้านสภาพของกระบวนการผลิต คือ ความหยาบหรือความละเอียดของผงวัตถุดิบ วัสดุรูปของเปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุดิบเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 90 ไมครอนและ 200 ไมครอน (R_90, R_200) ความชื้นของวัตถุดิบ (Moist_RM) ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moist_F) อุณหภูมิในเตาเผา (T) กำลังหมุนของเตา (KT) ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาเผา แคลไซเนอริบี และแคลไซเนอริซี (HVA, HVB, HVC) ปริมาณของก๊าซออกซิเจนส่วนเกินที่อยู่ในเตาเผา (O2) ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาในเตาเผา (CaO) ชั่วโมงการทำงานของเตาเผา (KR) การเดินและไมเดินระบบของหม้อบดวัตถุดิบในรูปของชั่วโมงการทำงาน (RM) การเดินและไมเดินระบบของหม้อบดถ่านหินในรูปของชั่วโมงการทำงาน (CM) และปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน (CK)

2. รวบรวมข้อมูล และสร้างฐานข้อมูลของตัวแปรที่กำหนดขึ้น โดยใช้ข้อมูลย้อนหลังเฉลี่ยรายวันที่โรงงานมีบันทึกไว้ในปี 2550 ของโรงงาน 3 ซึ่งประกอบด้วยเตาหมายเลข 5 และเตาหมายเลข 6 ทั้งนี้ จากข้อมูลทั้งหมด 365 วัน ตุ่มแยกออกร้อยละ 90 ใช้สร้างแบบจำลอง และร้อยละ 10 ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ได้

3. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์สถิติ ในประเด็นต่างๆ คือ

1) วิเคราะห์สถิติพรรณนาของข้อมูลแต่ละตัวแปรเพื่อดูลักษณะการแจกแจง หรือค่าที่สูงหรือต่ำผิดปกติ

2) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพื่อสังเกตความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตัวแปร เพื่อสามารถวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดมลพิษสูงในบางช่วงเวลาได้

4. สร้างแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุที่ใช้ปัจจัยด้านองค์ประกอบวัตถุดิบ เชื้อเพลิง และกระบวนการผลิตเป็นตัวทำนายการระบายมลพิษอากาศจากเตาเผาซีเมนต์ ซึ่งแบบจำลองความถดถอยเชิงพหุพัฒนาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม โดยมีขั้นตอนหลัก ได้แก่ การคัดเลือกตัวแปรเข้าสมการเพื่อสร้างแบบจำลอง การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน และการตรวจสอบความถูกต้อง

การสร้างแบบจำลองใช้ข้อมูลตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กันอย่างน้อยมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กับมลพิษอากาศที่จะทำนาย โดยทำการศึกษาแยกเป็น 4 กรณี คือ กรณีตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามปกติ กรณีแปลงค่าของตัวแปรอิสระในรูปลอการิทึมธรรมชาติกับตัวแปรตาม, กรณีตัวแปรอิสระกับลอการิทึมธรรมชาติของตัวแปรตาม และกรณีลอการิทึมธรรมชาติของทั้งตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม จากตัวแปรอิสระตั้งต้นทั้งหมดจำนวน 73 ตัว ทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุด้วยโปรแกรม SPSS และคัดเลือกตัวแปรอิสระด้วยวิธี Stepwise เมื่อได้แบบจำลองในกรณีต่างๆ แล้วจึงทำการคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมโดยการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อน (Residual Analysis) โดยพิจารณาจากค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standardized Residuals) ทดสอบความเป็นอิสระของค่าคลาดเคลื่อน โดยใช้สถิติทดสอบ Durbin-Watson และทดสอบความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน โดยพิจารณาจากกราฟระหว่างค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าทำนายในรูปมาตรฐาน (Standardized Predicted values)

หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ผ่านการคัดเลือกทั้ง 5 มลพิษ ด้วยข้อมูลตัวแปรอิสระและตัวแปรตามชุดใหม่ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับชุดที่ใช้สร้างแบบจำลอง โดยแทนค่าตัวแปรอิสระชุดใหม่ในแบบจำลองที่ได้เพื่อหาค่าทำนาย จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตามจากข้อมูลจริงกับค่าจากการทำนาย โดยหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 มาก แสดงถึงความถูกต้องแม่นยำสูง

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ตัวแปรที่เป็นตัวบ่งชี้ระดับความเข้มข้นของมลพิษที่ปล่อยออกทางปล่องได้ดี หรือมีศักยภาพที่สำคัญ ซึ่งสรุปได้จากผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างความเข้มข้นของมลพิษกับตัวแปร มีดังต่อไปนี้

- NO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณดินเหนียว หินปูน และเชื้อเพลิงทดแทน ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุค้ำเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน และดินกลางดง ในทิศทางตรงข้ามกัน

- SO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน หินปูน ลิกไนต์ ดินเหนียวและถ่านหินที่มีคุณภาพสูง ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับความชื้นของผงวัตถุค้ำ ค่าความร้อน และถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ ในทิศทางตรงข้ามกัน

- CO_2 มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน หินปูน ชั่วโมงการทำงานของหม้อบดถ่านหิน ชั่วโมงการทำงานของเขา และอุณหภูมิในเตาเผา ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุค้ำในทิศทางตรงข้ามกัน

- HCl มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน และดินเหนียว ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุค้ำ และเปอร์เซ็นต์ค้ำของผงวัตถุค้ำเมื่อร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 ไมครอน ในทิศทางตรงข้ามกัน

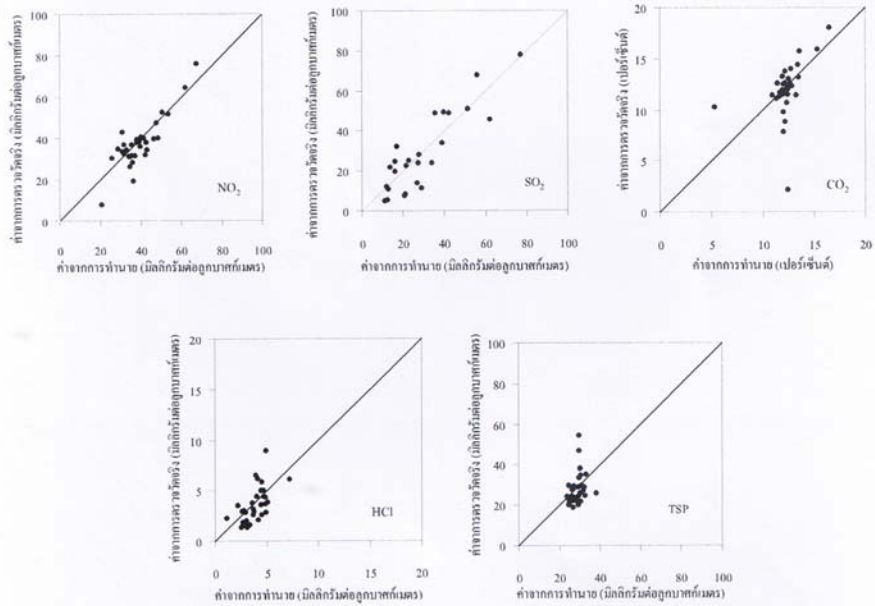
- TSP มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเชื้อเพลิงทดแทน วัตถุค้ำทดแทน ความชื้นของผงวัตถุค้ำ และหินดินดานที่มีซิลิกา ในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุค้ำ ดินเหนียว และหินดินดานที่มีอุณหภูมิในทิศทางตรงข้ามกัน

ตารางที่ 2 และ 3 แสดงผลการสร้างแบบจำลองของเตาหมายเลข 5 และ 6 ตามลำดับ โดยสรุปพบว่าตัวแปรอิสระที่สำคัญในแบบจำลอง ได้แก่ ปริมาณดินเหนียว ปริมาณหินปูน ชั่วโมงการทำงานของหม้อบดวัตถุค้ำ เชื้อเพลิงทดแทน ชั่วโมงการทำงานของเขา และปริมาณปูนเม็ดที่ผลิตได้ในแต่ละวัน โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจปรับแก้ (Adjusted R^2) ของแบบจำลอง NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP เฉลี่ยของทั้งสองเตา เท่ากับ 0.588, 0.397, 0.527, 0.478 และ 0.316 ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายความแปรปรวนของมลพิษโดยรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 32 ถึง 59 โดยแบบจำลองสำหรับ NO_2 สามารถอธิบายได้มากที่สุด ส่วนแบบจำลองสำหรับ TSP สามารถอธิบายได้น้อยที่สุด ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าการใช้เครื่องควบคุมมลพิษอากาศแบบไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูง ทำให้ระดับฝุ่นที่ระบายนอกทางปล่องมีสหสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระด้านวัตถุค้ำและกระบวนการผลิตน้อยกว่ามลพิษประเภทแก๊ส

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยค่า R ของค่าตัวแปรตามจากข้อมูลจริงกับค่าจากการทำนาย พบว่าช่วงค่า R ของแบบจำลอง NO_2 , SO_2 , CO_2 , HCl และ TSP เฉลี่ยของทั้งสองเตา เท่ากับ 0.659, 0.546, 0.635, 0.655 และ 0.314 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการทำนายและค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ของแบบจำลองของเตาหมายเลข 5 และ 6 ได้ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยแบบจำลองสำหรับ NO_2 มีความถูกต้องสูงที่สุด ส่วนแบบจำลองสำหรับ TSP มีความถูกต้องต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการทำนายของมลพิษทั้งสองประเภท

ตารางที่ 2 แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับมลพิษจากเตาเผาหมายเลข 5

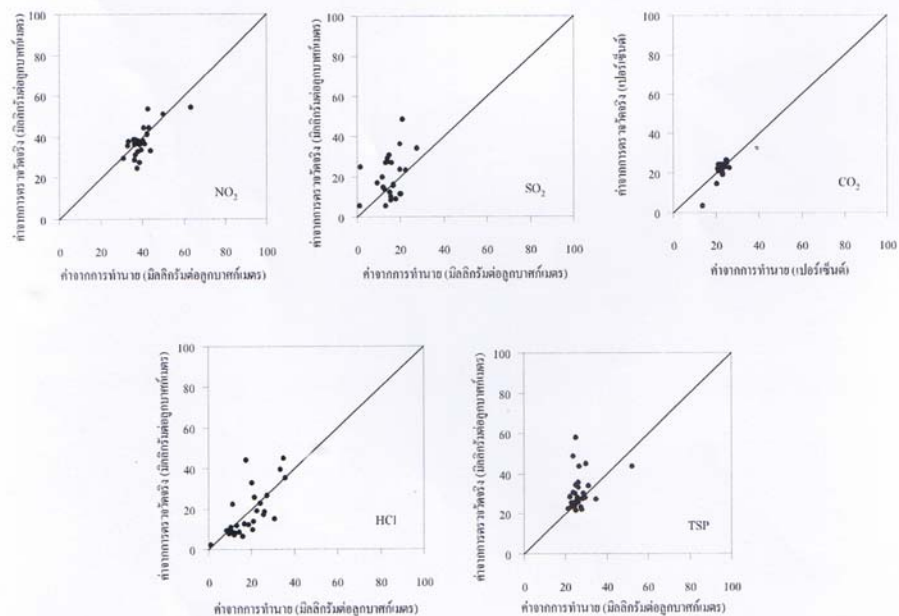
ตัวแปรตาม	สมการ	จำนวนข้อมูล	Regression		ตรวจสอบความถูกต้อง
			Adj. R ²	RMSE	R
NO ₂	$NO_2 = -37.487 + 0.019Clay + 1.551W_{46} - 0.208RM + 0.002Lime + 0.983W_{23} - 0.006ShaleA + 0.050T + 16.728Moist_{RM} - 0.970KR + 39.506R_{200} - 3.110R_{90}$	289	0.570	7.045	0.630
SO ₂	$Log_{SO_2} = -40.925 - 0.331Log_{Ant} - 0.103Log_{Coal_C} + 18.249Log_{R_{200}} - 1.720Log_{ShaleS} + 12.931Log_{Lime} - 6.410Log_{CK} - 1.153Log_{Coal_B} - 0.314Log_{LB} - 2.030Log_{Other} - 0.090Log_{W_{03}} + 0.351Log_{W_{38}} - 0.440Log_{Clay}$	270	0.387	1.164	0.744
CO ₂	$CO_2 = 3.647 + 1.257Log_{W_{38}} - 1.338Log_{RM} + 6.476Log_{KR} - 0.950Log_{Clay} + 1.314Log_{W_{23}} - 0.906Log_{AR} + 0.252Log_{LB} + 0.145Log_{W_{03}} - 0.101Log_{Coal_C} + 1.297Log_{Moist_F}$	283	0.520	3.034	0.440
HCl	$HCl = -24.220 - 2.176Log_{RM} + 0.953Log_{W_{38}} + 0.165Log_{W_{42}} + 3.248Log_{O2} - 1.674Log_{ShaleS} + 5.298Log_{Lime} - 0.306Log_{LB} - 1.371Log_{Other} + 0.464Log_{W_{34}}$	289	0.397	1.394	0.600
TSP	$Log_{TSP} = 2.990 - 0.000183Clay + 0.002LB + 0.003KT + 0.029Moist_F + 0.018W_{39} - 0.002RM - 0.000227ShaleA + 0.001Other$	286	0.249	1.164	0.342



รูปที่ 1 กราฟระหว่างค่าจากการทำนายและค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ของเตาหมายเลข 5

ตารางที่ 3 แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับมลพิษจากเตาเผาหมายเลข 6

ตัวแปรตาม	สมการ	จำนวนข้อมูล	Regression		ตรวจสอบความถูกต้อง
			Adj. R ²	RMSE	R
NO ₂	$NO_2 = -124.854 - 4.291 \text{Log_KD} + 0.690 \text{Log_W_35} - 4.468 \text{Log_RM} + 31.057 \text{Log_Lime} - 6.569 \text{Log_Other} - 0.613 \text{Log_Coal_C} - 0.772 \text{Log_W_03} - 9.235 \text{Log_KT} - 7.862 \text{Log_Moist_F}$	259	0.606	6.246	0.687
SO ₂	$\text{Log_SO}_2 = 17.155 + 0.280 \text{Log_KD} + 0.314 \text{Log_W_36} + 2.088 \text{Log_Moist_RM} + 0.569 \text{Log_W_10} - 0.055 \text{Log_Coal_C} - 3.829 \text{Log_HVA} + 0.053 \text{Log_W_40} + 0.821 \text{Log_O2} - 1.706 \text{Log_T} - 0.101 \text{Log_Ant} + 3.140 \text{Log_HVC}$	248	0.406	1.758	0.348
CO ₂	$CO_2 = 89.486 + 3.994 \text{Log_CK} - 2.540 \text{Log_RM} + 1.352 \text{Log_W_44} - 3.820 \text{Log_KT} - 0.337 \text{Log_W_29} + 1.303 \text{Log_ShaleA} + 2.959 \text{Log_ShaleS} - 13.346 \text{Log_HVA} + 0.260 \text{Log_W_35} + 1.644 \text{Log_Other} - 0.355 \text{Log_KD} + 0.810 \text{Log_CM} - 2.268 \text{Log_CaO}$	264	0.533	5.918	0.830
HCl	$\text{Log_HCl} = 17.948 - 0.770 \text{Log_RM} + 3.517 \text{Log_KR} - 0.123 \text{Log_KD} - 1.127 \text{Log_KT} - 0.594 \text{Log_ShaleS} + 0.497 \text{Log_W_06} + 0.049 \text{Log_W_03} - 3.222 \text{Log_HVA} + 0.115 \text{Log_W_36} + 4.580 \text{Log_R_90} + 0.257 \text{Log_AR} - 1.444 \text{Log_Moist_RM}$	263	0.559	1.478	0.709
TSP	$\text{Log_TSP} = 4.556 - 0.001 \text{T} + 0.002 \text{W_35} - 0.000175 \text{Clay} - 0.003 \text{RM} + 0.026 \text{W_41} - 0.006 \text{W_36} - 0.013 \text{W_44} + 0.000281 \text{Coal_C} - 0.002 \text{W_07}$	265	0.383	1.171	0.286



รูปที่ 2 กราฟระหว่างค่าจากการทำนายและค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง ของเตาเผาหมายเลข 6



สรุป

แบบจำลองความถดถอยที่นำข้อมูลค่าเฉลี่ยรายวันของวัดฤดูใบเชือกเพลิง และสภาพของกระบวนการผลิตมาใช้ทำนายการระบายมลพิษอากาศจากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ มีความสามารถในการทำนายการระบาย NO_x , SO_2 , CO_2 , HCL และ TSP ในระดับปานกลางถึงต่ำ โดยแบบจำลองที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของมลพิษได้มากที่สุดและมีความถูกต้องสูงสุดคือแบบจำลองสำหรับ NO_2 ส่วนแบบจำลอง TSP มีคุณสมบัติทั้งสองประการต่ำที่สุด แบบจำลองและผลการศึกษานี้สามารถนำไปประโยชน์ได้ในหลายแนวทาง อาทิ การเลือกสภาวะการผลิตหรือสัดส่วนการใช้วัตถุดิบที่สามารถลดการปล่อยมลพิษ และการทำนายมลพิษที่จะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) ปี 2550

เอกสารอ้างอิง

- [1] Noll, K. E. 1999. **Fundamentals of Air Quality Systems: Design of Air Pollution Control Devices**. American Academy of Environmental Engineers.
- [2] นพภาพร พานิช แสงสันต์ พาณิช วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และคณะ. 2547. **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] Giannopoulos D., Kolaitis D.I., Togkalidou A., et al. 2007. **Quantification of Emissions From The Co-incineration of Cutting Oil Emulsions in Cement Plants-Part I: NO_x , CO, and VOC**. Fuel. Vol. 86, pp.1144-1152.
- [4] Gabel K. and Tillman A. 2005. **Simulating Operational Alternatives for Future Cement Production**. Journal of Cleaner Production. Vol.13, pp.1246-1257.
- [5] Fuller G.A., Carslaw D.C. and Lodge H.W. 2002. **An Empirical Approach for The Prediction of Daily Mean PM_{10} Concentrations**. Atmospheric Environment. Vol.36, pp.1431-1441.
- [6] Slini T., Kaprara A., Karatzas K., et al 2006. **PM_{10} Forecasting for Thessaloniki**. Greece. Environmental Modelling & Software. Vol.21, pp.559-565.
- [7] Corani G. 2005. **Air Quality Prediction in Milan: Feed-forward Neural Networks, Pruned Neural Networks and Lazy Learning**. Ecological Modelling. Vol.185, pp.513-529.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเจติยา ขวัญมา เกิดเมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2524 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนพิมายวิทยา จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2547 หลังจากสำเร็จระดับปริญญาตรี ได้เข้าทำงานที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในตำแหน่ง ผู้ช่วยสอนและวิจัย ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จนถึงปี 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นในระดับบัณฑิตศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้รับทุนในการทำวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 8 ปี 2552 เรื่อง “แบบจำลองความถดถอยสำหรับการระบาย NO₂, SO₂, CO₂, HCl และ TSP จากกระบวนการเผาปูนซีเมนต์”