

การจำแนกและการกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์
ของเหมืองแม่เมาะด้วยการวิเคราะห์หลายตัวแปร

ธันวา เจริญศิริ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถิติ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
มิถุนายน 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา


คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ธันวา เจริญศิริ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

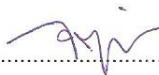
..........อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติการ สายชนู)


..........อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุภัทร เมฆพ่ายัพ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..........ประธาน
(ดร.กิตติมา พงกฤษณ)

..........กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติการ สายชนู)

..........กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุภัทร เมฆพ่ายัพ)

..........กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพรัตน์ วงษ์นาม)

คณะวิทยาศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถิติ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..........คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ ศรีสุข)

วันที่ 15 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2559

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.กิตติการ สายธนู อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผศ.ดร.จตุภัทร เมฆพ่าย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และ รศ.ดร.ไพรัตน์ วงษ์นาม กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้องตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งอย่างยิ่ง จึงขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.กิตติมา พุกกุญจน ประธานสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไข และวิจารณ์ผลงาน ทำให้งานวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณผู้ช่วยผู้ว่าการผลิตไฟฟ้า 2 และนายเฉลิมพล ดวงแข หัวหน้าแผนกเคมีการผลิตกองการผลิต 1 โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ซึ่งใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ จึงทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ส่วนหนึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จึงขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อสุวิษ คุณแม่สัว่ย่ง เจริญศิริ และพี่น้องทุกคนที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแก่เวทิตาแด่ บพการี บูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษา และประสบความสำเร็จมาจนตราบนานเท่านาน

ธันวาคม เจริญศิริ

57910024: สาขาวิชา: สถิติ; วท.ม. (สถิติ)

คำสำคัญ: ถ่านหินลิกไนต์/เหมืองแม่เมาะ/ การวิเคราะห์ปัจจัย/ การวิเคราะห์การจำแนก

ชื่อนา เจริญศิริ: การจำแนกและการกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะด้วยการวิเคราะห์หลายตัวแปร (CLASSIFICATION AND IDENTIFICATION OF LIGNITE QUALITY CHARACTERISTICS OF MAE MOH MINE WITH MULTIVARIATE ANALYSIS) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: กิตติการ สายชนู, Ph.D., จตุภัทร เมฆพ่าย, ปร.ด. 67 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557 โดยใช้ตัวแปรค่าความร้อนสูงเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหินออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน และกลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพดี จากนั้นทำการสร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ด้วยการวิเคราะห์การจำแนก ผลการวิจัยเมื่อใช้การวิเคราะห์ปัจจัยพบว่า สามารถรวมกลุ่มตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินได้ 6 ปัจจัย ได้แก่ ออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกั่ว ค่าความร้อน ความชื้น โพลีไซคลิกไฮโดรคาร์บอน โททาเนียมไดออกไซด์ และแมงกานีสไดออกไซด์ และเมื่อใช้การวิเคราะห์การจำแนกพบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์คือ ออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกั่ว ค่าความร้อน ความชื้น และโพลีไซคลิกไฮโดรคาร์บอน สำหรับการตรวจสอบสมการจำแนกในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ พบว่า เปอร์เซนต์ความถูกต้องในการจำแนกของเมตริกซ์ Confusion เมื่อใช้ชุดของข้อมูลในการสร้างตัวแบบและชุดของข้อมูลในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบมีค่าเท่ากับ 92.80 และ 85.35 ตามลำดับ

57910024: MAJOR: STATISTICS; M.Sc. (STATISTICS)

KEYWORDS: LIGNITE/MAE MOH MINE/FACTOR ANALYSIS/

DISCRIMINANT ANALYSIS

THANVA CHAROENSIRI: CLASSIFICATION AND IDENTIFICATION
OF LIGNITE QUALITY CHARACTERISTICS OF MAE MOH MINE WITH
MULTIVARIATE ANALYSIS. ADVISORY COMMITTEE: KIDAKAN
SAITHANU, Ph.D., JATUPAT MEKPARYUP, Ph.D. 67 P. 2016.

The purpose of this research was to classify and identify the lignite quality characteristics of Mae Moh Mine by collecting data of chemical lignite composition from Mae Moh power plant, Lampang since 2007 to 2014. The High Heating Value was utilized as the criterion to divide the quality groups of lignite into 2 groups, standard and desirable quality groups, and then built the discriminant equations to predict the quality groups of lignite with discriminant analysis. The results of research indicated that factor analysis was able to combine the correlated variables of chemical lignite composition with 6 factors, slag, heat, moisture, K_2O , TiO_2 and MnO_2 . Then, discriminant analysis was used. Four variables influenced to predict the group of lignite quality were slag, heat, moisture and K_2O . For corrective examination of the equation to predict the group of lignite quality, the correction percentage in classification of Confusion matrix were 92.80 and 85.35 in the training and validation data set, respectively.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	7
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	41
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4 ผลการวิจัย.....	44
ผลการศึกษาลักษณะทั่วไปของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำ ถ่านหิน.....	44
ผลการกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหิน.....	45
ผลการสร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์คุณภาพของถ่านหิน.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลการตรวจสอบความถูกต้องของสมการจำแนก.....	59
5 อภิปรายและสรุปผล.....	61
อภิปรายและสรุปผล.....	61
ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	64
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 ปริมาณสำรองถ่านหินของประเทศไทย.....	2
2-1 การจำแนกประเภทของถ่านหินด้วยวิธีการทดสอบวัสดุของสมาคมอเมริกัน.....	9
2-2 การจำแนกประเภทของถ่านหินตามมาตรฐานระบบระหว่างประเทศ.....	10
2-3 องค์ประกอบของถ่านหินซึ่งวิเคราะห์โดยใช้หลักเกณฑ์ออกไซด์ของถ่าน.....	11
2-4 การกำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ.....	18
2-5 ปริมาณก๊าซที่เครื่องควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถ รับได้.....	19
4-1 ค่าสถิติพรรณนาของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน.....	44
4-2 ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สันและค่า p-value ของการทดสอบสหสัมพันธ์ของ เพียร์สัน.....	48
4-3 ค่าเฉพาะ สัดส่วนความแปรผัน และสัดส่วนความแปรผันสะสมของแต่ละ ส่วนประกอบหลัก.....	50
4-4 ค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินในแต่ละ ปัจจัย เมื่อไม่มีการหมุนปัจจัย.....	52
4-5 ค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินในแต่ละ ปัจจัย เมื่อมีการหมุนปัจจัยด้วยวิธีเวรีแมกซ์.....	53
4-6 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มคุณภาพถ่านหิน.....	55
4-7 การทดสอบพหุสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ.....	55
4-8 ค่าเฉพาะของฟังก์ชันการจำแนกของฟิชเชอร์.....	52
4-9 สถิติวิลค์แลมปีดาในการทดสอบความมีนัยสำคัญของฟังก์ชันการจำแนก.....	58
4-10 สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันการจำแนกเคนนอนัลที่ทำให้เป็นค่ามาตรฐาน.....	59
4-11 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกของเมตริกซ์ Confusion.....	60

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1	กระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน..... 8
2-2	เครื่องการวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน..... 13
2-3	แหล่งถ่านหินที่สำคัญของประเทศไทย..... 14
2-4	ขั้นตอนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่ใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด..... 15
2-5	แอ่งของหินตะกอนยุคเทอร์เชียรี..... 17
2-6	เหมืองถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ..... 18
4-1	แผนภาพการกระจายระหว่างตัวแปรรายคู่ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน..... 47
4-2	กราฟ Scree plot สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก..... 51
4-3	ค่าระยะทางทั่วไปกำลังสอง..... 56

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ต้นกำเนิดพลังงานที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์เป็นระยะเวลาอันยาวนานมาแล้วตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันคือ เชื้อเพลิงจากธรรมชาติ เชื้อเพลิงจากธรรมชาติหมายถึง เชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จากการทับถมของซากพืช หรือซากสัตว์เป็นเวลานานนับหลายล้านปี เช่น หินน้ำมัน ถ่านหิน หรือก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น แต่เนื่องจากทรัพยากรซึ่งมีอยู่ตามธรรมชาติที่จะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานนั้นมีอยู่น้อยและจำกัด จึงจำเป็นต้องมีการค้นหาแหล่งพลังงานเพิ่มเติมอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เพียงพอต่อการนำมาผลิตไฟฟ้าในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ปัจจุบันปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นมากประกอบกับสามารถผลิตไฟฟ้าได้จากแหล่งพลังงานในหลายรูปแบบ เช่น ก๊าซธรรมชาติ พลังงานทดแทน พลังงานนิวเคลียร์ และถ่านหิน เป็นต้น

เนื่องจากพลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้าแต่ละรูปแบบมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป กล่าวคือ ก๊าซธรรมชาติเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้งานง่าย และสามารถผลิตได้เองในประเทศ ซึ่งก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ในปัจจุบันถึงร้อยละ 70 แต่แหล่งสำรองก๊าซธรรมชาติในประเทศไทยมีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งคาดการณ์ว่าสามารถสำรองใช้ได้ต่อไปอีกเพียงไม่กี่สิบปี (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, ฅัญฐณินชา ตระการจินดานนท์ และเปี่ยมศักดิ์เมณะเสวต, 2555) พลังงานทดแทนได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่ตามธรรมชาติจึงเป็นพลังงานสะอาด ปล่อยมลพิษค่อนข้างต่ำและใช้ได้อย่างยั่งยืน แต่ต้นทุนในการผลิตสูงและไม่มีเสถียรภาพในการผลิต พลังงานนิวเคลียร์เป็นพลังงานที่สามารถผลิตไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้ามหาศาล มีความมั่นคงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ใช้เชื้อเพลิงน้อย มีเสถียรภาพในการจัดหาเชื้อเพลิง ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรือนกระจก แต่มีข้อจำกัดคือ แหล่งพลังงานมีน้อยและต้องการเทคโนโลยีขั้นสูงในการพัฒนาโครงการเพื่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ จึงต้องใช้ระยะเวลานาน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการกำจัดกากของเสียกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

ถ่านหินเป็นพลังงานอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจผลิตไฟฟ้าเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่เป็นปริมาณมากสามารถใช้ได้อีกมากกว่า 200 ปี เป็นแหล่งพลังงานที่หาได้ง่าย และมีเสถียรภาพในด้านราคา จึงไม่เกิดปัญหาการขาดแคลนถ่านหินอีกทั้งยังสามารถเลือกคุณภาพถ่านหินได้ตามต้องการ และมีความปลอดภัยในการขนส่งและจัดเก็บง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดของการใช้ถ่านหินคือ ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่ปล่อยก๊าซในโตรเจน-

ไดออกไซด์และกำมะถันในปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น ๆ นอกจากนี้ถ่านหินยังเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากเป็นทรัพยากรที่หาได้เองตามธรรมชาติ ถ่านหินที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถ่านหินลิกไนต์ซึ่งปริมาณถ่านหินสำรองคงเหลือทั้งหมดในประเทศไทยมีประมาณ 1,249.89 ล้านตัน ในจำนวนนี้แบ่งเป็นปริมาณสำรองถ่านหินในแอ่งที่ยุติการผลิตแล้ว และแอ่งที่ยังคงมีการผลิตอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วเป็นปริมาณสำรองถ่านหินคงเหลือที่เหมืองแม่เมาะ 1,130.88 ล้านตัน (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) แสดงดังตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ปริมาณสำรองถ่านหินของประเทศไทย

ปริมาณสำรองถ่านหิน	พื้นที่		ปริมาณสำรอง (ล้านตัน)	
	ชื่อแอ่ง	อำเภอ/จังหวัด	ผลิตแล้ว	คงเหลือ
แอ่งที่ยังคงมีการผลิตอยู่ในปัจจุบัน	บ่อหลวง	อ.สอด จ.เชียงใหม่	1.39	n.a.
	แม่ทาน	อ.สบปราบ จ.ลำปาง	30.07	5.78
	แม่เมาะ	อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง	273.74	1,130.88
	แม่ตึบ	อ.งาว จ.ลำปาง	0.91	n.a.
	ลี้	อ.ลี้ จ.ลำพูน	39.24	n.a.
	เชียงม่วน	อ.เชียงม่วน จ.พะเยา	3.96	n.a.
	กระบี่	อ.เมืองจ.กระบี่	8.62	111.38
แอ่งที่ยุติการผลิตแล้ว	นาฮ้อง	อ.แม่แจ่ม จ.เชียงใหม่	2.48	n.a.
	แม่ตั้น	อ.แม่ระมาด จ.ตาก	0.30	0.90
	แม่ละเมา	อ.แม่สอด จ.ตาก	1.21	0.44
	หนองหญ้าปล้อง	อ.หนองหญ้าปล้อง จ.เพชรบุรี	1.20	0.51
	กันตัง	อ.กันตัง จ.ตรัง	0.01	n.a.
	นาด้วง	อ.นาด้วง จ.เลย	0.15	n.a.
	นากลาง	อ.นากลาง จ.หนองบัวลำพู	0.07	n.a.
รวม			1,249.89	

หมายเหตุ (not applicable: n.a. หมายถึง นำมาใช้ไม่ได้)

ถึงแม้ว่าการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าจะมีความสะอาดน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดมลภาวะ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology) มาใช้เพื่อกำจัดสารมลพิษที่ปล่อยออกมาในกระบวนการผลิตและการใช้ถ่านหินซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำเหมืองถ่านหินและจัดการถ่านหินก่อนนำมาใช้ รวมถึงการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากฝุ่นละอองและของเสียจากการเผาไหม้ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดมีหลายแบบ ได้แก่ เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดก่อนการเผาไหม้ (Pre-Combustion) เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดขณะการเผาไหม้ (Combustion) เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ (Post-Combustion) และเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดด้วยการแปรสภาพถ่านหิน (Coal conversion) ดังนั้นการสนับสนุนนโยบายเกี่ยวกับเทคโนโลยีเหล่านี้จึงเป็นการสร้างความมั่นคงในด้านพลังงาน และสร้างความมั่นใจและทัศนคติที่ดีเกี่ยวกับโรงไฟฟ้าถ่านหินให้กับประชาชนในชุมชน

ถ่านหินนอกจากจะถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานการผลิตไฟฟ้าแล้วยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นถ่านโค้กและถ่านอัดก้อนที่ให้ค่าความร้อนสูงซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กหรืออุตสาหกรรมเหล็กกล้า ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการสำรวจแหล่งถ่านหินเพิ่มเติมพร้อมทั้งทำการปรับปรุงคุณภาพถ่านหินให้ดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหินโดยศึกษาจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจะทำให้ทราบถึงประเภทของถ่านหินและคุณภาพของถ่านหิน จึงเป็นการนำถ่านหินไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปัญหาในด้านสุขภาพต่อประชาชนในชุมชนอีกด้วย

เนื่องจากการศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่เป็นจำนวนมาก ผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์การวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate analysis) ด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) เพื่อช่วยลดจำนวนตัวแปร โดยจะมีการรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเข้าไว้ให้เป็นปัจจัยเดียวกันซึ่งจะง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ต่อไปในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ด้วยการวิเคราะห์การจำแนก (Discriminant analysis) ดังนั้นตัวแบบในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ จึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้เป็นแนวทางในการกำหนดคุณภาพของถ่านหินจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและปัญหาในด้านสุขภาพของประชาชนในชุมชน นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทั่วไปขององค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ
2. กำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหินจากตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินด้วยการวิเคราะห์ปัจจัย
3. สร้างสมการจำแนกที่ใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินจากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหินด้วยการวิเคราะห์การจำแนก

สมมติฐานของการวิจัย

ตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินซึ่งคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะได้แก่

1. เถ้า (Ash)
2. ความชื้น (Moisture)
3. สารระเหย (Volatile matter)
4. ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)
5. ค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV)
6. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)
7. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)
8. อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)
9. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)
10. ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5)
11. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)
12. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)
13. ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
14. แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)
15. ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)
16. แคลเซียมออกไซด์อิสระจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (CaO free SO_3)

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ
2. ได้สมการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะซึ่งสามารถใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์ว่าถ่านหินลิกไนต์นั้นอยู่ในกลุ่มคุณภาพของถ่านหินแบบใด
3. นำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตไฟฟ้า อีกทั้งยังใช้ในการประกอบการพิจารณาเพื่อหาแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนจากเหมืองแม่เมาะ

ขอบเขตของการวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะเป็นข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน โดยเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณหรือค่าความเข้มข้นของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557 ได้แก่

1. เถ้า (Ash)
2. ความชื้น (Moisture)
3. สารระเหย (Volatile matter)
4. ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon)
5. ค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV)
6. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)
7. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)
8. อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)
9. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)
10. ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5)
11. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)
12. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)
13. ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)
14. แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)
15. ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)

16. แคลเซียมออกไซด์อิสระจากซัลเฟอไรต์รอกออกไซด์ (CaO free SO₃)

นิยามศัพท์เฉพาะ

กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ พิจารณาได้จากค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) ตามเกณฑ์มาตรฐานระบบระหว่างประเทศ และการกำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จึงแบ่งถ่านหินได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน (Standard quality group) เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 2,200-4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (KCal/Kg)
2. กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพดี (Desirable quality group) เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงมากกว่า 4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (KCal/Kg)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะซึ่งประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องอยู่เป็นจำนวนมาก จึงมีการประยุกต์การวิเคราะห์หลายตัวแปรเพื่อรวมตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งเป็นการกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหินเพื่อนำมาสร้างสมการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน โดยผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องครอบคลุมหัวข้อดังต่อไปนี้

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

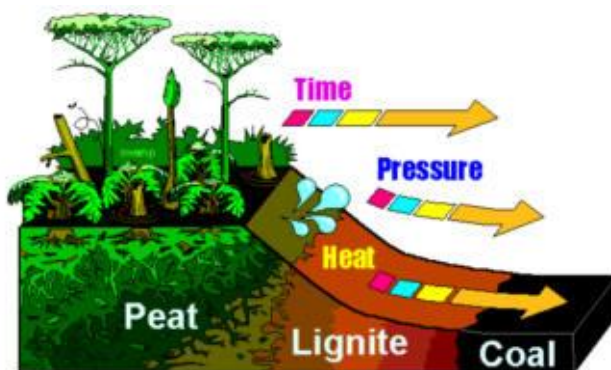
1. ถ่านหิน

1.1 กระบวนการเกิดถ่านหิน

โดยปกติแล้วซากพืชและซากสัตว์ที่ตายทับถมกันตามธรรมชาติจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาเคมี แต่ในบางครั้งการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติอาจทำให้กระบวนการย่อยสลายทางเคมีหยุดชะงักลง การมีซากพืชและซากสัตว์ที่ทับถมกันมากขึ้นประกอบกับอาจมีการทรุดตัวของแผ่นดินหรือระดับน้ำซึ่งการยุบตัวลงหรือยกตัวสูงขึ้นของแผ่นดินหรือระดับน้ำนั้นเป็นการปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะสมดุลของเปลือกโลก ต่อมาสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยในการเกิดขึ้นของพืชซึ่งมีวัฏจักรเริ่มตั้งแต่การเกิดขึ้นจนล้มตายลงแล้วเกิดการทับถมของซากพืชและซากสัตว์ติดต่อกันเป็นเวลานาน นอกจากนี้ยังมีการสะสมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก มีตะกอนดินทรายที่ถูกพัดพามากับน้ำทับถมซากพืชและซากสัตว์แล้วจมลงใต้ระดับน้ำอย่างช้า ๆ ภายในเวลาค่อนข้างสั้นประมาณ 5,000 ปี ซากพืชและซากสัตว์เหล่านี้จึงเปลี่ยนเป็นพีต (Peat) และเมื่อตะกอนที่ถูกปิดทับมีปริมาณมากขึ้น พีตจะถูกบีบอัดโดยน้ำหนักของตะกอนที่ทับกันอยู่ ประกอบกับอิทธิพลของความร้อนความดันที่เพิ่มขึ้นตามความลึกที่พีตจมตัวลงและช่วงเวลาของการเกิดถ่านหิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี พีตจึงแปรสภาพไปเป็นถ่านหินซึ่งอาจกล่าวได้ว่าพีตเป็นกระบวนการแรกของการเกิดถ่านหิน

กระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน (Coalification) เป็นลำดับขั้นตอนในการเกิดถ่านหิน โดยเริ่มจากพีตไปเป็นลิกไนต์ (Lignite) ซึ่งใช้ระยะเวลาหลายล้านปี จากนั้นจึงกลายเป็นซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) และบิทูมินัส (Bituminous) ซึ่งมักเกิดขึ้นที่ความลึกไม่เกิน 6 กิโลเมตรจากผิวโลกและอุณหภูมิของการเกิดความร้อนไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส หากความลึก

และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมากกว่านี้แล้วบิทูมินัสจะแปรสภาพไปเป็นแอนทราไซต์ (Anthracite) กระบวนการแปรสภาพจากพีตไปเป็นถ่านหินแสดงดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 กระบวนการแปรสภาพเป็นถ่านหิน (กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ, 2558)

1.2 ประเภทของถ่านหิน

เกณฑ์ในการจำแนกประเภทของถ่านหินนั้นมีความสัมพันธ์กันกับลำดับขั้นของกระบวนการเกิดถ่านหินซึ่งทำให้ถ่านหินแต่ละประเภทมีช่วงเวลาในการเกิดและคุณภาพที่แตกต่างกัน การกำหนดคุณสมบัติที่ใช้ในการจำแนกประเภทของถ่านหินนั้นพิจารณาได้จากปริมาณหรือค่าความเข้มข้นของค่าความร้อน (Calorific Value) ความชื้น (Moisture) เถ้า (Ash) สารระเหย (Volatile matter) และค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) ดังนี้

1. พีต เป็นถ่านหินที่เกิดขึ้นในกระบวนการแรกของการเกิดถ่านหิน พีตเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำที่สุด พีตประกอบด้วยซากพืชและซากสัตว์ซึ่งสลายตัวไปแล้วบางส่วน มีลักษณะเป็นสีน้ำมัน มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ มีปริมาณออกซิเจนและน้ำค่อนข้างสูงและใช้เป็นเชื้อเพลิงได้แต่ให้ค่าความร้อนต่ำและเมื่อเกิดการเผาไหม้ (Combustion) แล้วจะเกิดควันมาก จึงมักใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับครัวเรือนในบางประเทศ

2. ลิกไนต์ เป็นถ่านหินที่มีวิวัฒนาการมาจากพีต ลิกไนต์จึงยังคงมีซากพืชและซากสัตว์หลงเหลืออยู่เล็กน้อย และอาจมีร่องรอยของเนื้อไม้อยู่บ้าง ลิกไนต์จึงจัดเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพต่ำ มีปริมาณออกซิเจนและความชื้นค่อนข้างสูง ให้ค่าความร้อนต่ำ แต่ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่าพีต เก็บไว้ไม่ได้นาน และสามารถเกิดการเผาไหม้และติดไฟได้เอง (Self-Ignition) จึงนิยมใช้ในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม

3. ซับบิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีลักษณะสีดำคล้ายขี้ผึ้ง ให้ค่าความร้อนสูงกว่าลิกไนต์ สามารถที่จะแปรรูปไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซได้และเกิดการเผาไหม้ติดไฟได้เองจึงนิยมใช้ในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมเช่นเดียวกับลิกไนต์

4. บิทูมินัส เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพสูง จึงใช้เวลาในการแปรสภาพค่อนข้างนาน เนื้อแน่นแข็งและมีสีดำสนิท เป็นมันวาว ไม่มีร่องรอยของเนื้อไม้ มีเถ้าดำ เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว มีควันน้อย แต่ให้ค่าความร้อนสูง จึงเหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นถ่านโค้กและใช้ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก

5. แอนทราไซต์ เป็นถ่านหินที่มีสีดำ เป็นมันวาว มีความแข็งมาก มีรอยแตกเว้าแบบก้นหอย มีค่าคาร์บอนคงที่สูง ความชื้นต่ำ เกิดการเผาไหม้ติดไฟได้ยาก แต่ให้ค่าความร้อนสูงสุด ให้ระยะเวลาในการเผาไหม้นาน และเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วมีควันน้อยมาก จึงเป็นถ่านหินที่มีคุณภาพดีที่สุดในโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรม

การจำแนกประเภทของถ่านหินตามลักษณะดังกล่าวข้างต้นนั้นพิจารณาได้จากชั้นของถ่านหิน ด้วยวิธีการทดสอบวัสดุของสมาคมอเมริกัน (American Society for Testing and Materials: ASTM) ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับในระดับสากลโดยเป็นการพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ขีดจำกัดของค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon Limits: %) เปอร์เซ็นต์ของสารระเหย (Volatile matter: %) และค่าบีทียูต่อปอนด์ของขีดจำกัดของค่าความร้อน (Calorific Value Limits: Btu/Ib) (ASTM International, 2015) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การจำแนกประเภทของถ่านหินด้วยวิธีการทดสอบวัสดุของสมาคมอเมริกัน

ประเภทของถ่านหิน	ขีดจำกัดของค่าคาร์บอนคงที่ (%)	สารระเหย (%)	ขีดจำกัดของค่าความร้อน(Btu/Ib)
แอนทราไซต์	86-98	2-14	-
บิทูมินัส	69-86	22-31	10,500-14,000
ซับบิทูมินัส	น้อยกว่า 69	มากกว่า 31	8,300-10,500
ลิกไนต์	น้อยกว่า 69	มากกว่า 31	6,300-8,300
พีต	ต่ำ	สูง	ต่ำ

นอกจากนี้ยังมีการจำแนกประเภทของถ่านหินตามมาตรฐานระบบระหว่างประเทศ (International system) โดยพิจารณาจากคุณลักษณะทางกายภาพของถ่านหิน ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture: %) ค่าความร้อนเป็นกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (Calorific value: KCal/Kg) ค่าเปอร์เซ็นต์ของสารระเหย (Volatile matter: %) และค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจากฐานที่ไม่คิดค่าความชื้นของปริมาณธาตุคาร์บอน (C: %) ออกซิเจน (O: %) และไฮโดรเจน (H: %) (สถาบันการสอนวิทยาศาสตร์และส่งเสริมเทคโนโลยี, 2555) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การจำแนกประเภทของถ่านหินตามมาตรฐานระบบระหว่างประเทศ

ประเภทของถ่านหิน	ความชื้น (%)	ค่าความร้อน (KCal/Kg)	สารระเหย (%)	ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนักจากฐานที่ไม่คิดค่าความชื้น)		
				คาร์บอน	ออกซิเจน	ไฮโดรเจน
แอนทราไซต์	2-5	7,200-8,300	5-7	90-95	2-3	2-3
บิทูมินัส	5-10	5,830-8,300	20-40	80-90	10-15	4-5
ซับบิทูมินัส	28-30	5,500-6,500	40-45	75-80	15-20	5-6
ลิกไนต์	50-70	2,200-4,600	45-55	60-75	20-30	5-6

1.3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน

การที่จะทราบว่าถ่านหินมีคุณสมบัติเป็นอย่างไรนั้นจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ คุณสมบัติของถ่านหินจึงถูกใช้เป็นการจำแนกประเภทของถ่านหินและการควบคุมคุณภาพของถ่านหิน การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน มี 2 วิธีคือ

1. การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์โดยประมาณเป็นการวิเคราะห์แบบง่าย ด้วยวิธีการเผาถ่านหินภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้าและค่าคาร์บอนคงที่ในถ่านหิน โดยมุ่งเน้นคุณสมบัติในการเผาไหม้ การติดไฟได้เอง และการเกิดปริมาณเถ้าของถ่านหิน ดังนี้

1.1 ความชื้น (Moisture) ในถ่านหินจะมีความชื้นอิสระ (Free moisture) และความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหิน (Inherent moisture) ซึ่งความชื้นอิสระเป็นความชื้นที่บอกรับว่าถ่านหินนั้นชื้นเกาะติดภาชนะหรือเครื่องมือ ทำให้การไหลโดยน้ำหนักของถ่านหินไม่ดี ในขณะที่ความชื้นที่ติดแน่นอยู่ในเนื้อถ่านหินเป็นความชื้นที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากไล่ความชื้นอิสระออกไปแล้ว จึงเป็นความชื้นที่ไม่มีคุณค่าทางความร้อนและการเผาไหม้

1.2 สารระเหย (Volatile matter) เป็นร้อยละของน้ำหนักของถ่านหินที่สูญเสียไปหลังจากหักค่าความชื้นของถ่านหินออกไปแล้วองค์ประกอบของถ่านหินที่สลายตัวง่ายจะระเหยออกมา ดังนั้นเมื่อถ่านหินได้รับความร้อนแล้วสลายตัวจะได้องค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ ก๊าซ น้ำมันทาร์ และของเหลวใสที่มีแอมโมเนีย (Ammonia liquor) รวมถึงน้ำจากการแตกตัวของโมเลกุลที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (Hydrate) ซึ่งไม่ใช่ความชื้นอิสระ สารระเหยนี้จึงมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน เนื่องจากส่วนประกอบของสารระเหยจะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามประเภทและอายุของถ่านหิน

1.3 เถ้า (Ash) เป็นแร่ธาตุต่าง ๆ ที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินหลังจากส่วนที่เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้หมดไปแล้ว ดังนั้นปริมาณของเถ้าที่เหลือจึงมีความสำคัญต่อการพิจารณาซื้อขายถ่านหิน เนื่องจากค่าความร้อนที่ได้จากถ่านหินสามารถประมาณได้จากปริมาณเถ้า (Ash content) ที่เหลือ สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าทำได้โดยนำถ่านหินไปบดให้ละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผาไหม้ที่มีอากาศเพียงพอซึ่งการเผาไหม้จะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาไหม้จะช่วยทำให้ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทางเคมีเปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุ (Mineral matter) ที่มีอยู่ในถ่านหินให้เป็นแร่ธาตุในรูปออกไซด์ของโลหะหลาย ๆ ชนิด ดังนั้นคุณภาพของถ่านหินจึงอาจพิจารณาได้จากองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในเถ้าซึ่งประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเถ้าของถ่านหินนั้นปัจจุบันใช้เครื่องวัดการเรืองแสงของรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence spectrometer) ในการคำนวณส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ออกมาเป็นร้อยละ (วารสารณิคุณวานากิจ, 2540) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 องค์ประกอบของถ่านหินซึ่งวิเคราะห์โดยใช้หลักเกณฑ์ออกไซด์ของเถ้า

สารประกอบ	ร้อยละ
ซิลิกอนไดออกไซด์	35-40
อลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์	20-30
ไอออนออกไซด์	10-15
แคลเซียมออกไซด์	5-20
แมกนีเซียมออกไซด์	2-3
ไททานเนียมไดออกไซด์	0.5-1
โซเดียมออกไซด์	0.4-1
โพแทสเซียมออกไซด์	1.5-3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	5-20

ออกไซด์ของธาตุเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกั่ว (Slag) ขึ้นในผนังของหม้อไอน้ำของโรงไฟฟ้า ทำให้หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าลดลง ซึ่งธาตุที่แสดงฤทธิ์เป็นกรด (Acidic oxide) มีประมาณร้อยละ 20-90 ของปริมาณเถ้า ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์

(SiO₂) อลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) และไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ส่วนธาตุที่แสดงฤทธิ์เป็นด่าง (Basic oxide) มีประมาณร้อยละ 5-80 ของปริมาณเถ้า ได้แก่ ไอออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) โดยทั่วไปลักษณะของเถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1.3.1. เถ้าลอย (Fly ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ผงถ่านหิน ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าเถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควัน (Stack) โดยอาศัยเครื่องจับฝุ่นด้วยไฟฟ้า (Electrostatic precipitators) และจะถูกรวบรวมไว้ที่ถังเก็บ (Ash hopper)

1.3.2. เถ้าหนัก (Bottom ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เผาไหม้ (Combustion zone) ซึ่งอุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่ปะทะกัน โดยรวมตัวกันเป็นเม็ดหรือก้อนแล้วตกลงสู่ก้นเตาเผาไหม้ซึ่งบางส่วนของอนุภาคเถ้าจะไปปะทะผนังเตาและหลอมติดกัน ทำให้อนุภาคเถ้าสะสมเป็นก้อนใหญ่ที่เรียกว่าตะกรัน

1.4 ปริมาณค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon content) เป็นของแข็งที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่โดยเหลืออยู่ในถ่านหินหลังจากการเผาไหม้ซึ่งจะประมาณได้จากร้อยละที่เหลืออยู่ หลังจากหักค่าความชื้น สารระเหย และปริมาณเถ้าออกไป

1.5 ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content) และค่าความร้อน (Heating value หรือ Calorific value) เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วกำมะถันจะติดไฟได้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) พร้อมกับให้ค่าความร้อนออกมา ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นมลสารที่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารกัดกร่อน หากถ่านหินมีปริมาณกำมะถันสูงแล้วอาจทำให้เกิดการอุดตันและการกัดกร่อนของทางเดินก๊าซของเตา นอกจากนี้ไอเสียที่มีกำมะถันมากยังก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมทางอากาศ สำหรับค่าความร้อนที่ได้มาจากการเผาไหม้ของถ่านหินมี 2 ชนิด คือ ค่าความร้อนรวม (Gross Heating Value: GHV) เป็นความร้อนแฝงของน้ำที่เรียกว่าค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV) และค่าความร้อนที่ไม่รวมค่าความร้อนแฝงของน้ำนี้เรียกว่าค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value: LHV)

2. การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate analysis)

การวิเคราะห์โดยละเอียดเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบของปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อหาความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และกำมะถัน (S) โดยมีการรายงานปริมาณธาตุต่าง ๆ เป็นร้อยละ ในปัจจุบันศูนย์วิเคราะห์วิจัยถ่านหินและเถ้าลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

สามารถหาปริมาณธาตุดังกล่าวด้วยเครื่องการวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (Carbon Hydrogen Nitrogen analysis: CHN analysis) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 เครื่องการวิเคราะห์คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน (ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558)

2. แหล่งถ่านหินในประเทศไทย

ประเทศไทยมีปริมาณถ่านหินสำรองภายในประเทศมากกว่า 2,000 ล้านตัน ซึ่งเป็นปริมาณสำรองที่ประเมินแล้ว (Measured reserve) ประมาณ 1,000 ล้านตัน แหล่งถ่านหินส่วนใหญ่ของประเทศไทยอยู่ที่ภาคเหนือซึ่งเป็นแหล่งถ่านหินที่มีลำดับชั้นของถ่านหินประเภทถ่านหินลิกไนต์จนถึงบิทูมินัส ส่วนถ่านหินประเภทแอนทราไซต์มีปริมาณอยู่เพียงเล็กน้อยมาก และพบได้ในพื้นที่จังหวัดเลยเท่านั้น ส่วนใหญ่แหล่งถ่านหินที่นำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยจากอดีตจนถึงปัจจุบันนำมาจากเหมืองแม่เมาะ ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยจัดเป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำ ค่าความร้อนไม่สูงมาก นอกจากนี้ยังมีแหล่งถ่านหินที่ดำเนินการผลิตโดยบริษัทเอกชนซึ่งส่วนใหญ่เป็นถ่านหินที่มีคุณภาพที่ดีกว่า แต่ปัจจุบันปริมาณสำรองถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ของบริษัทเอกชนเหลือน้อยมากและบางแห่งได้หยุดทำการผลิตไปแล้ว ดังนั้นการผลิตถ่านหินจากภาคเอกชนในประเทศจึงมีน้อยมาก ส่วนใหญ่แล้วจึงเป็นการผลิตเพื่อใช้ประโยชน์ในกิจการของตนเองเท่านั้น

แหล่งถ่านหินที่สำคัญของประเทศไทยซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-3 มีทั้งหมด 7 แหล่ง ได้แก่

1. แหล่งแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
2. แหล่งแม่ตึบ อำเภองาว จังหวัดลำปาง

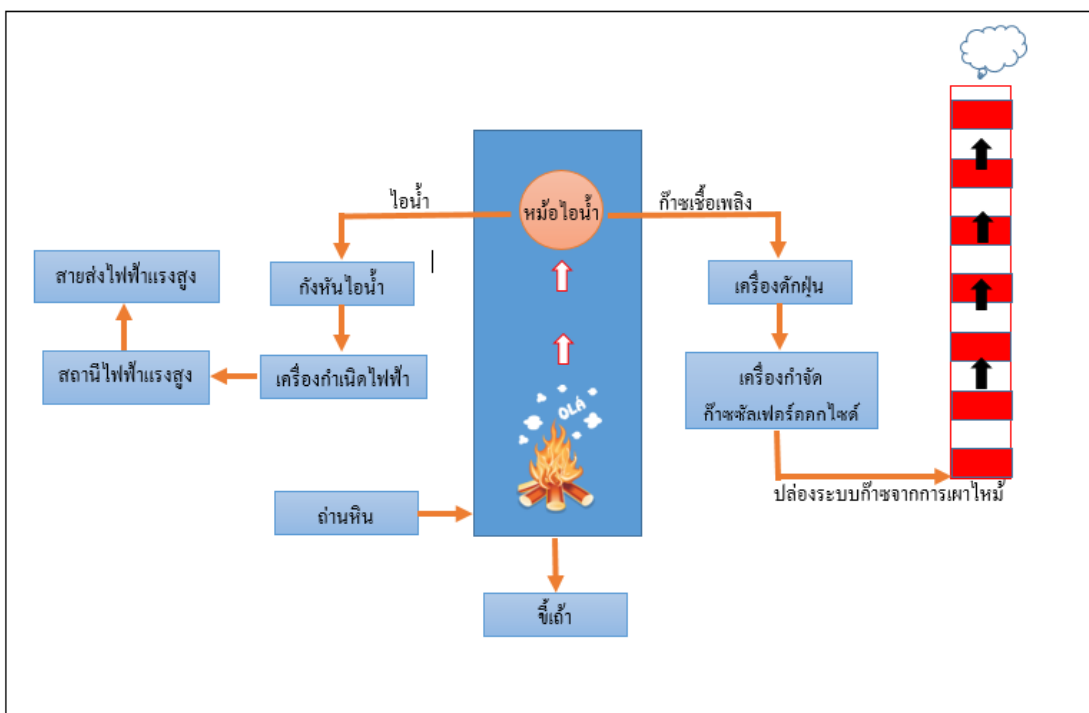
3. แหล่งบ้านป่าคา อำเภอถ้ำ จังหวัดลำพูน
4. แหล่งบ้านปู อำเภอถ้ำ จังหวัดลำพูน
5. แหล่งเวียงแหง อำเภอเวียงแหง จังหวัดเชียงใหม่
6. แหล่งกระบี่ อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่
7. แหล่งสะบ้าย้อย อำเภอสบ้าย้อย จังหวัดสงขลา



ภาพที่ 2-3 แหล่งถ่านหินที่สำคัญของประเทศไทย (Wikipedia, 2015)

การใช้ถ่านหินลิกไนต์ของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นการใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ส่วนที่เหลือจำนวนเล็กน้อยจึงจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งการเลือกใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านั้นจะคำนึงถึงความคุ้มค่าที่มีต่อระบบเศรษฐกิจ สังคม สุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นถ่านหินจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า เนื่องจากมีปริมาณสำรองมากกว่าเชื้อเพลิงอื่น ทำให้มีเสถียรภาพด้านราคา ถึงแม้ว่าถ่านหินจะมีความสะอาดน้อยกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น แต่ก็มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ทันสมัยโดยใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean coal technology) ซึ่งช่วยลดมลพิษจากกระบวนการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับขั้นตอนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินซึ่งใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาดนั้น แสดงดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ขั้นตอนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่ใช้เทคโนโลยีถ่านหินสะอาด

3. ประวัติและความเป็นมาของเหมืองถ่านหินลิกไนต์-โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

เชื้อเพลิงธรรมชาติเป็นต้นกำเนิดพลังงานซึ่งมนุษย์นำไปใช้ประโยชน์มาเป็นระยะเวลา ยาวนานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและยังคงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากพลังงานที่มีอยู่ยังมี

ปริมาณลดลงซึ่งสวนทางกันกับปริมาณความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการเสาะแสวงหาแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อให้ยังคงมีพลังงานไว้ใช้อยู่ตลอดเวลา

สำหรับประเทศไทยมีการตัดไม้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงมาตั้งแต่นอติจนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2460 พลเอกพระเจ้าบรมวงศ์เธอกรมพระกำแพงเพชรอัครโยธินมีพระราชประสงค์จะสงวนป่าไม้เอาไว้ จึงโปรดให้มีการสำรวจหาเชื้อเพลิงอื่นมาใช้แทนฟืนสำหรับหัวรถจักรไอน้ำของรถไฟ จึงได้ว่าจ้างชาวต่างประเทศเข้ามาดำเนินการสำรวจหาเชื้อเพลิงอื่น ซึ่งการสำรวจในสมัยนั้นเป็นไปด้วยความยากลำบากเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจยังไม่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมากนัก แต่จากการสำรวจในครั้งนั้นพบว่ามีย่านหินลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และตำบลคลองขนาน อำเภอเหนือคลอง จังหวัดกระบี่

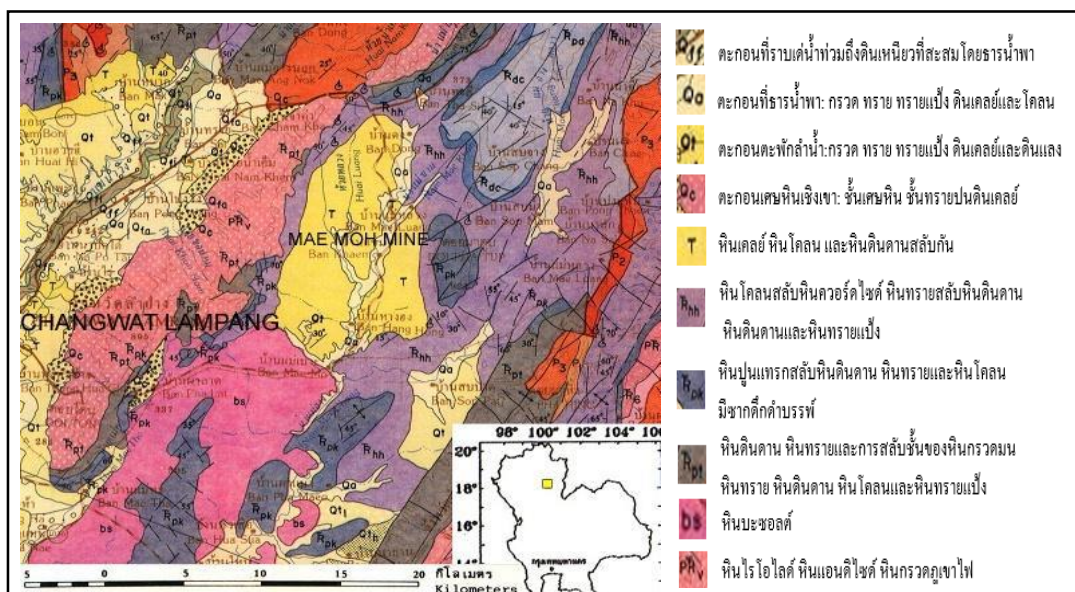
ดังนั้นในปี พ.ศ. 2498 จึงเริ่มมีการผลิตถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ ออกจำหน่ายให้แก่โรงบ่มไบยาสูบในภาคเหนือ โรงงานของการรถไฟแห่งประเทศไทยที่จังหวัดนครราชสีมา โรงปูนซีเมนต์ของบริษัทชลประทานซีเมนต์ จำกัด และโรงไฟฟ้าสามเสนของการไฟฟ้านครหลวง พร้อมกับมีการเจาะสำรวจถ่านหินลิกไนต์ควบคู่ไปด้วย และพบว่าที่อำเภอแม่เมาะมีถ่านหินลิกไนต์ฝังตัวอยู่ประมาณ 120 ล้านตัน และสามารถขุดมาใช้งานได้ 43.6 ล้านตัน เมื่อประสบความสำเร็จในการดำเนินการผลิตและจัดจำหน่ายถ่านหินลิกไนต์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงแล้ว ในปี พ.ศ. 2503 รัฐบาลจึงได้อนุมัติให้ก่อสร้างโรงจักรแม่เมาะเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 12,500 กิโลวัตต์ โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงและเพื่อให้ดำเนินงานเกี่ยวกับกิจการถ่านหินลิกไนต์ได้อย่างคล่องตัว รัฐบาลจึงได้ตั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขึ้น โดยรวมการไฟฟ้าอันฮีและโรงไฟฟ้าตะวันออกเฉียงเหนือเข้าไว้ด้วยกัน โดยทำหน้าที่ผลิตและจัดจำหน่ายถ่านหินลิกไนต์ วัตถุประสงค์จากถ่านหินลิกไนต์ และกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ เป็นต้นมา ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2512

ในระหว่างที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าของถ่านหินจากเหมืองแม่เมาะนั้นเกิดวิกฤตการณ์ในด้านราคาน้ำมันเชื้อเพลิงคือน้ำมันเชื้อเพลิงมีราคาเพิ่มขึ้น ทำให้ถ่านหินลิกไนต์มีคุณค่ามากขึ้น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงมีการเร่งสำรวจถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะและผลจากการสำรวจพบว่า มีถ่านหินลิกไนต์เพิ่มมากขึ้นซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวางแผนเพื่อพัฒนาการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินต่อไป ปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีหน่วยกำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า 10 เครื่อง และกำลังการผลิตติดตั้งรวมทั้งสิ้น 2,625 เมกกะวัตต์ และใช้ถ่านหินลิกไนต์ ประมาณปีละ 15-17 ล้านตันต่อปี ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังจังหวัดต่างๆ ทั้งภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คิดเป็นร้อยละ 20 ของกำลังผลิตของทั้งประเทศ (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, 2558)

4. ธรณีทั่วไปของเหมืองถ่านหินแม่เมาะ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเป็นหน่วยงานที่ดำเนินการพัฒนาแหล่งถ่านหินลิกไนต์ของประเทศไทย ซึ่งเหมืองถ่านหินลิกไนต์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทยคือเหมืองถ่านหินแม่เมาะ เหมืองถ่านหินแม่เมาะมีพื้นที่ประมาณ 20,000 ไร่ โดยพื้นที่ทั้งหมดเป็นของกรมป่าไม้ เหมืองแม่เมาะผลิตถ่านหินอยู่ในแอ่งแม่เมาะซึ่งมีลักษณะพื้นที่ต่ำล้อมรอบด้วยเทือกเขาจัดเป็นแอ่งสะสมตัวของตะกอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากการสำรวจแล้วพบว่าเป็นแอ่งที่มีปริมาณสำรองถ่านหินที่ประเมินแล้วมากที่สุดของประเทศ

แอ่งแม่เมาะเป็นแอ่งที่อยู่ระหว่างหุบเขาในเขตตำบลแม่เมาะและบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีรูปร่างคล้ายวงรีที่มีแกนยาว 16 กิโลเมตร วางตัวในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีบริเวณกว้างสุดประมาณ 9 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 135 ตารางกิโลเมตร (เหมืองแม่เมาะ, 2558) หินที่พบบริเวณแอ่งแม่เมาะประกอบด้วยหินยุคต่าง ๆ หินตะกอนที่พบในแอ่งแม่เมาะอยู่ในช่วงสมัยไมโอซีน (Miocene epoch) ซึ่งมีอายุประมาณ 23.0-5.3 ล้านปีที่ผ่านมา เป็นหินตะกอนกึ่งแข็งตัว มีความหนาของชั้นตะกอนรวมกันประมาณ 1,100 เมตร เรียกกลุ่มหิน (Lithological group) ดังกล่าวไว้ว่า “กลุ่มหินแม่เมาะ” หินชนิดหลักที่พบในกลุ่มหินแม่เมาะประกอบด้วย หินดินดาน (Shale) หินโคลน (Mudstone) หินทรายแป้ง (Siltstone) หินทราย (Sandstone) และหินกรวดมน (Conglomerate) โดยมีชั้นถ่านหินที่สำคัญ 2 ชั้น มีความหนาแต่ละชั้นประมาณ 20 เมตร ที่แทรกสลับบริเวณส่วนกลางของกลุ่มหินแม่เมาะจัดเป็นแอ่งของหินตะกอนยุคเทอร์เชียรี (Tertiary period) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แอ่งของหินตะกอนยุคเทอร์เชียรี (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

จากลักษณะชนิดหินตะกอน ชั้นถ่านหิน และซากบรรพชีวิน (Fossil) ทำให้สามารถสรุปได้ว่ากลุ่มหินแม่เมาะเกิดในสภาพแวดล้อมบริเวณทวีปที่มีสภาพพื้นที่เป็นทะเลสาบน้ำจืดหรือเป็นที่ราบน้ำท่วมถึง

ส่วนลักษณะสภาพแวดล้อมของเหมืองถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ แสดงดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 เหมืองถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ (สถาบันการสอนวิทยาศาสตร์และส่งเสริมเทคโนโลยี, 2555)

สำหรับการสำรวจปริมาณถ่านหินทั้งหมดในพื้นที่แอ่งแม่เมาะพบว่าปริมาณสำรองทางธรณีวิทยาประมาณ 1,130.88 ล้านตัน ในจำนวนนี้ประเมินว่าปริมาณที่คุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจมีประมาณ 890 ล้านตัน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2558) สิ่งที่สำคัญที่สุดในการผลิตถ่านหินลิกไนต์คือปริมาณและคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ที่ส่งเข้าโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะต้องได้คุณภาพตามที่โรงไฟฟ้ากำหนดซึ่งคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะกำหนดไว้แสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 การกำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

คุณภาพถ่านหิน	โรงไฟฟ้าแม่เมาะจ.ลำปาง	
	Unit 4-7	Unit 8-13
ค่าความร้อน (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)	2,011-3,299	2,000-3,100
ความชื้น (ร้อยละ)	25.0-38.9	25.0-36.0
เถ้า (ร้อยละ)	6.9-35.0	11.0-36.0
ค่ากำมะถัน (ร้อยละ)	1.32-4.00	0.94-3.35

เนื่องจากปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้การผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินมีความสำคัญมากขึ้น ถึงแม้ว่าการใช้ถ่านหินจะทำให้เกิดปัญหาจากกระบวนการผลิตซึ่งมีส่วนประกอบของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชนท้องถิ่น นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดเขม่า ฝุ่น และละอองจากถ่านหิน ดังนั้นรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงแก้ปัญหาโดยพยายามคิดค้นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด นั่นคือเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดซึ่งได้รับความสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง สำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะก็ต้องการแก้ปัญหาเรื่องมลพิษจากถ่านหินเช่นเดียวกันจึงได้มีการติดตั้งระบบมาตรฐานในการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Flue Gas Desulfurization : FGD) โดยให้อยู่ในเกณฑ์ของสำนักงานกรรมการสิ่งแวดล้อมเพื่อควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้กับโรงไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งแต่เดิมนั้นมีโรงไฟฟ้าทั้งหมด 13 เครื่อง แต่ในปัจจุบันได้หยุดใช้งานไปแล้ว 3 เครื่อง คือ โรงไฟฟ้าเครื่องที่ 1-3 ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการติดตั้งเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้กับโรงไฟฟ้าเครื่องที่ 4-13 โดยมีปริมาณก๊าซที่เครื่องควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถรับได้แสดงดังตารางที่ 2-5 (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, 2558)

ตารางที่ 2-5 ปริมาณก๊าซที่เครื่องควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถรับได้

โรงไฟฟ้า เครื่องที่	ปริมาณก๊าซที่เครื่องรับได้		ประสิทธิภาพในการทำงาน (ร้อยละ)
	ความเข้มข้น (มล./ลบ.ม)	มวล (ตัน/ชม.)	
4 - 7	เครื่องละ 17,000	เครื่องละ 19.8	เครื่องละ 97.0
8 - 11	เครื่องละ 17,000	เครื่องละ 12.5	เครื่องละ 95.0
12 - 13	เครื่องละ 17,000	เครื่องละ 12.5	เครื่องละ 92.0

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจำแนกและการกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะด้วยการวิเคราะห์หลายตัวแปรมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งงานวิจัยในประเทศไทยและงานวิจัยต่างประเทศ ดังนี้

1. งานวิจัยในประเทศไทย

อรรวรรณ ชัยลภากุล (2529) ศึกษาและวิเคราะห์คุณภาพของถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ของประเทศไทย ได้แก่ แหล่งถ่านหินในจังหวัดกระบี่ ลำพูน ตาก เลย และลำปาง ด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์โดยละเอียด (Ultimate analysis) และ

วิเคราะห์ถ่านหินด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic absorption Spectrophotometry) การตรวจวัดปริมาณแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงรังสีขาว (UV-Vis Absorption Spectrophotometry) และการตรวจวัดการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry) ผลการศึกษาพบว่าผลจากการวิเคราะห์โดยประมาณและการวิเคราะห์โดยละเอียดนำไปใช้ในการจัดลำดับชั้นของถ่านหินได้ว่าถ่านหินจากจังหวัดเลยจัดเป็นถ่านหินชนิดเซมิแอนทราไซต์ (Semi-Anthracite) ถ่านหินจากจังหวัดตากจัดเป็นถ่านหินชนิดบิทูมินัส (Bituminous) ที่มีปริมาณสารระเหยสูง ถ่านหินจากจังหวัดลำพูนและลำปางจัดเป็นถ่านหินชนิดซับบิทูมินัส (Sub-Bituminous) และถ่านหินจากจังหวัดกระบี่จัดเป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำที่สุด สำหรับผลการวิเคราะห์ถ่านหิน โดยละเอียดกับผลการวิเคราะห์ส่วนที่ได้จากการสกัดถ่านหินด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ได้ผลสอดคล้องกันกล่าวคือถ่านหินจากแหล่งต่างๆ เหล่านี้มีต้นกำเนิดมาจากพีชบกชั้นสูง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดัชนีคาร์บอนคูตี้ (Carbon Preference Index: CPI) ซึ่งอัตราส่วนของจำนวนคาร์บอนเลขคู่ของพาราฟินตั้งแต่ C₂₄-C₃₄ ต่อจำนวนคาร์บอนเลขคี่ตั้งแต่ C₂₅-C₃₅ และปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากการสกัดถ่านหินด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อน เฮอร์เซนต์ของคาร์บอน และปริมาณสารระเหย

กิตินันต์ แสงมณี และคณะ (2544) วิเคราะห์ถ่านหิน โดยวิธีการส่องผ่านด้วยรังสีแกมมา (Gamma ray transmission) ซึ่งเป็นวิธีการหาปริมาณถ่านหินที่แสดงคุณภาพของถ่านหิน โดยใช้รังสีแกมมา 2 พลังงาน ได้แก่ รังสีแกมมาพลังงาน 60 keV จากต้นกำเนิดรังสี Am-241 และรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ส่องผ่านตัวอย่างถ่านหิน การดูดกลืน (Absorption) และการกระเจิง (Scattering) จะทำให้ความเข้มข้นของรังสีแกมมาที่ผ่านออกมามีความเข้มข้นลดลงตามปริมาณและสัมประสิทธิ์การดูดกลืน เนื่องจากส่วนประกอบของธาตุต่าง ๆ ในถ่านหิน ผลการศึกษาการดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV และรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ของไออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ในถ่านหินตามสมการ $C_A = f \left[\log(I/I_0)_L / \log(I/I_0)_H \right] + h$ พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกไซด์ของแต่ละธาตุในถ่านหินมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนลอการิทึม (Log ratio) ของการดูดกลืนรังสีดังนี้

ไออนออกไซด์:

$$\text{Log ratio} = 0.2258(\% \text{ ash}) - 0.7027$$

แคลเซียมออกไซด์:

$$\text{Log ratio} = 0.0262(\% \text{ ash}) + 3.1226$$

ซิลิกอนไดออกไซด์:

$$\text{Log ratio} = 0.0127(\% \text{ ash}) + 3.1463$$

สำหรับตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์ซึ่งทำการทดสอบด้วยวิธีเดียวกันมีความสัมพันธ์ของปริมาณเท่ากับสัดส่วนลอการิทึมการดูดกลืนรังสี คือ

$$\text{Log ratio} = 0.0123(\% \text{ ash}) + 3.131$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันกับรูปแบบสมการของซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งหมายความว่าส่วนผสมของถ่านหินลิกไนต์มีองค์ประกอบที่สำคัญในรูปแบบเดียวกันกับถ่านหินที่เตรียมขึ้น และโดยส่วนใหญ่แล้วปริมาณเข้าประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์

ธงชัย แก้วอุดม (2553) วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหินลิกไนต์ที่มีความสัมพันธ์กับแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเหมืองแม่เมาะด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูล เพื่อจัดกลุ่มข้อมูลด้วยวิธีเคมีน (K-mean) พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองการจำแนกกลุ่มของถ่านหิน โดยใช้เทคนิคต้นไม้สำหรับการตัดสินใจ (Decision tree) การวิเคราะห์การจำแนก (Discriminant analysis) และข่ายงานระบบประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) หลังจากนั้นสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากองค์ประกอบของถ่านหินซึ่งประกอบด้วยปัจจัยจำนวน 8 ปัจจัยได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) อลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ไอออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้วิธีเคมีนในการแบ่งกลุ่มตัวอย่างเพื่อศึกษาว่าปัจจัยขององค์ประกอบถ่านหินอื่น ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่าแคลเซียมออกไซด์ในถ่านหินลิกไนต์ เมื่อแบ่งตามการวิเคราะห์การจัดกลุ่มแล้วจะอยู่ในกลุ่มใดบ้าง โดยจะแบ่งกลุ่มของข้อมูลออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งจะพิจารณาจากแนวโน้มในการก่อให้เกิดปัญหาของตะกรันจากค่าองค์ประกอบถ่านหินทั้ง 8 ปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการเกิดค่าแคลเซียมออกไซด์ที่มากกว่าร้อยละ 23 และเมื่อทำการสร้างแบบจำลองการจำแนกกลุ่มของถ่านหินแล้วตรวจสอบความถูกต้องในการพยากรณ์ พบว่าความถูกต้องในการพยากรณ์ด้วยเทคนิคต้นไม้สำหรับการตัดสินใจและการวิเคราะห์การจำแนกเป็นร้อยละ 80 และร้อยละ 89.7 ตามลำดับ ในขณะที่วิธีข่ายงานระบบประสาทเทียม มีความถูกต้องในการพยากรณ์ถึงร้อยละ 97.91

สกัด สิรินันต์ไพบูลย์, ภัฏฐนิชา ตระการจินดานนท์ และเปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต

(2555) ศึกษาถ่านหินกับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย พลังงานที่ใช้ผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันส่วนใหญ่มาจากก๊าซธรรมชาติในอัตราร้อยละ 70 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด เนื่องจากก๊าซธรรมชาติเป็นพลังงานที่ใช้ง่าย มีประสิทธิภาพสูงและสามารถผลิตเองได้ในประเทศ แต่อย่างไรก็ตามแหล่งสำรองก๊าซธรรมชาติในประเทศไทยมีอยู่อย่างจำกัดและคาดว่าจะมีสำรองเพียงพอไว้ใช้ได้ก็อีกเพียงไม่กี่สิบปี จึงต้องนำพลังงานชนิดอื่นมาทดแทนได้แก่ พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานทดแทน เช่น พลังชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมหรือพลังงานน้ำ และถ่านหิน แต่พลังงานเหล่านี้ต่างมีข้อจำกัดแตกต่างกันไป กล่าวคือแหล่งพลังงานนิวเคลียร์มีน้อยและต้องการเทคโนโลยีขั้นสูงและใช้ระยะเวลาในการพัฒนาโครงการเพื่อสร้างโรงไฟฟ้า นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการกำจัดกากของเสียกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ส่วนพลังงานทดแทนถึงแม้ว่าจะเป็นพลังงานสะอาด ปล่อยมลพิษค่อนข้างต่ำและใช้ได้อย่างยั่งยืน แต่มีข้อจำกัดคือ มีต้นทุนในการผลิตที่สูงและไม่มีเสถียรภาพในการผลิตพลังงาน ในขณะที่พลังงานถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่มีปริมาณมากคือมีปริมาณสำรองที่สามารถใช้ได้อีกมากกว่า 200 ปี ถ่านหินจึงเป็นแหล่งพลังงานที่หาได้ง่าย มีเสถียรภาพในด้านราคา จึงไม่เกิดปัญหาในเรื่องการขาดแคลนถ่านหิน และสามารถเลือกคุณภาพถ่านหินได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังมีความปลอดภัยในการขนส่งและจัดเก็บได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามหากนำเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดมาใช้ในการทำเหมืองถ่านหิน การจัดการถ่านหินก่อนนำมาใช้ประโยชน์และการใช้ประโยชน์จากถ่านหินโดยให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของชุมชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้นให้น้อยที่สุดก็จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านหิน ดังนั้นถ้าต้องการใช้พลังงานถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตไฟฟ้าแล้วจะต้องมีความรู้ ความเข้าใจและความรับผิดชอบร่วมกันของทุกภาคส่วนต่อผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมที่จะเกิดขึ้นหากต้องการสร้างโรงไฟฟ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นในอนาคต

เสกสรร แสงดาว และฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์ (2556) ศึกษาคุณภาพถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินภายใต้เงื่อนไขคุณภาพอากาศโดยรวมข้อมูลผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศจากกรมควบคุมมลพิษ ได้แก่ ข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศ ค่าเฉลี่ยสูงสุดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM_{10}) และข้อมูลเกี่ยวกับการสำรวจและวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ซึ่งประเทศไทยมักจะนำถ่านหินจากต่างประเทศมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าในประเทศไทย เช่น ถ่านหินจากประเทศอินโดนีเซีย และออสเตรเลีย เป็นต้น สำหรับผลการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยีโรงไฟฟ้า

ที่มีการเผาในเตาเผาแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion) ที่เป็นประเภทที่มีการเผาไหม้แบบยิ่งยวด (Subcritical) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับในต่างประเทศ ซึ่งเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าเป็นแบบที่มีการเผาไหม้ถ่านหินแบบผงที่ใช้ร่วมกับหม้อไอน้ำแบบเหนือยิ่งยวด (Supercritical) และเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าเป็นแบบที่มีการเผาไหม้ถ่านหินแบบผงที่มีการใช้หม้อกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง (Ultrasupercritical) เพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือเทคโนโลยีที่มีการผสมระหว่างเทคโนโลยีที่เปลี่ยนสถานะถ่านหินให้เป็นก๊าซ (Coal gasification) กับ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกังหันก๊าซ (Gas combined cycle plant) เข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า Integrated gasification combine cycle สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ของประเทศไทยพบว่าปริมาณความร้อน (Heating value) มีค่า 2,100-6,000 KJ/Kg ปริมาณเถ้าที่มีผลต่อปริมาณฝุ่นละออง (Fly ash) หรือเถ้า (Bottom ash) จากการเผาไหม้มีค่าร้อยละ 14-48.9 และปริมาณกำมะถัน (Sulfur content) ที่มีผลต่อปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีค่าร้อยละ 0.8-7.8 เมื่อเทียบคุณภาพถ่านหินจากต่างประเทศพบว่าปริมาณ ความร้อนมีค่า 1,691.7-7,307.3 KJ/Kg ปริมาณเถ้ามีค่าร้อยละ 2.2-45.9 และปริมาณกำมะถันมีค่าร้อยละ 0.2-4.7 ส่วนการตรวจวัดคุณภาพอากาศในประเทศไทยครอบคลุมพื้นที่ 29 จังหวัด ระหว่างปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2554 พบว่าสถานการณ์ของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ส่วนใหญ่ยังมีค่าอยู่ในระดับที่ต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด ยกเว้นในจังหวัดสมุทรสาคร สำหรับก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ผลการตรวจวัดพบว่าพื้นที่ในหลายจังหวัดมีแนวโน้มสูงขึ้นและระดับของผลการตรวจวัดมีค่าเกินร้อยละ 50 ของค่ามาตรฐานที่กำหนด เช่น จังหวัดกรุงเทพมหานคร สมุทรปราการ สมุทรสาคร และชลบุรี ส่วนสถานการณ์ของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM₁₀) พบว่ามีผลการตรวจวัดเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดเกือบทุกพื้นที่ ยกเว้นจังหวัดทางภาคใต้ สำหรับการกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างระดับคุณภาพอากาศ คุณภาพถ่านหินเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าถ่านหิน และประสิทธิภาพระบบกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยตัวแบบบ็อกซ์ (Box model) ซึ่งเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์อย่างง่าย โดยใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินระดับของกำมะถันและเถ้าในถ่านหิน และศักยภาพกำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน พบว่าถ่านหินในประเทศไทยมีคุณภาพใกล้เคียงกันกับถ่านหินจากแหล่งของประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลีย ส่วนศักยภาพกำลังผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินในพื้นที่ศึกษา 29 จังหวัด พบว่ามี 8 จังหวัดที่มีศักยภาพสามารถติดตั้งโรงไฟฟ้าถ่านหินเพิ่มเติมได้คือ จังหวัดนครราชสีมา สุราษฎร์ธานี ขอนแก่น นครสวรรค์ สงขลา ฉะเชิงเทรา สมุทรสาคร และภูเก็ต ส่วนอีก 21 จังหวัดที่เหลือไม่สามารถติดตั้งโรงไฟฟ้าถ่านหินเพิ่มขึ้นได้อีก เนื่องจากระดับของมลพิษทางอากาศมีค่าเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่คุณภาพอากาศในพื้นที่จะสามารถรองรับได้อีก แต่ถ้าหากในอนาคต

มลพิษทางอากาศในพื้นที่ลดลงแล้วก็จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้

2. งานวิจัยต่างประเทศ

Ogala, Akaegbobi, Omo-Irabor and Finkelman (2009) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุที่สำคัญและธาตุที่หายากในทางธรณีของเหมืองถ่านหินยุคมาสทริเชียร์ (Maastrichian age) ที่แอ่งน้ำอนัมบรา (Anambra basin) ในประเทศไนจีเรีย โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) ส่วนการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการจะทำการตรวจสอบทางธรณีเคมีด้วยเทคนิค ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Mass Spectrometry) ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดสเปกตรัมแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้หลักการปล่อยอะตอมออกมา (Atomic emission) ผลการศึกษาพบว่าสามารถแบ่งกลุ่มของถ่านหินออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มถ่านหินดั้งเดิมและถ่านหินแบบผสมได้แก่ หินควอตซ์ (Quartz) และแร่ที่ผสมด้วยดินเหนียว (Clay minerals) ส่วนกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มถ่านหินที่มีแนวโน้มของถ่านหินอยู่เป็นจำนวนมาก จึงเป็นถ่านหินเลนที่เกิดสะสมตามหนองน้ำ

Chao, Enyuan, Jiankun, Xiaofei and Li (2010) ศึกษาและทำนายการระเบิดของ ถ่านหินและก๊าซจากเหมืองเอนฮอง (Enhong Mine) ในจังหวัดยูนนาน (Yunnan) ของประเทศจีน โดยประยุกต์การวิเคราะห์การจำแนกเบย์เซียน (Bayesian discriminant analysis) และข่ายงานระบบประสาท (Neural network) ด้วยวิธีการแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation: BP) ซึ่งทำการเลือกดัชนีที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการระเบิดของถ่านหินและก๊าซมาศึกษา 5 ปัจจัย ได้แก่

1. ความเร็วเริ่มต้นของการกระจายของก๊าซมีเทน (x_1)
2. สัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของถ่านหิน (x_2)
3. ความดันก๊าซ (x_3)
4. รูปแบบของถ่านหินที่ถูกทำลาย (x_4) ซึ่งแบ่งได้เป็น 5 แบบ ดังนี้
 - 4.1 ถ่านหินสมบูรณ์ที่ไม่แตก
 - 4.2 ถ่านหินแตก
 - 4.3 ถ่านหินแตกแต่มีความแข็ง
 - 4.4 ถ่านหินแตกละเอียด
 - 4.5 ถ่านหินแตกละเอียดจนเป็นผง
5. ความลึกของการทำเหมืองถ่านหิน (x_5)

เพื่อสร้างสมการการจำแนกกลุ่มในการระเบิดของถ่านหินและก๊าซ โดยพิจารณาจากน้ำหนักของถ่านหินที่ติดตัวออกมาจากการระเบิด โดยแบ่งการระเบิดของถ่านหินออกได้เป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1. กลุ่มที่ไม่เกิดการระเบิดของถ่านหินและก๊าซ ($W_1(x)$)
2. กลุ่มที่เกิดการระเบิดของถ่านหินและก๊าซเล็กน้อย ($W_2(x)$)
3. กลุ่มที่เกิดการระเบิดของถ่านหินและก๊าซปานกลาง ($W_3(x)$)
4. กลุ่มที่เกิดการระเบิดของถ่านหินและก๊าซมาก ($W_4(x)$)

ผลการศึกษาพบว่าสามารถสร้างสมการในการจำแนกกลุ่มการระเบิดของถ่านหินและก๊าซได้ดังนี้

$$W_1(x) = -43.8694 + 1.4318x_1 + 113.0406x_2 + 6.4055x_3 + 5.2467x_4 - 0.0096x_5$$

$$W_2(x) = -65.0341 + 3.0204x_1 + 3.3712x_2 + 11.1590x_3 + 15.6942x_4 + 0.0258x_5$$

$$W_3(x) = -44.6246 + 1.4936x_1 - 3.2735x_2 + 5.7412x_3 + 9.9392x_4 + 0.0673x_5$$

$$W_4(x) = -93.3579 + 3.5749x_1 + 1.6379x_2 + 16.6684x_3 + 17.3454x_4 + 0.0271x_5$$

จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบในการทำนายการระเบิดของถ่านหินและก๊าซ โดยสุ่มตัวอย่างถ่านหินมา 5 ตัวอย่างจากเหมืองเอนสอง จังหวัดยูนนาน ผลการตรวจสอบพบว่าตัวแบบการวิเคราะห์การจำแนกเบย์เซียนและตัวแบบข่ายงานระบบประสาทสามารถทำนายกลุ่มการระเบิดของถ่านหินและก๊าซได้ถูกต้องทั้ง 5 ตัวอย่าง

Eskanazy, Finkelman and Chattarjee (2010) ศึกษารูปแบบการเกิดธาตุที่หายากในถ่านหินซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อแนวความคิดตามหลักวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากลักษณะของการใช้ประโยชน์ของถ่านหินขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและรูปแบบทางเคมีของธาตุที่หายาก ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้นำวิธีการเชิงสถิติมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุกับธาตุ และความสัมพันธ์ระหว่างธาตุกับค่าด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficients of correlation) และเพื่อจัดกลุ่มธาตุที่หายากในถ่านหินด้วยการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster analysis) โดยศึกษาจากชุดของตัวอย่างถ่านหินลิกไนต์จำนวน 75 ตัวอย่าง จากประเทศบัลแกเรียที่มีปริมาณเถ้าโดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 4.1-78.9 และทำการแบ่งถ่านหินออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. กลุ่ม 1a เป็นตัวอย่างถ่านหินจำนวน 4 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณเถ้าโดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 4.1-8.4
2. กลุ่ม 1b เป็นตัวอย่างถ่านหินจำนวน 46 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณเถ้าโดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 4.1-38.1

3. กลุ่ม 1c เป็นตัวอย่างถ่านหินจำนวน 29 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณเถ้าโดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 40.2-78.9

ผลการศึกษาพบว่า

1. กลุ่ม 1a เป็นกลุ่มความสัมพันธ์ของธาตุที่เป็นโลหะ โดยมีธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน 5 คู่ ดังนี้

1. เจอร์เมเนียม (Germanium: Ge) กับวานาเดียม (Vanadium: V)
2. เหล็ก (Iron: Fe) กับเซอร์โคเนียม (Zirconium: Zr)
3. นิกเกิล (Nickel: Ni) กับสตรอนเชียม (Strontium: Sr)
4. แกลเลียม (Gallium: Ga) กับโคบอลต์ (Cobalt: Co)
5. สังกะสี (Zinc: Zn) กับทองแดง (Copper: Cu)

ส่วนธาตุที่มีความสัมพันธ์กับซิงค์มี 3 ตัวคือ

1. แมงกานีส (Manganese: Mn)
2. โพแทสเซียม (Potassium: K)
3. ไททาเนียม (Titanium: Ti)

2. กลุ่ม 1b เป็นกลุ่มความสัมพันธ์ระหว่างธาตุที่เป็นโลหะหนักกับธาตุทรานซิชัน โดยมีธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน 3 คู่ ดังนี้

1. ตะกั่ว (Lead: Pb) กับเซอร์โคเนียม (Zirconium: Zr)
2. สังกะสี (Zinc: Zn) กับทองแดง (Copper: Cu)
3. นิกเกิล (Nickel: Ni) กับโคบอลต์ (Cobalt: Co)

ส่วนธาตุที่มีความสัมพันธ์กับซิงค์คือ แกลเลียม (Gallium: Ga)

3. กลุ่ม 1c เป็นกลุ่มความสัมพันธ์ระหว่างธาตุที่เป็นธาตุทรานซิชันกับธาตุทรานซิชัน โดยมีธาตุที่มีความสัมพันธ์กัน 3 คู่ ดังนี้

1. โพแทสเซียม (Potassium: K) กับโซเดียม (Sodium: Na)
2. นิกเกิล (Nickel: Ni) กับโคบอลต์ (Cobalt: Co)
3. วานาเดียม (Vanadium: V) กับโครเมียม (Chromium: Cr)

ส่วนธาตุที่มีความสัมพันธ์กับซิงค์คือ ไททาเนียม (Titanium: Ti)

Smoliński (2014) วิเคราะห์ผลกระทบทางเคมีกายภาพของพารามิเตอร์หรือธาตุ ซึ่งแสดงคุณลักษณะพิเศษของของเสียจากเหมืองถ่านหินที่เกิดขึ้นในทอมของการเผาไหม้และติดไฟได้เอง (Self-Ignition) และกระบวนการเผาไหม้ในระยะเริ่มต้นด้วยการประยุกต์

การวิเคราะห์การจัดกลุ่มตามลำดับชั้น (Hierarchical Cluster Analysis: HCA) และจะทำควบคู่ไปกับวิธีการทางเคมีคือการใช้แผนภาพสี (Colour data map) เพื่อจัดกลุ่มเมืองถ่านหินจำนวน 12 เมือง และธาตุทั้ง 31 ตัว ผลการศึกษาจากแผนภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) พบว่า

1. สามารถจัดกลุ่มเมืองถ่านหินจำนวน 12 เมืองได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1.1 กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มของเมืองถ่านหินที่สังเกตได้ว่าสามารถเกิดการเผาไหม้และติดไฟได้เอง จำนวน 5 เมืองได้แก่ เมืองที่ 2, 6, 7, 11, และ 12

1.2 กลุ่มที่ 2 ซึ่งสามารถแบ่งเมืองถ่านหินได้เป็นกลุ่มย่อยอีก 2 กลุ่มย่อยคือกลุ่มแรกเป็น เมืองที่ 3, 5, 8 และ 9 เป็นกลุ่มเมืองที่ไม่สามารถสังเกตได้ว่าเกิดการเผาไหม้และติดไฟได้เอง ส่วนอีกกลุ่มย่อยหนึ่งเป็นเมืองที่ 1, 4 และ 10 เป็นกลุ่มเมืองที่ไม่มีบันทึกการรายงานว่าเกิดการเผาไหม้และติดไฟได้เอง จึงต้องใช้ผลการยืนยันจากห้องปฏิบัติการควบคู่กันอีกทางหนึ่ง

2. สามารถจัดกลุ่มธาตุจำนวน 31 ธาตุ ได้เป็น 3 กลุ่มคือ

2.1 กลุ่มที่ 1 เป็นธาตุที่แสดงถึงปริมาณความชื้น (Contents of moisture) สารระเหย (Volatile matter) คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) กำมะถัน (S) ความร้อนจากการเผาไหม้ (Heat of combustion) และธาตุที่หายาก ได้แก่ ตะกั่ว (Pb) วานาเดียม (V) และสังกะสี (Zn)

2.2 กลุ่มที่ 2 อธิบายถึงแก้ว ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และธาตุที่หายาก ได้แก่ โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) และรูบิเดียม (Rb)

2.3 กลุ่มที่ 3 แสดงถึงธาตุไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5) และธาตุที่หายาก ได้แก่ อาร์ซีนิก (As) แบเรียม (Ba) แมงกานีส (Mn) ดีบุก (Sn) และสตรอนเชียม (Sr)

3. เมื่อใช้แผนภาพสีควบคู่กันกับแผนภาพเดนโดแกรม สามารถแบ่งเมืองถ่านหินได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

3.1 กลุ่มที่ 1 เป็นเมืองถ่านหินที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณของความชื้น สารระเหย คาร์บอน (C) กำมะถัน (S) ค่าความร้อนของการเผาไหม้ และซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ (SO_3) ในปริมาณที่มาก แต่มีความเข้มข้นหรือปริมาณของแก้ว ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) นิกเกิล (Ni) และรูบิเดียม (Rb) ในปริมาณที่น้อย

3.2 กลุ่มที่ 2 เป็นเหมืองถ่านหินที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณของแร่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) และนิกเกิล (Ni) ในปริมาณที่มาก

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเหมืองถ่านหินซึ่งมีแนวโน้มที่จะสามารถเกิดการเผาไหม้และติดไฟได้เองจะมีปริมาณหรือความเข้มข้นในปริมาณที่มากของพารามิเตอร์ 15 ตัวได้แก่ ความชื้น แร่สารระเหย คาร์บอน (C) กำมะถัน (S) ค่าความร้อนจากการเผาไหม้และซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) และรูบิเดียม (Rb)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการกำหนดลักษณะถ่านหินลิกไนต์จากตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหินซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก และการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์นั้นจะใช้การวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate analysis) ดังนี้

1. การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis)

การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor analysis) เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งของการวิเคราะห์หลายตัวแปร ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างปริมาณสุ่ม (Random quantities) ที่เรียกว่าปัจจัย (Factor) เพียงไม่กี่ปัจจัย โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ของความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (Covariance relationship) ระหว่างตัวแปรหลายตัว ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก ตัวแบบสำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยจึงเกิดจากแนวความคิดที่ว่าตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันมากจะถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน ส่วนตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันน้อยจะถูกจัดให้อยู่คนละกลุ่มกัน ซึ่งการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นจะศึกษาได้จากสหสัมพันธ์ที่สังเกตได้ (กิดาการ สายธนู, 2555)

1.1 ตัวแบบปัจจัยเชิงตั้งฉาก (Orthogonal factor model)

กำหนดให้ \mathbf{X} เป็นเวกเตอร์สุ่มที่สังเกตได้ซึ่งมีส่วนประกอบ p ส่วนประกอบ มีค่าเฉลี่ยเป็น $\boldsymbol{\mu}$ และเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวเป็น $\boldsymbol{\Sigma}$ ตัวแบบปัจจัยจะแสดงได้ด้วยการเขียน \mathbf{X} ให้อยู่ในรูปตัวแปรตามเชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสุ่มเพียงไม่กี่ตัวที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้คือ F_1, F_2, \dots, F_m ซึ่งจะเรียกตัวแปรสุ่มเหล่านี้ว่าปัจจัยร่วม (Common factors) และการแปรผันคือ $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$ ซึ่งจะเรียกการแปรผันเหล่านี้ว่าค่าคลาดเคลื่อน (Error) หรือบางครั้งเรียกว่าปัจจัยเฉพาะ (Specific factors) ดังนี้

$$\begin{aligned}
X_1 - \mu_1 &= l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\
X_2 - \mu_2 &= l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\
&\vdots \\
X_p - \mu_p &= l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pm}F_m + \varepsilon_p
\end{aligned}$$

หรืออาจเขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu} = \mathbf{L} \mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

$(p \times 1) \quad (p \times m) (m \times 1) \quad (p \times 1)$

นั่นคือ l_{ij} เป็นสัมประสิทธิ์ของค่าการให้น้ำหนัก (Loading) ของตัวแปรที่ i บนปัจจัยที่ j ดังนั้น \mathbf{L} จึงเป็นเมทริกซ์ของค่าการให้น้ำหนักของปัจจัย (Matrix of factor loadings)

ε_i เป็นปัจจัยเฉพาะซึ่งสัมพันธ์กับตัวแปรตาม X_i

$X_i - \mu_i$ เป็นค่าเบี่ยงเบน (Deviation) p ค่า ซึ่งแสดงด้วยเทอมของตัวแปรสุ่ม $p+m$ ตัว คือ $F_1, F_2, \dots, F_m, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_p$ ที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่ง $i=1, 2, \dots, p$ และ $j=1, 2, \dots, m$

ตัวแบบปัจจัยนี้จะมีข้อสมมุติของตัวแบบคือ

$$E(\mathbf{F}) = \mathbf{0}_{(m \times 1)} \quad \text{และ} \quad Cov(\mathbf{F}) = E(\mathbf{F}\mathbf{F}') = \mathbf{I}_{(m \times m)}$$

$$E(\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{0}_{(p \times 1)} \quad \text{และ} \quad Cov(\boldsymbol{\varepsilon}) = E(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}') = \boldsymbol{\Psi}_{(p \times p)} = \begin{bmatrix} \psi_1 & 0 & 0 \\ 0 & \psi_2 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & \dots \psi_p \end{bmatrix}$$

ซึ่ง \mathbf{F} และ $\boldsymbol{\varepsilon}$ เป็นอิสระกัน ดังนั้นจะได้ว่า

$$Cov(\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{F}) = E(\boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{F}') = \mathbf{0}_{(p \times m)}$$

จากข้อสมมุติและความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น จึงได้ตัวแบบปัจจัยเชิงตั้งฉากที่มีปัจจัยร่วม m ปัจจัย ดังนี้

$$\mathbf{X} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{L} \mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

$(p \times 1)$ $(p \times 1)$ $(p \times m)$ $(m \times 1)$ $(p \times 1)$

โดยที่

- μ_i เป็นค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่ i
- ε_i เป็นปัจจัยเฉพาะที่ i
- F_j เป็นปัจจัยร่วมที่ j
- L_{ij} เป็นค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่ i บนปัจจัยที่ j

และเวกเตอร์สุ่มที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้คือ \mathbf{F} และ $\boldsymbol{\varepsilon}$ จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. \mathbf{F} และ $\boldsymbol{\varepsilon}$ เป็นอิสระกัน
2. $E(\mathbf{F}) = \mathbf{0}$ และ $Cov(\mathbf{F}) = \mathbf{I}$
3. $E(\boldsymbol{\varepsilon}) = \mathbf{0}$ และ $Cov(\boldsymbol{\varepsilon}) = \boldsymbol{\Psi}$

โดยที่ $\boldsymbol{\Psi}$ เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม ที่เรียกว่า เมทริกซ์-
ความแปรปรวนเฉพาะ

1.2 ขั้นตอนของการวิเคราะห์ปัจจัย (Step of factor analysis)

กำหนดค่าสังเกต x_1, x_2, \dots, x_n บนตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กัน p ตัว เมื่อต้องการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ปัจจัยนั้นคือความพยายามที่จะตรวจสอบความสัมพันธ์ของความแปรปรวนร่วมของค่าสังเกต \mathbf{X} ซึ่งจะใช้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของตัวอย่าง \mathbf{S} ในการประมาณค่าเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของประชากร $\boldsymbol{\Sigma}$ ที่ไม่ทราบค่า ถ้าสมาชิกนอกแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ \mathbf{S} มีค่าน้อย หรือเมทริกซ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่าง \mathbf{R} มีค่าเข้าใกล้ศูนย์แล้ว แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันน้อย จึงไม่เกิดประโยชน์เมื่อทำการวิเคราะห์ปัจจัย เนื่องจากถ้าเกิดสถานการณ์นี้ขึ้นหมายความว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยเฉพาะ แต่วัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์ปัจจัยคือต้องการกำหนดปัจจัยร่วมที่สำคัญเพียงไม่กี่ปัจจัยในการอธิบายการแปรผันของค่าสังเกต x_1, x_2, \dots, x_n บนตัวแปร p ตัวที่มีความสัมพันธ์กัน (กิตติการ สายธนู, 2555)

สำหรับขั้นตอนของการวิเคราะห์ปัจจัยมีดังนี้

1. การถอดปัจจัย (Factor extraction)

เป็นการหาปัจจัยที่มีความสำคัญของข้อมูล โดยการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการให้น้ำหนักของปัจจัย (Factor loadings: L_{ij}) และความแปรปรวนเฉพาะ (Specific variances: ψ_i) ซึ่งจะพิจารณาการถอดปัจจัยด้วยวิธี 2 วิธี คือ

1.1 วิธีส่วนประกอบหลัก (Principal component method)

การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยส่วนประกอบหลักจะพิจารณาเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของตัวอย่าง \mathbf{S} ในเทอมคู่ลำดับของค่าประมาณของค่าเฉพาะและเวกเตอร์เฉพาะ $(\hat{\lambda}_1, \hat{\mathbf{e}}_1)$, $(\hat{\lambda}_2, \hat{\mathbf{e}}_2), \dots, (\hat{\lambda}_p, \hat{\mathbf{e}}_p)$ โดยที่ $\hat{\lambda}_1 \geq \hat{\lambda}_2 \geq \dots \geq \hat{\lambda}_p$ ซึ่งจะกำหนด m เป็นจำนวนปัจจัยร่วมและ $m < p$

สำหรับการแก้ปัญหาด้วยวิธีส่วนประกอบหลักโดยใช้ปัจจัยเพียงไม่กี่ปัจจัยนั้น ค่าประมาณของเมทริกซ์ค่าการให้น้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อจำนวนของปัจจัยมีค่ามากขึ้น

เช่น ถ้า $m=1$ จะมี $\tilde{\mathbf{L}} = \hat{\lambda}_1 \hat{\mathbf{e}}_1$

ถ้า $m=2$ จะมี $\tilde{\mathbf{L}} = [\hat{\lambda}_1 \hat{\mathbf{e}}_1 \mid \hat{\lambda}_2 \hat{\mathbf{e}}_2]$ โดยที่ $(\hat{\lambda}_1, \hat{\mathbf{e}}_1)$ และ $(\hat{\lambda}_2, \hat{\mathbf{e}}_2)$ เป็นคู่ลำดับ

2 คู่แรก ของค่าประมาณของค่าเฉพาะและเวกเตอร์เฉพาะสำหรับ \mathbf{S} หรือ \mathbf{R}

1.2 วิธีความควรจะเป็นสูงสุด (Maximum likelihood method)

ถ้าปัจจัยร่วม \mathbf{F} และปัจจัยเฉพาะ $\boldsymbol{\varepsilon}$ มีการแจกแจงปกติแล้ว จะประมาณค่าของค่าการให้น้ำหนักของปัจจัยและความแปรปรวนเฉพาะด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด เมื่อ \mathbf{F}_j และ $\boldsymbol{\varepsilon}_j$ มีการแจกแจงปกติร่วม (Jointly normal distribution) แล้วค่าสังเกต $\mathbf{X}_j - \boldsymbol{\mu} = \mathbf{L}\mathbf{F}_j + \boldsymbol{\varepsilon}_j$ จะมีการแจกแจงปกติ ซึ่งมีฟังก์ชันควรจะเป็น (Likelihood function) คือ

$$L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = (2\pi)^{-\frac{np}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}|^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{1}{2} \text{tr} \left[\boldsymbol{\Sigma}^{-1} \left(\sum_{j=1}^n (\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})' + n(\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu})(\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu})' \right) \right]}$$

$$= (2\pi)^{-\frac{(n-1)p}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}|^{-\frac{(n-1)}{2}} e^{-\frac{1}{2} \text{tr} \left[\boldsymbol{\Sigma}^{-1} \left(\sum_{j=1}^n (\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})' \right) \right]} \times (2\pi)^{-\frac{p}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}|^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{n}{2} (\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu})}$$

ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเมทริกซ์ \mathbf{L} และ $\boldsymbol{\psi}$ ที่ทำให้ $\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{L}\mathbf{L}' + \boldsymbol{\psi}$

ในการประมาณค่าเมทริกซ์ \mathbf{L} และ $\boldsymbol{\psi}$ ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุดทำได้โดยการหาตัวประมาณค่าความควรจะเป็นสูงสุด (ซึ่งก็คือ $\hat{\mathbf{L}}$ และ $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ ตามลำดับ) ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันควรจะเป็นมีค่ามากที่สุด

2. การหมุนปัจจัย (Factor rotation)

หากมีการถอดปัจจัยที่สำคัญออกจากข้อมูลแล้วได้ค่าการให้น้ำหนักของปัจจัยที่ยากต่อการอธิบายความหมาย ในการหาโครงสร้างของข้อมูลที่ง่ายขึ้นกว่าโครงสร้างดั้งเดิมเพื่อให้ได้ปัจจัยใหม่ที่ยากต่อการอธิบายความหมายจะต้องมีการหมุนปัจจัย

แนวความคิดการหมุนปัจจัยที่เป็นอุดมคตินั้นคือต้องการที่จะได้รูปแบบของค่าการให้น้ำหนักบนตัวแปรแต่ละตัวมีค่าสูงในปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงปัจจัยเดียว และมีค่าการให้น้ำหนักที่มีค่าปานกลาง หรือมีค่าต่ำในปัจจัยที่เหลือ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วบ่อยครั้งที่ไม่สามารถหาโครงสร้างที่ง่ายขึ้นได้ จึงใช้กราฟช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพิจารณาการหมุนปัจจัยให้ได้โครงสร้างที่ง่ายขึ้นได้ เมื่อพิจารณาปัจจัยรวม 2 ปัจจัยพร้อม ๆ กัน คือ $m=2$ และปัจจัยทั้งสองนี้ จะไม่มีความสัมพันธ์กัน โดยเป็นเวกเตอร์ที่มีความยาว 1 หน่วย ซึ่งตั้งฉากกัน ดังนั้นจึงเป็นการพล็อตกราฟของคู่ลำดับของค่าการให้น้ำหนัก (l_{i1}, l_{i2}) ทั้งหมด p จุด ซึ่งแต่ละจุดแทนตัวแปรแต่ละตัว แกนพิกัดจึงสามารถแสดงการหมุนปัจจัยเป็นมุม ϕ โดยมีค่าการให้น้ำหนักที่มีการหมุนปัจจัยแล้วเป็น \hat{l}_{ij}^* ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\hat{\mathbf{L}}^*_{(p \times 2)} = \hat{\mathbf{L}}_{(p \times 2)} \mathbf{T}_{(2 \times 2)}$$

โดยที่ $T = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$ เมื่อเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา

และ

$$T = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \text{ เมื่อเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา}$$

สำหรับชนิดของการหมุนปัจจัยนั้นแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. การหมุนปัจจัยเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Factor Rotation)

เป็นวิธีที่จะได้ปัจจัยใหม่ที่สร้างขึ้นแล้วปัจจัยใหม่นี้ไม่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงสถิติส่วนใหญ่รวมทั้งโปรแกรม Minitab จะหมุนค่าการให้น้ำหนักของ

ปัจจัยเพื่อให้ได้หลักเกณฑ์อย่างง่าย โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์แกมมาที่ใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการหมุนปัจจัย (Harman, 1976) จึงแบ่งวิธีการหมุนปัจจัยเชิงตั้งฉากเป็น 4 วิธี คือ

1.1 อีควิแมกซ์ (Equimax) เป็นวิธีที่หมุนค่าการให้น้ำหนักเพื่อให้ตัวแปรแต่ละตัวมีค่าสูงสำหรับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงปัจจัยเดียว และมีค่าการให้น้ำหนักต่ำสำหรับปัจจัยอื่นๆ ซึ่งค่าแกมมาของวิธีอีควิแมกซ์นี้จะมีค่าเท่ากับจำนวนของปัจจัยหารด้วยสอง

1.2 แวริแมกซ์ (Varimax) เป็นวิธีที่จะได้ความแปรปรวนของค่าการให้น้ำหนักของปัจจัยยกกำลังสอง (L_{ij}^2) มีค่ามากที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและค่าแกมมาของวิธีแวริแมกซ์นี้จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง

1.3 ควอร์ทิแมกซ์ (Quartimax) เป็นวิธีการหมุนค่าการให้น้ำหนักอย่างง่าย (Simple loadings) ซึ่งค่าแกมมาของวิธีควอร์ทิแมกซ์นี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

1.4 ออร์โทแมกซ์ด้วยแกมมา (Orthomax with gamma) เป็นวิธีที่ผู้ใช้สามารถกำหนดค่าของแกมมาได้เอง โดยที่แกมมาจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 และ 1

2. การหมุนปัจจัยเป็นมุมแหลม (Oblique factor rotation)

เป็นวิธีที่จะได้ปัจจัยใหม่ที่สร้างขึ้นแล้วปัจจัยใหม่มีความสัมพันธ์กัน

3. การคำนวณคะแนนของปัจจัย (Determination of factor score)

ถ้าต้องการประมาณค่าของปัจจัยที่เรียกว่าคะแนนของปัจจัย (Factor score) เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแปรตัวใหม่สำหรับการวิเคราะห์ต่อไป จะสามารถคำนวณคะแนนของปัจจัยได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$F_{(m \times 1)}^* = (L'L)^{-1} L'X$$

โดยที่ L เป็นเมทริกซ์ของค่าการให้น้ำหนัก ซึ่งมีมิติ pxm

และ X เป็นเวกเตอร์สุ่มที่สังเกตได้ ซึ่งมีมิติ $px1$

2. การวิเคราะห์การจำแนก (Discriminant analysis)

การจำแนก (Discrimination หรือ Classification) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปรเพื่อทำนายหรือพยากรณ์ว่าควรจัดค่าสังเกตใหม่ให้อยู่ในประชากรกลุ่มใด ซึ่งข้อมูลที่มีอยู่นั้นมีการจัดกลุ่มของประชากรไว้ชัดเจนอยู่แล้ว นั่นคือค่าสังเกตใด ๆ จะถูกจัดให้อยู่ได้ในประชากรกลุ่มเดียวเท่านั้น

หลักเกณฑ์ของการวิเคราะห์การจำแนก

ผู้วิจัยจะต้องเป็นผู้กำหนดจำนวนกลุ่มและเป็นผู้ทำการแบ่งกลุ่มจากข้อมูลที่มีอยู่ โดยข้อมูลแต่ละตัวรู้กลุ่มที่อยู่แน่นอนอยู่แล้ว นั่นคือ จะต้องมีการแบ่งกลุ่มก่อนที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์การจำแนก การวิเคราะห์การจำแนกจึงเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อหาสาเหตุที่ทำให้ข้อมูลมีกลุ่มที่อยู่แตกต่างกัน โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรอิสระจำนวน p ตัว (X_1, X_2, \dots, X_p) ที่คาดว่าจะจะเป็นสาเหตุที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มมีตัวแบบเชิงเส้นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

โดยที่ ε เป็นค่าคลาดเคลื่อน

ส่วนสมการจำแนกเชิงเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระจำนวน p ตัว (X_1, X_2, \dots, X_p) สำหรับของข้อมูลตัวอย่างขนาด n ที่เรียกว่า ฟังก์ชันจำแนกของฟิชเชอร์ (Fisher discriminant function) จะอยู่ในรูป

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p$$

โดยที่ \hat{Y} เป็นคะแนนของการจำแนก

สำหรับข้อสมมุติของการวิเคราะห์การจำแนกอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. ตัวแปรอิสระของข้อมูลแต่ละกลุ่มจะต้องมีการแจกแจงปรกติหลายตัวแปร

(Multivariate normal distribution) นั่นคือ $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]'$ มีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงปรกติ คือ

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\Sigma|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mu)'\Sigma^{-1}(\mathbf{x}-\mu)} \quad ; -\infty < x_i < \infty, i = 1, 2, \dots, p$$

ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วย $\mathbf{X} \sim N_p(\mu, \Sigma)$

สำหรับวิธีการตรวจสอบการแจกแจงปกติหลายตัวแปร จะใช้กราฟของการพลอตค่าระยะทางทั่วไปกำลังสอง (Squared generalized distance) หรือระยะห่างของ Mahalanobis ของข้อมูลแต่ละค่า โดยที่

$$d_j^2 = (\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}}) \quad ; j = 1, 2, \dots, n$$

ถ้าประชากรมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร และ $n \geq 25$ หรือ $n - p \geq 30$ จะได้ว่าค่า d_j^2 จะมีการแจกแจงเข้าสู่การแจกแจงไคกำลังสอง จากนั้นนำค่า d_j^2 และค่าไคกำลังสองที่ได้จากการแจกแจงไคกำลังสองมาพลอตกราฟ (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2552)

ขั้นตอนการพลอตกราฟค่าระยะทางทั่วไปกำลังสองมีดังนี้

1. คำนวณค่า d_j^2 ทุกค่าของ j ; $j = 1, 2, \dots, n$

2. เรียงลำดับค่า d_j^2 จากน้อยไปหามาก จะได้

$$d_{(1)}^2 \leq d_{(2)}^2 \leq \dots \leq d_{(n)}^2$$

3. หาค่าไคกำลังสองจากตารางไคกำลังสอง โดยหาค่า $\chi_{p, \frac{(j-0.5)}{n}}^2$

เมื่อ $\chi_{p, \frac{(j-0.5)}{n}}^2$ เป็นค่าควอไทล์ที่ $\frac{100(j-0.5)}{n}$ ของการแจกแจงไคกำลังสองที่

องศาเสรี p ที่ $\chi_{p, \frac{(j-0.5)}{n}}^2 = \chi_{p, \frac{(n-j+0.5)}{n}}^2$

4. พลอตคู่อันดับ $\left(\chi_{p, \frac{(j-0.5)}{n}}^2, d_{(j)}^2 \right)$

สำหรับเกณฑ์ในการพิจารณานั้น ถ้ากราฟอยู่ในรูปเชิงเส้นผ่านจุดกำหนดที่มีความชันเป็น 1 แสดงว่าค่าสังเกต \mathbf{x} ใด ๆ มีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร แต่ถ้ากราฟที่ได้ห่างจากเส้นตรงแบบเป็นระบบ แล้วสรุปว่า \mathbf{x} ไม่มีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร

2. พิจารณาค่าเมตริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของตัวแปรอิสระของทุกกลุ่มดังนี้

2.1 เมตริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของประชากรทั้ง k กลุ่มมีค่าเท่ากัน นั่นคือ $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \dots = \Sigma_k = \Sigma$ ซึ่งจะสามารถเขียนฟังก์ชันการจำแนกของฟิชเชอร์ได้

2.2 เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวข้องกับประชากรทั้ง k กลุ่ม มีค่าไม่เท่ากัน นั่นคือ มี Σ_i อย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน จะใช้ฟังก์ชันการจำแนกกำลังสอง (Quadratic discriminant function)

สำหรับสถิติที่ใช้ในการตรวจสอบว่าเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวข้องกับประชากรทั้ง k กลุ่มมีค่าเท่ากันหรือไม่นั้น จะใช้สถิติทดสอบของบ็อกซ์เอ็ม (Box's M Statistic) ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$M = \frac{|S_1|^{\frac{n_1-1}{2}} |S_2|^{\frac{n_2-1}{2}} \dots |S_k|^{\frac{n_k-1}{2}}}{|S_p|^{\frac{n_1+n_2+\dots+n_k-k}{2}}}$$

หรือ

$$\ln(M) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln |S_i| - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (N - k) \ln |S_p|$$

ส่วนสถิติที่ใช้ในการประเมินค่าคือ สถิติไคกำลังสอง (χ^2) สามารถคำนวณค่าได้จาก

$$\chi^2 = -2(1 - c_1) \ln(M)$$

โดยจะทำการตัดสินใจ ปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อ $\chi^2 > \chi^2_{(a_1)}$

และไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อ $\chi^2 < \chi^2_{(a_1)}$

โดยที่
$$c_1 = \frac{(k+1)(2p^2 + 3p - 1)}{6k(N-k)(p+1)} \quad \text{และ} \quad a_1 = \frac{1}{2}(k-1)p(p+1)$$

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์การจำแนก

1. เพื่อหาสาเหตุที่ทำให้กลุ่มมีความแตกต่างกัน เป็นการศึกษาว่ามีตัวแปรอิสระใดที่มีอิทธิพลในการแบ่งกลุ่ม โดยการสร้างสมการจำแนกซึ่งอยู่ในรูปเชิงเส้น
2. เพื่อทำนายค่าสังเกตใหม่ว่าควรจัดให้อยู่ในกลุ่มใด

การทำนายหรือพยากรณ์กลุ่ม

เมื่อได้ฟังก์ชันการจำแนกของพีชเชอร์แล้วจะสามารถทำนายหรือพยากรณ์ค่าสังเกตใด ๆ ว่าควรจัดอยู่ในกลุ่มใด เมื่อทราบค่าตัวแปรอิสระ X_1, X_2, \dots, X_p ได้ โดยพิจารณาจาก

1. ระยะทาง (Distance)

โดยพิจารณาระยะทางของหน่วยที่ j ไปยังจุดกลางกลุ่มหรือค่าเฉลี่ยของคะแนนการจำแนก 1 โดยมีเกณฑ์ในการตัดสินใจคือ เปรียบเทียบระยะทางหรือความแตกต่างของหน่วยที่ j กับจุดกลางกลุ่มที่ 1 และระยะทางระหว่างหน่วยที่ j กับจุดกลางหน่วยที่ 2 ถ้าค่าของระยะทางใดมีค่าน้อยกว่าก็จะทำนายหรือพยากรณ์ให้หน่วยที่ j อยู่ในกลุ่มนั้น

เกณฑ์การพยากรณ์หรือจัดหน่วยที่ j

กำหนด $D_1 =$ ระยะทางจากหน่วยที่ $j (x_j)$ กับค่ากลางของกลุ่มที่ 1 (\bar{x}_1)

$$D_1 = |\mathbf{b}'(\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}}_1)|$$

$D_2 =$ ระยะห่างจากหน่วยที่ $j (x_j)$ กับค่ากลางของกลุ่มที่ 2 (\bar{x}_2)

$$D_2 = |\mathbf{b}'(\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}}_2)|$$

โดย ถ้า $D_1 < D_2$ จะจัดให้หน่วยที่ $j (x_j)$ อยู่ในกลุ่มที่ 1

ถ้า $D_2 < D_1$ จะจัดให้หน่วยที่ $j (x_j)$ อยู่ในกลุ่มที่ 2

2. อัตราส่วนความควรจะเป็น (Likelihood ratio)

Welch (1939) ศึกษาการทำนายหรือพยากรณ์ของการจัดกลุ่ม โดยใช้อัตราส่วนความควรจะเป็น โดยค่าสังเกต \mathbf{X} ใด ๆ อาจจะมาจากระชากรกลุ่มที่ 1 หรือประชากรกลุ่มที่ 2 นั่นคือ $\mathbf{X} \sim f_1(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\Sigma}) \sim N_p(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\Sigma})$ และ $\mathbf{X} \sim f_2(\boldsymbol{\mu}_2, \boldsymbol{\Sigma}) \sim N_p(\boldsymbol{\mu}_2, \boldsymbol{\Sigma})$ โดยที่ f_1, f_2 เป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ \mathbf{X} ที่มีการแจกแจงปกติหลายตัวแปรซึ่งมาจากประชากรกลุ่มที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ดังนั้น อัตราส่วนความควรจะเป็นมีค่าดังนี้

$$\lambda = \frac{f_1(\boldsymbol{\mu}_1, \boldsymbol{\Sigma})}{f_2(\boldsymbol{\mu}_2, \boldsymbol{\Sigma})}$$

ในการพิจารณาว่าจะจัดกลุ่มของค่าสังเกต \mathbf{X} ใด ๆ คือ

ถ้า $\lambda > 1$ จะจัด \mathbf{X} ให้อยู่ในประชากรกลุ่มที่ 1

แต่ถ้า $\lambda \leq 1$ จะจัด \mathbf{X} อยู่ในประชากรกลุ่มที่ 2

3. ความน่าจะเป็นก่อน (Prior probability) และความน่าจะเป็นภายหลัง (Posterior probability)

Anderson (1951, 1984) ศึกษาอัตราส่วนความควรจะเป็น โดยขยายไปสู่ความน่าจะเป็นก่อนของกลุ่มที่ 1 และ 2 โดยกำหนดให้ความน่าจะเป็นก่อนของกลุ่มที่ 1 มีค่าเท่ากับ g และความน่าจะเป็นก่อนของกลุ่มที่ 2 มีค่าเท่ากับ $1-g$

ถ้าข้อมูลมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปรและเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเท่ากันแล้ว ($\Sigma_1 = \Sigma_2$) จะได้ความน่าจะเป็นมีเงื่อนไข (Conditional probability) คือ

$$P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 1}) = \frac{1}{|\mathbf{S}_p| \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_1)' \mathbf{S}_p^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_1) \right\}$$

ซึ่ง $(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_1)' \mathbf{S}_p^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_1) = D_1^2$ หรือระยะทางระหว่าง \mathbf{X}' ไปยังจุดกลางกลุ่มที่ 1 จึงได้ว่า

$$P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 1}) = \frac{1}{|\mathbf{S}_p| \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} D_1^2 \right\}$$

ในทำนองเดียวกัน ความน่าจะเป็น \mathbf{X} โดยกำหนดว่า \mathbf{X} มาจากประชากรกลุ่มที่ 2 คือ

$$P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 2}) = \frac{1}{|\mathbf{S}_p| \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} D_2^2 \right\}$$

เมื่อใช้ทฤษฎีเบส์ (Bayes's Theorem) โดยที่ทราบค่าข้อมูล \mathbf{X} ความน่าจะเป็นมีเงื่อนไขที่ \mathbf{X} จะมาจากประชากรกลุ่มที่ 1 หรือความน่าจะเป็นภายหลังของการอยู่ในกลุ่มที่ 1 คือ

$$P(\text{อยู่ในกลุ่มที่ 1} | \mathbf{X}') = \frac{g [P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 1})]}{g [P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 1})] + (1-g) [P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 2})]} \quad \dots(1)$$

ในทำนองเดียวกัน จะได้ความน่าจะเป็นภายหลังของการอยู่ในกลุ่มที่ 2 คือ

$$P(\text{อยู่ในกลุ่มที่ 2} | \mathbf{X}') = \frac{(1-g)[P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 2})]}{g[P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 1})] + (1-g)[P(\mathbf{X}' | \text{กลุ่มที่ 2})]}$$

...(2)

สำหรับการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มนั้นจะพิจารณาอัตราส่วนของสมการที่ (1) กับสมการที่ (2) ถ้าอัตราส่วนที่ได้มากกว่า 1 แล้วจะจัดค่าสังเกต \mathbf{X} ให้อยู่ในประชากรกลุ่มที่ 1

4. คะแนนการจำแนก (Discriminant score)

4.1 คะแนนการจำแนกเชิงเส้น (Linear discriminant score) ใช้เมื่อเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของประชากรระหว่างกลุ่มมีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณค่าคะแนนการจำแนกเชิงเส้น ได้ดังนี้

$$d_i(\mathbf{x}_0) = \boldsymbol{\mu}_i' \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{x}_0 - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_i' \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \bar{\mathbf{x}}_i + \ln(p_i)$$

โดยที่จะจัดค่าสังเกตใหม่ (\mathbf{x}_0) ให้อยู่ในประชากรกลุ่มที่ i (π_i) ซึ่งให้ค่า $d_i(\mathbf{x}_0)$ ที่มากที่สุด

ถ้าไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของประชากร $\boldsymbol{\mu}_i$ และ $\boldsymbol{\Sigma}$ จะประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ด้วยค่าสถิติ $\bar{\mathbf{x}}_i$ และ \mathbf{S}_{pooled} ตามลำดับ คือ

$$\hat{d}_i(\mathbf{x}_0) = \bar{\mathbf{x}}_i' \mathbf{S}_{pooled}^{-1} \mathbf{x}_0 - \frac{1}{2} \bar{\mathbf{x}}_i' \mathbf{S}_{pooled}^{-1} \bar{\mathbf{x}}_i + \ln(p_i)$$

โดยที่จะจัดค่าสังเกตใหม่ (\mathbf{x}_0) ให้อยู่ในประชากรกลุ่มที่ i (π_i) ซึ่งให้ค่า $\hat{d}_i(\mathbf{x}_0)$ ที่มากที่สุด

4.2 คะแนนการจำแนกกำลังสอง (Quadratic discriminant score) ใช้เมื่อเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของประชากรระหว่างกลุ่มไม่มีค่าเท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณค่าคะแนนการจำแนกกำลังสอง ได้ดังนี้

$$d_i^Q(\mathbf{x}_0) = -\frac{1}{2} \ln(|\boldsymbol{\Sigma}_i|) - \frac{1}{2} (\mathbf{x}_0 - \boldsymbol{\mu}_i)' \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (\mathbf{x}_0 - \boldsymbol{\mu}_i) + \ln(p_i)$$

โดยที่จะจัดค่าสังเกตใหม่ (\mathbf{x}_0) ให้อยู่ในประชากรกลุ่มที่ i (π_i) ซึ่งให้ค่า $d_i^o(\mathbf{x}_0)$ ที่มากที่สุด
 ถ้าไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของประชากร μ_i และ Σ_i จะประมาณค่าพารามิเตอร์
 เหล่านี้ด้วยค่าสถิติ $\bar{\mathbf{x}}_i$ และ \mathbf{S}_i ตามลำดับ คือ

$$\hat{d}_i^o(\mathbf{x}_0) = -\frac{1}{2} \ln(|\mathbf{S}_i|) - \frac{1}{2} (\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_i)' \Sigma_i^{-1} (\mathbf{x}_0 - \bar{\mathbf{x}}_i) + \ln(p_i)$$

โดยที่จะจัดค่าสังเกตใหม่ (\mathbf{x}_0) ให้อยู่ในประชากรกลุ่มที่ i (π_i) ซึ่งให้ค่า $\hat{d}_i^o(\mathbf{x}_0)$ ที่มากที่สุด

การประเมินความเหมาะสมของสมการจำแนก

เป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มของสมการจำแนก โดย
 พิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการจำแนกกลุ่มของเมทริกซ์ Confusion

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

การเก็บรวบรวมข้อมูล

โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน ปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีกำลังการผลิตติดตั้งรวมทั้งสิ้น 2,625 เมกกะวัตต์ โดยมีการใช้ถ่านหินลิกไนต์ประมาณปีละ 15-17 ล้านตันต่อปี และมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังจังหวัดทั้งภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คิดเป็นร้อยละ 20 ของกำลังการผลิตของทั้งประเทศ (โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, 2558) โรงไฟฟ้าแม่เมาะมีหน่วยกำลังการผลิตไฟฟ้า 10 เครื่อง ซึ่งโรงไฟฟ้าแต่ละเครื่องจะมีสายพานนำถ่านหินไปยังโรงไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ทำหนังสือขอความอนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของถ่านหินทางเคมีของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 4-13 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557 จากผู้ช่วยผู้ว่าการผลิตไฟฟ้า 2 ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เพื่อใช้ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

สำหรับข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง อยู่ในรูปปริมาณหรือค่าความเข้มข้นของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ดังนี้

1. เถ้า (Ash: %)
2. ความชื้น (Moisture: %)
3. สารระเหย (Volatile matter: %)
4. ค่าคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon: %)
5. ค่าความร้อนสูง (High Heating Value: HHV: KCal/Kg)
6. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O : %)
7. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO : %)
8. อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3 : %)
9. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2 : %)
10. ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5 : %)
11. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3 : %)
12. โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O : %)

13. ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2 : %)
14. แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2 : %)
15. ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3 : %)
16. แคลเซียมออกไซด์อิสระจากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (CaO free SO_3 : %)

การวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลปริมาณหรือค่าความเข้มข้นของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557 เพื่อตรวจสอบลักษณะทั่วไปของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหิน จากนั้นจะทำการแบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุด ได้แก่

1. ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบ (Training data set) เป็นชุดของข้อมูลที่น่าไปสร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ้ำถ่านหิน โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2555

2. ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Validation data set) เป็นชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการจำแนกในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ้ำถ่านหินว่ามีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 ถึงปี พ.ศ. 2557

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นดังนี้

1. ศึกษาลักษณะทั่วไปของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหิน ด้วยสถิติพรรณนา โดยหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) ของตัวแปรแต่ละตัว เพื่อกำหนดตัวแปรที่นำมาใช้ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ้ำถ่านหิน สำหรับขั้นตอนนี้จะใช้ข้อมูลทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557

2. สร้างสมการจำแนกกลุ่มเพื่อทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ้ำถ่านหิน โดยใช้ชุดของข้อมูลที่ใช้สร้างตัวแบบ ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2555 มีขั้นตอนดังนี้

- 2.1 กำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ้ำถ่านหินโดยใช้

- 2.2.1 แผนภาพการกระจาย (Scatterplot) และการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์รายคู่ระหว่างตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหิน

2.2.2 การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) และกราฟ Scree plot เพื่อหาจำนวนส่วนประกอบหลักที่จะใช้ในการกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหิน

2.2.3 การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis: FA) เมื่อได้จำนวนส่วนประกอบหลักจากขั้นตอนที่ 2.2 แล้ว จะทำการวิเคราะห์ปัจจัยโดยมีการถอดปัจจัย (Factor extraction) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก เพื่อรวมตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินที่มีความสัมพันธ์กันเข้าไว้ให้เป็นปัจจัยเดียวกัน จากนั้นจึงนำมาสร้างเป็นตัวแปรตัวใหม่ เพื่อใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินในขั้นตอนต่อไป

2.2 สร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์คุณภาพของถ่านหินด้วยการวิเคราะห์การจำแนก (Discriminant analysis)

3. ตรวจสอบความถูกต้องของสมการจำแนกที่ใช้ทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหิน โดยใช้ชุดของข้อมูลใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 ถึงปี พ.ศ. 2557

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ โดยรวบรวมข้อมูลจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557 ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

ผลการศึกษาลักษณะทั่วไปของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน

เมื่อใช้สถิติพรรณนา คือ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตรวจสอบลักษณะทั่วไปของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าสถิติพรรณนาของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
เถ้า	39.5080	3.4660
ความชื้น	13.0900	3.2940
สารระเหย	37.1480	2.1100
ค่าคาร์บอนคงที่	16.1720	1.8770
ค่าความร้อนสูง	3,937.20	265.00
โซเดียมออกไซด์	0.8174	0.1988
แมกนีเซียมออกไซด์	2.0509	0.2960
อลูมิเนียมออกไซด์	16.0410	2.1620
ซิลิกอนไดออกไซด์	31.8610	4.4420
ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์	0.1663	0.0242
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	18.3850	3.0510
โพแทสเซียมออกไซด์	2.0927	0.7018
ไททานเนียมไดออกไซด์	0.3375	0.1644
แมงกานีสไดออกไซด์	0.1305	0.0607

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ไอออนออกไซด์	12.6120	1.4100
แคลเซียมออกไซด์อิสระ จากซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	17.6220	6.8240

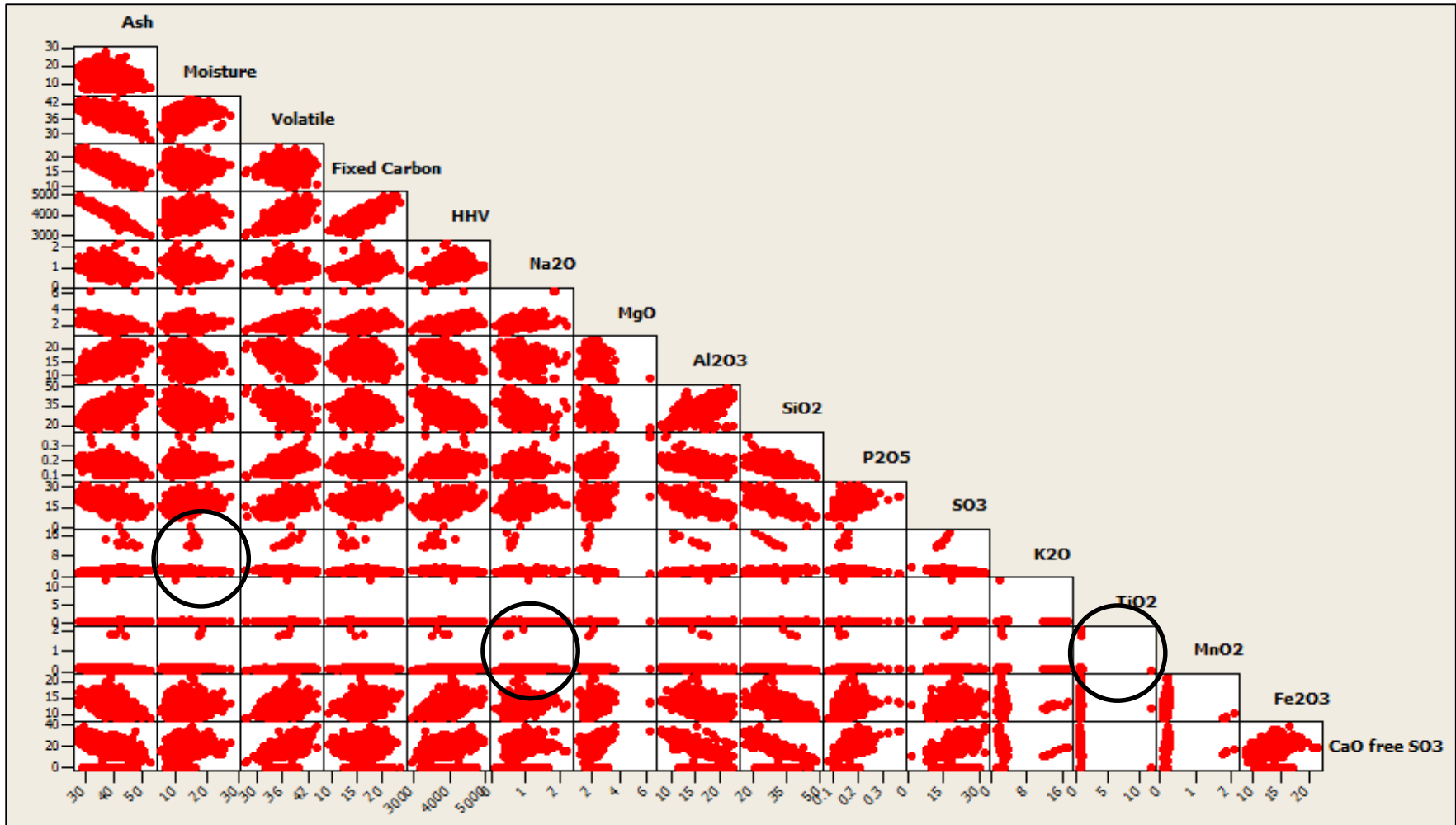
จากตารางที่ 4-1 เมื่อใช้สถิติพรรณนาคือ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตรวจสอบลักษณะทั่วไปของตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์โดยประมาณ 5 ตัว ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดคุณภาพของถ่านหิน พบว่าเปอร์เซ็นต์ของถ่านมีค่าเฉลี่ยเป็น 39.5080 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นมีค่าเฉลี่ยเป็น 13.0900 เปอร์เซ็นต์ของสารระเหยมีค่าเฉลี่ยเป็น 37.1480 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 16.1720 และค่าความร้อนสูงมีค่าเฉลี่ยเป็น 3,937.20 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

ดังนั้นเมื่อพิจารณาคูณลักษณะของถ่านหินตามหลักเกณฑ์การจำแนกประเภทของถ่านหินของมาตรฐานระบบระหว่างประเทศ และเกณฑ์กำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จึงพบว่ามีเพียงค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนสูงที่อยู่ในช่วงเกณฑ์การจำแนกประเภทของถ่านหินตามมาตรฐานระบบระหว่างประเทศและเกณฑ์กำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ เสกสรร แสงดาว และฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์ (2556) ที่ค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 2,100-6,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ผู้วิจัยจึงได้กำหนดค่าความร้อนสูงเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพถ่านหินออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 2,200-4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และกลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพดี เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงมากกว่า 4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

ผลการกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหิน

1. เมื่อพิจารณาแผนภาพการกระจายระหว่างตัวแปรรายคู่ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ได้ผลแสดงดังแผนภาพที่ 4-1 ซึ่งพบว่าตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่แสดงดังตารางที่ 4-2 กล่าวคือ p-value ของตัวแปรรายคู่ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินมีค่าน้อยมาก ๆ (≈ 0) ซึ่งหมายความว่าตัวแปรรายคู่ดังกล่าว มีความสัมพันธ์เชิงเส้นยกเว้นตัวแปร 3 คู่ที่มี p-value ของการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สันมาก ได้แก่ (1) ความชื้น

และโพแทสเซียมออกไซด์ มี $p\text{-value}=0.523$ (2) โซเดียมออกไซด์และแมงกานีสไดออกไซด์ มี $p\text{-value}=0.053$ และ (3) ไททานเนียมไดออกไซด์และแมงกานีสไดออกไซด์ มี $p\text{-value}=0.076$ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะประยุกต์การวิเคราะห์หลายตัวแปร เพื่อจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยลดจำนวนตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินที่มีความสัมพันธ์กันและมีอยู่เป็นจำนวนมากลงได้



ภาพที่ 4-1 แผนภาพการกระจายระหว่างตัวแปรรายคู่ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน

ตารางที่ 4-2 ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สันและค่า p-value ของการทดสอบสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน

	Ash	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	HHV	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃
Moisture	-0.069							
	(0.000*)							
Volatile	-0.566	0.511						
	(0.000*)	(0.000*)						
Fixed Carbon	-0.741	-0.324	-0.098					
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)					
HHV	-0.978	0.086	0.563	0.726				
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)				
Na₂O	-0.415	-0.239	0.077	0.393	0.381			
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)			
MgO	-0.537	-0.045	0.272	0.387	0.486	0.611		
	(0.000*)	(0.001*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)		
Al₂O₃	0.487	-0.216	-0.595	-0.067	-0.448	-0.364	-0.503	
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	
SiO₂	0.546	-0.214	-0.701	-0.054	-0.535	-0.347	-0.427	0.774
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

	Ash	Moisture	Volatile	Fixed Carbon	HHV	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO ₂	Fe ₂ O ₃
P₂O₅	-0.244	0.142	0.459	-0.089	0.228	0.111	0.216	-0.492	-0.545						
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)						
SO₃	-0.492	0.212	0.594	0.075	0.469	0.369	0.463	-0.855	-0.821	0.402					
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)					
K₂O	0.263	0.009	-0.159	-0.163	-0.244	-0.222	-0.327	0.239	0.182	-0.137	-0.346				
	(0.000*)	(0.523)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)				
TiO₂	0.138	-0.027	-0.090	-0.087	-0.125	-0.063	-0.139	0.183	0.117	-0.073	-0.168	0.076			
	(0.000*)	(0.047*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)			
MnO₂	-0.107	0.145	0.223	-0.051	0.101	0.026	0.030	-0.234	-0.245	0.196	0.187	-0.034	-0.024		
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.053)	(0.026*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.013*)	(0.076)		
Fe₂O₃	-0.470	0.072	0.439	0.187	0.504	0.256	0.236	-0.402	-0.679	0.242	0.362	-0.084	-0.028	0.112	
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.040*)	(0.000*)	
CaO free SO₃	-0.155	0.331	0.517	-0.241	0.147	0.094	0.169	-0.622	-0.578	0.538	0.568	-0.107	-0.091	0.258	0.172
	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)	(0.000*)

*p-value < 0.05

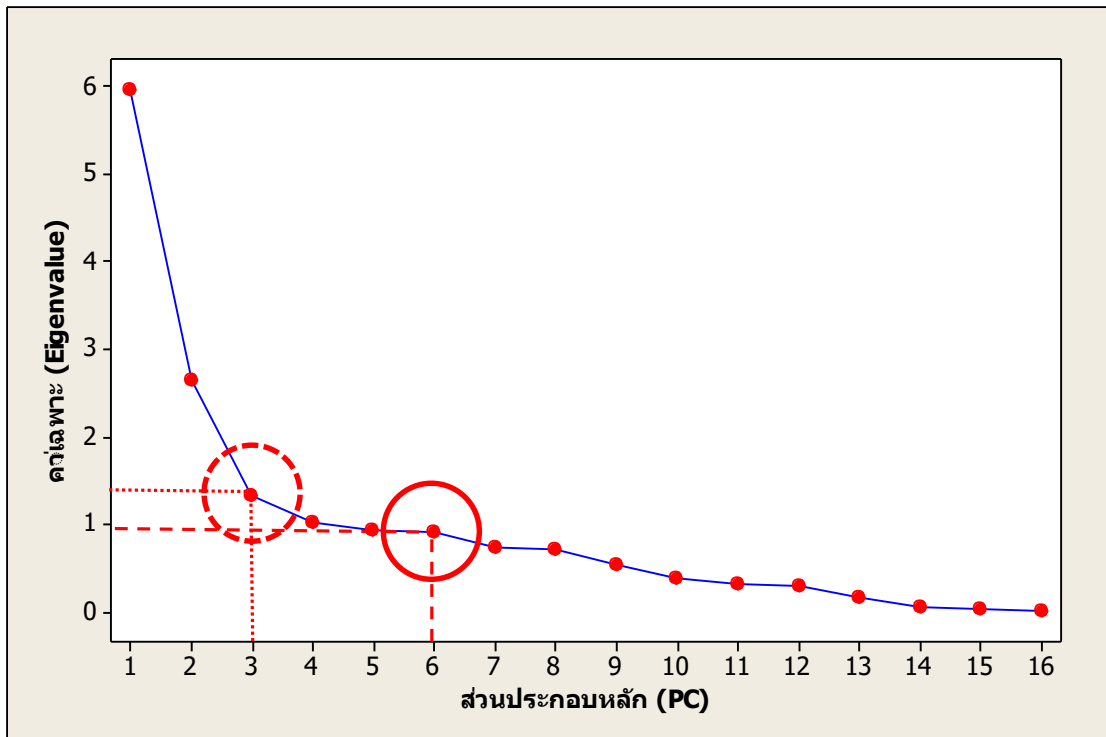
2. เมื่อใช้การวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักเพื่อพิจารณาหาจำนวนส่วนประกอบหลักที่จะใช้ในการกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านหิน ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่าเฉพาะ สัดส่วนความแปรผัน และสัดส่วนความแปรผันสะสมของแต่ละส่วนประกอบหลัก

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
ค่าเฉพาะ	5.9626	2.6416	1.3182	1.0278	0.9270	0.9020	0.7293	0.7155
สัดส่วนความแปรผัน	0.3730	0.1650	0.0820	0.0640	0.0580	0.0560	0.0460	0.0450
สัดส่วนความแปรผันสะสม	0.3730	0.5380	0.6200	0.6840	0.7420	0.7990	0.8440	0.8890
	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
ค่าเฉพาะ	0.5329	0.3708	0.3192	0.2978	0.1591	0.0552	0.0281	0.0130
สัดส่วนความแปรผัน	0.0330	0.0230	0.0200	0.0190	0.0100	0.0030	0.0020	0.0010
สัดส่วนความแปรผันสะสม	0.9220	0.9450	0.9650	0.9840	0.9940	0.9970	0.9990	1.0000

จากตารางที่ 4-3 พบว่า ค่าเฉพาะ (Eigenvalue) ของส่วนประกอบหลักที่ 1 ถึงส่วนประกอบหลักที่ 6 หรือ PC1 ถึง PC6 มีค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงกับ 1 จึงเลือกใช้ส่วนประกอบหลักทั้งหมดจำนวน 6 ส่วนประกอบ ซึ่งสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูล (Cumulative proportion of PC) ได้ร้อยละ 79.90

และเมื่อพิจารณากราฟ Scree plot สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-2 พบว่า กราฟมีการหักศอกที่ส่วนประกอบหลักที่ 3 แต่เนื่องจากส่วนประกอบหลักที่ 4 ถึงส่วนประกอบหลักที่ 6 มีค่าเฉพาะมากกว่าหรือใกล้เคียงกับ 1 อีกทั้งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มส่วนประกอบหลักทั้ง 3 ส่วนประกอบนี้เข้าไปอีกแล้วจะสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 17.8 ดังนั้นจึงเลือกใช้ส่วนประกอบหลักทั้งหมด 6 ส่วนประกอบ ซึ่งจะให้ผลสอดคล้องกันกับเมื่อพิจารณาด้วยการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก



ภาพที่ 4-2 กราฟ Scree plot สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก

3. เมื่อใช้การวิเคราะห์ปัจจัย โดยมีการลดปัจจัยด้วยการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลัก ซึ่งใช้จำนวนส่วนประกอบหลักในการรวมตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินที่มีความสัมพันธ์กันเข้าไว้เป็นปัจจัยเดียวกัน พบว่า ใช้จำนวนส่วนประกอบหลักจำนวน 6 ส่วนประกอบ จึงได้ปัจจัยจำนวน 6 ปัจจัย ที่จะนำไปสร้างเป็นตัวแปรตัวใหม่โดยพิจารณาจากค่าการให้น้ำหนัก (Loading) ของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินแต่ละตัว ทั้งเมื่อยังไม่มีการหมุนปัจจัยซึ่งให้ผลแสดงดังตารางที่ 4-4 และเมื่อมีการหมุนปัจจัยด้วยวิธี แวริแม็กซ์ (Varimax) ซึ่งให้ผลแสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-4 ค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินในแต่ละปัจจัย
เมื่อไม่มีการหมุนปัจจัย

ตัวแปร	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Factor6
Ash	0.791	0.464	0.334	-0.093	0.013	-0.069
Moisture	-0.232	0.566	-0.421	0.336	-0.278	0.070
Volatile matter	-0.752	0.360	-0.336	0.095	-0.139	-0.022
Fixed Carbon	-0.320	-0.851	-0.188	0.052	0.103	0.114
HHV	-0.771	-0.453	-0.391	0.080	-0.014	0.054
Na ₂ O	-0.487	-0.459	0.447	-0.220	0.031	-0.037
MgO	-0.626	-0.365	0.350	0.047	-0.114	0.010
Al ₂ O ₃	0.842	-0.223	-0.227	0.007	-0.032	0.063
SiO ₂	0.885	-0.224	-0.005	0.199	-0.059	0.160
P ₂ O ₅	-0.545	0.368	0.145	-0.135	0.103	-0.011
SO ₃	-0.835	0.187	0.232	0.044	-0.081	-0.044
K ₂ O	0.351	0.163	-0.352	-0.318	0.478	-0.377
TiO ₂	0.194	0.034	-0.158	-0.728	-0.541	0.278
MnO ₂	-0.259	0.265	-0.062	-0.127	0.502	0.741
Fe ₂ O ₃	-0.599	-0.059	-0.299	-0.361	0.090	-0.272
CaO free SO ₃	-0.565	0.576	0.197	-0.014	0.044	0.017
Variance	5.963	2.642	1.318	1.028	0.927	0.902
% Var	0.373	0.165	0.082	0.064	0.058	0.056

จากตารางที่ 4-4 พบว่าค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำถ่านหินในปัจจัยบางปัจจัยยังคงยากต่อการอธิบายความหมาย ดังนั้นเพื่อให้สามารถอธิบายความหมายของปัจจัยแต่ละปัจจัยได้ง่ายและชัดเจนมากขึ้น จึงต้องทำการหมุนปัจจัย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการหมุนปัจจัยแบบเวรีแม็กซ์ ซึ่งผลของค่าการให้น้ำหนักของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินในแต่ละปัจจัย
เมื่อมีการหมุนปัจจัยด้วยวิธีแวนริแมกซ์

Variable	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Factor6
Ash	-0.288	-0.924	-0.010	-0.153	0.057	0.035
Moisture	0.273	0.000	0.815	0.091	-0.006	-0.011
Volatile mather	0.674	0.371	0.491	0.044	0.020	-0.029
Fixed Carbon	-0.238	0.830	-0.343	0.127	-0.086	-0.033
HHV	0.269	0.934	0.046	0.109	-0.038	-0.027
Na ₂ O	0.317	0.330	-0.649	0.252	0.013	0.061
MgO	0.384	0.409	-0.374	0.437	-0.089	0.095
Al ₂ O ₃	-0.844	-0.218	0.048	-0.190	0.120	0.048
SiO ₂	-0.884	-0.344	0.002	0.048	-0.025	0.016
P ₂ O ₅	0.678	-0.004	0.014	-0.001	-0.007	-0.149
SO ₃	0.805	0.235	-0.013	0.292	-0.093	0.009
K ₂ O	-0.129	-0.143	0.005	-0.841	-0.026	0.000
TiO ₂	-0.105	-0.079	0.000	0.004	0.973	-0.011
MnO ₂	0.218	0.044	0.046	-0.012	0.011	-0.952
Fe ₂ O ₃	0.501	0.507	-0.047	-0.342	0.167	0.093
CaO free SO ₃	0.777	-0.147	0.166	0.092	-0.063	-0.162
Variance	4.520	3.360	1.621	1.273	1.023	0.984
% Var	0.282	0.210	0.101	0.080	0.064	0.061

จากตารางที่ 4-5 เมื่อมีการหมุนปัจจัยด้วยวิธีแวนริแมกซ์แล้วพบว่าค่าการให้น้ำหนัก
ของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินในแต่ละปัจจัยมีความชัดเจนมากขึ้น
ซึ่งถ้าพิจารณาค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรที่มีค่าตั้งแต่ 0.7 ขึ้นไปแล้ว สามารถรวมกลุ่มของตัวแปร
ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้านหินได้เป็นปัจจัยจำนวน 6 ปัจจัยแล้วสามารถอธิบาย
ความหมายของปัจจัยแต่ละปัจจัยได้ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 แสดงกลุ่มของออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกรัน (Slag) ได้แก่ Al_2O_3 , SiO_2 , SO_3 และ CaO free SO_3

ปัจจัยที่ 2 แสดงกลุ่มที่เกี่ยวกับค่าความร้อน (Heat) ได้แก่ Ash, Fixed Carbon และ HHV

ปัจจัยที่ 3 แสดงกลุ่มเกี่ยวกับความชื้น ได้แก่ Moisture

ปัจจัยที่ 4 แสดงกลุ่มโพแทสเซียมออกไซด์ ได้แก่ K_2O

ปัจจัยที่ 5 แสดงกลุ่มไททานเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ TiO_2

ปัจจัยที่ 6 แสดงกลุ่มแมงกานีสไดออกไซด์ ได้แก่ MnO_2

ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของธงชัย แก้วอุด (2553) ที่ว่าซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินที่มีอิทธิพลต่อแคลเซียมออกไซด์อิสระจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (CaO free SO_3)

ผลการสร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหิน

จากการศึกษาลักษณะทั่วไปของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน พบว่า ค่าความร้อนสูงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ โดยประมาณเพียงตัวเดียวที่มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานระบบระหว่างประเทศและเกณฑ์กำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผู้วิจัยจึงแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหินออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 2,200-4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม
2. กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพดี เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงกว่า 4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

ในการสร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินด้วย ปัจจัย 6 ปัจจัย ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรใหม่นั้น จะต้องมีการทดสอบว่าตัวแปรทั้ง 6 ตัวมีความสำคัญและสามารถใช้จำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินได้ด้วยสถิติวิลด์แลมบ์ดา (Wilk's Lamda) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 การทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน

Variable	Wilks' Lambda	F	df1	df2	p-value
Slag	0.938	270.940	1	4127	0.000
Heat	0.475	4566.272	1	4127	0.000
Moisture	0.999	4.599	1	4127	0.032
K ₂ O	0.998	9.415	1	4127	0.002
TiO ₂	1.000	.078	1	4127	0.779
MnO ₂	1.000	.402	1	4127	0.526

จากตารางที่ 4-6 จะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่มีความสำคัญและสามารถใช้ในการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินได้มี 4 ตัว คือ Slag, Heat, Moisture และ K₂O ซึ่งพิจารณาได้จาก p-value ของสถิติวิลคิล์แลมบ์ดา มีค่าน้อยกว่า 0.05 นั้นตัวแปรที่ไม่มีความสำคัญต่อการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินคือ TiO₂ และ MnO₂ จึงควรถูกตัดทิ้งไป

จากนั้นทำการตรวจสอบการมีพหุสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Multicollinearity) ทั้ง 4 ตัวที่ได้ ซึ่งได้ผลแสดงดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 การทดสอบพหุสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ

Variable	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	1.40095	0.00513	273.21	0.000	
Slag	0.106850	0.005026	21.26	0.000	1.0
Heat	0.370582	0.005209	71.14	0.000	1.0
Moisture	-0.002563	0.004694	-0.55	0.585	1.0
K ₂ O	0.058053	0.007034	8.25	0.000	1.0

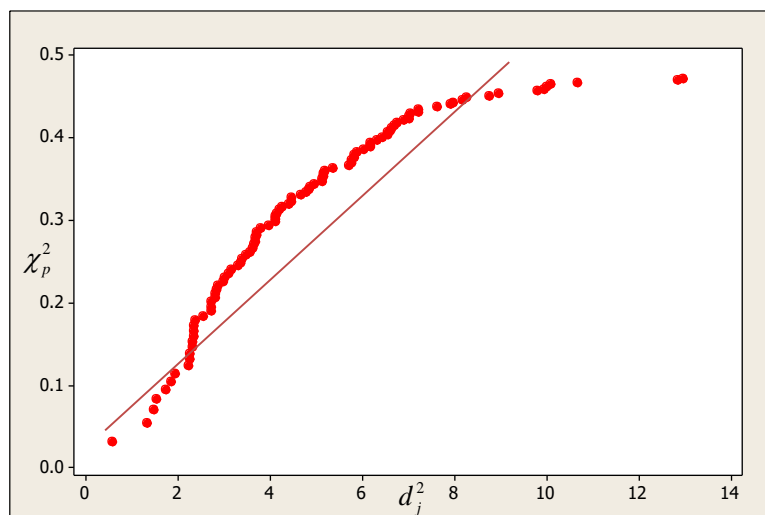
จากตารางที่ 4-7 จะเห็นได้ว่า VIF ของตัวแปร Slag, Heat, Moisture และ K₂O มีค่าน้อยกว่า 5 จึงแสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัวนี้ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ดังนั้น ตัวแปรอิสระที่มีความสำคัญหรือมีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินที่จะนำไปสร้างสมการจำแนกเพื่อทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหิน มี 4 ตัวคือ Slag, Heat, Moisture และ K_2O

เมื่อทำการตรวจสอบข้อสมมุติของการวิเคราะห์การจำแนก ซึ่งอยู่ภายใต้เงื่อนไข 2 ข้อให้ผลดังนี้

1. ตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัว ($\mathbf{X}=[X_1, X_2, X_3, X_4]'$) จะต้องมีการแจกแจงปรกติ

หลายตัวแปร นั่นคือ $\mathbf{X} \sim N_4(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ เมื่อพิจารณากราฟของการพลอตค่าระยะทางทั่วไปกำลังสองได้ผลดังนี้



ภาพที่ 4-3 ค่าระยะทางทั่วไปกำลังสอง

จากภาพที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าจุดส่วนใหญ่อยู่ใกล้เคียงกับเส้นตรง และพันอยู่รอบเส้นตรงอ้างอิง แต่มีจุดบางจุดที่อยู่ห่างจากเส้นอ้างอิง จึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวแปรทั้ง 4 ตัวคือ Slag, Heat, Moisture และ K_2O มีการแจกแจงปรกติหลายตัวแปร

2. การทดสอบความเท่ากันของเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวข้องกับกลุ่ม

ถ้ากำหนดให้คุณภาพของถ่านหินทั้ง 2 กลุ่มมี $\boldsymbol{\Sigma}_1$ และ $\boldsymbol{\Sigma}_2$ เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวข้องกับกลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐานและกลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพดี ตามลำดับ แล้ว สมมุติฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ

$$H_0 : \boldsymbol{\Sigma}_1 = \boldsymbol{\Sigma}_2$$

$$H_1 : \boldsymbol{\Sigma}_1 \neq \boldsymbol{\Sigma}_2$$

ภายใต้ H_0 เป็นจริง จะได้สถิติทดสอบของบ็อกซ์เอ็ม คือ

$$M = \frac{|S_1|^{\frac{n_1-1}{2}} |S_2|^{\frac{n_2-1}{2}}}{|S_p|^{\frac{n_1+n_2-k}{2}}}$$

เมื่อ	k	เป็นจำนวนกลุ่มของด้านหินที่พิจารณา ซึ่ง $k = 2$
	n_1	เป็นจำนวนข้อมูลของกลุ่มด้านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน ซึ่ง $n_1 = 3,206$
	n_2	เป็นจำนวนข้อมูลของกลุ่มด้านหินที่มีคุณภาพดี ซึ่ง $n_2 = 2,154$
	S_1	เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของกลุ่มด้านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน ซึ่ง $S_1 = 0.386609$
	S_2	เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของกลุ่มด้านหินที่มีคุณภาพดี ซึ่ง $S_2 = 0.388252$
	S_4	เมทริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวทั้งหมด ซึ่ง $S_4 = 0.420000$

ซึ่งสามารถคำนวณสถิติทดสอบของบ็อกซ์เอ็มได้ดังนี้

$$M = \frac{|0.386609|^{\frac{3,206-1}{2}} |0.388252|^{\frac{2,154-1}{2}}}{|0.420000|^{\frac{3,206+2,154-2}{2}}}$$

หรือ $\ln(M) = -2,758.765004$

สถิติที่ใช้ในการประเมินค่าคือ สถิติไคกำลังสอง (χ^2) สามารถคำนวณค่าได้จาก

$$\chi^2 = -2(1-c_1)\ln(M) \sim \chi^2_{(a_1)}$$

โดยที่ $c_1 = \frac{(2+1)(2(4)^2 + 3(4)-1)}{4(2)(5,360-2)(4+1)} = 0.00006019$

จึงได้ว่า

$$\chi^2 = -2(1-0.00006019)\ln(-2,758.765004) = 348.713$$

และที่องศาเสรี $a_1 = \frac{1}{2}(2-1)4(4+1) = 10$ จะได้ $\chi^2_{(10)} = 18.3070$

เนื่องจาก $\chi^2 = 348.713 > \chi^2_{(10)}$ จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นเมตริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของตัวแปรทั้ง 4 ตัวระหว่างกลุ่มคุณภาพของถ่านหินทั้งสองกลุ่มจึงมีค่าแตกต่างกัน

Gilbert (1969) และ Marks และDunn (1974) ได้แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้เมตริกซ์ความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วมเกี่ยวของประชากรกลุ่มหนึ่งจะมีค่ามากกว่าของประชากรอีกกลุ่มหนึ่งเป็นจำนวนเท่ามาก ๆ แล้วก็ตาม ผลการใช้สมการจำแนกกำลังสองจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักกับการใช้สมการจำแนกเชิงเส้นของพีชเซอร์

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์การจำแนกเชิงเส้นในการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน

เมื่อใช้ฟังก์ชันการจำแนกของพีชเซอร์พบว่าได้ค่าเฉพาะแสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ค่าเฉพาะของฟังก์ชันการจำแนกของพีชเซอร์

Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	1.381	100.0	100.0	.762

จากตารางที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าค่าเฉพาะมีค่า 1.381 ซึ่งมีความมากกว่า 1 แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างกลุ่มคุณภาพของถ่านหินทั้ง 2 กลุ่ม

สำหรับสถิติที่ใช้ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของฟังก์ชันการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินด้วยตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัว นั้นจะใช้สถิติวิลค์แลมบ์ดา ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 สถิติวิลค์แลมบ์ดาในการทดสอบความมีนัยสำคัญของฟังก์ชันการจำแนก

Test of Function(s)	Wilks' Lambda	Chi-square	df	p-value
1	.420	3577.896	4	.000

จากตารางที่ 4-9 พบว่า p-value ของสถิติวิลค์แลมบ์ดามีค่า ≈ 0 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงแสดงให้เห็นว่าควรใช้ตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัว คือ Slag, Heat, Moisture และ K_2O ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน

สมการการจำแนกเชิงเส้นของฟิชเชอร์ที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน แสดงผลได้ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 สัมประสิทธิ์ฟังก์ชันการจำแนกแคนนอนนิกัลที่ทำให้เป็นค่ามาตรฐาน

ตัวแปร	สัมประสิทธิ์
Slag	0.437
Heat	1.516
Moisture	-0.010
K ₂ O	0.237
(Constant)	-0.124

จากตารางที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของค่าความร้อน (Heat) มีค่ามากที่สุด ดังนั้นค่าความร้อนจึงมีอิทธิพลต่อการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหินมากที่สุด และสามารถเขียนสมการจำแนกเชิงเส้นของฟิชเชอร์ได้ดังนี้

$$\hat{Y}_0 = -0.124 - 0.437Slag + 1.516Heat - 0.010Moisture + 0.237K_2O$$

เมื่อ	\hat{Y}	เป็นค่าทำนายหรือค่าพยากรณ์ของคะแนนจำแนกสำหรับกลุ่มถ่านหิน
	Slag	เป็นค่าออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกรัน
	Heat	เป็นค่าความร้อน
	Moisture	เป็นความชื้น
	K ₂ O	เป็นโพแทสเซียมออกไซด์

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของสมการจำแนก

เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการจำแนกเชิงเส้นของฟิชเชอร์ที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน สำหรับชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบและชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบด้วยเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกของเมตริกซ์ Confusion ได้ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 เปอร์เซนต์ความถูกต้องในการจำแนกของเมตริกซ์ Confusion

ถนัดอยู่ในกลุ่ม	ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบ		ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ	
	กลุ่มถนัดที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน	กลุ่มถนัดที่มีคุณภาพดี	กลุ่มถนัดที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน	กลุ่มถนัดที่มีคุณภาพดี
กลุ่มถนัดที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน	2,148	96	821	143
กลุ่มถนัดที่มีคุณภาพดี	200	1,685	37	230
จำนวนข้อมูลถนัดทั้งหมด	2,348	1,781	858	373
สัดส่วนความถูกต้องของสมการจำแนก	0.9280		0.8538	

จากตารางที่ 4-11 พบว่าเปอร์เซนต์ความถูกต้องในการจำแนกของเมตริกซ์ Confusion ของสมการจำแนกเชิงเส้นที่ใช้ในการทำนายค่าหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถนัด สำหรับชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบมีค่าเป็นร้อยละ 92.81 ส่วนชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบมีค่าเป็นร้อยละ 85.38

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการจำแนกและกำหนดลักษณะคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ โดยรวบรวมข้อมูลจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เครื่องที่ 4-13 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2557 และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุดคือ ชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบเป็นข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2555 และชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบเป็นข้อมูลในปี พ.ศ. 2556 และปี พ.ศ. 2557

อภิปรายและสรุปผล

1. เมื่อพิจารณาลักษณะของถ่านหินตามหลักเกณฑ์การจำแนกประเภทของถ่านหินของมาตรฐานระบบระหว่างประเทศ และเกณฑ์กำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่ามีเพียงค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนสูงที่อยู่ในช่วงเกณฑ์การจำแนกประเภทของถ่านหินตามมาตรฐานระบบระหว่างประเทศและเกณฑ์กำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ เสกสรร แสงดาว และฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์ (2556) ที่มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 2,100-6,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ผู้วิจัยจึงใช้ค่าความร้อนสูงเป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหินออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน เป็น ถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 2,200-4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม และกลุ่มถ่านหินที่มีคุณภาพดี เป็นถ่านหินที่มีค่าความร้อนสูงมากกว่า 4,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

2. เมื่อทำการถอดปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบหลักแล้วจะมีการลดจำนวนตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินจาก 16 ตัว ให้เหลือเพียงแค่ 6 ตัว คือเป็น 6 ปัจจัยต่อจากนั้นจะทำการหมุนปัจจัยด้วยวิธีเวกซ์ เพื่อรวมกลุ่มของตัวแปรที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินที่มีความสัมพันธ์กันเข้าไว้ด้วยกัน โดยพิจารณาจากค่าการให้น้ำหนักของตัวแปรแต่ละตัวที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน ซึ่งปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยนี้สามารถอธิบายความหมายว่าเป็นกลุ่มของตัวแปรใหม่ ได้ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 เป็นกลุ่มออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกอน (Slag)

ปัจจัยที่ 2 เป็นกลุ่มค่าความร้อน (Heat)

ปัจจัยที่ 3 เป็นกลุ่มความชื้น (Moisture)

ปัจจัยที่ 4 เป็นกลุ่มโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)

ปัจจัยที่ 5 เป็นกลุ่มไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)

ปัจจัยที่ 6 เป็นกลุ่มแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)

3. เมื่อใช้สถิติวิวิคัลแลมปีดาตรวจสอบตัวแปรที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อการแบ่งกลุ่มคุณภาพของถ่านหิน พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินคือ ออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกอน (Slag) ค่าความร้อน (Heat) ความชื้น (Moisture) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งนำมาสร้างสมการจำแนกเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\hat{Y}_0 = -0.124 - 0.437\text{Slag} + 1.516\text{Heat} - 0.010\text{Moisture} + 0.237\text{K}_2\text{O}$$

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของสมการจำแนกเชิงเส้นที่ใช้ทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินที่ได้ พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการจำแนกกลุ่มคุณภาพของถ่านหินเป็นร้อยละ 92.80 สำหรับชุดของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบ และร้อยละ 85.35 สำหรับชุดของข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ

ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

1. สมการจำแนกกลุ่มที่ใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะที่สร้างขึ้นนี้ใช้ได้เฉพาะถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ เนื่องจากสมการจำแนกที่ได้สร้างมาจากองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ แต่อย่างไรก็ตามสมการจำแนกกลุ่มที่ได้นี้ยังคงมีประโยชน์ดังนี้

1.1 ใช้เป็นเครื่องมือในการกำหนดคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ได้ โดยพบว่ามีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำหนดคุณภาพของถ่านหิน ได้แก่ ออกไซด์ที่ทำให้เกิดตะกอน (Slag) ค่าความร้อน (Heat) ความชื้น (Moisture) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับการตรวจสอบด้วยวิธีการทางเคมีของ รชชย แก้วอุด (2553) และผลการศึกษาที่ได้นี้จะช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

1.2 เป็นแนวทางในการป้องกันและแก้ไขปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและปัญหาในด้านสุขภาพของประชาชนในชุมชนเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะ

2. สมการจำแนกกลุ่มที่ใช้ในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินลิกไนต์ของเหมืองแม่เมาะที่สร้างขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการทำนายหรือพยากรณ์กลุ่มคุณภาพของถ่านหินได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นหากมีข้อมูลสูญหายน้อยลง

3. การวิเคราะห์คุณภาพของถ่านหินในการวิจัยครั้งต่อไปอาจใช้การวิเคราะห์หลายตัวแปร ด้วยการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม หรือวิธีของข่ายงานระบบประสาทช่วยในการทำนายหรือพยากรณ์คุณภาพของถ่านหินลึกในต้นได้

บรรณานุกรม

- กรมเชื้อเพลิงธรรมชาติ. (2558). *ถ่านหิน*. เข้าถึงได้จาก <http://www.dmf.go.th/index.php?act=otherfuel&sec=coal>.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2550). *ปล่องภูเขาไฟลำปาง จังหวัดลำปาง*. เข้าถึงได้จาก <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=n06>.
- กัลยา วานิชย์บัญชา. (2552). *การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร* (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ธรรมสาร.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2558). *ข้อมูลโรงไฟฟ้าและเขื่อน*. เข้าถึงได้จาก http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=92&Itemid=117.
- กิดาการ สายธนู. (2555). *การวิเคราะห์หลายตัวแปร*. ชลบุรี: ม.ป.ท.
- กิตินันต์ แสงมณี, จิตพันธุ์ อินทร์เอียด, ศศิพันธุ์ ละวีรัตน์, วิเชียร รตนธงชัย, วันชัย ธรรมวานิช และสมพร จงคำ (2544). การวิเคราะห์ถ่านหินโดยวิธีการส่องผ่านด้วยรังสีแกมมา. ใน *การประชุมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ครั้งที่ 8* (หน้า 745-754). กรุงเทพฯ: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- ธงชัย แก้วอุด. (2553). *การวิเคราะห์องค์ประกอบของขี้ถ่านหินที่มีความสัมพันธ์กับแคลเซียมออกไซด์ ในถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ โดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูล*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2558). *เครื่อง CHN Analysis*. เข้าถึงได้จาก http://www.sc.chula.ac.th/department/Chemical_Technology/Analytical_unit/CHN.html.
- โรงไฟฟ้าแม่เมาะ. (2558). *ประวัติความเป็นมาโรงไฟฟ้าแม่เมาะ*. เข้าถึงได้จาก http://maemoh.egat.com/index_maemoh/index.php?content=history
- วารสารณิ คุณวานากิจ. (2540). การวิเคราะห์ถ่านหินลิกไนต์ในโรงไฟฟ้า. *วารสาร กฟผ.*, 6(1), 68-77.
- สถาบันการสอนวิทยาศาสตร์และส่งเสริมเทคโนโลยี. (2555). *แหล่งเรียนรู้เหมืองถ่านหินแม่เมาะ*. เข้าถึงได้จาก http://fieldtrip.ipst.ac.th/intro_sub_content.php?content_id=2&content_folder_id=5.

- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, ัญฐณิชา ตระการจินดาพันธ์ และเปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวด. (2555). ถ่านหินกับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย. *วารสารราชบัณฑิตยสถาน*, 37(4), 22-40.
- เสกสรร แสงดาว และฐิติศักดิ์ บุญปราโมทย์. (2556). คุณภาพถ่านหินสำหรับโรงไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานคุณภาพอากาศ. *วารสารวิจัยพลังงาน*, 10(3), 29-42.
- เหมืองแม่เมาะ. (2558). *ประวัติเหมืองแม่เมาะ*. เข้าถึงได้จาก <http://maemohmine.egat.co.th/>
- อรวรรณ ชัยลภากุล. (2529). *การวิเคราะห์ถ่านหินจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Anderson, T. W. (1951). Classification by Multivariate Analysis. *Psychometrical*, 16(1), 31-50.
- Anderson, T. W., & Bahadur, R. R. (1962). Classification into Two Multivariate Normal Distribution with Different Covariance Matrices. *Annals of Mathematical Statistics*, 33(2), 420-431.
- ASTM International. (2015). *Standard Classification of Coals by Rank*. Retrieved from <http://www.astm.org/Standards/D388.htm>
- Chao, W. A. N. G., Enyuan, W. A. N. G., Jiankun, X. U., Xiaofei, L. I. U., & Li, L. I. N. G. (2010). Bayesian discriminant analysis for prediction of coal and gas outbursts and applicatio. *Mining Science and Technology (China)*, 20(4), 520-523.
- Eskanazy, G., Finkelman, R. B., & Chattarjee, S. (2010). Some considerations concerning the use of correlation coefficients and cluster analysis in interpreting coal geochemistry data. *International Journal of Coal Geology*, 83(4), 491-493.
- Harman, H.H. (1972). *Modern factor analysis*. The United States of America: University of Chicago Press.
- Ogala, J. E., Akaegbobi, I., Omo-Irabor, O. O., & Finkelman, R. B. (2009). Statistical analysis of geochemical distribution of major and trace elements of the maastrichtian coal measures in the Anambra Basin, Nigeria. *Petroleum and coal*, 54(4), 261-270.

- Smoliński, A. (2014). Analysis of the impact of physicochemical parameters characterizing coal mine waste on the initialization of self-ignition process with application of Cluster Analysis. *Journal of Sustainable Mining*, 13(3), 36–40.
- Welch, B. L. (1939). Note on discriminant function. *Biometrika*, 31(1/2), 218-220.
- Wikipedia. (2015). *BlankMap_Thailand*. Retrieved from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlankMap_Thailand.png2558