

การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น กรณีศึกษาเหมืองหินปูนเขาวง  
จังหวัดสระบุรี



นาย ไกรวิทย์ บุญญกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROBABILISTIC ROCK SLOPE STABILITY ANALYSIS : A CASE STUDY OF  
KHAOWONG LIMESTONE QUARRY SARABURI PROVINCE



Mr. Kraiwit Punyokun

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความ

น่าจะเป็น กรณีศึกษาเหมืองหินปูนเขาวง จังหวัดสระบุรี

โดย

นายไกรวิทย์ ปุญญกุล


สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

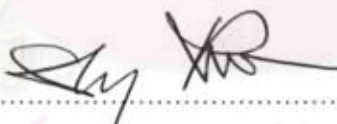
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทร พุ่มจันทร์

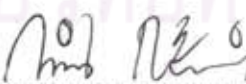
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरูญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สฤทธิเดช พัฒนเศรษฐพงษ์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนทร พุ่มจันทร์)

  
..... กรรมการ  
(ดร.พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ทรงวุฒิ อาทิตย์ทอง)

ไกรวิทย์ ปุณฺณกุล : การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น  
กรณีศึกษาเหมืองหินปูนเขาวง จังหวัดสระบุรี. (PROBABILISTIC ROCK SLOPE  
STABILITY ANALYSIS: A CASE STUDY OF KHAOWONG LIMESTONE  
QUARRY SARABURI PROVINCE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุนทร  
พุ่มจันทร์, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น  
เป็น วิธีวิเคราะห์ถูกพัฒนาจากการจำลองโครงสร้างชั้นหินคือ มุมเอียงเทและทิศทางของมุม  
เอียงเท รวมกับวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนดและจลนศาสตร์เข้าด้วยกัน  
ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นโอกาสของการพังทลาย (Probability of Failure) ข้อมูลที่ใช้  
ประกอบการวิเคราะห์ประกอบด้วย แผนที่แสดงโครงสร้างของชั้นหินซึ่งถูกจำลองมาจากการ  
ประยุกต์ใช้แบบจำลองทางธรณีสถิติที่ชื่อว่า แบบจำลองเกาส์เซียน (Sequential Gaussian  
Simulation) รูปร่างและขนาดของความลาด และคุณสมบัติเชิงกลของมวลหิน การวิเคราะห์  
เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็นถูกนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของเหมือง  
หินปูนเขาวง จ.สระบุรี ผลการศึกษาปรากฏว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิง  
จลนศาสตร์และเชิงกำหนดบ่งบอกว่าพื้นที่ศึกษามีโอกาสเกิดการพังทลายในรูปแบบของแบบ  
ระนาบและแบบรูปลิ้ม ขณะที่การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็นบ่งบอกว่า  
พื้นที่เสี่ยงต่อการพังทลายในรูปแบบการพังทลายแบบระนาบปรากฏในบริเวณทางด้านเหนือ  
ของบ่อเหมือง โดยมีโอกาสของการเกิดสูงสุดที่ 22 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาในครั้งนี้จึงได้  
นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพความลาดในบริเวณที่อาจจะเกิดปัญหาในรูปของการ  
ลดความชันของผนังบ่อเหมือง และความสูงชันบันได กล่าวโดยสรุปการศึกษาในครั้งนี้ได้นำ  
วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดในรูปของความน่าจะเป็น ซึ่งเป็นวิธีการศึกษาที่ใกล้เคียง  
กับความเป็นจริงของสภาพความลาด และให้ผลลัพธ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการประเมิน  
สถานภาพของการพังทลายของความลาดทั้งสามรูปแบบคือ การพังทลายแบบระนาบ การ  
พังทลายแบบรูปลิ้ม และการพังทลายแบบคะมำ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อการวาง  
แผนการทำเหมืองเพื่อป้องกันปัญหาด้านเสถียรภาพของบ่อเหมือง

ภาควิชา...วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ลายมือชื่อนิสิต..... ไกรวิทย์ ปุณฺณกุล  
สาขาวิชา...วิศวกรรมทรัพยากรธรณี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา .....2553....

## 5270228921 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : ROCK SLOPE ANALYSIS / GEOSTATISTIC / PROBABILISTIC ANALYSIS

KRAIWIT PUNYOKUN: PROBABILISTIC ROCK SLOPE STABILITY ANALYSIS: A  
CASE STUDY OF KHAOWONG LIMESTONE QUARRY SARABURI PROVINCE.

ADVISOR: ASST.PROF.SUNTHORN PUMJAN, PhD., 96 pp.

A probabilistic rock slope analysis is introduced in this study. The probabilistic rock slope analysis was developed by combining the structural model of dip angle and dip direction of rock mass, the deterministic slope analysis and kinematic slope analysis. The measure of safety is expressed in terms of the probability of failure. Input to the model consists of rock structure realization maps generated from Sequential Gaussian Simulation (SGS), the slope geometry and rock strength properties. The model was applied to the rock slope at Khaowong limestone quarry at Saraburi province. The results of kinematic and deterministic slope analysis indicate the potential of plane failure and toppling failure in the studied area. The probabilistic rock slope analysis indicates potential plane failure in the northern area of the pitwall with maximum probability of failure of 22 percents. Recommendations for rock slope stabilization were also made by reducing the slope angle and bench height. In conclusion, the proposed method provides a powerful tool for drawing a detailed and realistic picture of rock slope stability condition under 3 slope failure modes which are plane failure, wedge failure and toppling failure. This information will benefit the mine planning in relation to slope stability prevention program.

Department : Mining and Petroleum Engineering

Field of Study : Georesources Engineering

Academic Year : 2010

Student's Signature Kraiwit Punyokun

Advisor's Signature Sunthorn Pumjan

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ จากหลายๆ ฝ่าย ทางผู้วิจัยต้องขอขอบคุณบุคคลและองค์กรต่างๆ ซึ่งให้ความสนับสนุนและช่วยเหลือในทุกด้าน จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดังต่อไปนี้

ผศ.ดร.สุนทร พุ่มจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทั้งด้านวิชาการ ด้านติดต่อประสานงาน รวมถึงการตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำวิจัย ตลอดจนคอยให้คำแนะนำและกำลังใจในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเสมอ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน รศ. สฤทธิเดช พัฒนเศรษฐพงษ์ อ.ดร. พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต และ ดร.ทรงวุฒิ อาทิตย์ทอง ที่ช่วยให้คำปรึกษาแนะนำด้านวิชาการ และ ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้กำลังใจในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเสมอ

คุณระวิน อัญใจ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานวิจัยและทดสอบตัวอย่างเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ว.ศ. โสฐิติ จันทระเกตุ ที่อำนวยความสะดวกในการขอมูล เก็บตัวอย่าง ออกภาคสนาม ตลอดจนคอยให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ บริษัท เอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด ซึ่งอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

พี่ๆ เพื่อนๆ ปริญญาโท และน้องๆ ปริญญาตรี ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณลูก ปุณฺณกุล และ คุณแม่รัชฎาภรณ์ ปุณฺณกุล ที่คอยดูแลให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งคอยเป็นกำลังใจให้โดยตลอดจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์และเครื่องหมาย.....	ท
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2    ทบทวนวรรณกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์.....	4
2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด.....	5
2.3 ธรณีสถิติ.....	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
3    วิธีดำเนินการศึกษา.....	22
3.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	22
3.2 พื้นที่ศึกษา.....	24
3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	28
3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีจลนศาสตร์.....	29
3.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเชิงกำหนด.....	29
3.7 การดำเนินการด้วยวิธีธรณีสถิติ.....	30
3.8 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น.....	31

บทที่	ช หน้า
4	ผลการศึกษา และ อภิปราย..... 32
	4.1 การทดสอบทางกลศาสตร์..... 32
	4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินด้วยวิธีการจลนศาสตร์..... 34
	4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินด้วยวิธีการเชิงกำหนด..... 40
	4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินเชิงความน่าจะเป็น..... 51
	4.5 การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของบ่อเหมือง..... 67
5	สรุปผลการศึกษา และ ข้อเสนอแนะ..... 70
	5.1 สรุปผลการศึกษา..... 70
	5.2 ข้อเสนอแนะ..... 72
	รายการอ้างอิง..... 73
	ภาคผนวก..... 75
	ภาคผนวก ก การตรวจสอบสถานที่ตั้ง..... 76
	ภาคผนวก ข การทดสอบมวลหิน..... 84
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 96

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เกณฑ์การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย หรือค่า Factor of Safety กรณีปกติใช้เฉพาะค่าตัวเลขดัชนีเป็นตัวแปรหลักในการตัดสินใจ.....	5
4.1	สรุปการทดสอบกลศาสตร์.....	34
4.2	สรุปการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบเชิงกำหนด.....	40
4.3	สรุปการวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มเชิงกำหนด.....	43
4.4	ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้มาเชิงกำหนด.....	47
4.5	สถิติพื้นฐานของการวางตัวของหิน.....	53
4.6	เปรียบเทียบข้อมูลภาคสนามและแบบจำลองที่ 14 .....	57
ก1	ข้อมูลทิศทางการวางตัวของหินบริเวณเหมืองหินปูนเขาวง.....	79
ข1	ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม .....	84
ข2	แสดงผลการทดลองการทดสอบดัชนีก่จุด แบบแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก...	87
ข3	แสดงผลการทดลองการทดสอบดัชนีก่จุด แบบแท่งตัวอย่างรูปใดๆ.....	87
ข4	ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดี่ยว.....	89
ข5	ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน.....	90
ข6	การทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงแนวตั้งขนาด 10 kN.....	92
ข7	การทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงแนวตั้งขนาด 15 kN .....	93
ข8	การทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงแนวตั้งขนาด 20 kN .....	94
ข9	ความเครียดแนวตั้งและความเค้นเฉือน.....	95

## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2.1	รูปแบบการพังทลาย กับ ข้อมูลโครงสร้างชั้นหินที่ฉายลงไปสเตริโอกราฟ.....	4
2.2	รูปแบบการพังทลายแบบระนาบ.....	6
2.3	การพังทลายรูปลิ้ม.....	8
2.4	รูปแบบการพังทลายแบบกะม่า.....	9
2.5	การวิเคราะห์แบบกะม่า.....	10
2.6	พารามิเตอร์ในการค้นหาคู่ของตัวอย่างสำหรับคำนวณเวริโอแกรม.....	13
2.7	เวริโอแกรมจากการทดลองได้ และ การจำลองเวริโอแกรม.....	13
2.8	รูปแบบเวริโอแกรมทั่วไป.....	14
2.9	แผนภาพการดำเนินการการจำลองธรณีสถิติแบบเกาซ์เซียน.....	17
2.10	สรุปวิธีการทำแผนที่แสดงความเสี่ยงในการพังทลายของมวลหิน.....	18
2.11	ขั้นตอนการประเมินเสถียรภาพของการขุดมวลหินก่อนการสร้างถนนผ่านภูเขา ด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ .....	20
2.12	ผลลัพธ์การประเมินเสถียรภาพของการขุดมวลหินก่อนการสร้างถนนผ่านภูเขา ด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ .....	20
3.1	แผนภาพการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.2	บ่อเหมืองด้านทิศเหนือ ของเหมืองหินปูนเขาวง.....	24
3.3	ภาพถ่ายทางอากาศของเหมืองหินปูน บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (ท่าหลวง)... ..	24
3.4	แผนที่แสดงภาพรวมเหมืองหิน N-1, N-2 และ O-1 ของเหมืองหินปูน บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (ท่าหลวง).....	27
4.1	สเตอริโอเน็ตการวางตัวหินปูนของเหมืองหินปูนเขาวง.....	35
4.2	สเตอริโอเน็ตการจัดกลุ่มของการวางตัวของชุดหิน.....	35
4.3	ผลวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบด้วยวิธีจลนศาสตร์.....	36
4.4	ผลวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มด้วยวิธีจลนศาสตร์.....	37
4.5	ผลวิเคราะห์การพังทลายแบบกะม่าด้วยวิธีจลนศาสตร์.....	37
4.6	ผลวิเคราะห์การพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์.....	39
4.7	ผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสเกิดการพังทลายแบบระนาบ.....	41
4.8	รูปแบบการพังทลายแบบระนาบ.....	41

ภาพที่		หน้า
4.9	ผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสเกิดการพังทลายรูปปลีมี.....	43
4.10	แบบจำลองการพังทลายรูปปลีมี.....	44
4.11	ผลการวิเคราะห์การพังทลายรูปปลีมี.....	44
4.12	ผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสเกิดการพังทลายแบบคะมา.....	45
4.13	ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบคะมาเชิงกำหนดด้วยโปรแกรม ROCKTOPPLE.....	46
4.14	ตัวอย่างการคำนวณบล็อกที่ 61.....	46
4.15	กราฟความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำในแต่ละบล็อก.....	49
4.16	อีตโทแกรมค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในแต่ละบล็อก.....	50
4.17	การเตรียมข้อมูลมุมเท.....	52
4.18	การเตรียมข้อมูลทิศทางการวางตัว.....	52
4.19	กราฟอีตโทแกรมของค่ามุมเทของมวลหิน.....	53
4.20	กราฟอีตโทแกรมของค่าทิศทางการวางตัวของมวลหิน.....	54
4.21	การเปลี่ยนแปลงข้อมูลด้วยวิธีธรณีสถิติของมุมเท.....	54
4.22	แบบจำลองแวกไอแกรมของมุมเท.....	55
4.23	แบบจำลองแวกไอแกรมของค่าแนวการวางตัว.....	56
4.24	ตัวอย่างแบบจำลองมุมเท ลำดับที่ 1-5.....	57
4.25	ตัวอย่างแบบจำลองทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ลำดับที่ 1-5.....	57
4.26	ตัวอย่างการซ้อนทับระหว่างแผนที่มีมุมเท และ หน้าเหมือง.....	58
4.27	การวิเคราะห์ความไวของค่ามุมเทในการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบ.....	59
4.28	พื้นที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น.....	60
4.29	อีตโทแกรมของโอกาสการพังทลายของบล็อกในตำแหน่ง E698215 และ N1624485.....	61
4.30	แผนที่ความเสี่ยงต่อการพังทลายแบบระนาบ .....	62
4.31	พื้นที่ที่มีโอกาสการเกิดการพังทลายรูปปลีมี .....	62
4.32	การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลหินรูปปลีมีเชิงความน่าจะเป็น .....	63
4.33	อีตโทแกรมของมุมเทด้านที่ 1 .....	64
4.34	อีตโทแกรมของมุมเทด้านที่ 2 .....	64
4.35	อีตโทแกรมของการวางตัวของชั้นหินด้านที่ 1.....	65

ภาพที่		หน้า
4.36	อีลโทแกรมของการวางตัวของชั้นหินด้านที่ 2.....	65
4.37	อีลโทแกรมอัตราของเสียงความปลอดภัยในการวิเคราะห์เสถียรภาพการ พังทลายรูปลิ้ม.....	66
4.38	การปรับความชันของผนังบ่อเพื่อลดการพังทลายแบบระนาบ.....	67
4.39	การปรับผนังบ่อบริเวณทางไปบ่อเหมือง N เมื่อมีความสูงชันบันไดเท่ากับ 10 เมตร .....	69
4.40	การปรับผนังบ่อที่มีโอกาสการพังทลายแบบค้ำมาเมื่อมีความสูงชันบันไดเท่ากับ 17 เมตร.....	69
ก1	บริเวณเหมือง O .....	76
ก2	บริเวณเหมือง N .....	76
ก3	หินปูนธรรมชาติ .....	76
ก4	หินปูนคุณภาพดี .....	77
ก5	หินแอนดิไซต์.....	77
ก6	โครงสร้างรูปประทุนคว่ำ .....	77
ก7	การวัดความหนาของชั้นหิน .....	78
ก8	การตรวจสอบสถานที่ตั้ง .....	78
ข1	รูปแบบการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม .....	84
ข2	การทดสอบดัชนีก่อดจุดแบบแนวด้านหัวท้าย.....	85
ข3	การทดสอบดัชนีก่อดจุดแบบการแนวด้านข้าง .....	85
ข4	การทดสอบดัชนีก่อดจุดแบบแท่งตัวอย่างรูปใดๆ.....	86
ข5	ตัวอย่างหินหลังจากทำการทดสอบดัชนีก่อดจุดแบบหัวท้าย และ ด้านข้าง.....	86
ข6	ตัวอย่างหินหลังจากทำการทดสอบดัชนีก่อดจุดแบบตัวอย่างรูปใดๆ .....	87
ข7	การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว.....	88
ข8	ลักษณะการแตกของตัวอย่าง.....	88
ข9	การทดสอบกำลังอัดสามแกน .....	89
ข10	แท่งหินตัวอย่างหลังทำการทดสอบ .....	90
ข11	กราฟการพังทลายตามทฤษฎี Mohr-Coulomb โดยใช้โปรแกรม RocLab .....	90
ข12	การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง.....	91
ข13	ตัวอย่างก่อนการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง .....	91

ภาพที่		หน้า
ข14	ตัวอย่างหลังจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง.....	91
ข15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และแรงเฉือน .....	95
ข16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวตั้งและความเค้นเฉือน.....	95



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการสัญลักษณ์และเครื่องหมาย

$A$	คือ ค่าระยะความยาวระนาบการพังทลาย
$A_1$	คือ ความต่างของความสูงระหว่างมวลหินที่อยู่ติดกับบล็อกที่ 1
$A_a$	คือ สัดส่วนของขนาดรูปสี่เหลี่ยม
$\alpha$	คือ ความเร่งเนื่องจากการระเบิด
$B_b$	คือ สัดส่วนของขนาดรูปสี่เหลี่ยม
$\beta$	คือ มุมลาดเอียง หรือมุมเอียงหน้าตัดความลาด
$C$	คือ ค่าโคฮีชันของระนาบ
$C_A$	คือ ค่าโคฮีชันในระนาบ A
$C_B$	คือ ค่าโคฮีชันในระนาบ B
$C(u_0, u_0)$	คือ ค่าความแปรปรวนของ $y(u)$
$\Delta x$	คือ ความกว้างของมวลหินที่เกิดการพังทลายแบบกะมา
F.S.	คือ ตัวประกอบสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย
$\gamma$	คือ หน่วยน้ำหนักของหิน
$\gamma_w$	คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ
$\gamma(h)$	คือ แวริโอแกรม
$\bar{\gamma}(v_\alpha, v_\beta)$	คือ ค่าเฉลี่ยของแวริโอแกรม ( $\gamma(h)$ ) ของตัวอย่าง
$H$	คือ ความสูงชั้นบันได

$P_n$	คือ แรงกระทำด้านข้างของมวลหินที่ $n$
$P_{n-1}$	คือ แรงกระทำด้านข้างของมวลหินที่ $n-1$
$\emptyset$	คือ มุมเสียดทานของมวลหิน
$\emptyset_A$	คือ มุมเสียดทานในระนาบ A
$\emptyset_B$	คือ มุมเสียดทานในระนาบ B
$\psi_p$	คือ มุมเทของระนาบ
$\psi_f$	คือ ความชันของผนังป่อเหมือง
$\psi_A$	คือ มุมเทของระนาบ A
$\psi_B$	คือ มุมเทของระนาบ B
$\psi_5$	คือ มุมเทของระนาบ 5
$Q_n$	คือ แรงกระทำตั้งฉากของมวลหินที่ $n$
$K_n$	คือ ระยะที่เกิดแรงปฏิกิริยาที่ฐานของมวลหินที่ $n$
$L_n$	คือ ระยะที่เกิดแรงกระทำด้านข้างของมวลหินที่ $n-1$
$M_n$	คือ ระยะที่เกิดแรงกระทำด้านข้างของมวลหินที่ $n$
$m(u_0)$	คือ ค่าคาดหวังที่สุ่มตัวแปร $y(u)$
$n$	คือ ข้อมูลปฐมภูมิ
$N$	คือ ข้อมูลที่ถูกประเมินก่อนหน้า
$R_n$	คือ แรงปฏิกิริยาที่ฐานของมวลหินที่ $n$
$S_a$	คือ ระยะความกว้างของชั้นหินในชั้นหินกลุ่ม A
$S_b$	คือ ระยะความกว้างของชั้นหินในชั้นหินกลุ่ม B

$\sigma_{SK}$	คือ ค่าความแปรปรวนของค่าที่ถูกประเมินด้วยระบบครีกริ่ง
$\theta_{13}$	คือ มุมระหว่างระนาบ 1 และ 3
$\theta_{na.nb}$	คือ มุมที่ตั้งฉากระหว่างระนาบ A และ B
$\theta_{2na}$	คือ มุมระหว่างระนาบ 2 กับมุมตั้งฉากกับระนาบ A
U	คือ ค่าแรงยกตัว
V	คือ ค่าแรงผลักรองน้ำ
$(v_\alpha, V)$	คือ ค่าเฉลี่ยของเวกเตอร์ ( $\gamma(h)$ ) ของตัวอย่าง $(v_\alpha, V)$
W	คือ น้ำหนักของมวลสาร
$w_\alpha$	คือ ค่าน้ำหนักการประเมิน
X	คือ สัดส่วนของขนาดรูปสี่เหลี่ยม
$Y_n$	คือ ขนาดของมวลหินบล็อก n
$y_\alpha$	คือ ข้อมูลที่เปลี่ยนให้เป็นการกระจายตัวแบบปกติ
$y(u_0)$	คือ ค่าที่ถูกประเมิน
$[y(u_0)]^{\circ}SK$	คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ถูกประเมินด้วยระบบครีกริ่ง
Z	คือ ความสูงแนวตั้งของรอยร้าวที่อยู่ในความลาด
$Z_i$	คือ ตัวแปรสุ่ม
$Z_w$	คือ ความสูงแนวตั้งของระดับน้ำในรอยร้าวที่อยู่ในความลาด



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

การพังทลายของบ่อเหมือง เป็นปัญหาที่สำคัญของการทำเหมืองแร่ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากการพังทลายของบ่อเหมืองมักส่งผลโดยตรงกับสิ่งแวดล้อม ค่าใช้จ่าย และความปลอดภัยของการทำเหมืองแร่ ดังนั้นจึงได้นำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดมาใช้กับงานวิศวกรรมเหมืองแร่เพื่อประเมินความปลอดภัยความลาดของบ่อเหมือง ซึ่งการประเมินเสถียรภาพความลาดของบ่อเหมืองเพื่อช่วยทำให้เกิดความมั่นใจในการปฏิบัติงานในบ่อเหมือง อีกทั้งยังป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมกับบริเวณข้างเคียงของเหมืองแร่เมื่อบ่อเหมืองเกิดการพังทลาย

การประเมินเสถียรภาพความลาดของบ่อเหมืองมักจะใช้ดัชนีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (F.S.) โดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมากกว่าหนึ่งนั่นถือว่าความลาดของมวลหินมีเสถียรภาพ โดยสูตรคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยนั้นได้รวมคุณสมบัติวัสดุทางธรณีวิทยา ลักษณะรูปทรงเลขาคณิตของความลาดของบ่อเหมือง และโครงสร้างมวลหินที่เกิดในธรรมชาติ ซึ่งสามารถคำนวณได้หลายวิธีการ เช่น การวิเคราะห์เชิงกำหนด (Deterministic Analysis) การวิเคราะห์จลนศาสตร์ (Kinematic Analysis) และการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เป็นต้น เพื่อที่จะจำลองลักษณะทางธรณีวิทยาของมวลหินในหน้างานให้มีความใกล้เคียงกับธรรมชาติมากที่สุด ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำผลวิเคราะห์ไปใช้วางแผนเสถียรภาพความลาดของบ่อเหมืองได้อย่างเหมาะสม

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของบ่อเหมืองทั้งบ่อเพื่อหาโอกาสการพังทลายของความลาดของบ่อเหมือง มักจะเป็นงานที่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากทั้งการเก็บข้อมูล การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติวัสดุทางธรณีวิทยา เช่น ค่าโคฮีชันซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลสาร และลักษณะของโครงสร้างมวลหินที่เกิดในธรรมชาติ เช่น ประเภทแนวแตกของโครงสร้างมวลหินโดยเฉพาะโครงสร้างมวลหินเหล่านี้ล้วนมักจะไม่แน่นอน และยังคงต้องตรวจสอบความลาดของบ่อ

เหมือนหลายหน้างาน จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการหลายครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำผลทดสอบเป็นข้อมูลประกอบในการหาตัวประกอบค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยได้เหมาะสม

นอกจากปัญหาความไม่แน่นอนของคุณสมบัติวัสดุทางธรรมชาติ และลักษณะของโครงสร้างมวลหินในการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของบ่อเหมืองทั้งเหมืองแล้ว ยังมีปัญหาเรื่องข้อมูลที่จะใช้วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดซึ่งมีเป็นจำนวนมาก ทำให้ยากต่อการจัดการข้อมูล และอาจจะมีปัญหาในการแสดงผลเพื่อวางแผนและติดตามแก่ผู้ที่ปฏิบัติการแก้ปัญหาเสถียรภาพความลาดของบ่อเหมืองก็เป็นได้

งานวิจัยชิ้นนี้ให้ผลลัพธ์เป็นแผนที่ความเสี่ยงต่อการพังทลายของมวลหิน ซึ่งมาจากการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Slope Analysis) และการวิเคราะห์โดยวิธีนี้ได้นำเอาความไม่แน่นอนของลักษณะโครงสร้างของมวลหินจากแบบจำลองทางธรณีสัณติแบบเกาส์เซียนมาประกอบการวิเคราะห์เพื่อประเมินโอกาสการพังทลาย (Probability of Failure) และสามารถนำไปสู่การกำหนดบริเวณที่มีเสถียรภาพต่ำของบ่อเหมืองเพื่อติดตามและแก้ไขต่อไป

## 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 หาโอกาสการพังทลายด้วยรูปแบบต่างๆของบ่อเหมืองด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

1.2.2 ระบุพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดพังทลายรูปแบบต่างๆของบ่อเหมืองด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 การเลือกพื้นที่วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของการพังทลายของมวลหิน จะได้จาก การตรวจสอบเชิงธรณีวิทยาพื้นที่บ่อเหมือง และแผนที่การกระจายตัวของลักษณะของโครงสร้างมวลหิน

1.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินวิธีจลนศาสตร์ มีการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการพังทลายของมวลหินสามรูปแบบ คือ การพังทลายแบบระนาบ การพังทลายมวลหินรูปลิ้ม และ การพังทลายมวลหินแบบคมะมา

1.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงกำหนด มีการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการพังทลายของมวลหินสามรูปแบบ คือ การพังทลายแบบระนาบ การพังทลายมวลหินรูปลิ้ม และ การพังทลายมวลหินแบบคมะมา

1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น มีการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบการพังทลายของมวลหินสองรูปแบบ คือ การพังทลายแบบระนาบ และ การพังทลายมวลหินรูปลิ้ม โดยมีสองขั้นตอนหลัก คือ

1.3.4.1 การสร้างแบบจำลองด้วยธรณีสถิติ โดยการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างมวลหินโดยใช้ค่ามุมเท และการวางตัวแนวหินซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยการจำลองทางธรณีสถิติเพื่อสร้างแผนที่การกระจายตัวของลักษณะของโครงสร้างมวลหิน

1.3.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น โดยการนำมุมเท และการวางตัวชั้นหินที่ถูกจำลองโดยวิธีธรณีสถิติมาคำนวณในแบบจำลองของการพังทลายแบบระนาบ และการพังทลายมวลหินรูปลิ้ม เพื่อหาโอกาสการพังทลายในแต่ละรูปแบบ และ แผนที่การพังทลาย

1.3.5 การวิจัยนี้ใช้พื้นที่หน้าเหมืองปัจจุบันของเหมืองหินปูนเขาวง บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (ท่าหลวง)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถระบุพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดพังทลายรูปแบบต่างๆของบ่อเหมือง ด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

1.4.2 สามารถหาโอกาสการพังทลายด้วยรูปแบบต่างๆของพื้นที่ที่มีโอกาสเสี่ยง ด้วยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

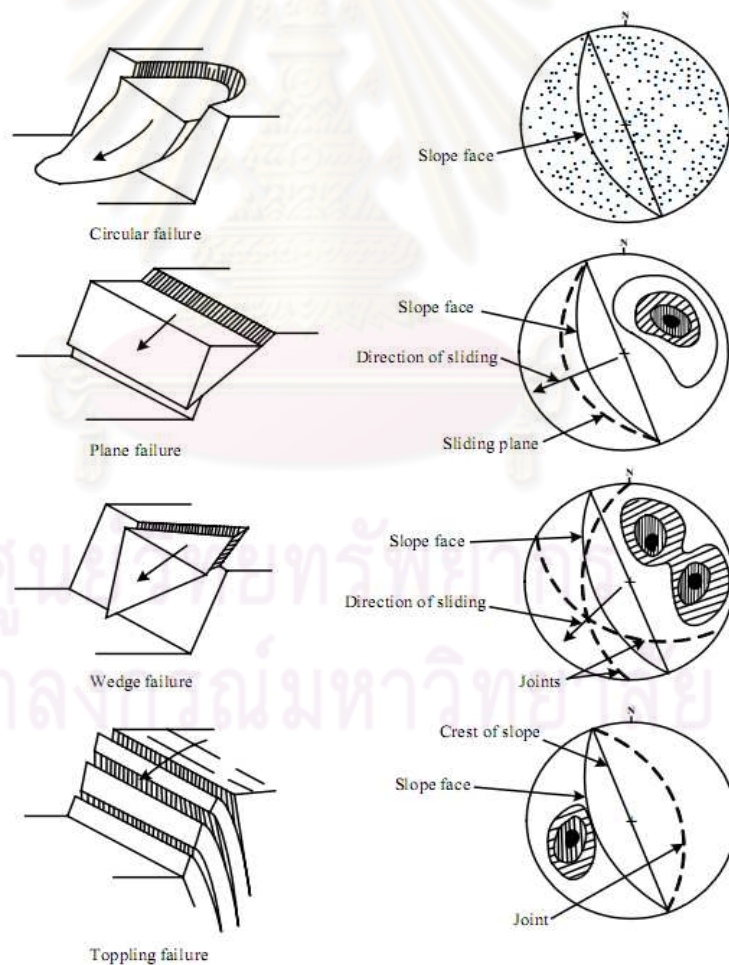
1.4.3 สามารถใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็นใช้ในการจัดการปัญหาพื้นที่เสี่ยงเหล่านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรม และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์ (Kinematic Analysis)

Hoek and Bray (1981) ได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินแบบจลนศาสตร์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการพังทลาย ซึ่งจัดแบ่งไว้ 4 รูปแบบคือ การพังทลายแบบวงกลม การพังทลายแบบระนาบ การพังทลายแบบรูปสี่เหลี่ยม และ การพังทลายแบบค้ำมา กับข้อมูลโครงสร้างชั้นหินที่มี มุมเทชั้นหิน (dip angle) และเส้นระดับ (strike line) ที่ฉายลงในสเตอริโอกราฟ ดังแสดงตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบการพังทลาย กับ ข้อมูลโครงสร้างชั้นหินที่ฉายลงในสเตอริโอกราฟ (Hoek and Bray, 1981)

## 2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนด (Deterministic Analysis)

การหาเสถียรภาพความลาดด้วยวิธีเชิงกำหนด นิยมระบุเป็นดัชนีเชิงเสถียรภาพของตัวเลขไร้มิติที่มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Factor of safety, F.S.) ทั้งนี้ค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 แสดงว่ามวลสารที่ตัดเป็นความลาดอยู่ตรงตำแหน่งขอบต่อเนื่อง (boundary) ระหว่างความมีเสถียรภาพกับความไม่มีเสถียรภาพ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 แสดงว่ามวลสารอยู่ในภาวะสมดุลพอดี

ในงานก่อสร้างที่มีโครงสร้างเป็นมวลสารประเภทที่เป็นดินหรือหิน ควรมีเกณฑ์เบื้องต้นเกี่ยวกับการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุด เมื่อโครงสร้างมวลสารมีการใช้งานเป็นความลาด จึงต้องมีการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในสภาวะต่างๆ เช่น ขนาดโครงสร้างของมวลสาร อายุการใช้งาน สภาพที่เกิดขึ้นขณะมีการใช้งาน หรือก่อนและหลังการใช้งาน โดยสรุปได้ในตารางที่ 2.1

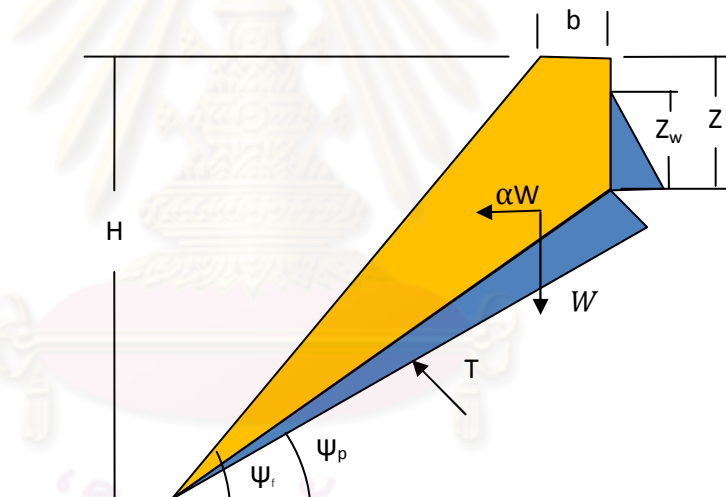
ตารางที่ 2.1 เกณฑ์การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย หรือค่า Factor of Safety กรณีปกติ ใช้เฉพาะค่าตัวเลขดัชนีเป็นตัวแปรหลักในการตัดสินใจ (สง่า ตั้งชวาล, 2552)

Type of slopes and Foundation	Required factor of Safety	
	Short-term Stability	Long-Term Stability
Slope of dams, levees, dike, and other rock excavation or earthwork	1.3	1.5
Earth retaining, supporting soil (rock) structures	1.5	2.0
Soil and rock foundations	2.0	3.0
Underground openings	4.0	8.0

การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดจำแนกได้ตามรูปแบบของการพังทลาย 3 รูปแบบ คือ การพังทลายแบบระนาบ (Plane Failure Analysis) การพังทลายรูปลิ้ม (Wedge Failure Analysis) และการพังทลายแบบคะมำ (Toppling Failure Analysis) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบระนาบ (Plane Failure Analysis)

การพังทลายแบบระนาบเกิดจากการตัดความลาดในมวลหินที่สัมพันธ์กับระนาบการวางตัวของชั้นหิน (Bedding Plane) การตัดความลาดในมวลหิน สามารถที่จะกำหนดระยะความยาวของหน้าความลาดได้ โดยระบุเป็นมุมความลาดที่มีค่าจำกัดหรือวัดได้ หรืออาจจะระบุเป็นสัมประสิทธิ์ในแนวราบต่อแนวตั้งก็ได้ การวิเคราะห์ผลลัพท์เชิงเสถียรภาพต้องหาโอกาสการพังทลายของมวลหินที่วางตัวบนระนาบเปราะบาง โดยระนาบเปราะบางอาจจะเป็นระนาบชั้นหินที่การเกาะเกี่ยวของอนุภาคระหว่างชั้นหินส่วนบนของหินตะกอนชนิดหนึ่งกับหินส่วนล่างของหินตะกอนอีกชั้นหนึ่ง เมื่อมีแรงยึดเกาะกันไม่ดีพอจนไม่สามารถต้านแรงเฉือนตามแนวเปราะบางได้ จะทำให้เกิดการไหลเลื่อนได้ง่ายขึ้น นอกจากระนาบชั้นหินที่สามารถทำให้เกิดการพังทลายได้แล้ว ยังรวมถึง แนวแตก รอยร้าวเล็กๆ หรือ รอยเลื่อนอีกด้วย



รูปที่ 2.2 รูปแบบการพังทลายแบบระนาบ (Hoek and Bray, 1981)

จากรูปที่ 2.2 สามารถใช้นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมาวิเคราะห์หาผลลัพท์ของความลาดทั่วไปได้ตามสมการดังนี้

$$F. S. = \frac{cA + [W(\cos\psi_p - \alpha\sin\psi_p) - U - (V\sin\psi_p)]\tan\phi}{W(\sin\psi_p + \alpha\sin\psi_p) + (V\cos\psi_p)} \quad (2.1)$$

กำหนดให้

$c$  คือ ค่าโคฮีชันของระนาบ  $W$  คือ น้ำหนักของมวลสาร  $\psi_p$  คือ มุมเทของระนาบ และ  $\emptyset$  คือ มุมเสียดทานของมวลหิน โดยจากค่าความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของภาพตัดขวางของการพังทลายแบบระนาบสำหรับความลาดทั่วไปที่มีแรงดันน้ำเกี่ยวข้อง จะได้ค่าระยะความยาวระนาบการพังทลาย ( $A$ ) ค่าแรงยกตัว ( $U$ ) ค่าแรงผลักของน้ำ ( $V$ ) และ ค่าความสูงของรอยแตก เป็นสมการย่อยดังนี้

$$A = (H - z)\text{cosec}\psi_p \quad (2.2)$$

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w Z_w(H - Z)\text{cosec}\psi_p \quad (2.3)$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w(Z_w)^2 \quad (2.4)$$

$$Z = H(1 - \sqrt{\cot\psi_f \cdot \tan\psi_p}) \quad (2.5)$$

ในกรณีที่รอยร้าวเกิดจากแรงดึงที่เกิดจากด้านบนของความลาด หาค่าน้ำหนักของมวลสารที่มีโอกาสไถลเลื่อนตามแนวระนาบหาได้จาก

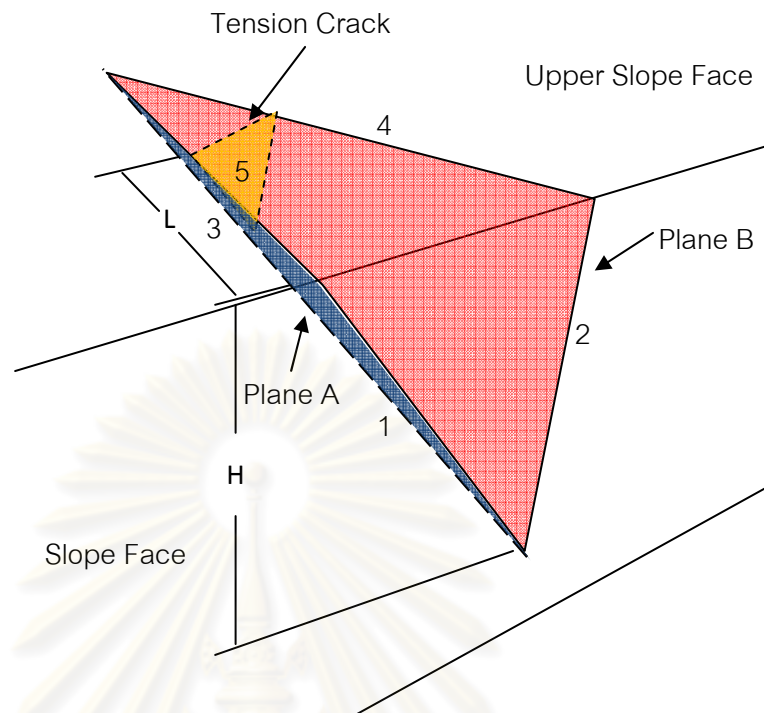
$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left[ \left\{ 1 - \frac{Z^2}{H^2} \right\} \cdot (\cot\psi_p) - (\cot\psi_f) \right] \quad (2.6)$$

ในกรณีที่รอยร้าวเกิดจากแรงดึงที่เกิดจากด้านบนของความลาดที่ตัดเฉียง หาค่าน้ำหนักของมวลสารที่มีโอกาสไถลเลื่อนตามแนวระนาบหาได้จาก

$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left[ \left\{ 1 - \frac{Z^2}{H^2} \right\}^2 \cdot (\cot\psi_p) - (\cot\psi_f) \right] \quad (2.7)$$

## 2.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายรูปลิ้ม (Wedge Failure Analysis)

การพังทลายรูปลิ้มเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของมวลหินสองระนาบที่มาตัดกันบนความลาด ทำให้เกิดเส้นตัดโดยมวลหินที่เกิดการพังทลายรูปลิ้มจะไถลออกจากความลาดในทิศทางที่เส้นตัดนั้น การเกิดการพังทลายรูปลิ้มโดยทั่วไปจะเกิดได้ตามรูปที่ 2.3 โดยการวิเคราะห์แบบเชิงกำหนดของการพังทลายรูปลิ้มจะวิเคราะห์ได้จากคำนวณสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.8 (Hoek, Bray and Boyd, 1973)



รูปที่ 2.3 การพังทลายรูปลิ้ม (Hoek and Bray, 1981)

$$F.S. = \frac{3}{\gamma_R H} (C_A + C_B Y) + \left( Aa - \frac{\gamma_w}{2\gamma_R} X \right) \tan \phi_A + \left( Bb - \frac{\gamma_w}{2\gamma_R} Y \right) \tan \phi_B \quad (2.8)$$

โดยกำหนดให้

$C_A$  และ  $C_B$  คือ ค่าโคฮีชันในระนาบ A และ B

$\phi_A$  และ  $\phi_B$  คือ มุมเสียดทานในระนาบ A และ B

$\gamma$  คือ หน่วยน้ำหนักของหิน

$\gamma_w$  คือ หน่วยน้ำหนักของน้ำ

$H$  คือ ความสูงชันบันได

$X, Y, A_a$  และ  $B_b$  คือ สัดส่วนของขนาดรูปลิ้ม ตามสมการที่ 2.9, 2.10, 2.11, 2.12

$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cdot \cos \theta_{2na}} \quad (2.9)$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} (\cos \theta_{1.nb})} \quad (2.10)$$



$$A_a = \frac{\{\cos\psi_A - \cos\psi_B(\cos\theta_{na.nb})\}}{\sin\psi_5(\sin^2\theta_{na.nb})} \quad (2.11)$$

$$B_b = \frac{\{\cos\psi_B - \cos\psi_A(\cos\theta_{na.nb})\}}{\sin\psi_5(\sin^2\theta_{na.nb})} \quad (2.12)$$

โดยที่กำหนดให้

$\psi_A$  และ  $\psi_B$  คือ มุมเทของระนาบ A และ B

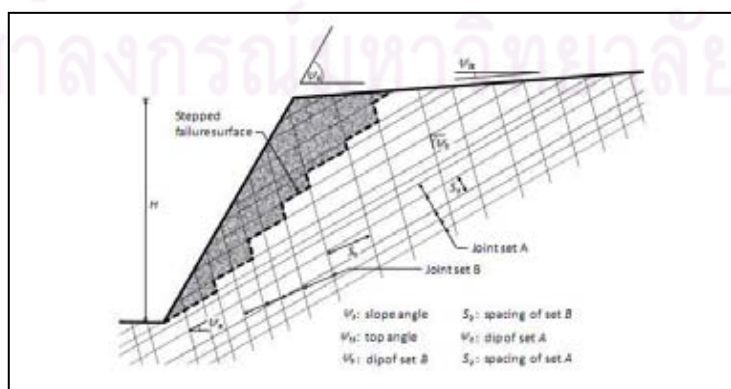
$\psi_5$  คือ มุมเทของระนาบหมายเลข 5

$\theta_{na.nb}$  คือ มุมที่ตั้งฉากระหว่างระนาบ A และ B

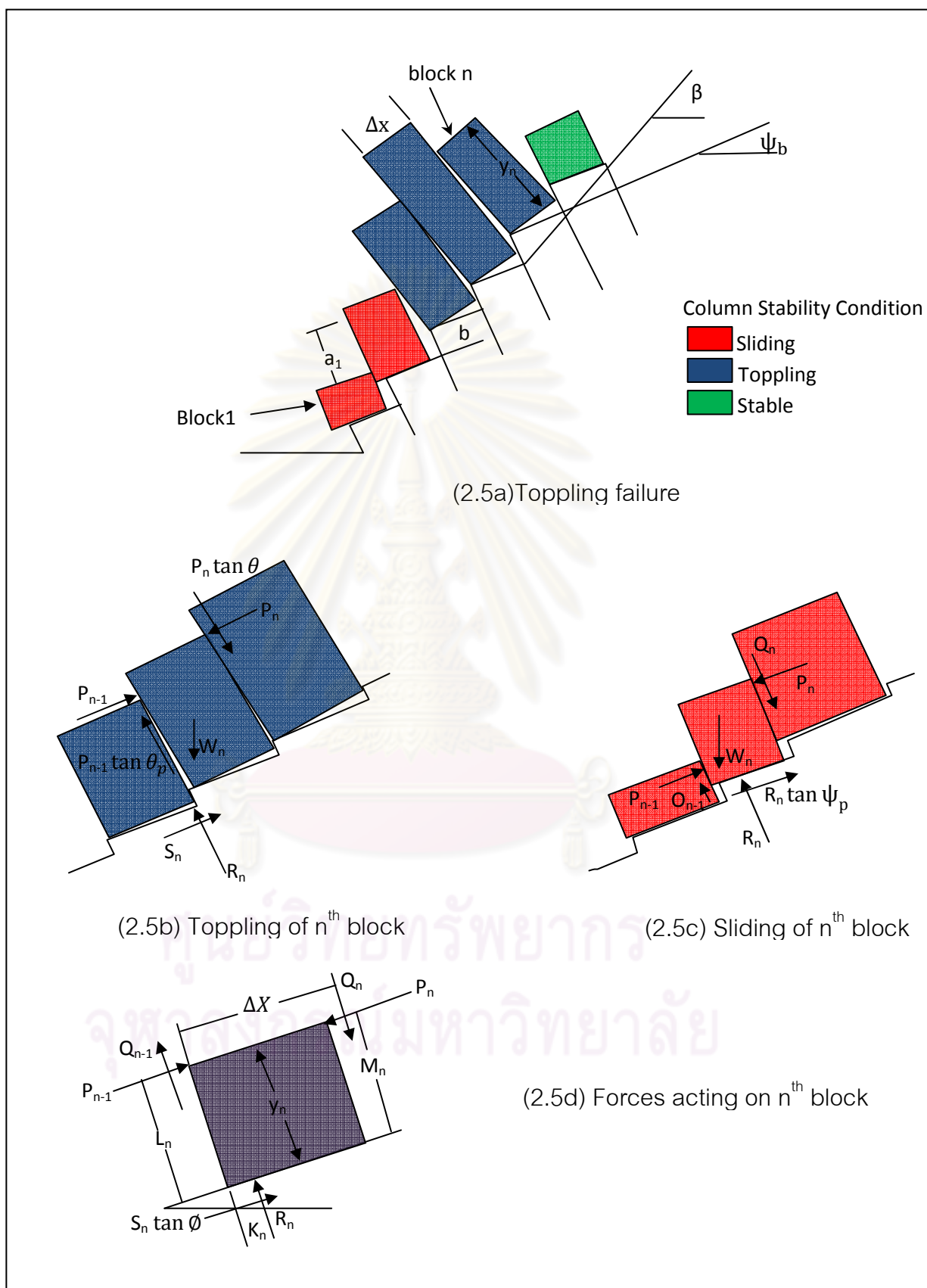
$\theta_{13}$  คือ มุมที่ตั้งฉากระหว่างระนาบ 1 และ 3

### 2.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบคะมา (Toppling Failure Analysis)

การพังทลายแบบคะมาเกิดจากการตัดความลาดในมวลหินที่มีความไม่ต่อเนื่องจึงทำให้มวลหินถูกแบ่งเป็นมวลย่อยๆ หลายก้อน (Block) การวิเคราะห์แบบเชิงกำหนดของการพังทลายแบบคะมา จะอาศัยการแบ่งมวลของมวลใหญ่ออกเป็นมวลย่อยๆ นำแรงที่มวลแต่ละก้อนกระทำต่อกัน และแรงที่ผนังฐานกระทำกับมวลย่อยๆ แต่ละก้อนนำมาใช้ในการคำนวณ โดยรูปแบบการแบ่งมวลใหญ่เป็นมวลย่อยๆ โดยใช้ตัวแปร และเงื่อนไขต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะเป็นไปตามรูปที่ 2.4 และการวิเคราะห์การพังทลายแบบคะมา จะมีการแบ่งลักษณะการเคลื่อนตัวของมวลหินอยู่ 3 ลักษณะ คือ มวลหินมีเสถียรภาพ มวลหินมีการไถลเลื่อน และ มวลหินมีการคะมา โดยการวิเคราะห์การพังทลายมวลหินที่มีการคะมาดังแสดงรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 รูปแบบการพังทลายแบบคะมา (Scavia, 1990)



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์แบบค้ำ (Hoek and Bray, 1981)

การวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินในแต่ละบล็อกเป็นแบบการค้ำน้ำหนักนั้น จะต้องคำนวณหาค่า  $P_{n-1}$  ตามสมการที่ 2.13 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีแรงดันเพื่อให้บล็อกหินเลื่อนขึ้นด้านบนตามรูปที่ 2.5b การวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินในแต่ละบล็อกเป็นแบบการไถลนั้นจะต้องคำนวณหาค่า  $P_{n-1}$  ตามสมการที่ 2.14 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีแรงดันให้มวลหินไถลมากกว่าแรงดันต้านการไถล ตามรูปที่ 2.5c และมวลหินในบล็อกที่มีเสถียรภาพค่า  $P_{n-1}$  จะมีค่าเท่ากับ 0

$$P_{n-1} = \frac{P_n(M_n - \Delta x \cdot \tan \phi) + (W_n/2)(y_n \cdot \sin \alpha - \Delta x \cdot \cos \alpha)}{L_n} \quad (2.13)$$

$$P_{n-1} = P_n - \frac{W_n(\tan \phi \cdot \cos \alpha - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \phi} \quad (2.14)$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของแต่ละบล็อกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมาจาก ค่ามุมที่เกิดการไถลในแต่ละบล็อก และ ค่ามุมเสียดทานที่ทำให้เกิดเสถียรภาพ

$$F.S.\text{toppling} = \frac{\tan \phi_{\text{available}}}{\tan \phi_{\text{required}}} \quad (2.15)$$

## 2.3 ธรณีสถิติ

### 2.3.1 หลักการของธรณีสถิติ

วิชาธรณีสถิติได้เริ่มต้นขึ้นมาจากการศึกษาโดย Krige (1951) และ Matheron (1955) ซึ่งได้พยายามปรับปรุงการคำนวณปริมาณสำรองแร่ทองคำในการทำเหมืองแร่ให้มีความถูกต้องมากขึ้น ต่อมา Matheron (1971) ได้พัฒนาวิธีการดังกล่าวขึ้น โดยนำเสนอทฤษฎีตัวแปรภูมิภาค ซึ่งเป็นทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เพียงแต่สรุปเกี่ยวกับตัวแปรจากพื้นฐานทางสถิติของข้อมูลเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงขนาดและตำแหน่งในมิติของข้อมูลตัวอย่างที่เกิดขึ้นมาด้วย โดยมีสมมุติฐานว่าตัวแปรทางธรณีวิทยาจะถูกกำหนดด้วยตำแหน่ง และขนาดของตัวอย่าง หรือขอบเขตที่แต่ละตัวอย่างมีอิทธิพลต่อกัน

การศึกษาตัวแปรภูมิภาคจะกระทำจากการเก็บตัวอย่างในสนาม และนำมาเป็นตัวแทนเพื่อใช้อธิบายภาพลักษณะที่แท้จริงของประชากร แต่ตัวแปรภูมิภาคจะมีประชากรจำนวนมาก และไม่ทราบค่าที่แท้จริงเป็นส่วนใหญ่ การศึกษาทางสถิติพื้นฐานจึงมีความจำเป็นเบื้องต้นในการ

วิเคราะห์ลักษณะการแจกแจงของข้อมูล เพื่อดูความจำเป็นในการเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลให้เหมาะสมก่อน นอกจากนี้ในการวัดความต่อเนื่องของตัวแปร แวริโอแกรมได้ผนวกพารามิเตอร์ทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน สัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์ และความแปรปรวนรวมเอาไว้ด้วยจึงทำให้จำเป็นต้องศึกษาลักษณะพื้นฐานทางสถิติของข้อมูลก่อนที่จะนำมาทำธรณีสถิติ

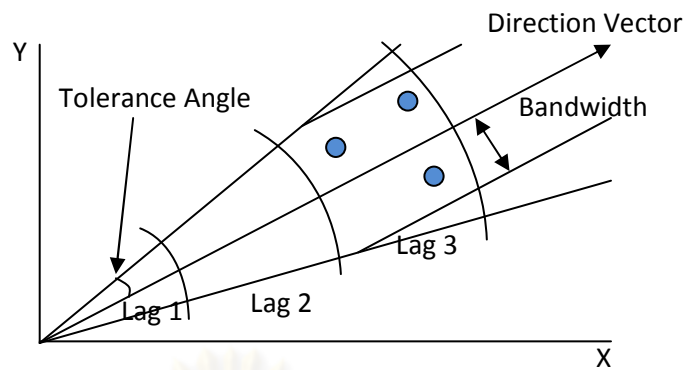
การประเมินค่าตัวแปรด้วยวิธีการคริกกิง (Kriging) ได้ถูกพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ว่าเป็นตัวประเมินที่เที่ยงตรง และให้ความแม่นยำหรือความผิดพลาดในการประเมินต่ำที่สุด ซึ่งวาเรียนซ์ของการประเมินนี้มีคุณค่าในการกำหนดคุณภาพของสิ่งที่คำนวณได้ และสามารถนำไปใช้คำนวณความน่าจะเป็นและขอบเขตความเชื่อมั่นของค่าที่คาดหมายไว้

### 2.3.2 แวริโอแกรม

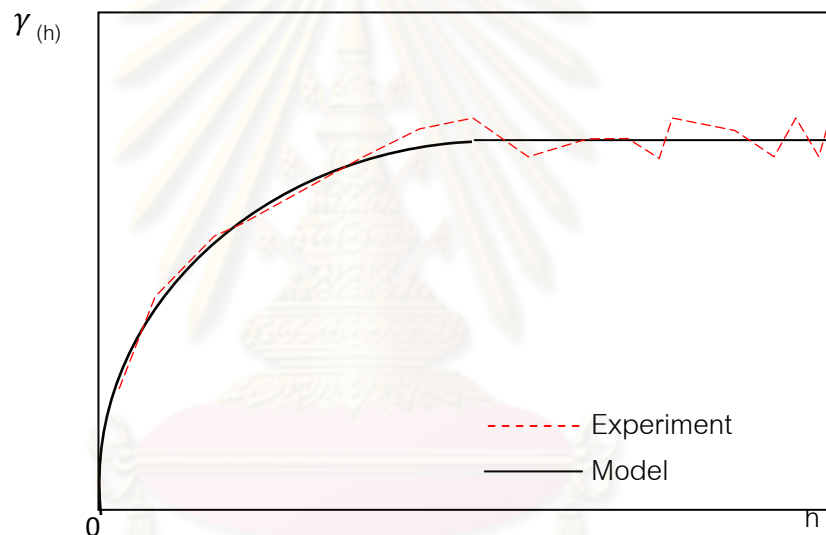
แวริโอแกรม (Variogram) คือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความแปรปรวนของตัวแปรที่มีค่าเกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่อยู่ หรืออีกนัยหนึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนกับระยะทางและทิศทาง

#### 2.3.2.1 การสร้างแวริโอแกรม

แวริโอแกรมที่สร้างจะต้องกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐาน ได้แก่ ค่ามุมทิศทาง (Direction) ค่าระยะห่างระหว่างข้อมูล (Lag) จำนวนค่าระยะห่างระหว่างข้อมูล (Number of lags) ระยะเวลา (Bandwidth) และ มุมเบนแบน (Tolerance Angle) ตามรูปที่ 2.7 การสร้างแวริโอแกรมสำหรับการใช้งานจริงนั้นเริ่มจากการสร้าง แวริโอแกรมทดลอง (Experimental variogram) ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องจึงต้องมีการจำลองให้มีความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์มาอธิบายแวริโอแกรมทดลองได้นั้นๆ



รูปที่ 2.6 พารามิเตอร์ในการค้นหาคู่ของตัวอย่างสำหรับคำนวณแวริโอแกรม  
(พันธิลพ หัตถโกศล, 2540)

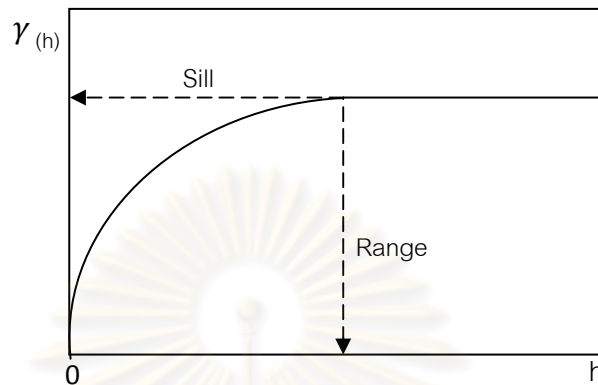


รูปที่ 2.7 แวริโอแกรมจากการทดลองได้ และการจำลองแวริโอแกรม  
(พันธิลพ หัตถโกศล, 2540)

### 2.3.2.2 องค์ประกอบแวริโอแกรม

แวริโอแกรมจะประกอบไปด้วย ระยะอิทธิพล (Range) ค่าของความแปรปรวนคงที่ (Sill) และความแปรปรวนนุกเก็ต (Nugget Variance) โดย ระยะอิทธิพลคือ ระยะขอบเขตของความสัมพันธ์ของข้อมูล โดยข้อมูลที่อยู่ใกล้กันจะมีความสัมพันธ์มากกว่าข้อมูลที่อยู่ไกลออกไป เมื่อห่างเกินกว่าระยะหนึ่งก็จะเป็นไม่มีความสัมพันธ์อีกต่อไป ค่าของความแปรปรวนคงที่คือ เมื่อระยะห่างมากกว่าระยะอิทธิพลข้อมูลจะไม่มีความสัมพันธ์กัน และความแปรปรวนนุกเก็ตคือ

ค่าคงที่ที่เกิดจากความผิดพลาดในการเก็บข้อมูลหรือ ระยะห่างระหว่างข้อมูล โดยองค์ประกอบทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบแวกรีโอแกรมทั่วไป (พันธ์ลพ หัตถโกศล, 2540)

### 2.3.3 การประเมินแบบคริกกิง (Kriging Estimation)

วิธีการประเมินแบบคริกกิงเป็นเครื่องมือทางธรณีสถิติในการประเมินค่าของบล็อกโดยอาศัยค่าสังเกตของตัวอย่างที่อยู่รอบๆบล็อก คริกกิงเป็นวิธีประเมินเชิงเส้นตรงที่ไม่ลำเอียงและให้ค่าความแปรปรวนของการประเมินหรือความผิดพลาดในการประเมินน้อยที่สุด โดยทั่วไปจะใช้เขียนในรูปเป็นสมการที่ 2.16 ได้ดังนี้

$$\sum_{\alpha=1}^n [w_{\alpha} \bar{y}(v_{\alpha}, v_{\beta})] + u = \bar{y}(v_{\alpha}, V); i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1 \quad (2.17)$$

กำหนดให้  $w_{\alpha}$  คือ ค่าน้ำหนักการประเมิน  $\bar{y}(v_{\alpha}, v_{\beta})$  คือ ค่าเฉลี่ยของแวกรีโอแกรม ( $\gamma(h)$ ) ของระหว่างตัวอย่าง ( $v_{\alpha}, v_{\beta}$ )  $\bar{y}(v_{\alpha}, V)$  คือ ค่าเฉลี่ยของแวกรีโอแกรม ( $\gamma(h)$ ) ของระหว่างตัวอย่างกับบล็อกที่ทำการประเมิน ( $v_{\alpha}, V$ )

### 2.3.4 การจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียน (Sequential Gaussian Simulation)

แบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนคือ การใช้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบมีเงื่อนไข (Conditional cumulative distribution function, CCDF) มาสร้างแบบจำลอง (Realization) ที่สามารถเดาค่าในบล็อกที่ไม่รู้ค่าได้หลายแบบจำลองที่แตกต่างกัน โดยใช้สมการที่ 2.18 เป็นการ

อธิบายจำลองกรณีสถิติแบบเกาส์เซียน โดยการประเมินค่าในบล็อกครั้งแรกด้วยตัวแปรสุ่ม ( $Z_1$ ) ที่มีเงื่อนไขของข้อมูลปฐมภูมิ ( $n$ ) และการประเมินครั้งต่อไปจะประเมินค่าในบล็อกนั้นด้วยตัวแปรสุ่มที่มีเงื่อนไขของข้อมูลปฐมภูมิ และข้อมูลที่ถูกประเมินมาก่อน ( $N$ )

$$\begin{aligned} F \{Z_1 \leq z_1 | n\} \\ F \{Z_n \leq z_n | n+1\} \\ \cdot \\ \cdot \\ F \{Z_n \leq z_n | n+N-1\} \end{aligned} \quad (2.18)$$

กำหนดให้  $Z_i$  คือ ตัวแปรสุ่ม,  $z_i$  คือ ค่าประมาณการที่  $Z_i$ ,  $n$  คือ ข้อมูลปฐมภูมิ และ  $N$  คือ ข้อมูลที่ถูกประเมินมาก่อน

การประเมินค่าในแต่ละครั้งจะใช้ตัวแปรสุ่ม สุ่มค่าในฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบมีเงื่อนไขที่มีการแจกแจงปกติ โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบมีเงื่อนไขจะได้รับการคำนวณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนด้วยระบบคริกกิง ตามสมการที่ 2.19 และ 2.20

$$[y(u_0)]^{\circ SK} = m(u_0) + \sum_{\alpha=1}^N w_{\alpha} [y_{\alpha} - m(u_{\alpha})] \quad (2.19)$$

กำหนดให้  $[y(u_0)]^{\circ SK}$  คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่ถูกประเมินด้วยระบบคริกกิง  $y(u_0)$  คือ ค่าที่ถูกประเมิน  $m(u_0)$  คือ ค่าคาดหวังที่สุ่มตัวแปร  $y(u)$   $w_{\alpha}$  คือ ค่าน้ำหนักการประเมินด้วยระบบคริกกิงและ  $y_{\alpha}$  คือ ข้อมูลที่เปลี่ยนให้เป็นการกระจายตัวแบบปกติ

$$\sigma_{SK}^2 = C(u_0, u_0) - \sum_{\alpha=1}^N w_{\alpha} C(u_0, u_{\alpha}) \quad (2.20)$$

กำหนดให้  $\sigma_{SK}$  คือ ค่าความแปรปรวนของค่าที่ถูกประเมินด้วยระบบคริกกิง  $C(u_0, u_0)$  คือ ค่าความแปรปรวนของระหว่างจุดที่ทำการประเมิน  $C(u_0, u_{\alpha})$  คือ ค่าความแปรปรวนของระหว่างจุดที่ทำการประเมินกับตัวอย่างที่ใช้ในการประเมินและ  $w_{\alpha}$  คือ ค่าน้ำหนักการประเมินด้วยระบบคริกกิง

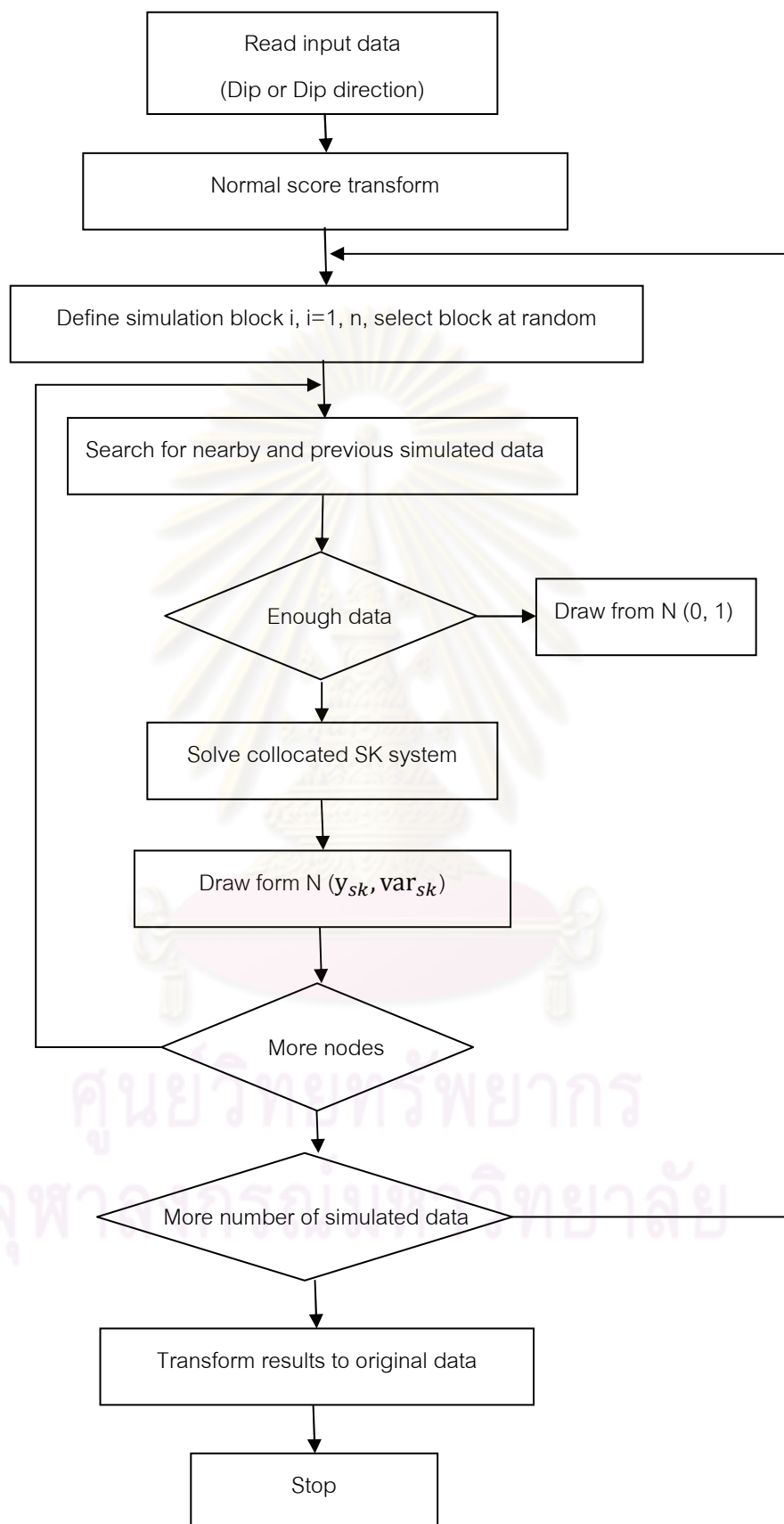
การดำเนินการจำลองกรณีสถิติแบบเกาส์เซียน ดำเนินการโดยการนำข้อมูลปฐมภูมิมาเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติโดยใช้ฟังก์ชัน Normal score transform โดยค่า

ของข้อมูลจะมีค่าประมาณ 3 ถึง -3 และมีการแจกแจงแบบปกติ ระบุตำแหน่งของบล็อกที่จะถูก  
คำนวณแบบสุ่ม (Define simulation block) ค้นหาข้อมูลที่ใกล้เคียงในระยะค้นหาบล็อกที่ถูก  
ระบุ เมื่อมีจำนวนข้อมูลที่จะใช้คำนวณมากพอที่จะคำนวณด้วยระบบครีกริ่ง โดยคำนวณค่าเฉลี่ย  
และความแปรปรวน เพื่อสร้างฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบมีเงื่อนไข และสุ่มค่าจากฟังก์ชันได้  
แต่ถ้าข้อมูลมีไม่มากพอที่จะประเมินค่าจากฟังก์ชันการแจกแจงของข้อมูลเดิม การดำเนินการการ  
จำลองกรณีสถิติแบบเกาส์เซียนจะคำนวณบล็อกต่อไปจนกระทั่งหมดขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยใช้  
ค่าของข้อมูลปฐมภูมิ และข้อมูลที่ประเมินในครั้งก่อน เมื่อประเมินค่าเสร็จ ค่าที่ประเมินได้จะถูก  
เปลี่ยนกลับไปเป็นค่าเดิมอีกครั้งหนึ่ง โดยตามการดำเนินการการจำลองกรณีสถิติแบบเกาส์เซียน  
แสดงในรูปที่ 2.9



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

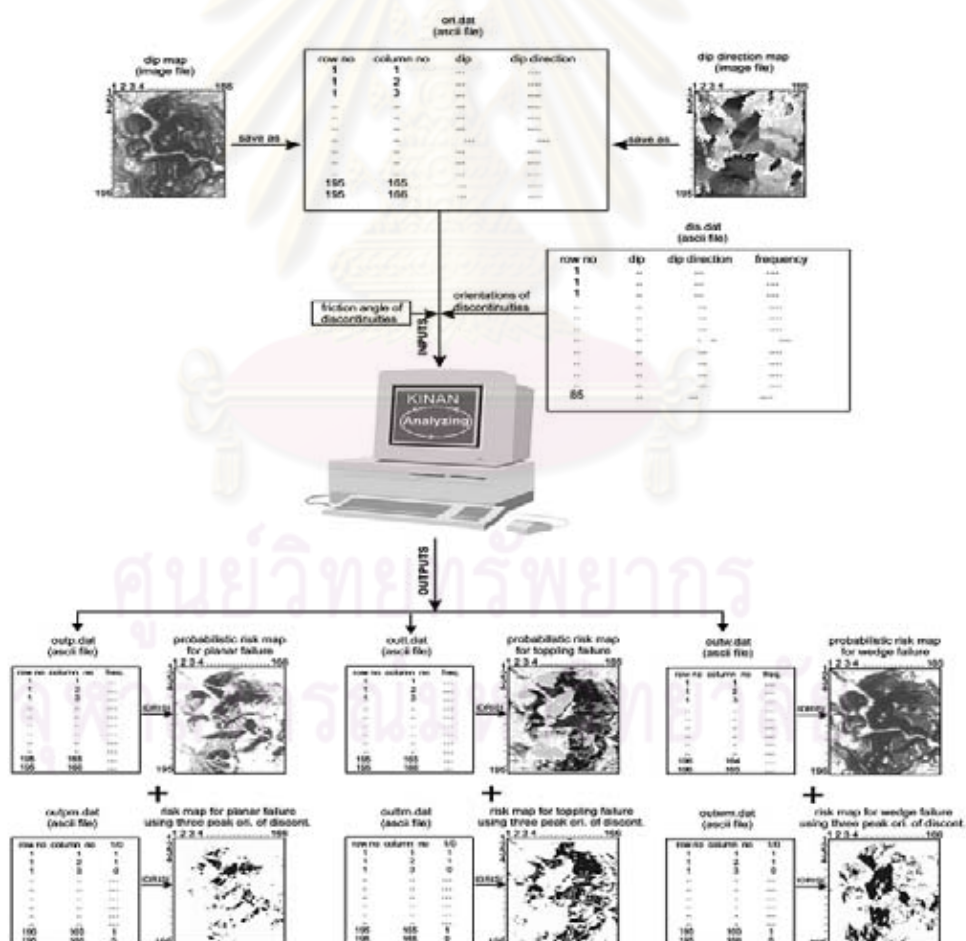




รูปที่ 2.9 แผนภาพการดำเนินการจำลองธรณีสถิติแบบเกอซ์เซียน

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gokceoglu (1999) ได้ศึกษาเสถียรภาพความลาดของมวลหินในบริเวณบริเวณอะตินแด็กซ์ (Altindag) ในประเทศตุรกี โดยการนำข้อมูลความไม่ต่อเนื่องของมวลหินที่แปลความหมายให้เป็นแผนที่มุมเอียงเท (Dip Angle) และทิศทางมุมเอียงเท (Dip Direction) หลังจากนั้นทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม KINAN (Eastman, 1992) โดยโปรแกรมจะประมวลผลด้วยวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์ และแบบจำลองเส้นชั้นความสูง (Digital Elevation Models) ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงในรูปแบบแผนที่ที่แสดงความเสี่ยงในการพังทลายของมวลหินในรูปแบบต่างๆ แล้วมาประมวลผลเพื่อหาโอกาส และตำแหน่งของการพังทลายของมวลหินรูปแบบต่างๆ ในบริเวณอะตินแด็กซ์ (Altindag) โดยแสดงขั้นตอนการศึกษาเสถียรภาพความลาดของมวลหินในบริเวณ อะตินแด็กซ์ ตามรูปที่ 2.10

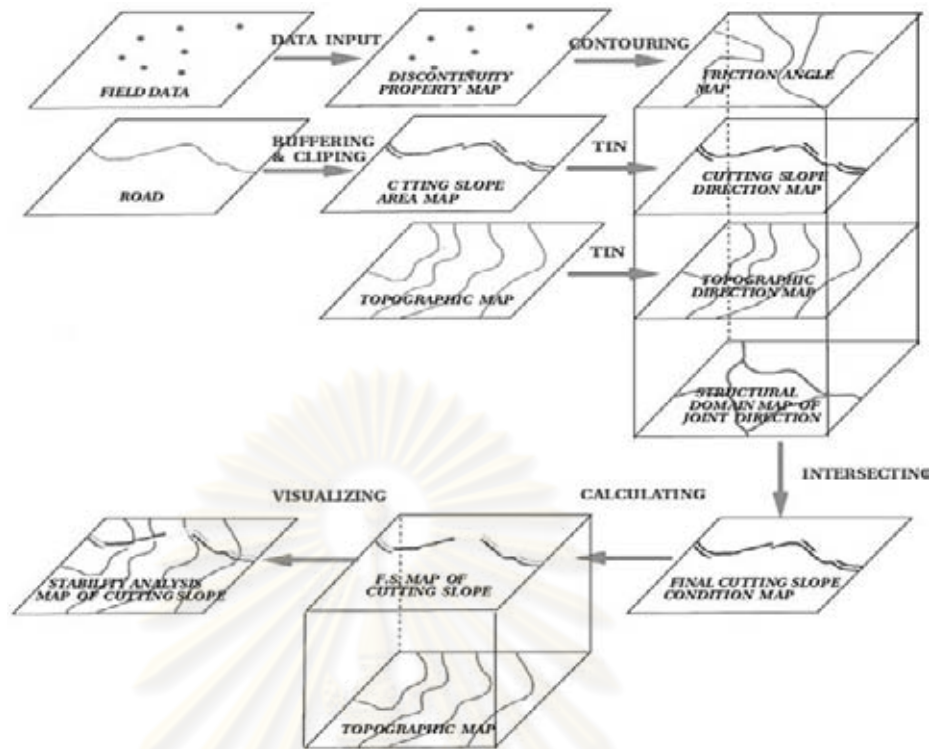


รูปที่ 2.10 สรุปวิธีการทำแผนที่ที่แสดงความเสี่ยงในการพังทลายของมวลหิน (Gokceoglu, 1999)

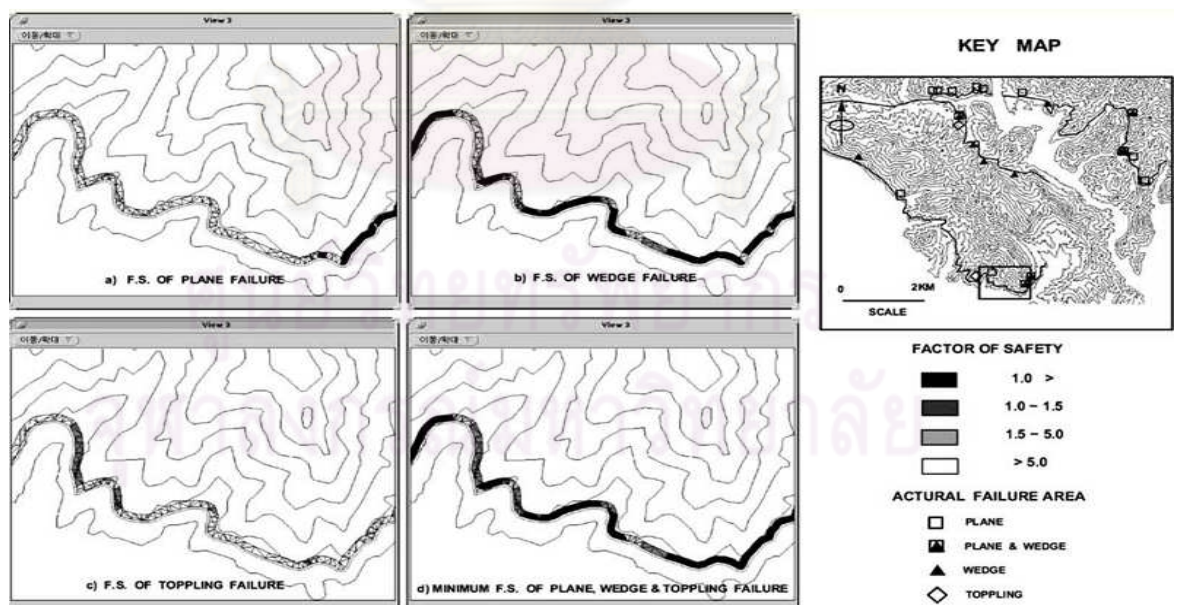
Pumjan (1999) ได้ศึกษาเสถียรภาพของความลาดแบบความน่าจะเป็นเชิงพื้นที่ (Localized Probabilistic) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถจะประเมินความเสี่ยงของการพังทลายของความลาดที่ค่าความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้ได้ โดยการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นในพื้นที่เฉพาะจะใช้ค่ากำลังอัดของวัสดุที่ได้จากการสร้างแบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนตัวแปรร่วม (Sequential Gaussian Co-simulation) ซึ่งสามารถให้ฟังก์ชันตัวแปรร่วมของค่ากำลังอัดวัสดุเชิงสถิติได้ในรูปของค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) และมุมเสียดทานของมวลหิน (Friction Angle) ได้ในทุกๆจุดของพื้นที่ศึกษา ซึ่งการวิจัยชิ้นนี้มีการประยุกต์กับตัวอย่างของพื้นผิวของเหมืองถ่านหิน

Gunther (2003) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์คุณสมบัติรูปทรงเลขาคณิต และคุณสมบัติทางจลนศาสตร์ และพัฒนาโปรแกรมชื่อว่า SLOPE MAP<sup>®</sup> ซึ่งพัฒนาจาก Quick Basic<sup>®</sup> โดยการสร้างโมเดลโครงสร้างของมวลหิน และการวิเคราะห์อัตราความเค้นและความเครียดของหน้าลาดในแต่ละพื้นที่ เพื่อที่จะประเมินเสถียรภาพของความลาดชันเชิงเขาที่เป็นหินแข็ง นอกจากนี้ในงานวิจัยยังได้ทดลองใช้โปรแกรม SLOPE MAP<sup>®</sup> มาประยุกต์ใช้กับการประเมินเสถียรภาพของความลาดชันเชิงเขาบริเวณที่กักเก็บน้ำโอเกอ (Oker) ประเทศเยอรมนี

Kim (2004) ได้ศึกษาการประเมินเสถียรภาพของการขุดมวลหินก่อนการสร้างถนนผ่านภูเขา ด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์มีข้อดีคือ สามารถวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณมากและพื้นที่ใหญ่ โดยการนำแผนที่หลายรูปแบบเช่น แผนที่ภูมิประเทศ แผนที่ทิศทางของการขุดเจาะความลาดชัน แผนที่มุมเสียดทานภายในของชั้นหิน และแผนที่การวางตัวของชั้นหิน มาซ้อนทับกัน แล้วแบ่งเป็นพื้นที่ย่อยซึ่งเรียกว่าโพลิกอน (Polygon) โดยจะประเมินแต่ละโพลิกอนด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจลนศาสตร์ ก่อนเพื่อที่จะหาพื้นที่ที่มีความปลอดภัยสูง หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์โพลิกอน ที่เหลือซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงด้วยวิธีเชิงกำหนด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย โดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของการออกแบบ จะหมายถึงบริเวณที่มีความไม่ปลอดภัยจากการพังทลายของมวลหิน โดยขั้นตอนการประเมินและผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการประเมินเสถียรภาพของการขุดมวลหินก่อนการสร้างถนนผ่านภูเขาด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Kim,2004)



รูปที่ 2.12 ผลลัพธ์การประเมินเสถียรภาพของการขุดมวลหินก่อนการสร้างถนนผ่านภูเขาด้วยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Kim,2004)

สง่า ตั้งชวาล (2541) ได้ศึกษาความน่าเชื่อถือของการขุดเจาะพื้นดิน โดยการวางแผน และการประเมินจะทำโดยการขุดเจาะในวัสดุเปราะ (ดินหรือหิน) โดยใช้เครื่องจักรหรือระเบิด การประเมินความน่าเชื่อถือได้ถูกประยุกต์ใช้ในการทำนายการพังทลายของมวลหินในขณะที่อยู่ในกระบวนการขุดเจาะ การประเมินเสถียรภาพของหน้าที่ทำการขุดเจาะด้วยเครื่องจักรทำได้ด้วยวิธีเชิงกำหนด และสถิติ ส่วนการประเมินความเสี่ยงอันเนื่องจากการระเบิดหินค้ำเนื่องจากผลกระทบ ต่อสิ่งแวดล้อมหลังจากการระเบิด

สงวน ชูช้าง อติศักดิ์ บุญบาตร และกิตติเทพ เพ็องขจร (2551) ได้ศึกษาเสถียรภาพและการออกแบบบ่อเหมืองสุดท้ายที่บริษัท ปูนซิเมนต์นครหลวง จำกัด โดยมีการออกสำรวจภาคสนาม การทดสอบกลศาสตร์ของหิน และสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหามุมเทสูงสุดของบ่อเหมืองสุดท้ายที่เหมืองหินปูนของบริษัทปูนซิเมนต์นครหลวง จำกัด ซึ่งการหามุมเทสูงสุดนั้นจะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของมวลหินระยะยาวหลังจากการปิดเหมืองไปแล้วและปริมาณสำรองของแหล่งแร่หินปูนสูงสุด ผลการศึกษาพบว่ามวลหินของเหมืองหินปูนสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ มวลหินที่มีรอยแตกไม่มากและมวลหินที่มีรอยแตกมาก สำหรับมวลหินที่มีรอยแตกไม่มากควรมีมุมเทของความสูงชันบันไดระหว่าง 70 ถึง 80 องศา และมุมเทของความลาดระหว่าง 49 ถึง 56 องศา สำหรับมวลหินที่มีรอยแตกมาก ควรมีมุมเทของชันบันได ไม่เกิน 60 องศา และมุมเทของความลาดระหว่าง 43 องศา

กิตติเทพ เพ็องขจร (2551) ได้ศึกษาเสถียรภาพบ่อเหมือง O และ N ที่เหมืองหินปูนเขาวงของบริษัทปูนซิเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด โดยได้ทำการศึกษาด้วยวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์ และวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด โดยจากการศึกษาพบว่า บ่อเหมือง O และ N มีเสถียรภาพ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการศึกษา

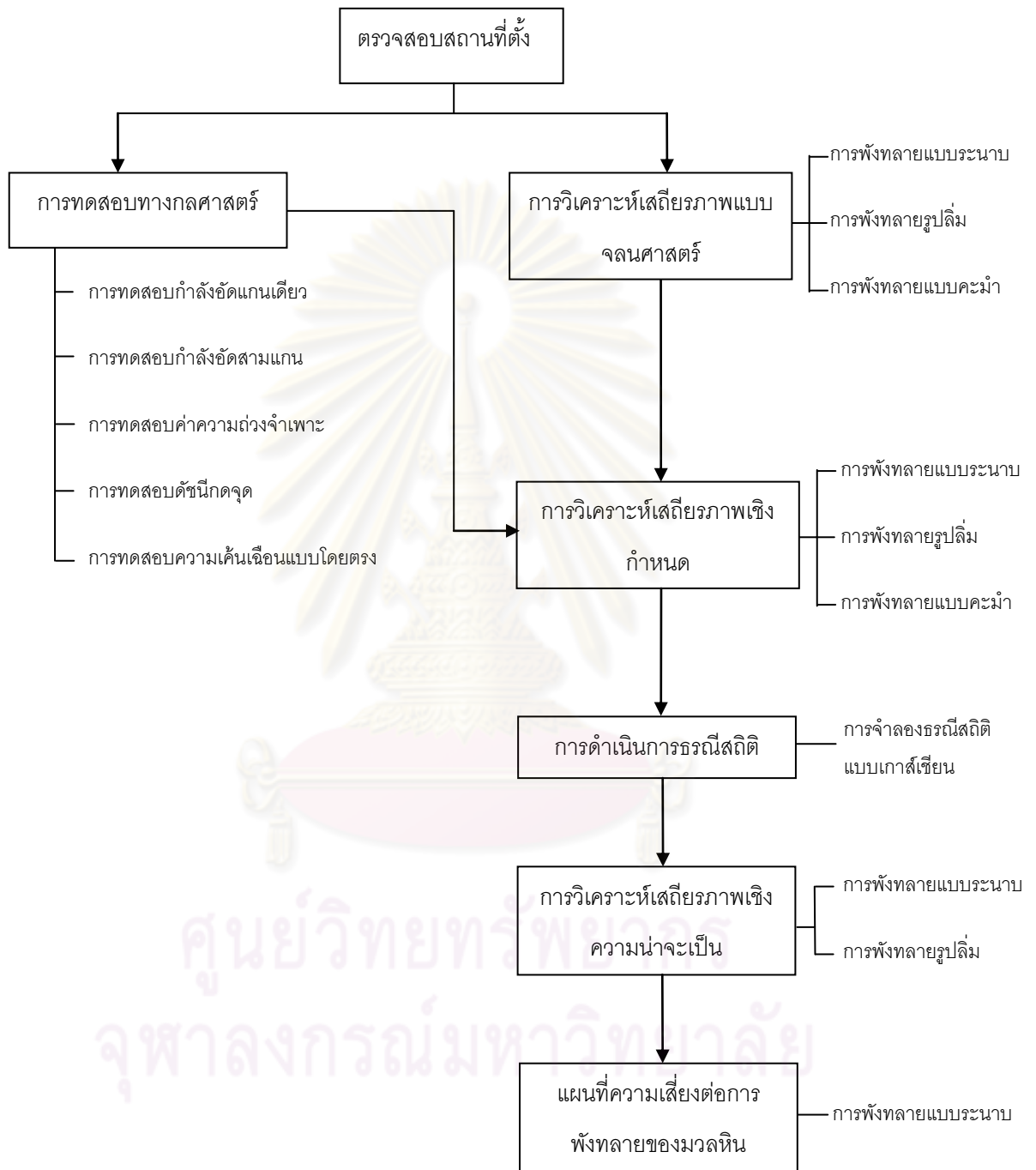
#### 3.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยภาพรวมงานวิจัยเริ่มด้วยการตรวจสอบสถานที่ตั้ง และการเก็บข้อมูลภาคสนามในบ่อเหมือง ตัวอย่างมวลหินที่ถูกเก็บจะถูกนำมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ต่างๆ เช่น การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังอัดสามแกน การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบดัชนีกวด และ การทดสอบความเค้นเฉือนแบบโดยตรง นอกจากมวลหินแล้วยังมีข้อมูลการวางตัวของมวลหินที่ถูกเก็บจากบ่อเหมืองเพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างแผนที่การวางตัวของมวลหินด้วยการจำลองธรณีสัณติ โดยการจำลองธรณีสัณติ จะใช้วิธีการจำลองแบบเกาส์เซียนเพื่อสร้างแผนที่หลายแบบจำลอง

ในการวิจัยนี้มีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาด 3 วิธีด้วยกันคือ การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด และการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์จะวิเคราะห์การพังทลายสามรูปแบบด้วยกันคือ การพังทลายแบบระนาบ การพังทลายรูปลิ้ม และการพังทลายแบบคมะมา และการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนดจะวิเคราะห์การพังทลายสามรูปแบบด้วยกัน คือ การพังทลายแบบระนาบ การพังทลายรูปลิ้ม และการพังทลายแบบคมะมา เช่นกัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น จะใช้แบบจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด และการจำลองธรณีสัณติแบบเกาส์เซียน มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย และหาโอกาสการเกิดพังทลายในแต่ละบล็อก โดยโอกาสการพังทลายแต่ละบล็อกจะถูกสร้างเป็นแผนที่โอกาสการพังทลาย (Probability of Failure Map) เพื่อแสดงพื้นที่และโอกาสต่อความเสี่ยงของการพังทลาย การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็นจะวิเคราะห์การพังทลายสองรูปแบบด้วยกันคือ การพังทลายแบบระนาบและการพังทลายรูปลิ้ม เนื่องจากข้อจำกัดของข้อมูลและโอกาสในการเกิดการพังทลาย การสร้างแผนที่โอกาสพังทลาย

สามารถสร้างได้เพียงจากการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบ แผนภาพแสดงภาพรวมการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

## 3.2 พื้นที่ศึกษา

### 3.2.1 ข้อมูลทั่วไปของเหมืองเขาวง

เหมืองหินปูนเขาวง เป็นเหมืองหินปูนของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด โดยเริ่มเปิดเหมืองประมาณปี พ.ศ. 2524 เพื่อผลิตหินปูนป้อนให้แก่โรงงานปูนซีเมนต์เขาวงและท่าหลวง ปัจจุบันมีการทำเหมืองเพื่อผลิตหินปูนประมาณปีละ 9 ล้านตัน โดยส่งให้โรงงานปูนซีเมนต์ท่าหลวง และ โรงงานปูนซีเมนต์เขาวงซึ่ง มีกำลังการผลิตปูนซีเมนต์วันละ 18,000 ตัน ภาพบ่อเหมืองและภาพถ่ายทางอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 บ่อเหมืองด้านทิศเหนือ ของเหมืองหินปูนเขาวง

### 3.2.2 ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในเหมืองหินปูนเขาวง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัดตั้งอยู่ที่ตำบลเขาวง อำเภอพระพุทธรบาท จังหวัดสระบุรี มีขอบเขตอยู่ในพิกัด 1622500-1626500 N และ 693000 -700000 E ครอบคลุมพื้นที่ 42 ตารางกิโลเมตร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายทางอากาศของเหมืองหินปูน บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง)



### 3.2.3 ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไป

แหล่งหินปูนขาวในพื้นที่ประทานบัตรเป็นชั้นหินที่ประกอบเป็นปีกด้านใต้ของโครงสร้างรูปประทุนคว่ำ โดยมีแกนชั้นหินโค้งประทุน อยู่ในแนวเกือบตะวันตก - ตะวันออก วางตัวอยู่ในที่ราบด้านเหนือ หินปูนขาวทั้งหมดถูกจัดลำดับอยู่ในหน่วยหินเขาขาด ซึ่งจัดรวมอยู่ในหินชุดราชบุรี มีอายุอยู่ในช่วงยุคเพอร์เมียน และมีหน่วยหินที่มีอายุอ่อนกว่าแต่เป็นหินชุดราชบุรีเหมือนกัน ชื่อหน่วยหินชั้นบนวางตัวอยู่เหนือหน่วยหินเขาขาด โดยพบการสัมผัสและการแผ่กระจายของหินหน่วยนี้ลงไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ที่สำคัญมีการแทรกตัวขึ้นมาแผ่กระจายของหินอัคนีชนิดหินแอนดิไซต์ คือ หน่วยหินเขาใหญ่ต่อแนวกันไปอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะบริเวณพื้นที่ประทานบัตรด้านตะวันออกเฉียงใต้ จึงเป็นไปได้ว่าหินแอนดิไซต์ชุดนี้มีอิทธิพลต่อการเกิดผนังแทรกชั้น และผนังแทรกตัวในหินปูนของพื้นที่ประทานบัตร

หินส่วนใหญ่ในบริเวณพื้นที่ประทานบัตรเป็นหินปูนสีเทาอ่อนถึงเทาแก่เนื้อละเอียดถึงหยาบมาก มีแนวการวางตัวของชั้นหินประมาณตะวันตก - ตะวันตก เอียงเทไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนข้างมากไปทางทิศใต้ด้วยมุมเอียงเทตั้งแต่ 40-70 องศา ความหนาของแต่ละชั้นหินจาก 0.10 ถึงมากกว่า 3 เมตรขึ้นไป มีชั้นหินชนิดซิลิกาสูงของหินดินดานและหินเชิร์ต เกิดแทรกสลับเป็นลาย (Lamination) หรือแถบ (Band) อยู่ด้วย หินปูนบางส่วนถูกแปรสภาพตกผลึกใหม่ (Re - Crystallization) พบอยู่ใกล้เคียงหรือสัมผัสอยู่กับหินแอนดิไซต์ที่แทรกหรือตัดขึ้นมาภายหลังในโครงสร้างรูปผนังแทรกชั้น และผนังหิน

### 3.2.4 ธรณีวิทยาแหล่งแร่และการลำดับชั้นหิน

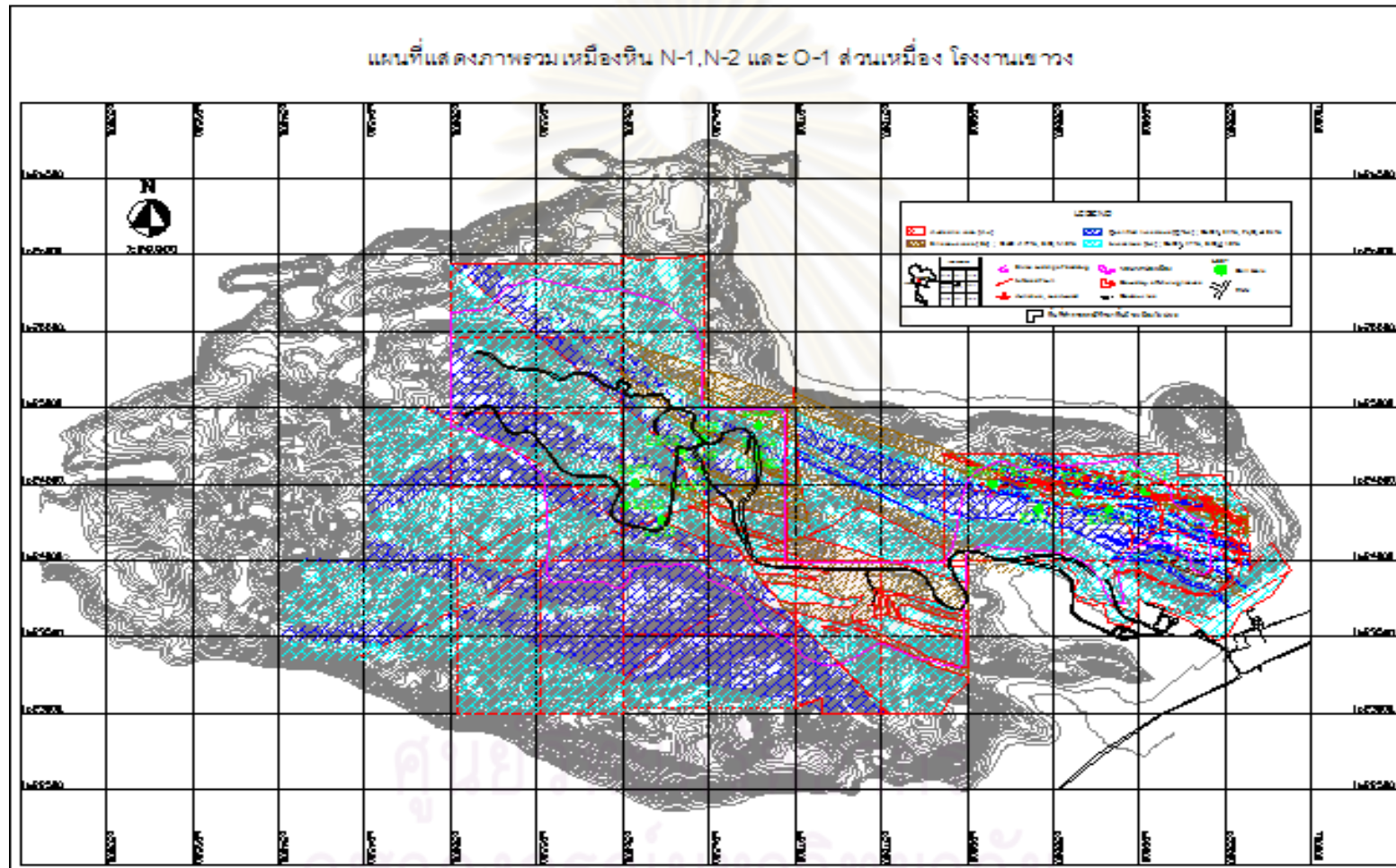
จากผลการเจาะสำรวจในปี 2539 และปี 2546 และการสำรวจธรณีวิทยาพื้นผิวในปี 2543 พบว่าชั้นหินในพื้นที่ประทานบัตรมีการวางตัวเรียงลำดับซ้อนกันเป็นชั้น ๆ มีมุมเอียงเทไปทางทิศใต้ ลักษณะของหินในบริเวณพื้นที่ประทานบัตรเป็นหินปูน สีเทาอ่อนถึงเทาแก่ เนื้อละเอียดถึงหยาบมาก มีชั้นหินชนิดซิลิกาสูงของหินดินดานและหินเชิร์ตเกิดแทรกสลับ พบหินแอนดิไซต์ที่แทรกหรือตัดขึ้นมาภายหลังในโครงสร้างรูปผนังแทรกชั้น และผนังบริเวณพื้นที่ประทานบัตรสามารถแบ่งชั้นหินออกได้ 4 กลุ่ม คือ หินปูนธรรมดา หินปูนคุณภาพดี หินซิลิกาสูง และหินแอนดิไซต์

3.2.4.1 หินปูนธรรมดา มีสีเทาถึงสีเทาเข้มเนื้อหยาบถึงละเอียด ส่วนมากเนื้อหินมีลักษณะละเอียดมาก มีลักษณะเป็นชั้นบาง ๆ ถึงความหนาตั้งแต่ 0.50 - 5.00 เมตร บางบริเวณแสดงลักษณะของชั้นหินบาง ๆ ชัดเจน หินปูนกลุ่มนี้มีสีเข้ม แบ่งแยกได้ชัดเจนกับหินปูนคุณภาพดีที่มีสีเทาอ่อน และบางส่วนมีลักษณะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็นหินปูนคุณภาพดี พบกระจายทั่วไปในพื้นที่ประทานบัตร

3.2.4.2 หินปูนคุณภาพดี มีสีเทาขาวเนื้อละเอียดถึงหยาบ ส่วนใหญ่เป็นหินปูนเนื้อละเอียด เป็นชั้นบาง ๆ หลาย ๆ ชั้น มีบางบริเวณที่พบเป็นชั้นหนา โดยที่หินปูนคุณภาพดีนี้พบแทรกอยู่ในชั้นของหินปูนธรรมดา พบกระจายอยู่ทั่วไปโดยเฉพาะตอนกลางของพื้นที่ประทานบัตร ด้านตะวันออกและด้านใต้ของพื้นที่ประทานบัตรด้านตะวันตก

3.2.4.3 หินปูนซิลิกาสูงหรือหินปูนคุณภาพต่ำ ประกอบด้วยชั้นหินบางมากถึงหนา ความหนาแต่ละชั้นมีตั้งแต่ 10 เซนติเมตร ถึง 50 เซนติเมตร โดยมีหินหลายชนิดวางสลับกัน ประกอบไปด้วยหินจำพวกซิลิกาแทรก หินเชิร์ต (Chert - bedded) และหินปูนซิลิกาสูง ซึ่งจะพบมากทางด้านตอนกลางของพื้นที่ประทานบัตร กลุ่มหินซิลิกาสูงมีความหนารวมตั้งแต่ 2 - 30 เมตร แทรกอยู่ระหว่างชั้นหินปูนธรรมดาและหินปูนคุณภาพดี โดยรวมแล้วหินซิลิกาสูงมีสีเทาแก่ถึงดำ เนื้อละเอียดถึงเนียน โดยมีสายแร่แคลไซต์สีขาวเล็ก ๆ ตัดผ่านเป็นร่างแห

3.2.4.4 หินแอนดิไซต์ เป็นหินภูเขาไฟที่แทรกขึ้นมาภายหลังมีอายุอ่อนที่สุด มีเนื้อหินมีเขียวอ่อนถึงเขียวแก่ เนื้อละเอียดถึงหยาบ บางบริเวณพบเป็นจุดหรือดอกขาว ๆ ของแร่เฟลด์สปาร์ เนื้อหินมีความแข็งตั้งแต่แข็งมากจนถึงนุ่มมากในบางบริเวณ ส่วนมากเกิดแทรกขึ้นมาตามผนัง หรือ ผนังแทรกชั้นได้ง่ายกว่าที่จะดันผ่าทะลุชั้นหินปูนขึ้นมา หินภูเขาไฟกลุ่มนี้มีความหนาตั้งแต่ 0.50 เมตร ถึง 20 เมตร และมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านข้างที่สัมพันธ์กับหินปูนขณะแทรกขึ้นมา เกิดการแปรสภาพในตัวหินปูนดั้งเดิมกลายเป็นหินอ่อนได้ในบางบริเวณ



รูปที่ 3.4 แผนที่แสดงภาพรวมเหมืองหิน N-1,N-2 และ O-1 ของเหมืองหินปูนเซวางบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง)

### 3.3 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

3.3.1 ข้อมูลการวางตัวของมวลหิน เป็นค่าที่เก็บข้อมูลด้วยเข็มทิศบรรทัด และจีพีเอส โดยเก็บค่ามุมเทและแนวการวางตัวของมวลหิน และตำแหน่งของข้อมูล การเก็บข้อมูลจะใช้แบบสุ่มโดยให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้งหมด

3.3.2 ข้อมูลธรณีเทคนิคของมวลหิน โดยทำการทดสอบทางกลศาสตร์ของหิน เพื่อที่จะหาคุณสมบัติเชิงกลของตัวอย่างหินปูนของเหมืองเขาวง โดยข้อมูลทางธรณีเทคนิคของมวลหินจะเป็นตัวแทนในการคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การทดสอบมีด้วยกัน 5 การทดสอบ คือ การหาค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบดัดชันจุด การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังอัดสามแกน และการทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรง

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างภาคสนาม ได้แก่ เข็มทิศบรรทัด จีพีเอส และ ค้อนธรณี

3.4.2 อุปกรณ์ทดสอบทางธรณีเทคนิค ได้แก่ เครื่องเจาะมวลหิน อุปกรณ์ทดสอบการหาค่าความถ่วงจำเพาะ เครื่องทดสอบดัดชันจุด เครื่องทดสอบกำลังอัด และเครื่องทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรง

3.4.3 อุปกรณ์ในการประมวลผลข้อมูล ได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำหรับประมวลผลข้อมูล โดยมีโปรแกรม Microsoft Excel<sup>®</sup> เป็นโปรแกรมจัดการข้อมูล โปรแกรม Dips 4.0 เป็นโปรแกรมพล็อตมุมเทและทิศทางการวางตัวของมวลหินลงในสเตอริโอเน็ต และประเมินการพังทลายแบบจลนศาสตร์ โปรแกรม Plane 2.0 เป็นโปรแกรมคำนวณเสถียรภาพการพังทลายแบบระนาบ โปรแกรม SWedge 4.0 เป็นโปรแกรมคำนวณเสถียรภาพการพังทลายรูปลิ้ม โปรแกรม ROCKTOPPLE 1.0 เป็นโปรแกรมคำนวณเสถียรภาพการพังทลายแบบคะมำ และโปรแกรม SGeMs เป็นโปรแกรมจำลองแวลูไอแกรม ดำเนินการครีกกิ่ง และแบบจำลองเกาส์เซียน

### 3.5 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีจลนศาสตร์ (Kinematic)

การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีจลนศาสตร์ จะดำเนินการด้วยโปรแกรม Dips 4.0 โดยวิธีการนี้จะใช้การนำมุมเท และการวางตัวของมวลหินมาพล็อตลงในสเตอริโอเน็ตเพื่อที่จะวิเคราะห์รูปแบบการพังทลายแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในบ่อเหมือง โดยเริ่มจากการพล็อตวางตัวของแนวหินในภาพรวม และการกำหนดกลุ่มให้กับการวางตัว โดยการพล็อตโพล (pole) ของมุมเท และทิศทางวางตัวของมวลหินลงในสเตอริโอเน็ตทั้งหมด แล้วจึงหาบริเวณที่มีความหนาแน่นของข้อมูลมากที่สุดเป็นตัวแทนของการวางตัวของแนวหินภาพรวม และจำแนกกลุ่มการวางตัวของมวลหินเพื่อที่จะหารูปแบบการพังทลายแบบต่างๆที่มีโอกาสเกิดขึ้นในบ่อเหมือง ได้แก่ การพังทลายแบบระนาบ การพังทลายรูปปลี และ การพังทลายแบบคมะ

### 3.6 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเชิงกำหนด

3.6.1 การวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบระนาบ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนดดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของมวลหินที่ใช้ประกอบการคำนวณได้จากการทดสอบธรณีเทคนิค นอกจากนั้นยังกำหนดให้สภาวะการวิเคราะห์การพังทลายมี 4 สภาวะ คือ สภาวะหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) สภาวะหินมีน้ำบางส่วน ( $Z_w = 50$  เปอร์เซ็นต์) สภาวะหินแห้ง ( $Z_w = 0$  เปอร์เซ็นต์) และไม่มีรอยแตกและสภาวะแห้ง

3.6.2 การวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดรูปปลี โดยใช้มุมเทและการวางตัวของมวลหิน โดยได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีจลนศาสตร์ และคุณสมบัติเชิงกลของมวลหินที่ใช้ประกอบการคำนวณได้จากการทดสอบธรณีเทคนิค การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนดดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 นอกจากนั้นยังกำหนดให้สภาวะการวิเคราะห์การพังทลายมี 3 สภาวะคือ สภาวะหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) สภาวะหินมีน้ำบางส่วน ( $Z_w = 50$  เปอร์เซ็นต์) และสภาวะหินแห้งและไม่มีรอยแตก

3.6.3 การวิเคราะห์การพังทลายแบบคมะเชิงกำหนด จะใช้โปรแกรม ROCKTOPPLE 1.00 ในการวิเคราะห์การพังทลายแบบคมะ ข้อมูลมุมเทและการวางตัวของมวลหินได้จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีจลนศาสตร์ และคุณสมบัติเชิงกลของมวลหินที่ใช้ประกอบการคำนวณ

ได้จากการทดสอบธรณีเทคนิคการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนดดังกล่าวไว้ในบทที่ 2

### 3.7 การดำเนินการด้วยวิธีธรณีสถิติ

3.7.1 การเตรียมข้อมูลก่อนดำเนินการด้วยวิธีธรณีสถิติ ก่อนดำเนินการจะต้องเตรียมข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างได้แก่ มุมเทและทิศทางการวางตัว จำนวน 359 ตัวอย่าง และพื้นที่จำลองที่ครอบคลุมพื้นที่เหมือง 1,560 เมตร X 660 เมตร โดยมีขนาดบล็อกเท่ากับ 10 เมตร X 10 เมตร

3.7.2 การคำนวณค่าสถิติพื้นฐานของข้อมูลได้แก่ ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าความเบ้ และฮิสโทแกรม เพื่อหาค่าผิดปกติและลักษณะการแจกแจงของข้อมูล

3.7.3 การเปลี่ยนรูปแบบข้อมูล การนำฮิสโทแกรมของข้อมูลปฐมภูมิมาเปลี่ยนรูปแบบให้มีการกระจายตัวแบบปกติ โดยส่งข้อมูลในฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลเดิมไปยังโดเมนใหม่ชื่อว่า โดเมนเกาส์เซียน

3.7.4 การนำข้อมูลแต่ละชุดมาสร้างเวรีโอแกรม โดยทำการสร้างเวรีโอแกรมแบบรวมทิศ (Ommidirection variogram) เวรีโอแกรมที่สร้างจะต้องกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐาน ได้แก่ ค่ามุมทิศทาง (Direction) ค่าระยะห่างระหว่างข้อมูล (Lag Spacing) จำนวนจุด (Number of Lags) และค่าเบนแบน (Angular Tolerance) การทำงานขั้นตอนนี้จะทำการเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าวไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้เวรีโอแกรมที่มีโครงสร้างและความหมายชัดเจน

3.7.5 การจำลองเวรีโอแกรม การนำเวรีโอแกรมที่สร้างมาเลือกให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบเวรีโอแกรมได้แก่ แบบเส้นตรง แบบสเฟียริคัล แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล หรือแบบเกาส์เซียน เพื่อกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานได้แก่ ระยะอิทธิพล ค่าของความแปรปรวนคงที่ ความแปรปรวนนักเกิด เพื่อที่จะนำพารามิเตอร์พื้นฐานเหล่านี้ใช้ประกอบในการสร้างแบบจำลอง

3.7.6 การสร้างแบบจำลองเกาส์เซียน การจำลองนั้นจะต้องนำพารามิเตอร์ ได้แก่ รูปแบบเวรีโอแกรม ระยะอิทธิพล ค่าของความแปรปรวนคงที่ ความแปรปรวนนักเกิดระยะการค้นหา และจำนวนข้อมูลที่ถูกคำนวณในระยะค้นหา และจำนวนแบบจำลองที่ต้องการ

### 3.8 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็น

#### 3.8.1 การวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบเชิงความน่าจะเป็น

3.8.1.1 การวิเคราะห์ความไว จะใช้ข้อมูลมุมเทตั้งแต่ 29 – 64 องศา โดยคำนวณจากสูตรคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนดดังรายละเอียดในบทที่ 2 โดยการวิเคราะห์นี้จะวิเคราะห์ในสภาพ 4 สภาพ คือ สภาพหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) สภาพหินมีน้ำบางส่วน ( $Z_w = 50$  เปอร์เซ็นต์) สภาพหินแห้ง ( $Z_w = 0$  เปอร์เซ็นต์) และไม่มีรอยแตกและสภาพแห้ง

#### 3.8.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

3.8.1.2.1 การเลือกพื้นที่ที่มีโอกาสการเกิดการพังทลายแบบระนาบ ตามข้อมูลธรณีวิทยา ธรณีเทคนิค แผนที่จากการจำลองด้วยธรณีสัณติ และการสำรวจสถานที่ตั้ง

3.8.1.2.2 การคำนวณพบว่าโอกาสการพังทลายในแต่ละบล็อกในพื้นที่เป้าหมาย โดยจะใช้ข้อมูลมุมเทจากแบบจำลองเกาส์เซียนในแต่ละบล็อกมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนด โดยจะคำนวณทุกบล็อกในพื้นที่ภายใต้สภาวะที่มีอาจจะก่อให้เกิดการพังทลายตามการวิเคราะห์ความไว และนำเสนอตัวอย่างฮิสโทแกรมของในโอกาสการพังทลายของบล็อกหนึ่งบล็อก

3.8.1.2.3 แผนที่เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น โดยสร้างในลักษณะใช้เส้นชั้นความสูง (Contour) ที่บ่งบอกโอกาสการพังทลายของแต่ละบล็อก และนำมาซ้อนทับกับแผนที่ภูมิประเทศ โดยแสดงออกมาเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการพังทลายของความลาด

#### 3.8.2 การวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มความน่าจะเป็น

#### 3.8.2.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

3.8.2.1.1 การเลือกพื้นที่ที่มีโอกาสการเกิดการพังทลายรูปลิ้ม ตามข้อมูลธรณีวิทยา ธรณีเทคนิค แผนที่จากการจำลองด้วยธรณีสัณติ และการสำรวจสถานที่ตั้ง

3.8.2.1.2 การคำนวณโอกาสการพังทลายในแต่ละบล็อกในพื้นที่เป้าหมาย โดยจะใช้ข้อมูลมุมเทจากแบบจำลองเกาส์เซียนในแต่ละบล็อกมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนด และนำเสนอตัวอย่างฮิสโทแกรมของในโอกาสการพังทลายของบล็อก

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปราย

#### 4.1 การทดสอบทางกลศาสตร์

การทดสอบทางกลศาสตร์ประกอบด้วย 5 การทดสอบ คือ การหาค่าความถ่วงจำเพาะ การทดสอบดัชนีจุด การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังอัดสามแกน และการทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรง

##### 4.1.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินปูน

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของหินปูน เพื่อศึกษาหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) การดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวม การทดสอบอ้างอิงโดยมาตรฐาน ASTM C 127 (American Standard for Testing and Materials) จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างหินปูนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.70 มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.29

##### 4.1.2 การทดสอบดัชนีกดจุด

การทดสอบดัชนีกดจุดมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุเช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย การทดสอบดัชนีกดจุดใช้ตัวอย่างที่เป็นแท่งทรงกระบอก และแท่งตัวอย่างรูปใดๆ มาทำการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า กรณีตัวอย่างที่เป็นแท่งทรงกระบอกได้ค่าดัชนีกดจุดเฉลี่ยเท่ากับ 2.60 โดยเทียบกับกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยเท่ากับ 84.10 เมกกะปาสคาล และกรณีตัวอย่างแบบรูปใดๆ ได้ค่าดัชนีกดจุดเฉลี่ยเท่ากับ 10.17 โดยเทียบกับกำลังอัดแกนเดียวเฉลี่ยเท่ากับ 258.85 เมกกะปาสคาล

##### 4.1.3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM D7012-07 เพื่อนำมาคำนวณหาปัจจัยตัวคูณความปลอดภัย การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ใช้หินปูนที่ได้จากภาคสนามจำนวน 6 ตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่าค่ากำลังอัดแกนเดียวอยู่ระหว่าง 27.23 เมกกะปาสคาล ถึง 194.44 เมกกะปาสคาล และมีค่าเฉลี่ยกำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 66.67 เมกกะปาสคาล

##### 4.1.4 การทดสอบกำลังอัดสามแกน

การทดสอบกำลังอัดสามแกนมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของวัสดุ ตามมาตรฐาน ASTM เพื่อนำมาคำนวณหาปัจจัยตัวคูณความปลอดภัย การทดสอบกำลังอัดสามแกน ใช้ตัวอย่างหินปูนจำนวน 6 ตัวอย่าง ให้อยู่สภาวะความดัน (Confining Pressure) ที่ 500 800



1,000 1,400 1,800 และ 2,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ตามลำดับ และใช้โปรแกรม RocLab® ในการประมวลผลค่าโคฮีชัน และค่ามุมเสียดทานตามทฤษฎีการพังทลายของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) ผลการทดสอบพบว่า มีค่าโคฮีชันมีค่าเท่ากับ 0.536 เมกกะปาสคาล และค่ามุมเสียดทาน มีค่าเท่ากับ 48.70 องศา

#### 4.1.5 การทดสอบความเค้นเฉือนแบบโดยตรง

ทดสอบความเค้นเฉือนแบบโดยตรงได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5607 โดยการหาความเค้นเฉือนที่เหลืออยู่โดยหาได้จากการให้ความเค้นเท่ากับ 1.97, 2.95 และ 3.94 เมกกะปาสคาล ผลการทดสอบพบว่า มีค่าโคฮีชัน เท่ากับ 0.125 เมกกะปาสคาล และ ค่ามุมเสียดทานเท่ากับ 38.5 องศา

#### 4.1.6 สรุปการทดสอบกลศาสตร์

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ พบว่าค่าการทดสอบมีค่าสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับค่าอ้างอิงจากการทดสอบแหล่งเดียวกันและแหล่งใกล้เคียง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าใกล้เคียงค่าอ้างอิงเนื่องจากแหล่งหินปูนแหล่งใกล้เคียงกัน ค่าประมาณกำลังอัดแกนเดียวของการทดสอบดัชนีจุดนี้มีค่าที่สอดคล้องกันคือมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว ค่าการทดสอบกำลังอัดสามแกนเพื่อหาค่าแรงเฉือนสูงที่สุด (Peak Shear strength) พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าโคฮีชันอยู่ในขอบเขตของค่าอ้างอิง และมุมเสียดทานมีค่ามากกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าค่าการทดสอบความเค้นเฉือนแบบโดยตรงมีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงเล็กน้อย โดยค่าโคฮีชันมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำที่สุดของค่าอ้างอิงประมาณ 0.1 เมกกะปาสคาล และมุมเสียดทาน 1 องศา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สรุปการทดสอบกลศาสตร์

การทดสอบ	ผลการทดสอบ	ค่าอ้างอิง
ค่าความถ่วงจำเพาะ	2.70	2.76-2.79 <sup>2</sup>
ค่าการทดสอบดัชนีกวดจุด	$I_s = 2.60 \text{ Mpa (84.10 MPa)}$	$I_s = 3.418 \text{ Mpa (81.91 MPa)}$ <sup>1</sup>
ค่าการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว	66.67 MPa	50.3-64.9 MPa <sup>2</sup>
ค่าการทดสอบกำลังอัดสามแกน (Peak Shear strength)	โคฮีชัน = 0.536 MPa มุมเสียดทาน = 48.70 องศา	โคฮีชัน = 0.38-0.76 MPa <sup>1</sup> มุมเสียดทาน = 48 องศา <sup>1</sup>
ค่าการทดสอบความเค้นเฉือนแบบโดยตรง	โคฮีชัน = 0.125 MPa มุมเสียดทาน = 38.5 องศา	โคฮีชัน = 0.22-0.76 MPa <sup>1</sup> มุมเสียดทาน = 39-49.9 องศา <sup>1</sup>

<sup>1</sup> กิตติเทพ เพ็องขจร, 2552

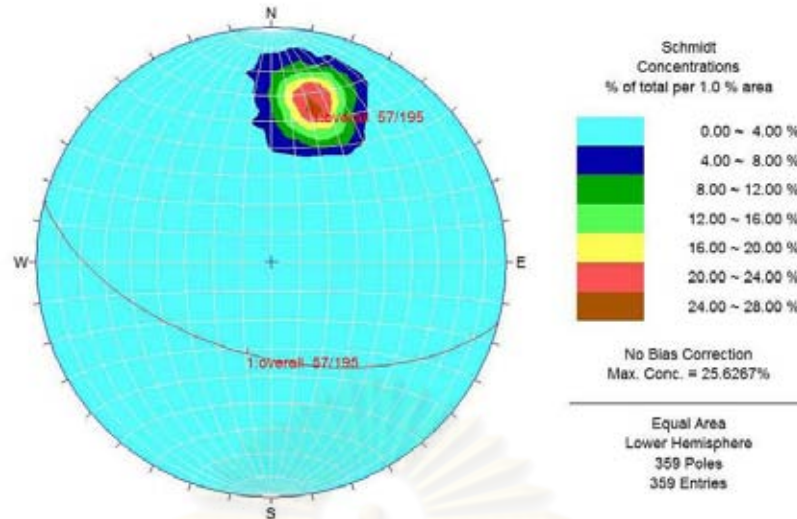
<sup>2</sup> สงวน ชูช้าง อติศักดิ์ บุญบาตร และกิตติเทพ เพ็องขจร, 2551

#### 4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินด้วยวิธีการจลนศาสตร์ (Kinematic Analysis)

วิเคราะห์จลนศาสตร์เป็นวิธีวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดอย่างหนึ่ง ซึ่งจะเป็นการนำค่ามุมลาดเอียงของหินและทิศทางการวางตัวของของผนังบ่อเหมืองที่สนใจมาพล็อตลงในสเตอริโอเน็ต เพื่อที่จะหารูปแบบการพังทลายแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในบ่อเหมือง สำหรับการวิเคราะห์จลนศาสตร์จะใช้โปรแกรม Dips 5.1

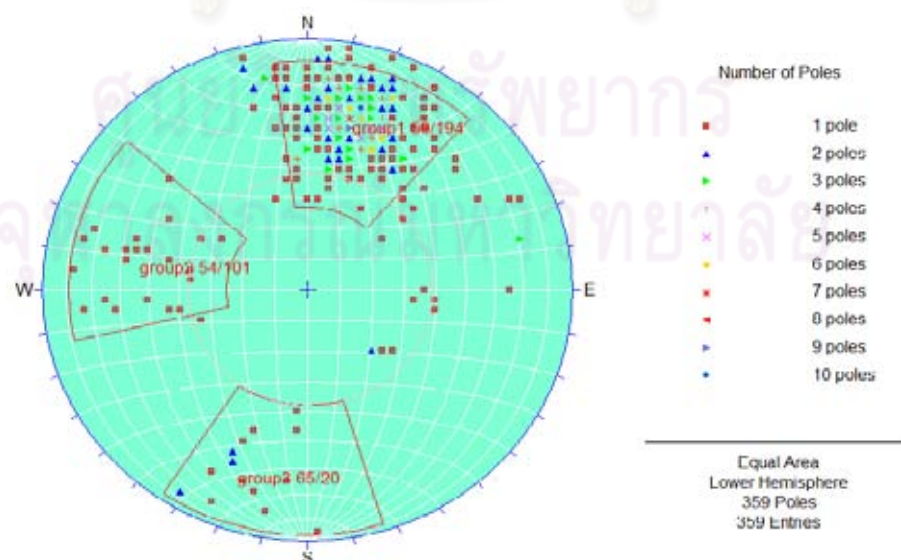
จากการพล็อตสเตอริโอเน็ตมุมเท และทิศทางการวางตัวของชั้นหินจำนวน 359 จุดรอบเหมืองหินปูนเขาวงพบว่า การวางตัวของชุดหินส่วนใหญ่มีมุมเทเท่ากับ 57 องศา และ ทิศทางการวางตัวเท่ากับ 195 องศา โดยมีความหนาแน่นของข้อมูลเท่ากับ 25.62 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปแบบที่

4.1



รูปที่ 4.1 สเตอริโอเนตการวางตัวหีนปูนของเหมืองหินปูนเขาวง

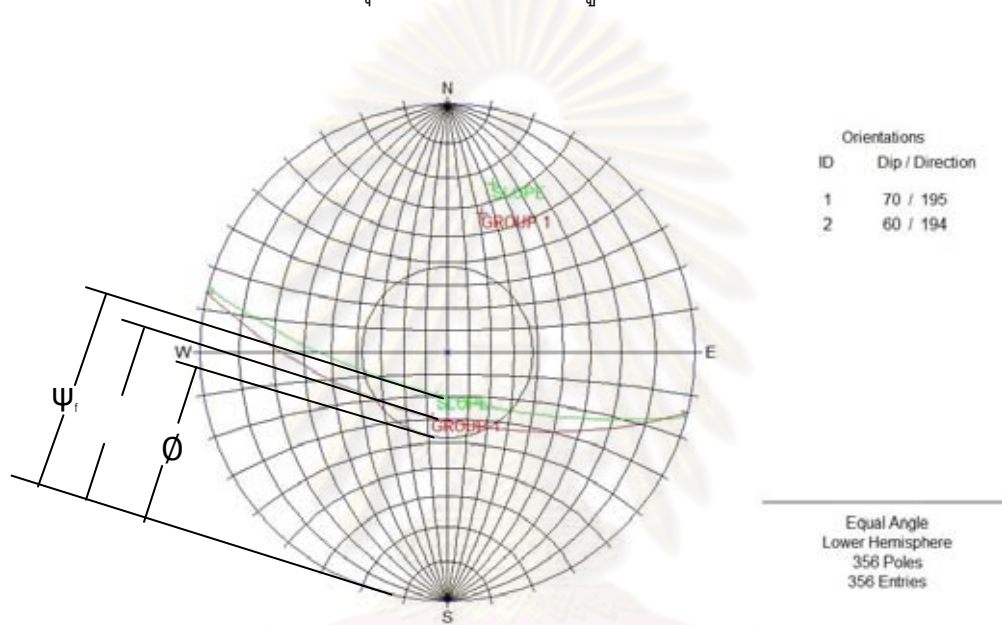
เนื่องจากการเก็บข้อมูลต้องเก็บกระจายให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ข้อมูลส่วนใหญ่จะกระจุกตัวที่ 195/57 (ทิศทางการวางตัว/มุมเท) การจำแนกชุดหีนทำได้โดยการสร้างขอบเขตการวางตัวของชั้นหีน และหาค่าเฉลี่ยของมุมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหีน การวางตัวของชุดหีนสามารถจำแนกได้ 3 กลุ่มคือ ชุดหีนกลุ่ม 1 หรือ GROUP 1 (194/60) ชุดหีนกลุ่ม 2 หรือ GROUP 2 (101 /54) และ ชุดหีนกลุ่ม 3 หรือ GROUP 3 (20/65) โดยมีการวางตัวที่มีมุมเทเท่ากับ 60 54 และ 65 องศา ตามลำดับ และทิศทางการวางตัวของชั้นหีนเท่ากับ 194 101 และ 20 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเตอริโอเนตการจัดกลุ่มของการวางตัวของชุดหีน

#### 4.2.1 การวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบด้วยวิธีจลนศาสตร์

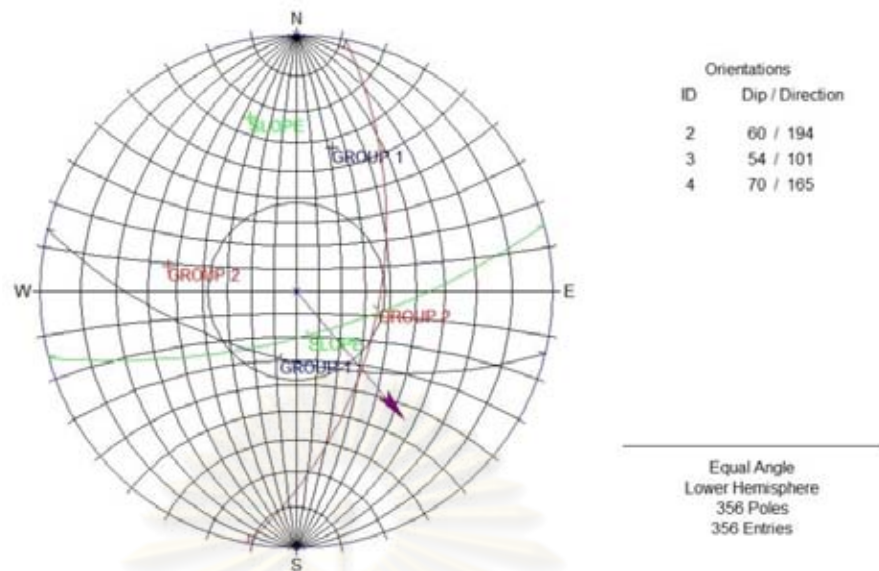
การวิเคราะห์การพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์แบบระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่ามีโอกาสการเกิดการพังทลายแบบระนาบกับผนังบ่อเหมือง (195/70) กับ ชุดหินกลุ่ม 1 (194/60) โดยชุดหินกลุ่ม 1 อยู่บริเวณที่ไม่มีเสถียรภาพ คือ อยู่ระหว่างผนังบ่อเหมืองกับกรวยเสียดทานที่มีมุม 38.5 องศา (จากข้อมูลการทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรง) โดยค่ามุมเทของระนาบมีค่าอยู่ระหว่างค่าความชันผนังบ่อและมุมเสียดทาน ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดการพังทลายแบบระนาบ



รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบด้วยวิธีจลนศาสตร์

#### 4.2.2 การวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มด้วยวิธีจลนศาสตร์

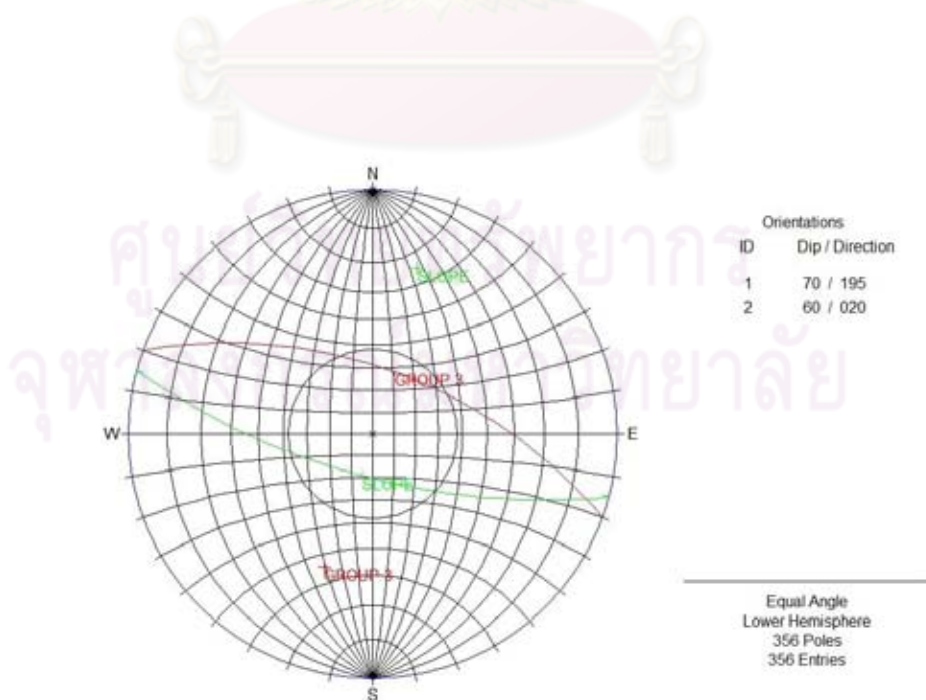
การวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มด้วยวิธีจลนศาสตร์ดังแสดงรูปที่ 4.4 พบว่ามีโอกาสการเกิดการพังทลายรูปลิ้มค่อนข้างน้อย โดยมีโอกาสเกิดจากชุดหินกลุ่ม 1 (194/60) ตัดกับชุดหินกลุ่ม 2 (101/54) สัมพันธ์กับผนังบ่อเหมือง (165/70) ทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลหินตัดเท่ากับ 320 องศา (ตามลูกศร) แต่เนื่องจากระนาบการพังทลายระหว่างชุดหินกลุ่ม 1 และชุดหินกลุ่ม 2 มีจุดตัดอยู่นอกกรวยเสียดทาน ทำให้มวลหินรูปลิ้มจะตัดเข้าไปในผนังบ่อไม่ได้ อยู่บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลาย ทำให้มีโอกาสเกิดการพังทลายรูปลิ้มค่อนข้างน้อย



รูปที่ 4.4 ผลวิเคราะห์การพังทลายรูปปลี้มด้วยวิธีจลนศาสตร์

#### 4.2.3 การวิเคราะห์การพังทลายแบบค่อมด้วยวิธีจลนศาสตร์

ผลวิเคราะห์การพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์ดังแสดงรูปที่ 4.5 พบว่ามีโอกาสการเกิดการพังทลายแบบค่อมระหว่างผนังบ่อเหมือง (195/70) กับชุดหินกลุ่ม 3 (20/65) เนื่องจากชุดหินกลุ่ม 3 กับผนังบ่อเหมืองมีการวางตัวที่ตรงข้ามกันทำให้เกิดการพังทลายแบบค่อมได้

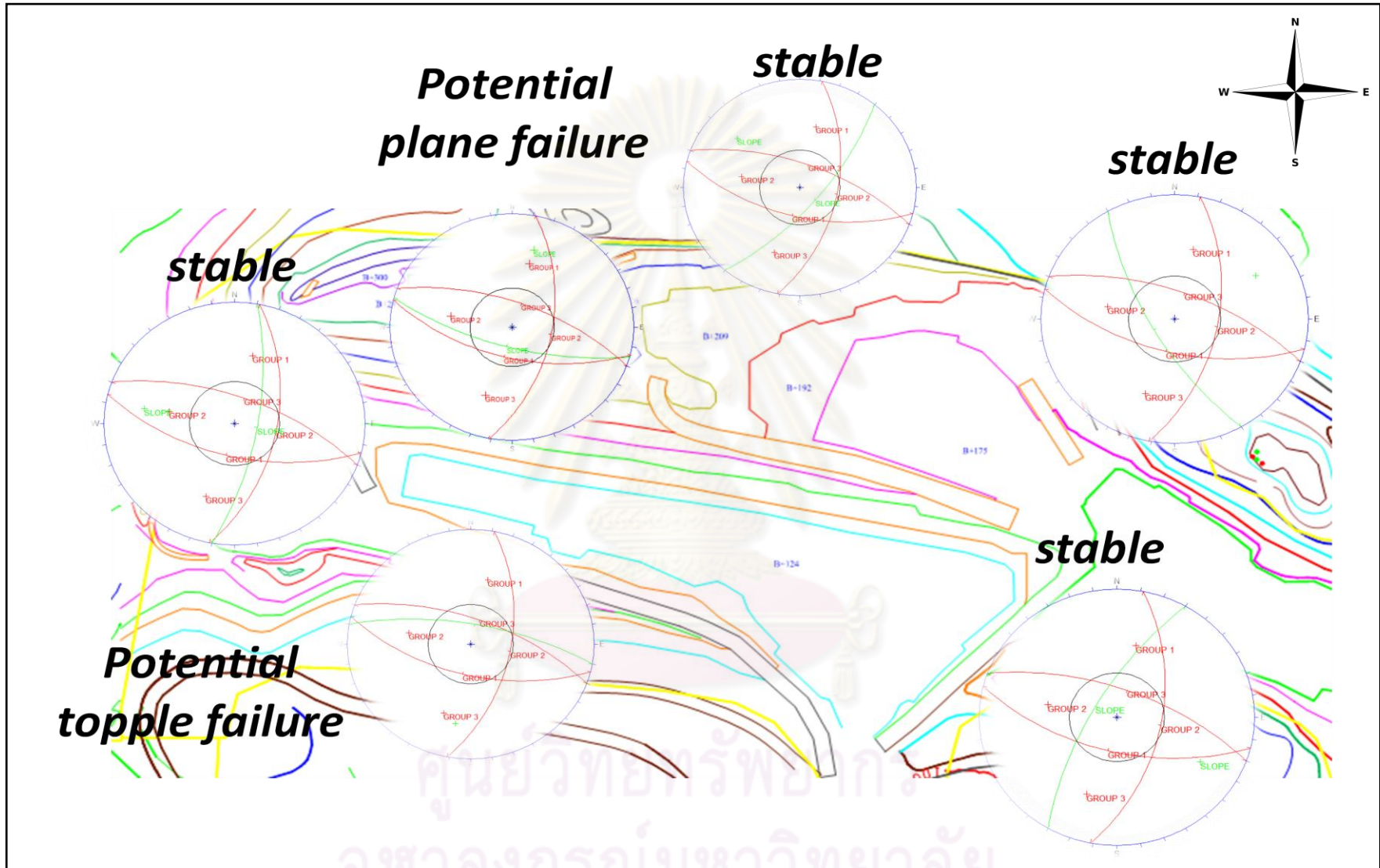


รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์การพังทลายแบบค่อมด้วยวิธีจลนศาสตร์

#### 4.2.4 สรุปผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์

การวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นหิน อธิบายการเกิดการพังทลาย ผลปรากฏว่าเสถียรภาพความลาดบริเวณหน้าเหมืองมีโอกาสเกิดการพังทลายในสองรูปแบบคือ การพังทลายแบบระนาบและการพังทลายแบบคะมำ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบระนาบ บ่งชี้ว่าค่ามุมเทของระนาบมีค่าอยู่ระหว่างค่าความชันผนังบ่อและมุมเสียดทาน ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดการพังทลายแบบระนาบ และการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบคะมำบ่งชี้ว่า ชุดหินกลุ่ม 3 กับ ผนังบ่อเหมืองมีการวางตัวที่ตรงข้ามกัน ทำให้มีโอกาสเกิดการพังทลายแบบคะมำได้ ผลการวิเคราะห์ยังบ่งชี้ว่าเสถียรภาพความลาดบริเวณหน้าเหมืองไม่มีโอกาสเกิดการพังทลายรูปปลีมี เนื่องจากระนาบการพังทลายระหว่างชุดหินกลุ่ม 1 และชุดหินกลุ่ม 2 มีจุดตัดอยู่นอกกรวยเสียดทาน ทำให้มวลหินรูปปลีมีจะตัดเข้าไปในผนังบ่อไม่ได้อยู่บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลาย กล่าวโดยสรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์ในแต่ละตำแหน่งของบ่อเหมืองพบว่ามีความสอดคล้องกันดีกับการวิเคราะห์การพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์แบบภาพรวม(รูปที่4.6)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ผลวิเคราะห์การพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์

### 4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินด้วยวิธีการเชิงกำหนด (Deterministic Analysis)

#### 4.3.1 การวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบระนาบ

การวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบระนาบจะใช้มุมเทเป็นตัวแปรหลักในการวิเคราะห์ เพราะสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนดมีมุมเทเป็นปัจจัยหลัก โดยค่ามุมเทที่นำมาใช้ในการคำนวณจะนำมาจากการวิเคราะห์จันศาตร์เชิงภาพรวม ซึ่งเท่ากับ 60 องศา และกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆคงที่คือ ความสูงของชั้นบันไดเท่ากับ 17 เมตร ความชันของผนังบ่อเท่ากับ 70 องศา ค่าโคฮีชันเท่ากับ 125 กิโลพาสคาล มุมเสียดทานเท่ากับ 38.5 องศา และค่าความถ่วงจำเพาะของหินเท่ากับ 2.7 โดยวิเคราะห์ในกรณีที่ สภาพหินอิมตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) สภาพหินมีน้ำบางส่วน ( $Z_w = 50$  เปอร์เซ็นต์) สภาพหินแห้ง ( $Z_w = 0$  เปอร์เซ็นต์) และไม่มีรอยแตกและสภาพแห้ง โดยสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบเชิงกำหนด

สภาพของมวลหิน	เปอร์เซ็นต์การอิมตัว ด้วยน้ำ	สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย
มีรอยแตกและอิมตัวไปด้วยน้ำ	100	2.81
มีรอยแตกและมีน้ำบางส่วน	50	3.45
มีรอยแตกและหินแห้ง	0	3.62
ไม่มีรอยแตกและหินแห้ง	0	3.98

จากการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบเชิงกำหนดพบว่า บ่อเหมืองโดยภาพรวมมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุดเท่ากับ 2.811 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่กำหนดควรมีค่ามากกว่า 1.5 ทำให้สรุปได้ว่าบ่อเหมืองโดยรวมมีเสถียรภาพและมีความปลอดภัยต่อการพังทลายแบบระนาบ

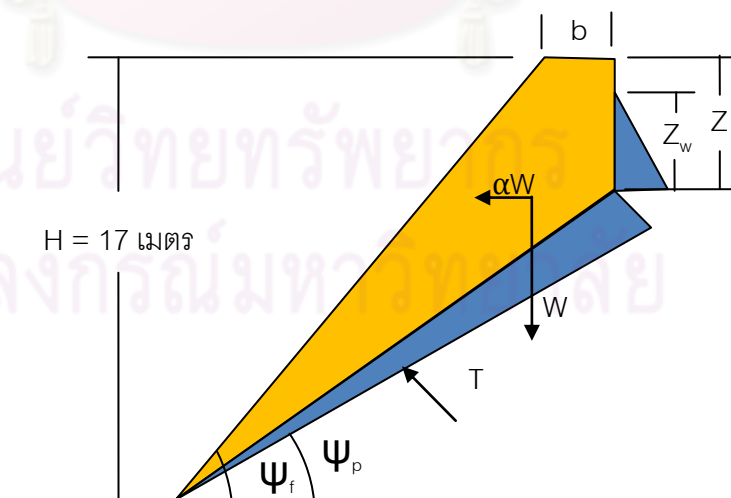


#### 4.3.1.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบระนาบ

ตัวอย่างการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบระนาบ กำหนดให้ค่าโคฮีชันเท่ากับ 125 กิโลพาสคาล มุมเสียดทานเท่ากับ 38.5 องศา มุมเทของชั้นหินเท่ากับ 60 องศา ความสูงชั้นบันไดเท่ากับ 17 เมตร ความชันของผนังบ่อ 70 องศา ค่าความเร่งของคลื่นเนื่องจากการระเบิดเท่ากับ 0.1g และสภาพชั้นหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) ผลจากการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบระนาบพบว่ามีความปลอดภัยเท่ากับ 2.81



รูปที่ 4.7 ผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสเกิดการพังทลายแบบระนาบ



รูปที่ 4.8 รูปแบบการพังทลายแบบระนาบ

กำหนดให้

$$H = 17 \text{ เมตร } \psi_p = 60 \text{ องศา } \psi_f = 70 \text{ องศา } \alpha = 0.1g \text{ และ } Z_w = 100 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

จากสมการที่ 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 แทนค่าได้เท่ากับ

$$Z = H \left( 1 - \sqrt{\cot \psi_f \cdot \tan \psi_p} \right) = 3.50$$

$$A = (H - z) \operatorname{cosec} \psi_p = 15.58$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w (H - Z) \operatorname{cosec} \psi_p = 276.74$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w (Z_w)^2 = 60.61$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ 1 - \frac{Z^2}{H^2} \right] \cdot (\cot \psi_p) - (\cot \psi_f) = 717.54$$

จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้เท่ากับ

$$F. S. = \frac{cA + [W(\cos \psi_p - \alpha \sin \psi_p) - U - (V \sin \psi_p)] \tan \phi}{W(\sin \psi_p + \alpha \sin \psi_p) + (V \cos \psi_p)}$$

$$F. S. = \frac{1930.659}{686.72} = 2.81$$

#### 4.3.2 การวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้ม

การวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดรูปลิ้มจะใช้มุมและการวางตัวของมวลหินเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบเชิงกำหนดมีทั้งมุมและการวางตัวของมวลหินเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์สามารถกำหนดระนาบการพังทลายคือ ระนาบที่ 1 คือ กลุ่ม 1 (194/60) และระนาบที่ 2 คือ กลุ่ม 2 (101/54) นอกจากนี้กำหนดให้ตัวแปรอื่นๆที่คือ ความสูงของชั้นบันไดเท่ากับ 17 เมตร ความชันของผนังบ่อเหมืองเท่ากับ 70 องศา และผนังบ่อเหมืองวางตัวแนว 165 องศา ค่าไคซี้นเท่ากับ 125 กิโลพาสคาล มุมเสียดทานเท่ากับ 38.5 องศา ค่าความถ่วงจำเพาะของหินเท่ากับ 2.7 โดยวิเคราะห์ในกรณีที่มีสภาพหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) และไม่มีรอยแตกและสภาพแห้ง ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปการวิเคราะห์การพังทลายรูปปลี้มเชิงกำหนด

สภาพของมวลหิน	เปอร์เซ็นต์การอิมตัว ด้วยน้ำ	สัมประสิทธิ์ความ ปลอดภัย
อิมตัวไปด้วยน้ำ	100	1.66
มีน้ำบางส่วน	50	4.61
แห้ง	0	4.69

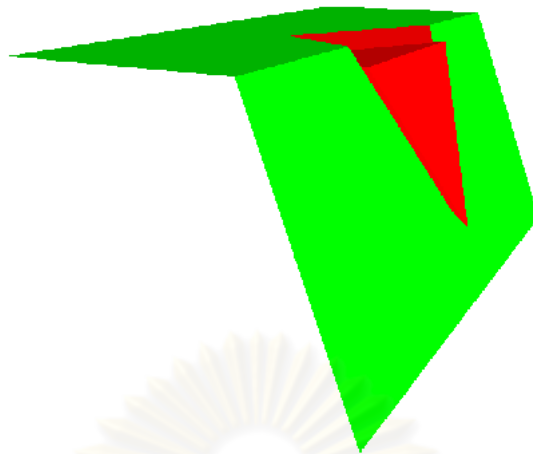
จากการวิเคราะห์การพังทลายรูปปลี้มเชิงกำหนดพบว่า บ่อเหมืองโดยรวมมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุดคือหินอิมตัวไปด้วยน้ำซึ่งมีสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.668 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่คำนวณได้เมื่อมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่กำหนดคือ 1.5 ทำให้สรุปได้ว่าบ่อเหมืองโดยรวมมีเสถียรภาพและมีความปลอดภัยต่อการพังทลายรูปปลี้ม

#### 4.3.2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดรูปปลี้ม

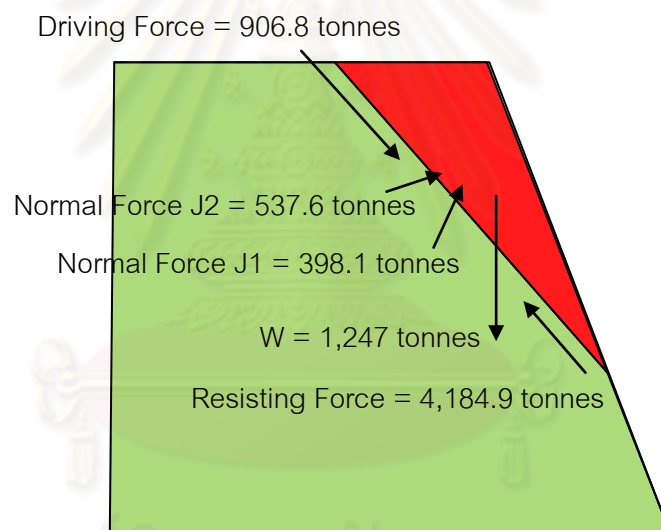
ตัวอย่างการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดรูปปลี้ม กำหนดให้ค่าโคฮีชันทั้งสองระนาบเท่ากับ 125 กิโลพาสคาล มุมเสียดทานทั้งสองระนาบเท่ากับ 38 องศา มุมเทของชั้นหินกลุ่มหนึ่งเท่ากับ 60 องศา ทิศทางการวางตัวของชั้นหินกลุ่มหนึ่งเท่ากับ 194 องศา มุมเทของชั้นหินกลุ่มสองเท่ากับ 54 องศา ทิศทางการวางตัวของชั้นหินกลุ่มสองเท่ากับ 102 องศา ความสูงชันบันได เท่ากับ 17 เมตร มุมเทของชันบันได 70 องศา และ สภาพชั้นหินมีน้ำบางส่วน ( $Z_w = 50$  เปอร์เซ็นต์) ผลจากการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดรูปปลี้ม พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 4.61 พื้นที่วิเคราะห์แบบจำลองและผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.11



รูปที่ 4.9 ผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสเกิดการพังทลายรูปปลี้ม



รูปที่ 4.10 แบบจำลองการพังทลายรูปลิ้ม



$$F.S. = \frac{\text{Resisting Force}}{\text{Driving Force}} = \frac{4,184.9}{906.8} = 4.61$$

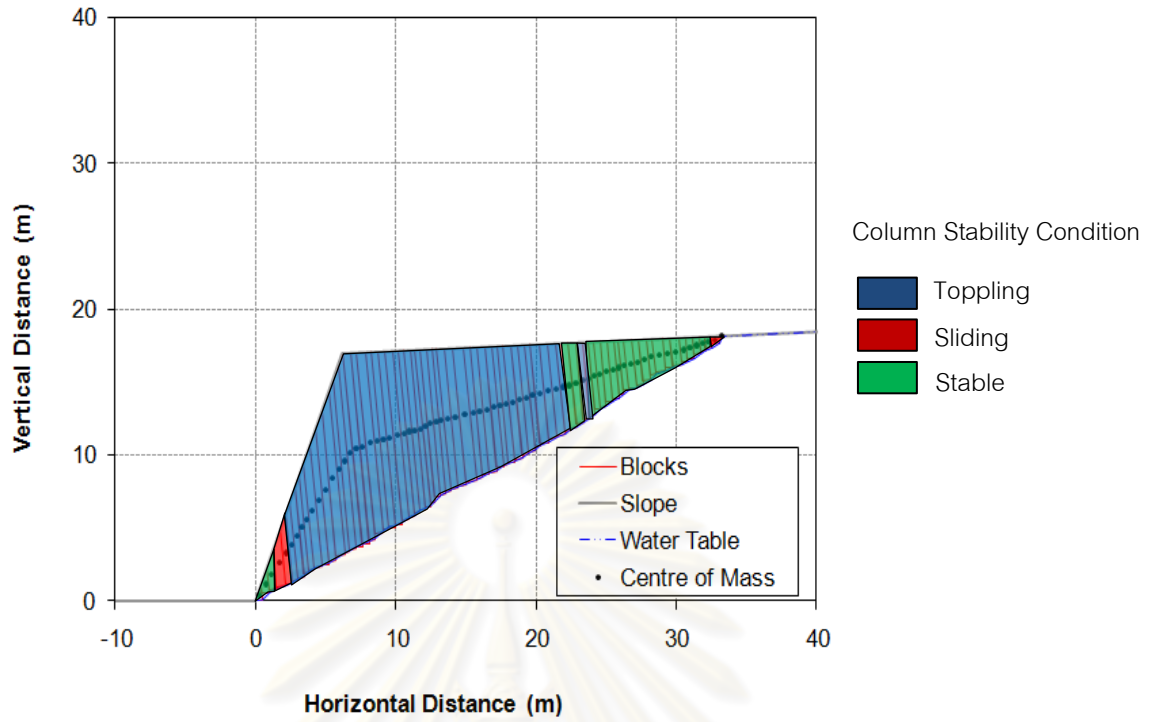
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้ม

#### 4.3.3 การวิเคราะห์การพังทลายแบบคะมาเชิงกำหนด

การวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบคะมาจะใช้โปรแกรม ROCKTOPPLE 1.00 การวิเคราะห์การพังทลายแบบคะมา ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้คือ มุมเทและการวางตัวของมวลหิน เพราะจำเป็นจะต้องจำลองโครงสร้างของผนังบ่อเหมืองให้มีสภาพจริงมากที่สุด โดยมุมเทและการวางตัวของมวลหินที่ได้มาจากการวิเคราะห์จลนศาสตร์เชิงภาพรวม คือ ระบายฐานมีมุมเทเท่ากับ 20 องศา การวางตัวที่ 195 องศา และ ระบายตั้งฉากมีทิศทางเดียวกับกลุ่ม 3 คือ มุมเทเท่ากับ 63 องศา และการวางตัวที่ 20 องศา จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การพังทลายเชิงกำหนดแบบคะมานอกจากนี้กำหนดให้ ความสูงชันบันไดเท่ากับ 17 เมตร ความชันของผนังบ่อเหมืองเท่ากับ 70 องศา และทิศทางการวางตัวของผนังบ่อเหมืองเท่ากับ 195 องศา ระยะห่างของแต่ละมวลหินเท่ากับ 0.2 เมตร ทำให้แบบจำลองมีบล็อกหินจำนวน 72 บล็อก มุมเสียดทานของมวลหินเท่ากับ 38 องศา และค่าความถ่วงจำเพาะของหินเท่ากับ 2.7 ผนังบ่อเหมืองที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.12

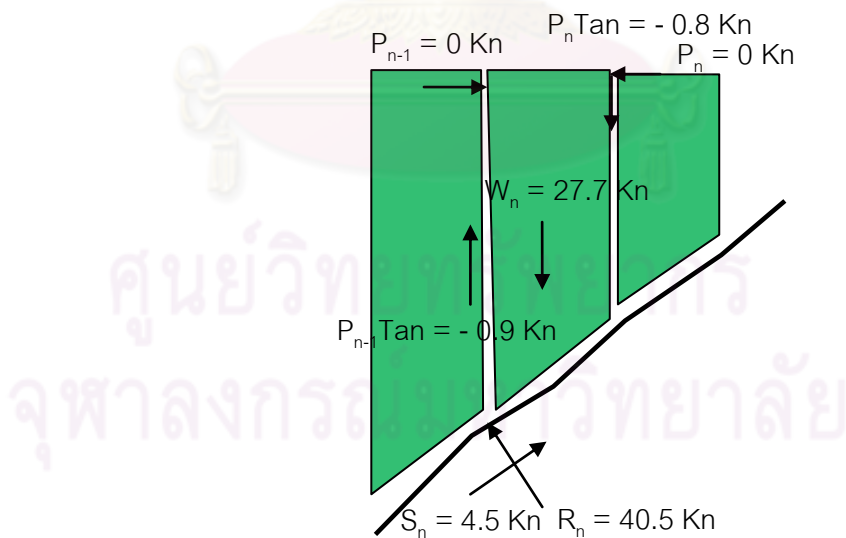


รูปที่ 4.12 ผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสเกิดการพังทลายแบบคะมา



รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้ำเชิงกำหนดด้วยโปรแกรม

ROCKTOPPLE



$$F. S_{\text{toppling}} = \frac{\text{Tan}\phi_{\text{available}}}{\text{Tan}\phi_{\text{required}}} = \frac{8.9}{0.79} = 11.2$$

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างการคำนวณบล็อกที่ 61

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้ำเชิงกำหนด

Name	codinate		Pn-1T	Pn-1S	Pn-1	Rn	Sn	S/R	F.S	Results
	X	Y								
Block 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.7	0.1	7.1	Stable
Block 2	0.4	0.0	-7.6	-47.2	0.0	16.4	1.9	0.1	6.9	Stable
Block 3	0.8	0.0	-3.1	-79.2	0.0	27.5	3.1	0.1	7.0	Stable
Block 4	1.2	59.4	75.4	-105.0	0.0	104.5	66.2	0.6	1.2	Sliding
Block 5	1.8	204.2	235.1	59.4	59.4	165.9	151.3	0.9	0.9	Sliding
Block 6	2.1	183.2	204.2	34.5	204.2	34.7	-15.3	0.4	1.8	Toppling
Block 7	2.5	164.0	183.2	-32.9	183.2	52.8	-11.7	0.2	3.6	Toppling
Block 8	2.8	150.3	164.0	-32.3	164.0	52.2	-6.7	0.1	6.1	Toppling
Block 9	3.1	138.7	150.3	-51.6	150.3	56.7	-4.2	0.1	10.6	Toppling
Block 10	3.4	124.5	138.7	-208.8	138.7	104.0	-1.4	0.0	57.3	Toppling
Block 11	3.9	112.5	124.5	-244.3	124.5	113.9	1.7	0.0	51.7	Toppling
Block 12	4.3	101.8	112.5	-274.9	112.5	121.9	3.9	0.0	24.9	Toppling
Block 13	4.7	90.4	101.8	-429.5	101.8	170.8	8.7	0.1	15.6	Toppling
Block 14	5.2	83.0	90.4	-231.5	90.4	102.9	4.7	0.0	17.3	Toppling
Block 15	5.5	74.3	83.0	-344.7	83.0	138.2	7.6	0.1	14.4	Toppling
Block 16	5.9	66.6	74.3	-367.4	74.3	144.1	9.0	0.1	12.6	Toppling
Block 17	6.2	63.1	66.6	-427.6	66.6	167.1	15.5	0.1	8.5	Toppling
Block 18	6.7	59.7	63.1	-386.4	63.1	151.7	13.9	0.1	8.7	Toppling
Block 19	7.2	56.7	59.7	-525.3	59.7	199.1	19.6	0.1	8.0	Toppling
Block 20	7.8	53.7	56.7	-340.0	56.7	133.9	12.2	0.1	8.6	Toppling
Block 21	8.3	50.7	53.7	-353.5	53.7	137.5	12.6	0.1	8.6	Toppling
Block 22	8.7	47.6	50.7	-402.6	50.7	153.5	14.4	0.1	8.4	Toppling
Block 23	9.2	44.9	47.6	-441.4	47.6	166.1	16.0	0.1	8.2	Toppling
Block 24	9.8	42.0	44.9	-310.0	44.9	119.6	10.8	0.1	8.7	Toppling
Block 25	10.2	39.5	42.0	-246.1	42.0	96.8	8.5	0.1	9.0	Toppling
Block 26	10.5	36.8	39.5	-347.4	39.5	130.8	12.1	0.1	8.5	Toppling
Block 27	11.0	34.2	36.8	-266.2	36.8	101.9	9.0	0.1	8.9	Toppling
Block 28	11.4	31.7	34.2	-251.1	34.2	95.9	8.5	0.1	8.9	Toppling
Block 29	11.7	29.3	31.7	-298.0	31.7	111.4	10.3	0.1	8.6	Toppling

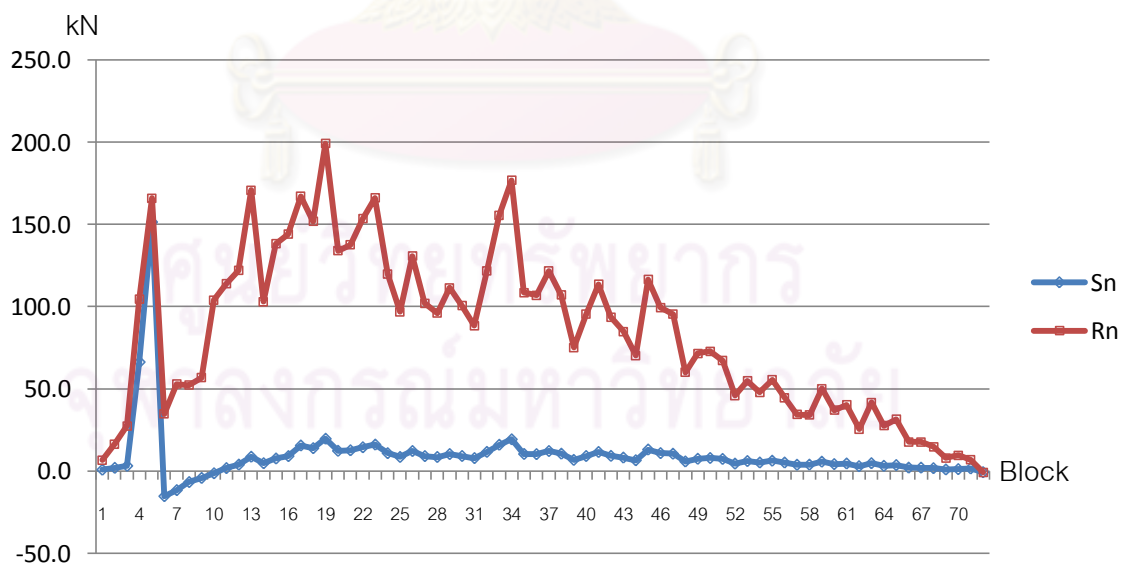
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้ำเชิงกำหนด (ต่อ)

Name	codinate		Pn-1T	Pn-1S	Pn-1	Rn	Sn	S/R	F.S	Results
	X	Y								
Block 30	12.2	26.9	29.3	-268.7	29.3	100.5	9.1	0.1	8.7	Toppling
Block 31	12.6	24.7	26.9	-235.8	26.9	88.4	7.8	0.1	8.9	Toppling
Block 32	12.9	22.4	24.7	-334.6	24.7	121.8	11.6	0.1	8.3	Toppling
Block 33	13.4	20.8	22.4	-432.2	22.4	155.6	15.9	0.1	7.7	Toppling
Block 34	14.1	20.3	20.8	-492.0	20.8	176.8	19.2	0.1	7.3	Toppling
Block 35	14.8	18.3	20.3	-299.6	20.3	108.5	10.3	0.1	8.3	Toppling
Block 36	15.3	16.4	18.3	-296.4	18.3	106.8	10.2	0.1	8.3	Toppling
Block 37	15.8	14.8	16.4	-340.2	16.4	121.6	12.1	0.1	7.9	Toppling
Block 38	16.3	13.2	14.8	-299.9	14.8	107.1	10.5	0.1	8.1	Toppling
Block 39	16.8	11.3	13.2	-209.7	13.2	75.1	6.7	0.1	8.8	Toppling
Block 40	17.2	9.6	11.3	-269.7	11.3	95.3	9.1	0.1	8.3	Toppling
Block 41	17.7	8.3	9.6	-322.3	9.6	113.4	11.5	0.1	7.8	Toppling
Block 42	18.2	6.9	8.3	-266.9	8.3	93.6	9.2	0.1	8.1	Toppling
Block 43	18.7	5.4	6.9	-243.0	6.9	84.8	8.1	0.1	8.2	Toppling
Block 44	19.2	3.9	5.4	-202.3	5.4	70.2	6.5	0.1	8.5	Toppling
Block 45	19.6	3.9	3.9	-332.6	3.9	116.5	13.0	0.1	7.1	Toppling
Block 46	20.2	3.6	3.9	-284.3	3.9	99.4	10.8	0.1	7.2	Toppling
Block 47	20.8	3.4	3.6	-272.6	3.6	95.4	10.5	0.1	7.2	Toppling
Block 48	21.4	2.3	3.4	-173.1	3.4	59.9	5.8	0.1	8.2	Toppling
Block 49	21.8	1.7	2.3	-206.6	2.3	71.6	7.4	0.1	7.6	Toppling
Block 50	22.3	1.4	1.7	-209.7	1.7	72.8	7.9	0.1	7.3	Toppling
Block 51	22.8	1.1	1.4	-193.1	1.4	67.1	7.3	0.1	7.3	Toppling
Block 52	23.3	0.4	1.1	-133.8	1.1	45.9	4.5	0.1	8.1	Toppling
Block 53	23.7	0.3	0.4	-158.1	0.4	54.8	6.0	0.1	7.2	Toppling
Block 54	24.1	0.0	0.3	-138.8	0.3	47.9	5.1	0.1	7.4	Toppling
Block 55	24.5	0.0	-0.6	-160.2	0.0	55.5	6.2	0.1	7.0	Stable
Block 56	25.1	0.1	-0.1	-128.6	0.0	44.7	5.1	0.1	6.9	Stable
Block 57	25.5	0.0	0.1	-99.6	0.1	34.4	3.8	0.1	7.2	Toppling
Block 58	25.9	0.0	-0.2	-98.5	0.0	34.1	3.8	0.1	7.0	Stable

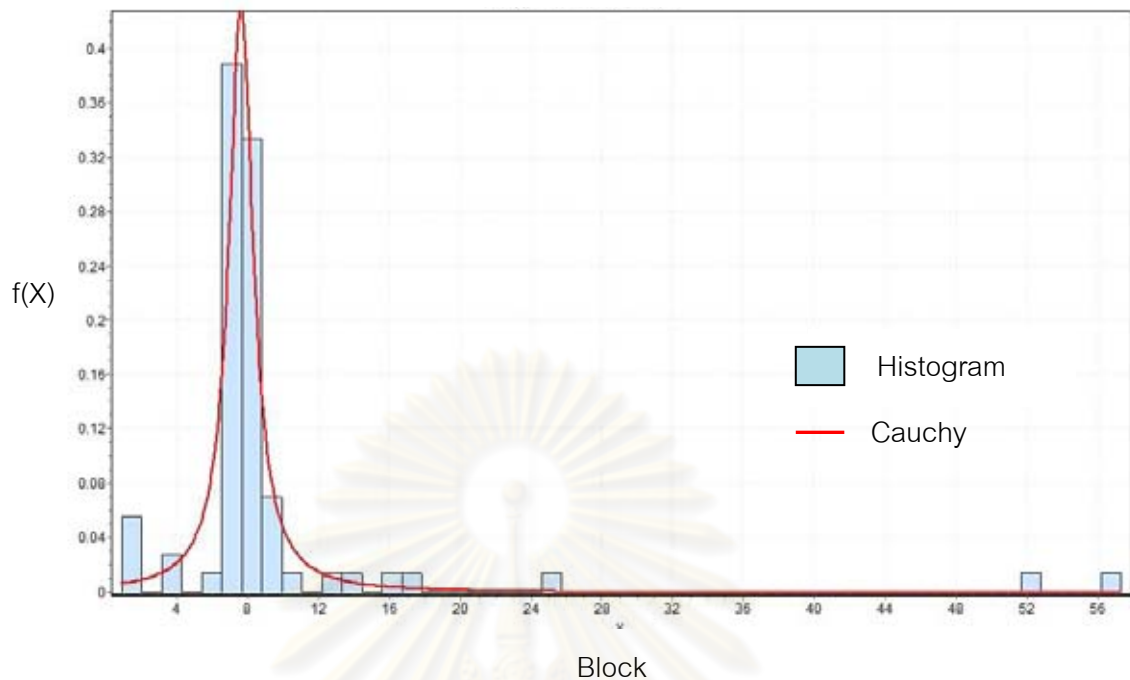


ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้ำเชิงกำหนด (ต่อ)

Name	codinate		Pn-1T	Pn-1S	Pn-1	Rn	Sn	S/R	F.S	Results
	X	Y								
Block 59	26.3	0.0	-1.9	-144.8	0.0	50.2	5.6	0.1	7.0	Stable
Block 60	26.9	0.0	-0.9	-106.7	0.0	37.0	4.2	0.1	7.0	Stable
Block 61	27.3	0.0	-1.9	-116.1	0.0	40.2	4.5	0.1	7.0	Stable
Block 62	27.9	0.0	-0.8	-73.4	0.0	25.4	2.9	0.1	7.0	Stable
Block 63	28.3	0.0	-4.5	-120.1	0.0	41.6	4.7	0.1	7.0	Stable
Block 64	29.0	0.0	-2.3	-79.3	0.0	27.5	3.1	0.1	7.0	Stable
Block 65	29.6	0.0	-4.1	-90.8	0.0	31.5	3.6	0.1	7.0	Stable
Block 66	30.2	0.0	-1.4	-51.0	0.0	17.7	2.0	0.1	6.9	Stable
Block 67	30.6	0.0	-2.0	-50.7	0.0	17.6	2.0	0.1	6.9	Stable
Block 68	31.1	0.0	-2.6	-42.2	0.0	14.7	1.7	0.1	6.9	Stable
Block 69	31.6	0.0	-1.0	-22.6	0.0	7.9	0.9	0.1	6.8	Stable
Block 70	32.0	0.0	-2.6	-27.3	0.0	9.5	1.1	0.1	6.8	Stable
Block 71	32.5	0.8	-3.2	-16.9	0.0	6.8	1.5	0.2	3.5	Stable
Block 72	33.0	0.0	-1.7	0.8	0.8	-0.8	-0.8	0.9	0.9	Sliding



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ของแรงที่กระทำในแต่ละบล็อก



รูปที่ 4.16 ฮิสโทแกรมค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในแต่ละบล็อก

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบค้ำด้วยโปรแกรม TOPPLE 1.0 พบว่า บล็อกที่มีเสถียรภาพจำนวน 19 บล็อก บล็อกที่เกิดการค้ำจำนวน 50 บล็อก และบล็อกที่เกิดการไถลจำนวน 3 บล็อก โดยรูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงกระทำในแต่ละบล็อกพบว่าค่า  $R_N$  มีค่ามากกว่า  $S_N$  ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าผนังบ่อมีโอกาสเกิดการพังทลายแบบค้ำนั่นเอง เนื่องจากค่า  $R_N$  เป็นแรงที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับบล็อกทำให้เกิดการเคลื่อนตัวออกไปจากผนังบ่อเหมือน และ จากฮิสโทแกรมค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในแต่ละบล็อก (รูปที่ 4.16) พบว่ามีค่า F.S. บล็อกที่มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่กำหนด ( $F.S_{critical} = 1.5$ ) จำนวน 3 บล็อก บล็อกเหล่านี้มีโอกาสเกิดการไถลของมวลหินมาได้

สรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบค้ำคือ มวลหินบนความลาดของผนังบ่อไม่เกิดการเคลื่อนไหลลงมา เนื่องจากบริเวณด้านล่างของความลาดมีมวลหินที่มีเสถียรภาพอยู่ ถึงแม้ว่าจะมีมวลหินบางส่วนเกิดการไถลลงมา แต่มวลหินบริเวณด้านล่างของความลาดจะช่วยค้ำยันมวลหินที่เกิดการไถลลงมาให้มีเสถียรภาพ ทำให้เกิดเสถียรภาพของความลาดในภาพรวม

#### 4.3.4 สรุปการวิเคราะห์การพังทลายของมวลหินเชิงกำหนด

ผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบเชิงกำหนดพบว่า ความลาดในภาพรวมมีเสถียรภาพดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 2.8 - 3.9 ผลการวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้มพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกำหนด ( $F.S_{critical} = 1.5$ ) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.6 - 3.6 และผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้ำพบว่า มีโอกาสการเกิดการค้ำของมวลหินบริเวณตอนกลางของความลาดจำนวน 50 บล็อก มีบล็อกที่เกิดการไถลจำนวน 3 บล็อก และมีบล็อกที่มีเสถียรภาพจำนวน 19 บล็อก แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวมมวลหินค่อนข้างมีเสถียรภาพ

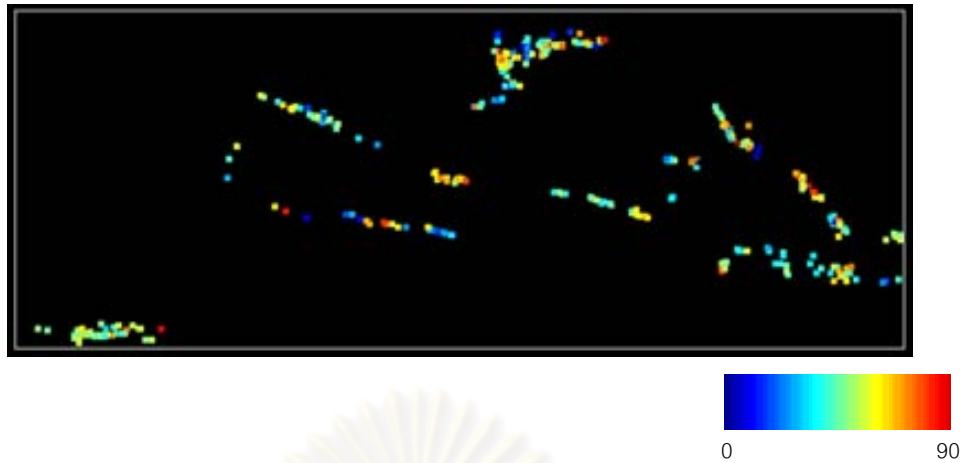
#### 4.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

ถึงแม้ว่าในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีเชิงกำหนดจะมีค่าเกินค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกำหนดแต่ก็ยังมีโอกาสเกิดการพังทลาย เนื่องจากความไม่แน่นอนทางด้านธรณีวิทยา และ ความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ ดังนั้นการประเมินเสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นโอกาสการเกิดการพังทลายของความลาดจะให้ข้อมูลด้านเสถียรความลาดที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า

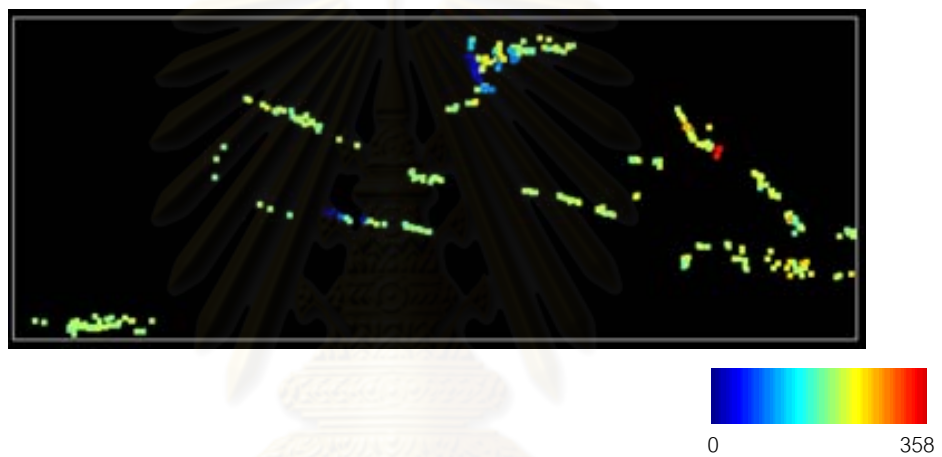
การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินเชิงความน่าจะเป็นประกอบด้วยกันสองส่วนคือ การจำลองโครงสร้างการวางตัวของชั้นหินโดยสร้างแบบจำลองทางธรณีสถิติแบบเกาส์เซียน และการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น โดยค่าการวางตัวของชั้นหินที่ได้จากการจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นเพื่อหาโอกาสการพังทลายของมวลหิน

##### 4.4.1 การดำเนินการด้วยวิธีธรณีสถิติ

4.4.1.1 การเตรียมข้อมูลก่อนดำเนินการด้วยวิธีธรณีสถิติ โดยการสร้างพื้นที่จำลองที่ครอบคลุมพื้นที่บ่อเหมืองขนาด 1,560 เมตร X 660 เมตร โดยมีขนาดบล็อกเท่ากับ 10 เมตร X 10 เมตร จัดรูปแบบข้อมูล และนำข้อมูลเข้าโปรแกรม SGEMs เพื่อดำเนินการธรณีสถิติแบบเกาส์เซียน รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงการเตรียมข้อมูลมุมเทและทิศทางการวางตัวก่อนป้อนเข้าสู่โปรแกรม



รูปที่ 4.17 การเตรียมข้อมูลมมเท



รูปที่ 4.18 การเตรียมข้อมูลทิศทางการวางตัว

#### 4.4.1.2 การคำนวณค่าสถิติพื้นฐานของข้อมูล

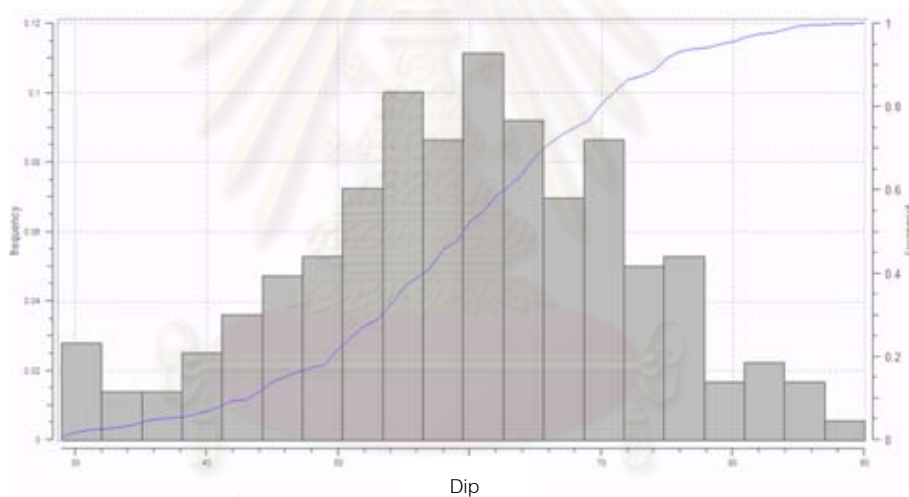
ค่าสถิติพื้นฐานซึ่งประกอบด้วย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความแปรปรวน ของมมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ดังแสดงในตารางที่ 4.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 สถิติพื้นฐานของการวางตัวของหิน

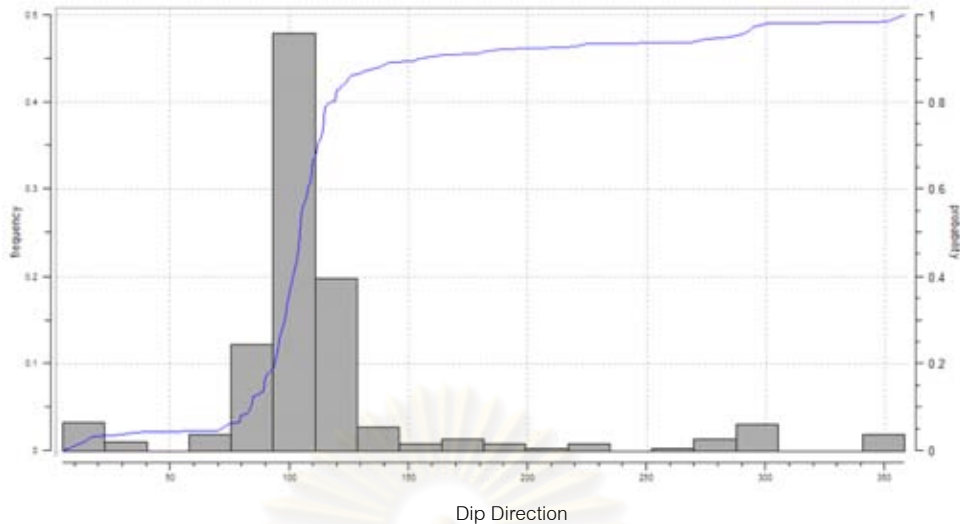
	Minimum (deg)	Maximum (deg)	Mean (deg)	Standard Deviation(SD)	Variance (R <sup>2</sup> )
Dip angle	29	90	59.54	12.61	159.18
Dip Direction	5	358	117.03	58.54	3428.68

4.4.1.2.1 ค่ามุมเทของมวลหิน จากข้อมูลค่ามุมเทของมวลหินจำนวน 359 ตัวอย่างพบว่า ค่ามุมเทของมวลหินมีค่าอยู่ในช่วง 29-90 องศา มีค่าเฉลี่ยมุมเทของมวลหินเท่ากับ 59.54 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 12.61 องศา และความแปรปรวนของข้อมูลเท่ากับ 152.18



รูปที่ 4.19 กราฟฮิสโทแกรมของค่าความลาดชันของมวลหิน

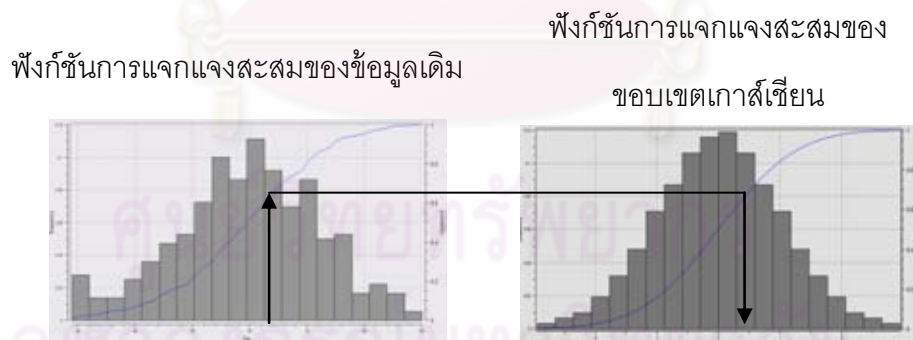
4.4.1.2.2 ค่าทิศทางการวางตัวของมวลหิน จากข้อมูลค่ามุมเทของมวลหินจำนวน 359 ตัวอย่างพบว่า ค่ามุมเทของมวลหินมีค่าอยู่ในช่วง 5-358 องศา มีค่าเฉลี่ยมุมเทของมวลหินเท่ากับ 117.03 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 58.54 องศา และความแปรปรวนของข้อมูลเท่ากับ 3,428



รูปที่ 4.20 กราฟฮิสโทแกรมของค่าทิศทางการวางตัวของมวลหิน

#### 4.4.1.3 การเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูล

การจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนจำเป็นต้องเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลจากแบบธรรมดาเป็นรูปแบบขอบเขตเกาส์เซียน (Gaussian Domain) วิธีการเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลทำได้โดยการสร้างฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลเดิม ส่งข้อมูลในฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของข้อมูลเดิมไปยังฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของขอบเขตเกาส์เซียน การเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงข้อมูลด้วยวิธีธรณีสถิติของมูเมเท

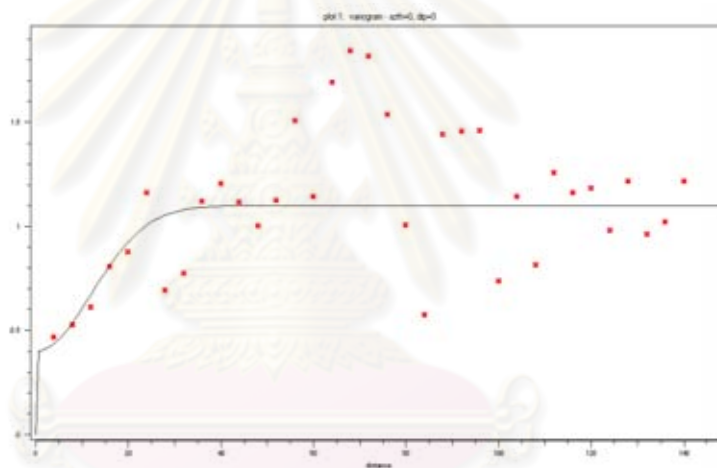
#### 4.4.1.4 การจำลองเวรีโอแกรม

การคำนวณและการจำลองเวรีโอแกรม จะต้องใช้ค่ามูเมเทและค่าทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ที่มีการเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลให้อยู่ในรูปของการแจกแจงแบบปกติแล้วมาคำนวณ และจำลองรูปแบบเวรีโอแกรมที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม SGEMS ดังนี้

#### 4.4.1.4.1 การจำลองเวรีโอแกรมของมุมเท

การหาความสัมพันธ์ของเวรีโอแกรมได้จาก จำนวนค่าระยะห่างระหว่างข้อมูล (Number of Lag) จำนวน 30 ค่า ระยะห่างระหว่างข้อมูล (Lag separation) เท่ากับ 2 เมตร และระยะเผื่อระหว่างข้อมูล (Lag tolerance) เท่ากับ 1 เมตร โดยมีการค้นหาจุดข้างเคียงได้จากทิศทาง (Azimuth) เท่ากับ 0 องศา มุมเท (Dip) เท่ากับ 0 องศา มุมเบี่ยงเบน (Tolerance) เท่ากับ 30 องศา และระยะขนาด (Band width) เท่ากับ 15 เมตร

เวรีโอแกรมของมุมเทสามารถจำลองด้วยแบบจำลองเกาส์เซียน (Gaussian) ซึ่งประกอบด้วยค่าความแปรปรวนคงที่เท่ากับ 0.7 ค่าความแปรปรวนนักเกิดเท่ากับ 0.4 ระยะอิทธิพลเท่ากับ 31.5 เมตรโดยแบบจำลองเวรีโอแกรมนี้ จะถูกใช้ในการคำนวณในแบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียน



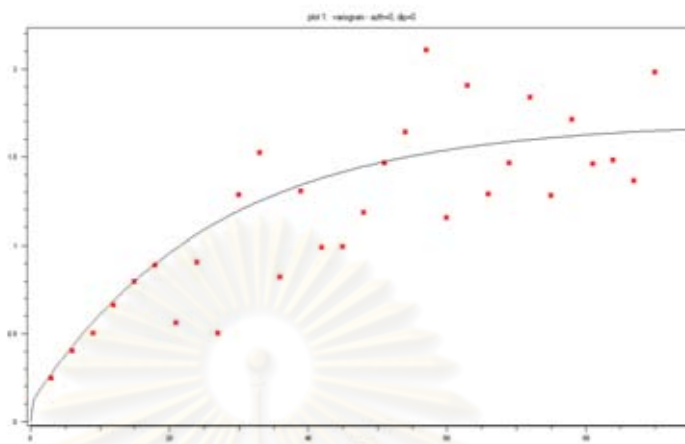
รูปที่ 4.22 แบบจำลองเวรีโอแกรมของมุมเท

#### 4.4.1.4.2 การจำลองเวรีโอแกรมของค่าแนวการวางตัว

การหาความสัมพันธ์ของเวรีโอแกรมได้จาก จำนวนค่าระยะห่างระหว่างข้อมูล (Number of Lag) จำนวน 40 ค่า ระยะห่างระหว่างข้อมูล (Lag separation) เท่ากับ 2 เมตร และระยะเผื่อระหว่างข้อมูล (Lag tolerance) เท่ากับ 1 เมตร โดยมีการค้นหาจุดข้างเคียงได้จากค่าจากทิศทาง (Azimuth) เท่ากับ 0 องศา มุมเท (Dip) เท่ากับ 0 องศา มุมเบี่ยงเบน (Tolerance) เท่ากับ 50 องศา และระยะขนาด (Band width) เท่ากับ 25 เมตร

เวรีโอแกรมของค่าทิศทางวางตัวของชั้นหินสามารถจำลองด้วยแบบจำลองเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential) ซึ่งประกอบด้วยค่าความแปรปรวนคงที่เท่ากับ 1.6 ค่า

ความแปรปรวนมักเกิดเท่ากับ 0.1 และระยะอิทธิพลเท่ากับ 78 เมตรโดยแบบจำลองเวรีโอแกรมนี้ จะถูกใช้ในการคำนวณของแบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียน

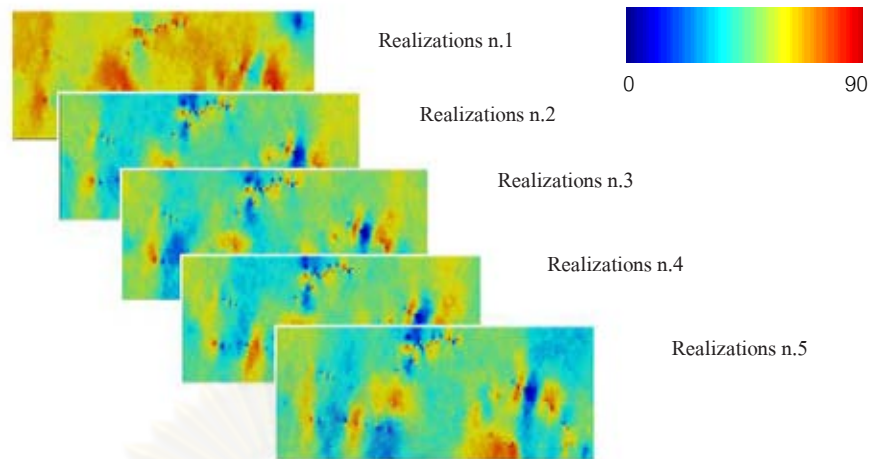


รูปที่ 4.23 แบบจำลองเวรีโอแกรมของค่าแนวการวางตัว

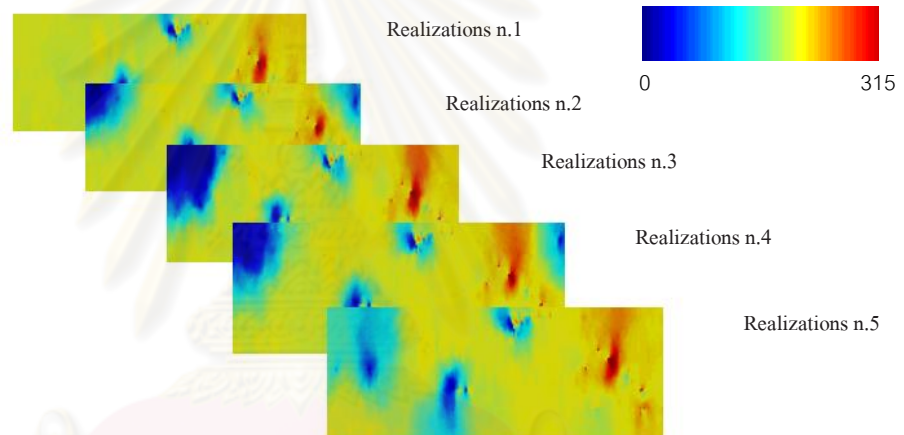
4.4.1.5 การประมาณค่าโดยธรณีสถิติแบบจำลองเกาส์เซียน (Sequential Gaussian simulation)

การศึกษานี้ใช้โปรแกรม Stanford Geostatistical Modeling Software (SGEMs) มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยเริ่มจากการแบ่งย่อยมวลหินเป็นบล็อกขนาด 10 X 10 เมตร ขนาดของบล็อกกำหนดโดยความสูงชั้นบันไดและแบบการทำเหมืองเป็นหลัก โดยมีจำนวนบล็อกรวมทั้งสิ้น 10,269 บล็อก มีพื้นที่ครอบคลุมพื้นที่ 1.52 ตารางกิโลเมตร กำหนดระยะการค้นหเท่ากับ 300 เมตร และจำนวนข้อมูลที่ถูกคำนวณมากที่สุดที่ 5 ข้อมูล จะได้แบบจำลองมุมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหิน 50 แบบจำลอง โดยรูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงตัวอย่างแบบจำลองมุมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหิน (แบบจำลองที่ 1-5) จากการเปรียบเทียบสถิติระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บภาคสนามกับแบบจำลองที่ได้จากวิธีธรณีสถิติ พบว่าค่าของแต่ละตัวแปรใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่าแบบจำลองที่ได้จากธรณีสถิติ จะมีค่าความแปรปรวนน้อยกว่าค่าที่เก็บมาจริง ตารางที่ 4.6 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบข้อมูลสถิติระหว่างข้อมูลทางสถิติของข้อมูลจริงและข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองที่ 14





รูปที่ 4.24 ตัวอย่างแบบจำลองมุมเท ลำดับที่ 1-5

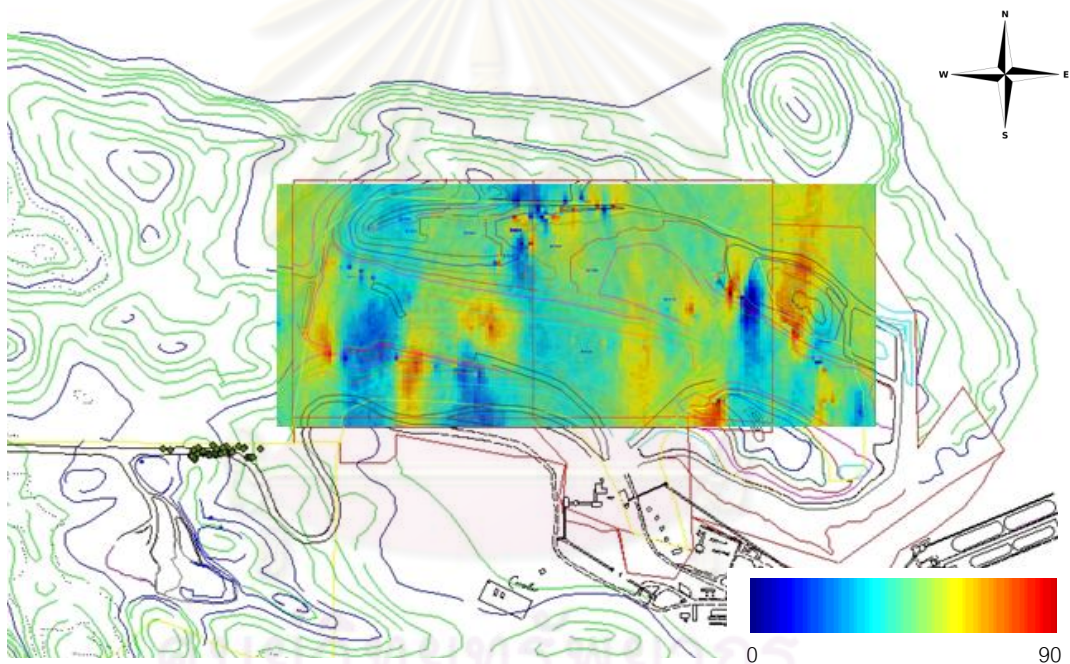


รูปที่ 4.25 ตัวอย่างแบบจำลองทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ลำดับที่ 1-5  
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบข้อมูลภาคสนามและแบบจำลองที่ 14

	Number of data	Minimum (deg)	Maximum (deg)	Mean (deg)	Standard Deviation(SD)	Variance ( $R^2$ )
Original dip angle	359	29	90	59.54	12.61	159.18
dip angle Realization N.14	10296	0.47	90	58.13	6.01	36.16
Original dip direction	359	5	358	183.96	48.51	2353.52
dip direction Realization N.14	10296	5	315	187.47	24.98	624.33

#### 4.4.1.6 สรุปการดำเนินการธรณีสถิติ

การจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนพบว่า แบบจำลองที่ได้จากการจำลองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เนื่องจากค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง แสดงว่าช่วงของค่าที่ได้จากการจำลองแคบกว่าข้อมูลปฐมภูมิ รูปที่ 4.26 แสดงการนำแผนที่มุมเทที่ได้จากการจำลองมาซ้อนทับกับแผนที่ภูมิประเทศของหน้าเหมืองปัจจุบัน พบว่ามีความสอดคล้องกันดีกับหน้าเหมืองปัจจุบัน โดยค่ามุมเทและการวางตัวของชั้นหินบริเวณที่เก็บมาจะมีค่าใกล้เคียงกับแผนที่แบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียน และ บริเวณที่ห่างออกไปจากจุดที่เก็บตัวอย่างจะพบว่าค่ามุมเท และการวางตัวของชั้นหินมีค่าแตกต่างไปจากค่าในหน้างานจริงเล็กน้อย



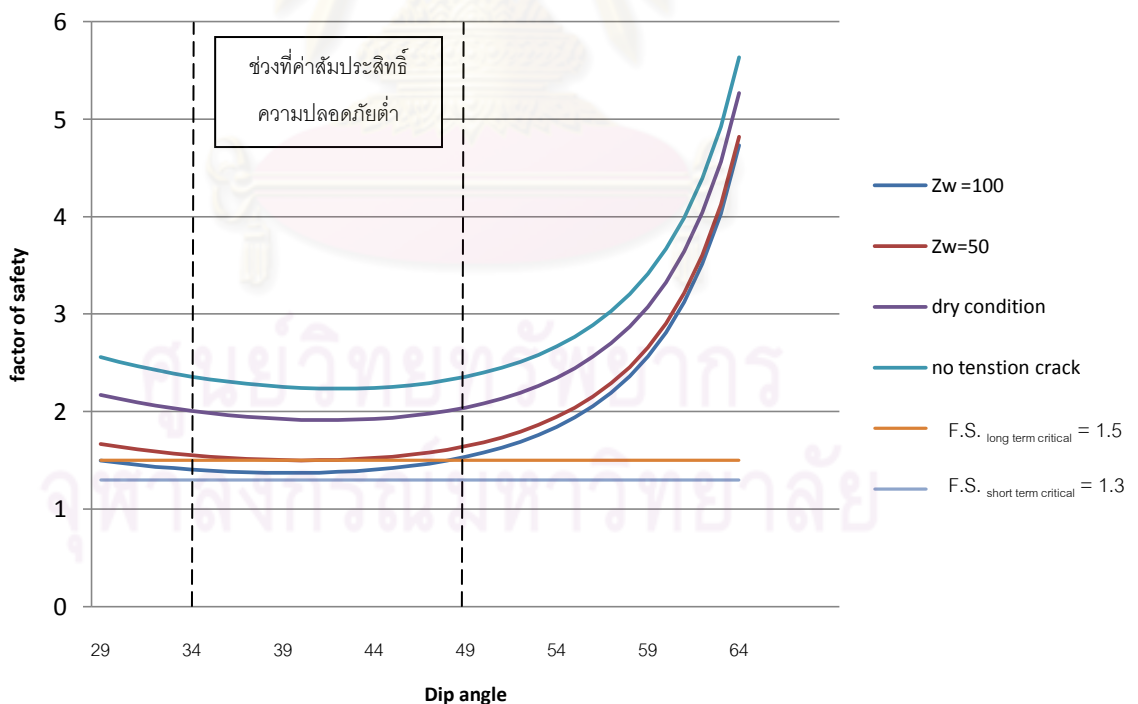
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างการซ้อนทับระหว่างแผนที่มุมเท และ หน้าเหมือง

#### 4.4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพแบบระนาบเชิงความน่าจะเป็น

เนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง และความไม่แน่นอนของตัวแปรเหล่านั้นได้นำมาใช้ประกอบกรวิเคราะห์แบบเชิงกำหนด วิธีการการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น ได้นำเอาตัวแปรที่ไม่แน่นอนมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดได้

#### 4.4.2.1 การวิเคราะห์ความไว

จากการวิเคราะห์ความไวตามรูปที่ 4.27 พบว่า ค่ามุมเทในช่วง 34- 49 องศา เป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำ เนื่องจากค่าแรงเสียดทานการเคลื่อนตัวของมวลหิน และแรงเคลื่อนตัวของมวลหินมีค่าใกล้เคียงกัน ช่วงมุมเทน้อยกว่า 34 องศาพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงขึ้นโดยแปรผกผันกับค่ามุมเท เนื่องจากกระบวนการที่จะเกิดการไถลเลื่อน มีความยาวมากทำให้เกิดแรงเสียดทานการเคลื่อนตัวของมวลหินมากขึ้น และช่วงมุมเทมากกว่า 49 องศาพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงขึ้นโดยแปรผันตามค่ามุมเท เนื่องจากมวลที่จะเกิดการไถลเลื่อนในความลาดมีน้ำหนักน้อยทำให้แรงเคลื่อนตัวของมวลหินมีน้อยตามไปด้วย จาก การวิเคราะห์กรณีที่มีสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) หินมีน้ำบางส่วน ( $Z_w = 50$  เปอร์เซ็นต์) สภาพหินแห้ง ( $Z_w = 0$  เปอร์เซ็นต์) และสภาพไม่มีรอยแตกและสภาพแห้ง พบว่าทุกกรณีให้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเกินค่าที่กำหนดคือ 1.5 ยกเว้นกรณีที่มีสภาพหินอิ่มตัวด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซ็นต์) นอกจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำที่สุดแล้ว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมีค่าน้อยกว่า 1.5 ในช่วงของค่าของมุมเทระหว่าง 29-49 องศา ซึ่งเป็นกรณีที่มีความเสี่ยงเกิดการพังทลายแบบระนาบ กรณีนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ ความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น



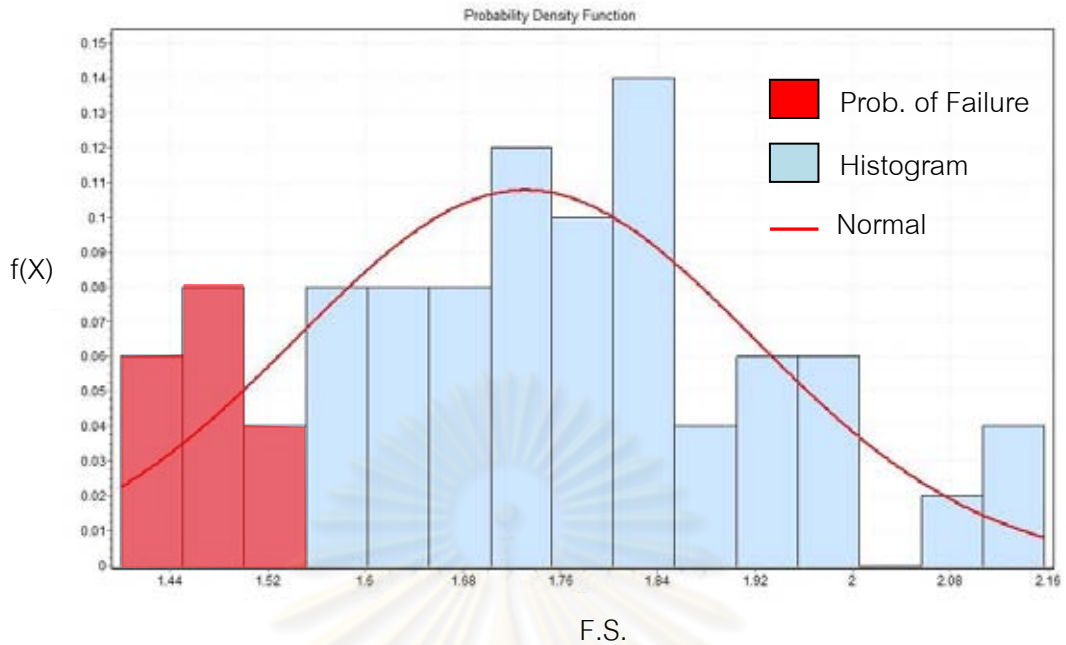
รูปที่ 4.27 การวิเคราะห์ความไวของค่ามุมเทในการวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบ

4.4.2.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น  
จากการสำรวจลักษณะโครงสร้างการวางตัวของชั้นหินสัมพันธ์กับหน้าเหมือง  
พบว่า พื้นที่ที่จะมีโอกาสการเกิดการพังทลายแบบระนาบอยู่บริเวณทางด้านเหนือของบ่อเหมืองมี  
ขนาดพื้นที่ 290X520 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 พื้นที่ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

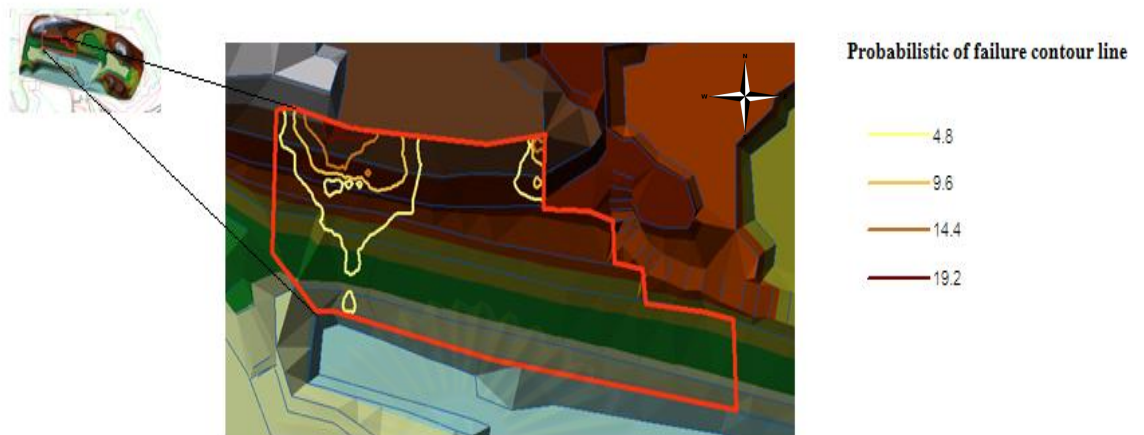
จากการวิเคราะห์ความไวพบว่า กรณีที่มวลหินเต็มไปด้วยน้ำและมีรอบแตกบน  
ผนังเป็นกรณีที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลาย ซึ่งจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของ  
มวลหินเชิงความน่าจะเป็น โดยแผนที่มุมเทที่ได้จากแบบจำลองธรณีสัณติจะถูกนำไปใช้  
ประกอบการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของบล็อกนั้นๆ ดังนั้นภายในบล็อกเดียวกัน  
จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยได้หลายค่าตามจำนวนแบบจำลองที่ใช้ และ  
ฟังก์ชันการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสามารถสร้างได้จากกลุ่มของค่าสัมประสิทธิ์  
ความปลอดภัยที่คำนวณไว้แล้ว ในที่สุดโอกาสการพังทลายจะคำนวณจากพื้นที่ได้กราฟที่มีค่า  
สัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำกว่าค่าที่กำหนด รูปที่ 4.29 แสดงตัวอย่างการคำนวณโอกาสการ  
พังทลายของบล็อกที่อยู่ในตำแหน่ง E698215 และ N1624485 ผลการคำนวณพบว่าโอกาสการ  
พังทลายเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกำหนดเท่ากับ 1.5 ภายใต้สภาวะ  
อิ่มตัวด้วยน้ำ และมีรอยร้าวบนผนังบ่อ



รูปที่ 4.29 ฮิสโทแกรมของโอกาสการพังทลายของบล็อกในตำแหน่ง E698215 และ N1624485

#### 4.4.2.3 แผนที่เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

การสร้างแผนที่ความเสี่ยงประกอบด้วย การนำค่าโอกาสการพังทลายจากการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็นในแต่ละบล็อกมาพล็อตเป็นเส้นชั้นความสูง (Contour) ประกอบในแผนที่บ่อเหมือง โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็นในสถานะที่ชั้นหินมีน้ำบางส่วน ชั้นหินแห้ง และไม่มีรอยแตกบนผนังบ่อ พบว่ามีโอกาสเกิดการพังทลายเข้าใกล้ 0 เปอร์เซนต์ แต่ว่าการนี้ที่สถานะอิ่มไปด้วยน้ำ ( $Z_w = 100$  เปอร์เซนต์) พบว่ามีโอกาสเกิดการพังทลาย โดยบ่งบอกโอกาสการพังทลายของมวลหินด้วยเส้นระดับความสูงแบ่งตามสีตามรูปที่ 4.30 พบว่าพื้นที่ศึกษามีโอกาสการพังทลายสูงที่สุดเท่ากับ 22 เปอร์เซนต์ โดยแสดงเป็นเส้นระดับสีน้ำตาล ผลที่ได้ระบุได้ว่าผนังบ่อระดับความสูงที่ +260 บริเวณมุมตะวันตกเฉียงเหนือ เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการพังทลายของมวลหิน และผนังบ่อที่มีระดับที่ลดลงมากก็จะมีความเสี่ยงต่อการพังทลายของมวลหินน้อยลง

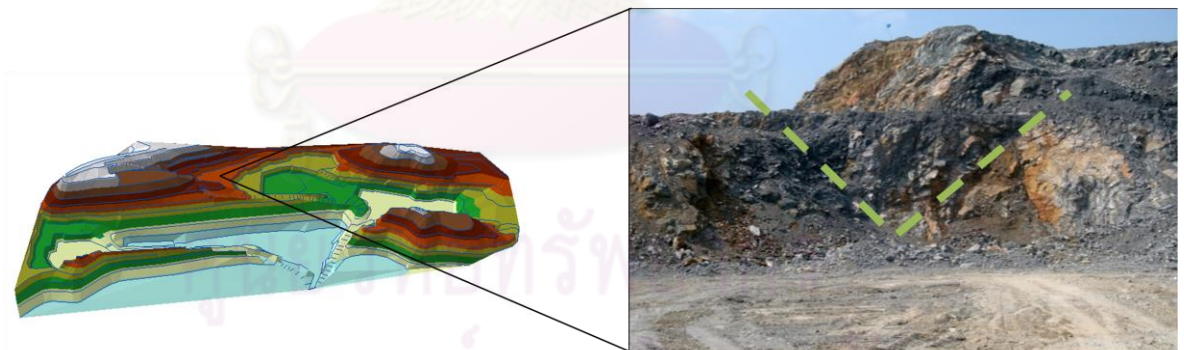


รูปที่ 4.30 แผนที่ความเสี่ยงต่อการพังทลายแบบระนาบ

#### 4.4.3 การวิเคราะห์การพังทลายรูปลิ้ม

##### 4.4.3.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

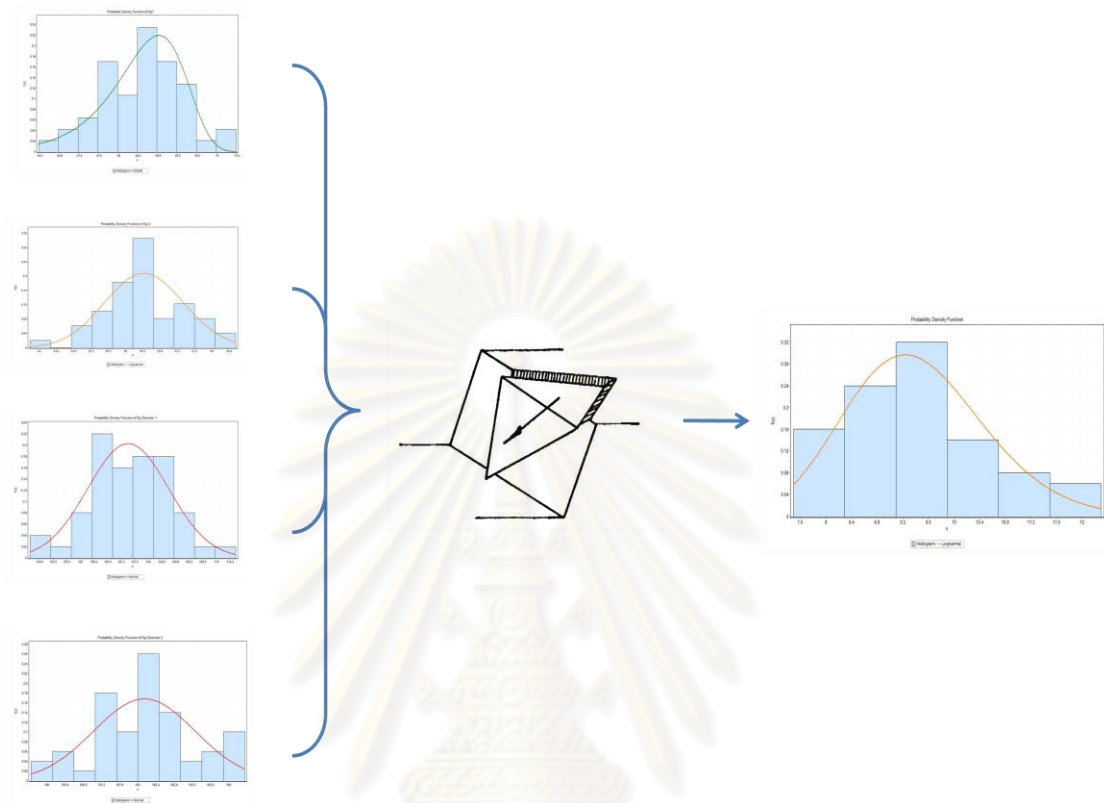
พื้นที่ทำการวิเคราะห์มีพื้นที่ขนาด 1,500 X 700 เมตร และมีความสูงทั้งหมดเท่ากับ 170 เมตร ในพื้นที่ดังกล่าวพบว่ามีโอกาสการเกิดการพังทลายรูปลิ้มเพียงแห่งเดียว คือ บล็อก N698560 E1624540 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 พื้นที่ที่มีโอกาสการเกิดการพังทลายรูปลิ้ม

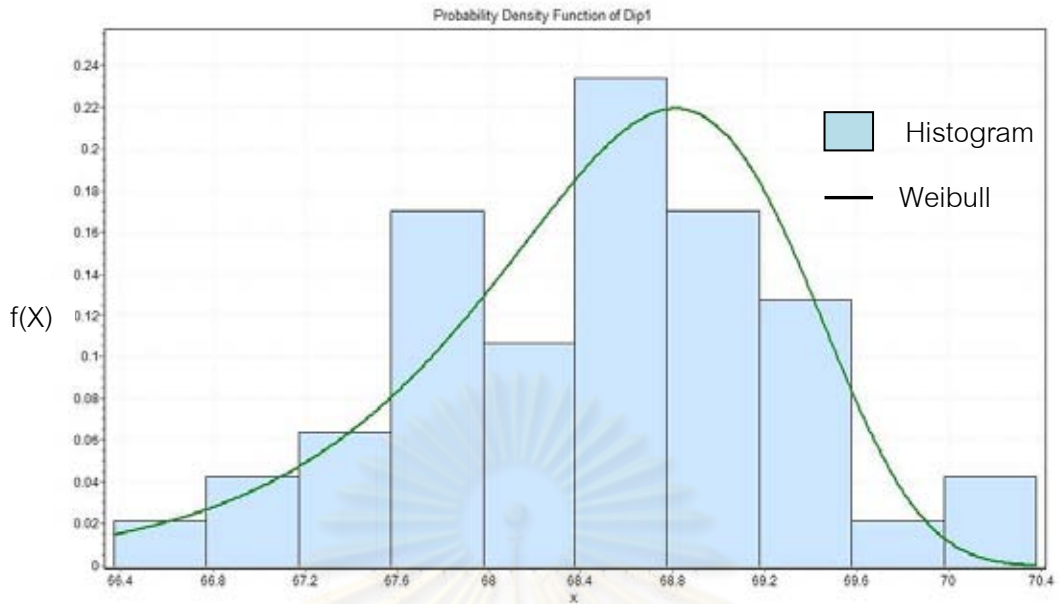
การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็นของการพังทลายรูปลิ้ม เริ่มจากการนำมุมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหินของหน้าที่ 1 และ 2 ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยแบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนในบล็อกที่ N698550 E1624540 และ N698560 E1624540 จำนวน 50 ค่าจาก 50 แบบจำลอง มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด เพื่อที่จะหาโอกาสการพังทลายของมวลหินในการ

เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความพลอดภัยที่กำหนดไว้เท่ากับ 1.5 ดังที่แสดงในรูปที่ 4.32 โดยการกระจายตัวของข้อมูลมุลุมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหิน ดังแสดงในรูปที่ 4.33 - 4.36



รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์เสถียรภาพของมวลหินรูปสี่เหลี่ยมเชิงความน่าจะเป็น

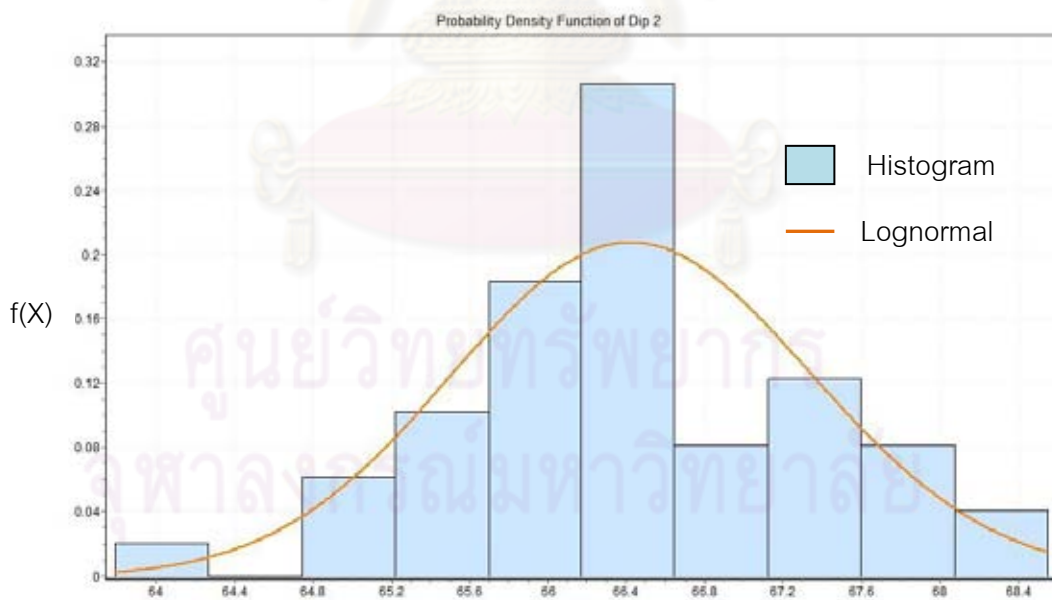
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Dip 1

#### รูปที่ 4.33 ฮิสโทแกรมของมุมเทด้านที่ 1

มุมเทมวลหินหน้าที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 66.36-70.37 องศา มีค่าเฉลี่ยมุมเทของมวลหินเท่ากับ 68.52 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.79 องศา และ มีการกระจายตัวแบบไวบูล (Weibull Distribution)

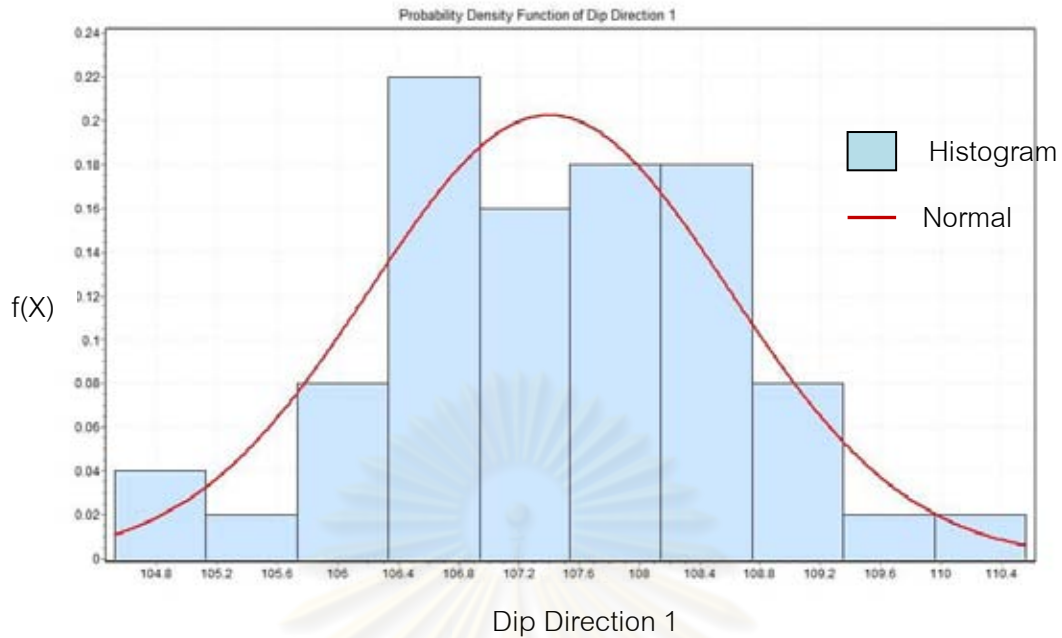


Dip 2

#### รูปที่ 4.34 ฮิสโทแกรมของมุมเทด้านที่ 2

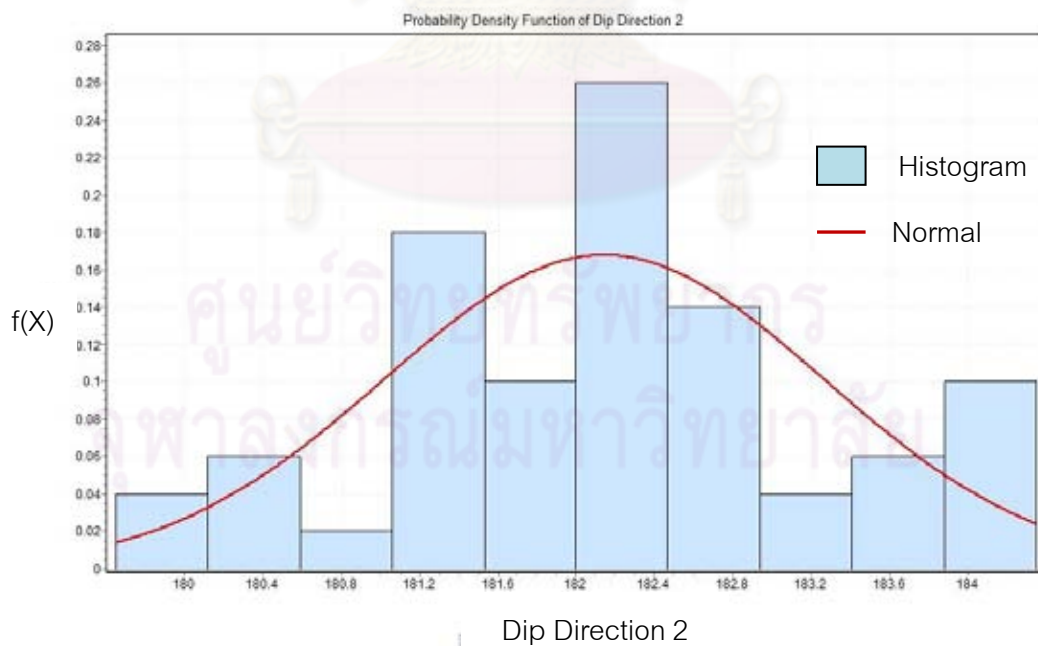
มุมเทมวลหินหน้าที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 66.40-68.54 องศา มีค่าเฉลี่ยมุมเทของมวลหินเท่ากับ 66.40 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.91 องศา และ มีการกระจายตัวแบบล็อกนอ มอล (Lognormal Distribution)





รูปที่ 4.35 ฮิสโทแกรมของการวางตัวของชั้นหินด้านที่ 1

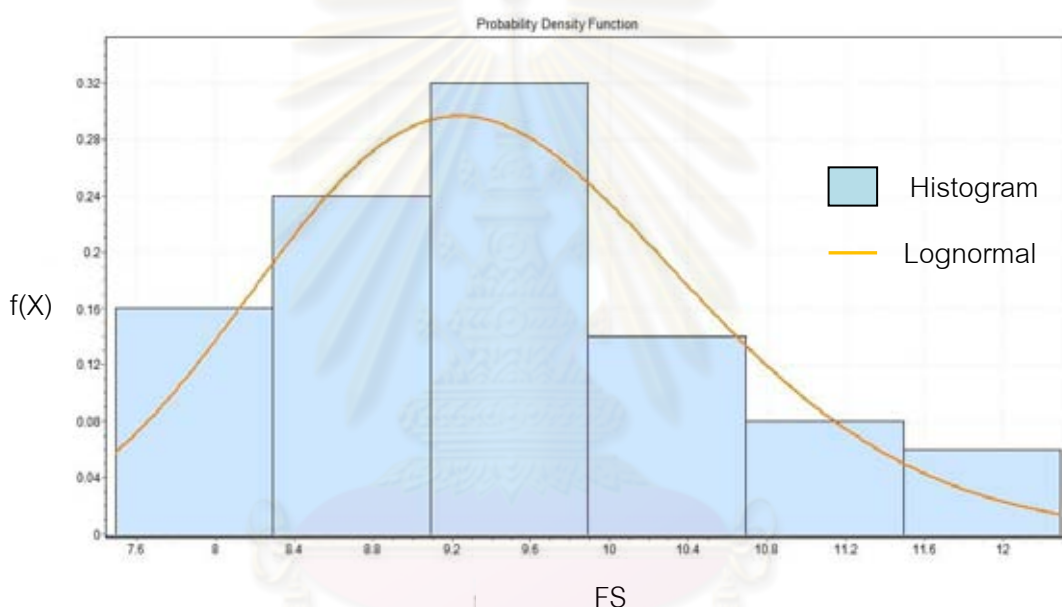
ทิศทางการวางตัวของมวลหินหน้าที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 104.51- 110.56 องศา มีค่าเฉลี่ยทิศทางการวางตัวของมวลหินเท่ากับ 107.39 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.19 องศา และ มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)



รูปที่ 4.36 ฮิสโทแกรมของการวางตัวของชั้นหินด้านที่ 2

ทิศทางการวางตัวของมวลหินหน้าที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 179.65 – 184.34 องศา มีค่าเฉลี่ยทิศทางการวางตัวของมวลหินเท่ากับ 182.10 องศา ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.17 องศา และมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินรูปลิ้มเชิงความน่าจะเป็น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยอยู่ในช่วง 7.49 – 12.29 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.43 และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.11 ตามรูปที่ 4.37 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกำหนดที่ 1.5 พบว่า โอกาสการพังทลายเข้าใกล้ 0 เปอร์เซ็น บ่งชี้ว่าผนังบ่อที่ตำแหน่ง N698560 E1624540 มีความปลอดภัยต่อการพังทลายรูปลิ้ม



รูปที่ 4.37 ฮิสโทแกรมอัตราของเสถียรภาพความปลอดภัยในการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายรูปลิ้ม

#### 4.4.4 สรุปการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินเชิงความน่าจะเป็น

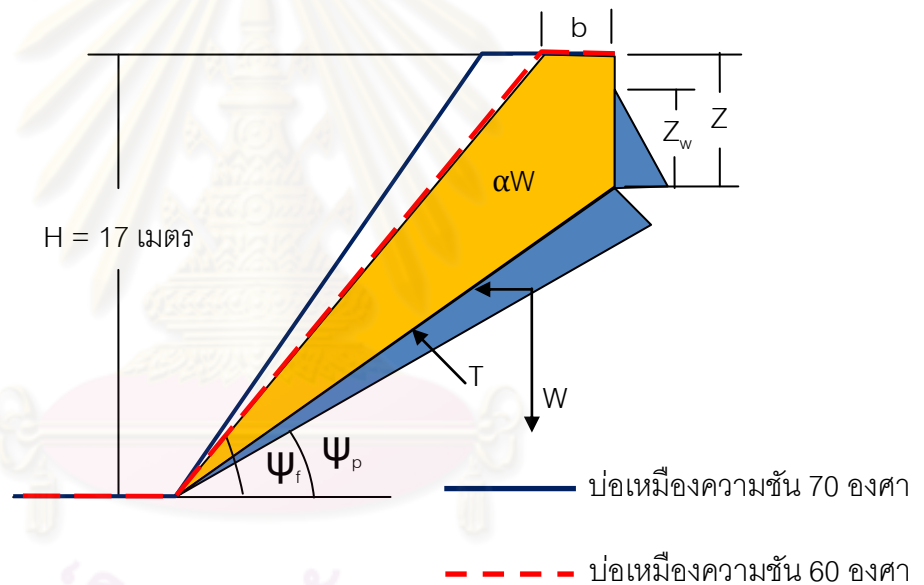
จากการวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินแบบระนาบเชิงความน่าจะเป็นพบว่า พื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลายคือบริเวณทิศเหนือของเหมือง โดยมีโอกาสการพังทลายสูงสุดเท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินรูปลิ้มเชิงความน่าจะเป็นพบว่า ผนังบ่อบริเวณที่ตำแหน่ง N698560 E1624540 มีความปลอดภัยต่อการพังทลายรูปลิ้ม

#### 4.5 การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของบ่อเหมือง

##### 4.5.1 การแก้ปัญหาคารพังหลายแบบระนาบบริเวณทางทิศเหนือของบ่อเหมือง

จากการวิเคราะห์ความไวของค่ามุมเทในการวิเคราะห์การพังหลายแบบระนาบ พบว่ามุมเทของมวลหินที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยมากที่สุด คือ 40 องศา หมายความว่า เป็นมุมที่ก่อให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยน้อยที่สุด

การแก้ปัญหาคารพังหลายแบบระนาบบริเวณทางทิศเหนือของบ่อเหมือง ทำได้โดยการปรับลดความชันของผนังบ่อในบริเวณที่มีโอกาสเกิดการพังหลาย โดยผนังบ่อมีความชันลดลงจาก 70 องศา เหลือ 60 องศา โดยใช้มุมเทของชั้นหินที่มีค่าเท่ากับ 40 องศา และ ชั้นหินมีสภาวะอิ่มตัว ด้วยน้ำดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.38 การปรับความชันของผนังบ่อเพื่อลดการพังหลายแบบระนาบ

กำหนดให้

$$H = 17 \text{ เมตร } \psi_p = 40 \text{ องศา } \psi_f = 60 \text{ องศา } \alpha = 0.1g \text{ และ } Z_w = 100 \text{ เมตร}$$

จากสมการที่ 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 แทนค่าได้เท่ากับ

$$Z = H \left( 1 - \sqrt{\cot \psi_f \cdot \tan \psi_p} \right) = 5.37$$

$$A = (H - z) \operatorname{cosec} \psi_p = 18.47$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w (H - Z) \operatorname{cosec} \psi_p = 487.06$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w (Z_w)^2 = 141.76$$

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[ 1 - \frac{Z^2}{H^2} \right] \cdot (\cot \psi_p) - (\cot \psi_f) = 2,028.861$$

จากสมการที่ 2.1 สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยได้เท่ากับ

$$F. S. = \frac{cA + [W(\cos \psi_p - \alpha \sin \psi_p) - U - (V \sin \psi_p)] \tan \phi}{W(\sin \psi_p + \alpha \sin \psi_p) + (V \cos \psi_p)}$$

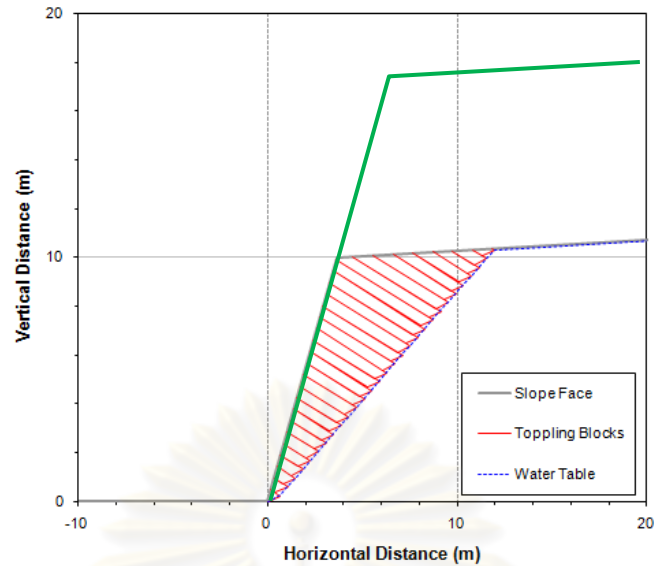
$$F. S. = \frac{3,005.62}{1,541.81} = 1.94$$

จากการแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบระนาบบริเวณทางทิศเหนือของบ่อเหมืองด้วยวิธีการปรับลดความชันของผนังบ่อเหมือง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเพิ่มขึ้นจาก 1.36 เป็น 1.94 โดยควรทำการลดความชันของผนังบ่อเหมืองในบริเวณที่มีความเสี่ยงทั้งหมดของพื้นที่

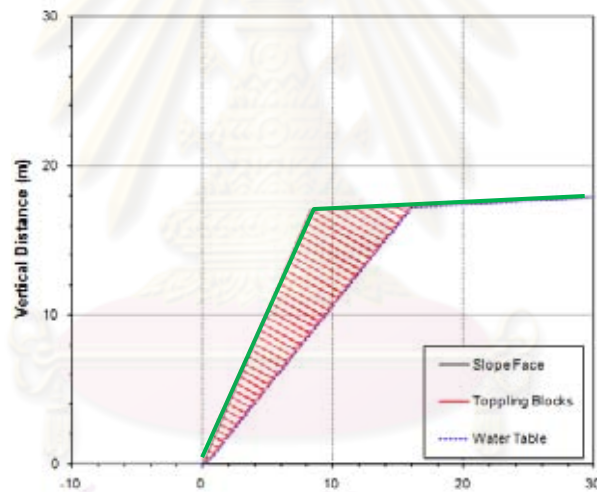
#### 4.5.2 การแก้ปัญหาค่าการพังทลายแบบค้ำบริเวณทางไปบ่อเหมือง N

เนื่องจากการวางฐานพานลำเลียงสินแร่ใหม่บริเวณที่มีพื้นที่ที่มีโอกาสการพังทลายแบบค้ำมา จึงจำเป็นต้องลดความสูงผนังบ่อจาก 17 เมตร เหลือ 10 เมตร การลดความสูงผนังบ่อเหมืองทำให้ผนังบ่อมีเสถียรภาพมากขึ้นแต่ก็ยังคงมีโอกาสเกิดการค้ำมาขึ้น ดังนั้นก็ควรที่จะปรับความชันของผนังบ่อลงจาก 70 องศา เป็น 65 องศา เพื่อให้มวลหินมีเสถียรภาพมากขึ้นตามรูปที่ 4.38 โดยจากการคำนวณตามพารามิเตอร์ขั้นต้นเพื่อที่จะออกแบบความชันและความสูงของผนังบ่อเหมืองด้วยโปรแกรม ROCKTOPPLE 1.0 ปรากฏว่าผนังบ่อที่ถูกออกแบบมานั้นมีเสถียรภาพดีทุกบล็อก

สำหรับความสูงผนังบ่อจาก 17 เมตรที่มีโครงสร้างของชั้นหินเช่นเดียวกับพื้นที่นี้ ควรปรับความชันของผนังบ่อเหมืองโดยให้ทำการลดความชันให้เท่ากับ 60 องศา เพื่อให้มวลหินมีเสถียรภาพ โดยจากการคำนวณตามพารามิเตอร์ขั้นต้นเพื่อที่จะออกแบบความชันและความสูงของผนังบ่อเหมืองด้วยโปรแกรม ROCKTOPPLE 1.0 ปรากฏว่าผนังบ่อที่ถูกออกแบบมานั้นมีเสถียรภาพดีทุกบล็อก



รูปที่ 4.39 การปรับผนังบ่อบริเวณทางไปบ่อเหมือง N เมื่อมีความสูงชั้นบันไดเท่ากับ 10 เมตร



รูปที่ 4.40 การปรับผนังบ่อที่มีโอกาสการพังทลายแบบคะมาเมื่อมีความสูงชั้นบันไดเท่ากับ 17 เมตร

#### 4.5.3 สรุปการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของบ่อเหมือง

การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของบ่อเหมืองควรจะกำหนดให้ ความชันของผนังบ่อไม่เกิน 60 องศา สำหรับผนังบ่อที่มีทิศทางการวางตัวของชั้นหินมีการวางตัวไปทิศทางเดียวกันกับผนังบ่อ กำหนดให้ความชันของผนังบ่อไม่เกิน 60 องศา สำหรับผนังบ่อที่มีทิศทางการวางตัวของชั้นหินมีการวางตัวไปทิศทางตรงกันข้ามกับผนังบ่อ โดยที่ความสูงชั้นบันไดไม่เกิน 17 เมตร และกำหนดให้ความชันของผนังบ่อไม่เกิน 65 องศา สำหรับผนังบ่อที่มีทิศทางการวางตัวของชั้นหินมีการวางตัวไปทิศทางตรงกันข้ามกับผนังบ่อ โดยที่ความสูงชั้นบันไดไม่เกิน 10 เมตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษา และ ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมวลหินที่เหมืองหินปูนเขาวง จังหวัดสระบุรี ใน 3 รูปแบบ คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์ การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด และการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น โดยการศึกษามุ่งขยายผลการศึกษาเสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์และเชิงกำหนด เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น

##### 5.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดแบบจลนศาสตร์

การวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์ในภาพรวมพบว่า มวลหินมีโอกาสเกิดการพังทลายสองรูปแบบ คือ การพังทลายแบบระนาบและการพังทลายแบบคะมำ โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบระนาบบ่งชี้ว่าค่ามุมเทของระนาบมีค่าอยู่ระหว่างค่าความชันผนังบ่อและมุมเสียดทาน ซึ่งเป็นรูปแบบที่เกิดการพังทลายแบบระนาบ และการวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายแบบคะมำบ่งชี้ว่า ชุดหินกลุ่ม 3 กับ ผนังบ่อเหมืองมีการวางตัวที่ตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการพังทลายแบบคะมำได้ และผลการวิเคราะห์ยังบ่งบอกว่ามวลหินบริเวณหน้าเหมืองไม่มีโอกาสเกิดการพังทลายรูปลิ้ม เนื่องจากระนาบการพังทลายระหว่างชุดหินกลุ่ม 1 และชุดหินกลุ่ม 2 มีจุดตัดอยู่นอกกรวยเสียดทาน ทำให้มวลหินรูปลิ้มจะตัดเข้าไปในผนังบ่อไม่ได้ อยู่บริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลาย

การวิเคราะห์เสถียรภาพการพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์ในแต่ละตำแหน่งของบ่อเหมือง พบว่ามีความสอดคล้องกันดีกับการวิเคราะห์การพังทลายด้วยวิธีจลนศาสตร์แบบภาพรวม โดยพื้นที่ในบ่อเหมืองมีโอกาสเกิดการพังทลายสองแบบคือ การพังทลายแบบระนาบและการพังทลายแบบคะมำ และ พื้นที่ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพ

### 5.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด

การวิเคราะห์การพังทลายแบบระนาบเชิงกำหนดพบว่ามวลหินมีเสถียรภาพดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 2.8 - 3.9 ผลการวิเคราะห์การพังทลายรูปปลีพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยกำหนด ( $F.S_{critical} = 1.5$ ) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยอยู่ระหว่าง 1.6 - 3.6 และผลการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้มาพบว่า มีโอกาสการเกิดการค้มาของมวลหินบริเวณตอนกลางของความลาดจำนวน 50 บล็อก มีบล็อกที่เกิดการไถลจำนวน 3 บล็อก และมีบล็อกที่มีเสถียรภาพจำนวน 19 บล็อก ในภาพรวมผนังบ่อเหมืองที่ใช้ในการวิเคราะห์การพังทลายแบบค้มา ยังคงมีเสถียรภาพ

### 5.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น

แบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนพบว่า แบบจำลองที่ให้ค่ามุมเทและทิศทางการวางตัวของชั้นหินใกล้เคียงกับความเป็นจริง แต่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าและมีความสอดคล้องกันดีกับหน้าเหมืองปัจจุบัน

การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินแบบระนาบเชิงความน่าจะเป็น ซึ่งนำค่าที่ได้จากแบบจำลองธรณีสถิติแบบเกาส์เซียนมาประกอบการวิเคราะห์พบว่า มีความเสี่ยงต่อการพังทลายบริเวณทิศเหนือของบ่อเหมืองโดยมีโอกาสการพังทลายสูงที่สุดเท่ากับ 22 เปอร์เซ็นต์ และการวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหินรูปปลีความน่าจะเป็นพบว่า ผนังบ่อเหมืองที่ตำแหน่ง N698560 E1624540 มีความปลอดภัยต่อการพังทลายรูปปลี

การศึกษาในครั้งนี้ได้แสดงวิธีการและผลการศึกษาเสถียรภาพความลาดของมวลหินโดยมุ่งเน้นไปสู่วิธีการศึกษาเสถียรภาพความลาดเชิงความน่าจะเป็น โดยรูปแบบการศึกษาเสถียรภาพเชิงความน่าจะเป็นที่นำเสนอมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ได้รวมเอาความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของโครงสร้างของมวลหินในรูปของมุมเทและทิศทางการวางตัว มาประกอบในระเบียบการวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองธรณีสถิติ แผนที่แบบจำลองโครงสร้างของมวลหินประกอบกับการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดเชิงกำหนด เพื่อนำไปสู่การประเมินโอกาสการพังทลาย (Probability of Failure) เชิงพื้นที่ และทำที่สุดให้ผลลัพธ์เป็นแผนที่โอกาสการพังทลาย

จากสมมุติฐานและระดับของข้อมูลที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์ในแบบจำลอง ทำให้มีความเชื่อมั่นว่าผลลัพธ์ที่ได้มาน่าจะใกล้เคียงกับสภาพของเสถียรภาพความลาดในพื้นที่จริง และการประเมินโอกาสการพังทลายเชิงพื้นที่นอกจากสามารถประเมินเสถียรภาพตามรายละเอียดและความน่าจะเป็นของพื้นที่แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้ยังนำไปสู่ขั้นตอนการแก้ไขหรือปรับเสถียรภาพความลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.1.4 การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของบ่อเหมือง

การแก้ไขปัญหาเสถียรภาพของบ่อเหมืองควรจะกำหนดให้ ความชันของผนังบ่อไม่เกิน 60 องศาสำหรับผนังบ่อที่มีทิศทางการวางตัวของชั้นหินมีการวางตัวไปทิศทางเดียวกันกับผนังบ่อ กำหนดให้ความชันของผนังบ่อไม่เกิน 60 องศา สำหรับผนังบ่อที่มีทิศทางการวางตัวของชั้นหินมีการวางตัวไปทิศทางตรงกันข้ามกับผนังบ่อ โดยที่ความสูงชันบันไดไม่เกิน 17 เมตร และ กำหนดให้ความชันของผนังบ่อไม่เกิน 65 องศา สำหรับผนังบ่อที่มีทิศทางการวางตัวของชั้นหินมีการวางตัวไปทิศทางตรงกันข้ามกับผนังบ่อ โดยที่ความสูงชันบันไดไม่เกิน 10 เมตร

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การปรับปรุงโมเดลการศึกษา โดยการเพิ่มตัวแปรและความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของตัวแปรประกอบ การวิเคราะห์เสถียรภาพมวลหิน นอกจากโครงสร้างทางธรณีวิทยาแล้วยังมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ค่าคลาดเคลื่อนจากการทดลอง ค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหินในแต่ละพื้นที่เป็นต้น ได้ซึ่งทำให้โมเดลมีความใกล้เคียงกับสภาพจริงมากขึ้น

5.2.2 การปรับปรุงโมเดลโดยการสร้างให้อยู่ในชุดคำสั่งเดียวกัน การศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมย่อยหลายโปรแกรม ทำให้ผู้ที่ศึกษาในภายหลังทำงานด้วยความยุ่งยาก การนำโปรแกรมย่อยหลายโปรแกรมเหล่านั้นมารวมเป็นชุดคำสั่งเดียวกัน จะทำให้ทำงานได้ง่ายขึ้น และสามารถปรับปรุงตัวแปรเมื่อหน้าเหมืองเปลี่ยนแปลงไปได้รวดเร็วขึ้น



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กิตติเทพ เพ็ญขจร, 2552. การศึกษาเสถียรภาพและออกแบบผนังบ่อทางทิศตะวันออกของเหมือง “O” และเส้นทางขนส่งระหว่างเหมือง “O” และ “N” ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย (ท่าหลวง) จำกัด. หน่วยวิจัยกลศาสตร์กลศาสตร์ สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- พันธุ์ลพ หัตถโกศล. 2540. ธรณีสถิติ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยเชียงใหม่
- วุฒิพันธุ์ วงษ์มงคล. 2546. การประยุกต์ใช้วิธีธรณีสถิติในการศึกษาค่านำไฟฟ้าของชั้นดินสนามบริเวณอำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล
- สง่า ตั้งชวาล. 2541. เสถียรภาพของการขุดเจาะ พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สง่า ตั้งชวาล. 2552. ธรณีเทคนิคเชิงวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาอังกฤษ

- Choochang S., Boonbatr A. and Fuenkajorn K. 2009. Stability analysis and design of the final pit walls of SCCC limestone quarry ,proceeding of the second Thailand symposium on rock mechanic,:293-308.
- Giani G., 1992. Rock Slope Stability Analysis. A.A. Balkema Publishers, Old Post Road, Brookfield, VT05036, USA
- Gokceoglu C., 2000, Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey , Engineering Geology, 55, (March 2000): 277-296
- GÜNTHER A., 2003, SLOPEMAP: programs for automated mapping of geometrical and kinematical properties of hard rock hill slopes, Computers & Geosciences, 29,: 865-875.

- Hoek and Blay, 1981. Rock Slope Engineering, Elsevier science publishers ltd.,  
New York, NY 10010, USA
- Kelkar M. and Perez G., 2002. Applied geostatistic for reservoir  
characterization.
- Kesimal A., Ercildi B. and Cihangir F., 2008. Environmental impacts of blast-  
induced acceleration on slope instability at a lime stone quarry,  
Environmental Geology: 381-389.
- Kim K., Geographic Information System (GIS) based stability analysis of rock cut  
slopes, , Geosciences Journal ,: 391-400
- Pumjan S., 1998. A localized probabilistic approach slope stability analysis,  
Doctoral Dissertation, Michigan technological university.
- Pumjan S. and Young D., 1999. Geotechnical site characterization in localized  
probabilistic terms, Proceeding of 37<sup>th</sup> U.S. Rock mechanics symposium
- Totone B.,2008, User manual for ROCKTOPPLE: A spreadsheet-based program  
for probabilistic block toppling analysis, Geomechanic Research Group,  
Department of civil engineering, University of Toronto.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก การตรวจสอบสถานที่ตั้ง

### ก1 การสำรวจสถานที่ตั้งบริเวณเหมืองหินปูนเขาวง



รูปที่ ก1บริเวณเหมือง O



รูปที่ ก2 บริเวณเหมือง N



รูปที่ ก3 หินปูนธรรมดา



รูปที่ ก4 หินปูนคุณภาพดี



รูปที่ ก5 หินแอนดิไซต์



รูปที่ ก6 โครงสร้างรูปประทุนคว่ำ



รูปที่ ก7 การวัดความหนาของชั้นหิน



รูปที่ ก8 การตรวจสอบสถานที่ตั้ง

ตารางที่ ก1 ข้อมูลทิศทางการวางตัวของหินบริเวณเหมืองหินปูนเขาวง

E	N	Dip Direction	Dip
699323	1624045	200	68
699320	1624061	195	60
699311	1624056	195	71
699308	1624072	185	72
699330	1624066	205	56
699295	1624048	245	71
699297	1624077	242	62
699336	1624077	245	75
699323	1624075	255	72
699289	1624064	215	49
699266	1624074	215	55
699257	1624066	200	51
699251	1624103	206	51
699241	1624085	205	51
699182	1624105	205	52
699188	1624083	193	56
699187	1624067	195	62
699191	1624059	192	55
699193	1624060	194	58
699174	1624084	195	54
699164	1624084	205	50
699145	1624122	194	47
699149	1624115	192	50
699151	1624117	180	30
699098	1624114	188	66
699097	1624114	180	48
699083	1624113	205	50
699078	1624119	180	55
699051	1624088	195	60
699053	1624091	220	54
699051	1624090	185	65
699051	1624074	195	62
699051	1624079	192	54
699049	1624078	195	58
699049	1624077	165	85
699044	1624074	170	75
699047	1624071	165	80

E	N	Dip Direction	Dip
699043	1624069	165	82
699043	1624084	202	62
699041	1624085	204	70
699043	1624086	199	58
699209	1624289	205	73
699211	1624289	215	58
699215	1624285	202	78
699221	1624283	205	66
699225	1624282	200	72
699228	1624280	214	75
699225	1624266	200	65
699226	1624257	197	64
699228	1624260	207	58
699238	1624262	190	85
699251	1624245	200	79
699252	1624246	210	84
699253	1624234	212	66
699256	1624234	188	67
699266	1624235	197	63
699267	1624231	200	70
699103	1624396	210	74
699028	1624439	194	57
699033	1624428	205	60
699037	1624423	205	55
699044	1624414	204	62
699048	1624401	255	72
699047	1624398	269	65
699053	1624396	202	76
699053	1624394	195	45
699054	1624394	199	58
699056	1624393	358	90
699057	1624390	210	57
699059	1624388	198	50
699056	1624381	210	47
699059	1624379	202	65
699059	1624376	205	49
699062	1624374	205	67

E	N	Dip Direction	Dip
699063	1624374	205	60
699062	1624372	207	46
699062	1624369	200	58
699068	1624367	210	75
699077	1624356	205	90
699088	1624353	205	60
699091	1624354	205	60
699093	1624358	205	58
699101	1624360	190	70
699102	1624348	194	74
699106	1624355	200	60
699106	1624354	195	60
699129	1624346	310	29
699111	1624349	315	30
699126	1624339	315	30
699122	1624327	305	32
699406	1624043	190	45
699414	1624046	206	40
699441	1624049	215	55
699344	1624049	214	53
699302	1624079	187	51
699181	1624110	205	54
699223	1624255	130	57
699287	1624188	204	50
699093	1624355	205	69
697926	1624280	180	47
697930	1624321	190	55
697946	1624349	180	65
698040	1624449	198	54
698109	1624434	174	40
698142	1624420	195	42
698264	1624354	198	45
698222	1624369	195	50
698174	1624400	180	61
699322	1624165	175	55
699306	1624148	173	69
699325	1624157	205	55
699318	1624159	175	75
699310	1624172	165	65

E	N	Dip Direction	Dip
699310	1624174	178	60
699307	1624181	191	76
699305	1624179	279	41
699300	1624177	271	36
699302	1624182	276	34
699297	1624183	276	41
699294	1624174	184	55
699295	1624182	170	44
699296	1624184	180	77
699296	1624188	200	58
699291	1624182	197	52
699291	1624186	189	46
699291	1624189	204	52
699288	1624188	194	48
699296	1624193	194	51
699445	1624150	193	59
699447	1624149	186	51
699444	1624139	194	64
699430	1624153	180	60
699434	1624148	200	67
699431	1624153	202	53
699412	1624138	195	62
698917	1624321	177	44
698920	1624318	182	50
698930	1624237	209	51
698927	1624233	210	52
698929	1624320	216	50
698930	1624316	189	62
698936	1624316	186	64
698977	1624317	172	76
698975	1624314	198	73
698984	1624314	211	29
698986	1624318	214	65
698987	1624302	200	54
698984	1624304	255	70
698573	1624488	88	52
698584	1624485	88	65
698563	1624484	101	45
698568	1624492	170	75



E	N	Dip Direction	Dip
698573	1624491	165	70
698567	1624487	182	83
698553	1624487	200	55
698777	1624588	185	82
698774	1624588	183	81
698773	1624590	186	84
698766	1624589	202	69
698766	1624587	229	51
698756	1624576	186	31
698745	1624580	191	61
698742	1624580	195	63
698737	1624581	202	71
698739	1624586	199	85
698719	1624583	174	54
698727	1624583	169	54
698710	1624587	221	62
698683	1624576	174	76
698683	1624577	179	70
698674	1624575	174	68
698669	1624577	198	60
698666	1624574	197	66
698664	1624577	189	71
698660	1624579	184	79
698654	1624579	185	74
698649	1624586	188	56
698648	1624570	202	56
698646	1624580	106	74
698644	1624557	85	61
698644	1624560	103	66
698645	1624565	106	52
698634	1624573	104	61
698641	1624563	102	76
698637	1624555	84	73
698634	1624562	95	77
698630	1624578	108	56
698614	1624557	218	64
698611	1624561	223	42
698604	1624591	210	54
698605	1624573	224	44

E	N	Dip Direction	Dip
698602	1624573	229	65
698604	1624554	83	44
698603	1624558	97	36
698604	1624573	99	37
698605	1624550	81	41
698599	1624534	101	59
698595	1624557	232	29
698582	1624550	202	71
698575	1624548	227	67
698570	1624561	230	43
698570	1624555	232	39
698565	1624537	193	59
698564	1624539	212	71
698561	1624531	203	70
698557	1624558	198	67
698552	1624562	196	66
698555	1624559	210	44
698530	1624565	25	59
698534	1624563	24	81
698539	1624548	15	72
698540	1624549	31	81
698544	1624547	31	81
698538	1624541	5	66
698544	1624530	26	68
698539	1624539	24	61
698551	1624542	18	70
698552	1624529	23	64
698546	1624518	20	51
698553	1624525	23	64
698558	1624506	21	56
698558	1624508	105	54
698547	1624456	216	48
698542	1624453	198	42
698541	1624452	190	42
698530	1624452	190	45
698500	1624445	180	55
698495	1624440	185	58
698486	1624440	195	76
698483	1624440	190	42

E	N	Dip Direction	Dip
698551	1624485	160	30
698535	1624584	120	50
698534	1624600	115	38
698538	1624603	192	33
698594	1624575	125	31
698604	1624567	175	50
698598	1624577	195	55
698599	1624582	182	62
698603	1624585	175	45
698634	1624587	200	51
698662	1624601	189	35
698701	1624606	202	39
698721	1624602	200	74
698173	1624390	186	58
698167	1624399	195	44
698159	1624409	190	61
698154	1624408	193	57
698142	1624425	197	53
698139	1624404	195	46
698132	1624412	189	62
698128	1624419	193	62
698123	1624415	192	59
698119	1624419	188	56
698110	1624420	175	57
698091	1624434	200	50
698078	1624438	194	66
698072	1624432	185	67
698069	1624436	198	70
698049	1624444	204	71
698007	1624460	210	60
697999	1624464	180	65
698031	1624214	195	70
698058	1624203	185	82
698102	1624191	175	35
698193	1624196	5	41
698207	1624197	5	47
698225	1624186	75	35
698226	1624184	180	66
698239	1624182	180	72

E	N	Dip Direction	Dip
698245	1624175	173	72
698278	1624177	11	80
698285	1624176	170	75
698297	1624176	195	64
698312	1624168	200	70
698330	1624168	175	45
698377	1624167	165	70
698381	1624162	194	46
698383	1624165	190	50
698394	1624160	177	44
698401	1624156	190	40
698412	1624158	182	45
698417	1624155	184	46
698431	1624150	195	52
698436	1624149	170	36
698867	1624194	195	71
698874	1624191	192	67
698857	1624192	188	68
698848	1624195	196	66
698850	1624206	200	69
698840	1624202	205	57
698839	1624202	194	62
698839	1624200	186	67
698792	1624219	202	58
698788	1624222	195	55
698775	1624226	203	53
698771	1624223	199	52
698762	1624228	192	63
698750	1624231	195	57
698747	1624234	192	60
698689	1624241	188	53
698683	1624243	201	64
698675	1624246	192	57
698667	1624245	193	52
698665	1624247	204	51
698465	1624272	195	79
698457	1624275	189	70
698450	1624280	190	72
698441	1624276	182	71

E	N	Dip Direction	Dip
698439	1624267	185	59
698421	1624270	189	72
698422	1624280	198	69
698406	1624279	185	75
698401	1624275	189	66
698394	1624290	186	68
698395	1624293	193	75
697578	1623918	175	61
697589	1623909	192	63
697590	1623913	191	69
697585	1623930	195	59
697580	1623925	186	53
697581	1623918	195	65
697592	1623925	189	71
697598	1623924	186	56
697611	1623927	201	61
697611	1623924	188	61
697613	1623930	199	62
697613	1623931	170	65
697622	1623925	187	58
697625	1623923	193	54
697629	1623926	188	63
697633	1623923	186	64
697641	1623926	191	54
697646	1623922	204	54
697648	1623926	186	70
697655	1623924	191	63
697660	1623924	201	75
697665	1623926	193	70
697676	1623930	195	50
697688	1623927	186	58
697691	1623929	191	60
697696	1623936	196	75
697695	1623929	195	55
697738	1623913	189	60
697743	1623916	185	58
697745	1623915	186	72
697749	1623914	184	65
697754	1623914	187	64

E	N	Dip Direction	Dip
697775	1623940	189	84
697730	1623941	202	63
697727	1623939	198	65
697712	1623947	196	62
697680	1623947	184	65
697668	1623942	187	55
697651	1623940	196	48
697641	1623949	190	60
697598	1623941	193	68
697585	1623937	192	63
697520	1623935	185	58
697498	1623938	195	60

## ภาคผนวก ข การทดสอบมวลหิน

### ข1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม



รูปที่ ข1 รูปแบบการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

ตารางที่ ข1 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

Determination	Sample 1	Sample 2
Weight of SSD Sample , B (g)	3140.6	2048.9
Weight of Sample in Water , C (g)	1982.9	1279.1
Weight of Oven – Dry Sample in Air , A (g)	3138.1	2038.5
Bulk Specific Gravity (Oven – Dry)	2.15	2.65
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.15	2.66
Apparent Specific Gravity	2.72	2.68
Absorption (%)	0.08	0.51
Average Bulk Specific Gravity (Oven – Dry)	2.40	
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.40	
Average Apparent Specific Gravity	2.70	
Average Absorption (%)	0.29	

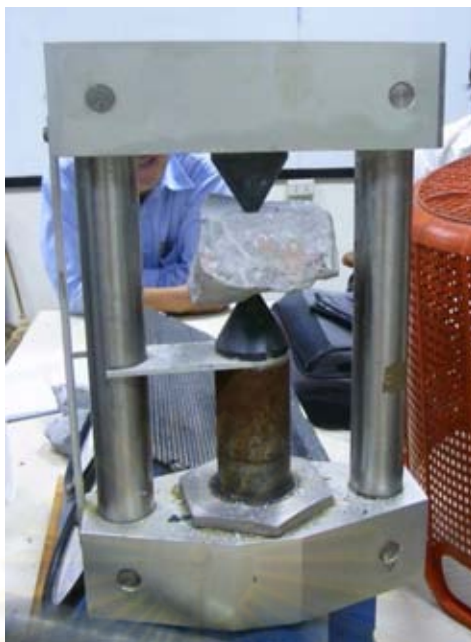
## ข2 การทดสอบดัดชนิดจุด



รูปที่ ข2 การทดสอบดัดชนิดจุดแบบแนวด้านหัวท้าย



รูปที่ ข3 การทดสอบดัดชนิดจุดแบบการแนวด้านข้าง



รูปที่ ข4 การทดสอบดัดชันิกดจุดแบบแท่งตัวอย่างรูปใดๆ



รูปที่ ข5 ตัวอย่างหินหลังจากทำการทดสอบดัดชันิกดจุดแบบหัวท้าย และ ด้านข้าง



รูปที่ ข6 ตัวอย่างหินหลังจากทำการทดสอบดัดชันิกจุดแบบตัวอย่างรูปใดๆ

ตารางที่ ข2 แสดงผลการทดลองการทดสอบดัดชันิกจุด แบบแท่งตัวอย่างรูปทรงระบอก

Axial Test (kN)	Is (MPa)	UCS	Diametral (kN)	Is(55)	UCS
0.5	0.17	3.97	6	1.98	47.60
2.3	0.76	18.25	7.5	2.48	59.50
15	4.96	119.01	12	3.97	95.21
6.5	2.15	51.57	10.5	3.47	83.31
15	4.96	119.01	17	5.62	134.88
Average	2.60	62.36	Average	3.50	84.10

ตารางที่ ข3 แสดงผลการทดลองการทดสอบดัดชันิกจุด แบบแท่งตัวอย่างรูปใดๆ

Irregular (kN)	Remark	Is (MPa)	UCS
13	D = 4cm	8.13	195.00
15	D = 3cm	16.67	400.00
18	D = 3.8cm	12.47	299.17
16	D = 3.7cm	11.69	280.50
14	D = 5.3cm	4.98	119.62
15	D = 4.6cm	7.09	258.86

### ข3 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ ข7 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว



รูปที่ ข8 ลักษณะการแตกของตัวอย่าง



ตารางที่ ข4 ผลการทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

Sample	D (mm)	L(mm)	Stress (kN)	Area(m2)	compressive Strength ( kN/m <sup>2</sup> )
1	55	120.5	98.8	0.00237	41582.49
2	55	119	96.1	0.00237	40446.12
3	55	118.5	175.8	0.00237	73989.89
4	55	119	64.7	0.00237	27230.64
5	55	118	46.2	0.00237	19444.44
6	55	118	54.5	0.00237	22937.7
Average					37605.21

ข4 การทดสอบกำลังอัดสามแกน



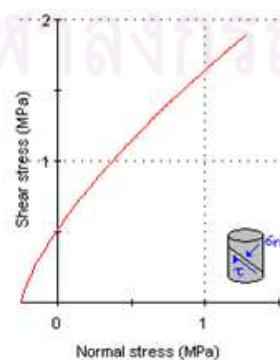
รูป ข9 การทดสอบกำลังอัดสามแกน



รูป ข10 แท่งหินตัวอย่างหลังทำการทดสอบ

ตารางที่ ข5 ผลการทดสอบกำลังอัดสามแกน

psi	MPa	Stress (kN)
500	3.447	129.92
800	5.515	164.33
1000	6.894	147.91
1400	9.653	232.21
1800	12.409	229.2
2000	13.789	230.89



#### Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 68 MPa  
 GSI = 63  $m_i$  = 8 Disturbance factor (D) = 1  
 intact modulus (Ei) = 61200 MPa  
 modulus ratio (MR) = 900

#### Hoek-Brown Criterion

$m_b$  = 0.569  $s$  = 0.0021  $a$  = 0.502

#### Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.536 MPa friction angle = 48.70 deg

#### Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.251 MPa  
 uniaxial compressive strength = 3.071 MPa  
 global strength = 7.112 MPa  
 deformation modulus = 8918.28 MPa

รูปที่ ข11 กราฟการพังทลายตามทฤษฎี Mohr-Coulomb โดยใช้โปรแกรม RocLab

## ข5 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง



รูปที่ ข12 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง



รูปที่ ข13 ตัวอย่างก่อนการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง



รูปที่ ข14 ตัวอย่างหลังจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

ตารางที่ ข6 การทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงแนวตั้งขนาด 10 kN

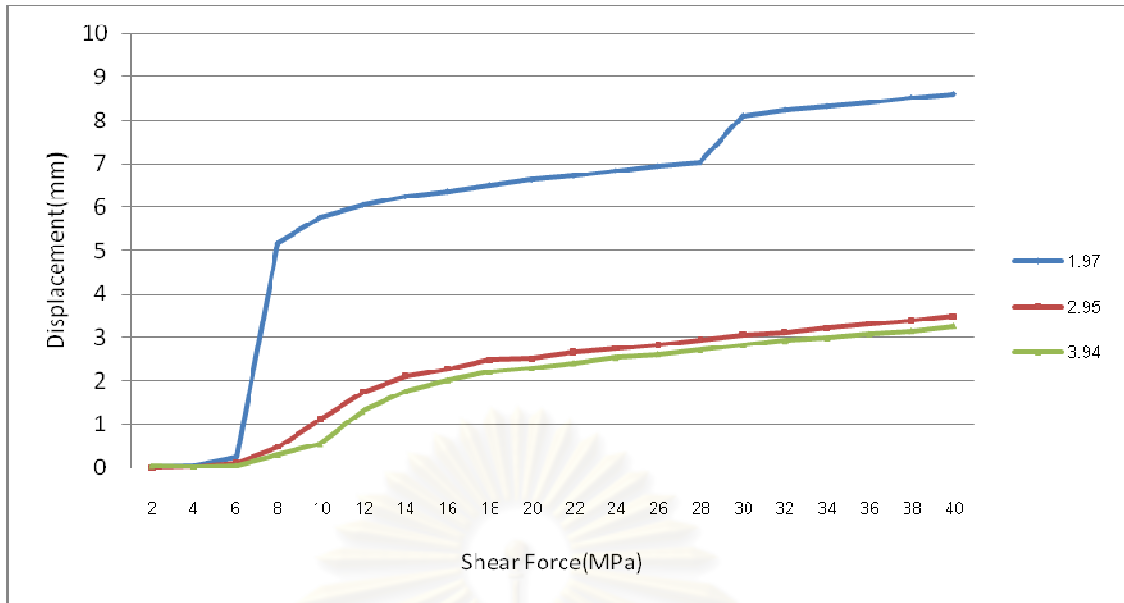
Vertical Stress(MPa) =		1.97
Shear Force (kN)	Hor. displace (mm)	Shear Stress (MPa)
2	0.02	0.39
4	0.05	0.79
6	0.26	1.18
8	5.18	1.58
10	5.77	1.97
12	6.05	2.36
14	6.24	2.76
16	6.37	3.15
18	6.51	3.54
20	6.63	3.94
22	6.72	4.33
24	6.84	4.73
26	6.95	5.12
28	7.04	5.51
30	8.11	5.91
32	8.24	6.30
34	8.32	6.70
36	8.41	7.09
38	8.53	7.48
40	8.61	7.88

ตารางที่ ข7 การทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงแนวตั้งขนาด 15 kN

Vertical Stress(MPa) = 2.95		
Shear Force (kN)	Hor. displace (mm)	Shear Stress (MPa)
2	0	0.39
4	0.02	0.79
6	0.12	1.18
8	0.48	1.58
10	1.12	1.97
12	1.74	2.36
14	2.11	2.76
16	2.28	3.15
18	2.49	3.54
20	2.51	3.94
22	2.66	4.33
24	2.76	4.73
26	2.83	5.12
28	2.95	5.51
30	3.06	5.91
32	3.12	6.30
34	3.21	6.70
36	3.32	7.09
38	3.39	7.48
40	3.49	7.88

ตารางที่ ข8 การทดสอบหาแรงเฉือนโดยตรงภายใต้แรงแนวตั้งขนาด 20 kN

Vertical Stress(MPa) =		3.94
Shear Force (kN)	Hor. displace (mm)	Shear Stress (MPa)
2	0.05	0.39
4	0.03	0.79
6	0.07	1.18
8	0.31	1.58
10	0.55	1.97
12	1.31	2.36
14	1.76	2.76
16	2.02	3.15
18	2.21	3.54
20	2.29	3.94
22	2.42	4.33
24	2.54	4.73
26	2.62	5.12
28	2.71	5.51
30	2.82	5.91
32	2.93	6.30
34	2.99	6.70
36	3.08	7.09
38	3.15	7.48
40	3.26	7.88

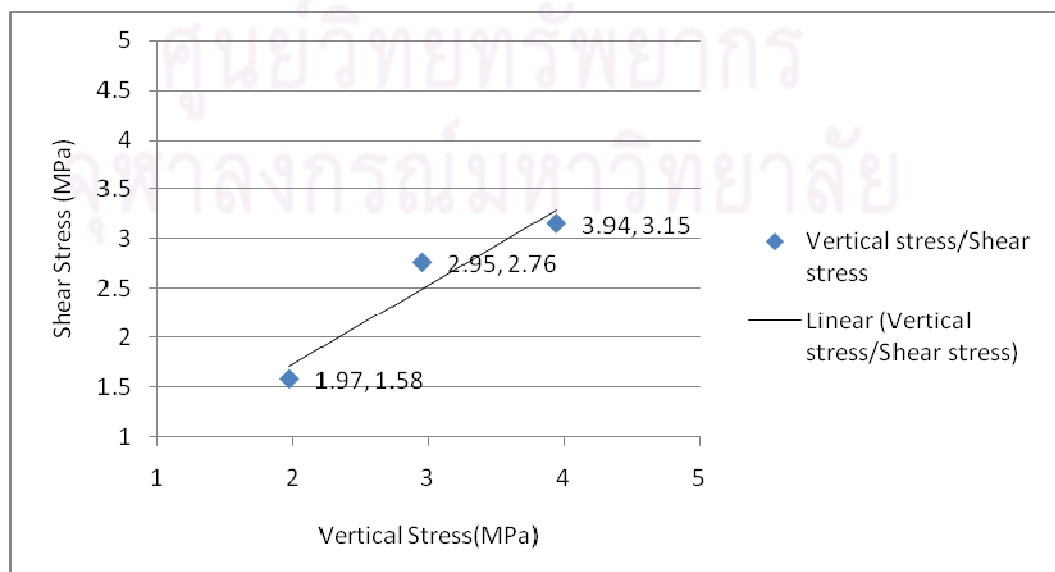


รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และ แรงเฉือน

ตารางที่ 9 ความเครียดแนวตั้งและความเค้นเฉือน

Vertical Stress(MPa)	Shear Stress (MPa)
1.97	1.58
2.95	2.76
3.94	3.15

รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวตั้งและความเค้นเฉือน



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายไกรวิทย์ ปุณฺณกุล เกิดวันที่ 2 เมษายน 2530 ที่จังหวัดพังงา สำเร็จการระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนทับปุดวิทยา จังหวัดพังงา ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาโยธาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคปีการศึกษา 2551

ปัจจุบันได้เข้ารับการศึกษาคณะในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และยังเป็นวิศวกร สังกัดส่วนทรัพยากรธรณีและเหมือง ฝ่ายวิศวกรรมและเทคนิค บริษัท เอสซีจี ซีเมนต์ จำกัด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย