การประเมินหาความเหมาะที่สุดในการระเบิดตัดชั้นตะพัก

Evaluation of Optimum Bench Blasting

สง่า ตั้งชวาล

Sanga Tangchawal

Department of Mining and Petroleum Engineering

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phayathai Road, Bangkok 10330

Phone (66-2) 218-6581; Fax: (66-2) 218-6920

E-Mail: sa-nga.t@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การวางแผนในการระเบิดตัดชั้นตะพัก เพื่อพัฒนาเหมืองเปิดหรือเพื่อตัดไหล่ทาง จุดประสงค์หลักต้องการให้ได้ผลลัพธ์ของการระเบิดมีปริมาตรหินระเบิดกับขนาดของชิ้นส่วนหินตามที่ได้วางแผนไว้เบื้องต้น การดำเนินงานระเบิดหินที่ดีวิศวกรยังต้องสามารถควบคุมงานระเบิดตัดชั้นตะพัก ให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมในระดับไม่เกินขีดจำกัดมาตรฐาน บทความเรื่องนี้ได้นำเสนอขั้นตอนของการวางแผนกับการคำนวณเพื่อหาค่าความเหมาะสมของปริมาณการใช้วัตถุระเบิดที่เหมาะที่สุดกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของการตัดชั้นตะพัก ทั้งนี้มีการแสดงผลการหาจุดเหมาะสมที่สุดของงานระเบิด ที่อ้างอิงจากกรณีศึกษาของเหมืองหินหลายแห่งในประเทศไว้ด้วย

Abstract

In planning processes of bench blasting for open pit mines or rock slope cut. Main objectives are to obtain the blasted volume of rock and their fragment sizes as prior set. Good plans of rock blasting, engineers have to be able to control the environment impacts within the threshold limit of blast standards. This article presents various steps of planning and computation in order to match the explosive consumption with the optimum geometric dimensions of bench blasting. Results of blast optimization based on case histories of quarry blasting in Thailand have also been presented.

1. คำนำ

การระเบิดที่นิยมใช้สำหรับพัฒนาหน้างานขุดเจาะเชิงวิศวกรรมเป็นการระเบิดแบบตัดชั้นตะพัก ทั้งนี้เพราะมีการใช้หลุมเจาะหลายหลุมเพื่อให้ได้ปริมาณหินจำนวนมากพอกับความต้องการ ก่อนส่งไปบด คัด ย่อย ในโรงโม่หิน การวางแผนเพื่อเจาะหลุมกับทำการระเบิดตัดชั้นตะพักเพียงชั้นเดียว (สำหรับงานตัดไหล่ทาง) หรือการตัดชั้นตะพักหลายชั้น (สำหรับงานพัฒนาในเหมืองเปิด) วิศวกรสามารถใช้แนวทางที่เสนอแนะในบทความนี้ เพื่อที่จะควบคุมปริมาณวัตถุระเบิดให้เหมาะพอดีกับรูปแบบเชิงเรขาคณิตของผังระเบิดได้

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ดำเนินการโดยคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ทั้งนี้ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยหลายแหล่ง ทั้งจากแหล่งทุนภายนอก (กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี) กับเงินทุนวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์กับของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป้าหมายหลักของการวิจัยเพื่อวางแผนกับควบคุมผลกระทบจากการระเบิดหิน เนื้อหาหลักของผลงานดังกล่าวมีการนำเสนออย่างเป็นขั้นตอนในบทความนี้

2. เทคนิคในการควบคุมงานระเบิดตัดชั้นตะพัก

2.1 ข้อปฏิบัติทั่วไป

ลำดับแรกของการวางแผนหน้างานขุดเจาะ จำเป็นต้องมีการสำรวจข้อมูลหน้างานระเบิด เพื่อวิเคราะห์หาค่าเชิงเสถียรภาพ และเพื่อแก้ไขอุปสรรคของการพัฒนา เช่น รอยแตกแยกในชั้นหิน หรือระดับน้ำใต้ดินที่อาจรบกวนงานขุดเจาะเป็นต้น นอกจากนี้ในแผนงานยังจำเป็นต้องเลือกว่าจะเปิดหน้างานในลักษณะแนวไหนที่เหมาะกับสภาพภูมิประเทศกับธรณีวิทยาของแหล่ง เช่น การเปิดหน้าอิสระหน้าเดียวหรือสองหน้า การวางแนวหลุมเจาะขนานกับแนวสันหิน (strike) หรือเอียงเป็นมุมแหลมกับแนวสันหิน เป็นต้น

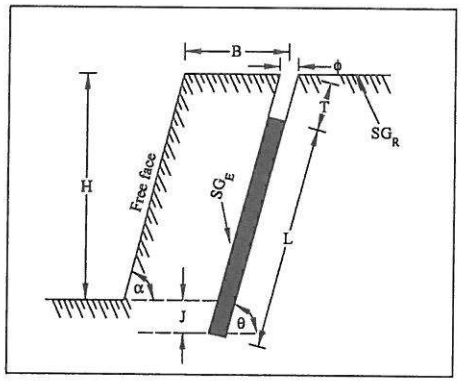
2.2 จำนวนหลุมเจาะระเบิดที่เหมาะสม

รูปแบบมาตรฐานของการเจาะระเบิดตัดชั้นตะพัก (bench blasting) สำหรับการเจาะแบบหลุมเอียง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ทั้งนี้ไม่ได้มีการแปลเป็นภาษาไทยไว้ แต่จะมีการเขียนทับศัพท์และอธิบายความหมายสั้น ๆ ไว้ในบทความ

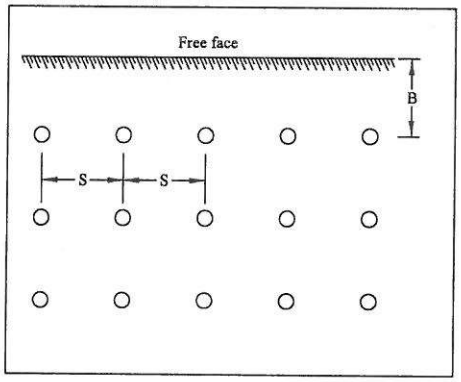
หลังจากได้วางแผนเบื้องต้นกับมีการบันทึกข้อมูลดิบภาคสนามมาพอสมควร ขั้นตอนแรกของการดำเนินงานระเบิดหิน วิศวกร

RECEIVED 18 October, 2003

ACCEPTED 6 February, 2004



รูป ก

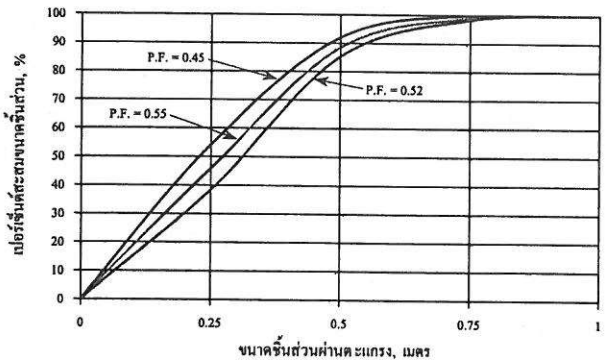


รูป ข

B	=	burden distance;	J	=	vertical sub-drill length
H	=	vertical bench height;	L	=	explosive and primer length
S	=	spacing distance;	T	=	stemming or collar length
SG_E	=	specific gravity of explosives;	SG_R	=	specific gravity of in-situ rock
ϕ	=	hole diameter;	α, θ	=	angles of cut and drill hole.

รูปที่ 1 แพตเทิร์นของการระเบิดแบบตัดชั้นตะพักของหลุมเจาะเอียง รูป ก. เป็นภาพตัดขวางชั้นตะพักของหลุมเจาะเอียง 1 หลุม ส่วน รูป ข. เป็นผังระเบิดของบริเวณหน้าตัดชั้นตะพัก ที่แสดงขนาดมิติของระยะห่างจากหน้าอิสระ (burden, B) กับระยะห่างระหว่างแถวของหลุมเจาะ (spacing, S)

หรือผู้ที่ปฏิบัติงานเจาะระเบิดจำเป็นต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นก่อนว่าต้องการระเบิดให้ได้ปริมาตรหินแต่ละครั้งเป็นปริมาณเท่าใด จากนั้นจึงมีการปฏิบัติการคำนวณอย่างมีระบบเพื่อเลือกจำนวนหลุมเจาะ เลือกรูปแบบของผังระเบิดกับค่ามิติเชิงเรขาคณิตของผังระเบิดที่สามารถควบคุมผลลัพธ์การระเบิดหินได้



รูปที่ 2 ตัวอย่างการตรวจวัดขนาดของชิ้นส่วนหินที่แตกหักหลังจากการระเบิด ที่เหมืองหินปูน บริษัทปูนซิเมนต์ไทย (มหาชน) จำกัด อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช ค่าขนาดชิ้นส่วนหินที่ผ่านตะแกรงมีการเปรียบเทียบกับค่าพาวเดอร์แฟคเตอร์หลายค่า (สง่า ตั้งชวาลและคณะ, 2542)

ขั้นตอนต่อมาของการวางแผนระเบิดตัดชั้นตะพัก นั่นคือการประเมินค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ (ประเทศไทยนิยมใช้ ammonium nitrate plus fuel oil: AN-FO) ค่านี้ถูกระบุเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักวัตถุระเบิด ต่อ ปริมาตรแน่น (dense volume) ของหินระเบิด หรือมีชื่อเรียกเฉพาะว่า powder factor (P.F.) จากเอกสารอ้างอิงหลายแหล่งร่วมกับข้อมูลดิบของการตรวจวัดภาคสนามชิ้นส่วนหินที่แตกหักจากการระเบิด (ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 2) ตัวเลขพาวเดอร์แฟคเตอร์ ที่เหมาะที่สุด ของการระเบิดหินในประเทศ มีค่าพิสัยอยู่ระหว่าง 0.45-0.55 กิโลกรัม (AN-FO) ต่อหนึ่งลูกบาศก์หินระเบิด

จากรูปที่ 1 ถ้าหากต้องการหาค่าตัวเลขจำนวนหลุมเจาะระเบิด (ค่า N) และให้ค่า k เป็นน้ำหนักวัตถุระเบิดหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อหลุม สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่า N กับค่าน้ำหนักวัตถุระเบิด ร่วมกับค่าปริมาตรของหินที่อยู่กับที่ (in-situ rock volume: V_R) ได้ดังสมการที่ 1 ดังนี้

$$N = \left[\frac{(P.F.)\ (V_R)}{k}\right] \qquad (1)$$

สมการหาจำนวนของหลุมเจาะระเบิดข้างต้นจะถูกนำมาเขียนเป็นสมการเชิงตรรกวิทยา (สมการที่ 2 และ 3) เริ่มต้นให้ค่าปริมาตรหินแน่นที่ต้องการผลิตเป็นค่า V_{req} (ค่านี้เป็นปริมาตรหินแน่นต่อการระเบิดหนึ่งครั้งตามที่ทางฝ่ายปฏิบัติการระเบิดได้วางแผนไว้) เนื่องจากในแต่ละแพตเทิร์นของผังหน้าตัดของการระเบิดตามที่วิศวกรเลือกใช้ มักมีการกำหนดจำนวนแถวของการเจาะหลุมระเบิด (row of blast holes)ไว้ให้เป็นค่าที่คงที่ นั่นคือค่าจำนวนแถวจะเป็นค่าที่ทราบ

ในการทำปฏิบัติการภาคสนาม ค่าความผิดพลาด (error) ของตัวเลขปริมาตรหินควรมีการกำหนดไว้ในระดับที่ยอมรับได้ ในที่นี้กำหนดตัวย่อค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรเป็น %V ค่านี้มีพิสัยที่ $\pm$ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่เปลี่ยนแปลงได้จากค่า V_{req} ที่กำหนดไว้ในครั้งแรก ทำให้แสดงเป็นสมการของค่าจำนวนหลุมเจาะที่ต่ำสุด N_{min} กับค่าจำนวนหลุมเจาะที่สูงสุด N_{max} ดังนี้

$$N_{min} = \frac{[(P.F.)_{min}]\ [1 - (\%V/100)]\ V_{req}}{k} \quad (2)$$

และ

$$N_{max} = \frac{[(P.F.)_{max}]\ [1 + (\%V/100)]\ V_{req}}{k} \quad (3)$$

คำอธิบายของพจน์ในสมการที่ 2 และ 3 ได้แก่

k = น้ำหนักวัตถุระเบิดของ AN-FO ต่อหนึ่งหลุมเจาะ หน่วยกิโลกรัม (เลขจำนวนเต็ม) ต่อหลุมเจาะ

N_{min} = จำนวนหลุมเจาะ (เลขจำนวนเต็ม) ที่ต่ำสุดต่อการระเบิดหนึ่งครั้ง

N_{max} = จำนวนหลุมเจาะ (เลขจำนวนเต็ม) ที่สูงสุดต่อการระเบิดหนึ่งครั้ง

$P.F._{min}$ = น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อปริมาตรหินแน่นที่ค่าต่ำสุด หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$P.F._{max}$ = น้ำหนักวัตถุระเบิดต่อปริมาตรหินแน่นที่ค่าสูงสุด หน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

V_{req} = จำนวนปริมาตรหินแน่นที่ฝ่ายปฏิบัติการวางแผนไว้ หน่วยลูกบาศก์เมตร

%V = ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของปริมาตรหินระเบิด (10 %) หน่วยเปอร์เซ็นต์

จากการที่ทราบค่าหลุมเจาะต่ำสุดและสูงสุด จะถูกใช้เป็นตัวเลขพื้นฐานในการวิเคราะห์เชิงตรรกวิทยาหาค่าของปริมาตรหินแน่นที่ค่าต่ำสุดและที่ค่าสูงสุดต่อไป

2.3 จำนวนปริมาตรหินระเบิดที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาปริมาตรหินแน่นที่เหมาะสมกับจำนวนรูเจาะ ซึ่งตามปกติผังหน้าระเบิดจะมีจำนวนรูเจาะเป็นอย่างน้อย 3 รูเจาะต่อหนึ่งแถว และตามรูปแบบทั่วไปของผังระเบิด จำนวนแถวมีอย่างน้อย 3 แถว (แต่ไม่ควรเกิน 4 แถว ด้วยเหตุผลด้านการสั่นสะเทือนและการแตกหักเกินพอดีหลังแนวระเบิด) ดังนั้นจึงให้ตัวเลขค่าจำนวนหลุมเจาะ N ในแต่ละผังระเบิดต้องเท่ากับหรือมากกว่า 9 หลุมเจาะ ทำให้เขียนค่าความสัมพันธ์เชิงตรรกวิทยาของปริมาตรหินกับค่า N ได้ดังนี้

$$(V_R)_N \leq \min_{value}\left[\left(\frac{kN}{(P.F.)_{min}}\right), \left\{1+\left(\frac{\%V}{100}\right)\right\} V_{req}\right] \quad (4)$$

และ

$$\max_{value}\left[\left(\frac{kN}{(P.F.)_{max}}\right), \left\{1-\left(\frac{\%V}{100}\right)\right\} V_{req}\right] \leq (V_R)_N \quad (5)$$

ความหมายของพจน์ในสมการที่ 4 และ 5 ได้แก่

$(V_R)_N$ = ปริมาตรหินแน่นที่คำนวณได้ตามค่า N ที่กำหนด หน่วยลูกบาศก์เมตร

$\min_{value}$ = ค่าตัวเลขปริมาตรหินต่ำสุด (ของตัวเลขปริมาตรคู่เดียวกัน) หน่วยลูกบาศก์เมตร

$\max_{value}$ = ค่าตัวเลขปริมาตรหินสูงสุด (ของตัวเลขปริมาตรคู่เดียวกัน) หน่วยลูกบาศก์เมตร

จากข้อเปรียบเทียบดังกล่าว สมการทั่วไป (generalized equations) ที่ใช้คำนวณค่าปริมาตรหินแน่นที่ต่ำสุด [ค่า $(V_R)_{min}$] กับค่าปริมาตรหินแน่นที่สูงสุด [ค่า $(V_R)_{max}$] ได้ดังนี้

$$(V_R)_{min} = \max_{value}\left[\left(\frac{kN}{(P.F.)_{max}}\right), \left\{1-\left(\frac{\%V}{100}\right)\right\} V_{req}\right] \quad (6)$$

และ

$$(V_R)_{max} = \min_{value}\left[\left(\frac{kN}{(P.F.)_{min}}\right), \left\{1+\left(\frac{\%V}{100}\right)\right\} V_{req}\right] \quad (7)$$

2.4 การประเมินมิติเชิงเรขาคณิตที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้เป็นการหาค่าระยะที่เป็นมิติเชิงเรขคณิต (geometric dimensions) ของการระเบิดแบบตัดชั้นตะพัก เงื่อนไขบังคับในการออกแบบระยะที่เป็นมิติของการเจาะระเบิด คือ ต้องสามารถทำให้หินเกิดการแตกหักได้ขนาดของชิ้นส่วนที่เหมาะสม กับสามารถควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเกณฑ์ไม่เกินขีดจำกัดมาตรฐาน หรือเป็นสิ่งที่ชุมชนผู้ได้รับผลกระทบยินยอมรับได้

การออกแบบหาค่าระยะมิติที่เหมาะสมนี้มีหลายแนวทางเลือก แต่ละแนวทางเลือกก็อาจมีผลทำให้ค่าผลเฉลยสุดท้าย (final solution) แตกต่างกันไป แนวทางที่ผู้เขียนบทความนำเสนอนี้จะสอดคล้องกับเรื่องปริมาตรหินระเบิดที่แสดงไว้ในสมการที่ 6 และ 7 และยังปรับค่าให้

เหมาะสมกับค่าความสูงในแนวดิ่งของชั้นตะพัก (bench height) ที่แต่ละหน้างานระเบิดอาจมีความสูงไม่เท่ากันด้วย

ระยะมิติแรกของผังหน้าตัดที่ควรหาเป็นลำดับแรก คือ ระยะเบอร์เดนแถวแรก (first burden) ซึ่งเป็นระยะตั้งฉากของหลุมเจาะระเบิดแถวแรกกับหน้าอิสระ ทั้งนี้อิงจากข้อเสนอแนะของ Konya (page 70, 1995) ที่กำหนดให้

$$B_{cal} = 0.012\left[\frac{2\,SG_E}{SG_R}+1.5\right]\phi \qquad (8)$$

พจน์ของสมการที่ 8 มีความหมายดังนี้

B_{cal} = ระยะเบอร์เดนแถวแรก หน่วยเมตร (เป็นเลขจำนวนเต็มของเมตร หรือครึ่งของเมตร เท่านั้น)

SG_E = ความถ่วงจำเพาะของวัตถุระเบิด

SG_R = ความถ่วงจำเพาะของหินระเบิด

ϕ = เส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะระเบิด หน่วยมิลลิเมตร

ขั้นตอนต่อมาของการหาระยะมิติเชิงเรขาคณิต เป็นการหาค่า T ที่เป็นระยะความยาวของการปิดหลุมเจาะ (stemming distance) กับการหาค่า J ที่เป็นระยะการเจาะแนวดิ่งที่ต่ำกว่าพื้น (sub-drill distance) ทั้งนี้อิงจากงานวิจัยของสง่า ตั้งชวาล (2543 ก) กำหนดไว้ ดังนี้

$$\text{Stemming values, } T = \min_{value}(0.7\,B,\ 3) \qquad (9)$$

และ

$$\text{Sub-drill values, } J = \begin{cases} \min_{value}(0.3\,B,\ 1) & \text{if } H < 10 \text{ meters} \\ \min_{value}(0.3\,B,\ 1.5) & \text{if } 10 \le H < 15 \\ \min_{value}(0.3\,B,\ 2) & \text{if } 15 \le H < 20 \end{cases} \qquad (10)$$

ให้สังเกตว่าพจน์ของค่า $\min_{value}$ หมายถึง การกำหนดให้เลือกค่าที่น้อยหรือค่าที่ต่ำกว่าเสมอ เมื่อทำการคำนวณได้ค่า 1 คู่ (ที่อยู่ในวงเล็บ)

2.5 ตัวอย่างการประเมินหาผังหน้าตัดของงานระเบิดที่เหมาะสม

จากแนวทางที่ได้ระบุมา ผู้ปฏิบัติการหน้างานระเบิดสามารถที่จะใช้เครื่องคิดเลขธรรมดาคำนวณหาผังระเบิดที่เหมาะสมสำหรับสภาวะทางภูมิประเทศและสภาวะทางธรณีวิทยาของแหล่งหินแต่ละบริเวณได้ ผู้เขียนบทความขอเสนอกรณีตัวอย่างของเหมืองหินปูนขนาดใหญ่ ที่ใช้หลุมเจาะระเบิดขนาดใหญ่ (200 มม.) และความสูงของชั้นตะพักที่สูงถึง 20 เมตร เพื่อนำมาคำนวณตามแบบจำลองหน้าระเบิดที่อิงตามบทความนี้

1. <u>โจทย์ตัวอย่าง</u>

กำหนดให้มีการปฏิบัติการระเบิดหินปูนที่มีหน้าอิสระหน้าเดียว ชั้นตะพักมีความสูงแนวดิ่ง 20 เมตร ความต้องการให้ได้หินมีปริมาตรแน่น 15,000 ลูกบาศก์เมตรต่อการระเบิดหนึ่งครั้ง จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้ค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุระเบิด (ANFO) เท่ากับ 0.82 และความถ่วงจำเพาะของหินปูน 2.68 ส่วนข้อกำหนดของการเจาะระเบิด เป็นการเจาะรูเอียงทำมุม 75 องศาจากแนวราบ หลุมเจาะขนานกับหน้าความลาดและแนวสันหิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลุมเจาะ 200 มม. และเจาะเพียง 3 แถว

<u>ผลเฉลย</u>

1. โจทย์นี้สามารถใช้รูปที่ 1 แทนได้เพียงแต่เพิ่มค่ามุมกับค่าตัวแปรอื่นลงในรูป และก่อนทำการคำนวณ ยังมีสมมุติฐานที่ผู้ปฏิบัติการต้องใช้อ้างอิงเพิ่มเติม ได้แก่ ค่าพาวเดอร์แฟคเตอร์ มีพิสัยระหว่าง 0.45 ถึง 0.55 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของปริมาตรแน่น เท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์

2. ในเชิงการสั่นสะเทือนกับผลกระทบอื่นที่เกิดจากการระเบิดหิน อัตราส่วนของความสูงชั้นตะพักกับระยะเบอร์เดน (อัตราส่วนค่า H/B) ควรให้มีค่าระหว่าง 3-4 จึงจะเป็นค่าที่เหมาะสม เพราะถ้า H/B ต่ำหรือสูงกว่านี้ ผลลัพธ์การแตกหักของหินไม่ดี และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากค่า B ยังไม่ทราบจึงต้องคำนวณค่าระยะเบอร์เดนแถวแรกจากสมการของ Konya โดยการแทนค่าตัวเลขขนาดหลุมเจาะกับค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุระเบิดกับของหินลงไปในสมการที่ 8 จะได้ค่าระยะเบอร์เดนแถวแรก เป็น 5.07 เมตร

ตามข้อสมมุติฐานของแนวทางในบทความ ค่าระยะเบอร์เดนต้องเป็นเลขจำนวนเต็มของเมตรหรือเป็นเลขครึ่งของเมตร นั่นคือค่าระยะเบอร์เดนแถวแรก มีโอกาสเป็นได้ทั้งที่ค่า 5.0 หรือ 5.5 เมตร และเมื่อตรวจสอบค่าอัตราส่วน H/B พบว่า ตัวเลข 5.0 หรือ 5.5 เมตรจะมีอยู่ในเกณฑ์ที่ยินยอมรับได้ (H/B อยู่ระหว่าง 3-4) ดังนั้นค่าระยะเบอร์เดนแถวแรกจึงใช้เป็นบรรทัดฐานเป็น 5.0 หรือ 5.5 เมตร อย่างไรก็ตามในเชิงปฏิบัติงานระเบิด ระยะเบอร์เดนแถวแรกไม่จำเป็นจะต้องเท่ากับระยะเบอร์เดนแถวที่ 2 และแถวที่ 3 ปกติระยะเบอร์เดนแถวแรกจะสั้นกว่า เพื่อให้ผลลัพธ์ของการระเบิดมีขนาดชิ้นส่วนหินตามต้องการ กับช่วยเพิ่มระยะกระเดื่นของชิ้นส่วนมากองรวมกันบริเวณที่ไม่ใกล้หน้าระเบิดมาก

3. ขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณหาค่าระยะมิติเชิงเรขาคณิตอื่นที่เหมาะสม ซึ่งในที่นี้จะแสดงการคำนวณค่าเฉพาะกรณีที่ ระยะ B = 5.0 เมตร (กรณีของ B = 5.5 เมตรก็หาค่าทำนองเดียวกัน)

- ทำการหาค่าระยะปิดอัดส่วนบนของหลุมเจาะ หรือค่า T

$T = \min_{value} = (0.7\,B,\ 3) = [(0.7 \times 3),\ 3]$ เมตร

= 3 เมตร (เลือกค่าน้อย)

- ทำการหาค่าระยะแนวดิ่งที่เจาะหลุมเจาะต่ำกว่าพื้น หรือค่า J

$J = \min_{value} = (0.7\,B, 2) = [(0.7 \times 3), 2]$ เมตร

$= 1.5$ เมตร (เลือกค่าน้อย)

4. ขั้นตอนถัดมา เป็นการคำนวณหาน้ำหนักวัตถุระเบิดที่เหมาะสม ในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณค่าเฉพาะกรณีที่ ระยะ B = 5.0 เมตร (กรณีของ B = 5.5 เมตรก็หาค่าทำนองเดียวกัน) ทั้งนี้เป็นการหาค่า k ที่เป็นค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดของหลุมเจาะเดี่ยว ทำได้โดยการแทนค่า T = 3 และ J = 1.5 เมตรและใช้ค่าความถ่วงจำเพาะวัตถุระเบิด กับขนาดของหลุมเจาะกับค่ามุมเอียงของการเจาะตามโจทย์ จะคำนวณได้ค่า k = 493.4 กิโลกรัมซึ่งตามข้อกำหนดของสมการที่ 1 ค่า k ต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม ในเชิงอนุรักษ์จะเลือกค่า k = 494 กิโลกรัม (แทนที่จะเป็น 493 กิโลกรัม)

5. จากการที่ทราบค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดต่อหลุม ที่มีความสัมพันธ์กับระยะมิติเชิงเรขาคณิตอื่นของการระเบิดแบบตัดชั้นตะพัก ทำให้เหลือการคำนวณหาค่าจำนวนหลุมเจาะกับหาค่าปริมาตรหิน ในขั้นตอนนี้เป็นการหาตัวเลขจำนวนหลุมเจาะเฉพาะกรณีที่ ระยะ B = 5.0 เมตร (กรณีของ B = 5.5 เมตรก็หาค่าทำนองเดียวกัน) นั่นคือแทนค่าที่ทราบหรือคำนวณได้ลงในสมการที่ 2 และ 3

$$N_{min} = \frac{[(P.F.)_{min}]\,[1 - (\%V/100)]\,V_{req}}{k} = \frac{[0.45]\,[1 - (10/100)]\,15{,}000}{494}$$

$$N_{max} = \frac{[(P.F.)_{max}]\,[1 + (\%V/100)]\,V_{req}}{k} = \frac{[0.55]\,[1 + (10/100)]\,15{,}000}{494}$$

ผลลัพธ์ของค่าจำนวนหลุมเจาะมี 2 ค่า นั่นคือ 12.30 กับ 18.37 ซึ่งทำให้เป็นเลขจำนวนเต็ม ได้ค่าหลุมเจาะที่คำนวณได้เป็น 12 กับ 18 หลุมเจาะ แต่เมื่อพิจารณาของกรณีเจาะ 3 แถวและแถวละ 3 หลุม แสดงว่าค่า $N \geq 9$ และเลข 3 หารลงตัว ได้แก่ 15 หลุมเจาะกับ 18 หลุมเจาะ (ค่าของ 12 หลุมเจาะใช้ไม่ได้ เพราะว่ามีค่าน้อยกว่า N_{min} และค่าของ 21 หลุมเจาะใช้ไม่ได้ เพราะว่ามีค่ามากกว่า N_{max})

เมื่อวิเคราะห์ผลเชิงค่าใช้จ่าย การเจาะหลุมเพียง 15 หลุมเจาะจะใช้จ่ายต่ำกว่าการเจาะหลุมถึง 18 หลุมเจาะ ดังนั้นจึงเหลือค่า N เพียงค่าเดียวที่จะไปใช้วิธีลองผิด-ถูก เพื่อหาปริมาตรหินแน่น นั่นคือ N = 15 หลุมเจาะ

6. นำค่า N = 15 จากกระบวนการคำนวณก่อนหน้านี้ มาแทนค่าในสมการที่ 6 และ 7 เพื่อหาปริมาตรหินแน่นที่เหมาะสมซึ่งเป็นกรณีเฉพาะที่ระยะ B = 5.0 เมตร (กรณีของ B = 5.5 เมตร ก็ใช้วิธีหาค่าทำนองเดียวกัน) นั่นคือจะได้

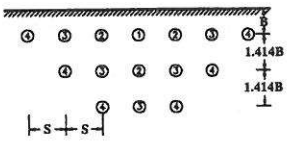
$$(V_R)_{min} = \max_{value}\left[\left(\frac{kN}{(P.F.)_{max}}\right), \left\{1 - \left(\frac{\%V}{100}\right)\right\} V_{req}\right] = \max_{value}\left[\left(\frac{494 \times 15}{0.55}\right), \left\{1 - \left(\frac{10}{100}\right)\right\} 15{,}000\right]$$

$$(V_R)_{max} = \min_{value}\left[\left(\frac{kN}{(P.F.)_{min}}\right), \left\{1 + \left(\frac{\%V}{100}\right)\right\} V_{req}\right] = \min_{value}\left[\left(\frac{494 \times 15}{0.45}\right), \left\{1 + \left(\frac{10}{100}\right)\right\} 15{,}000\right]$$

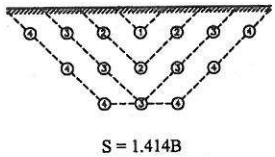
ผลลัพธ์ภายหลังจากการเลือกค่าจำนวนปริมาตรหินแน่น จะมี 2 ค่า นั่นคือ 13,500 ลูกบาศก์เมตร [ตัวเลขค่าสูงของ $(V_R)_{min}$] กับ 16,467 ลูกบาศก์เมตร [ตัวเลขค่าต่ำของ $(V_R)_{max}$]

7. ขั้นตอนต่อไป วิศวกรสามารถนำไปเลือกเทียบกับรูปแบบแพตเทิร์นมาตรฐานของการระเบิด (blast pattern) ซึ่งมักมีข้อกำหนดเพิ่มเติมของผังระเบิดเกี่ยวกับค่าระยะห่างระหว่างแถวหรือเบอร์เดน (B) กับค่าระยะห่างระหว่างหลุมเจาะหรือสเปซชิง (S) ตัวอย่างเช่น กำหนดให้ S = 1.414 B หรือ S = 2 B เป็นต้น

ในส่วนของทีมงานวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ใช้วิธีการค้นหาจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการระเบิดหินและปรับปรุงเพิ่มเติมจากผลงานของ Konya (pages 122-126, 1995) เพื่อให้ได้รูปแบบแพตเทิร์นเหมาะสมกับงานระเบิดหินในประเทศ ทั้งนี้แบ่งเป็นการระเบิดหน้าอิสระหน้าเดียว 5 แบบ (เป็นแบบ V-cut จำนวน 2 แพตเทิร์น กับเป็นแบบ box-cut จำนวน 3 แพตเทิร์น) และเป็นการระเบิดหน้าอิสระสองหน้า 4 แบบ (เป็นแบบ square corner cut จำนวน 1 แพตเทิร์น กับเป็นแบบ angle corner cut จำนวน 3 แพตเทิร์น)



รูป ก



รูป ข

รูปที่ 3 ผังภาพของการออกแบบแพตเทิร์น V-cut with angle corner ค่า S = 1.414 B และระยะเบอร์เดนไม่เท่ากันทุกแถว ค่าระยะเบอร์เดนแถวแรกจะสั้นที่สุด รูป ก. แสดงระยะมิติของผังหน้าระเบิด ส่วนรูป ข.เป็นการแสดงขอบเขตของการแตกหักและทิศทางของการถ่วงจังหวะ ตัวเลขต่ำของแก๊ปถ่วงจังหวะ มีการจุดระเบิดก่อน

เนื่องจากเนื้อที่ของบทความมีจำกัด ผู้เขียนจึงนำเสนอผลเฉลยของโจทย์ตัวอย่างที่เป็นผังระเบิดหน้าอิสระหน้าเดียว และแสดงเฉพาะ

ตารางที่ 1 การประมวลผลของการหาค่าปริมาตรหินแน่นที่ใกล้เคียงกับค่าปริมาตรที่ได้วางแผนไว้ (15,000 ลูกบาศก์เมตร) ค่าตัวเลขการคำนวณที่ระบุในตารางเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณจากรูปแบบแพตเทิร์น V-cut with angle corner โดยที่ไม่ได้แสดงผลการคำนวณรูปแบบแพตเทิร์นอื่นอีก 4 แบบ (ค่า B เป็นระยะเบอร์เดนแถวแรก ส่วนค่า H เป็นความสูงแนวดิ่งชั้นตะพักคงที่ = 20 เมตร)

1.1 ข้อมูลเข้ากับการคำนวณจากสมการแบบจำลอง

ระยะ B (เมตร)	ระยะ T (เมตร)	ระยะ J (เมตร)	ค่า K (กก.)	อัตราส่วน H/B	จำนวนหลุม (N)	ปริมาตรแน่น (ม.^{3})	
						ต่ำสุด	สูงสุด
5.0	3.0	1.5	494	4.00	15	13,500	16,467
5.5	3.0	1.5	494	3.64	15	13,500	16,467

1.2 ข้อมูลเปรียบเทียบกับแพตเทิร์นมาตรฐานกับการคำนวณเพิ่มเติม

ระยะ B (เมตร)	ระยะ S (เมตร)	ปริมาตรแน่น (ม.^{3}) V-cut with angle corner
5.0	7.0	12,540
5.5	7.5	14,555

ในส่วนที่เป็นผลลัพธ์สำหรับขั้นตอนสุดท้ายที่มีผลของค่าตัวเลขปริมาตรหินแน่นที่ความผิดพลาดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ และมีความใกล้เคียงกับตัวเลขปริมาตรหินแน่นที่วางแผนไว้ (V_{req}) เท่ากับ 15,000 ลูกบาศก์เมตร มากที่สุด นั่นคือแพตเทิร์นแบบ V-cut with angle corner มีปริมาตรแน่น = 14,555 ลูกบาศก์เมตร และผังหน้าตัดของการระเบิดหินเป็น B x S = 5.5 x 7.5 เมตร รายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 3 กับตารางที่ 1

3. การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปออกแบบเพื่อควบคุมงานระเบิด

3.1 ข้อปฏิบัติทั่วไป

ตามที่ได้แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ของการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยกับการนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับรูปแบบแพตเทิร์นมาตรฐาน จะเห็นว่ามีความยุ่งยากและต้องทำการคำนวณซ้ำหลายครั้ง โอกาสที่การคำนวณจะเกิดการผิดพลาดเป็นไปได้ง่าย และยังเสียเวลาที่ใช้ในการคำนวณมากพอสมควร ทีมงานวิจัยจึงได้เสนอแนะโปรแกรมสำเร็จรูป (packaged program) เพื่อความสะดวกรวดเร็วและหาผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ

3.2 รูปแบบทั่วไปของโปรแกรมสำเร็จรูป

โปรแกรมที่พัฒนาจากโครงการวิจัย มีชื่อว่า Blast Design (สง่า ตั้งชวาล, 2543 ก และ 2543 ข) ใช้ตัวแปลโปรแกรมของ Delphi compiler โปรแกรมเขียนขึ้นมาเพื่อรองรับการป้อนข้อมูลเข้า (input data) ที่เป็นค่าระยะมิติเชิงเรขาคณิตของการเจาะระเบิดแบบตัดชั้นตะพัก ค่าปริมาตรหินที่วางแผนไว้ ค่าคุณสมบัติของวัตถุระเบิด และค่าตัวแปรอื่นที่จำเป็น เช่นความสูงชั้นตะพัก เป็นต้น จากนั้นในกระบวนการคำนวณภายในโปรแกรม มีการคำนวณรูปแบบแพตเทิร์นต่าง ๆ และแสดงค่าของผลลัพธ์เป็นข้อมูลออก (output) กับเป็นภาพกราฟิกของผังระเบิดรูปแบบแพตเทิร์นที่เหมาะสม (ของหน้าอิสระเดียวหรือสองหน้าอิสระ) ที่กำหนดให้มีความผิดพลาดของปริมาตรแน่นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งแสดงค่าระยะ B กับ S ที่สอดคล้องกับแพตเทิร์นนั้น ๆ แสดงค่าระยะมิติเชิงเรขาคณิตอื่น และค่าน้ำหนักวัตถุระเบิดที่ใช้ทั้งหมดสำหรับแต่ละผังระเบิด รวมทั้งค่าพาวเดอร์แฟคเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์สุดท้าย อีกด้วย

ในบางกรณีที่การระเบิดอาจมีผังหน้าตัดระเบิดที่สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ตั้งไว้เกิน 1 แพตเทิร์น ซึ่งถ้าเกิดขึ้นเป็น 2 แพตเทิร์น โปรแกรมสำเร็จรูปจะแสดงผลไว้ทั้ง 2 รูปแบบ เป็นหน้าที่ของวิศวกรหรือผู้ปฏิบัติการหน้างานระเบิดที่จะเลือกรูปแบบของแพตเทิร์นไหน ที่สอดคล้องกับสภาวะทางภูมิประเทศกับสภาวะทางธรณีวิทยา รวมทั้งให้สอดคล้องกับเครื่องจักรกลที่ปฏิบัติงานในบริเวณ และมีผลทำให้การปฏิบัติการเจาะระเบิดโดยรวมประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

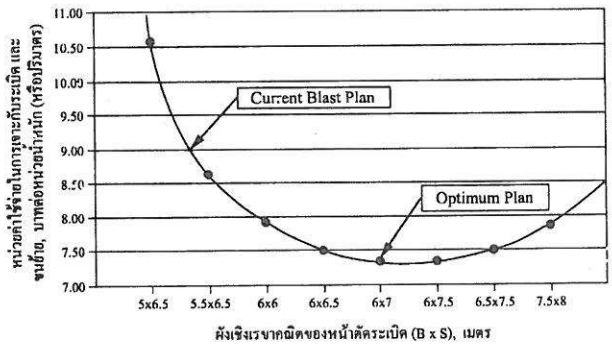
4. การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของผังระเบิดเชิงค่าใช้จ่าย

ถ้าหากแต่ละหน้างานระเบิด มีการบันทึกรายละเอียดของค่าใช้จ่ายไว้ทุกขั้นตอน ทั้งค่าใช้จ่ายในออฟฟิศกับค่าใช้จ่ายภาคสนาม วิศวกรสามารถหาหน่วยค่าใช้จ่ายย่อยของการปฏิบัติงานแต่ละส่วนได้ เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายต่อตัน (หรือปริมาตรแน่น) ที่ผลิตหินได้ ก็สามารถทำการปรับแต่งเป็นกราฟของการประเมินหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงานได้ ตามขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. หน่วยค่าใช้จ่ายของการเจาะระเบิด (drilling and blasting costs)ที่ใช้ในการผลิตหินหนึ่งหน่วย (ปริมาตรหรือน้ำหนัก) สำหรับผังหน้าระเบิดแพตเทิร์นรูปแบบหนึ่ง ถูกนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับผังหน้าตัดของการเจาะระเบิด (ค่า B x S) ที่แปรเปลี่ยนไปหลายค่า

2 เพื่อให้การประเมินผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น ตัวเลขหน่วยค่าใช้จ่ายของการขนย้ายกับการลำเลียง (transporting and hauling costs) ที่ใช้ในการย้ายหินหนึ่งหน่วย สำหรับผังหน้าระเบิดรูปแบบแพตเทิร์นหนึ่ง ถูกนำมารวมกับตัวเลขหน่วยค่าใช้จ่ายของการเจาะระเบิด ทำให้ได้ตัวเลขใหม่ที่เป็นหน่วยค่าใช้จ่ายทั้งหมด (total unit cost) ของการพัฒนาหน้างานขุดเจาะ แล้วนำมาพล็อตเปรียบเทียบกับผังหน้าตัดของการเจาะระเบิด (ค่า B x S) อีกครั้ง แล้วลากเส้นกราฟเพื่อคาดคะเนหาผังหน้าตัดเชิงค่าใช้จ่าย (ในหนึ่งรูปแบบแพตเทิร์นของการระเบิดหินได้) ที่เหมาะที่สุด หรือเรียกว่า optimum blast plan สำหรับการปฏิบัติการขุดเจาะในบริเวณหนึ่ง

ตัวอย่างที่ได้จากกรณีศึกษาของการระเบิดรูปแบบแพตเทิร์น box cut with angle corner (สง่า ตั้งชวาล, 2546) ของเหมืองหินปูนขนาดใหญ่ ที่มีการรวบรวมข้อมูลเชิงค่าใช้จ่ายไว้อย่างต่อเนื่องหลายปี กราฟการประเมินหาจุดเหมาะสมที่สุดของการเปิดหน้างานแสดงไว้ในรูปที่ 4 แต่เนื่องจากข้อมูลการผลิตเป็นความลับของบริษัท กราฟของรูปที่ 4 จึงมีการดัดแปลงรูปกราฟไปจากเดิมเล็กน้อย เป็นเพียงการแสดงแนวคิดแทน



รูปที่ 4 กราฟการคาดคะเนหาผังหน้าตัดระเบิดที่เหมาะสมที่สุด โดยการเปรียบเทียบกับหน่วยค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการเปิดหน้างานขุดเจาะ

ตามปกติตำแหน่งของจุดต่ำสุดของกราฟ ควรจะเป็นผังหน้าระเบิดที่เหมาะที่สุด เพราะว่าค่าใช้จ่ายในการผลิตหินหนึ่งหน่วย (น้ำหนักหรือปริมาตร) ต่ำสุด แต่อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริง ยังมีเงื่อนไขบังคับหลายอย่างในภาคสนาม เช่น ในบางครั้งสภาวะภูมิประเทศไม่เอื้ออำนวยให้มีการระเบิดหน้าอิสระหน้าเดียวเพราะหน้างานอยู่ตรงมุมอับ ทำให้ต้องปรับเปลี่ยนแผนงานใหม่ เป็นการเจาะระเบิดสองหน้า หรือบางทีต้องให้มีการถ่วงจังหวะในลักษณะที่ชิ้นส่วนหินระเบิดมากองตรงกลางหน้าระเบิด เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อชุมชนข้างเคียง เป็นต้น

5. สรุปแนวคิดและข้อเสนอแนะ

เทคนิคของการออกแบบระเบิดเพื่อตัดชั้นตะพักของมวลสารมีการนำเสนอในรูปแบบที่สามารถใช้คำนวณด้วยเครื่องคิดเลขธรรมดา ทั้งนี้ข้อมูลเข้าของการคำนวณหาจุดที่เหมาะสม เป็นข้อมูลปกติภาคสนามที่มีการบันทึกไว้ตามหน้างานระเบิด สมมุติฐานของการควบคุมผลลัพธ์การแตกหักของหินให้ได้ชิ้นส่วนที่พอดีกับความต้องการ และเพื่อควบคุมผลลัพธ์ของงานระเบิดไม่ให้เกิดผลกระทบเกินขีดจำกัดมาตรฐานการวิจัยมีการอ้างอิงจากเอกสารเฉพาะของการระเบิดหิน กับเป็นผลจากการสังเกตการณ์จริงในภาคสนามของทีมงานวิจัย

วิศวกรและผู้ปฏิบัติงานภาคสนามสามารถจัดการควบคุมค่าใช้จ่ายของการเจาะระเบิดได้ และสามารถควบคุมค่าขนย้ายวัสดุภายหลังจากการระเบิดเสร็จสิ้น ในระหว่างการปฏิบัติงานถ้าหากมีการบันทึกผลของการใช้จ่ายไว้ค่อนข้างละเอียดทุกขั้นตอน แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผังหน้าตัดของการระเบิดตามรูปแบบแพตเทิร์นที่กำหนดไว้ ณ ตำแหน่งผังหน้าตัดที่มีค่าใช้จ่ายโดยรวมต่ำสุดต่อการผลิตหินหนึ่งหน่วย แสดงว่าผังหน้าตัดนั้นเป็นรูปแบบเชิงเรขาคณิตที่เหมาะสมที่สุด ผลเฉลยในกรณีนี้อาจมีผลลัพธ์ได้เกิน 1 ผังหน้าตัด จึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานภาคสนามที่จะตัดสินใจเลือกผังหน้าตัดใด

6. กิตติกรรมประกาศ

เงินทุนวิจัยของโครงการ ในเรื่องการระเบิดและการควบคุมผลกระทบหลายโครงการที่ผู้เขียนบทความเป็นหัวหน้าโครงการ ได้รับการสนับสนุนจาก กองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี และจากเงินวิจัยงบประมาณแผ่นดิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณต่อคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่หลายท่านช่วยร่วมวิจัยด้วย ตลอดจนศิษย์เก่าที่ปัจจุบันทำงานเป็นวิศวกรเหมืองแร่ และวิศวกรโยธา จำนวนเกิน 10 ท่าน ผู้เขียนบทความขอขอบคุณต่อวิศวกรและผู้ปฏิบัติงานภาคสนามในเหมืองแร่และเหมืองหินหลายแห่ง ที่ตั้งกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปทุกภาคในประเทศได้มีความเอื้ออาทรและให้ความสนับสนุนด้วยดีต่อทีมงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

1. สง่า ตั้งชวาล, สุรพล ภู่วิจิตร, ภิญโญ มีชำนะ และ สมศักดิ์ สายสินธุ์ชัย "ผลกระทบอันเนื่องมาจากการใช้วัตถุระเบิด ในงานเหมืองแร่และเหมืองหิน" รายงานหลักฉบับสมบูรณ์ นำเสนอต่อกองการเหมืองแร่ กรมทรัพยากรธรณี พ.ศ. 2542 จำนวน 176 หน้า พร้อมแผ่นโปรแกรมสำเร็จรูป
2. สง่า ตั้งชวาล "ความน่าเชื่อถือในการออกแบบระเบิดหิน และควบคุมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม" รายงานฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2542 ถ จำนวน 189 หน้า พร้อมแผ่นโปรแกรมสำเร็จรูป

3. สง่า ตั้งชวาล "การวางแผนทั้งระบบในการเปิดหน้างานขุดเจาะโดยใช้วัตถุระเบิด" รายงานฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2542 ข จำนวน 170 หน้า

4. สง่า ตั้งชวาล "บ่อเหมืองเปิดที่เหมาะที่สุด สำหรับงานขุดเจาะในเหมืองแร่และเหมืองหิน" รายงานฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2546 จำนวน 254 หน้า พร้อมแผ่นโปรแกรมสำเร็จรูป

5. Konya, C.J. "Blast Design" Intercontinental Development, Montville, Ohio, U.S.A., 1995, 230 pages.

6. Tangchawal S. "Improved Stability Evaluation and Blast Planning in Quarries" Asean Journal on Science & Technology for Development, Vol. 19, No. 1, June 2002, pages 17-28.

7. Tangchawal S. "Blast Planning & Vibration Evaluation in Quarries" Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 21, No. 11, November 2002, pages 1714-1719.