

ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดต่อเสถียรภาพของลาดหินในเหมืองหินปูน



นายธีระนันท์ คงกัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม  
ที่ส่งเข้ามาทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

BLASTING VIBRATION EFFECT ON ROCK SLOPE STABILITY IN A LIMESTONE QUARRY

Mr. Theeranun Khongkan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดต่อ

เสถียรภาพของลาดหินในเหมืองหินปูน

โดย

นายธีระนันท์ คงกัน

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ สฤทธิเดช พัฒนเศรษฐพงษ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร พุ่มจันทร์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์)

ธีระนันท์ คงกัน : ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดต่อเสถียรภาพของลาดหินในเมืองหินปูน. (BLASTING VIBRATION EFFECT ON ROCK SLOPE STABILITY IN A LIMESTONE QUARRY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต , 99 หน้า.

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการประเมินผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่มีต่อเสถียรภาพความลาดชันของผนังบ่อเหมือง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิมและวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยเริ่มจากการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นหิน มุมเท แนวการวางตัว รวมทั้งคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของหิน และใช้วิธีการวิเคราะห์ทางจลน์ศาสตร์และขีดจำกัดสมดุล ในการประเมินค่าเสถียรภาพของความลาด ผลลัพธ์ที่ได้คือการพังแบบระนาบที่เป็นการพังหลัก ของผนังบ่อเหมืองที่ปรากฏในแต่ละพื้นที่ จากนั้นใช้วิธีการวิเคราะห์ขีดจำกัดสมดุลสถิตเพื่อคำนวณหาค่าเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองในรูปแบบสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในกรณีที่ไม่มีผลของแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง และหลังจากมีการระเบิดบริเวณใกล้เคียงเกิดขึ้น พฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ถูกวิเคราะห์ในรูปแบบความเร็วอนุภาคสูงสุด โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุด ปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้และระยะห่างของจุดทำการวัดและจุดที่ทำการระเบิดถูกนำมาวิเคราะห์ และสร้างสมการที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดในพื้นที่ศึกษาในรูปแบบความเร่ง วิธีการวิเคราะห์ขีดจำกัดสมดุลแบบพลศาสตร์ถูกนำไปใช้ในการศึกษาผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนที่มีต่อการวิเคราะห์เสถียรภาพ จากการศึกษาพบว่าในระหว่างที่มีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดมาเกี่ยวข้อง ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของผนังบ่อเหมือง มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 15 เปอร์เซ็นต์ และ 21 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาสามารถบอกได้ว่า ระดับความรุนแรงของผลกระทบ ขึ้นกับขนาดความรุนแรงของแรงสั่นสะเทือนและความชันของผนังบ่อเหมือง นอกจากนี้แล้ว ในการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วย วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์แบบสถิตเพื่อการจำลองและประเมินเสถียรภาพนั้น ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยและพฤติกรรมการพังของผนังบ่อเหมืองที่เกิดขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรธรณี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5370261621 : MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS: ROCK SLOPE / LIMESTONE QUARRY / KINEMATIC ANALYSIS / BLASTING VIBRATION / SIESMIC LOAD

THEERANUN KHONGKAN: BLASTING VIBRATION EFFECT ON ROCK SLOPE STABILITY IN A LIMESTONE QUARRY. ADVISOR: PIPAT LAOWATTANABUNDIT, 99 pp.

The objective of this study is to investigate the blasting vibration effect on rock slope stability. Both conventional and numerical methods were performed. Geological structure, dip angle, dip direction and rock mechanical properties were collected and used in evaluation of slope stability by kinematic and limit equilibrium analysis. The result demonstrated that plane failure is a major mode of failure in each zone. Static limit equilibrium method was carried out in non-blasting vibration for stability analysis in term of factor of safety. When nearby blasting was applied in this area the characteristics of blasting vibration was evaluated in peak particle velocity (PPV) term. The relationship between PPV, quantity of explosive and distance was evaluated in order to characterize the blasting vibration which leads to the equation of peak acceleration. Pseudo-static limit equilibrium analysis was conducted in the study of blasting vibration effect on the stability analysis. During blasting vibration acted in this area the factor of safety of pit slope was reduced in range of 15% to 21%. From this study, it can conclude that degree of effect depends on magnitude of vibration and slope angle. In addition, numerical analysis was used that FLAC2D will execute in static analysis to simulate and estimate stability of slope. The result is the factor of safety and failure behavior of pit slope.

Department: Mining and Petroleum Engineering      Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Georesources Engineering

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เนื่องด้วยความช่วยเหลือ และคำแนะนำจากหลาย ๆ ฝ่าย ทางผู้วิจัยต้องขอกราบขอบคุณหลายองค์กร รวมทั้งบุคคล ซึ่งให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในทุกด้าน จนสามารถทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ ดังต่อไปนี้

อ.ดร. พิพัฒน์ เหล่าวัฒนบัณฑิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือด้านวิชาการ ติดต่อประสานงาน คอยชี้แนะ แก้ไข ข้อผิดพลาด รวมทั้งกำลังใจเมื่อเกิดปัญหา ในการทำงานวิจัย ตลอดมา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ ด้านวิชาการ รวมทั้งข้อเสนอแนะ สำหรับการทำวิจัย เพื่อผลประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คุณระวิน อยู่ใจ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทดสอบตัวอย่างเป็นอย่างดี

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นสถานที่ศึกษาหาความรู้พร้อมทั้งเป็นสถานที่ในการทำวิจัย

หัวหน้า เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ทำงานทุกท่าน ที่ช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก ในการทำงานให้งานที่รับผิดชอบมอบหมายสำเร็จไปด้วยดี เวลาที่ผู้ทำการวิจัยต้องใช้เวลาในการทำงานวิจัย และศึกษา

เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ปริญญาโท ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา กำลังใจ ตลอดมา

ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่น้อง ตระกูล คงกัน ทุกคน ที่เป็นทั้งพ่อ แม่ เป็นทั้ง เพื่อน ยามท้อแท้ หรือเหนื่อยล้า คอยเป็นกำลังใจ ตั้งแต่เล็กจนโต คอยสนับสนุนช่วยเหลือ ทั้งทางด้านการเงิน ยานพาหนะ ในการศึกษา การทำงานวิจัย จนสามารถสำเร็จการศึกษาได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
รายการสัญลักษณ์และเครื่องหมาย .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้อมูลเบื้องต้น.....	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	30
3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย .....	30
3.2 พื้นที่ศึกษา.....	33
3.3 การศึกษาและการเลือกระบุพื้นที่ (Site Investigations and Site Screening) .....	34
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา .....	36
3.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ (Kinematic analysis).....	36
3.6. การวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit equilibrium analysis).....	38
3.7 การใช้วัตถุระเบิด (Characteristics of blasting).....	41
3.8 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข .....	45
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปราย .....	47
4.1 การศึกษาและการเลือกระบุพื้นที่ .....	47

4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์.....	48
4.3 การสำรวจและทดสอบภาคสนาม.....	51
4.4 แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด.....	54
4.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมมูล.....	61
4.6 การออกแบบผนังป่อเหมือง.....	65
4.7 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข.....	67
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก.....	80
ภาคผนวก ข.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3. 1 แสดงเกณฑ์ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจลศาสตร์ .....	37
ตารางที่ 3. 2 แสดงค่ามุมเสียดทานของหินปูน .....	41
ตารางที่ 3. 3 แสดงข้อมูลการใช้วัตถุระเบิดของพื้นที่ .....	43
ตารางที่ 3. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัดส่วนระยะทางหรือ Scale distance และค่าของ แรงสั่นสะเทือนในรูปแบบ PPV .....	45
ตารางที่ 4. 1 แสดงชุดของรอยไม่ต่อเนื่องในแต่ละโซนที่พบว่ามีโอกาสต่อเสถียรภาพผนัง บ่อเหมือง .....	48
ตารางที่ 4. 2 แสดงผล Rock mass classification ที่ได้จากการทำ Field Estimation .....	51
ตารางที่ 4. 3 แสดงค่า UCS ของ JCS ที่ได้จากการทดสอบกำลังกดจุด .....	52
ตารางที่ 4. 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่ได้จากการคำนวณจากการทดสอบ ภาคสนาม .....	54
ตารางที่ 4. 5 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) ความเร่งอนุภาคสูงสุด และการเคลื่อนที่ของอนุภาคสูงสุด .....	55
ตารางที่ 4. 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ Curve fitting ซึ่งเป็นตัวแทนของพฤติกรรม ของการระเบิดของพื้นที่ศึกษา .....	57
ตารางที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง ปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง และ ค่าความเร่งของอนุภาค .....	60
ตารางที่ 4. 8 แสดงตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโซน A3 .....	61
ตารางที่ 4. 9 แสดงตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโซน C3 .....	62
ตารางที่ 4. 10 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยโซนA3 .....	64
ตารางที่ 4. 11 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยโซนC3 .....	65
ตารางที่ 4. 12 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีการ LE และการ วิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน A3 .....	67
ตารางที่ 4. 13 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีการ LE และการ วิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน C3 .....	70

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2. 1 การแสดงส่วนประกอบของผนังบ่อเหมือง.....	5
รูปที่ 2. 2 การแสดงส่วนประกอบ Diagrammatic ของผนังบ่อเหมือง.....	6
รูปที่ 2. 3 การแสดง Shear Strength of discontinuity.....	7
รูปที่ 2. 4 การแสดงการทำ Stereo-net plot ภาพจาก School of Earth and Environment University of Leed .....	9
รูปที่ 2. 5 การแสดงรูปแบบการพังแบบระนาบ (E. Hoek & Bray (1981) .....	10
รูปที่ 2. 6 การแสดงแนวแรงตาม Pseudo static -Limit Equilibrium Analysis.....	11
รูปที่ 2. 7 การแสดงลักษณะของคลื่น ระยะทางของคลื่นกับความกว้าง คลื่นจะมียอดคลื่น (peak) ท้องคลื่น (www.elearning.msu.ac.th) .....	13
รูปที่ 2. 8 การแสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นพีเมื่อเคลื่อนออกจากจุดกำเนิดคลื่น ทำให้อนุภาค ตัวกลางจะมีการอัดขยายขนานไปตามทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่.....	14
รูปที่ 2. 9 การแสดงลักษณะการเดินทางของ คลื่นเอสอนุภาคจะมีการเคลื่อนขึ้นลงตั้งฉากกับทิศทาง ที่คลื่นเคลื่อนที่ (ดัดแปลงจากMyraksin (2011)) .....	15
รูปที่ 2. 10 การแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเรลีย์เป็นวงรีไปตามทิศทางการเคลื่อนที่รูปที่ (อ้างอิงจาก: โชติถนอม (2006)).....	15
รูปที่ 2. 11 การแสดงการเคลื่อนที่ของ คลื่นเลิฟเป็นแนว ระนาบไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ (อ้างอิง จาก: โชติถนอม (2006)) .....	16
รูปที่ 2. 12 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด และความถี่ที่ทำให้เกิดความ เสียหายของอาคารสิ่งปลูกสร้างตามข้อกำหนดของ สำนักเหมืองแร่ผิวดินของประเทศ สหรัฐอเมริกา (USOSM Regulation using method 3).....	21
รูปที่ 2. 13 การแสดงกราฟสเกล ล็อก-ล็อก(Log-Log Scale) ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่า อัตราส่วนระยะทางจากข้อมูลของ USOSM .....	23
รูปที่ 2. 14 การแสดง ค่า K สำหรับการกระเบิดในเมืองเปิดทั่วไปอยู่ระหว่างเส้นกราฟ 2 เส้นจาก ข้อมูลของ USOSM.....	24
รูปที่ 2. 15 การแสดงกราฟสเกล ล็อก-ล็อก แสดงค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทาง จากข้อมูลจากผลการศึกษาของ ไพรัตน์ เจริญกิจ & คณะ (2536) .....	25
รูปที่ 2. 16 การแสดงมาตรฐานเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ .....	27

รูปที่ 3. 1 แสดงข้อมูลการใช้วัสดุระเบิดของพื้นที่.....	32
รูปที่ 3. 2 แสดงสถานที่ตั้งพื้นที่ศึกษา .....	33
รูปที่ 3. 3 การแสดงแบ่งโซนสำหรับพื้นที่ศึกษาและโครงสร้างการวางตัวของหิน.....	35
รูปที่ 3. 4 การแสดงเก็บรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ศึกษา โครงสร้างการวางตัวของหิน จำนวนชุดรอยไม่ ต่อเนื่อง.....	35
รูปที่ 3. 5 การแสดงภาพหินตัวอย่างสำหรับการทดสอบกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการ .....	36
รูปที่ 3. 6 การแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หาจุดที่มีโอกาสของการพังด้วยวิธีทางจลน์ศาสตร์ .....	38
รูปที่ 3. 7 การแสดงวัดค่าค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยกตามวิธีการของ (Barton (1972, 1973, 1976)) .....	39
รูปที่ 3. 8 การแสดงแก้ปถว้างจังหวะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (None-electric gap) และ วัสดุระเบิดแรงสูง แบบ Emulsion .....	42
รูปที่ 3. 9 การแสดงอุปกรณ์วัดแรงสั่นสะเทือนและการเดินทางของคลื่น 3 ทิศทาง .....	43
รูปที่ 3. 10 การแสดงรูปแบบการบันทึกและเก็บรวบรวมข้อมูลแรงสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน USBM .....	44
รูปที่ 4. 1 การแสดงการระบุพื้นที่ศึกษาและการคัดเลือกโซนที่มีโอกาสของการพัง .....	48
รูปที่ 4. 2 การแสดงรายละเอียดของโซนที่พบว่ามีโอกาสของการพัง .....	49
รูปที่ 4. 3 การแสดงลักษณะรูปทรงจำลองทางเรขาคณิตของโซน A3 ซึ่งมีโอกาสของการพังและ ลักษณะของรอยไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏ .....	50
รูปที่ 4. 4 การแสดงลักษณะรูปทรงจำลองทางเรขาคณิตของโซน C3 ซึ่งมีโอกาสของการพังและ ลักษณะของรอยไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏ .....	50
รูปที่ 4. 5 การแสดงช่วงของค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบ Point Load Index Test.....	53
รูปที่ 4. 6 การแสดงผลการวิเคราะห์วัดแรงสั่นสะเทือนด้วยมาตรฐาน USBM.....	55
รูปที่ 4. 7 การแสดงการสร้าง Regression Line สำหรับความสัมพันธ์ของ Scale Distance และ PPV .....	56
รูปที่ 4. 8 การแสดงพฤติกรรมของระยะทางกับความความเร็วอนุภาคสูงสุด PPV .....	58
รูปที่ 4. 9 การแสดงพฤติกรรมของระยะทางกับอัตราเร่งอนุภาคสูงสุด.....	58
รูปที่ 4. 10 การแสดงรูปแบบจำลองทางเรขาคณิตของโซน A3.....	63
รูปที่ 4. 11 การแสดงรูปแบบจำลองทางเรขาคณิตของโซน C3.....	63
รูปที่ 4. 12 การแสดงการเปรียบเทียบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้วยวิธีการ LE และการ วิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน A3.....	68

รูปที่ 4. 13 การแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัย  
โปรแกรม FLAC2D โซน A3 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา ..... 69

รูปที่ 4. 14 การแสดงผลการเปรียบเทียบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้วยวิธีการ LE และการ  
วิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน C3..... 70

รูปที่ 4. 15 การแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัย  
โปรแกรม FLAC2D โซน C3 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา ..... 71



## รายการสัญลักษณ์และเครื่องหมาย

A	คือ	พื้นที่ระนาบสัมผัสระหว่างรอยชั้นไม่ต่อเนื่อง
A	คือ	แอมพลิจูดของคลื่น จากสมการ Dennis Clark (2010)
A	คือ	การสั่นสะเทือนจากการระเบิด สมการของ Badal kumar kujur (2010)
a	คือ	ความเร่ง
ag	คือ	ความเร่ง
a <sub>h</sub>	คือ	ความเร่งในแนวระนาบ
c	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การยืดเกาะมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล
D	คือ	ระยะทางมีหน่วยเป็นเมตร
F.S.	คือ	สัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงสุด
f	คือ	ความถี่มีหน่วยเป็น เฮิรซ์
H	คือ	ค่าความสูงของหน้าความลาด
JRC	คือ	สัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก
JCS	คือ	ค่ากำลังอัดของผนังรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล
K	คือ	ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
n	คือ	ค่าคงที่ของพื้นที่ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของหินและลักษณะรูปร่างของรอย ความไม่ต่อเนื่อง(geometrical discontinuities)
Q	คือ	ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
Q <sub>max</sub>	คือ	ปริมาณวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
PPV	คือ	การสั่นสะเทือนจากการระเบิด
R	คือ	ระยะทางมีหน่วยเป็นเมตร
T	คือ	จำนวนครั้งของรอบคลื่นในหนึ่งหน่วยเวลา
U	คือ	แรงยกตัวเนื่องจากน้ำใต้ดินใน
V, PPV	คือ	การสั่นสะเทือนจากการระเบิด
V	คือ	แรงผลักเนื่องจากน้ำใต้ดินใน
W	คือ	ปริมาณวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นปอนด์/ระยะถ่วงเวลา
z	คือ	ค่าความสูงแนวตั้งของรอยร้าวของความลาด
z <sub>w</sub>	คือ	ค่าความสูงแนวตั้งของระดับน้ำใต้ดิน
$\alpha$	คือ	ค่าคงที่ที่ขึ้นกับพื้นที่ซึ่งสามารถหาได้จากการคูณด้วยการทำ regression จากสมการ Ghosh – Daemon(1983)
$\alpha$	คือ	การสั่นสะเทือนจากการระเบิด
$\tau$	คือ	กำลังเฉือนของรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล
$\sigma_n$	คือ	ค่าความเค้นฉากที่กระทำต่อรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล
$\emptyset$	คือ	มุมเสียดทานมีหน่วยเป็นองศา

$\phi_b$	คือ	มุมเสียดทานเบื้องต้นมีหน่วยเป็นองศา
$\beta$	คือ	ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ ศึกษา
$\Psi_p$	คือ	มุมจากแนวราบของรอยความไม่ต่อเนื่อง
$\Psi_f$	คือ	มุมจากแนวราบของหน้า slope
$\gamma$	คือ	หน่วยน้ำหนักของหิน
$\gamma_w$	คือ	หน่วยน้ำหนักของน้ำ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

แร่และหินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ไม่สามารถเกิดทดแทนใหม่ได้ การทำเหมืองเพื่อการนำทรัพยากรแร่และหินที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ จำเป็นที่จะต้องตระหนักถึงการใช้อย่างคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด การออกแบบกระบวนการผลิต การใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย และเลือกใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพ ก็เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรแร่และหินอย่างคุ้มค่า ในกระบวนการออกแบบการทำเหมือง การวางแผนนำเอาแร่และหินออกมาใช้ ภายใต้ขอบเขตพื้นที่จำกัด เช่น เขตประทานบัตร หรือแนวกันเขตต่าง ๆ โดยวิธีการเพิ่มความชันของผนังบ่อเหมืองก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าด้วยเช่นกัน ซึ่งการเพิ่มความชันมีผลกระทบโดยตรงต่อเสถียรภาพของความลาดผนังบ่อเหมือง ดังนั้นการวิเคราะห์เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองเพื่อให้เกิดความแน่ใจในด้านความปลอดภัยจึงเป็นเรื่องสำคัญ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การทำเหมืองในประเทศไทย ส่วนใหญ่มีการใช้วัตถุระเบิดในการทำให้หินแตก เพื่อสะดวกแก่การตักและขน ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ซึ่งมีความเชื่อว่าเมื่อความชันของผนังบ่อเหมืองถูกออกแบบให้มีความชันเพิ่มขึ้น ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดก็จะมีผลต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองนั้นด้วย โดยขนาดของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่เกิดขึ้น จะขึ้นกับวิธีการในการออกแบบระเบิด ชนิด น้ำหนักของวัตถุระเบิดที่ใช้ และระยะทางจากจุดที่ทำการระเบิดถึงผนังบ่อเหมือง นอกจากนี้แล้วค่าความหนาแน่นของพื้นที่ ก็มีผลต่อขนาดของแรงสั่นสะเทือนด้วยเช่นกัน

สาเหตุหลักในการเกิดแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด เริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของส่วนผสมในการระเบิด มีความร้อนและการเผาไหม้และแก๊ส จากนั้นเกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบคลื่นสั่นสะเทือน เมื่ออยู่ในสถานะถูกบีบอัด (Confining Condition) เกิดแรงอัด รวมทั้งแรงดึงกระทำต่อหิน แรงในรูปแบบคลื่นสั่นสะเทือนดังกล่าว จะมีผลทำให้อนุภาคตัวกลางต่าง ๆ ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน เช่น โครงสร้าง อาคารรอบ ๆ รวมทั้งผนังบ่อเหมือง มีความเค้นและความเครียดเกิดขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่เลยขีดจำกัดความยืดหยุ่น การแตกหักหรือการพังก็จะเกิดขึ้น

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยฉบับนี้เป็นการค้นคว้าเกี่ยวกับผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองบริเวณพื้นที่การทำเหมืองหินในจังหวัดสระบุรี ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีจำนวนของเหมืองหินกระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก ในการศึกษาใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสถิต (Static Analysis) และวิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) เพื่อค้นหาค่ามุกวิกฤตในการออกแบบผนังบ่อเหมือง และวิเคราะห์เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองที่มีศักยภาพต่อการพัง ในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสูงสุด ที่มีแรงกระทำของการสั่นสะเทือนจากการระเบิดในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งในหลาย ๆ งานวิจัยได้ทำการศึกษาไว้ในวิธีการวิเคราะห์แบบสถิต แต่ยังไม่ค่อยมีการศึกษาถึงผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 สามารถประเมินผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่มีต่อเสถียรภาพความลาดของผนังบ่อเหมืองในเหมืองหินปูนได้

1.2.2 สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพความลาดบริเวณหน้าเหมืองที่มีการรบกวนของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด

1.2.3 สามารถออกแบบบ่อเหมืองที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดบริเวณใกล้เคียง และปัจจัยอื่น ๆ ได้

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การเลือกพื้นที่วิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของผนังบ่อเหมือง การศึกษาตรวจสอบสภาพธรณีวิทยาบริเวณการทำเหมือง แผนที่การกระจายตัวของโครงสร้างทางธรณีวิทยา และค่าตัวแปรต่างๆ ได้จากวิธีการสำรวจภาคสนาม

1.3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของผนังบ่อเหมืองและผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด จะทำการศึกษาในสภาวะปราศจากน้ำใต้ดิน

1.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของผนังบ่อเหมืองจะวิเคราะห์เฉพาะลักษณะการพังแบบระนาบ (Plane Failure) เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่มี

1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของผนังบ่อเหมืองด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC2D จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม ในกรณีที่ไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง



1.3.5 การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพื้นที่หน้าเหมือง ซึ่งอยู่ในช่วงการพัฒนาและออกแบบ ของเหมืองแห่งหนึ่งในจังหวัดสระบุรี (ไม่ประสงค์ออกนาม)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถอธิบายพฤติกรรม และผลกระทบของคลื่นสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่มีต่อเสถียรภาพความลาดชันบ่อเหมือง และนำไปสู่การออกแบบความลาดของผนังบ่อเหมืองที่มีความปลอดภัยและคุ้มค่า เหมาะสมตามเงื่อนไข ณ เวลาปัจจุบัน มีค่าความปลอดภัยที่ยอมรับได้ และนำทรัพยากรหินปูนที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ได้อย่างมีคุณค่าและเกิดประโยชน์มากที่สุด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลเบื้องต้น

ข้อมูลจาก Mathis (2007) กล่าวว่า ivalว่า การออกแบบความลาดชันของผนังบ่อเหมืองเป็นการกำหนดขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบ ได้แก่ มุมเอียง (Slope Angle) ความสูง (Bench Height) ความกว้าง (Bench Width) ของแต่ละชั้นบันได (Bench)

Inter-ramp angle เป็นมุมลาดชันของผนังบ่อเหมืองระหว่างชั้นบันได อยู่ระหว่างหน้างานหรือถนนที่ใช้ในการขุดและขนลำเลียงแร่และหินในบ่อเหมือง มุมลาดชันของผนังบ่อเหมือง (Overall Slope Angle) เป็นมุมลาดชันที่วัดตั้งแต่พื้นบ่อถึงขอบบ่อด้านบน การออกแบบความลาดชันของบ่อเหมืองอาศัยหลักการลองผิดลองถูก เพื่อให้ได้ความลาดชันของผนังบ่อเหมืองที่เหมาะสม โดยทั่วไปการออกแบบความลาดชันของผนังบ่อเหมือง จะกำหนดให้มีค่าความลาดชันของผนังบ่อเหมือง ที่ 45 องศา

##### 2.1.1 เกณฑ์และหลักการออกแบบผนังบ่อเหมือง

###### 2.1.1.1 สภาพธรณีวิทยาทั่วไป

โครงสร้างของชั้นหินที่ต่อเนื่องกัน และโครงสร้างที่ แยกออกจากกัน ด้วยรอยเลื่อน (Fault) รอยแยก (Joint) และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเนื้อหิน

###### 2.1.1.2 พื้นที่ใช้สอยและสภาพการปฏิบัติงานในบ่อเหมือง

บริเวณที่ติดตั้งเครื่องโมในบ่อเหมือง (Crushing Area) แนวสายพานลำเลียง (Belt Conveyor) ซึ่งต้องการความมีเสถียรภาพสูง และแนวถนนในบ่อ (Access Road and Main Road) ซึ่งต้องการความลาดชันของบ่อเหมืองที่ไม่เท่ากัน โดยที่ถนนหลักต้องการเสถียรภาพมากกว่าถนนชั่วคราว

##### 2.1.2 การออกแบบชั้นบันไดเหมือง

โดยทั่วไปการออกแบบรูปร่างของผนังบ่อเหมือง จะออกแบบในลักษณะชั้นบันได โดยกำหนดให้มี Inter-ramp angle เป็นมุมชันที่สุดและมีสมมติฐานว่าจะต้องมีหินแตกหล่นลงมาจากผนังบ่อ ในการออกแบบจึงต้องกำหนดให้มีชั้นรองรับหินร่วงหล่น (Catch Bench) เว้นไว้ที่ผนังบ่อเหมืองโดยทั่วไปจะเว้นไว้ทุกระยะ 2-3 ชั้นบันได โดยมีหลักการดังนี้

### 2.1.2.1 ความสูงของระดับชั้นบันได

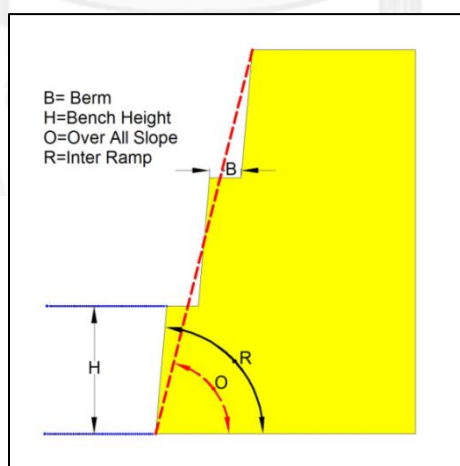
โดยทั่วไปจะกำหนดตามขนาดของเครื่องจักรกลและวิธีการขุดตักแร่ สำหรับเหมืองที่จำเป็นต้องมีการเลือกตักแร่ก็จะออกแบบให้มีความสูงของระดับชั้นบันไดไม่มากนัก

### 2.1.2.2 ความกว้างของระดับชั้นบันได

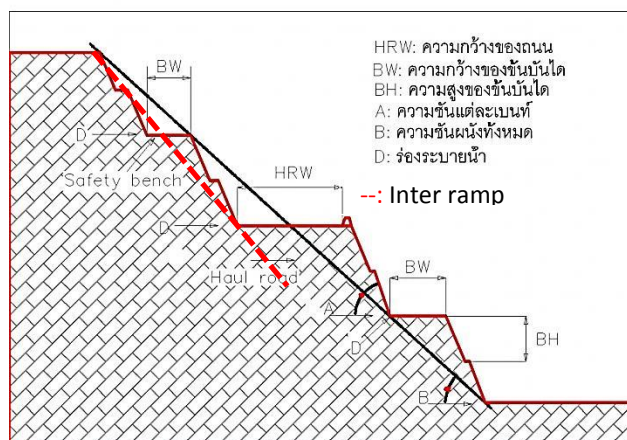
โดยทั่วไปจะกำหนดให้มีความกว้างน้อยที่สุด ซึ่งความกว้างของชั้นบันไดย่อย (Berm) ที่น้อยที่สุดควรจะเท่ากับ 4 ฟุต และกำหนดให้ Bench Face Angle นั้น จะเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพเนื้อหินที่นิยมใช้กันจะอยู่ประมาณ  $75^{\circ}$ - $80^{\circ}$  ซึ่งใช้ค่าสถิติที่วัดได้จากหน้างานหรือได้จากการทดสอบความมั่นคงและรอยแตกที่หลังแนวหน้าผา (Over Break) ของ Bench Face Angle ที่มุม  $90^{\circ}$  จากความสูง

### 2.1.3 การออกแบบ Inter-ramp angle

การออกแบบ Inter-ramp angle ต้องคำนึงถึงด้านความปลอดภัยและด้านเศรษฐศาสตร์ ข้อจำกัดของขอบเขตพื้นที่ในการทำเหมือง เช่น ความกว้างของที่ดิน ขอบเขตของใบอนุญาตในการทำเหมือง ในการกำหนดความชันจะขึ้นกับลักษณะการวางตัวของสายแร่ ลักษณะทางธรณีวิทยา เช่น ลักษณะการวางตัว ความหนา ตลอดจนชนิดหรือประเภทของชั้นดิน หิน และสินแร่ ลักษณะทางธรณีวิทยาเหล่านี้ จะเป็นปัจจัยในการกำหนดความลึกและความชัน ซึ่งในแต่ละชั้นอาจจะออกแบบให้มีความชันไม่เท่ากันได้ ในการออกแบบ Inter-ramp angle ควรให้มีความชันมากที่สุดด้วยเหตุผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยทางด้านเสถียรภาพสูงสุด และค่าใช้จ่ายที่ถูกต้องที่สุด



รูปที่ 2. 1 การแสดงส่วนประกอบของผนังบ่อเหมือง



รูปที่ 2. 2 การแสดงส่วนประกอบ Diagrammatic ของผนังบ่อเหมือง

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพผนังบ่อเหมือง

#### 2.2.1.1 ลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งแร่

ลักษณะทางธรณีวิทยา เช่น ลักษณะการวางตัว ความหนา ตลอดจนชนิดหรือประเภทของ ชั้นดิน หิน และสินแร่ เป็นต้น สำหรับเหมืองหินปูนนั้น ลักษณะทางธรณีวิทยาจะมีส่วนช่วยในการ กำหนดระดับความลึกของบ่อเหมือง ลักษณะของบ่อเหมือง และทิศทางของการเดินหน้าเหมือง ใน เหมืองที่ประกอบด้วยหินที่มีความแข็งไม่มากหรือดิน เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองก็จะต่ำกว่าหินแข็ง

#### 2.2.1.2 ธรณีวิทยาโครงสร้างของบริเวณที่จะทำการเปิดเหมือง

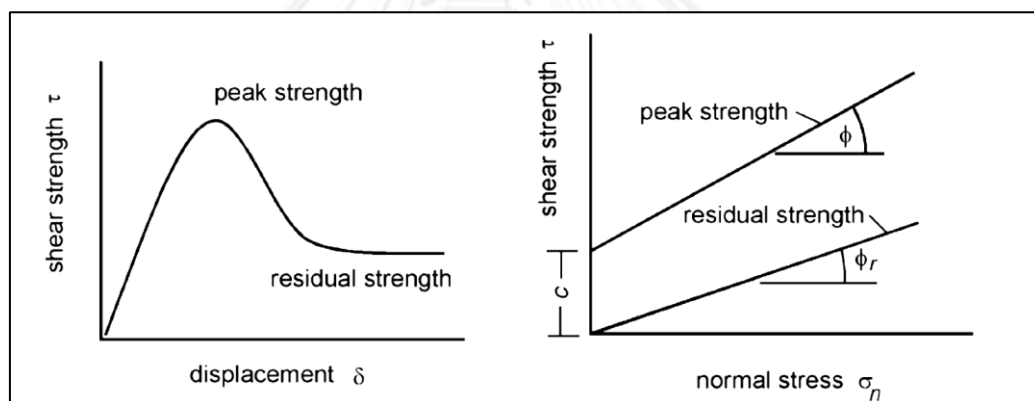
ลักษณะการวางตัวและความต่อเนื่องทางธรณีวิทยาโครงสร้าง จะมีผลต่อเสถียรภาพของ ผนังบ่อเหมืองและมีส่วนในการกำหนดลักษณะการพังทลาย (Failure Mode) ที่จะเกิดขึ้น ธรณีวิทยา โครงสร้างที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่ รอยเลื่อน (Faults) แนวแตก Joints) และแนวชั้นหิน (Bedding Planes) เป็นต้น

#### 2.2.1.3 ความแข็งแรงเฉือนของดินและหิน

N.R. Barton (1973) และ N.R. Barton (1976) ได้ศึกษาและกล่าวไว้ว่า ความแข็งแรง เฉือนของชั้นดินและหินเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบความลาดชันของผนังบ่อ เหมือง ในแต่ละพื้นที่ย่อมมีค่าความแข็งแรงเฉือนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะประกอบด้วยค่าความแข็งแรง เฉือนของเนื้อดินและหิน (Intact Shear Strength) และค่าความแข็งแรงเฉือนตามแนวธรณีวิทยา โครงสร้าง (Defects Shear Strength) ค่าความแข็งแรงเฉือนนี้จะเป็นส่วนของแรงต้านต่อการเลื่อน

บนระนาบเอียง ซึ่งก็คือพฤติกรรมการพังทลายของผนังบ่อเหมือง ซึ่งถ้าหากมีค่าสูงก็จะสามารถ ออกแบบให้ผนังบ่อเหมืองชันมากได้

ในการทดสอบตัวอย่างโดยให้ค่าความเค้นฉาก (Normal stress) กระทำต่อระนาบชั้นหิน และเกิดความเค้นเฉือน (Shear stress) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์สำหรับการเคลื่อนที่ เมื่อความเค้นเฉือน เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุด (Peak strength) ค่าดังกล่าวจะเป็นตัวแทนของพฤติกรรมของทั้งสอง ระนาบชั้นหินที่กระทำต่อกัน เมื่อการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนค่าความเค้นเฉือนลดลงจนเหลือ เป็นค่าคงที่ (Residual strength) กราฟพฤติกรรมระหว่างเส้นค่าความแข็งแรงสูงสุด และค่าคงที่ สำหรับ ค่าความเค้นฉาก ความชันของเส้นกราฟ ค่าความแข็งแรงสูงสุด จะให้ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น และจุดตัด บนแกนความเค้นเฉือนจะให้ค่าการยึดเกาะ ความชันของเส้นกราฟของหลังจากเกิดความเค้นเฉือน สูงสุด หรือค่าคงที่ จะให้ค่าเป็นมุมเสียดทานคงค้าง รายละเอียดตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแสดง Shear Strength of discontinuity (N.R. Barton (1973) และ N.R. Barton (1976)

#### 2.2.1.4 ระดับน้ำใต้ดิน

น้ำใต้ดินเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบความลาดชันของผนังบ่อเหมือง กล่าวคือ น้ำใต้ดินจะมีผลต่อการเพิ่มแรงดันของน้ำที่แทรกอยู่ในเนื้อดินหรือหินหรือตามแนว โครงสร้างทางธรณีวิทยาต่างๆ ซึ่งจะทำให้ค่าความแข็งแรงเฉือนของชั้นดินและหินลดลง

### 2.2.1.5 แรงสะท้อนจากแผ่นดินไหว

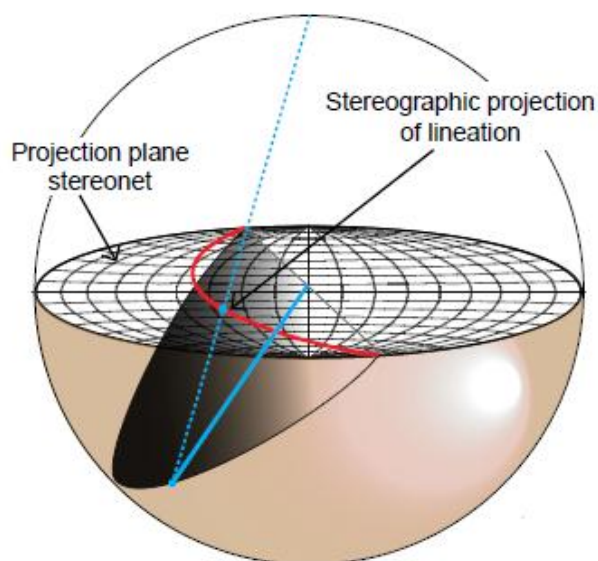
แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวจะมีผลต่อการเพิ่มแรงจุดที่กระทำต่อผนังบ่อเหมืองในแนวระนาบ จึงทำให้เสถียรภาพของบ่อเหมืองลดลง และยังทำให้เกิดความเค้นกระทำต่ออนุภาคของหินและดิน ซึ่งหากความเค้นดังกล่าวเกินจุดยึดหยุ่น จะทำให้เกิดการพังและแตกหักของดินและหินได้

### 2.2.2 การวิเคราะห์ความลาดเอียงแบบดั้งเดิม (Conventional Analysis)

Eberhardt (2003) ได้ศึกษาไว้ว่าวิธีการแบบดั้งเดิม ว่าโดยทั่วไปจะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ (Kinematic analysis) และขีดจำกัดสมดุล (Limit equilibrium analysis) รวมทั้งวิธีการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม Microsoft Excel การวิเคราะห์การตกของแท่งทรงสี่เหลี่ยม (Block) ที่ใช้สำหรับการอ้างอิงหรือจำลองการร่วงของก้อนหิน สามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 2.2.2.1 การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ (Kinematic analysis)

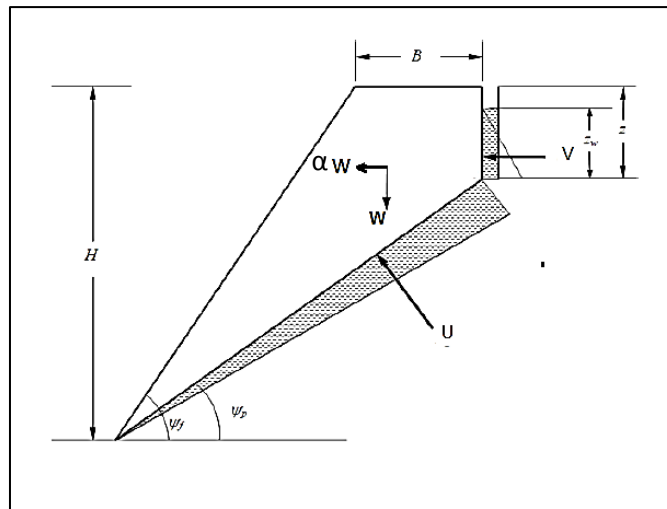
การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ (Kinematic analysis) คือการศึกษาหาความเป็นไปได้ของการพังรอบๆพื้นที่ ด้วยวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลจากพื้นที่ศึกษา ได้แก่ ข้อมูลด้านโครงสร้างทางธรณีวิทยา (Geological structure) เช่น ทิศทางการวางตัวของรอยความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity orientation) จำนวนชุดของรอยไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity sets) ระยะห่าง (Joint spacing) เป็นต้น จากนั้นทำการหาค่า Day-lighting ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบทิศทางการวางตัวของโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ได้จากการศึกษาในพื้นที่กับทิศทางการออกแบบผนังบ่อเหมืองเพื่อหาค่าศักยภาพของการพังในพื้นที่ สำหรับการพังแบบลิ้ม (Wedge failure) และแบบระนาบ (Plane failure) โดยประเมินจากโครงสร้างของมวลหิน (Rock mass) และโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่มี (Geological structure) ทำ Stereo-net plots หรือ Specialized computer codes สำหรับการพังแบบลิ้ม (Wedge failure) และแบบระนาบ (Plane failure) การศึกษาเชิงสถิติ (Statistic) ของรอยไม่ต่อเนื่องหรือรอยแยกที่สามารถจะเก็บรวบรวมได้ในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2. 4 การแสดงการทำ Stereo-net plot ภาพจาก School of Earth and Environment  
University of Leed

#### 2.2.2.2 การวิเคราะห์แบบขีดจำกัดสมดุล (Limit equilibrium analysis)

เป็นวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย การไหลของดิน การเคลื่อนที่และการหมุนบนพื้นผิว การไถลในระนาบ (Slide on plane) และการคว่ำ (Toppling) ของหินก้อน การทวนสอบเพื่อหาช่วงของความแข็งแรงเฉือน ที่จะเกิดการพังทลายในอนาคตและการพัฒนาของขีดจำกัดความสมดุล การค้นหาค่าการพังวิฤตที่เกี่ยวข้องกับน้ำใต้ดิน มีผลต่อขีดจำกัดความสมดุล เป็นต้น จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุล สามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของการพังแบบระนาบได้ด้วยสมการ 2.1 และสามารถวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของการพังแบบระนาบในกรณีมีแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องได้ด้วยสมการ 2.2 ซึ่งจากรูปที่ 2.5 เราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆได้



รูปที่ 2. 5 การแสดงรูปแบบการพังแบบระนาบ (E. Hoek & Bray (1981))

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

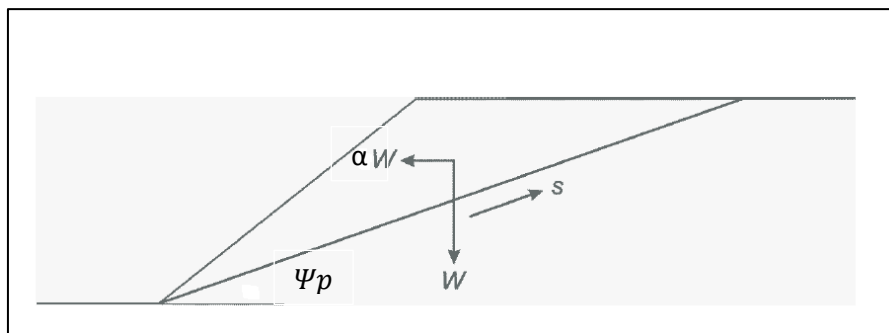
### 2.2.2.3 การวิเคราะห์แบบขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static (Pseudo static-limit equilibrium analysis)

Jibson (2011) ได้ศึกษาและกล่าวไว้ว่าการวิเคราะห์แบบขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static เป็นวิธีการวิเคราะห์ค่าการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวซึ่งเป็นลักษณะ Body force ที่เกิดจากการสั่นสะเทือน ประยุกต์ใช้ตัวแปรการสั่นสะเทือน ให้เข้ากับวิธีการขีดจำกัดสมดุลแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นแรงกระทำในแนวระนาบ จากสมการ

$$F.S. = \frac{cA + (W(\cos \Psi_p - \alpha \sin \Psi_p) \tan \phi)}{W(\sin \Psi_p + \alpha \cos \Psi_p)} \quad (2.2)$$

เมื่อ ค่า  $\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์ Pseudo static





รูปที่ 2. 6 การแสดงแนวแรงตาม Pseudo static -Limit Equilibrium Analysis  
(Jibson (2011))

เมื่อ  $\alpha$  เท่ากับ

$$\alpha = a_h/g \quad (2.3)$$

เมื่อ  $a_h$  ความเร่งในแนวระนาบ และ  $g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$$A = (H - z)\text{cosec}\Psi_p \quad (2.4)$$

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w Z_w(H - z)\text{cosec}\Psi_p \quad (2.5)$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w(z_w)^2 \quad (2.6)$$

$$z = H(1 - \sqrt{(\cot\Psi_f \tan\Psi_p)}) \quad (2.7)$$

$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left[ \left\{ 1 - \frac{z^2}{H^2} \right\} (\cot\Psi_p) - (\cot\Psi_f) \right] \quad (2.8)$$

รายละเอียดของตัวแปรต่างในสมการอธิบายได้ดังนี้

- A คือ พื้นที่ระนาบสัมผัสระหว่างรอยชั้นไม่ต่อเนื่อง
- $a_h$  คือ ความเร่งในแนวระนาบ
- c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะซึ่งสามารถหาได้จากตัวแปรกำลังเฉือน
- F.S. คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย
- H คือ ค่าความสูงของหน้าความลาด

- U คือ แรงดันจากอิทธิพลของน้ำใต้ดินที่กระทำต่อระนาบในแนวตั้งงานวิจัยนี้จะไม่คิดมื่ออิทธิพลของน้ำใต้ดินเข้ามาเกี่ยวข้อง
- V คือ แรงดันจากอิทธิพลของน้ำใต้ดินที่กระทำต่อระนาบในแนวราบในงานวิจัยนี้จะไม่คิดมื่ออิทธิพลของน้ำใต้ดินเข้ามาเกี่ยวข้อง
- W คือ น้ำหนักจำเพาะของหินบนระนาบรอยความไม่ต่อเนื่องภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก
- Z คือ ค่าความสูงแนวตั้งของรอยร้าวของความลาด
- $Z_w$  คือ ค่าความสูงแนวตั้งของระดับน้ำใต้ดิน
- $\emptyset$  คือ มุมเสียดทานเบื้องต้น
- $\alpha$  คือ ความเร่งของอนุภาคเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนสามารถหาได้จากพฤติกรรมของการสั่นจากการใช้ตัวถูกระเบิด
- $\Psi_f$  คือ มุมเทของความลาดจากแนวระนาบ

### 2.2.3 การวิเคราะห์ความลาดเอียงโดยอาศัยแบบจำลองเชิงตัวเลข

Eberhardt (2003) ได้ศึกษาไว้ว่า เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ความลาดเอียงแบบดั้งเดิม ถูกจำกัดไว้ด้วยการวิเคราะห์สำหรับปัญหาง่าย ๆ รูปร่างทางเรขาคณิตแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนมากนัก และในสถานะที่มีภาระกระทำแบบพื้นฐาน แต่ในหลาย ๆ ปัญหาสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดเอียงมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความซับซ้อนของรูปแบบทางเรขาคณิตของหิน ความไม่เป็นแบบเดียวกันของวัสดุ (An-isotropic) พฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้น (Non-linear behavior) ซึ่งการวิเคราะห์เชิงตัวเลข อาจประยุกต์ใช้ได้ สามารถจำแนกตามแบบจำลองหลัก ๆ ดังนี้

#### 2.2.3.1 แบบจำลองสำหรับความต่อเนื่อง

แบบจำลองแบบต่อเนื่องเหมาะกับการวิเคราะห์ความลาดเอียง ที่เนื้อค่อนข้างแน่นรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เช่น Intact rock, Weak rock และวัสดุที่มีลักษณะคล้ายดิน หรือกรณีของมวลหินที่ประกอบด้วยรอยแยกไม่มาก

### 2.2.3.2 แบบจำลองสำหรับความไม่ต่อเนื่อง

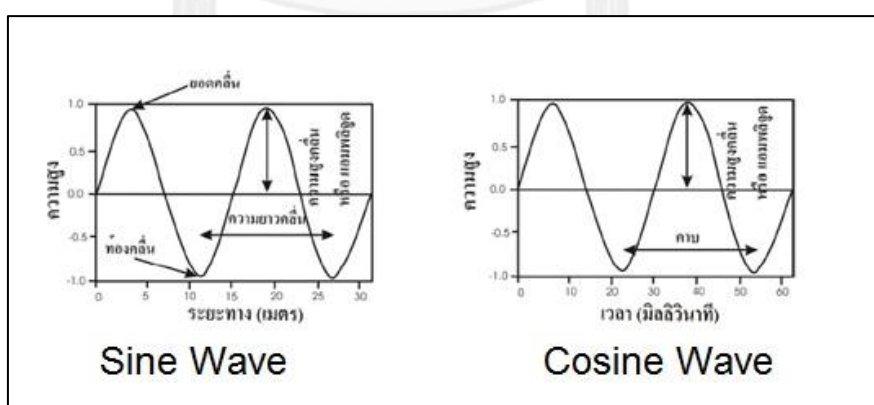
สำหรับแบบจำลองสำหรับความไม่ต่อเนื่องนั้นเหมาะกับการวิเคราะห์ความลาดเอียง ที่มีพฤติกรรมของรอยไม่ต่อเนื่อง เข้ามาเกี่ยวข้อง

### 2.2.3.3 แบบจำลองแบบผสม

สำหรับแบบผสมนั้นจะรวมสองวิธีการข้างต้นเข้าด้วยกัน สามารถลดจุดอ่อนและเพิ่มจุดแข็งของวิธีการข้างต้นได้มากขึ้น

## 2.2.4 คลื่นสั้นสะเทือน

บุรินทร์ เวชบรรเทิง (2011) สำนักงานบรรเทาทุกข์และประชานามัยพิทักษ์ ได้ศึกษาไว้ว่า คลื่นสั้นสะเทือน (Seismic Wave) เกิดขึ้นเมื่อมีการถูกรบกวนของอนุภาค ทำให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น เช่น เมื่อมีคลื่นกระแทกเกิดขึ้นหรือแผ่นดินไหว อนุภาคในบริเวณที่ถูกกระแทกหรือถูกรบกวนจะเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่อนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่น มีเพียงพลังงานที่ถูกถ่ายทอดหรือเคลื่อนที่ออกไป การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงให้เห็นเมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านไป แล้ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า ซายน์ (Sine) หรือโคซายน์ (Cosine) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ลักษณะของคลื่นสามารถเทียบได้ในรูปแบบของระยะทางหรือเทียบได้ในรูปแบบของเวลา ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน นั่นคือ ความเร็ว (Velocity) จากรูปที่ 2.7 ความกว้าง ของแอมพลิจูด (Amplitude) วัดจากท้องคลื่นถึงยอดคลื่นหารด้วยสอง ส่วนความยาวคลื่น (Wave length) คือระยะตั้งแต่ยอดคลื่นแรกทับกับยอดคลื่นตัวที่ถัดมา



รูปที่ 2. 7 การแสดงลักษณะของคลื่น ระยะทางของคลื่นกับความกว้าง คลื่นจะมียอดคลื่น (peak) ท้องคลื่น (Bullen & Bolt (1985))

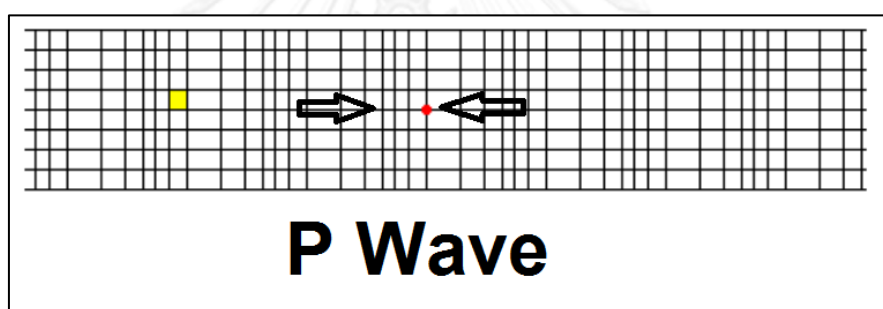
คลื่นสั้นสะเทือน จัดเป็นคลื่นประเภทที่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ซึ่งการพิจารณา

พฤติกรรมของคลื่นสั่นสะเทือนอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง เรียกว่า คลื่นตัวกลาง (Body waves) และคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางและขนานไปกับผิวดินเรียกว่า คลื่นผิวดิน (Surface waves) รายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 2.2.4.1 คลื่นตัวกลาง (Body wave)

##### 2.2.4.1.1 คลื่นตามยาว (Longitudinal wave)

เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางและทำให้อนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน มีลักษณะแบบอัด (Compression) และขยาย (Rarefaction) ในทิศทางเดียวกันกับคลื่นที่เคลื่อนที่ไป ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คลื่นสั่นสะเทือนที่มีลักษณะแบบนี้บางครั้งเรียกว่า คลื่นปฐมภูมิ หรือคลื่นพี (P-wave) และยังมีอีกชื่อหนึ่งที่ใช้บ่อยคือ คลื่นอัด

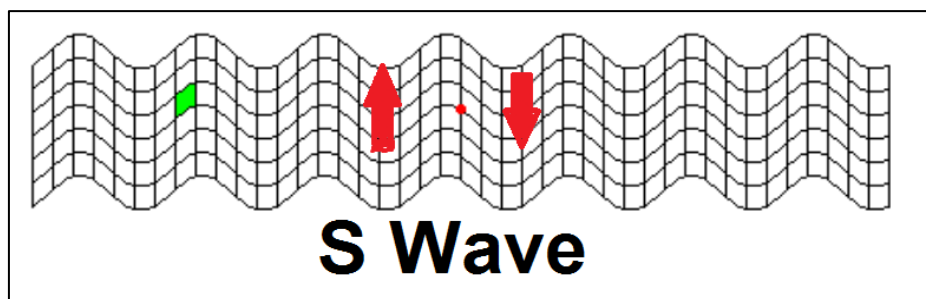


รูปที่ 2.8 การแสดงลักษณะการเดินทางของคลื่นพีเมื่อเคลื่อนออกจากจุดกำเนิดคลื่น ทำให้อนุภาคตัวกลางจะมีการอัดขยายขนานไปตามทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่

(ดัดแปลงจาก Myraksin (2011))

##### 2.2.4.1.2 คลื่นตามขวาง (Transverse wave)

เป็นคลื่นที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน มีการเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หรือเรียกว่าคลื่นไหวสะเทือน เพราะอนุภาคมีการเคลื่อนที่ขึ้นและลงในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งเรียกว่าคลื่นทุติยภูมิ หรือคลื่นเอส (S-wave) หรือคลื่นเฉือน

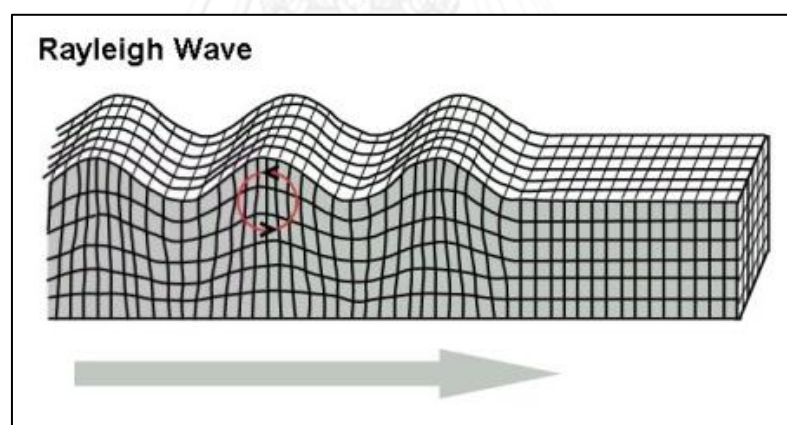


รูปที่ 2. 9 การแสดงลักษณะการเดินทางของ คลื่นเอสอนุภาคจะมีการเคลื่อนขึ้นลงตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (ดัดแปลงจากMyraksin (2011))

#### 2.2.4.2 คลื่นผิวพื้น (Surface wave)

##### 2.2.4.2.1 คลื่นเรลีย์ (Rayleigh wave)

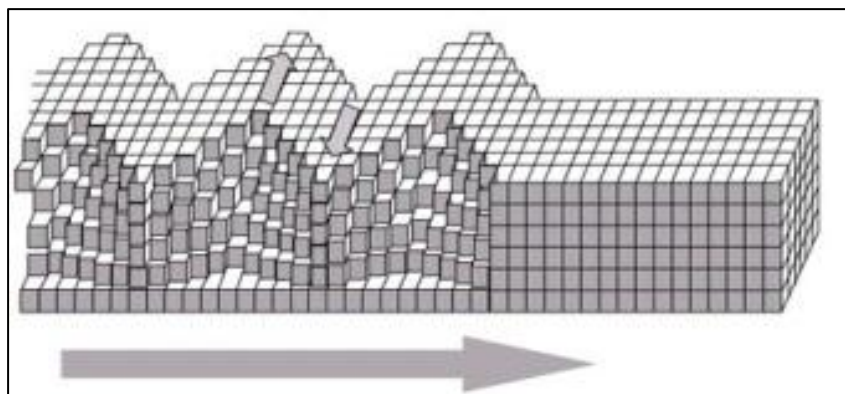
เป็นคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางและมีการเคลื่อนขนานไปกับผิวพื้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นแบบวงรี สามารถแยกองค์ประกอบของทิศทางของคลื่นออกได้ ทั้งในแนวตั้งและแนวนอน ดังแสดงรูปที่ 2.10



รูปที่ 2. 10 การแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเรลีย์เป็นวงรีไปตามทิศทางการเคลื่อนที่รูปที่ (อ้างอิงจาก: โชติถนอม (2006))

##### 2.2.4.2.2 คลื่นเลิฟ (Love wave)

คลื่นเลิฟเป็นคลื่นตัวกลางที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตามขวางขนานไปกับผิวสัมผัสของอากาศและพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2. 11 การแสดงการเคลื่อนที่ของ คลื่นเล็ฟเป็นแนว ระบายไปตามทิศทางการเคลื่อนที่  
(อ้างอิงจาก: โชติถนอม (2006))

### 2.2.5 การสั่นสะเทือนจากการระเบิด (Blasting vibration)

Duvall, Johnson, Meyer, & Devine (1963), Wiss (1968) และ Nichols, Johnson, & Duvall. (1971) ได้นำเสนอ พฤติกรรมของการสั่นสะเทือนจากการระเบิด ในรูปแบบระดับของการ พังของโครงสร้างและนำเสนอในรูปแบบของความเร็วของอนุภาคสูงสุด (Peak Particle Velocity) หรือ PPV ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของการสั่นสะเทือน

#### 2.2.5.1 ความเร็วสูงสุดของอนุภาค (Peak particle velocity)

Nichols et al. (1971) จาก U.S. Bureau of Mines (USBM) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมิน การพังของโครงสร้าง และได้กำหนดระดับของขีดจำกัดการพังจากการระเบิดขึ้น ซึ่งความเร็วสูงสุด ของอนุภาค ถูกนิยามว่าเป็นความเร็วสูงสุดที่พื้นผิวดินมีการเคลื่อนที่ โดยจากหลาย ๆ งานวิจัยได้ นำเสนอสมการในการทำนายค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง (Weight charge per delay) กับระดับของความเร็วสูงสุดของอนุภาค การศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของ พื้นผิวจากการระเบิดมีการศึกษาและพัฒนาจนกลายเป็นทฤษฎี เรียกว่าทฤษฎีพลังงาน การศึกษา เรื่องของการเดินทางของคลื่นถูกแสดงในรูปของค่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วงและระยะทางที่ทำการวัด kujur (2010) ได้ศึกษาไว้

$$A = K \frac{Q^{0.5}}{D} \quad (2.9)$$

เมื่อ	A	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด
	D	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
	K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
	Q	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม

### 2.2.5.2 สมการสำหรับการทำนายค่าแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด (Predicting equation for blasting vibration)

นักวิจัยจาก The United State Bureau of Mines (USBM) Duvall et al. (1963), Siskind, Stagg, Kopp, & Dowding (1980) ได้ศึกษาสมการที่ใช้ในการทำนายค่าการสั่นสะเทือน ในแต่ละงานวิจัยอาจจะแตกต่างกัน แต่มีหลาย ๆ ตัวแปรที่คล้ายคลึงกัน เช่น ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับสถานะของแต่ละพื้นที่ มีผลโดยตรงกับค่าแรงสั่นสะเทือน ในทุกงานวิจัยได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วงกับระยะทางที่ทำการตรวจวัด ในเชิงเส้นไว้ว่าควรจะเป็นสัดส่วนกับรากที่สองของปริมาณปริมาณของวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง ดังนี้

$$V = K \left[ \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right]^{-\beta} \quad (2.10)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ศึกษา
	K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
	$Q_{\max}$	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
	R	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
	V	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด

Langefors, Kihlstrom, & Westerberg (1958) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณการใช้วัตถุระเบิด และค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาคไว้ดังนี้

$$V = K \left[ \sqrt{\frac{Q_{\max}}{R^{2/3}}} \right]^{\beta} \quad (2.11)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ศึกษา
	K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
	$Q_{\max}$	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
	R	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
	V	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด

USBM ได้แนะนำเพิ่มเติมว่าควรจะเป็น รากที่สามของปริมาณวัตถุระเบิดซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลมและสูตรยกกำลังมีความสัมพันธ์กับค่าแอมพลิจูดของคลื่นและสัดส่วนระยะทาง (Scaled Distance) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = K \left[ \frac{R}{(Q_{\max})^{1/3}} \right]^{-\beta} \quad (2.12)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ ศึกษา
-------	---------	---------------------------------------

K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
$Q_{\max}$	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
R	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
V	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด

Standard (1973) ได้นำเสนอเกี่ยวกับสมการแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดไว้ว่า อาจจะเป็นสัดส่วนที่เทียบเท่ากับระยะทางหรือว่า scaled distance ซึ่งนิยามไว้ว่า ค่าของสัดส่วนปริมาณของน้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ต่อระยะทางยกกำลังเศษสองส่วนสาม ดังนี้

$$V = K \left[ \frac{Q_{\max}}{R^{2/3}} \right]^{\beta} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ ศึกษา
	K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
	$Q_{\max}$	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
	R	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
	V	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด

Ghosh–Daemon (1983) ก็ได้นำเสนอความสัมพันธ์ของลักษณะผลกระทบที่ไม่ยืดหยุ่น ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานระหว่างการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางที่แตกต่างกัน ในความไม่ยืดหยุ่นดังกล่าวเป็นผลให้เกิดการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่น และได้ปรับแก้ค่าจาก USBM ด้วยการเพิ่มค่าของความไม่ยืดหยุ่น ( $\alpha$ ) เข้าไปด้วย

$$\text{GDHN1} \quad V = K \left[ R / \sqrt{Q_{\max}} \right]^{-\beta} e^{-\alpha R} \quad (2.16)$$

$$\text{GDHN2} \quad V = K \left[ R / (Q_{\max})^{1/3} \right]^{-\beta} e^{-\alpha R} \quad (2.17)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ ศึกษา
	K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
	$Q_{\max}$	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
	R	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
	V	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด
	$\alpha$	คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับพื้นที่ซึ่งสามารถหาได้จากการคูณด้วยการทำ regression

B & P (1993; Roy (2005) ได้นำเสนอสมการในการทำนายค่าการสั่นสะเทือน โดยอาศัยข้อมูลของเหมืองในอินเดียซึ่งได้เพิ่มเงื่อนไขที่ว่า  $Q_{\max} > 0$  และ  $v > 0$  สมการแสดงดังนี้



$$V = n + K[R/\sqrt{Q_{\max}}]^{-1} \quad (2.18)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ ศึกษา
	K	คือ ค่าคงที่ขึ้นกับพื้นที่
	$Q_{\max}$	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
	R	คือ ระยะทางจากจุดที่มีการระเบิดถึงจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นเมตร
	V	คือ การสั่นสะเทือนจากการระเบิด
	n	คือ ค่าคงที่ของพื้นที่ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของหินและลักษณะรูปร่างของรอยความไม่ต่อเนื่อง(geometrical discontinuities)

### 2.2.6 การสั่นสะเทือนของพื้นผิวดิน (Ground vibration)

SHENG, JONES, & PETYT (1999) ได้นำเสนอเกี่ยวกับคลื่นสั่นสะเทือนจากการระเบิดว่า มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากแผ่นดินไหว แต่มีความถี่ (frequency) ที่สูงกว่าและค่าแอมพลิจูด ที่ต่ำกว่า ซึ่งสามารถก่อให้เกิดการพังรอบ ๆ โครงสร้าง การสั่นสะเทือนของพื้นผิวดินไม่ว่าจากการระเบิดหรือแผ่นดินไหว จะทำให้เกิดการสั่นที่มีแรงกระทำ ซึ่งมีความถี่ของการสั่นที่เป็นลักษณะของแรงสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ ในลักษณะ ขึ้น ๆ ลง ๆ ของอนุภาค และความถี่คือจำนวนครั้งของการสั่นต่อวินาทีหรือหน่วยเวลา สามารถแสดงเป็นสมการดังนี้

$$f = 1/T \quad (2.19)$$

เมื่อ	T	คือ จำนวนครั้งของรอบคลื่นในหนึ่งหน่วยเวลา
	f	คือ ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

#### 2.2.6.1 ความเร็วของอนุภาค (Particle velocity)

คืออัตราของความเร็ว ซึ่งอนุภาคมีการเคลื่อนที่วัดได้ในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาที มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งหรือแอมพลิจูด คือระยะทางที่อนุภาคมีการเคลื่อนที่และมีความสำคัญต่อประเด็นการพังของอนุภาคโครงสร้าง

$$V = 2 \pi f A \quad (2.20)$$

เมื่อ	A	คือ แอมพลิจูดมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
	f	คือ ความถี่มีหน่วยเฮิรตซ์

V คือ ความเร็วของอนุภาค

### 2.2.6.2 ความเร่ง (Acceleration)

คืออัตราที่อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงของความเร็ว ซึ่งวัดในหน่วยมิลลิเมตรต่อกำลังสองของวินาที ( $\text{mm/s}^2$ ) หรือเท่ากับค่าความโน้มถ่วงของโลก ( $g$ )

$$a = 2\pi f v \quad (2.21)$$

และสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของ  $a_g$  ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อกำลังสองของวินาที ได้ด้วยสมการดังนี้

$$a_g = 2\pi f v / 9804 \quad (2.22)$$

เมื่อ  $f$  คือ ความถี่ มีหน่วยเฮิรตซ์

V คือ ความเร็วของอนุภาค

โดยปกติแล้วการสั่นสะเทือนจากการระเบิดไม่สามารถทำลายโครงสร้างได้ เนื่องจากเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงและเกิดขึ้นเร็ว โดยให้ข้อสังเกตว่า คลื่นที่มีลักษณะดังกล่าว สามารถทำให้เกิดรอยแตกในคอนกรีตเก่า ส่วนการพังในมวลหินในเหมืองใต้ดินนั้น เกิดจากแรงระเบิด การกระจายตัวของความเค้นและการกักความร้อนเนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศ

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.3.1 ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการใช้วัตถุระเบิดในงานเหมืองแร่และเหมืองหิน

สำนักการเหมืองแร่ของประเทศสหรัฐอเมริกา (The United States Bureau of Mines: Report of Investigation No. 8507; USBM RI 8507) โดย Siskind et al. (1980) ได้ศึกษาไว้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลกระทบต่อแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดที่ได้แก่ ชนิด ปริมาณ คุณสมบัติของวัตถุระเบิดที่ใช้ ระบบการจุดระเบิด รูปแบบทางเรขาคณิตของการวางรูเจาะระเบิดในชั้นหิน การกระจายตัวของวัตถุระเบิด คุณสมบัติทางโครงสร้าง ลักษณะธรณีวิทยา และลักษณะภูมิประเทศของหิน รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ สามารถควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ หากมีมาตรการในการป้องกันผลกระทบที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ตามหลักวิศวกรรม

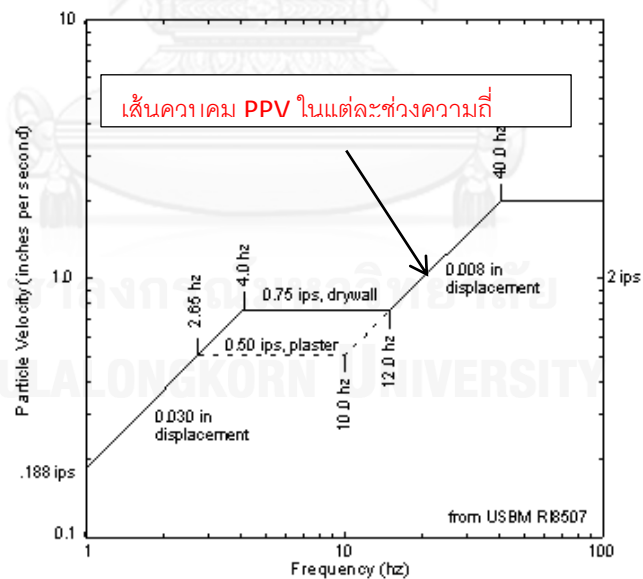
### 2.3.1.1 เร็วคลื่นหรือความเร็วอนุภาคสูงสุดและอัตราส่วนระยะทาง

ความเร็วอนุภาคสูงสุด คือค่าการขจัดมากที่สุดต่อหน่วยของเวลา ในที่นี้หมายถึงอัตราความเร็วของอนุภาคในพื้นดินหรือหินที่เกิดขึ้นจากพื้นดินหรือหินเกิดการสั่นสะเทือนเนื่องจากผลของการระเบิดในพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นดินหรือพื้นหินนั้นๆ และสัดส่วนระยะทาง ได้แก่สัดส่วนของระยะทางต่อปริมาณวัตถุระเบิด ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดความสั่นสะเทือน สามารถแสดงตามสมการได้ดังนี้

$$\text{caled Distance} = \frac{\text{Distance to Structure}}{\sqrt{\text{Maximum Charge Weight per 8 Delay Interval}}} \quad (2.23)$$

### 2.3.1.2 ความสัมพันธ์ตัวแปรการสั่นสะเทือน

จากการวัดค่าความเร็วคลื่นหรือความเร็วอนุภาคสูงสุด ที่มีความสัมพันธ์เปลี่ยนไปได้ตามค่าของความถี่ที่ความเร็วคลื่นนั้น การประเมินผลของความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ตรวจวัดได้ควบคุมไปกับความถี่ของคลื่น โดยต้องวิเคราะห์ได้ว่าคลื่นส่วนใหญ่มีความถี่เท่าไร เมื่อความเร็วอนุภาคสูงสุดที่วัดได้มีค่าต่างๆกัน ในการออกแบบระเบิดแต่ละครั้งต้องควบคุม ความเร็วสูงสุดของอนุภาคไม่ให้เกินเส้นควบคุมซึ่งเป็นเกณฑ์ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดที่ยอมรับไม่ได้ วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอ้างอิงตามมาตรฐานของ USBM



รูปที่ 2. 12 การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด และความถี่ที่ทำให้เกิดความเสียหายของอาคารสิ่งปลูกสร้างตามข้อกำหนดของ สำนักเหมืองแร่ผิวดินของประเทศสหรัฐอเมริกา (USOSM Regulation using method 3)

จากการทดลองพบว่า อัตราการสั่นสะเทือนมากที่สุดของพื้นดินหรือพื้นหินที่จุดใดๆ วัดจากจุดที่ทำการระเบิด มีอัตราส่วนผกผันกับรากที่สองของระยะทางวัดจากจุดนั้นๆ ถึงจุดที่ทำการระเบิด จากการทดลองตรวจวัดความสั่นสะเทือนจากการระเบิดหลายๆ ครั้ง สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้ในแต่ละครั้งกับระยะทาง และขนาดความเร็วคลื่นที่จุดต่างๆ วัดจากจุดที่ทำการระเบิดได้ ดังนี้

$$PPV = K\left(\frac{D}{W^{0.5}}\right)^{\beta} \quad (2.24)$$

เมื่อ	$\beta$	คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ที่ทำการระเบิด (Site factors)
	D	คือ ระยะทางวัดจากจุดที่มีการระเบิดกับจุดตรวจวัดมีหน่วยเป็นฟุต
	PPV	คือ ค่าความเร็วคลื่นหรือความเร็วอนุภาคสูงสุดมีหน่วยเป็น นิ้ว/วินาที
	K	คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับแต่ละพื้นที่ที่ทำการระเบิด (Site factors)
	W	คือ ปริมาณวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจังหวะถ่วงมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อระยะถ่วงเวลา

ค่าคงที่หาได้จากกราฟ ล็อก-ล็อก (Log-Log scale) ที่เขียนระหว่างค่าความเร็วคลื่นสูงสุดกับอัตราส่วนระยะทาง จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็นลบ ค่า  $\beta$  คือค่าของความชัน ส่วนค่า K คือค่าจุดตัดของแกน Y ที่มีค่าอัตราส่วนระยะทาง เท่ากับ 1.0 (intercept) ในการทดลองเพื่อหาสูตร สำหรับการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วคลื่น ปริมาณวัตถุระเบิด และระยะทาง ในแต่ละพื้นที่ จะต้องทำการทดลองหลาย ๆ ครั้ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อได้สูตร ในการคำนวณของแต่ละพื้นที่มาแล้วก็ไม่ได้หมายความว่า สูตรนั้นจะใช้ได้ สำหรับการคำนวณหาความเร็วคลื่นที่เกิดจากการระเบิดทุกครั้งไป และเมื่อเปลี่ยนพื้นที่ไปยังพื้นที่อื่น ปัจจัยต่างๆ ได้เปลี่ยนไป จำเป็นจะต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าคงที่ใหม่สำหรับพื้นที่นั้นๆ เสมอ

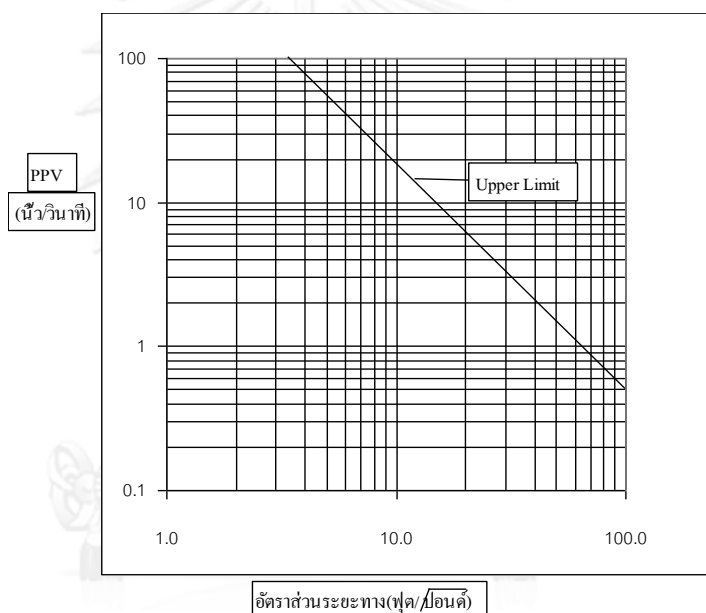
จากผลการทดลองวัดค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดของสำนักงานเหมืองแร่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ผลการระเบิดของเหมืองแร่และเหมืองหินมากกว่า 700 แห่งทั่วโลก แล้วนำมาพล็อตค่าในกราฟสเกล ล็อก-ล็อก (Log-Log Scale) ระหว่างค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทาง โดยขีดเส้นกราฟเป็นเส้นตรงเหนือจุดต่างๆ ทุกจุด แล้วขีดเส้นตรงอีกเส้นหนึ่งขนานกับเส้น Upper limit ให้สูงกว่าเล็กน้อยเพื่อให้แน่ใจยิ่งขึ้นว่าไม่มีจุดใดอยู่เหนือเส้นกราฟสามารถประเมินค่าความสั่นสะเทือนจากการระเบิดได้ดังนี้

หน่วยอังกฤษ : ได้ค่า  $K = 160$  (ค่าที่เส้นกราฟตัดกับแกน Y (Intercept) หรือมีอัตราส่วนระยะทาง = 1) และได้ ค่า  $\beta = -1.6$  (ค่าความชันของเส้นกราฟ) สามารถเขียนสูตรการประเมินค่าความเร็วคลื่นสูงสุดที่เกิดจากการระเบิดได้ ดังนี้

$$V = 160 \left[ \frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.6} \quad (2.25)$$

หน่วยเมตริก: ค่า  $K = 1143$ ,  $\beta = -1.6$  เขียนสูตรการประเมินค่าความเร็วคลื่นสูงสุดที่เกิดจากการระเบิดได้ ดังนี้

$$V = 1,143 \left[ \frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.6} \quad (2.26)$$



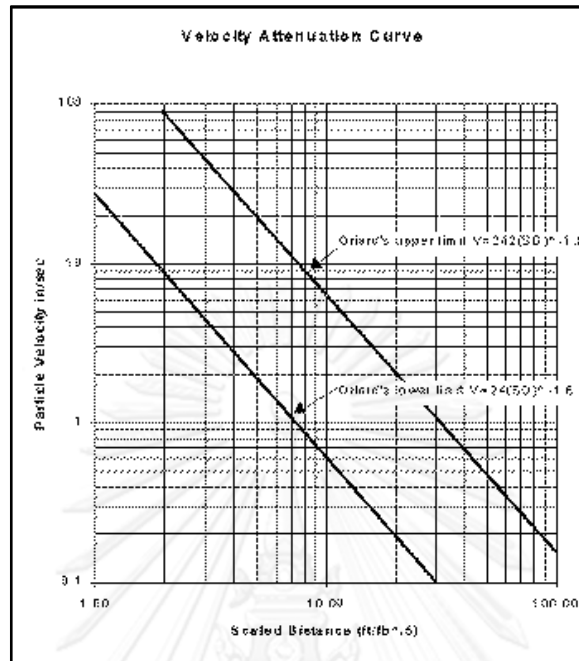
รูปที่ 2. 13 การแสดงกราฟสเกล ล็อก-ล็อก(Log-Log Scale) ของค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทางจากข้อมูลของ USOSM

ค่า  $K$  ที่ได้จากการศึกษาการระเบิดในประเทศสหรัฐอเมริกา มีค่าระหว่าง 24 – 600 ขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นหิน และระดับการอัดแน่นของวัตถุระเบิดในรูระเบิด (Degree of Confinement) โดยที่ค่าหลักของ  $K$  มีดังนี้

- $K = 24$  สำหรับกรณีที่มีการอัดแน่นของวัตถุระเบิดไม่ดีตีมาก (Under Confined)
- $K = 160$  สำหรับกรณีที่มีการอัดแน่นของวัตถุระเบิดดีปานกลาง (Normal Confinement)

$K = 600$

สำหรับกรณีที่มีการอัดแน่นของวัสดุระเบิดดีมาก (Over Confined)



รูปที่ 2. 14 การแสดง ค่า  $K$  สำหรับการกระเบิดในเหมืองเปิดทั่วไปอยู่ระหว่างเส้นกราฟ 2 เส้น จากข้อมูลของ USOSM

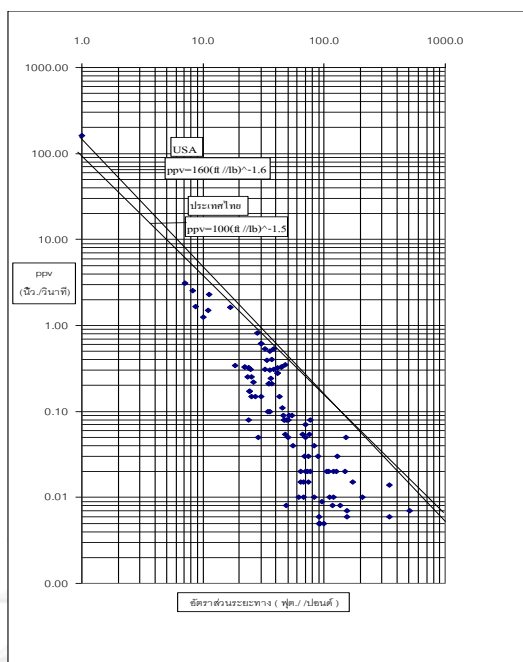
ไพร์ตัน เจริญกิจ & คณะ (2536) ได้ศึกษาผลของแรงสั่นสะเทือนโดยได้ทำการตรวจวัดความสั่นสะเทือนจากการระเบิดในเหมืองแร่และเหมืองหินในประเทศไทย ประมาณ 500 ครั้งแล้วนำมาวิเคราะห์ข้อมูลและเขียนเส้นกราฟประเมินค่าความสั่นสะเทือนจากการระเบิดได้ ดังนี้

หน่วยอังกฤษ : ได้ค่า  $K = 100$  (ค่าที่เส้นกราฟตัดกับแกน  $Y$  (intercept) หรือมีอัตราส่วนระยะทาง = 1) และได้ ค่า  $\beta = -1.4$  (ค่าความชันของเส้นกราฟ) สามารถเขียนสูตรการประเมินค่าความเร็วคลื่นสูงสุดที่เกิดจากการระเบิดได้ ดังนี้

$$V = 100 \left[ \frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.4} \quad (2.27)$$

หน่วยเมตริก: ค่า  $K = 600$ ,  $\beta = -1.4$  เขียนสูตรการประเมินค่าความเร็วคลื่นสูงสุดที่เกิดจากการระเบิดได้ ดังนี้

$$V = 600 \left[ \frac{D}{W^{0.5}} \right]^{-1.6} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2. 15 การแสดงกราฟสเกล ล็อก-ล็อก แสดงค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดกับค่าอัตราส่วนระยะทางจากข้อมูลจากผลการศึกษาของ ไพรัตน์ เจริญกิจ & คณะ (2536)

### 2.3.2 การสำรวจและประเมินกำลังเฉือนของรอยแยก (Rock Joint Shear Strength)

Kemthong (2006) ได้ศึกษาว่า คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการประเมินเสถียรภาพและการออกแบบทางวิศวกรรม และการวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาด Hoek & Brown (1980) การหาค่ากำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่อง (Joint shear strength) สามารถหาได้จากการทดสอบแบบกำลังเฉือนทางตรง (Direct shear testing) ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ภายในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม สำหรับการทดสอบภาคสนาม (Field estimation) นั้น สามารถกระทำได้แต่การได้รับผลอาจไม่ดีมากนัก เนื่องจากหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ขนาดของแท่งตัวอย่างที่ไม่ได้มาตรฐาน เป็นต้น ผลที่ได้ อาจจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้เราจะใช้ วิธีการดังกล่าวในการหาพฤติกรรมที่เป็นตัวแทนของรอยไม่ต่อเนื่อง

การเก็บตัวอย่างหินในภาคสนาม ควรเก็บรอบ ๆ พื้นที่ที่ทำการศึกษาให้ครอบคลุมมากที่สุด ซึ่งถือเป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษาดังกล่าว โดยสามารถระบุตำแหน่งต่างๆได้ ตัวอย่างของหินที่ได้ควรเก็บรวบรวม ระบุตำแหน่ง บันทึก สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่เป็นไปได้ตามมาตรฐานการทดสอบในนี้จะอ้างอิงมาตรฐาน ASTM (ASTM D4543, 1985)

วัตถุประสงค์ของการทดสอบภาคสนาม เพื่อศึกษาตัวแปรและพฤติกรรมของรอยความไม่ต่อเนื่อง (Field discontinuity) ตัวแปรกำลังเฉือนของรอยแยก (Joint shear strength criterion) โดยการศึกษาจาก สัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก (Joint roughness coefficient (JRC)) ตาม

มาตรฐาน ASTM (ASTM D5607, 1995) ค่ากำลังเฉือนประลัย (Peak shear strength) และกำลังเฉือนคงค้าง (Residual shear strength) เป็นค่าประมาณที่ได้จากการประเมินภาคสนาม

ความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น (Basic friction angle) และคุณสมบัติทางกายภาพ ค่ากำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่องที่ประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยกสามารถประเมินได้จากวิธีการของ Barton ค่าของกำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่องสามารถคำนวณได้จาก ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก และค่ากำลังอัดแกนเดียว (Uniaxial Compressive Strength ( $\sigma_c$ ))

จากการศึกษาของ N.R. Barton (1973) สามารถบอกได้ว่า พฤติกรรมของรอยแยกของหินในการจำแนกมวลหินนั้นมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tau = \sigma_n \tan\{\phi_b + JRC \log_{10}(JCS/\sigma_n)\} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\tau$  คือ ค่ากำลังเฉือนของรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล

JCS คือ ค่ากำลังอัดของผนังรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล

JRC คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก

$\phi_b$  คือ มุมเสียดทานเบื้องต้นมีหน่วยเป็นองศา

$\sigma_n$  คือ ความเค้นฉากประสิทธิผลมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล


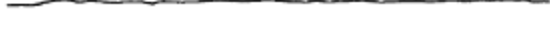




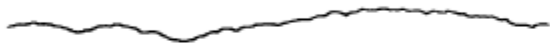



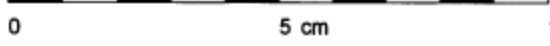
### 2.3.2.1 ตัวแปรกำลังเฉือน (Shear strength parameters)

#### 2.3.2.1.1 ความขรุขระ (Roughness)

N.R. Barton (1973, (1974, (1976) และ N.R. Barton & Choubey (1977) กล่าวว่าไว้ว่าเป็นการวัดลักษณะผิวหน้าของรอยไม่ต่อเนื่อง (Plane of discontinuity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลังเฉือน เป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายและสามารถทดสอบได้ในพื้นที่ มีการจำแนกค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก (JRC) ไว้จาก 0 ถึง 20

รูปแบบของและมาตราเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ สามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นการวัดโดยตรงตามวิธีการของ N.R. Barton (1973, (1974, (1976) และ N.R. Barton & Choubey (1977)



	JRC = 0 - 2
	JRC = 2 - 4
	JRC = 4 - 6
	JRC = 6 - 8
	JRC = 8 - 10
	JRC = 10 - 12
	JRC = 12 - 14
	JRC = 14 - 16
	JRC = 16 - 18
	JRC = 18 - 20
	

รูปที่ 2. 16 การแสดงมาตราเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ

อ้างอิงจาก Barton และ Choubey (1977)

สำหรับรอยแยกที่มีวัสดุภายใน (Filled joints) ซึ่งจะเป็นตัวแทนคุณสมบัติของรอยแยกแทนในกรณีของ Barton จะพิจารณาการสัมผัสระหว่างหินต่อหินเท่านั้น

จากการศึกษาของ Deere & Miller (1966) ค่ากำลังอัดที่ผนังรอยแยก (JCS) มีความสัมพันธ์ต่อค่ากำลังเฉือนและการเปลี่ยนรูป การเคลื่อนที่เนื่องจากการเฉือนมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสกันของผนังต่อผนัง (Rock to Rock) ค่ากำลังอัดที่ผนังรอยแยกเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดการพัง การประเมินค่า JCS ได้จากการทดสอบแบบช้อนกระดอนชนิดตี (Schmidt Rebound Hammer Test)

### 2.3.2.1.2 ความเค้นฉาก (Normal Stress)

จากการค้นคว้าของ Vasarhelyi (1999) ได้อธิบายถึงความเค้นฉากประสิทธิผล คือภาระที่กระทำในแนวตั้งฉากที่มีผลต่ออัตราการเลื่อนไถล ผลที่ได้จะแสดงเป็นค่า มุมการไถล (Dilation angle) ที่ลดลงต่อการเพิ่มแรงในแนวฉาก (Normal force) พฤติกรรมของการเฉือนที่เกิดขึ้นนั้นต้องอยู่ในสภาวะที่มวลหินอยู่ในสถานะสถิต (Rigid body) ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนรูป นั่นคือค่าของความเค้นฉากประสิทธิผลที่ได้จะเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์ต่อการประเมินค่ากำลังเฉือน (Shear strength) จากการศึกษาของ E. Hoek & Bray (1981) ได้แนะนำค่าของความเค้นฉากประสิทธิผลที่มีความสัมพันธ์กับค่า JCS อยู่ในช่วง

$$0.01 < (\sigma_n/JCS) < 0.3 \quad (2.30)$$

### 2.3.2.1.3 สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ (Cohesion)

สัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีนัยสำคัญโดยตรงต่อค่ากำลังเฉือนของหิน นั่นคือเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อกำลังของหิน ในสภาวะที่ค่าการยึดเกาะมีการพัฒนาขึ้นบนผิวรอยเลื่อน ในกรณี Intact rock มวลหินหินแข็งปราศจากรอยความไม่ต่อเนื่อง ค่าการยึดเกาะจะมีค่าสูงมาก ส่งผลต่อกำลังของหินและไม่มีสภาวะเสี่ยงต่อการไถลเกิดขึ้น สำหรับหินผิวยาวนั้น ค่าการยึดเกาะถูกพัฒนาขึ้นหลังจากการเคลื่อนที่จากการเฉือนหยุดลง ขนาดของค่าการยึดเกาะที่เกิดขึ้นบนแกนความเค้นเฉือนที่จุดตัดกับเส้นโค้งของกำลังเฉือน (Curve shear strength) ในไดอะแกรมของโมห์ร์ (Mohr diagram) ค่าการยึดเกาะจะเพิ่มขึ้นหลังจากการเพิ่มขึ้นของความเค้นฉาก (Normal stress) จนกระทั่งถึงค่ากำลังคงค้าง (Residual strength) ในกรณีของรอยไม่ต่อเนื่องที่มีวัสดุภายใน ค่าการยึดเกาะจะขึ้นกับคุณสมบัติและความหนาของวัสดุภายในอ้างอิงจาก Wyllie (1998)

จาก Coulomb criterion ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุด ค่าความเค้นฉากและค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.31)$$

- |       |            |  |
|-------|------------|--|
| เมื่อ | $c$        | คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล       |
|       | $\tau$     | คือ กำลังเฉือนของรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล             |
|       | $\sigma_n$ | คือ ค่าความเค้นฉากที่กระทำต่อรอยแยกมีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล |
|       | $\phi$     | คือ มุมเสียดทานมีหน่วยเป็นองศา                           |

#### 2.3.2.1.4 ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น (Basic Friction Angle) ( $\phi_b$ ) และ ค่ามุมเสียดทานคงค้าง (Residual Friction Angle) ( $\phi_r$ )

เป็นค่าการต้านทานโดยการเฉือนที่ต่ำที่สุด โดยทั่วไปแล้ว ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ( $\phi_b$ ) มักอ้างถึงสถานะพื้นผิวราบเรียบและผิวสด สามารถพิจารณาจากค่าคงที่ของวัสดุได้เลย สำหรับค่ามุมเสียดทานคงค้าง ( $\phi_r$ ) อ้างถึงสถานะคงค้างของผิวรอยแยกหลังจากเกิดการเคลื่อนที่แบบเฉือน (Shear displacement) หากผิวของรอยแยกไม่มีการผูกพันที่เกิดจากการกัดกร่อนตามธรรมชาติ มุมเสียดทานคงค้าง จะมีค่าเท่ากับค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น สำหรับวิธีการในการใส่ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ในการทดสอบ Direct shear test หรือ tilt tests นั้น ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น จะขึ้นกับชนิดของหินและสถานะความชื้น อ้างอิงจาก Horn & Deere (1962) ค่าของค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ในสถานะแห้ง อยู่ในช่วง 26-38 องศา และในสถานะที่มีน้ำ จะอยู่ในช่วง 25-35 องศา การวัดค่าดังกล่าวเป็นเรื่องยากเนื่องจากสถานะ Very large shear displacements ทำได้ยากอ้างอิงจาก Xu & De Fretias (1990) อาจหาได้ด้วยวิธีการทางอ้อม โดยการวัดค่าการเคลื่อน (Dilatation) ในการทดสอบ ความเค้นเฉือนที่สถานะความเค้นฉากต่างๆและต้องมีการปรับแก้บ้าง

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยในภาพรวมเริ่มจากการศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งข้อมูลทางธรณีวิทยาเบื้องต้นของเหมืองหินในจังหวัดสระบุรี เริ่มจากการทำการเลือกและระบุพื้นที่ที่จะทำการศึกษา ออกแบบวิธีการเก็บตัวอย่าง ทำการเก็บข้อมูลภาคสนาม เช่น ข้อมูลโครงสร้างธรณีวิทยา ลักษณะการวางตัวของมวลหิน จำนวนชุดของรอยไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น เก็บตัวอย่างทางธรณีเทคนิคในภาคสนามที่สามารถเป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา ทำการทดสอบค่าเชิงกลในห้องปฏิบัติการทางกลศาสตร์ของหิน ศึกษาลักษณะโดยรวมในพื้นที่ รูปร่างและลักษณะทางเรขาคณิต และสภาพของหินในพื้นที่ศึกษา ซึ่งจะได้ค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมวลหินที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา

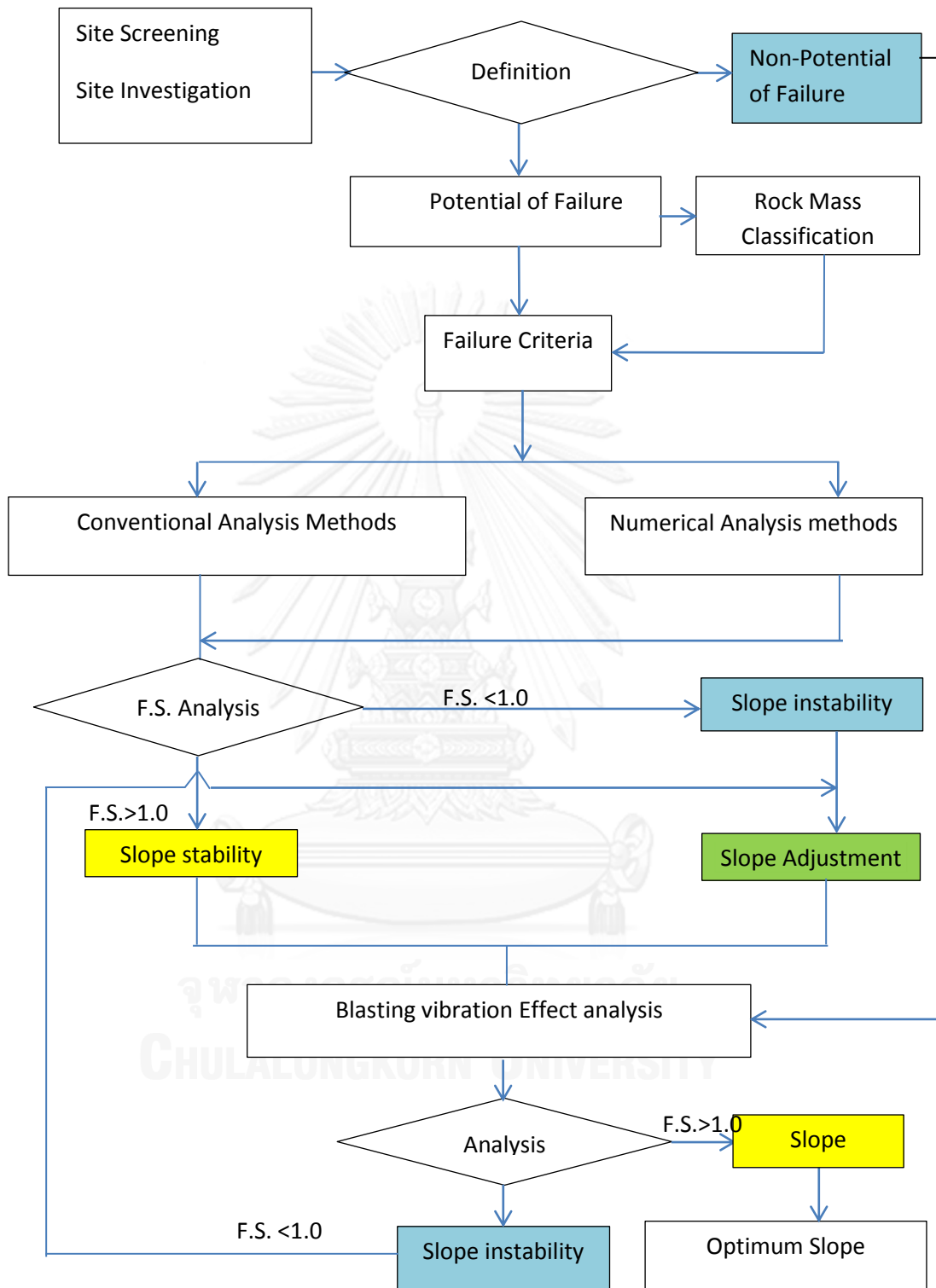
สำหรับงานวิจัยฉบับนี้เริ่มจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ เพื่อทำการหาโอกาสของการพังภายในพื้นที่ศึกษา โดยการจำลองรูปร่างและลักษณะทางเรขาคณิตของมวลหินในบริเวณพื้นที่ศึกษา ทำการวิเคราะห์ค่า daylight conditions ที่มุมความลาดของผนังบ่อเหมืองแต่ละพื้นที่ ที่ความชัน 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, และ 70 องศา และ เปรียบเทียบกับค่าของแนวการวางตัว และค่ามุมเท ที่สามารถเก็บรวบรวมได้จากข้อมูลภาคสนามในแต่ละโซนของพื้นที่ซึ่งระบุในการศึกษา โดยอาศัยโปรแกรม Microsoft Excel เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ สำหรับพื้นที่ที่ไม่มีศักยภาพของการพังจะไม่มีวิเคราะห์เสถียรภาพ สำหรับพื้นที่ที่มีศักยภาพของการพังจะนำไปวิเคราะห์เสถียรภาพ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย (Factor of Safety) ของผนังบ่อเหมืองที่สามารถออกแบบให้มีความชันได้มากที่สุด ซึ่งจะวิเคราะห์รูปแบบการพังเฉพาะการพังแบบระนาบ (Plane failure) โดยอาศัยวิธีการแบบดั้งเดิม ควบคู่ไปพร้อม ๆ กับแบบจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งใช้วิธีการ Finite Difference Methods (FDM) โดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยฉบับนี้คือการศึกษาผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดต่อเสถียรภาพความลาดผนังบ่อเหมือง เริ่มต้นจากการศึกษาพฤติกรรมการใช้วัตถุระเบิดในพื้นที่ศึกษา โดยการเก็บรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้วัตถุระเบิด น้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ ระยะห่างจากจุดระเบิดถึงจุดที่สนใจ และค่าความเร็วอนุภาคที่วัดได้ในแต่ละครั้ง หาความสัมพันธ์ที่แสดงได้ถึงพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ในรูปแบบความเร่งของอนุภาคจากการสั่นสะเทือนที่แทนด้วยตัวแปร  $\alpha$  และใช้ในการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย

สำหรับผนังบ่อเหมือง เมื่อเกิดการระเบิดบริเวณใกล้เคียง เปรียบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยก่อนและหลังการระเบิด ของแต่ละค่าความชันของผนังบ่อเหมืองแล้วเปรียบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย สำหรับค่าความชันสูงสุดของแต่ละด้านของผนังบ่อเหมือง ทำการออกแบบผนังบ่อเหมืองภายใต้ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ยอมรับได้ในสภาวะปราศจากน้ำใต้ดิน เพื่อหาค่าความชันสูงสุดของผนังบ่อเหมือง ในแต่ละพื้นที่เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบภาพรวมของผนังบ่อเหมืองทั้งหมด ซึ่งขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 3.1



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

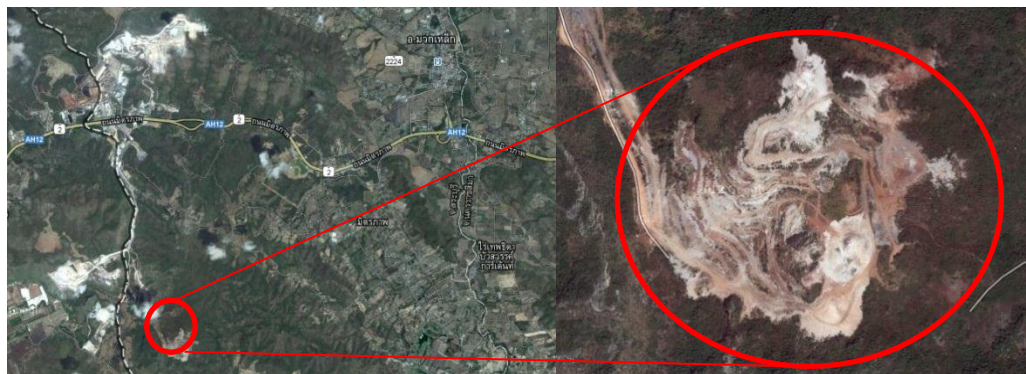


รูปที่ 3. 1 แสดงข้อมูลการใช้วัตถุระเบิดของพื้นที่

## 3.2 พื้นที่ศึกษา

### 3.2.1 ข้อมูลและที่ตั้ง

พื้นที่ศึกษาเป็นเหมืองหินปูนที่อยู่ในช่วงการออกแบบและพัฒนาตั้งอยู่บริเวณอำเภอแก่งคอย รอยต่ออำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี



รูปที่ 3. 2 แสดงสถานที่ตั้งพื้นที่ศึกษา

ลักษณะเหมืองหินปูนอยู่ในช่วงการออกแบบและการพัฒนาหน้าเหมืองเพื่อการผลิต ระดับความสูง ประมาณ 300-600 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ธรณีวิทยาแหล่งแร่บริเวณพื้นที่ศึกษา พบว่าเป็นหินตะกอนยุคเพอร์เมียน (Permian) ประกอบด้วย

หน่วยหินภูเพ (Phu Phe Formation) เป็นหินปูนเนื้อสีเทาแกมชมพูถึงเทาดำ มีชั้นหินเชิร์ต กระเปาะสลับเป็นชั้น ๆ ระบายเอียงเท ประมาณ 35-60 องศาในทางทิศใต้

หน่วยหินหนองโป่ง (Nong Pong Formation) เป็นหินปูนเนื้อสีเทาและเทาดำ เนื้อหยาบปานกลาง หินเชิร์ต และหินดินดานสลับ ระบายเอียงเท ประมาณ 40-65 องศาในทางทิศใต้

หน่วยหินปางอโศก (Pang Asok Formation) เป็นหินดินดานสีเทาดำ สีน้ำตาลซีมัว เนื้อทรายแป้ง มีชั้นหินปูน หินทรายแทรกสลับ

หน่วยหินเขาขาด (Khae Khad Formation) เป็นหินปูนเนื้อเทาดำ หินปูนเนื้อดิน หินปูนโดโลไมต์มีเชิร์ตแทรกสลับ

หน่วยหินซับบอน (Sup Bon Formation) เป็นหินดินดาน หินทราย หินทรายแป้ง หินเชิร์ต มีหินปูนแทรก ระบายเอียงเทในทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ บางแห่งเทไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ และหินยุค ควอเทอร์นารี (Quaternary) เป็นตะกอนน้ำพัดพา ประกอบด้วย

กรวด เศษหิน ทราย และดิน ส่วนใหญ่มักสะสมบริเวณเชิงเขาความหนาประมาณ 2-3 เมตร ข้อมูลจาก เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ (2537)

### 3.2.2 ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยา

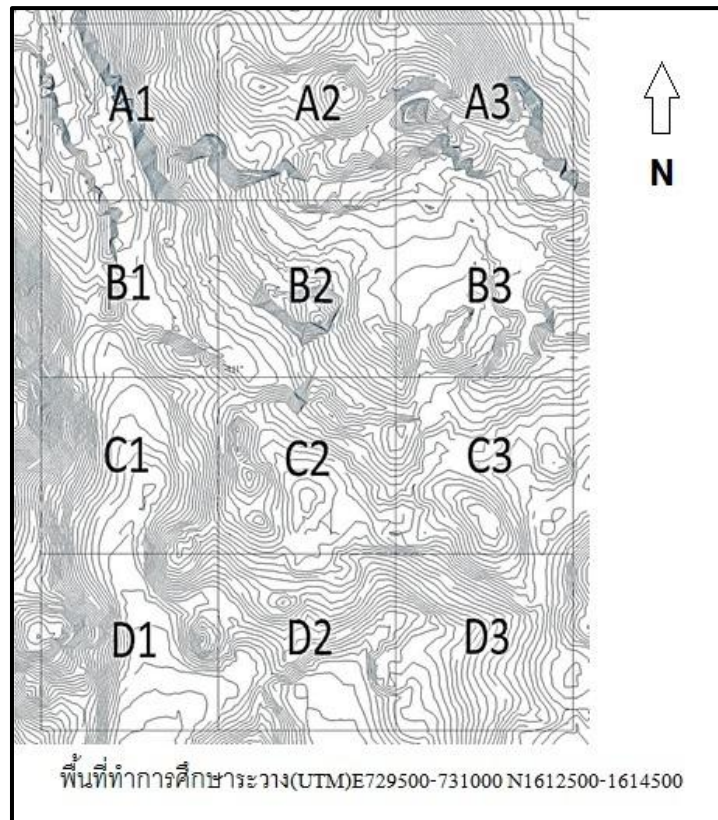
โครงสร้างของชั้นหินในบริเวณพื้นที่ศึกษา พบว่า มีการวางตัว (Strike) NWW-SEE เกือบ E-W เอียงเทไปทาง SW มีมุมเอียงเท (Dip Angle) ประมาณ 30-60 องศา บางที่เอียงเทไปทาง NE บ้าง จึงเกิดเป็นโครงสร้างคดโค้ง (Folding) ซึ่งมีแนวแกนคดโค้งขนานกันไปกับแนว Strike ของชั้นหิน กรมทรัพยากรธรณี (2528) เมตร ข้อมูลจาก เอส ที เอส เอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์ (2537)

### 3.3 การศึกษาและการเลือกระบุพื้นที่ (Site Investigations and Site Screening)

การศึกษาค่าคุณสมบัติพื้นฐานทางกลศาสตร์ของหินเพื่อทำการจำแนกค่าคุณสมบัติของมวลหินในแต่ละโซน สำหรับการประเมินเสถียรภาพ การเลือกพื้นที่ สำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 12 โซน ขนาด กว้างxยาว เท่ากับ 300x300 เมตร และจำแนกออกเป็น ตัวอักษรภาษาอังกฤษจากด้านบนซ้ายไปขวา จากบนลงล่าง โดยเริ่มจาก A1 ถึง D3 ตามลำดับ ดังแสดงตามรูปที่ 3.3 โครงสร้างทางธรณีวิทยา ทิศทางการวางตัวของรอยไม่ต่อเนื่อง จำนวนชุดของรอยไม่ต่อเนื่อง สภาพของรอยไม่ต่อเนื่อง ระยะห่างของรอยแตก วัสดุภายในรอยแตก และตัวอย่างหิน ถูกเก็บรวบรวมสำหรับการทดสอบเชิงกลศาสตร์ สำหรับการคำนวณหาการจำแนกมวลหิน (Rock mass classification)

โครงสร้างและทิศทางการวางตัวของรอยไม่ต่อเนื่อง ถูกใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบความชันของผนังบ่อเหมือง และหาค่าพื้นที่ที่มีโอกาสของการพังของผนังบ่อเหมืองในแต่ละพื้นที่





รูปที่ 3. 3 การแสดงแบ่งโซนสำหรับพื้นที่ศึกษาและโครงสร้างการวางตัวของหิน



รูปที่ 3. 4 การแสดงเก็บรวบรวมข้อมูลในพื้นที่ศึกษา โครงสร้างการวางตัวของหิน จำนวนชุดรอย  
ไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 3. 5 การแสดงภาพหินตัวอย่างสำหรับการทดสอบกลศาสตร์ของหินในห้องปฏิบัติการ

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

3.4.1 อุปกรณ์ภาคสนาม เช่น เซ็มทิก บรุนตัน เครื่องระบุพิกัดด้วยดาวเทียม (GPS) ค้อน ธรณี ไม้บรรทัด สายวัดระยะ

3.4.2 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเชิงกลศาสตร์ของหิน เช่น เครื่องเจาะตัวอย่าง เครื่องตัด ตัวอย่างหิน เครื่องทดสอบดัชนีกดจุด

3.4.3 อุปกรณ์สำหรับการเก็บรวบรวมและประมวลผล ได้แก่ คอมพิวเตอร์ โปรแกรม Microsoft Excel, Word โปรแกรมในการคำนวณเชิงตัวเลข FLAC2D

### 3.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ (Kinematic analysis)

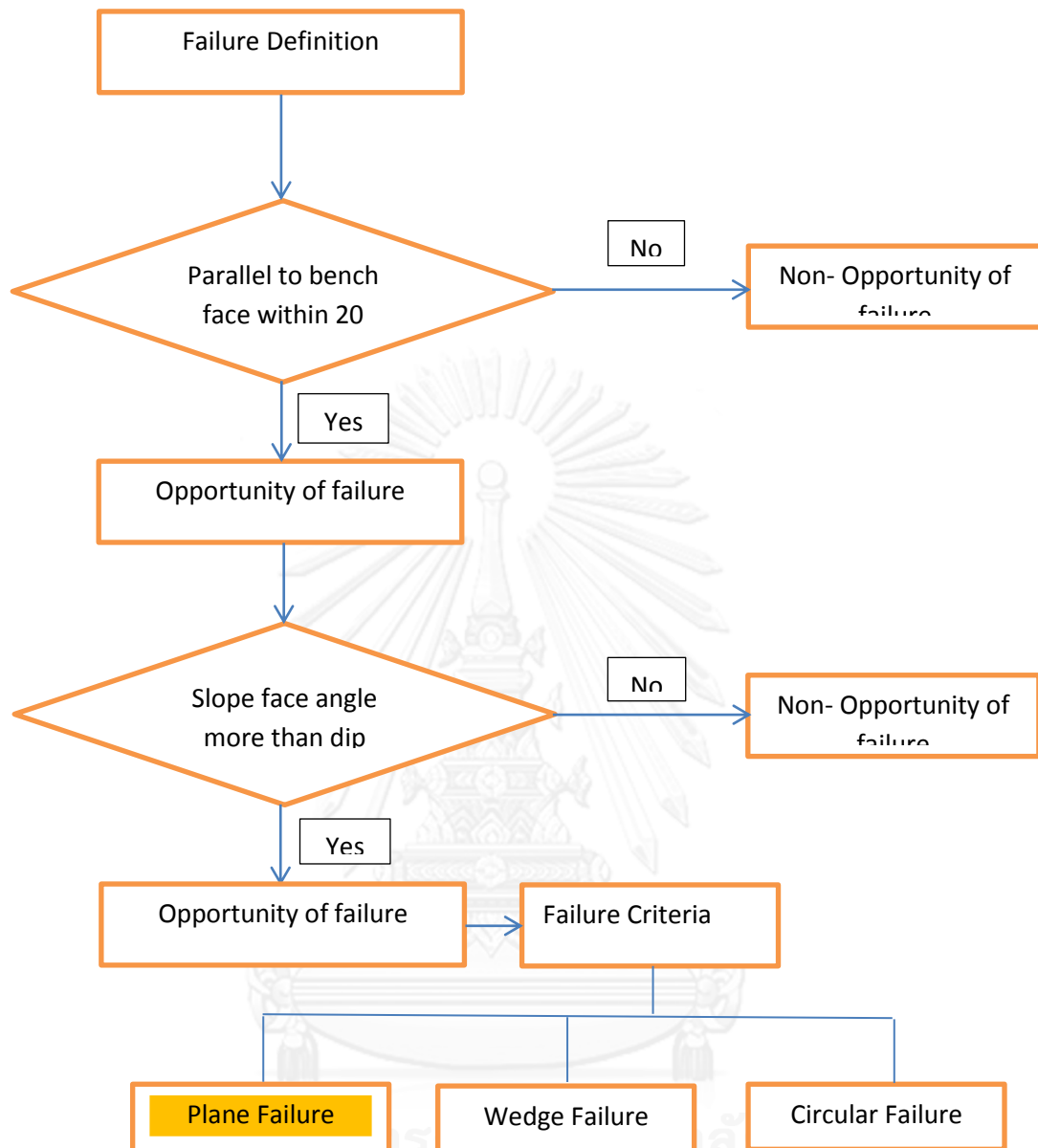
จากการเก็บรวบรวมข้อมูลและการศึกษาในพื้นที่สำหรับโซนที่มีโอกาสของการพังของผนังบ่อเหมือง วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางจลนศาสตร์ ถูกวิเคราะห์ด้วยการทำ Day lighting ในโซนที่ไม่พบว่ามีศักยภาพของการพังจะไม่ต้องทำการวิเคราะห์ต่อ และสำหรับโซนที่พบว่ามีโอกาสของการพัง จะทำการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของแต่ละโซนด้วยวิธีการขีดจำกัดสมดุล โดยความชันของผนังบ่อเหมืองในการวิเคราะห์หาค่า Day lighting จะเริ่มที่ความชัน 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 องศา

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางจลนศาสตร์การเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามเป็นสิ่งสำคัญ โครงสร้างทางธรณีวิทยา ทิศทางการวางตัวของรอยไม่ต่อเนื่อง จำนวนชุดของรอยไม่ต่อเนื่อง สภาพของรอยไม่ต่อเนื่อง ระยะห่างของรอยแตก วัสดุภายในรอยแตก และตัวอย่างหิน ถูกเก็บรวบรวมเพื่อการทดสอบ Day lighting โดยอาศัยโปรแกรม Microsoft Excel เป็นเครื่องมือในการคำนวณ เพื่อหาจุดที่มีศักยภาพในการพังขั้นตอนนี้ตามตาราง 3.1

ตารางที่ 3. 1 แสดงเกณฑ์ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจลศาสตร์

ลำดับ	Slope	Discontinuity	เกณฑ์ในการพิจารณา	
1.	Angle	Dip	>	<
			Day Lighting	Non Day lighting
2.	ทิศทางด้าน Slope	แนว Strike	$\leq 20$ องศา	$> 20$ องศา
			มีโอกาสพัง	ไม่มีโอกาสพัง

ขั้นตอนในการวิเคราะห์จากตาราง 3.1 คือ เมื่อสามารถจำลองรูปร่างทางเรขาคณิตของรอยไม่ต่อเนื่องได้แล้ว เราจะทำการเปรียบเทียบรูปร่างทางเรขาคณิตดังกล่าวกับทิศทางการวางตัวของผนังบ่อเหมือง โดยหากค่าความชันของผนังบ่อเหมืองมากกว่าค่ามุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่อง จะเกิด Day lighting และหากค่าความชันของผนังบ่อเหมืองน้อยกว่าค่ามุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่อง จะไม่เกิด Day lighting กรณีนี้จะไม่ทำการวิเคราะห์ต่อ ในผนังที่ปรากฏ Day lighting จะทำการวิเคราะห์ค่าการตัดกัน ตามข้อ 2 ในตาราง 3.1 นั่นคือหากค่าการวางตัวของแนว Strike กับทิศทางของหน้าผนังบ่อเหมืองตัดกันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 องศา นั่นคือ ผนังบ่อเหมืองดังกล่าวมีโอกาสในการพังแบบระนาบ และหากค่าการวางตัวของแนว Strike กับทิศทางของหน้าผนังบ่อเหมืองตัดกันมากกว่า 20 องศา ผนังบ่อเหมืองดังกล่าวจะไม่มีโอกาสในการพังแบบระนาบ



รูปที่ 3. 6 การแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หาจุดที่มีโอกาสของการพังด้วยวิธีทางจลนศาสตร์

### 3.6. การวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุล (Limit equilibrium analysis)

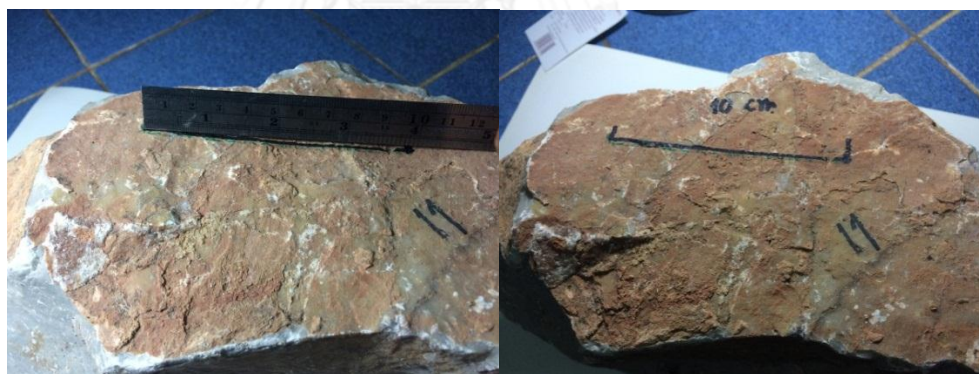
ในการศึกษาเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง จะต้องมีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของหิน การเก็บรวบรวม โครงสร้างทางธรณีวิทยา ทิศทางการวางตัวของรอยไม่ต่อเนื่อง มุมเท สภาพของรอยไม่ต่อเนื่อง ระยะห่างของรอยแตก วัสดุภายในรอยแตก รวมทั้งตัวแปรกำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่อง ประกอบด้วย ความขรุขระ ความเค้นฉากประสิทธิผล สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ และ ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ การศึกษาตัวแปรกำลังเฉือนจะใช้วิธีการสำรวจภาคสนาม รายละเอียดดังนี้

### 3.6.1 กำลังเฉือนของรอยแยก

การหาค่ากำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่องสามารถหาได้จากการทดสอบแบบกำลังเฉือนทางตรง ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ภายในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม สำหรับการทดสอบภาคสนาม นั้นสามารถกระทำได้แต่การได้รับผลอาจไม่ดีมากนัก เนื่องจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดของแท่งตัวอย่างที่ไม่ได้มาตรฐาน เป็นต้น ผลที่ได้อาจจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้เราจะใช้วิธีดังกล่าวในการหาพฤติกรรมที่เป็นตัวแทนของรอยไม่ต่อเนื่อง สามารถบอกได้ว่าพฤติกรรมของรอยแยกของหินในการจำแนกมวลหินนั้นมีความสัมพันธ์สมการ 2.29

### 3.6.2 ความขรุขระ

เป็นการวัดลักษณะผิวหน้าของรอยไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกำลังเฉือน สามารถทดสอบได้ในพื้นที่โดยตรง และได้มีการจำแนกเกณฑ์ในการประเมิน ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก (JRC) ไว้จาก 0 ถึง 20 ตามรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นการวัดรูปแบบโดยตรง โดยที่การวัดค่าตามวิธีการของ N.R. Barton & Choubey (1977) และจะใช้เป็นตัวแทนของค่าความขรุขระของพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 3. 7 การแสดงวัดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยกตามวิธีการของ (Barton (1972, 1973, 1976))

### 3.6.3 ความเค้นฉากประสิทธิผล

ความเค้นฉากประสิทธิผลคือภาระที่กระทำในแนวตั้งฉากที่มีผลต่ออัตราการเลื่อนไถล สำหรับการประเมินค่ากำลังเฉือน (Shear strength) จากการศึกษาของ E. Hoek & Bray (1981) ได้นำเสนอค่าของความเค้นฉากประสิทธิผลที่มีความสัมพันธ์กับค่า JCS อยู่ในช่วง

$$0.01 < (\sigma_n / JCS) < 0.3$$

ซึ่ง JCS หรือค่ากำลังอัดที่ผนังรอย มีความสัมพันธ์ต่อค่ากำลังเฉือนและการเปลี่ยนรูป การเคลื่อนที่ เนื่องจากการเฉือนมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสกันของผนังต่อผนัง ค่ากำลังอัดที่ผนังรอย แยก ซึ่งสามารถหาได้จากการทดสอบกำลังกดจุด (Point Load Test) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการของของ E. Hoek & Bray (1981) ในการประเมินค่าความเค้นฉากประสิทธิผล

### 3.6.4 สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ

ในการศึกษาสัมประสิทธิ์การยึดเกาะซึ่งมีความสำคัญต่อค่ากำลังเฉือนของหิน กรณีมวลหินแข็งที่ปราศจากรอยความไม่ต่อเนื่อง ค่าการยึดเกาะจะมีค่าสูงมากและไม่มีความเสี่ยงต่อการไหลเกิดขึ้นเลย ส่วนหินผิวยาวนั้น ค่าการยึดเกาะเกิดขึ้นหลังจากการเคลื่อนที่จากการเฉือนหยุดลง ขนาดของค่าการยึดเกาะสามารถหาได้จากจุดตัดบนแกนความเค้นเฉือน (Shear stress) ในไดอะแกรมของโมห์ร์ (Mohr diagram) กรณีของรอยไม่ต่อเนื่องที่มีวัสดุภายใน ค่าการยึดเกาะจะขึ้นกับคุณสมบัติและความหนาของวัสดุภายใน

ในการงานวิจัยนี้สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ สามารถคำนวณได้จากการศึกษาของ Coulomb criterion ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนสูงสุดและค่าความเค้นฉากมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะดังสมการ 2.31 ดังนี้

### 3.6.5 ค่ามุมเสียดทานเบี่ยงตัน

โดยทั่วไปแล้ว การหาค่ามุมเสียดทาน ( $\phi$ ) หรือมุมเสียดทานเบี่ยงตัน ( $\phi_b$ ) สามารถหาได้จากการทดสอบ Direct shear test หรือ Tilt tests ซึ่งค่ามุมเสียดทานเบี่ยงตัน จะขึ้นกับชนิดของหินและสภาวะความชื้น สำหรับหินปูน จากหลาย ๆ งานวิจัยได้เสนอค่ามุมเสียดทานหรือมุมเสียดทานเบี่ยงตัน ไว้ตามตาราง 3.2 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าสูงสุดและต่ำสุดจากตาราง 3.2 ซึ่งเป็นค่าประมาณสำหรับค่ามุมเสียดทานเบี่ยงตันสำหรับการคำนวณตัวแปรกำลังเฉือน

ตารางที่ 3. 2 แสดงค่ามุมเสียดทานของหินปูน

Rock type	Location/Name	$\phi$ (Degree)	Sources
Limestone	Wolf camp	34	Goodman (1989)
	Magny	36	Grasselli and Egger- 2003
	Port du gard	37	
	N/A	35	Waltham (1994)
	N/A	35	
	Indiana	42	Goodman (1989)
	N/A	31-37	Duzgun et al. (2002)

หลังจากหาค่าตัวแปรกำลังเฉือนได้แล้วเราจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการขีดจำกัดสมดุล ในกรณีของการพังแบบระนาบในโซนที่พบโอกาสของการพัง ในกรณีที่ไม่มีแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องโดยอาศัยสมการ 2.1 ในกรณีที่มีแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องใช้สมการ 2.2

### 3.7 การใช้วัตถุระเบิด (Characteristics of blasting)

เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง ดังนั้นพฤติกรรมการระเบิดของพื้นที่จึงจำเป็นต้องมีการศึกษา โดยทั่วไประดับของแรงสั่นสะเทือนจะขึ้นกับชนิดของวัตถุระเบิดที่ใช้ น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง ระยะห่างของจังหวะถ่วง เทคนิค ที่แตกต่างกันไปของการระเบิด สภาพทางธรณีวิทยา และระยะห่างจากจุดตรวจวัดถึงบริเวณที่มีการระเบิด

ในการศึกษานี้ พบว่ามีการใช้วัตถุระเบิดแรงสูงเป็นชนิด Emulsion ที่มีความเร็วในการระเบิด (VOD) ประมาณ 4,500-6,100 เมตร/วินาที วัตถุระเบิดแรงต่ำ เป็น ANFO มีความเร็วในการระเบิด (VOD) ประมาณ 2,200-4,000 เมตร/วินาที จุดด้วยแก้วปล่องเวลาชนิดใช้ไฟฟ้าและไม่ใช้ไฟฟ้า



### รูปที่ 3. 8 การแสดงแก๊ปถ่วงจังหวะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (None-electric gap) และ วัตถุระเบิดแรงสูงแบบ Emulsion

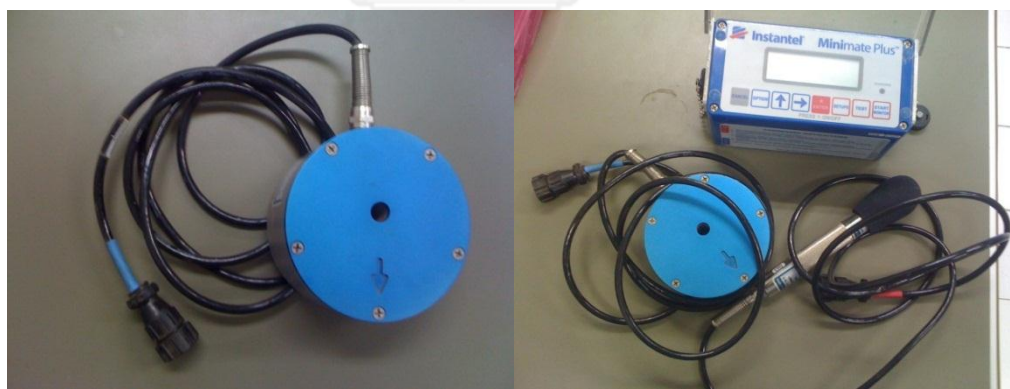
ขนาดรูเจาะระเบิดที่ใช้ตั้งแต่ขนาด 3.0 นิ้ว (89 มิลลิเมตร) ถึง 6.0 นิ้ว (152 มิลลิเมตร) โดยทั่วไปใช้รูเจาะขนาด 5.0 นิ้ว (127 มิลลิเมตร) ระยะห่างระหว่างแถว (Burden) 3 ถึง 4 เมตร ระยะห่างภายในแถว (Spacing) 5 ถึง 6 เมตร ความสูงของหน้าผา (Bench height) ประมาณ 15 เมตร ระยะเจาะต่ำกว่าพื้น (Sub drill) ประมาณ 0.3-0.4 เท่าของระยะห่างระหว่างแถว น้ำหนักของวัตถุระเบิดรวม (high+ low) แปรผันในช่วง 22 ถึง 180 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ โดยปกติจะใช้การจุดระเบิดแบบหน่วงเวลาเพื่อลดปริมาณวัตถุระเบิดต่อจังหวะถ่วง โดยมีอนุกรมเวลาที่ทำให้ไม่เกิดการซ้ำกันของแก๊ปที่ 17, 25, 42, 67 มิลลิเซคัน (Millisecond) ปกติใช้ 25 มิลลิเซคัน (Millisecond) รายละเอียดข้อมูลในการระเบิดแสดงดังตาราง 3.3



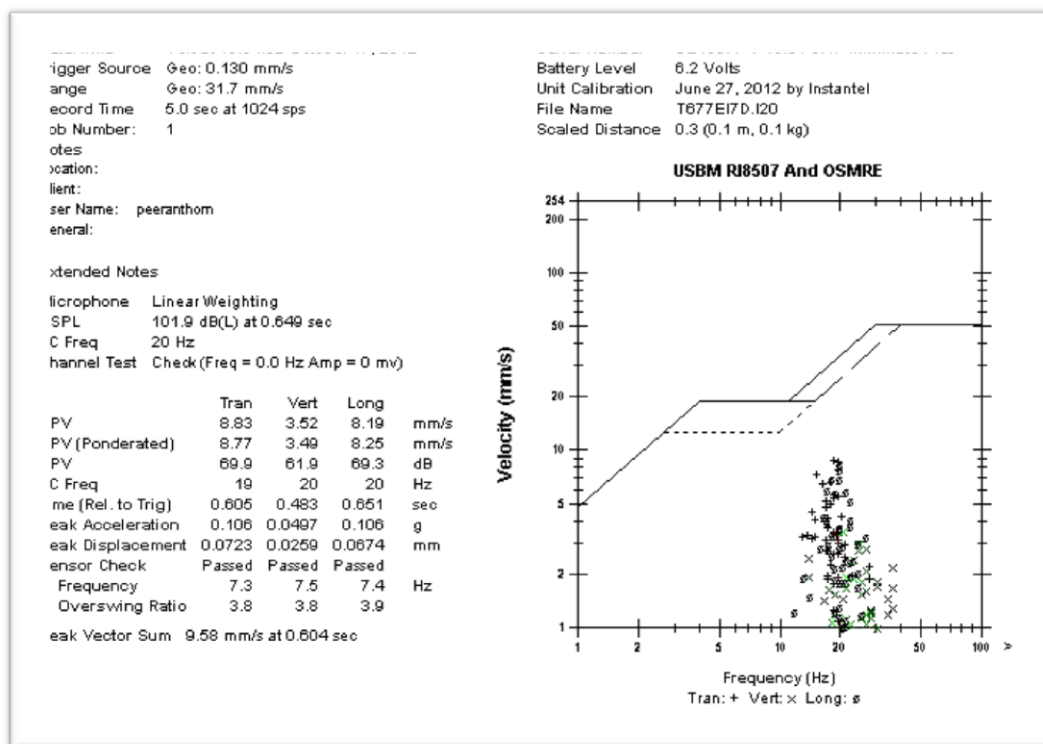
ตารางที่ 3. 3 แสดงข้อมูลการใช้วัตถุระเบิดของพื้นที่

Rock type/RMR	Limestone/70-75
Hole Diameter (mm)	127
Hole Depth (m)	16
Stemming height (m)	3-4
Burden (m)	3-4
Spacing (m)	5-6
Sub drill (m)	1-1.2
Explosive type	Emulsion
Explosive Quantity (kg)	22-180
Initiations system	Non-electric, Electric

พฤติกรรมของคลื่นสั่นสะเทือนถูกวัดในรูปของค่าความเร็วสูงสุดของอนุภาค (PPV) และความถี่ (Hz) สำหรับการระเบิดในแต่ละครั้ง ข้อมูลถูกวัดและเก็บรวบรวมด้วยเครื่องมือวัดแรงสั่นสะเทือน โดยวัดทิศทางการเดินทางของคลื่นใน 3 แกน คือ ทิศตามยาว (Long) ทิศตามขวาง (Trans) และทิศทางแนวตั้ง (Vertical) รายละเอียดของข้อมูลจะถูกเก็บบันทึกตามวิธีการของ USBM



รูปที่ 3. 9 การแสดงอุปกรณ์วัดแรงสั่นสะเทือนและการเดินทางของคลื่น 3 ทิศทาง



รูปที่ 3. 10 การแสดงรูปแบบการบันทึกและเก็บรวบรวมข้อมูลแรงสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน USBM

### 3.7.1 การวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลแรงสั่นสะเทือน

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดในแต่ละครั้ง มีการรวบรวมข้อมูลจากการระเบิดตั้งแต่ปี 2553-2555 ซึ่งการบันทึกรวบรวมความสัมพันธ์ของการระเบิดแต่ละครั้งในรูปแบบของ จุดที่ทำการวัด ระยะห่างแนวราบในหน่วยเมตร ระยะห่างแนวตั้งในหน่วยเมตร และระยะห่างแนวเฉียงในหน่วยเมตร ค่าแรงสั่นสะเทือนที่วัดได้ในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาที ค่าสัดส่วนระยะทาง (Scale Distance) และปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้สูงสุดต่อหนึ่งจังหวะถ่วง (Maximum Charge per Delay) ในหน่วยกิโลกรัม

### 3.7.2 การประมวลผลแรงสั่นสะเทือน

เมื่อรวบรวมข้อมูลได้แล้ว ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการหาความสัมพันธ์ของแต่ละช่วงของน้ำหนักวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วงกับค่าสัดส่วนระยะทางและค่าของแรงสั่นสะเทือนในรูปแบบ PPV ในแต่ละช่วงของค่าสัดส่วนระยะทางดังที่ได้แสดงตามตาราง 3.4

ตารางที่ 3. 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัดส่วนระยะทางหรือ Scale distance และค่าของแรงสั่นสะเทือนในรูปแบบ PPV

Scale Distance (m/kg <sup>0.5</sup> )	Average PPV (mm/sec)
10-20	2.96
20-30	3.06
30-40	2.62
40-50	3.66
50-60	2.04
60-70	2.14
70-80	1.81
80-90	1.53
90-100	1.67
100-110	1.85

นำข้อมูลที่ได้จากความสัมพันธ์ในตาราง 3.4 มาเขียนกราฟในมาตราส่วน Log scale เมื่อได้ค่าเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายตัวระหว่างค่าสัดส่วนระยะทางหรือ Scale distance และค่าของแรงสั่นสะเทือนในรูปแบบ PPV ในมาตราส่วน Log Scale แล้วนั้น ทำการหาค่า Regression Line ของชุดข้อมูลที่ได้ เขียนเส้นขนานกับเส้นดังกล่าวให้ครอบคลุม ชุดข้อมูลทั้งหมดหรือเรียกว่า Upper limit Line เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีชุดข้อมูลใดที่เกิดขึ้นสูงกว่าเส้น Upper Limit หาค่าความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการ เมื่อจุดตัดแกน y หรือค่า PPV แสดงค่า Log K จะต้องทำการแปลงให้เป็นค่า K ธรรมดา และค่าความชันของเส้น Upper limit แสดงค่า  $\beta$  จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการของ USBM ตามสมการ 2.23 เพื่อใช้เป็นสมการสำหรับการทำนายค่าพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนของพื้นที่ศึกษาต่อไป

### 3.8 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ FLAC2D เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขในการพังแบบบรณานแบบสถิต คือไม่มีแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิมแบบสถิต ขั้นตอนในการวิเคราะห์ โดยการจำลองรูปร่างทางเรขาคณิตของผนังบ่อเหมืองและรูปแบบของรอยไม่ต่อเนื่อง โดยใช้โปรแกรม FLAC2D ใส่ค่าพารามิเตอร์ตัวแปร

กำลังเดือนที่โปรแกรมต้องการลงไป ซึ่งรายละเอียดและวิธีการทำงานของโปรแกรมอยู่ที่ภาคผนวก ผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมจะนำเสนอในรูปแบบสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยของผนังบ่อเหมือง และทำการเปรียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมต่อไป ซึ่งวิธีการทำงานของโปรแกรมและขั้นตอนการใส่ค่าโปรแกรมดังแสดงในภาคผนวก ข



## บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปราย

### 4.1 การศึกษาและการเลือกระบุพื้นที่

จากการศึกษาและการเลือกระบุพื้นที่ที่สามารถบอกได้ว่า พื้นที่ศึกษาประกอบด้วยรอยความไม่ต่อเนื่อง 3 ชุด โดยใช้ทิศทางของมุมเทเป็นเกณฑ์ คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) ซึ่งมีมุมเทมากที่สุดเท่ากับ 90 องศา มุมเทน้อยสุดเท่ากับ 20 องศา มุมเทเฉลี่ยเท่ากับ 64 องศา และหลังจากการแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 12 โซน เท่ากัน ขนาดพื้นที่ 300 เมตร คูณ 300 เมตร สามารถระบุชุดของรอยไม่ต่อเนื่องในแต่ละโซนได้ดังนี้

สำหรับโซน A1, C1, D1, D2 และ D3 ไม่มีข้อมูล เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วงของการพัฒนาไม่สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้ ซึ่งสำหรับพื้นที่ที่สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้มีรายละเอียดดังนี้

โซน A2 ประกอบด้วย 3 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE)

โซน A3 ประกอบด้วย 3 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE)

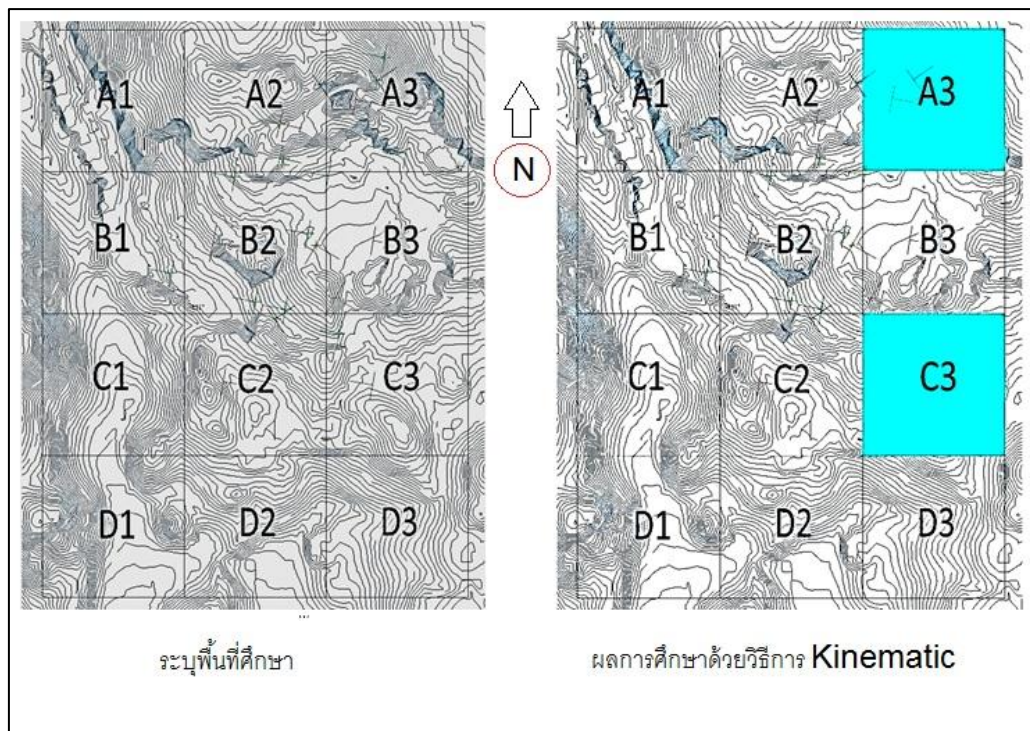
โซน B1 ประกอบด้วย 1 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW)

โซน B2 ประกอบด้วย 2 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE)

โซน B3 ประกอบด้วย 1 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE)

โซน C2 ประกอบด้วย 1 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE)

โซน C3 ประกอบด้วย 1 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW)



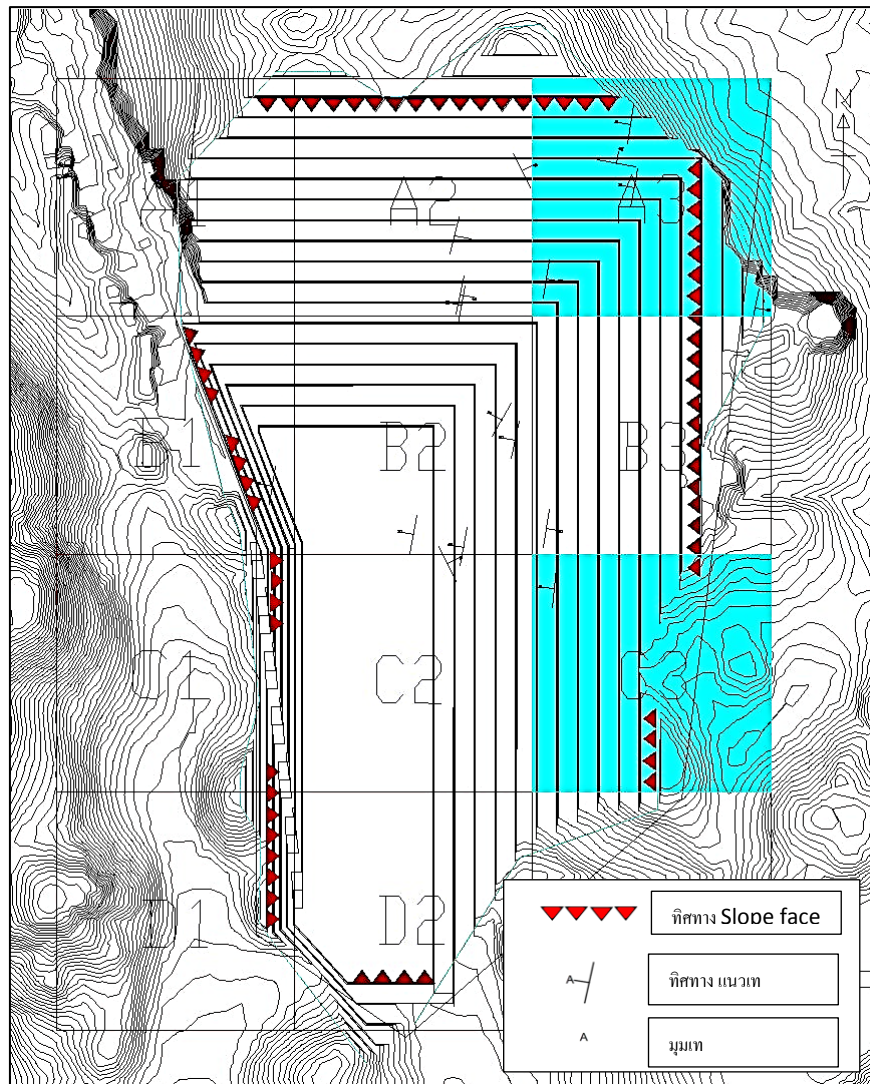
รูปที่ 4. 1 การแสดงการระบุพื้นที่ศึกษาและการคัดเลือกโซนที่มีโอกาสของการพัง

#### 4.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์

จากการทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ เพื่อหา Day lighting เปรียบเทียบระหว่างความชันของผนังบ่อเหมือง ที่ความชัน 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 องศา และมุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่องในหลายๆโซนนั้นจากรูปที่ 4.1 ผลที่ได้คือ ในโซน A3 ซึ่งมีหน้าความลาด (Slope face) ไปทางทิศใต้ (South) และ ทิศตะวันตก (West) ประกอบด้วย 3 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) และ โซน C3 ซึ่งมีหน้าความลาด (Slope face) ไปทางทิศตะวันตก (West) ประกอบด้วย 1 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) รายละเอียดตามรูปที่ 4.2 รายละเอียดของโซนที่พบว่ามีโอกาสของการพังแสดงตามตาราง 4.1

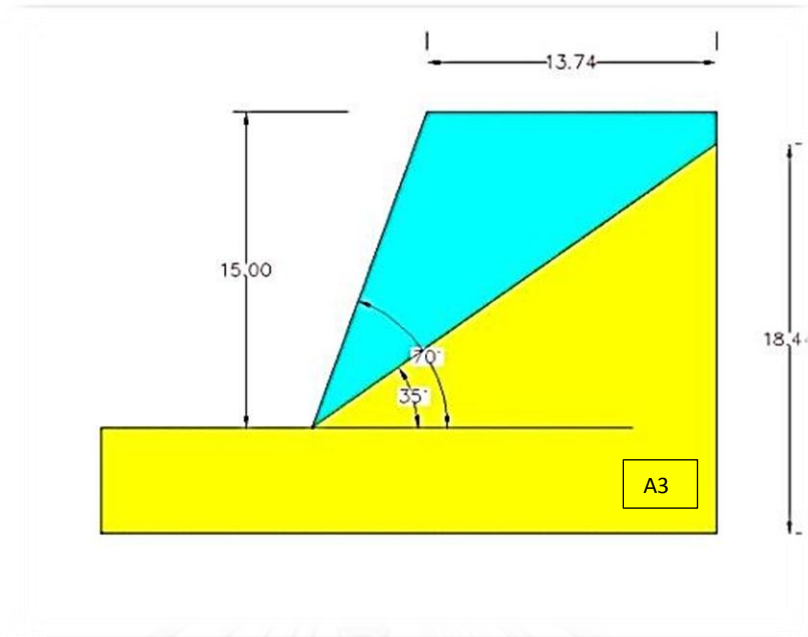
ตารางที่ 4. 1 แสดงชุดของรอยไม่ต่อเนื่องในแต่ละโซนที่พบว่ามีโอกาสต่อเสถียรภาพผนังบ่อเหมือง

Zone	Dip Direction	Dip Angle	Dip Direction
A3	NE	85	12
	NW	35	280
	SE	84	100
C3	NW	40	276

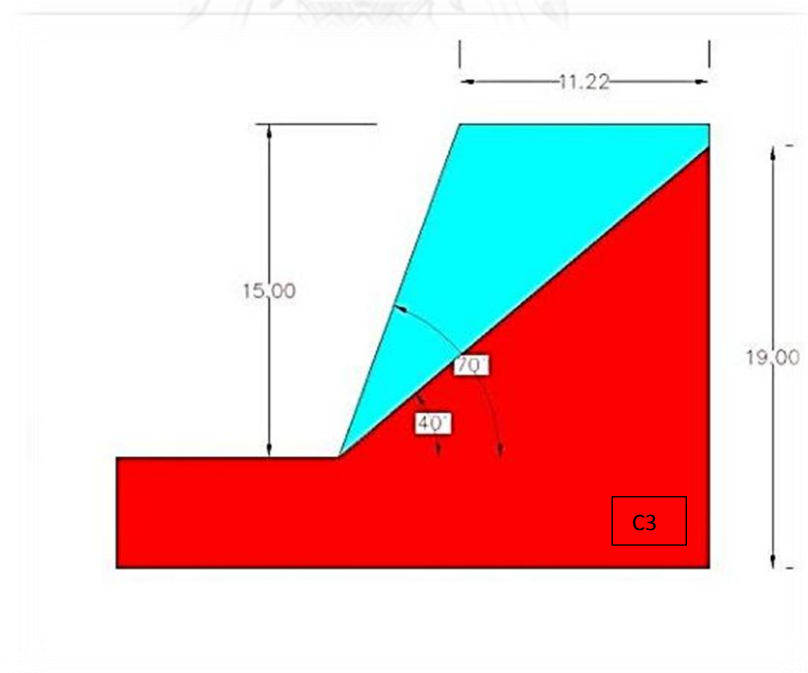


รูปที่ 4. 2 การแสดงรายละเอียดของโซนที่พบว่ามีโอกาสของการพัง

จากการทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Day-lighting โซน A3 มีรอยความไม่ต่อเนื่องที่มีโอกาสของการพังแบบระนาบเกิดขึ้น มุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่องเท่ากับ 35 องศา โซน C3 มีรอยความไม่ต่อเนื่องที่มีโอกาสของการพังแบบระนาบ ซึ่งมีมุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่อง เท่ากับ 40 องศา ลักษณะรูปทรงจำลองทางเรขาคณิตสามารถจำลองได้ตามรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4. 3 การแสดงลักษณะรูปทรงจำลองทางเรขาคณิตของโซน A3 ซึ่งมีโอกาสของการพังและลักษณะของรอยไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏ



รูปที่ 4. 4 การแสดงลักษณะรูปทรงจำลองทางเรขาคณิตของโซน C3 ซึ่งมีโอกาสของการพังและลักษณะของรอยไม่ต่อเนื่องที่ปรากฏ



### 4.3 การสำรวจและทดสอบภาคสนาม

จากการทดสอบและสำรวจภาคสนาม สามารถเก็บรวบรวมข้อมูล โครงสร้างทางธรณีวิทยา ทิศทางการวางตัวของรอยไม่ มุมเท สภาพของรอยไม่ต่อเนื่อง ระยะห่างของรอยแตก วัสดุภายในรอยแตก เพื่อศึกษาตัวแปรและพฤติกรรมของรอยความไม่ต่อเนื่อง ทำ Rock Mass Classifications รายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 4. 2 แสดงผล Rock mass classification ที่ได้จากการทำ Field Estimation

Classification parameters and their ratings						
1	UCS of intact rock	>250MPa	100-250MPa	50-100MPa	25-50MPa	<25MPa
	Rating	10	5	2	1	0
2	RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25% or weathered
	Rating	20	17	14	8	3
3	Spacing of joint	>3m	1-3m	0.3-1m	50-300mm	<50mm
	Rating	30	25	20	10	5
4	strike and dip orientations of joint	very favorable	favorable	fair	unfavorable	very unfavorable
	Rating	15	13	10	6	3
5	Condition of joint	verytight:separation<0.1mm not continuous	tight:<1mm and continuous no gouge	open:1-5mm continuous Gouge<5mm	open>5mm continuous Gouge>5mm	
	Rating	15	10	5	0	
6	Ground water inflow	None	<25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min	
	Rating	10	8	5	2	
sum						72

Class No.	I	II	III	IV	V
Description of Class	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor
Total rating	100-90	90-70	70-50	50-25	<25

คือค่าของ RMR ที่ได้ในแต่ละช่องของการสำรวจภาคสนาม และผลการประเมิน

#### 4.3.1 สัมประสิทธิ์ความขรุขระ

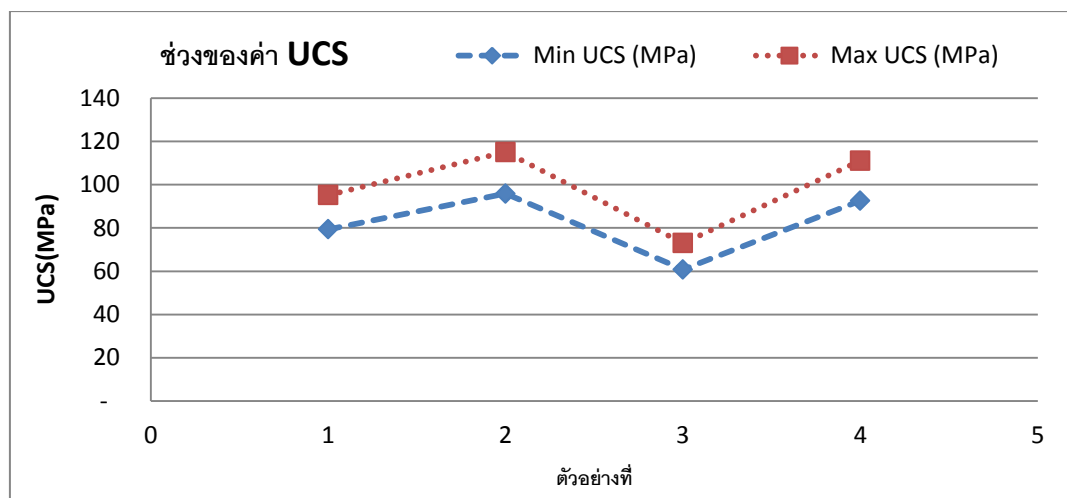
จากการสำรวจและทดสอบภาคสนาม สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระได้โดยตรงจากวิธีการวัดค่าตามวิธีการของ Barton และ Choubey (1977) ผลจากการสำรวจและทดสอบภาคสนามที่ได้จากการวัดค่าความขรุขระในสนามในหลาย ๆ จุด จากการเทียบตามมาตรฐานของ Barton และ Choubey (1977) เราสามารถสรุปได้ว่าค่าความขรุขระอยู่ในช่วง 6-8

#### 4.3.2 ความเค้นฉากประสิทธิผล

ในงานวิจัยนี้ใช้การประเมินความเค้นฉากประสิทธิผลตามวิธีการของ Hoek and Bray (1981) ค่าของความเค้นฉากประสิทธิผลจากการสำรวจและทดสอบภาคสนาม สามารถหาได้จากสมการ 3.2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า JCS โดยที่ค่า JCS หรือค่ากำลังอัดที่ผนังรอยแยก สามารถหาได้จากการทดสอบกำลังกดจุด (Point Load Test) เพื่อหาค่า Uniaxial Compressive Strength (UCS) ที่ได้เป็นค่าการทดสอบทางอ้อม สามารถแสดงได้ดังตาราง 4.3 เราเลือกค่า UCS เฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของค่า JCS

ตารางที่ 4. 3 แสดงค่า UCS ของ JCS ที่ได้จากการทดสอบกำลังกดจุด

No.	Point Load (MPa)	UCS (MPa)	
		K Min	K Max
		20	24
1	3.97	79	95
2	4.79	96	115
3	3.04	61	73
4	4.63	93	111
<b>Average</b>	<b>4.11</b>	<b>82</b>	<b>99</b>



รูปที่ 4.5 การแสดงช่วงของค่า UCS ที่ได้จากการทดสอบ Point Load Index Test

#### 4.3.3 ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น

สำหรับวิธีการหาค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น  $\phi_b$  โดยทั่วไปสามารถหาได้จากการทดสอบ Direct shear test หรือ Tilt tests ค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของหินและสถานะความชื้น ในงานวิจัยนี้เป็นการสำรวจและทดสอบภาคสนาม จากหลายๆงานวิจัยได้เสนอค่ามุมเสียดทานหรือมุมเสียดทานเบื้องต้น สำหรับหินปูน จากตารางที่ 3.2 ได้ค่าที่ต่ำที่สุดคือ 34 องศา และค่ามากที่สุดคือ 42 องศา เนื่องจากการศึกษาไม่ได้เป็นการทดสอบโดยตรง จะเลือกใช้ค่าในช่วงดังกล่าวในการหาค่าตัวแปรกำลังเฉือน โดยเลือกใช้ค่าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีผลต่อกำลังเฉือนของรอยแยกมากที่สุดคือ 34 องศาในการประเมินค่าตัวแปรกำลังเฉือน

#### 4.3.4 กำลังเฉือนของรอยแยก

เนื่องจากค่าของกำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่อง สามารถคำนวณได้จากค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของรอยแยก และค่ากำลังอัดแกนเดียว จากความสัมพันธ์ของ Barton (1973) สามารถหาค่าพฤติกรรมของรอยแยกของหินได้จากสมการ 3.1

จากการศึกษาและรวบรวมตัวแปรต่าง ๆ จากการสำรวจภาคสนาม สามารถสรุปเป็นค่าต่าง ๆ และสามารถคำนวณหาค่าของกำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่องได้ตามตาราง 4.4 ค่ากำลังเฉือนของรอยไม่ต่อเนื่องที่ได้จะเป็นค่าของช่วงต่ำสุดและค่าสูงสุด สำหรับค่าที่เราใช้นั้นจะเป็นค่าช่วงต่ำ เนื่องจากมีผลต่อความต้านทานต่อการเฉือนมากกว่าค่าสูงสุด

### 4.3.5 สัมประสิทธิ์การยึดเกาะ

ความสัมพันธ์ของค่ามุมเสียดทานเบื้องต้น ค่ากำลังเฉือนสูงสุด ค่าความเค้นฉาก สามารถประเมินได้จากการศึกษาของ Coulomb criterion โดยอาศัยสมการ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่ได้จะเป็นค่าของช่วงต่ำสุดและค่าสูงสุด เนื่องจากมีผลต่อความต้านทานต่อการเฉือนมากกว่าค่าสูงสุด จากการคำนวณสามารถหาค่าและแสดงได้ดังตาราง 4.4

จากการทดสอบภาคสนาม สามารถบอกได้ว่าจากการจำแนกลักษณะของมวลหิน ค่ากำลังกวดจุดอยู่ในช่วง 4 ถึง 10 เมกะพาสคาล ค่ากำลังอัดแกนเดียวที่หาได้จากการคำนวณโดยอาศัยการทดสอบกำลังกวดจุด เท่ากับ 82 ถึง 99 เมกะพาสคาล ระยะห่างระหว่างรอยแตกในช่วง 1 ถึง 3 เมตร ค่าทิศทางการวางตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ สภาวะของรอยแตกมีวัสดุภายในความหนาประมาณ 1 ถึง 5 มิลลิเมตร และไม่มีน้ำใต้ดิน ค่า Rating RMR ที่ 72 คะแนน จากตาราง 4.2 และค่าตัวแปรกำลังเฉือนที่สามารถคำนวณได้ดังแสดงในตาราง 4.4

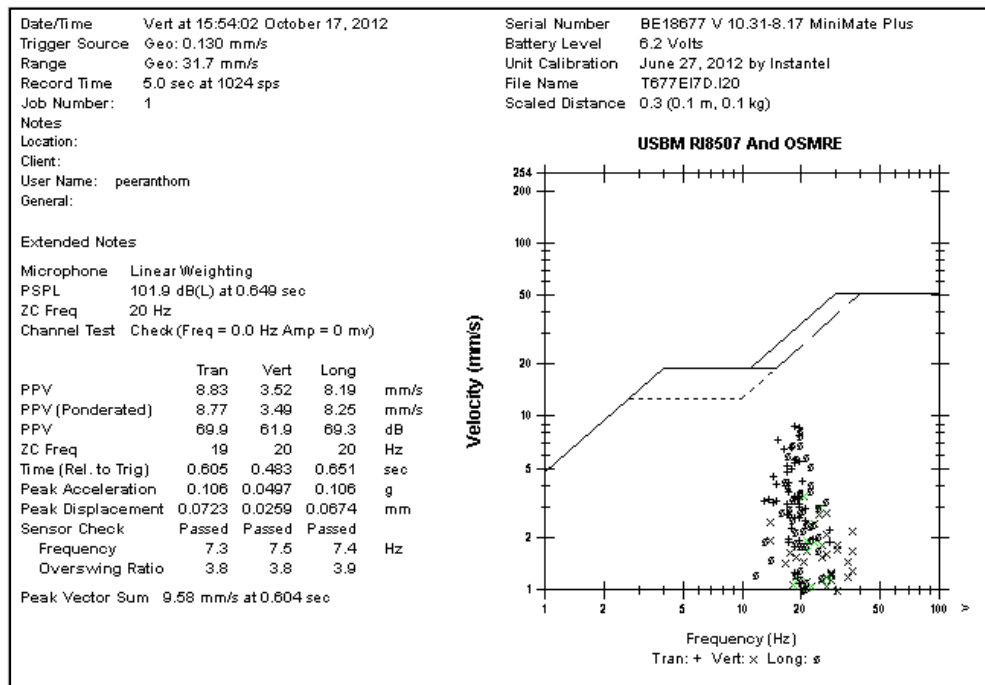
ตารางที่ 4. 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การยึดเกาะที่ได้จากการคำนวณจากการทดสอบภาคสนาม

Field Estimation Parameter	Min	Max
$\phi_b$ (degree)	34	42
JRC	6	8
$\sigma_n$ (kPa)	821	29,574
JCS (kPa)	82,149	98,579
JCS/ $\sigma_n$	3	120
Shear Strength (kPa)	611	48,510
Cohesion (kPa)	57	21,881

### 4.4 แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด

จากผลการวัดค่าแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดและบันทึกผลในรูปแบบของ USBM Standard Chart สามารถสรุปความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของคลื่นสั่นสะเทือนบริเวณพื้นที่ศึกษาได้แสดงตามรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของความถี่ (Hz) และความถี่อนุภาคสูงสุด (PPV) ในหน่วย

มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ข้อมูลความเร่งอนุภาคสูงสุด และการเคลื่อนที่ของอนุภาคสูงสุด ถูกบันทึกและแสดงได้ตามตาราง 4.5



รูปที่ 4. 6 การแสดงผลการวิเคราะห์หัตถ์แรงสั่นสะเทือนด้วยมาตรฐาน USBM

ตารางที่ 4. 5 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วอนุภาคสูงสุด (PPV) ความเร่งอนุภาคสูงสุด และการเคลื่อนที่ของอนุภาคสูงสุด

Monitoring Data	Tran	Vertical	Long	Unit
PPV	8.83	3.52	8.19	mm/s
Peak Acceleration	0.106	0.0497	0.106	g
Peak Displacement	0.072	0.026	0.067	mm

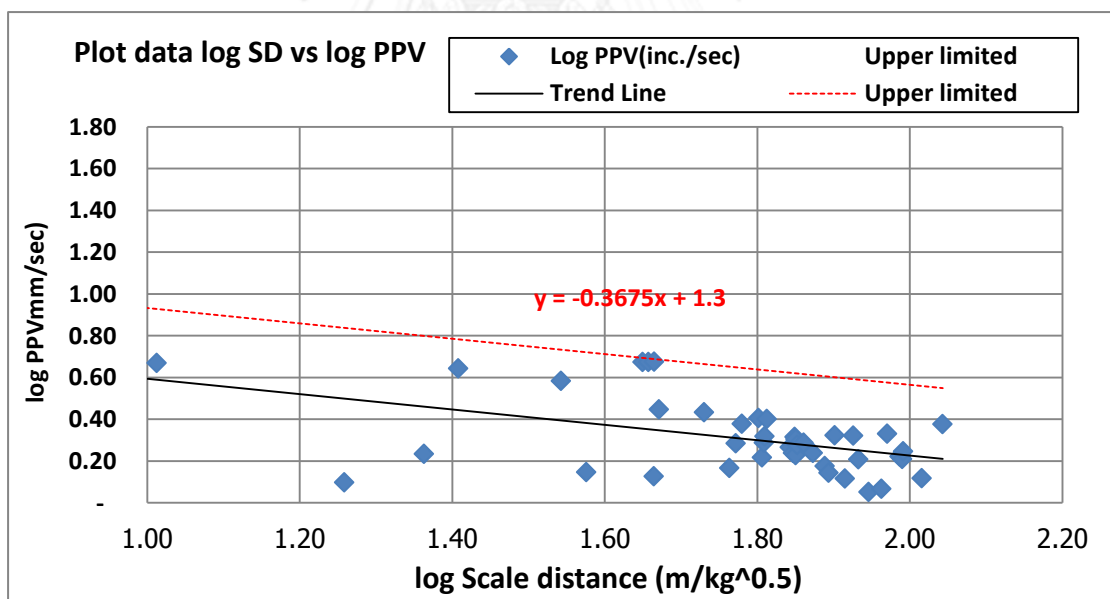
หลังจากการระเบิดแต่ละครั้งได้มีการบันทึกและเก็บรวบรวมผลของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ซึ่งคลื่นสั่นถูกวัดและบันทึกในรูปแบบของความเร็วอนุภาคสูงสุด หรือ PPV ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นความเร็วสูงสุดซึ่งอนุภาคของพื้นดินเคลื่อนที่ ความสัมพันธ์ของความเร่งของอนุภาคสูงสุด (g) ถูกนิยามว่าอัตราเร็วซึ่งอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว จากการรวบรวมเก็บข้อมูลสามารถประเมินค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุด หรือ PPV และความเร่ง (g) สำหรับพื้นที่ศึกษาดังกล่าวได้ดังสมการ

$$1 \text{ mm/sec} = 0.012 \text{ g} \quad (4.1)$$

จากสมการของ USBM ที่ใช้ในการทำนายค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด หรือ PPV ซึ่งสามารถเขียนได้จากสมการ 2.24

$$PPV = K \left( \frac{D}{W^{0.5}} \right)^{-\beta}$$

การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคสูงสุด หรือ PPV และค่าสัดส่วนระยะทาง หรือ Scale distance โดยวิธีการ Regression Analysis โดยอาศัยคู่ของข้อมูลในแต่ละช่วงของปริมาณวัตถุระเบิดมากที่สุด ที่มีการใช้ในพื้นที่ศึกษา นำมาเขียนกราฟในมาตราส่วน ล็อก ค่า K,  $\beta$  สามารถหาได้จากการทำ Regression Analysis ดังกล่าว โดยขีดเส้นกราฟเป็นเส้นตรงเฉลี่ยของจุดต่างๆทุกจุด จากนั้นขีดเส้นตรงอีกเส้นหนึ่งขนานกับเส้นเฉลี่ยให้สูงกว่าข้อมูลทั้งหมดซึ่งเรียกว่า Upper Limit เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีจุดใดอยู่เหนือเส้นกราฟดังกล่าว จากนั้นเราสามารถประเมินค่าความสัมพันธ์จากการระเบิดได้โดยที่จุดตัดแกน Y ของเส้นขอบบนสุด Upper Limit ดังกล่าว จะให้ค่า Log K และความชันของเส้นขอบบนสุดของ Upper Limit จะให้ค่า  $\beta$  ดังแสดงตามรูปที่ 4.7



รูปที่ 4. 7 การแสดงการสร้าง Regression Line สำหรับความสัมพันธ์ของ Scale Distance และ PPV

จากการทำ Simple linear regression และ Curve fitting ค่าคงที่ต่าง ๆ สำหรับสมการของความเร็วอนุภาคสูงสุด หรือ PPV สามารถที่จะเป็นตัวแทนของพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดของพื้นที่ศึกษาได้ ซึ่งพฤติกรรมของการระเบิดของพื้นที่ศึกษาดังกล่าวสามารถอธิบายโดย

อาศัยสมการของ USBM ที่เป็นผลจากสหสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังกล่าว สามารถแสดงเป็นสมการที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมของการระเบิดของพื้นที่ศึกษาดังกล่าวได้ดังนี้

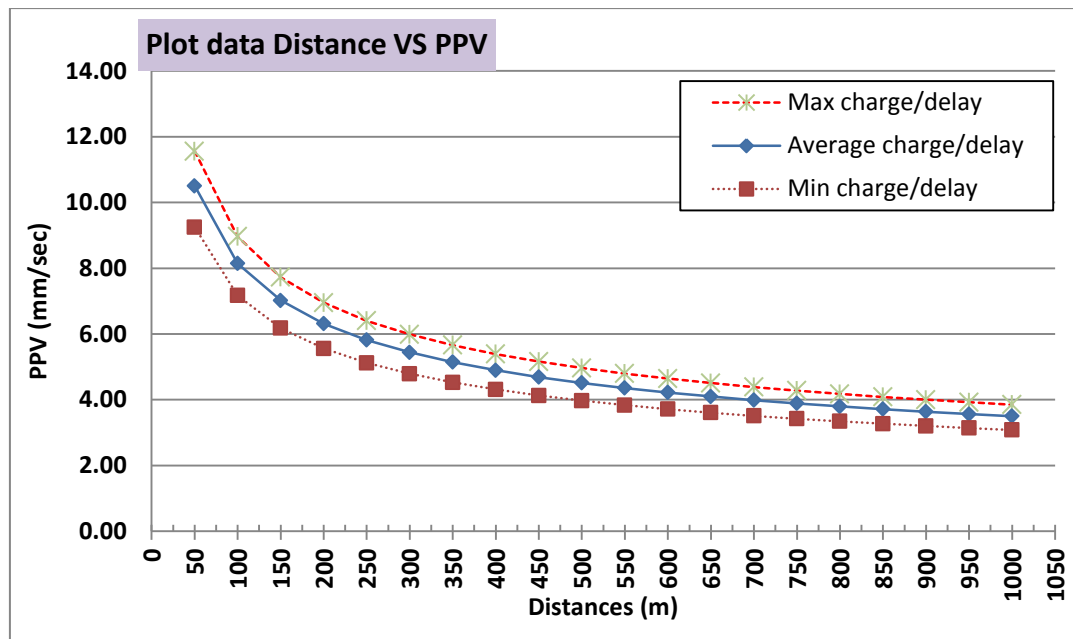
ตารางที่ 4. 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทำ Curve fitting ซึ่งเป็นตัวแทนของพฤติกรรมของการระเบิดของพื้นที่ศึกษา

Log K	K (Rock energy Transfer coefficient)	$\beta$ (specific geological constant)	Predictor equations
1.3	19.95	-0.367	$PPV = 19.95 \left( \frac{D}{W^{0.5}} \right)^{-0.367}$

จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากจุดตรวจวัดและค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด หรือ PPV ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ดังนี้

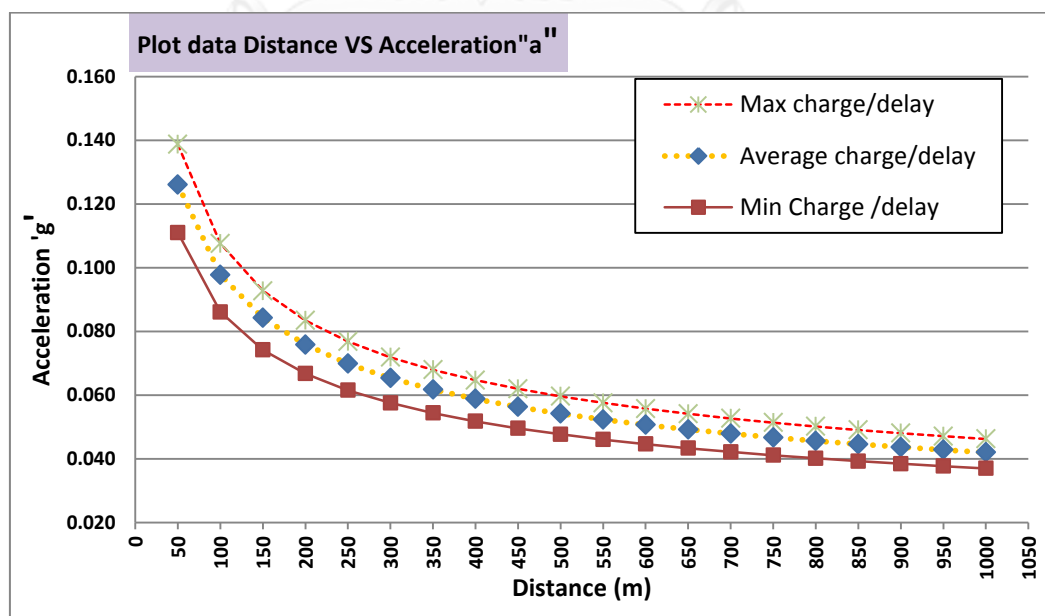
$$PPV = 19.95 \left( \frac{D}{W^{0.5}} \right)^{-0.367} \quad (4.2)$$

เมื่อนำค่าระหว่างระยะทางที่ระยะต่าง ๆ (R) ของจุดตรวจวัดแทนค่าลงในสมการ พร้อมทั้งเลือกใช้ค่าปริมาณวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจันทะถ่วง (W) จากพื้นที่ศึกษา โดยการกำหนดปริมาณวัตถุระเบิดที่ใช้คงที่เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วอนุภาคสูงสุด กับระยะทางต่างๆ โดยเริ่มจากระยะทางใกล้สุดที่ 50 เมตร ผลที่ได้คือเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดหรือ PPV ที่แต่ละระยะทางที่เพิ่มขึ้นมีค่าลดลง และจะมีลักษณะคงที่เมื่อระยะทางเริ่มไกลขึ้น และค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดหรือ PPV จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงระยะทางค่าหนึ่ง นั่นหมายความว่า ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดหรือ PPV จะไม่มีผลต่อสิ่งปลูกสร้าง เนื่องจากระยะทางไกลมาก เมื่อนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าระยะทางกับค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดหรือ PPV จะแสดงได้ตามรูปที่ 4.8



รูปที่ 4. 8 การแสดงพฤติกรรมของระยะทางกับความความเร็วอนุภาคสูงสุด PPV

จากรูปที่นิยามความเร็วอนุภาคสูงสุดหรือ PPV คือค่าความเร็วสูงสุดที่อนุภาคผิวดินมีการเคลื่อนที่ เมื่อแปลงค่าความเร็วดังกล่าวให้อยู่ในรูปของความเร่ง  $\alpha$  ซึ่งเป็นอัตราเร็วที่อนุภาคสูงสุดที่ผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความเร่งสามารถเทียบได้ตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4. 9 การแสดงพฤติกรรมของระยะทางกับอัตราเร่งอนุภาคสูงสุด



จากข้อมูลเบื้องต้น โดยทั่วไปพื้นที่ศึกษามีการใช้ขนาดรูเจาะขนาด 5 นิ้วสำหรับหลุมระเบิดที่ความสูงของชั้นบันได 15 เมตร น้ำหนักของวัตถุระเบิดที่ใช้อยู่ในช่วง 120 ถึง 130 กิโลกรัม ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการออกแบบระเบิดแต่ละครั้ง สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง ในหน่วยกิโลกรัมและความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  สำหรับแต่ละช่วงของระยะทางสามารถแสดงได้ตามตาราง 4.8 นั่นคือเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นค่าความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  จะมีค่าลดลง และมีลักษณะคงที่เมื่อระยะทางเริ่มไกลขึ้น และค่าความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงระยะทางค่าหนึ่ง นั้นหมายความว่าค่าความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  จะไม่มีผลต่อสิ่งปลูกสร้างแล้วเนื่องจากระยะทางไกลมาก ผลแสดงได้ตามตาราง 4.8



ตารางที่ 4. 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง ปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวัดว่าง  
และค่าความเร่งของอนุภาค

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากพื้นที่สนใจและความเร่ง g			
Distance	ช่วงน้ำหนักของวัตถุระเบิดต่อจังหวัดว่าง		
	Min	Average	Max
(m)	<40 (kg)	70-80 (kg)	120-130 (kg)
50	0.111	0.126	0.139
100	0.086	0.098	0.108
150	0.074	0.084	0.093
200	0.067	0.076	0.083
250	0.061	0.070	0.077
300	0.057	0.065	0.072
350	0.054	0.062	0.068
400	0.052	0.059	0.065
450	0.050	0.056	0.062
500	0.048	0.054	0.060
550	0.046	0.052	0.058
600	0.045	0.051	0.056
650	0.043	0.049	0.054
700	0.042	0.048	0.053
750	0.041	0.047	0.051
800	0.040	0.046	0.050
850	0.039	0.045	0.049
900	0.038	0.044	0.048
950	0.038	0.043	0.047
1000	0.037	0.042	0.046

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ของปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง ในหน่วยกิโลกรัม และความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  ในแต่ละช่วงจะมีความสัมพันธ์กับระยะทางที่ทำการศึกษาซึ่งเริ่มจาก 50 เมตร ถึง 1,000 เมตร จากปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง ที่ใช้อยู่ในช่วง 120 ถึง 130 กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณวัตถุระเบิดสูงสุดที่ใช้ต่อจังหวะถ่วง ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้ค่าความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  เท่ากับ 0.139g ที่ 50 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่ใกล้ที่สุดสำหรับการศึกษาดังนั้นจะเลือกใช้ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 0.139g เป็นค่าสำหรับการศึกษาเสถียรภาพของการพังเนื่องจากเป็นค่า  $\alpha$  ที่มากที่สุดซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพมากที่สุด

#### 4.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุล

จากการทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 และ 70 องศา ในทุก ๆ โชน ผลที่ได้คือ ในโชน A3 ซึ่งมีมุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่องเท่ากับ 35 องศา และ โชน C3 ซึ่งมีมุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่องเท่ากับ 40 องศา มีรอยความไม่ต่อเนื่องที่ทำให้เกิดโอกาสของการพังแบบระนาบเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

จากการศึกษาสามารถสรุปเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุลสำหรับในแต่ละโชนสามารถจำแนกออกเป็นรายละเอียดและตัวแปรต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ ตามแสดงในตาราง 4.8 และ 4.9 โดยมีรูปร่างจำลองทางเรขาคณิตตามรูปที่ 4.10 และ 4.11

#### ตารางที่ 4. 8 แสดงตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโชน A3

ตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโชน A3						
Slope Face	Slope Plane	Area	Cohesion	Unit Weight	Friction Angle	Acceleration
(Degree)	(Degree)	(Sq m)	(kPa)	(Tons/cu m)	$\phi$ (Degree)	(g)
40	35	23.44	57	2.50	34	0.139
45	35	23.44	57	2.50	34	0.139
50	35	23.44	57	2.50	34	0.139
55	35	23.44	57	2.50	34	0.139
60	35	23.44	57	2.50	34	0.139
65	35	23.44	57	2.50	34	0.139
70	35	23.44	57	2.50	34	0.139

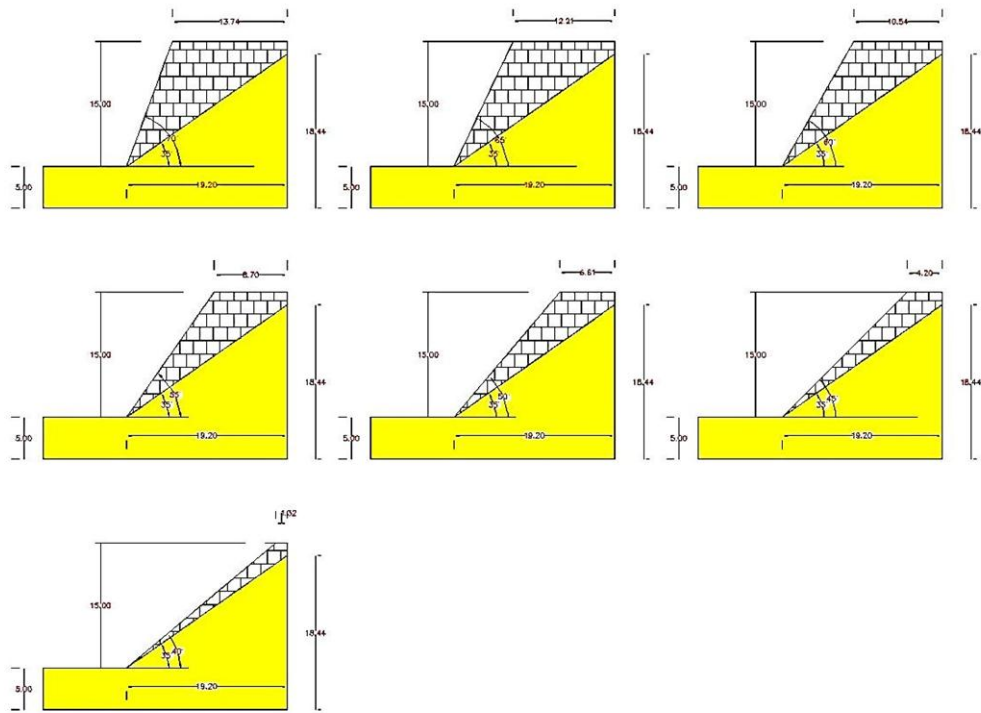
ตารางที่ 4. 9 แสดงตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโซน C3

ตัวแปรที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพโซน C3						
Slope Face	Slope Plane	Area	Cohesion	Unit Weight	Friction Angle	Acceleration
(Degree)	(Degree)	(Sq m)	(kPa)	(Tons/cu m)	$\phi$ (Degree)	(g)
45	40	20.97	57	2.50	34	0.139
50	40	39.07	57	2.50	34	0.139
55	40	54.70	57	2.50	34	0.139
60	40	68.52	57	2.50	34	0.139
65	40	81.01	57	2.50	34	0.139
70	40	92.53	57	2.50	34	0.139

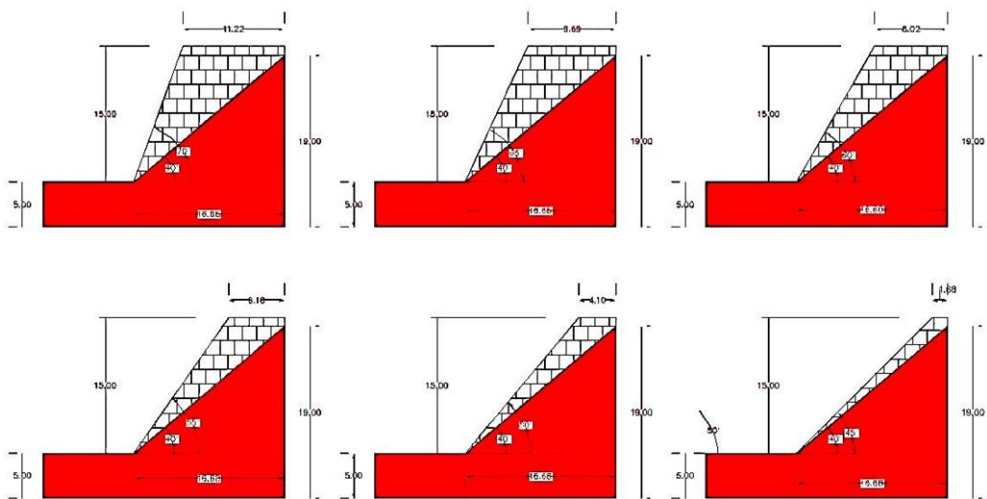
#### 4.5.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุลสถิต

วิธีการขีดจำกัดสมดุลสถิต ถูกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในแต่ละโซนดังกล่าว สำหรับการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบระนาบกรณีไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง (Non-Vibration) ใช้สมการ 2.1 ในการคำนวณ

ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงเป็นดังนี้คือ โซน A3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย เท่ากับ 5.12 ที่ความลาดเอียง 40 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุด เท่ากับ 1.77 ที่ ความลาดเอียง 70 องศา ตามลำดับ และสำหรับโซน C3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย เท่ากับ 4.56 ที่ความลาดเอียง 45 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุด เท่ากับ 1.66 ที่ ความลาดเอียง 70 องศา ตามลำดับ ในสภาวะปราศจากน้ำใต้ดิน รายละเอียดดังแสดงตามตาราง 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4. 10 การแสดงรูปแบบจำลองทางเรขาคณิตของโซน A3



รูปที่ 4. 11 การแสดงรูปแบบจำลองทางเรขาคณิตของโซน C3

#### 4.5.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static

กรณีมีแรงสั่นสะเทือน (Vibration) เข้ามาเกี่ยวข้อง ได้ค่าความเร่งของแรงสั่นสะเทือน  $\alpha$  เท่ากับ 0.139 g ที่ระยะทาง 50 เมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่ใกล้ที่สุดสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ และใช้สมการ 2.2 ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยแบบบรรณาบซึ่งมีตัวสัมประสิทธิ์  $\alpha$  ซึ่งเป็นตัวแทนของค่าความเร่งของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง

หลังจากมีผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดขนาดเท่ากับ 0.139 g เกิดขึ้น โชน A3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย เท่ากับ 4.19 ที่ความลาดเอียง 40 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุดเท่ากับ 1.40 ที่ ความลาดเอียง 70 องศา โดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยลดลงคิดเป็น 18.09 เปอร์เซ็นต์ และ 20.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสำหรับโชน C3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย เท่ากับ 3.83 ที่ความลาดเอียง 45 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุด เท่ากับ 1.34 ที่ ความลาดเอียง 70 องศาโดยค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยลดลงคิดเป็น 15.97 เปอร์เซ็นต์ และ 19.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รายละเอียดดังแสดงตามตาราง 4.10 และ 4.11 ผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับโชนที่มีโอกาสของการพังคือ A3 และ C3 ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุล สามารถแสดงได้ตามตาราง 4.10 และ 4.11 ดังนี้

ตารางที่ 4. 10 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยโชนA3

Slope Angle (Degree)		Acceleration	Factor of Safety A3		
Slope Face	Slope Plane		Non- Vibration	Vibration	Dif.%
$(\Psi_f)$	$(\Psi_p)$	(g)	Limit Eq.	Limit Eq.	
40	35	0.139	5.12	4.19	18.09
45	35	0.139	3.21	2.60	19.00
50	35	0.139	2.44	1.95	19.77
55	35	0.139	2.15	1.71	20.20
60	35	0.139	1.97	1.57	20.53
65	35	0.139	1.86	1.47	20.78
70	35	0.139	1.77	1.40	20.99
Average					<u>19.91</u>

ตารางที่ 4. 11 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยโซน C3

Slope Angle (Degree)		Acceleration	Factor of Safety C3		
Slope Face	Slope Plane		Non- Vibration	Vibration	Dif.%
$(\Psi_f)$	$(\Psi_p)$	(g)	Limit Eq.	Limit Eq.	
45	40	0.139	4.56	3.83	15.97
50	40	0.139	2.82	2.34	17.06
55	40	0.139	2.24	1.85	17.80
60	40	0.139	1.95	1.60	18.33
65	40	0.139	1.78	1.44	18.74
70	40	0.139	1.66	1.34	19.07
Average					<u>17.83</u>

#### 4.6 การออกแบบผนังบ่อเหมือง

##### 4.6.1 การออกแบบความชันของผนังบ่อเหมือง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุลสถิตและวิธีขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static สามารถบอกได้ว่าหลังจากมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเกิดขึ้นแล้ว ทำให้ค่าความมีเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองลดลง จากเกณฑ์การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงกำหนดซึ่งกำหนดไว้ในรูปแบบดัชนีตัวเลขที่เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยนั้น โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 1.0 แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยอยู่ในช่วงสมดุลพอดี หากมีค่ามากกว่า 1.0 แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยอยู่ในช่วงสมดุล มีเสถียรภาพ และหากมีค่าน้อยกว่า 1.0 แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยอยู่ในขาดสมดุล ไม่มีเสถียรภาพ นั่นคือสามารถนำเกณฑ์ดังกล่าวไปออกแบบผนังบ่อเหมืองได้

จากรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงลักษณะทิศทางของผนังบ่อเหมือง ขอบเขต และลักษณะของรอยความไม่ต่อเนื่องในแต่ละโซน กระจายกัน โดยมีชุดของรอยความไม่ต่อเนื่องหลักอยู่ 3 รายละเอียดคือ NE, NW และ SE โซน A1, B1, C1 และ D1 อยู่บริเวณขอบผนังบ่อเหมืองทางทิศตะวันตก A2, B2, C2 และ D2 ครอบคลุมบริเวณผนังบ่อเหมืองทางด้านทิศเหนือ ทิศใต้ และพื้นบ่อเหมือง ส่วน A3, B3, C3 และ D3 ครอบคลุมบริเวณผนังบ่อเหมืองทางด้านทิศตะวันออก สำหรับโซน A1, C1, D1, D2 และ

D3 ไม่มีข้อมูล เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วงของการพัฒนาไม่สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้ ซึ่งสำหรับพื้นที่ที่สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลได้ และหลังจากการทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ เพื่อหา Day lighting เปรียบเทียบระหว่างความชื้นของผนังบ่อเหมือง ที่ความชื้น 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 องศา และมุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่องในทุกๆโซนนั้น ผลที่ได้คือ โซน A3 และ โซน C3 ซึ่งครอบคลุมบริเวณผนังบ่อเหมืองทางด้านทิศตะวันออก พบว่ามีโอกาสของการพังแบบ ระบายเกิดขึ้น จากข้อมูลตามตารางที่ 4.11 พบว่าสำหรับโซน A3 ทุกค่าความชื้นของผนังบ่อเหมือง กรณีไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุดที่ 1.77 ที่ความชื้นของผนังบ่อเหมือง 70 องศา ซึ่งหมายถึงว่าผนังบ่อเหมืองมีเสถียรภาพ และหลังจากมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง พบว่าที่ค่าความชื้นของผนังบ่อเหมืองตั้งแต่ 40 องศา ถึง 70 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยลดลงเฉลี่ย 19.91 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดเท่ากับ 1.40 ที่ความชื้นของผนังบ่อเหมือง 70 องศา นั่นคือผนังบ่อเหมืองบริเวณดังกล่าวมีเสถียรภาพ และ จากข้อมูลตามตารางที่ 4.12 พบว่าสำหรับโซน C3 กรณีไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้องนั้น พบว่าที่ค่าความชื้นของผนังบ่อเหมืองมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุดที่ 1.66 ที่ความชื้นของผนังบ่อเหมือง 70 องศา ซึ่งหมายถึงว่าผนังบ่อเหมืองมีเสถียรภาพ และหลังจากมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง พบว่าที่ค่าความชื้นของผนังบ่อเหมืองตั้งแต่ 45 องศา ถึง 70 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยลดลงเฉลี่ย 17.83 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดเท่ากับ 1.34 ที่ความชื้นของผนังบ่อเหมือง 70 องศา นั่นคือผนังบ่อเหมืองบริเวณดังกล่าวมีเสถียรภาพ

ดังนั้นในการออกแบบผนังบ่อเหมืองทางทิศทางทิศเหนือ โซน A2 ประกอบด้วย 3 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW) และทิศตะวันออกเฉียงใต้ (SE) และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ พบว่าไม่มีโอกาสการพังแบบระบาย สามารถกำหนดความชื้นของผนังบ่อเหมืองให้มีค่าความชื้น 70-80 องศา

การออกแบบผนังบ่อเหมืองทางทิศทางทิศตะวันออกสามารถกำหนดความชื้นของผนังบ่อเหมืองให้มีค่าความชื้น 70-80 องศา

การออกแบบผนังบ่อเหมืองทางทิศทางทิศใต้ จากโซน D2 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ผนังบ่อเหมืองทางทิศทางทิศใต้เนื่องจากไม่ข้อมูลทางโครงสร้างธรณีวิทยา แต่เนื่องจากความสูงของพื้นที่กับระยะขอบเขต และระดับบ่อเหมืองสุดท้ายมีความสูงไม่มาก ประมาณ 30 เมตร สามารถออกแบบให้มี ความชื้นมากได้

การออกแบบผนังบ่อเหมืองทางทิศทางทิศตะวันตก จากโซน B1 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ผนังบ่อเหมืองทางทิศทางทิศตะวันตก ประกอบด้วย 1 ชุดรอยไม่ต่อเนื่อง คือ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (NW)



และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ พบว่าไม่มีโอกาสการพังแบบระนาบ สามารถกำหนดความชันของผนังบ่อเหมืองให้มีค่าความชัน 70-80 องศา

#### 4.6.2 การออกแบบการระเบิด

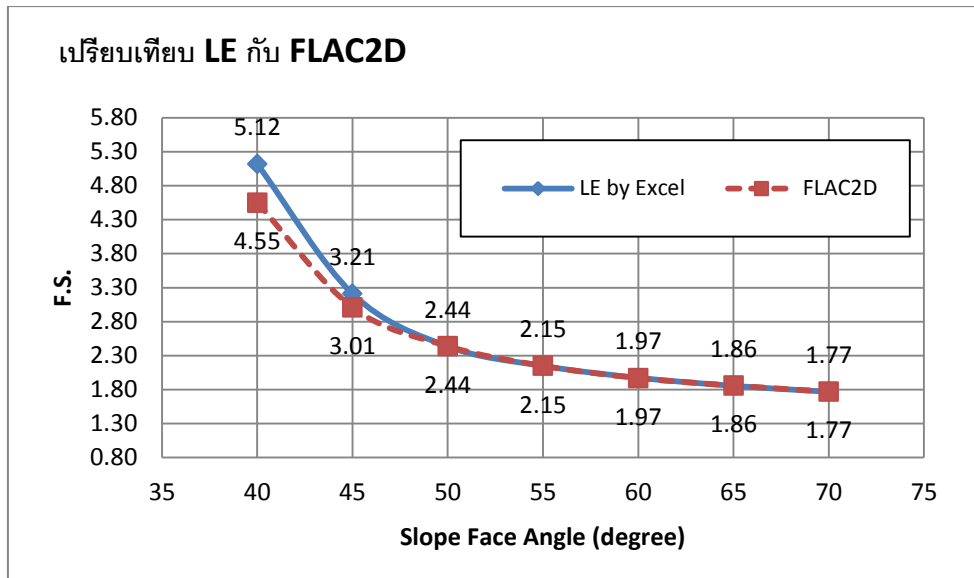
จากข้อมูลเบื้องต้น โดยทั่วไปพื้นที่ศึกษามีการใช้ขนาดรูเจาะขนาด 5 นิ้วสำหรับหลุมระเบิดที่ความสูงของชั้นบันได 15 เมตร และ จากตารางที่ 4.8 ค่าระยะทาง 50 เมตร ปริมาตรวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจังหวะถ่วง 120-130 กิโลกรัม และค่าความเร่งของอนุภาคสูงสุด  $\alpha$  เท่ากับ 0.139 g เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static แล้วผลปรากฏว่าแรงสั่นจากการระเบิดขนาดดังกล่าวทำให้เสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง ทั้งโซน A3 และ C3 ลดลง แต่ยังมีเสถียรภาพ

#### 4.7 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ในการศึกษาวิจัยนี้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขถูกใช้ในการศึกษาร่วมกับวิธีการแบบดั้งเดิม โดยอาศัยวิธีการ Finite Difference ซึ่งใช้โปรแกรม FLAC2D เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย สำหรับโซนที่มีโอกาสของการพังคือ A3 และ C3 ซึ่งวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้ นั้นวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองในแต่ละโซน ในกรณีที่ไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเข้ามาเกี่ยวข้อง การวิเคราะห์เชิงตัวเลขจะคำนวณในทุกๆ ความชันของผนังบ่อเหมืองทุกๆ ด้าน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยระหว่างการคำนวณโดยอาศัยวิธีการขีดจำกัดสมดุลด้วยโปรแกรม Excel และโดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม FLAC2D ผลที่ได้เป็นดังนี้

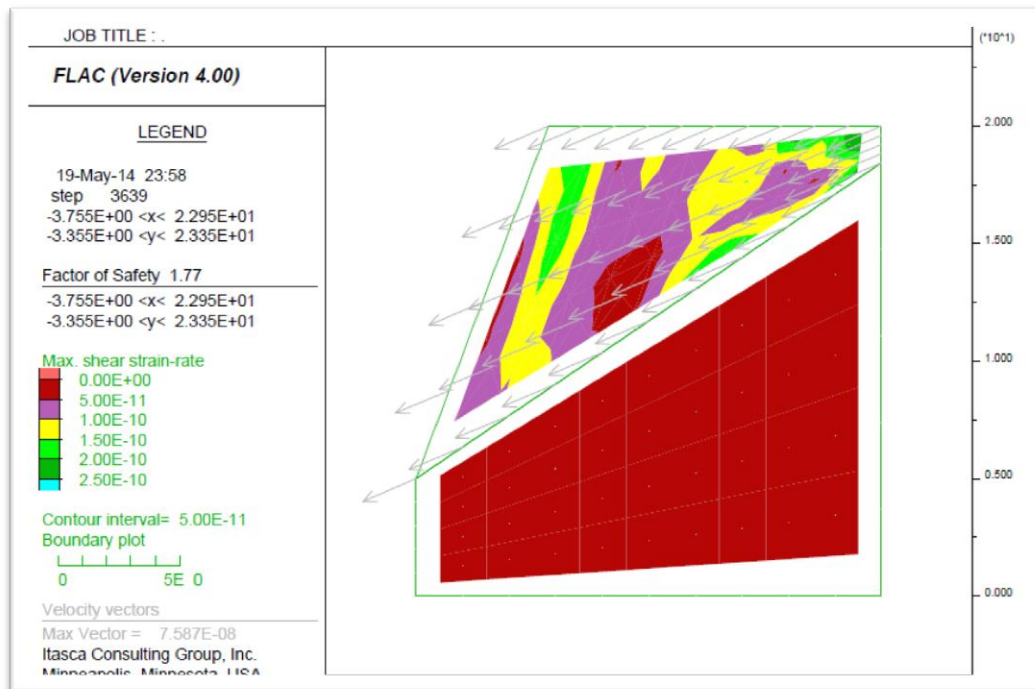
ตารางที่ 4. 12 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีการ LE และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน A3

Slope Angle (Degree)		Acceleration	Factor of Safety A3		
Slope	Slope		Non-Vibration		Dif.%
$(\Psi_f)$	$(\Psi_p)$	(g)	Limit Eq.	FLAC2D	
40	35	0.139	5.12	4.55	11.11
45	35	0.139	3.21	3.01	6.27
50	35	0.139	2.44	2.44	0
55	35	0.139	2.15	2.15	0
60	35	0.139	1.97	1.97	0
65	35	0.139	1.86	1.86	0
70	35	0.139	1.77	1.77	0



รูปที่ 4. 12 การแสดงการเปรียบเทียบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้อยด้วยวิธีการ LE และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน A3

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้วิธีการ Finite Difference ซึ่งอาศัยโปรแกรม FLAC2D เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยสำหรับโซนที่มีโอกาสของการพัง ผลที่ได้สำหรับโซน A3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเท่ากับ 4.55 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 40 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุด เท่ากับ 1.77 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมที่คำนวณด้วยโปรแกรม Excel ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยลดลง 11.11 เปอร์เซ็นต์ และ 0.0 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตามลำดับ รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้อยด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน A3 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา

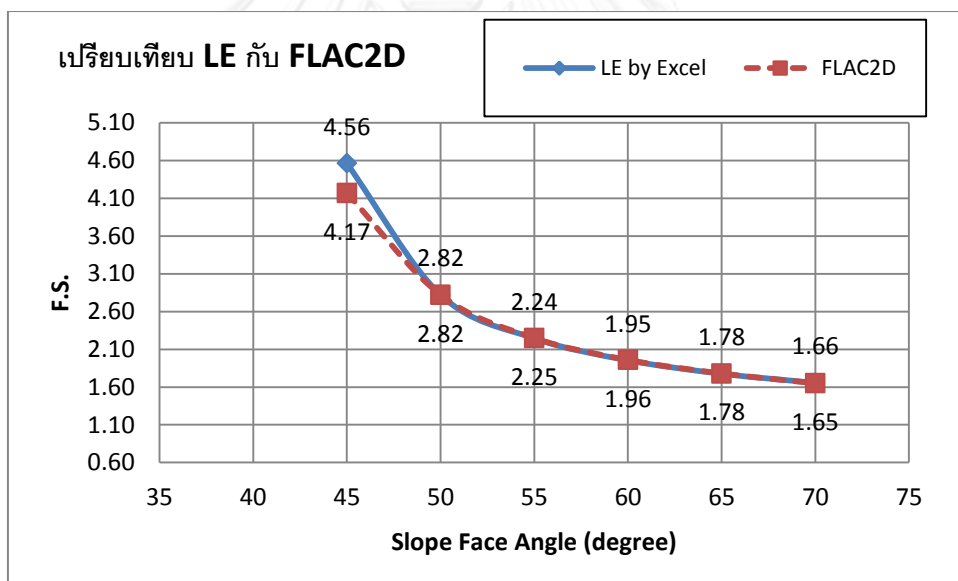


รูปที่ 4. 13 การแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โชน A3 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา

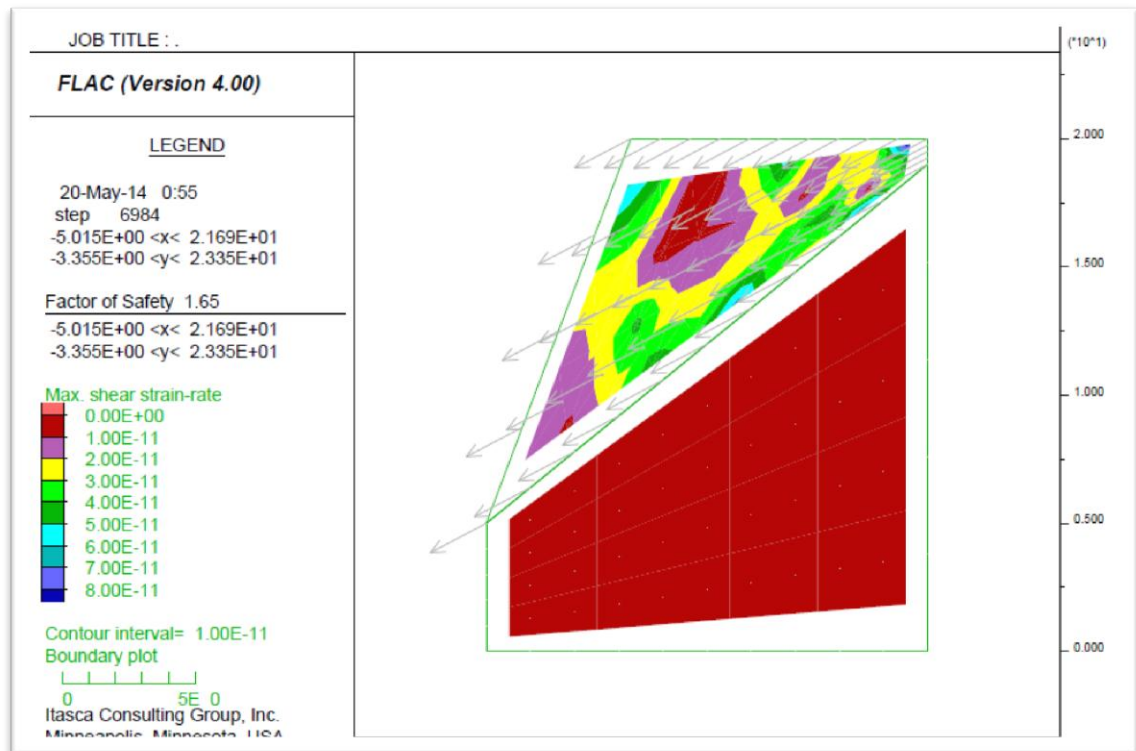
สำหรับโชน C3 ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย เท่ากับ 4.17 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 45 องศา และค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยต่ำสุด เท่ากับ 1.65 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมที่คำนวณด้วยโปรแกรม Excel ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยลดลง 8.59 เปอร์เซ็นต์ และ 0.0 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตามลำดับ รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โชน C3 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา

ตารางที่ 4. 13 แสดงผลจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีการ LE และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน C3

Slope Angle (Degree)		Acceleration	Factor of Safety C3		
Slope	Slope		Non-Vibration		Dif.%
$(\Psi_f)$	$(\Psi_p)$	(g)	Limit Eq.	FLAC2D	
45	40	0.139	4.56	4.17	8.59
50	40	0.139	2.82	2.82	0
55	40	0.139	2.24	2.25	+0.01
60	40	0.139	1.95	1.96	+0.01
65	40	0.139	1.78	1.78	0
70	40	0.139	1.66	1.65	0.01



รูปที่ 4. 14 การแสดงการเปรียบเทียบการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยด้วยวิธีการ LE และการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัยโปรแกรม FLAC2D โซน C3



รูปที่ 4. 15 การแสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความด้อยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยอาศัย  
โปรแกรม FLAC2D โซน C3 ที่ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาเรื่องเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองในเหมืองหินปูน เราสามารถบอกได้ว่ามีหลาย ๆ ตัวแปรที่มีผลต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองได้แก่ สภาพโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา ลักษณะทางกายภาพของชั้นหิน คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมวลหิน ลักษณะและพฤติกรรม การขุดตัดของหน้างานก็มีผลต่อการศึกษารื่องของเสถียรภาพด้วย ในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนามปรากฏว่า พบสภาพธรณีวิทยาเป็นลักษณะของรอย ความไม่ต่อเนื่องที่มีศักยภาพของการพังแบบระนาบมีมุมลาดเอียง 35 และ 40 องศาจากแนวราบมี ทิศทางแนวเทไปทางตะวันตกเฉียงเหนือ ในโซน A3 และ C3 ซึ่งมีทิศทางของหน้าความลาดในทางทิศ ตะวันตก ผลจากการเพิ่มความชันของผนังบ่อเหมือง ส่งผลทำให้เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองลดลง ตามความชันที่เพิ่มขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในช่วง 1.77 ถึง 5.12 สำหรับโซน A3 ซึ่ง สามารถบอกได้ว่าผนังบ่อเหมืองมีเสถียรภาพ และสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยในช่วง 1.66 ถึง 4.56 สำหรับโซน C3 ซึ่งสามารถบอกได้ว่าผนังบ่อเหมืองมีเสถียรภาพและค่อย ๆ ลดลง เมื่อ ความชันของ ผนังบ่อเหมืองถูกทำให้ชันขึ้น และหลังจากทำการประเมินพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนจากการ ระเบิดในพื้นที่ศึกษาแล้ว วิเคราะห์เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองด้วย วิธีการแบบสถิตคือแบบไม่มี ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนเกี่ยวข้อง และวิธีการแบบพลวัตคือแบบมีผลกระทบของ แรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง พบว่าหลังจากมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดบริเวณใกล้เคียง ที่ ระยะทาง 50 เมตร ขนาดของความเร่งอนุภาค เท่ากับ 0.139 g เกิดขึ้นแล้ว แรงสั่นสะเทือนจากการ ระเบิดในลักษณะความเร่งของอนุภาคดังกล่าว มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง โดยมีค่า สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย ในช่วง 4.19 ถึง 1.40 สำหรับโซน A3 และ 3.83 ถึง 1.34 สำหรับโซน C3 จากการศึกษาสามารถบอกได้ว่า หลังจากมีผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเกิดขึ้น เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อความชันของผนังบ่อเหมืองถูกทำให้ชันขึ้น และเมื่อ เปรียบเทียบกับกรณีไม่มีแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัย ลดลงในช่วง 15.00 ถึง 21.00 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือสามารถบอกได้ว่า แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดมีผลกระทบต่อ เสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง และจะมีผลกระทบมากหรือน้อย นั้นขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของ

การระเบิด โดยที่ระดับความรุนแรงของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด ขึ้นกับ ระยะทางจากจุดที่ทำให้การระเบิดถึงจุดตรวจวัด ปริมาณของวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจังหวะถ่วง ค่าความแน่นหนาของการเคลื่อนที่ของพลังงาน ( $K$ ) และค่าคงที่ด้านโครงสร้างของหิน ( $\beta$ )

นอกจากนี้มีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบดั้งเดิมและวิธีการเชิงตัวเลข สำหรับกรณีไม่มีผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้อง จากการศึกษาเปรียบเทียบพบว่า การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเฉลี่ยในช่วง 0.0 ถึง 2.0 เปอร์เซนต์ และ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเชิงตัวเลขเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยเฉลี่ยในช่วง 0.0 ถึง 2.0 นั่นคือสามารถบอกได้ว่า วิธีการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบดั้งเดิมและวิธีการเชิงตัวเลข สามารถให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน และมีรายละเอียดดังนี้

### 5.1.1 การวิเคราะห์เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

เราสามารถบอกได้ว่า ในสภาวะโครงสร้างทางธรณีเดียวกัน ค่าคุณสมบัติของหินชนิดเดียวกันและเหมือนกัน ในแต่ละค่ามุมชันของผนังบ่อเหมือง การลดลงของเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองจะเกิดขึ้นเมื่อมุมชันของผนังบ่อเหมืองเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจะลดลงทุกความชันที่เพิ่มขึ้น

ในแต่ละค่าของมุมชันที่เพิ่มขึ้นนั้น เมื่อมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดเกิดขึ้นมีผลทำให้ค่าเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองในแต่ละค่าความชันลดลง ซึ่งการลดลงของเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองจะลดลงขึ้นกับขนาดของความเร่ง  $\alpha$  ของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด และระยะทางจากพื้นที่ที่ทำการระเบิดกับผนังบ่อเหมืองที่ทำการวิเคราะห์ โดยขนาดของความเร่งของแรงสั่นสะเทือนจะขึ้นอยู่กับชนิดและน้ำหนักของวัตถุระเบิดที่ใช้ ทิศทาง และวิธีการในการออกแบบระเบิด ซึ่งในแต่ละพื้นที่จะมีตัวแปรที่เรียกว่าค่าความแน่นหนาของการเคลื่อนที่ของพลังงาน ( $K$ ) และค่าคงที่ด้านโครงสร้างของหิน ( $\beta$ ) ที่จะทำให้ขนาดของความเร่งของแรงสั่นสะเทือนต่างกันออกไป ถึงแม้ว่าชนิดและน้ำหนักของวัตถุระเบิดที่ใช้ ทิศทาง และวิธีการในการออกแบบระเบิดจะเหมือนกัน

นั่นคือสามารถสรุปได้ว่า แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดมีผลต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง โดยขนาดของผลกระทบขึ้นกับขนาดของแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

### 5.1.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

จากการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม FLAC2D ในการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ผลของค่าเสถียรภาพความลาดมีผลไปในทางเดียวกันกับวิธีการแบบดั้งเดิม นั่นคือ

ในสภาวะโครงสร้างทางธรณีเดียวกัน ค่าคุณสมบัติของหินชนิดเดียวกันและค่ามุมชันของผนังบ่อเหมืองเหมือนกัน การลดลงของเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองจะเกิดขึ้นเมื่อมุมชันของผนังบ่อเหมืองเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยจะลดลงเมื่อความชันของผนังบ่อเหมืองเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยที่ได้จะต่ำกว่าผลที่ได้จากการใช้วิธีการแบบดั้งเดิม

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เราสามารถอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขร่วมกับวิธีการวิเคราะห์แบบดั้งเดิมในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ความปลอดภัยได้ เพื่อเป็นเครื่องมือในการยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพให้เกิดความเข้าใจในการออกแบบความลาดของผนังบ่อเหมือง

### 5.1.3 การออกแบบผนังบ่อเหมือง

จากการศึกษาเรื่องเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองในเหมืองหินปูน ภายใต้ผลกระทบของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดแล้ว พบว่าหลังจากมีแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดบริเวณใกล้เคียงเกิดขึ้นแล้ว แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดในลักษณะความเร่งของอนุภาค มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง ทำให้ค่าเสถียรภาพ ลดลงในช่วง 17 ถึง 21 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ แรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดมีผลกระทบต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง สำหรับบริเวณที่มีโอกาสของการพังแบบระนาบ และมุมเทของรอยความไม่ต่อเนื่องเท่ากับ 35-40 องศา และจากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีการขีดจำกัดสมดุลและขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static พบว่าผนังบ่อเหมืองที่มีโอกาสของการพังแบบระนาบ นั่นคือ โซน A3 และ C3 สามารถบอกได้ว่า การออกแบบผนังบ่อเหมืองในทุกด้านสามารถกำหนดความชันของผนังบ่อเหมืองให้มีค่าความชันประมาณ 70-80 องศา โดยต้องอยู่ในสภาวะปราศจากน้ำใต้ดินด้วย ความสูงของแต่ละชั้นบันไดเท่ากับ 15 เมตร

### 5.1.4 การออกแบบระเบิดและควบคุมแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด

จากการศึกษาเรื่องพฤติกรรมของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดในพื้นที่ศึกษา ที่มีการใช้ขนาดรูเจาะขนาด 5 นิ้วสำหรับหลุมระเบิดที่ความสูงของชั้นบันได 15 เมตร และ จากตารางที่ 4.8 ค่าระยะทาง 50 เมตร ปริมาณวัตถุระเบิดมากที่สุดต่อจังหวะถ่วง 120-130 กิโลกรัม และค่าความเร่งของอนุภาคสูงสุด  $\alpha$  เท่ากับ 0.139g เมื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธีขีดจำกัดสมดุลแบบ Pseudo static แล้วผลปรากฏว่าแรงสั่นจากการระเบิดขนาดดังกล่าวทำให้เสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง ทั้งโซน A3 และ C3 ลดลง แต่ยังมีเสถียรภาพที่ค่าความชันของผนังบ่อเหมืองสูงสุดที่ 70 องศาได้ ในสภาวะปราศจากน้ำใต้ดิน



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลแรงสั่นสะเทือน

นอกจากข้อมูลที่กำลังกล่าวมาเบื้องต้นแล้วนั้น ในการเก็บรวบรวม ประเมิน ประมวลผล และ ทำนายค่าของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิด การตรวจสอบเครื่องมือในการวัดค่าของแรงสั่นสะเทือน ในแต่ละครั้งควรมีการทวนสอบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้เครื่องมือวัดสามารถวัดค่าได้แม่นยำ และให้ได้ ค่าการวัดที่มีความถูกต้องที่สุด การวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลด้านแรงสั่นสะเทือนในแต่ละครั้งควรวัด ในจุดเดียวกันหรือพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกัน เพื่อให้ได้ค่าคงที่ด้านโครงสร้างของหินของแต่ละพื้นที่ใน ทิศทางเดียวกัน การวัดค่าแรงสั่นสะเทือนในแต่ละครั้งควรมีการบันทึกสภาพดินฟ้าอากาศ รวมทั้ง สภาพพื้นดินในขณะทำการวัดด้วย เช่น ฝนตก ดินชื้น หรือแห้งแล้ง ฤดูกาล เนื่องจากมีผลต่อค่าคงที่ ด้านโครงสร้างของหิน เป็นต้น

### 5.2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูลการปรับปรุงขอบเขตการศึกษา

เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยฉบับนี้คือ การศึกษาผลกระทบของแรงสั่นสะเทือน จากการระเบิดต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมือง การศึกษาหลักจึงเน้นการเก็บรวบรวม วิเคราะห์ และ ประเมิน ตัวแปรที่มีผลต่อแรงสั่นสะเทือน เช่น ขนาด ทิศทาง พฤติกรรม ของแรงสั่นสะเทือน ที่ เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา เท่านั้น วิธีการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้ได้มีการศึกษา คุณสมบัติของหินด้วยวิธีการสำรวจในพื้นที่เป็นหลัก ดังนั้นข้อมูลด้านคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของหิน จึงไม่อาจเป็นตัวแทนได้เต็มที่

การประเมินเสถียรภาพของหินเป็นการประเมิน การพังแบบระนาบเพื่อศึกษาผลกระทบของ แรงสั่นสะเทือนที่มีต่อเสถียรภาพเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อสามารถพิสูจน์ผลการศึกษาของ ผลกระทบ ของแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดต่อเสถียรภาพของผนังบ่อเหมืองแล้วนั้น ควรมีการขยายไป วิเคราะห์และประเมินการพังแบบอื่นๆ

## รายการอ้างอิง

- B, S., & P, P. (1993). Generation, propagation & prediction of ground vibration from opencast blasting. *Blasting in ground excavation & mines*, 21-35.
- Barton, N. R. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Eng. Geol*, 7, 287-332.
- Barton, N. R. (1974). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105*(Oslo: Norwegian Geotech. Inst).
- Barton, N. R. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min.Sci.& Geomech*(Abstr. 13), 1-24.
- Barton, N. R., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech*, 10(1-2), 1-54.
- Bullen, K. E., & Bolt, B. A. (1985). An introduction to the theory of seismology. *Cambridge University Press ISBN 9780521283892*.
- Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties of intact rock. *Technical Report No. AFWL-TR-65-11*(New Maxico: Kirkland Airforce Base).
- Duvall, W. I., Johnson, C. F., Meyer, A. V. C., & Devine, A. V. C. (1963). Vibrations from instantaneous and millisecond-delay quarry blasts. (BuMines RI 6151), 34 p.
- Eberhardt, E. (2003). Rock slope stability analysis utilization of adanced numerical techniques. *Professor of Geotechnical Rock Engineering Geological Engineering/EOS UBC-Vancouver*.
- Hoek, & Brown. (1980). *Underground Excavations in Rock*. (London: The Institution of Mining and Metallurgy).
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd ed.). *London: The Institution of Mining and Metallurgy*.
- Horn, H. M., & Deere, D. U. (1962). Friction characteristics of minerals. *Geotechnique*, 12, 319-335.
- Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of lopes during earthquakes – A Retrospective. *Engineering Geology*, v. 122, p. 43-50.
- Kemthong, R. (2006). *Determination of rock joint shear Strength based on rock physical properties*. Suranaree University of Technology.
- kujur, B. k. (2010). *Blast vibration studies in surface mines*. ( bachelor ).

- Langefors, U., Kihlstrom, B., & Westerberg, H. (1958). Ground vibrations in blasting. *Water Power*, 400 p.
- Mathis, J. I. (2007). Bench-inter-ramp-overall: a guide to statistically designing a rock slope.[on-line]. Available: .  
([http://www.zostrich.com/index\\_htm\\_files/Bench\\_interramp.pdf](http://www.zostrich.com/index_htm_files/Bench_interramp.pdf) ).
- Myraksin. (2011). การศึกษาโครงสร้างโลก. Retrieved Jun 11, from  
<http://www.myraksina.exteen.com>
- Nichols, H. R., Johnson, C. F., & Duvall., W. I. (1971). Blasting vibrations and their effects on structures. *Bulletin No.656, USBM*, 105 p.
- Roy, P. (2005). Rock Blasting Effects and Operations. *Balkema Publisher (2005)*.
- SHENG, X., JONES, C. J. C., & PETYT, M. (1999). Ground vibration generated by a harmonic load acting on a railway track. *Journal of Sound and Vibration*, 225(1), 3-28.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). Structure response and damage produced by ground vibrations from surface mine blasting. *BuMines RI 8507.,USBM*, 74 p.
- Standard, I. (1973). Criteria for Safety and Design of Structures Subjected Under Ground Blast. (ISI).
- Vasarhelyi, B. (1999). Shear failure in rock using different constant normal load. *Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng*, 43(2), 179-186.
- Wiss, J. F. (1968). Effect of blasting vibrations on buildings and people. *Civil Engineering,ASCE*, 1968, July, pp 46-48.
- Wyllie, D. C. (1998). Foundation on Rock. *London: E&FN Spon.,.*
- Xu, S., & De Fretias, M. H. (1990). The complete shear stress versus shear displacement behavior of clean and infilled rough joint. *In Proceedings of the International Conference on Rock Joint*(Rotterdam: A.A.Balkema., ), pp. 341-348.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2528). แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย มาตรฐานส่วน 1 : 250,000. (กรุงเทพฯ: กรมแผนที่ทหาร).
- โชติถนอม, อ. (2006). ความสำคัญของเสียง.
- บุรินทร์ เวชบรรเทิง. (2011). ความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับแผ่นดินไหว FUNDAMENTAL SEISMOLOGY. Retrieved September 14, from Available:  
[http://www.school.net.th/schoolnet/article/articles\\_member\\_read.php?article\\_id=660](http://www.school.net.th/schoolnet/article/articles_member_read.php?article_id=660)
- ไพรัตน์ เจริญกิจ, & คณະ. (2536). รายงานการศึกษาความสัมพันธ์ของชั้นดินหินจากการระเบิด. รายงานการศึกษา ฝ่ายพัฒนาเหมืองแร่และเหมืองหิน กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี, 39.

เอส ที เอส เอ็นจินีเยริง คอนซัลแตนท์, บ., จำกัด. . (2537). รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม(ฉบับสมบูรณ์). เอกสารอัดสำเนาเย็บเล่มการรายงานผลโครงการเหมืองแร่หินปูนและหินดินดานเพื่ออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## ก1 การตรวจสอบสถานที่ตั้งและทดสอบหิน



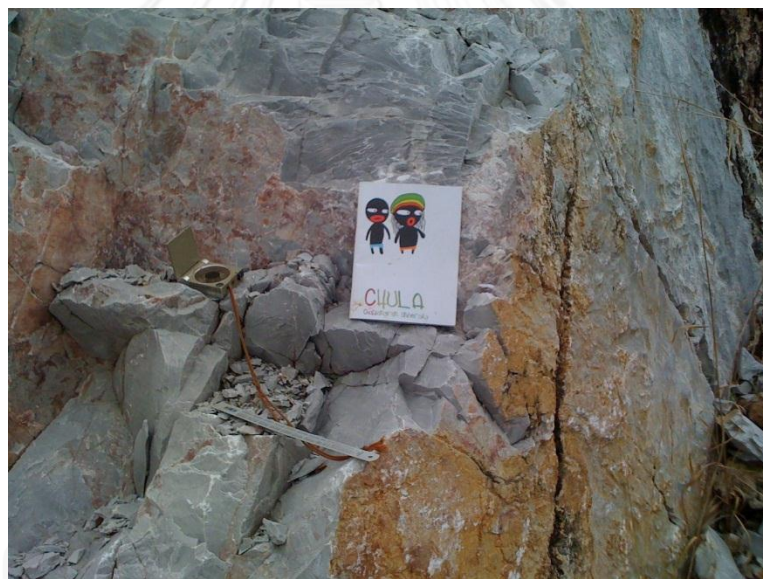
รูปที่ ก1 การแสดงพื้นที่ศึกษาเหมืองหินปูนในช่วงพัฒนา ในจังหวัดสระบุรี



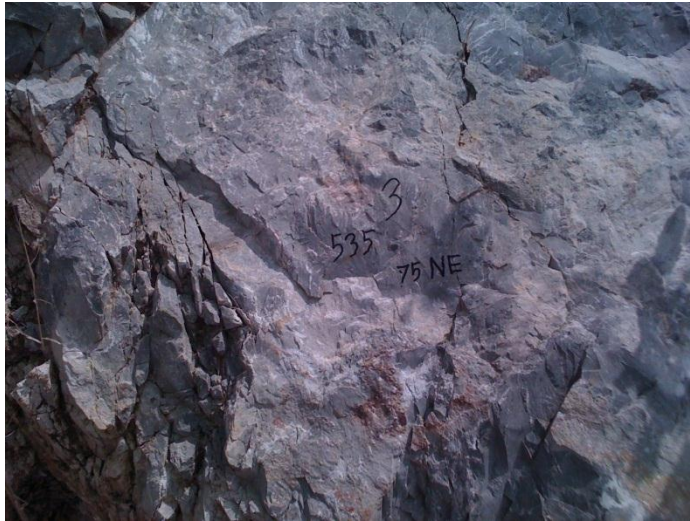
รูปที่ ก2 การแสดงพื้นที่ศึกษาเหมืองหินปูนมองจากทิศใต้-เหนือ



รูปที่ ก3 การแสดงการวัดความหนาของชั้นหิน



รูปที่ ก4 การแสดงการวัดทิศทางการวางตัวของรอยชั้นไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ ก5 การแสดงทิศทางการวางตัวของรอยชั้นไม่ต่อเนื่อง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตาราง ก1 แสดงข้อมูลทิศทางการวางตัวของรอยความไม่ต่อเนื่อง

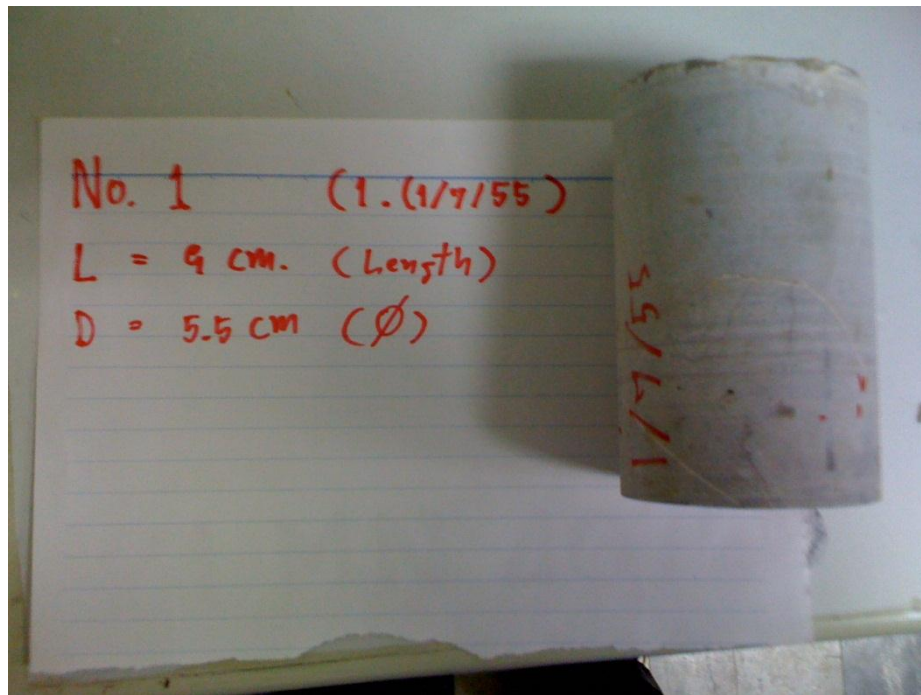
No.	E	N	Z	Dip Angle	Dip Direction
1	1614251	731174	540	90	NE
2	1614260	731293	545	85	NE
3	1613755	731079	388	70	NE
4	1613936	731148	450	82	NW
5	1613936	731148	450	80	NW
6	1613776	731100	395	65	NW
7	1614309	731310	520	40	NW
8	1614229	731315	528	30	NW
9	1614081	731097	479	50	NW
10	1614056	730993	454	65	NW
11	1613724	731214	417	40	NW
12	1613792	731037	383	30	NW
13	1613853	730859	333	80	NW
14	1614169	731089	516	75	SE
15	1613911	731165	457	87	SE
16	1614078	731468	482	85	SE

ตาราง ก1 (ต่อ) แสดงข้อมูลทิศทางการวางตัวของรอยความไม่ต่อเนื่อง

No.	E	N	Z	Dip Angle	Dip Direction
17	1614094	731096	488	60	SE
18	1614114	731204	478	82	SE
19	1613800	731204	458	85	SE
20	1614797	731204	440	65	SW
21	1614066	731459	481	35	SW
22	1613884	731360	440	35	SW
23	1613750	731295	430	90	SW
24	1613780	731034	382	85	SW
25	1613735	731061	393	20	SW



รูปที่ ก6 การแสดงการเตรียมแท่งตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Point Load Index Test



รูปที่ ก7 การแสดงแท่งตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร



รูปที่ ก8 การแสดงแท่งตัวอย่างทรงกระบอกหลังการทดสอบ Point Load

ตาราง ก2 แสดงผลการทดสอบ Point Load ในห้องปฏิบัติการทางกลศาสตร์ของหิน

No.	Point Load	UCS (MPa)	
		K Min	K Max
	(MPa)	20	24
1	3.97	79	95
2	4.79	96	115
3	3.04	61	73
4	4.63	93	111
<b>Average</b>	<b><u>4.11</u></b>	<b><u>82</u></b>	<b><u>99</u></b>

ตาราง ก3 แสดงผลการวัดแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษา

Distance	$Q_{max}$	PPV	Scale Distance	Remark	
(m)	(kg/delay)	(mm/sec)	(m/kg <sup>2</sup> )	ข้อมูลปี	ช่วงของข้อมูล
290.62	38.42	2.80	46.89	55	Q1
444.39	32.24	1.39	78.27	53-54	
444.61	39.39	1.69	70.84	55	
446.12	39.31	1.90	71.15	55	
451.40	38.72	1.94	72.55	53-54	
552.82	39.20	1.13	88.30	53-54	
65.43	40.40	4.67	10.29	53-54	Q2
148.43	41.41	1.72	23.07	53-54	
221.75	40.40	3.84	34.89	53-54	
351.08	42.73	2.72	53.71	55	
522.80	40.47	1.30	82.18	55	
557.93	43.83	2.09	84.28	53-54	
633.16	45.93	2.14	93.42	53-54	
646.26	43.77	1.62	97.69	53-54	
744.44	45.45	2.38	110.42	53-54	

ตาราง ก3 (ต่อ) แสดงผลการวัดแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษา

Distance	$Q_{max}$	PPV	Scale Distance	Remark	
(m)	(kg/delay)	(mm/sec)	(m/kg <sup>2</sup> )	ข้อมูลปี	ช่วงของข้อมูล
461.74	52.06	1.65	64.00	55	Q3
477.39	54.04	2.52	64.94	53-54	
469.57	53.05	2.08	64.47	55	
736.80	50.50	1.31	103.68	53-54	
351.95	62.21	4.72	44.62	55	Q4
354.76	58.92	4.73	46.22	53-54	
353.35	60.56	4.73	45.41	55	
559.00	66.91	0.98	68.34	55	
562.75	63.16	2.02	70.81	55	
589.60	62.37	1.73	74.66	53-54	
160.50	78.28	1.25	18.14	53-54	Q5
641.56	82.48	2.06	70.64	55	
771.80	70.70	1.17	91.79	53-54	
831.76	71.96	1.76	98.05	53-54	
349.63	86.25	1.40	37.65	53-54	Q6
435.45	88.97	1.34	46.17	53-54	
656.61	88.98	1.84	69.61	53-54	
551.05	90.23	1.47	58.01	53-54	
574.00	90.83	2.39	60.23	55	
562.53	90.53	1.93	59.12	55	
638.22	92.48	0.89	66.37	55	
950.09	95.95	1.67	96.99	53-54	
1166.22	94.27	0.85	120.12	53-54	
636.53	101.00	2.54	63.34	53-54	Q7
654.50	100.55	0.84	65.27	55	
719.00	99.69	0.29	72.01	55	

ตาราง ก3 (ต่อ) แสดงผลการวัดแรงสั่นสะเทือนจากการระเบิดบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษา

Distance	Qmax	PPV	Scale Distance	Remark	
(m)	(kg/delay)	(mm/sec)	(m/kg <sup>2</sup> )	ข้อมูลปี	ช่วงของข้อมูล
752.93	114.66	1.73	70.31	53-54	Q8
829.33	114.89	1.50	77.37	53-54	
841.75	112.67	0.51	79.30	55	
927.00	117.16	1.61	85.64	53-54	
293.00	131.30	4.40	25.57	53-54	
734.05	129.96	1.94	64.39	55	Q9
740.33	128.54	0.60	65.30	55	
877.00	121.20	2.10	79.66	53-54	

ตาราง ก4 แสดงผลการทดสอบ Point Load Index

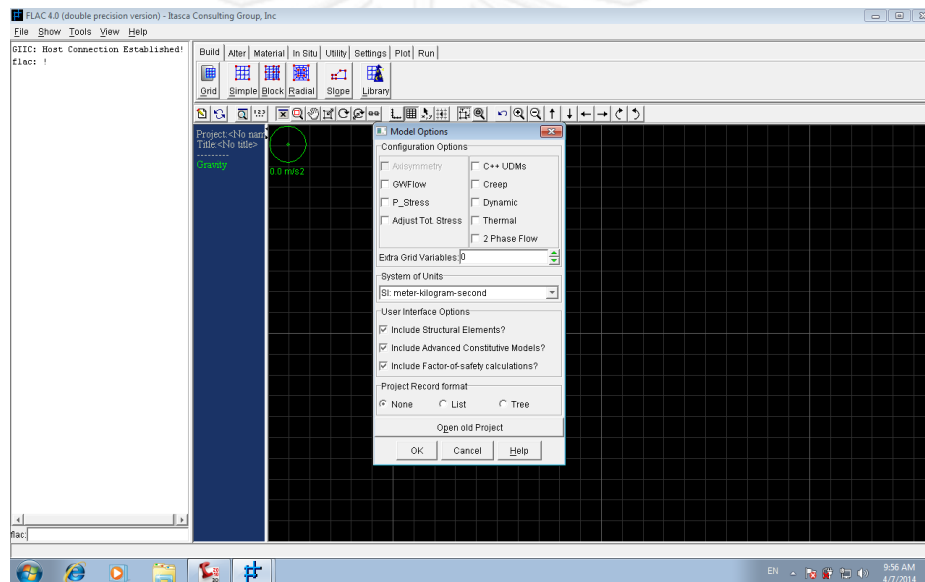
Point Load Index Test				
No.	Specimens	Diameter	Length	P
		(cm)	(cm)	(kN)
1	Core	5.50	9	12.00
2	Core	5.50	15	14.50
3	Core	5.50	18	9.20
4	Core	5.50	13	14.00

## ภาคผนวก ข

## ขั้นตอนและวิธีการการใช้โปรแกรม FLAC2D

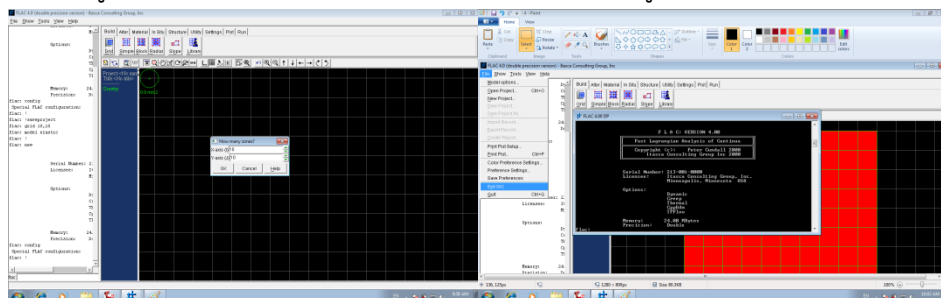
ขั้นตอนและวิธีการการติดตั้งโปรแกรม FLAC2D สามารถกระทำได้ด้วยวิธีในคู่มือ FLAC2D ที่แนบมากับตัวโปรแกรม

- เมื่อติดตั้งโปรแกรมลงในเครื่องคอมพิวเตอร์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการเปิดโปรแกรม FLAC2D โดยเลือก FLAC4.0 Double Precision version /เลือกหน่วยที่ต้องการในงานวิจัยนี้เลือกเป็นระบบ SI /ทำเครื่องหมายถูก ในช่อง Include Structure Element ,Include Advance Constitutive Models, Include Factor-of-Safety Calculations ตามรูปที่



## รูปที่ ข1 การแสดงหน้าต่างเริ่มการทำงานโปรแกรม FLAC2D

- จะเข้าสู่หน้าต่างหน้าจการทำงานของโปรแกรม FLAC2D /ไปที่ File /เลือกปุ่ม Exit GIIC เพื่อเข้าสู่โหมดการทำงานผ่าน Command Prompt ตามรูปที่ ข2



## รูปที่ ข2 การแสดงหน้าต่างเริ่มการทำงานผ่าน Command Driven



3. เริ่มทำการสร้าง Grid Model ขนาด  $10 \times 10$  /ที่  $j=6$  ถึง 11 เป็นแบบ Mohr และ  $j=1$  ถึง 5 เป็นแบบ Elastic และให้ตัดแถวที่  $j=6$  ออก ด้วยการใส่คำสั่ง Command Driven

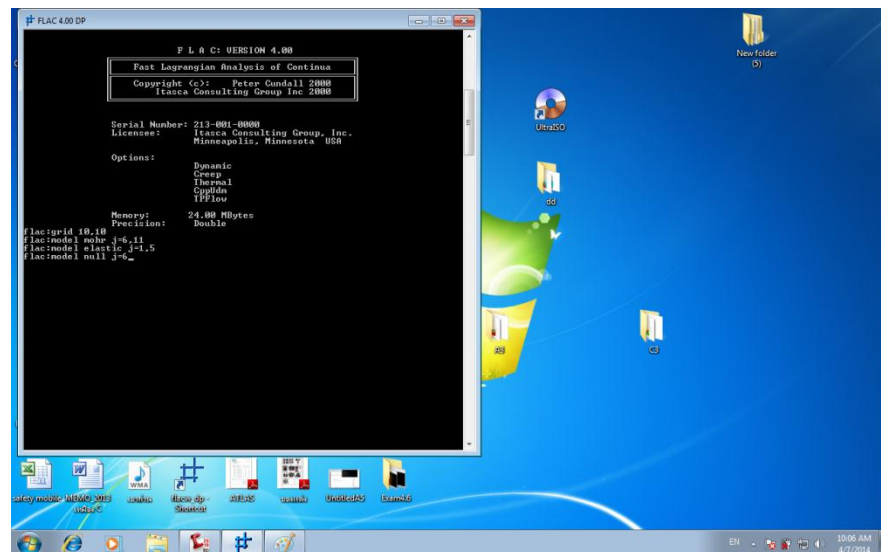
*Grid 10,10*

*Model Mohr  $j=6,11$*

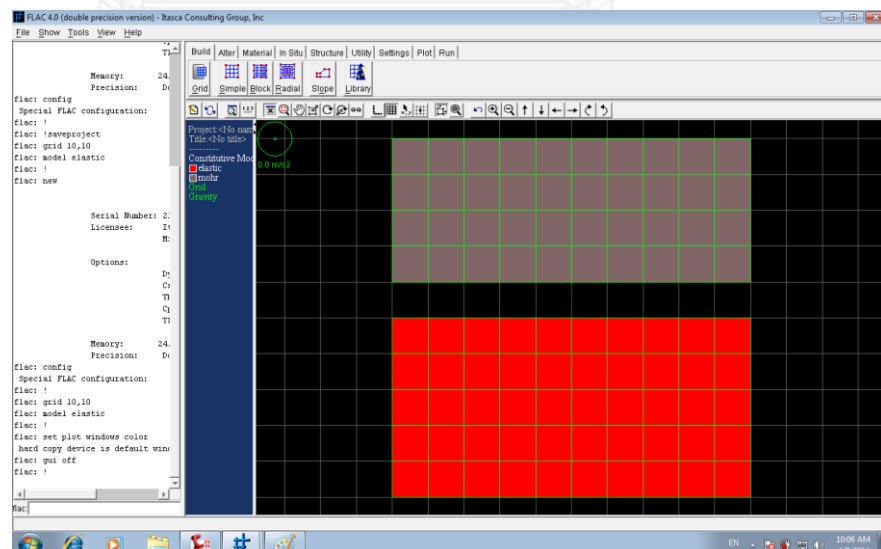
*Model Elastic  $j=1,5$*

*Model null  $j=6$*

*GLIC*



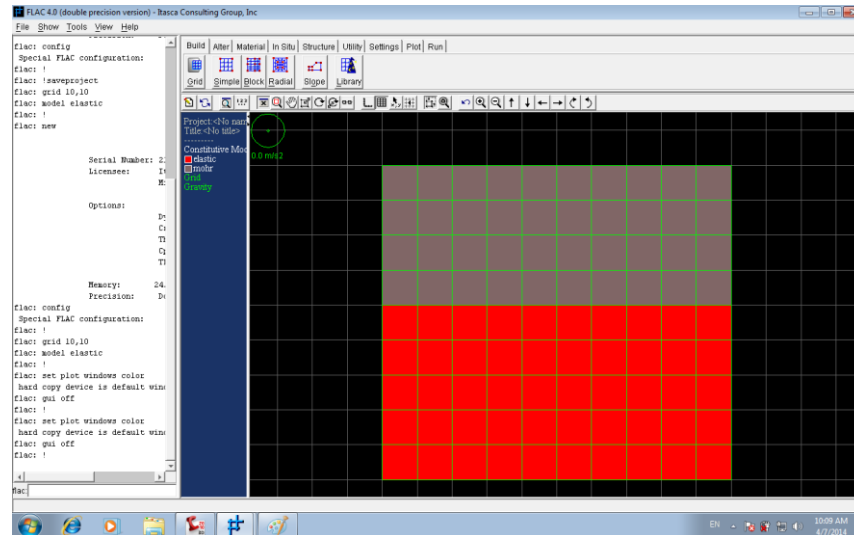
รูปที่ ข3 การแสดงการใช้คำสั่งผ่าน Command Driven



รูปที่ ข4 การแสดง Model เริ่มต้นที่ได้จากการ Run โปรแกรม

4. จัดรูปร่างของ Model เริ่มต้นให้ได้ตามรูปทรงทางเรขาคณิตตามแบบจำลองที่เราต้องการ ในตัวอย่างนี้ จะทำการสร้าง Model แทนค่าเส้นรอยไม่ต่อเนื่อง /File /Exit GIIC และพิมพ์คำสั่ง

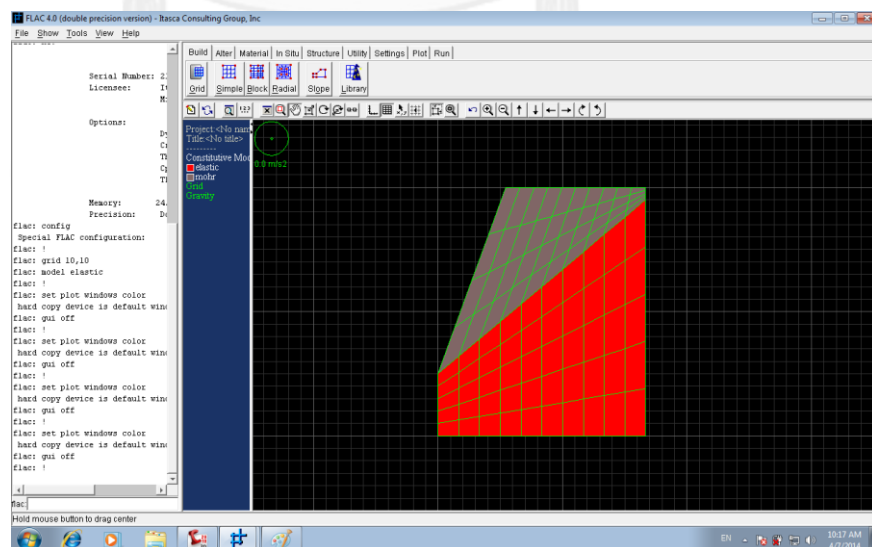
*Ini y (add) -1 i=1,11 j=7,11*  
*GIIC*



รูปที่ ข5 การแสดงผลการสร้าง Model แทนค่าเส้นรอยไม่ต่อเนื่อง

5. สร้าง Model ความชันของผนังบ่อเหมือง 70 องศา และมุมเทของรอยไม่ต่อเนื่อง 40 องศา /File /Exit GIIC

*Gen 0,0 0,5 16.68,19 16.68,0 i=1,11 j=1,6*  
*Gen 0,5 5.46,20 16.68,20 16.68,19 i=1,11 j=7,11*  
*GIIC*



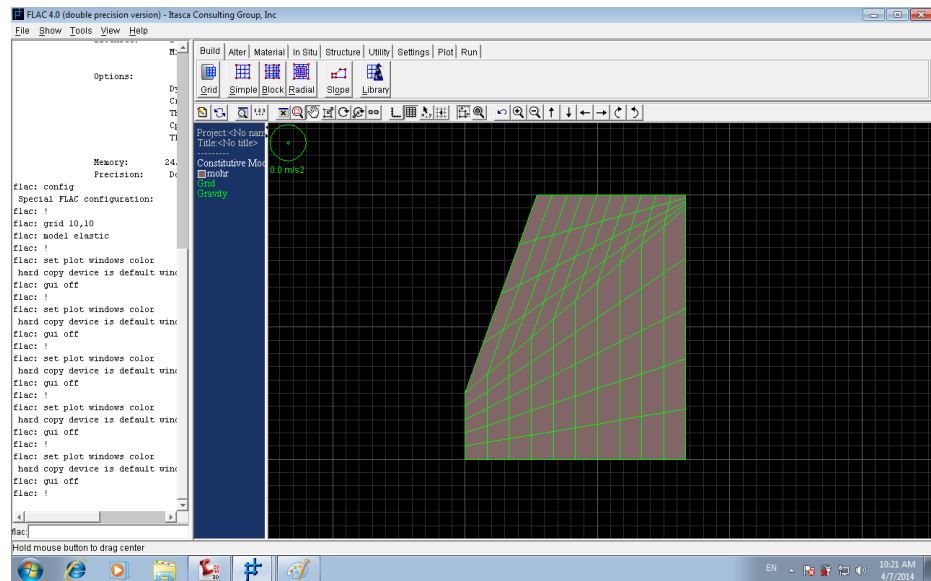
รูปที่ ข6 การแสดงผลการสร้าง Model ความชัน 70 องศา และมุมเทของรอยไม่ต่อเนื่อง 40 องศา

6. เนื่องจากคุณสมบัติของชั้นหินที่แยกกันด้วยรอยชั้นไม่ต่อเนื่องแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องให้ค่าคุณสมบัติของหินเหมือนกันด้วยวิธีการรวมกลุ่มหินให้มีชื่อ rock80 มีคุณสมบัติแบบ mohr ขั้นตอนการทำคือ /File /Exit GIIC

*Group 'rock80' notnull*

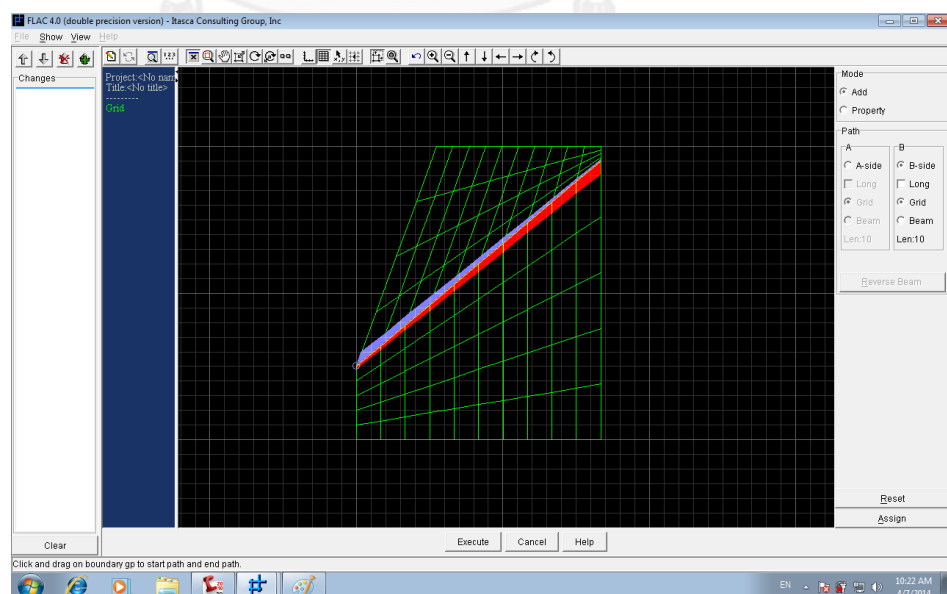
*Model mohr group 'rock80'*

*GIIC*



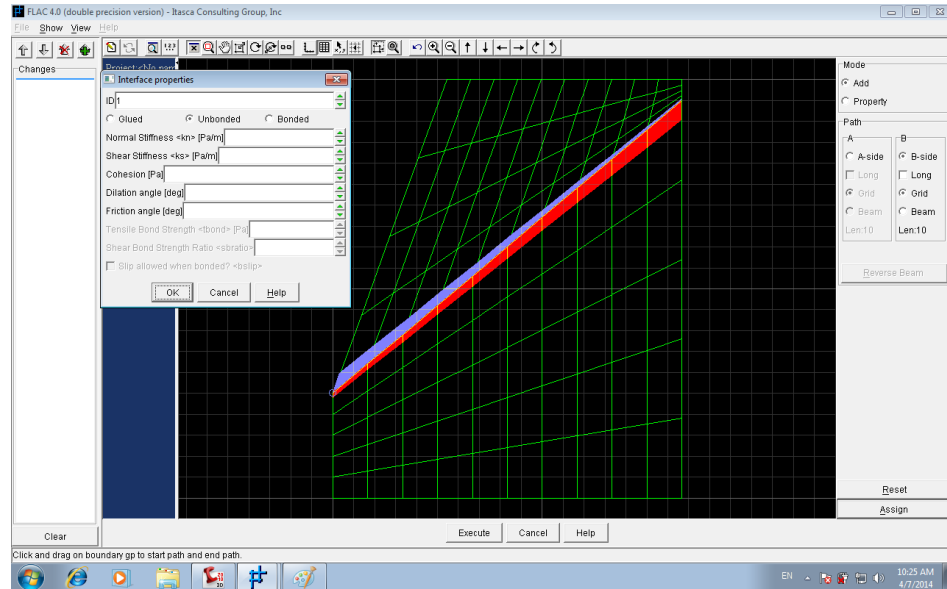
รูปที่ ข7 การแสดงการรวมกลุ่มหินที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันให้เป็นชนิดเดียวกัน

7. สร้างรอยไม่ต่อเนื่องมุมเท 40 องศา ให้เป็นตัวแทนของ Discontinuity Plane ของ Slope โดย ปุ่ม Alter/interface /Add/ A-side/B-side



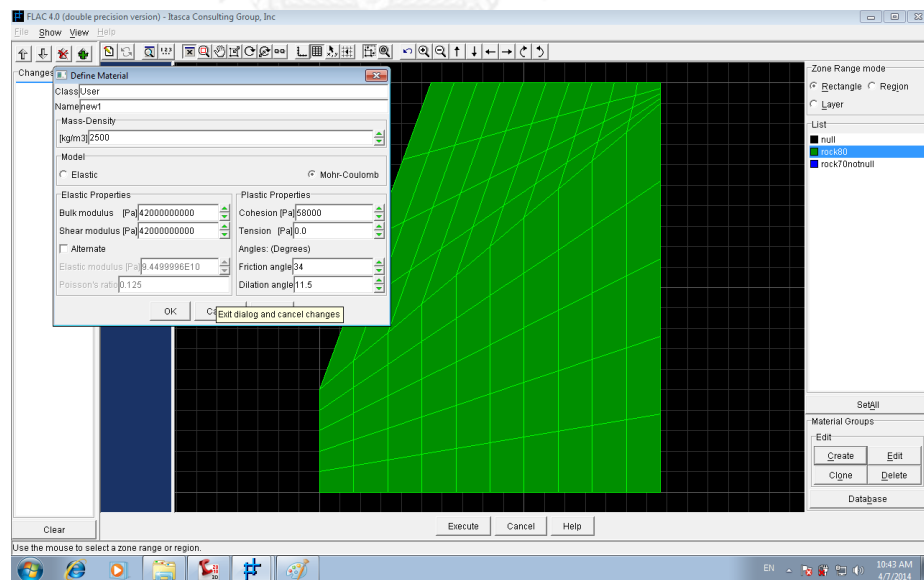
รูปที่ ข8 การแสดงการสร้างรอยไม่ต่อเนื่อง

8. กำหนดคุณสมบัติของรอยไม่ต่อเนื่อง โดยใช้ปุ่ม Assign และใส่ค่าคุณสมบัติตามตัวแปรกำลังเฉือนที่หามาได้ Execute เป็นการตกลงเสร็จสิ้นขั้นตอน



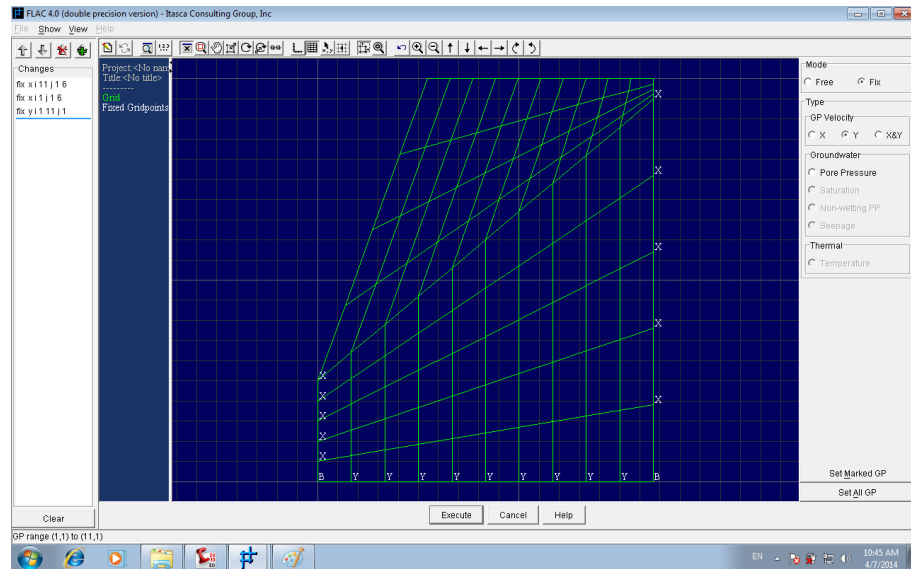
รูปที่ ข9 การแสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของรอยไม่ต่อเนื่องตามตัวแปรกำลังเฉือน

9. กำหนดค่า Material ให้กับ Model ในตัวอย่างนี้ จะกำหนดค่า Material เป็น หินปูน มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.5 ตันต่อ ลบม. ชนิด Model Mohr Coulomb รายละเอียดตามรูปที่ ข10 คำสั่ง Material/Assign/Create/Set All/Execute



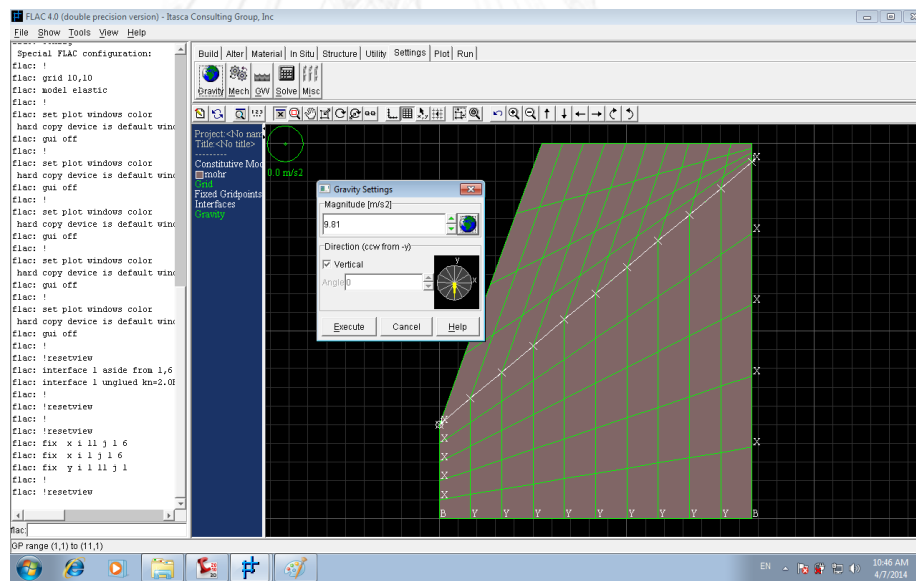
รูปที่ ข10 การแสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุให้กับ Model

10. กำหนด Boundary Condition ให้กับ Model ใน Model นี้เราจะกำหนดให้ระนาบด้านบนของรอยความไม่ต่อเนื่อง เคลื่อนที่ได้อิสระ และระนาบหินด้านล่างรอยความไม่ต่อเนื่อง ยึดแน่น ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยใช้คำสั่ง In Situ/Fix



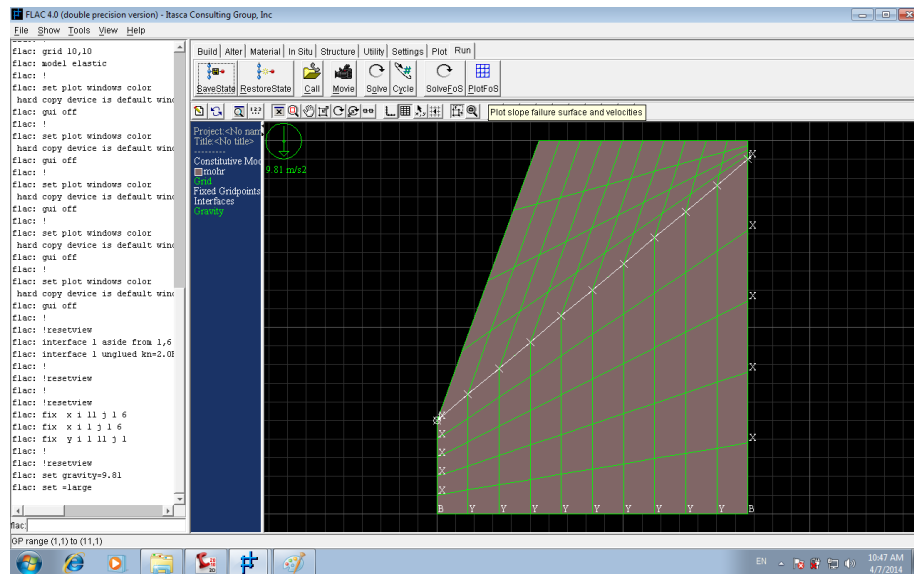
รูปที่ ข11 การแสดงการกำหนด Boundary Condition แบบ Fix ให้กับบรรทัดหินส่วนที่อยู่ด้านล่าง รอยความไม่ต่อเนื่อง

- กำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $g$  ในที่นี้คือ  $9.81 \text{ m/sec}^2$  มีทิศทางแนวตั้งมีค่าเป็นบวก โดยใช้คำสั่ง Settings/Gravity/Execute



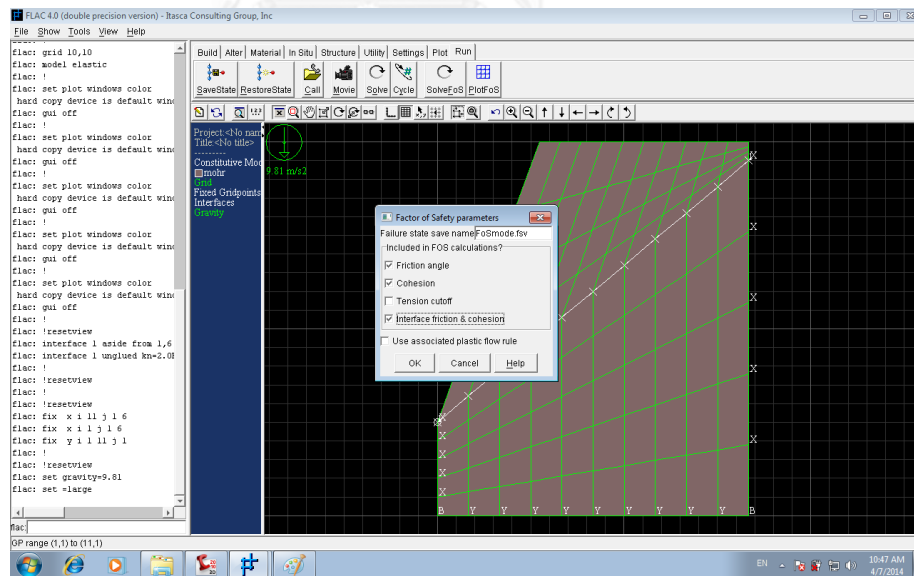
รูปที่ ข12 การแสดงกำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $g$  ให้กับ Model

## 12. Model พร้อมสำหรับการ Run ทาค่า Factor of Safety



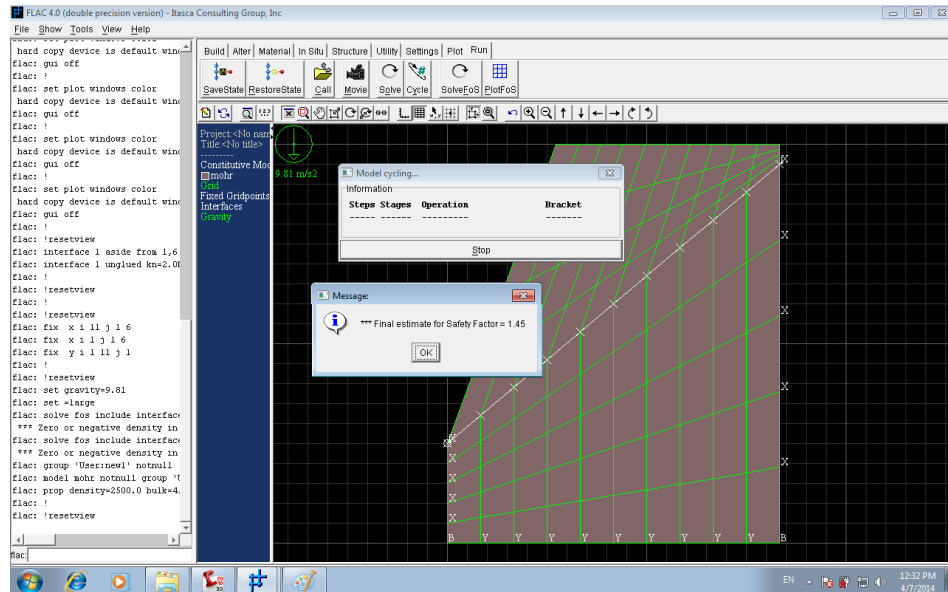
รูปที่ ข13 การแสดง Model พร้อมสำหรับการ Run ทาค่า Factor of Safety

13. ในขั้นตอนการ Run Factor Of Safety เริ่มจาก Run/ Solve FOS จะขึ้น Dialog box ให้ทำเครื่องหมายถูก ที่ Friction Angle, Cohesion, Interface Friction & Cohesion จากนั้นกด OK



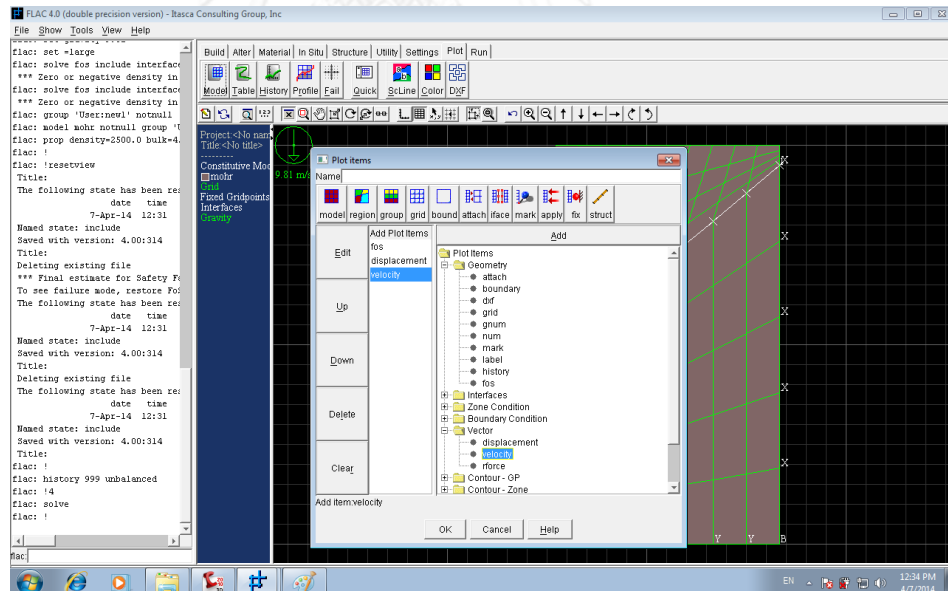
รูปที่ ข14 การแสดงการ Run Factor Of Safety

14. ผลของการ Run Factor Of Safety ในตัวอย่างจะได้ค่า เท่ากับ 1.45

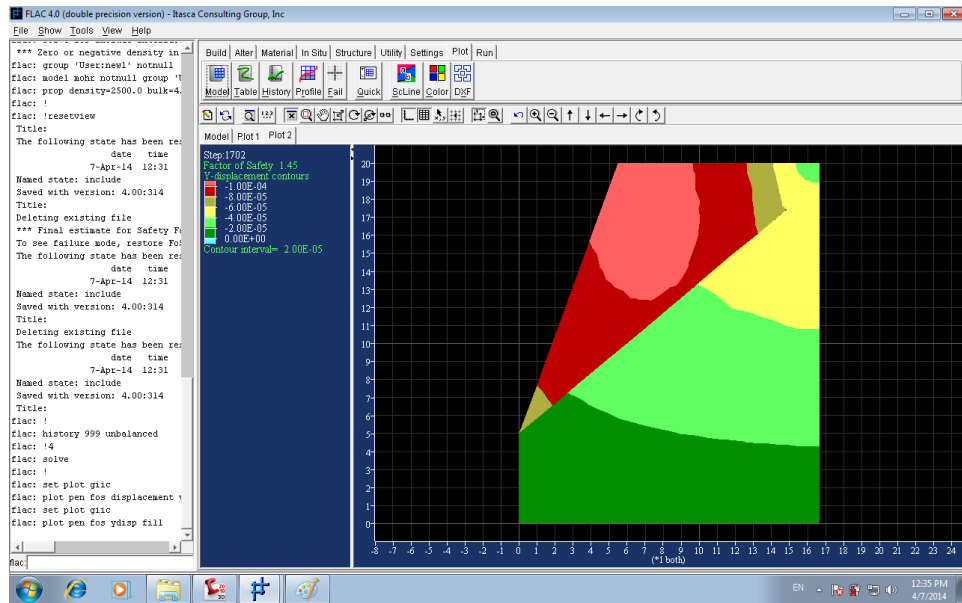


รูปที่ ข15 การแสดงผลการ Run Factor of Safety

15. ตั้งค่าการ Plot ดูพฤติกรรมที่เราสนใจ เช่น Discontinuity, Velocity, Vector ต่างๆ โดยใช้คำสั่ง Plot/Model/เลือกค่าที่สนใจ เช่น Geometry/fos. กดปุ่ม OK



รูปที่ ข16 การแสดงขั้นตอนการตั้งค่าการ Plot ดูพฤติกรรมที่เราสนใจ



รูปที่ ข17 การแสดงผลของ Y Displacement และ F.S.



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีระนันท์ คงกัน เกิดวันที่ 27 กรกฎาคม 2527 ที่จังหวัดกระบี่ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนปลายพระยาวิทยาคม อำเภอปลายพระยา จังหวัดกระบี่ และระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา ในปีการศึกษา 2550

ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม ทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปีการศึกษา 2553 และยังเป็นวิศวกรเหมืองแร่ ประจำแผนกเหมือง ฝ่ายเหมือง บริษัทปูนซีเมนต์ ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY