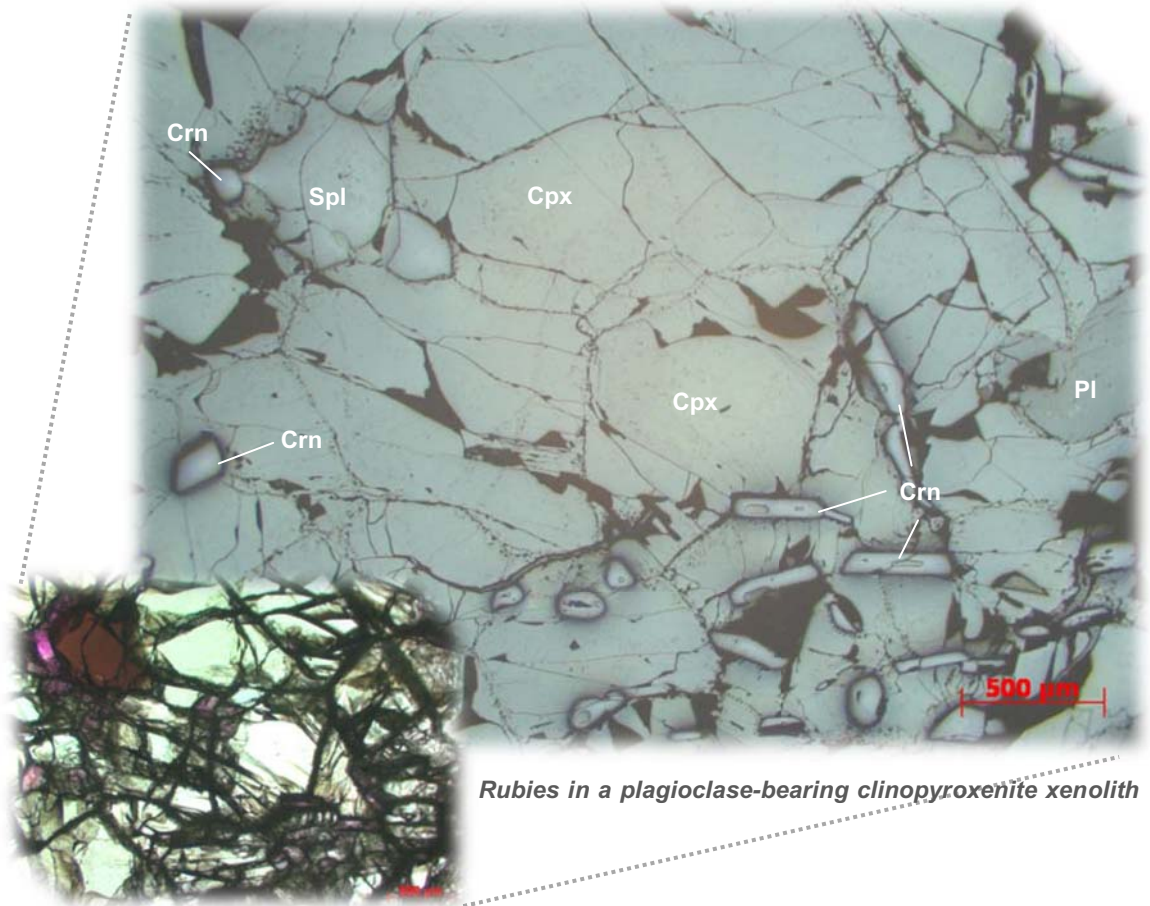


# รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การกำเนิดของทับทิมสยามและหินแปรกล่อมที่เกี่ยวข้องกับพลอย:  
ในความสัมพันธ์ต่อหินบะซอลต์ชนิดนำพลอย



สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การกำเนิดของทับทิมสยามและหินแปลกปลอมที่เกี่ยวข้องกับพลอย:  
ในความสัมพันธ์ต่อหินบะซอลต์ชนิดนำพลอย

นาย ธีรชัย เชื้อเหล่านิช  
ผศ. ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์  
รศ. ดร. วิสุทธิ์ พิสุทธิอาณนที

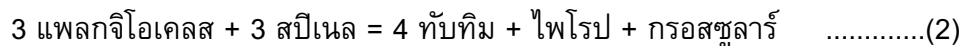
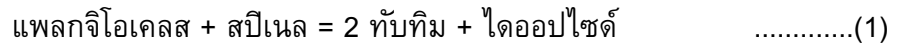
กรมทรัพยากรธรณี  
ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อโครงการ: TRG4680004  
ชื่อโครงการ: การกำเนิดของทับทิมสยามและหินแปลกปลอมที่เกี่ยวข้องกับ  
พลอย: ในความสัมพันธ์ต่อหินบะซอลต์ชนิดนำพลอย  
ชื่อนักวิจัย: นายธวัชชัย เชื้อเหล่านิช สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี  
E-mail Address: [t.chualaowanich@gmail.com](mailto:t.chualaowanich@gmail.com)  
ระยะเวลาโครงการ: 1 กรกฎาคม 2546 – 30 กันยายน 2554

หย่อมหินบะซอลต์ที่พบในบริเวณอำเภอไร่ จังหวัดตราด จัดเป็นหินเนื้ออัลคาไล ชนิดบาชานด์ ซึ่งผลการศึกษาบ่งชี้ชัดว่าเป็นหินตัวกลางนำพลอยทับทิมจากชั้นหินแปรชั้นสูง ระดับลึกขึ้นมาสู่ผิวโลกในรูปของหินแปลกปลอม โดยหินแปลกปลอมอัมพลอยนี้ จัดอยู่ในหินประเภท "plagioclase-bearing garnet clinopyroxenite" ที่มีลักษณะเนื้อหินแสดงสมดุลภาวะทางแร่ระหว่างแร่องค์ประกอบหลัก (ซึ่งได้แก่ แร่โคลโนไพรอกซีน ชนิดไดออปไซด์) กับ แร่รอง (ซึ่งได้แก่ แร่คอร์ันดัม และการ์เนท) โดยมีแพลกจิโอเคลส และสปิเนล เกิดร่วมด้วยในสัดส่วนที่หลากหลาย จากผลการศึกษาเชิงศิลาวรรณนาและศิลาเคมี บ่งชี้ว่ากระบวนการก่อกำเนิดทับทิมนี้เป็นผลจากการแปรสภาพระดับหินแกรนูลไลท์ (granulite facies) ที่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อของชั้นเปลือกโลกส่วนล่างกับชั้นเนื้อโลกส่วนบน (ประมาณ 50 - 60 กม. ใต้ผิวโลก) ภายใต้ช่วงอุณหภูมิประมาณ 1,100 - 1,200°C และความดันประมาณ 1.5 - 1.8 GPa โดยสัมพันธ์กับปฏิกิริยาทางแร่หลักๆ ที่เป็นไปได้ 2 ปฏิกิริยา คือ:



และผลการหาอายุสัมบูรณ์  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ของหินบะซอลต์ บ่งว่าในบริเวณนี้เคยมีการปะทุของแมกมา บะซอลต์นำพลอยทับทิมเกิดขึ้นมาแล้วเป็นช่วงๆ ไม่ต่ำกว่าสี่ครั้งตลอดช่วงปลายมหายุคใหม่ (Late Cenozoic) คือ เมื่อประมาณ  $2.38 \pm 0.16$ ,  $1.58 \pm 0.05$ ,  $1.33 \pm 0.09$  และ  $0.69 \pm 0.01$  ล้านปีก่อน ตามลำดับ ซึ่งจัดว่าเป็นแหล่งหินบะซอลต์นำพลอยที่มีอายุอ่อนกว่าบริเวณอื่นๆ ของประเทศ

นอกจากนี้ผลที่ได้รับทั้งหมดในงานวิจัยนี้ ยังสนับสนุนแนวคิดที่ว่าพลอยทับทิม และแซปไฟร์ที่พบในไทยมีความต่างกันเชิงปฏิกิริยาการก่อตัวของแร่ ที่อาจรวมถึงชนิดหินดั้งเดิมและแหล่งที่มาของหินต้นกำเนิด

**คำสำคัญ:** ทับทิม, หินแปลกปลอมอัมพลอย, บะซอลต์เนื้ออัลคาไล, อายุ  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , ตราด

## Abstract

---

**Project Code:** TRG4680004

**Project Title:** Petrogenesis of Siamese Ruby and Corundum-related Xenoliths:  
In Relation to their Basaltic Host

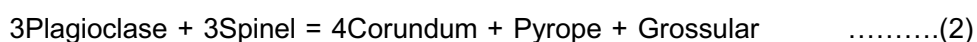
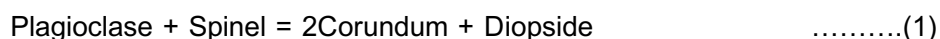
**Investigator:** Mr. Tawatchai Chualaowanich  
Bureau of Mineral Resources, Department of Mineral Resources

**E-mail Address:** [tc\\_chaeng@yahoo.com](mailto:tc_chaeng@yahoo.com)

**Project Period:** 1 July 2003 – 30 September 2010

Alkali basalts exposed in the vicinity of Borai area, Trat province are classified as basanites. These basalts patches are proof be a corundum carrier taking ruby from existing ruby-bearing strata formed at depth up to the earth's surface in a form of xenoliths.

The ruby-bearing xenoliths are classified as a "plagioclase-bearing garnet pyroxenite" displaying an equilibrium mosaic texture among main mineral phase (which is diopsidic pyroxene) and subordinate phases (which are corundum and garnet). Plagioclase and rarer spinel occur as associated phases. According to petrological and petrochemical studies, these xenoliths were formed under a high grade metamorphic condition of granulite facies, i.e. 1,100 - 1,200°C and 1.5 - 1.8 GPa, within the upper mantle-lower crust transitional zone, or at depth of about 50 - 80 km., and ruby was most-likely generated by following reactions:



Additional new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages imply that the ruby-related basaltic eruption events in this vicinity had intermittently been occurred at least 4 times, i.e., 2.38±0.16, 1.58±0.05, 1.33±0.09 and 0.69±0.01 Ma, during the Late Cenozoic times.

This study provides some constraints ensuring that the genetic conditions of the Siamese ruby somewhat differ on the aspects of parental rock type as well as parental source material, from those of sapphire found elsewhere in Thailand.

**Keywords:** *ruby, corundum-bearing xenolith, alkali basalt,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages, Trat*

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณรัก หรรษาเวก อดีตผู้อำนวยการส่วนส่งเสริมและสนับสนุนวิชาการ สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี ที่คอยกระตุ้นและสนับสนุนให้ผู้เขียนดำเนินงานเชิงวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งคอยให้คำชี้แนะในส่วนของการเก็บข้อมูลภาคสนาม และได้ให้ข้อมูลตำแหน่งที่พบหินอุ้มพลอย ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้มีอาจสำเร็จเป็นรูปธรรมขึ้นมาได้ หากปราศจากความอนุเคราะห์จากคณาจารย์หลายท่าน จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร. วิสุทธิ์ พิสุทธิพานนท์ ที่กรุณาเป็นนักวิจัยพี่เลี้ยง คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ ผศ.ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ ที่ช่วยเหลือในส่วนของ การวิเคราะห์เชิงศิลาคemie และเข้ามาเป็นส่วนร่วมสำคัญของงานวิจัยนี้ และ รศ.ดร. ปัญญา จารุศิริ ที่ช่วยดำเนินการและให้คำปรึกษาในส่วนของ การวิเคราะห์อายุสัมบูรณ์ของตัวอย่างหินให้สำเร็จลุล่วงได้โดยเสียค่าใช้จ่ายต่ำ พร้อมกันนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ ศ.ดร. Ching-Hua Lo และ คุณ Ching-Chang Szu เจ้าหน้าที่ประจำห้อง Ar/Ar Geochronological Lab จาก Department of Geosciences, National Taiwan University (NTU) รวมถึง ศ.ดร. Tung-Yi Lee และ ผศ.ดร. Mong-Wan Yeh จาก Department of Geosciences, National Taiwan Normal University (NTNU) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์อายุหินดังกล่าว

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณปานใจ สารพันโชติวิทยา และดร. ดรุณี สายสุทธิชัย จากกรมทรัพยากรธรณี ที่ช่วยในการจัดเตรียมและเก็บข้อมูลภาคสนาม คุณบุญมี มณีรัตน์ รวมถึงเจ้าของเหมืองระเบิดย่อยหินอีกหลายท่าน (ขออนุญาตไม่เอ่ยนาม) ที่อนุญาตให้เข้าสำรวจเก็บข้อมูลและตัวอย่างหินในพื้นที่ส่วนบุคคล

ผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้โอกาส และสนับสนุนทุนวิจัย (รหัสโครงการ TRG4680004) และกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณวิจัยเพิ่มเติม โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายบางส่วนในการเก็บข้อมูลสนามและค่าเคมีวิเคราะห์ (ในปีงบประมาณ 2547 และ 2548) และงบทั้งหมดในการวิเคราะห์อายุหิน (ในปีงบประมาณ 2550 และ 2551) ซึ่งช่วยให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จเป็นรูปธรรม และท้ายสุดนี้ สำหรับผู้ที่ให้การเอื้อเฟื้อสนับสนุนอีกหลายท่านที่มีได้เอ่ยนาม ผู้เขียนใคร่ขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

## สารบัญ

บทคัดย่อ.....	i
Abstract.....	ii
กิตติกรรมประกาศ .....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูป.....	v
สารบัญตาราง.....	vii
บทที่ 1: บทนำ.....	1
1.1 คำนำ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ที่ตั้งและการเข้าถึงพื้นที่.....	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ผลงานศึกษาในอดีต .....	4
บทที่ 2: ธรณีวิทยาและธรณีวิทยาแหล่งแร่ .....	9
2.1 ลักษณะทั่วไปของหินบะซอลต์มหายุคซีโนโซอิก.....	9
2.2 ธรณีวิทยาในพื้นที่ .....	9
2.3 ธรณีวิทยาแหล่งแร่ .....	13
บทที่ 3: ศิลาบรรณนาและศิลาเคมี.....	18
3.1 ศิลาบรรณนา .....	18
3.2 ศิลาเคมี.....	25
บทที่ 4: ธรณีเคมี.....	29
4.1 คุณสมบัติเชิงค่าออกไซด์หลัก .....	29
บทที่ 5: ธรณีกาลวิทยาหินบะซอลต์ .....	37
5.1 หลักและวิธีการการวัดอายุหินบะซอลต์.....	37
5.2 ผลการวิเคราะห์หาอายุหินบะซอลต์.....	38
5.3 ลำดับเหตุการณ์การเกิดหินบะซอลต์ .....	40
บทที่ 6: บทวิจารณ์และข้อเสนอแนะ.....	46
บทที่ 7: บทสรุป .....	49
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก ก: ข้อมูลภาพผลวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ.....	52
ภาคผนวก ข: ข้อมูลผลการหาอายุหินด้วยวิธี $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ .....	92
ภาคผนวก ค: บทความเผยแพร่ผลงาน .....	102

## สารบัญรูป

รูปที่ 1	แผนที่แสดงการกระจายตัวของหย่อมหินบะซอลต์มหายุคซีโนโซอิก (พื้นที่สีเทา) ในประเทศไทย (ที่มา: ดัดแปลงจากชั้นข้อมูลหินบะซอลต์ ในฐานข้อมูล ดิจิตอลแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย 1:1,000,000) พร้อมจุดเก็บตัวอย่าง (ดาวสีดำ) ที่นำมาตรวจอายุด้วยวิธี $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ .....	9
รูปที่ 2	แผนที่แสดงที่ตั้งพื้นที่ศึกษา ลักษณะทางธรณีวิทยาโดยรอบ ตำแหน่งหลุมทดลอง และจุดร้อนเลี้ยงตะกอนพร้อมชนิดของฟลอยคอร์ันดัมและเฟอโรแมกนีไทต์ ในบริเวณ ต.บ่อพลอย อ.บ่อไร่ จ.ตราด .....	11
รูปที่ 1 ก)	ชั้นตะกอนยุคใหม่ใต้ชั้นหินบะซอลต์ในบริเวณเหมืองหินศิลาทอง ที่แสดง “ผิวใหม่” (สีน้ำตาลเข้ม) ใต้บริเวณแนวสัมผัส (มุมมอง ~0°); ข) (รูปล่างขวา) ส่วนขยายชั้นกรวด Q1 ที่พบไรทงคำจากการขุดหลุมทดลองแร่ SLT1 และ ชั้นกรวด Q2; ค) (รูปล่างซ้าย) ที่พบทั้งทับทิม แร่เฟอโรแมกนีไทต์และไรทงคำ จากการขุดหลุมทดลองแร่ SLT2 .....	14
รูปที่ 2 ก)	ชั้นหินบะซอลต์เหนือชั้นตะกอนยุคใหม่ในบริเวณเหมืองหินศิลาทอง แสดงการเปลี่ยนแปลงเนื้อหินแบบเฉียบพลัน ระหว่างส่วนเนื้อผุ (ส่วนบน; สีส้มอมเหลือง) กับส่วนเนื้อหินสด (ส่วนล่าง; ชั้นสีเทา) ทำให้ดูเสมือนว่าจะเป็นชั้นหินลาวา 2 ชั้น (มุมมอง ~80°); ข) (รูปล่างซ้าย) ภาพขยายเนื้อหินของบะซอลต์ผุ โดยแสดงลักษณะการผุแบบ spheroidal ในส่วนบนของชั้นบะซอลต์; ค) (รูปล่างขวา) บริเวณที่ชั้นหินผุมากจนโครงสร้างการผุแบบ spheroidal เลื่อนไปทำให้ดูคล้ายเป็นชั้นตะกอนดินเหนียวที่มีกรวดกลมมนฝังปะอยู่.....	15
รูปที่ 3	เกร็ดฟลอยทับทิมและเฟอโรแมกนีไทต์ ได้แก่ เซอร์คอน และอิลเมโนแมกนีไทต์ ที่ได้จากการสำรวจในบริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษา (จาก ธวัชชัย เชื้อเหล่านิช และ คณะ 2548).....	17
รูปที่ 4	ตัวแทนหินแปรกล่อมอัลตราเมฟิกและเมฟิกในหินบะซอลต์: ก) หินเลอโซไลต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว (equigranular) เม็ดแร่ขนาดปานกลาง; ข) หินไพรอกซีไนต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว (equigranular) เม็ดแร่ขนาดเล็ก; ค) หินไพรอกซีไนต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว แทรกชั้นกับหินไพริคลาไซต์ เนื้อริ้ว (floriated) เม็ดแร่ขนาดปานกลางถึงหยาบ; ง) หินไพริคลาไซต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว เม็ดแร่ขนาดเล็ก.....	19

- รูปที่ 5 ตัวแทนหินแปลกปลอมอุ้มพลอยในหินบะซอลต์: ก) และ ข) เนื้อหินขนาดปานกลาง ประกอบด้วยแร่ไพรอกซีน ชนิดไดออปไซด์ (สีเขียวใบไม้) คอร์ันดัม ชนิดทับทิม (สีแดงชมพู) แพลจิโอเคลส (สีขาวน้านม) และคาร์นทีก การ์เนท (สีขาวชุ่นอมชมพู);ค) เนื้อผลึกขนาดปานกลางถึงหยาบ ที่ประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ และทับทิม ที่มีขอบปฏิกิริยาบางๆ หุ้มรอบผลึกทับทิม; ง) เนื้อหยาบที่ประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ แพลจิโอเคลส และเม็ดแร่พลอยขนาดใหญ่เนื้อหยาบที่ประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ แพลจิโอเคลส และเม็ดแร่พลอยขนาดใหญ่.....20
- รูปที่ 6 ลักษณะเนื้อหินบะซอลต์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ภายใต้กำลังขยาย 40x: ก) และ ข) เนื้อผลึกพื้น ที่ฝังประดับด้วยผลึกแร่ดอกขนาดเล็กของโอลิวีน (Ol) และเหมือนว่าผลึกแท่ง (laths) ของแพลจิโอเคลส (Pl) มีการวางตัวไปในทิศทางเดียวกัน; ค) เนื้อผลึกพื้นขนาดละเอียดกว่าและไม่แสดงการเรียงตัวของผลึกแท่งแพลจิโอเคลส; ง) ขอบปฏิกิริยา 2 ชั้นของแร่โคลโนไพรอกซีนทุติยภูมิ (Cpx II) รอบผลึกแร่โคลโนไพรอกซีนปฐมภูมิ (Cpx I) ที่สัมผัสกับบะซอลต์ โดยขอบปฏิกิริยาชั้นในแสดงลักษณะเนื้อคล้ายฟองน้ำ;จ) ผลึกแร่โคลโนไพรอกซีนปฐมภูมิ (Cpx I) ที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแร่โคลโนไพรอกซีนทุติยภูมิ (Cpx II) ทั้งหมด โดยที่เนื้อผลึกส่วนในแสดงลักษณะเนื้อคล้ายฟองน้ำ; ฉ) ขอบปฏิกิริยารอบผลึกแร่ต่างๆในชิ้นส่วนของหินแปลกปลอมที่เป็นผลึกจากการทำปฏิกิริยากับบะซอลต์.....21
- รูปที่ 7 ลักษณะเนื้อหินแปลกปลอมภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยใช้กำลังขยาย 40x ที่บ่งถึงสภาวะสมดุลในการก่อตัวของแร่ประกอบหินที่ชัดเจน: ก) และ ข) เนื้อหินเลอโซไรต์; ค) และ ง) เนื้อหินไพรอกซีนไนต์; จ) และ ฉ) เนื้อหินไพริคลาไซต์ ที่แสดงลักษณะของเนื้อริ้วหยาบ.....23
- รูปที่ 8 เปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินแปลกปลอมอุ้มพลอยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40x) โดยใช้แสงทะลุผ่าน (ซีกซ้าย) และแสงสะท้อน (ซีกขวา) ซึ่งเนื้อหินบ่งถึงสภาวะสมดุลในการก่อตัวของแร่ประกอบหินที่ชัดเจน: ก) และ ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแร่คอร์ันดัม (ทับทิม) กับไดออปไซด์; ค) และ ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแร่คอร์ันดัม สปีเนล ไดออปไซด์ และแพลจิโอเคลส; จ) และ ฉ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแร่คอร์ันดัม ไดออปไซด์ และการ์เนท (คาลิไฟต์).....9
- รูปที่ 9 เปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปลกปลอมอุ้มพลอย TrBRc2-1 (ฝั่งซ้าย) กับภาพสีผสมแสดงรูปแบบการกระจายตัวของธาตุและปริมาณความเข้มข้นเชิงคุณภาพที่ได้จากการวัดค่าแบบกวาดรังสี (ฝั่งขวา) ที่สามารถช่วยจำแนกชนิดแร่ประกอบหินออกจากกันได้ชัดเจน.....9

รูปที่ 12	แผนภาพ TAS จำแนกชนิดหินบะซอลต์ ตามหลักการของ Cox et al., 1979 (รูปหลายเหลี่ยม); เส้นประสีเทา ได้จาก Irvine and Baragar (1971) และเส้นประสีแดงได้จาก Kuno (1968).....	32
รูปที่ 13	แผนภาพ TAS จำแนกชนิดหินบะซอลต์ ตามหลักการของ Le Maitre et al., 1979 .....	32
รูปที่ 14	แผนภาพแสดงจุดค่าออกไซด์หลักชนิดต่างๆ เทียบกับค่าดัชนีการแข็งตัว (SI) ของหินบะซอลต์ (ฝั่งซ้าย) และหินแปรกลอมเมฟิก-อัลตราเมฟิกชนิดต่างๆ (ฝั่งขวา) .....	34
รูปที่ 15	แผนที่แสดงค่าอายุหินบะซอลต์ ในบริเวณต่างๆของประเทศไทย (ที่มา: (I) Carbonnel et al., 1972; (II) Barr et al., 1976; (III) Bignell and Snelling, 1977; (IV) Barr and Macdonald, 1981; (V) Sasada et al., 1987; (VI) Intasopa, 1993; (VII) Sutthirat et al., 1994; (VIII) Sutthirat et al., 1995; และ ** ในงานวิจัยนี้) .....	41

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	ผลการจำแนกแร่บนแผ่นหินบางขัดมันภายใต้ SEM เซึ่งเปรียบเทียบโดยอาศัยลักษณะการกระจายตัวของเคมีธาตุ .....	28
ตารางที่ 2	ค่า Wt.% ออกไซด์หลัก และ Norms (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของหินบะซอลต์ ในบริเวณเหมืองหินศิลาทอง อ.บ่อไร่ จ.ตราด (TAS และ SI เป็นค่า H <sub>2</sub> O-free normalized).....	30
ตารางที่ 10	ค่า Wt.% ออกไซด์หลัก และ Norms (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของหินแปรกลอมเมฟิกในหินบะซอลต์ในบริเวณเหมืองหินศิลาทอง อ.บ่อไร่ จ.ตราด (TAS และ SI เป็นค่า normalized).....	31
ตารางที่ 11	สรุปผลการวิเคราะห์หาอายุสัมบูรณ์ของตัวอย่างหินบะซอลต์จากบริเวณต่างๆ ด้วยวิธี <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar ไอโซโทป .....	39
ตารางที่ 12	รวบรวมอายุหินบะซอลต์ซีโนโซอิกในประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน โดยปรับปรุงเพิ่มเติมจาก Sutthirat et al., (1994).....	42
ตารางที่ 6	สรุปช่วงเวลาการเกิดหินบะซอลต์นำพลอยในประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน.....	45

# บทที่ 1: บทนำ

## 1.1 คำนำ

ประเทศไทย มีประวัติการทำพลอยตระกูลคอรันดัม (ทับทิม-แซปไฟร์) หรือที่เรียกตามคำไทยโบราณว่าพลอย “กระรุน” หรือ “กากรุน” ที่สืบเนื่องยาวนานเป็นร้อยปี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “พลอยแดง” จากภาคตะวันออก ซึ่งเป็นที่รู้จักดีในตลาดพลอยโลกในนาม “ทับทิมสยาม (Siamese Ruby)” และเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปว่าแหล่งพลอยตระกูลนี้ มักพบกระจายตัวอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ที่มีหินภูเขาไฟชนิดหินบะซอลต์ (อาทิ Taylor and Buravas, 1951; Charaljanaphet, 1951; Vichit et al., 1978 อ้างอิงใน Aranyakanon and Vichit, 1983 เป็นต้น) ที่ปะทุขึ้นมาสู่ผิวโลกในช่วงมหายุคใหม่ (Cenozoic) (Carbonnel et al., 1972; Bignell and Snelling, 1977; Barr and Macdonald, 1981; Sutthirat et al., 1994 และรัชชชัย เชื้อเหล้าวานิช 2551) แต่ทว่าความเข้าใจในกระบวนการและธรรมชาติการก่อกำเนิดที่แท้จริงของพลอยตระกูลนี้ของไทยกลับยังไม่ชัดเจน แม้ว่าจะมีการเสนอแนวคิดของกระบวนการกำเนิดพลอยตระกูลคอรันดัมของไทยนำเสนอไว้ในหลายรูปแบบแล้วก็ตาม กล่าวคือ ในช่วงเริ่มแรกนักวิจัยส่วนหนึ่งนิยมแนวคิดที่ว่าพลอยคอรันดัม (ทั้งชนิดทับทิมและแซปไฟร์) ที่พบในประเทศน่าจะเกิดจากการตกผลึกโดยตรงจากแมกมาอัลคาไลบะซอลต์ (อาทิ Barr and MacDonald, 1978; Vichit, 1975; Vichit et al., 1978) ซึ่งงานวิจัยแต่ละชิ้นข้างต้นได้นำเสนอรูปแบบของกระบวนการตกผลึกที่ต่างกันบ้างในรายละเอียดปลีกย่อย แต่ในยุคหลังแนวคิดหลักของการกำเนิดพลอยตระกูลนี้ในไทยได้เปลี่ยนไป ซึ่งส่วนใหญ่เชื่อว่าแมกมาบะซอลต์เป็นเพียงตัวกลางนำพลอยขึ้นมาสู่ผิวโลกเท่านั้น แต่ไม่ได้เป็นแหล่งต้นกำเนิดที่แท้จริง (อาทิ Coenraads et al., 1990 และ 1995; Guo et al., 1994 และ 1996a; Levinson and Cook, 1995; Pisutha-Amund et al., 1999) กระนั้นงานวิจัยแต่ละชิ้นเหล่านี้ยังคงนำเสนอรูปแบบของการกำเนิดพลอยคอรันดัมไทยในรายละเอียดที่ต่างกัน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดเป็นการมุ่งเน้นศึกษาในพื้นที่ที่ให้พลอยคอรันดัม ชนิดแซปไฟร์ เป็นหลัก

ต่อมาในราว พ.ศ. 2543 ได้มีเริ่มมีบทความวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลึกแร่พลอยทับทิมขนาดเล็กที่เกิดเป็นแร่มลทิน (inclusion) ภายในผลึกแร่ดอกไพโรซีนขนาดใหญ่ (pyroxene megacryst) ดอกหนึ่ง ที่เก็บจากบริเวณบ้านหนองบอน ตำบลหนองบอน อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด และเป็นที่มาของแนวคิดที่ว่าทับทิมและแซปไฟร์ในบริเวณภาคตะวันออกของไทย น่าจะมีการก่อกำเนิดใต้ผิวโลกที่ระดับความลึกต่างกัน โดยทับทิมน่าจะก่อตัวขึ้นในส่วนที่เป็นชั้นเนื้อโลกส่วนบน (upper mantle) ขณะที่แซปไฟร์น่าจะเกิดในช่วงระดับความลึกที่ตื้นกว่า คือในบริเวณชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง (lower crust) (Sutthirat et al., 2000 และ 2001; Sutthirat, 2001) และถัดมาใน พ.ศ. 2545 ได้มีรายงานการพบก้อนหินแปลกปลอมฝังประดับผลึกแร่พลอยทับทิม (ruby-bearing xenoliths) จากชั้นหินบะซอลต์สด ในบริเวณเหมืองหินศิลาทองสำราญสุข เขตตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด เป็นครั้งแรก (รัชชชัย เชื้อเหล้าวานิช, 2547) จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยมี

ความคาดหวังว่าผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถปิดช่องโหว่บางส่วนที่มีอยู่ของความเข้าใจถึงกระบวนการและธรรมชาติการก่อกำเนิดพลอยตระกูลคอร์นดัมของไทย หรืออย่างน้อยช่วยเติมเต็มความเข้าใจในธรรมชาติการก่อกำเนิดที่แท้จริงของพลอยทับทิมสยามได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อันจะใช้เป็นปัจจัยเสริมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการสำรวจหาแหล่งพลอยแหล่งใหม่ ๆ ทั้งในและต่างประเทศที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาใกล้เคียงกันนี้ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ (1) ศึกษาธรรมชาติและองค์ประกอบทั้งทางแร่และทางเคมีของหินบะซอลต์ หินแปรกล่อมชนิดอุ้มทับทิม รวมถึงหิน/แร่แปรกล่อมชนิดอื่นที่พบฝังในเนื้อหินบะซอลต์ ในบริเวณ ตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกันที่จะโยงไปสู่ความเข้าใจถึงกระบวนการกำเนิดของทับทิมสยาม และ (2) ศึกษาหินบะซอลต์เชิงธรณีกาล เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์เชิงเวลาของเหตุการณ์การปะทุขึ้นมาของลาวาบะซอลต์นำพลอยที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณ

## 1.3 ที่ตั้งและการเข้าถึงพื้นที่

พื้นที่ศึกษาหลักตั้งอยู่ในเขตตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด อยู่ระหว่างระหว่างพิกัดที่  $2^{\circ}34000 - 2^{\circ}23600$  เมตร ตะวันออก และ  $103^{\circ}92000 - 103^{\circ}94000$  เมตร เหนือ ในเขต UTM 48 เหนือ ตามแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:50,000 ลำดับชุด L7017 ระวัง 5534 III (กิ่งอำเภอบ่อไร่) การเดินทางจากกรุงเทพฯ เข้าสู่พื้นที่ศึกษามีระยะทางทั้งสิ้นประมาณ 330 กิโลเมตร โดยอาศัยทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 34 (มอเตอร์เวย์) หรือ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 34 (บางนา-ตราด) หรือ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 3 (สุขุมวิท) จนเข้าเขตบ้านบึงจังหวัดชลบุรี จึงแยกเข้าทางหลวงหมายเลข 344 (บ้านบึง-แกลง) ถึงอำเภอแกลง จังหวัดระยอง แล้วเดินทางต่อด้วยถนนสุขุมวิท จนถึงสามแยกพลับพลา อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี จากนั้นเลือก 1) เดินทางบนเส้นทางสุขุมวิทต่อไปยังบ้านแสนตุ้ง จังหวัดตราด ประมาณ 50 กิโลเมตร ต่อด้วยทางหลวงหมายเลข 3157 ขึ้นเหนือไปยังบ้านช้างทูน เป็นระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตร และต่อด้วยทางหลวงหมายเลข 3389 (3157) ไปทางตะวันออกประมาณ 10 กิโลเมตร จึงเข้าสู่ตัวตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด แล้วใช้เส้นทาง รพช. บ้านคลองโสน-หมื่นด่าน เข้าสู่พื้นที่ศึกษา หรือ 2) แยกขึ้นเหนือด้วยทางหลวงหมายเลข 317 (มะขาม-โป่งน้ำร้อน-สระแก้ว) เป็นระยะทางประมาณ 25 กิโลเมตร ถึงสามแยกบ้านทับนคร แล้วแยกขวาเข้าทางหลวงหมายเลข 3229 (เขื่อนคีรีธาร-บ่อไร่) ไปทางตะวันออกจนถึงสามแยกบ้านช้างทูน เป็นระยะทางประมาณ 40 กิโลเมตร จากนั้นอาศัยทางหลวงหมายเลข 3389 (3157) ต่อด้วยถนน รพช. บ้านคลองโสน-หมื่นด่าน เพื่อเข้าสู่พื้นที่ต่อไป นอกจากนี้ยังได้มีการออกเก็บตัวอย่างหินบะซอลต์ในบริเวณอื่นๆของประเทศเพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบเชิงอายุด้วยเช่นกัน

## 1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

โครงการศึกษาวิจัยนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย (1) ขั้นตอนการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนที่เป็นผลงานเชิงสำรวจทั้งทางด้านธรณีวิทยาและธรณีวิทยาแหล่งแร่ที่สัมพันธ์หินบะซอลต์และแหล่งพลอยโดยรอบพื้นที่ศึกษา และผลงานเชิงวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดพลอยที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์ (2) ขั้นตอนการสำรวจภาคสนาม เพื่อศึกษาลักษณะทางธรณีวิทยาและสภาพการสะสมของพลอยทับทิมและเพื่อนแร่ในบริเวณพื้นที่ศึกษา ด้วยการเดินศึกษาชั้นหิน และชุดหลุมทดลอง พร้อมเก็บตัวอย่างหินสำหรับศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการ (3) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างหิน โดยการตัดแบ่งส่วนตัวอย่างเพื่อจัดทำแผ่นหินบางและแผ่นหินบางขัดมันสำหรับศึกษาด้านศิลาวรรณนาและศิลาเคมี ส่วนหนึ่งนำมาบดละเอียดเพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบเคมีโดยรวมของหิน และส่วนหนึ่งนำมาบดย่อยหยาบให้ได้ขนาดประมาณ 0.5-1 มม. ศึกษาด้านธรณีกาลของหินบะซอลต์ (4) ขั้นตอนการศึกษาวิเคราะห์หินตัวอย่าง โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพของเนื้อหินภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และศึกษาลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ภายในผลึกแร่ ด้วยเครื่อง Electron Probe Microanalyzer (EPMA) และ Scanning Electron Microprob (SEM) ทำการวิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์หลัก และธาตุร่องรอยในหิน ด้วยวิธี XRF และ ICP-MS เพื่อศึกษาลักษณะทางเคมีของหิน และวิเคราะห์หาอายุหินบะซอลต์ ด้วยวิธีวัดค่า  $^{39}\text{Ar}/\text{Ar}$  เพื่อตรวจวัดหาอายุสัมบูรณ์ของหิน จากนั้นเป็น (5) ขั้นตอนของการประมวลผลรวม เผยแพร่ผลงาน และจัดทำรายงาน



## 1.5 ผลงานศึกษาในอดีต

ผลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ สามารถแบ่งตามลักษณะของเนื้อหาได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ 1) ผลการศึกษาเชิงสำรวจที่เน้นการสำรวจเก็บข้อมูลสนามเป็นหลัก ซึ่งให้ภาพข้อมูลธรณีวิทยา/แหล่งแร่ของบริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษาแบบกว้างๆ ในขณะที่ 2) ผลการศึกษาเชิงวิจัยที่เน้นการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้ข้อมูลในรายละเอียดเชิงลึกเฉพาะประเด็น

**1.5.1 กลุ่มการศึกษาเชิงสำรวจ** ผลงานส่วนใหญ่เป็นของกรมทรัพยากรธรณี ซึ่งสามารถแยกประเภทลักษณะงานสำรวจเป็น 2 ด้านหลักๆ คือ

**ด้านธรณีวิทยา** เป็นการศึกษาลักษณะหน่วยหิน/ตะกอนทั้งหมดที่โผล่ปรากฏในพื้นที่สำรวจ การลำดับชั้นหิน ลักษณะธรณีโครงสร้าง และกำหนดขอบเขตการกระจายตัวของหน่วยหิน/ตะกอนอายุต่างๆ อาทิ รายงานผลการสำรวจหาความต่อเนื่องทางธรณีวิทยาในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในมาตราส่วน 1:250,000 โดย พล เชาว์ดำรงค์ (2535) แผนที่ธรณีวิทยาของจังหวัดจันทบุรี และตราด ในมาตราส่วน 1:250,000 โดย วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ (2540) แผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน 1:50,000 ระวังอำเภอโป่งน้ำร้อน (5434 I) และ ระวังบ้านตรอกนองบน (5434 II) โดย วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และนรรัตน์ บุญกันภัย (2536) และรายงานการสำรวจธรณีวิทยาจังหวัดจันทบุรี มาตราส่วน 1:250,000 โดย วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และนรรัตน์ บุญกันภัย (2545)

**ด้านธรณีวิทยาแหล่งแร่** มุ่งเน้นศึกษาลักษณะหน่วยหิน/ตะกอน การลำดับชั้นหิน และลักษณะธรณีโครงสร้างที่สัมพันธ์กับแหล่งแร่พลอย เพื่อหาร่องรอยการสะสมตัว กำหนดขอบเขตการกระจายตัวของแหล่งพลอยพร้อมทั้งประเมินศักยภาพของแหล่ง อาทิ

การุณ ต้นธงชัย (2543) ได้จัดทำรายงานผลการสำรวจธรณีวิทยาแหล่งแร่รัตนชาติบริเวณอำเภอโป่งน้ำร้อน จังหวัดจันทบุรี พบร่องรอยของแร่พลอยชนิดทับทิมสะสมตัวในบริเวณเขาหัก และบริเวณช่วงต้นของคลองโป่งน้ำร้อน

ปานใจ สารพันโชติวิทยา และประวัติ ตั้งพงษ์ (2545ข) ได้จัดทำรายงานความก้าวหน้าผลการสำรวจธรณีวิทยาแหล่งแร่รัตนชาติ บริเวณอำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด และอำเภอขลุ้ง จังหวัดจันทบุรี ซึ่งพบพลอยทับทิมและแซปไฟร์ โดยมี แร่เพทาย นิลเสียน (pyroxene) นิลตะโก แมกนีไทต์ และ อิลเมไนต์ เป็นเพื่อนแร่ที่สำคัญ สะสมตัวอยู่ตามชั้นตะกอนทางน้ำ

ธวัชชัย เชื้อเหล่านิช (2547) ได้นำเสนอความก้าวหน้าในการสำรวจธรณีแหล่งแร่รัตนชาติ บริเวณอำเภอขลุ้ง จังหวัดจันทบุรี และอำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด พบว่าชั้นกรวดริมตลิ่งคลองอีตัก ในบริเวณบ้านโชคดี-สะพานหินล่าง อำเภอขลุ้ง มีพลอยแซปไฟร์และแร่เพื่อนพลอย เช่น เพทาย สะสมตัวร่วมด้วยในปริมาณเล็กน้อย และพื้นคลองบางช่วงเป็นพืดหินบะซอลต์ที่มีลักษณะเนื้อละเอียดแน่น แตกเป็นรูปแท่งเส้าหลายเหลี่ยม ในเนื้อหินฝังประดับด้วยแร่ดอกโอลิวีน (olivine phenocrysts) แต่ไม่พบร่องรอยของก้อนหิน/แร่แปลกปลอม ซึ่งลักษณะเนื้อหินที่ปรากฏนี้ไม่คล้ายคลึงกับของหินบะซอลต์ชนิดนำพลอย มีจึงได้สันนิษฐานว่าพลอยที่สะสมตัวอยู่น่าจะเป็นแร่พลัดมาจากชั้นหินบะซอลต์นำพลอยที่ผุพังไปแล้ว และสำหรับในบริเวณบ้านคลองโสน-หมื่นด่าน

อำเภอป่าไร่ พบก้อนหินแปลกปลอมอุ้มพลอยทับทิมฝังในชั้นหินบะซอลต์สดที่ไหลปิดทับบนชั้นกรวดมีพลอยทับทิมอีกทอดหนึ่ง ซึ่งเป็นหลักฐานอีกชิ้นหนึ่งที่บ่งชี้ว่าเคยมีการปะทุของลาวาบะซอลต์ชนิดนำพลอยเกิดขึ้นในพื้นที่บริเวณนี้มาแล้วไม่ต่ำกว่า 2 ครั้ง

**1.5.2 กลุ่มผลการศึกษาด้านธรณีวิทยา** สามารถจัดจำแนกตามลักษณะเบื้องต้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ศึกษาเป็น 2 ด้านหลักๆ คือ

**ด้านที่เน้นทางศิลาวิทยา (Petrology) และธรณีเคมี (Geochemistry)** เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะปรากฏของเนื้อหิน ชนิดแร่ และลักษณะทางธรณีเคมี ที่จะนำไปสู่ความเข้าใจในกระบวนการก่อกำเนิดหิน อาทิ

Barr and Macdonald (1978) ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและธรณีเคมีเบื้องต้นของหินบะซอลต์มหายุคใหม่ (Cenozoic basalts) ในประเทศไทย โดยได้แบ่งคร่าวๆ เป็น 2 เนื้อหิน คือ เนื้ออัลคาไล (alkali) และ เนื้อโธลิไอต์ (tholiite) โดยหินบะซอลต์เนื้ออัลคาไลเป็นกลุ่มหลักที่พบในไทย ที่ยังจำแนกย่อยออกเป็น 2 กลุ่มชนิดหิน คือ (1) กลุ่ม “บาซานิทอยด์บะซอลต์ (basanitoid basalts)” ซึ่งประกอบด้วยชนิดย่อย 4 ชนิดหิน ได้แก่ เนฟิลีนไนต์ (nephelinite) บาซานิต (basanite) เนฟิลีนฮาวายไอต์ (nepheline hawaiiite) และ เนฟิลีนมูเกียไรต์ (nepheline mugearite) และ (2) กลุ่ม “ฮาวายไอต์บะซอลต์ (hawaiiite basalts)” ซึ่งประกอบด้วย ชนิดย่อย 3 ชนิดหิน คือ อัลคาไลโอลิวีนบะซอลต์ (alkali olivine basalt) ฮาวายไอต์ (hawaiiite) และ มูเกียไรต์ (mugearite) ส่วนหินบะซอลต์เนื้อโธลิไอต์นั้นพบได้น้อย มักพบเป็นหย่อมขนาดเล็กปรากฏอยู่ในบริเวณพืดหินบะซอลต์เนื้ออัลคาไล และได้ตั้งข้อสรุปไว้ว่าแหล่งพลอยตระกูลคอร์รันดัม (ทับทิม-แซปไฟร์) ของไทยมีต้นกำเนิดปฐมภูมิมาจากหินหนืดบะซอลต์เนื้ออัลคาไล กลุ่มบาซานิทอยด์ (basanitoid magmas) ที่มีผลึกแร่แปลกปลอม (xenocrysts) และก้อนหินแปลกปลอมอัลตราแมฟิก (ultramafic nodules) เกิดร่วม ซึ่งผลึกแร่แปลกปลอมเหล่านี้ รวมถึง เซอร์คอน (zircon) และคอร์รันดัม (corundum) น่าจะเกิดขึ้นจากกระบวนการแยกตัวขององค์ประกอบแร่ออกจากเนื้อหินหนืดในลักษณะของ high-pressure cognate phases

Vichit *et al.* (1978) ได้นำเสนอลักษณะทางศิลาเคมีของหินบะซอลต์นำพลอยตระกูลคอร์รันดัมของไทย ประกอบลักษณะทางธรณีวิทยาแหล่งแร่ทั่วไปของแหล่งพลอยทับทิมและแซปไฟร์เหล่านี้ ที่สามารถพบได้ในหลายบริเวณตามภาคต่างๆ ยกเว้นภาคใต้ ได้แก่ ภาคเหนือ (เชียงใหม่ แพร่ และสุโขทัย) กลาง (เพชรบูรณ์) ตะวันตก (กาญจนบุรี) ตะวันออก (จันทบุรี และตราด) และตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง (ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี) โดยแหล่งสะสมตัวของพลอยตระกูลนี้ทั้งหมดได้จากการผุพังของชั้นหินบะซอลต์

Barr and Macdonald (1981) ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและธรณีเคมีเบื้องต้นของหย่อมหินบะซอลต์ในประเทศไทยเพิ่มเติมพร้อมกับแหล่งหินบะซอลต์มหายุคใหม่อื่นๆ ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และให้ความเห็นว่าความหลากหลายของชนิดหินบะซอลต์ที่พบในประเทศไทยน่าจะเป็นตัวแทนในภาพรวมของหย่อมหินบะซอลต์ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งการเกิดของหินบะซอลต์มหายุคใหม่ตอนปลาย (late Cenozoic basalts) เหล่านี้

สัมพันธ์กับกระบวนการทางธรณีฐานที่ซับซ้อน (complex tectonics) ที่เกี่ยวข้องกับการยกตัวของแผ่นดิน (continental uplifting) การคลายตัว (extensional tectonism) และค่ากระแสความร้อนสูง (high heat flow) ใต้เปลือกทวีป เช่นเดียวกับหย่อมหินบะซอลต์ในภูมิภาคตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกาและในภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้ของออสเตรเลีย ซึ่งความหลากหลายในชนิดหินบะซอลต์ที่พบอาจเป็นผลจากความต่างในสัดส่วนปริมาณและ/หรือระดับความลึกของการหลอมละลายบางส่วน of ชั้นเนื้อโลก และ/หรือการตกผลึกลำดับส่วนระหว่างเคลื่อนตัวขึ้นสู่ผิวโลก โดยคิดในเชิงเปรียบเทียบว่ากลุ่มหินบะซอลต์เนื้อโธลิอิต (tholiitic basalts) ได้จากการหลอมละลายบางส่วน of ชั้นเนื้อโลกในปริมาณที่ค่อนข้างมาก ซึ่งเกิดขึ้นในระดับค่อนข้างตื้น ในขณะที่กลุ่มหินบะซอลต์เนื้ออัลคาลี (alkali basalts) ได้จากการหลอมละลายบางส่วน of ชั้นเนื้อโลกในปริมาณที่ค่อนข้างน้อยกว่า แต่เกิดขึ้นในระดับที่ลึกกว่า

Jungyusuk and Sirinawin (1983) ได้รวบรวมและนำเสนอข้อมูลใหม่เพิ่มเติมบางส่วน of ธรรมชาติการกระจายตัว ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของหย่อมหินบะซอลต์มหาสมุทรใหม่ ไล่เรียงตามชื่อแหล่งหินบะซอลต์แต่ละแห่งในภูมิภาคเหนือ กลาง ตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนล่างตามขอบที่ราบสูงโคราช และตะวันออกเฉียง กล่าวโดยสรุปคือพืดหินบะซอลต์มีฐานปรากฏที่พบทั้งในลักษณะการไหลบ่าเป็นผืนแผ่นดิน ปล่องภูเขาไฟรูปกรวย (cone) และปล่องภูเขาไฟขนาดเล็ก (plug) มีแนวการไหลของพืดหินวางตัวในทิศประมาณเหนือ-ใต้ เช่นเดียวกับแนวปล่องภูเขาไฟ ซึ่งเป็นผลจากการแทรกปะทุตัวขึ้นมาตามแนวแตกที่เป็นผลจากการคลายตัวของแผ่นทวีปที่สัมพันธ์กับกระบวนการเปิดตัวของแอ่งทะเลอันดามัน การเคลื่อนหมุนตัวในทิศทางตามเข็มนาฬิกาของแผ่นทวีปภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้ การเปิดแอ่งทะเลจีนใต้ และการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแผ่นทวีปอินเดียกับแผ่นยูเรเชีย ซึ่งเป็นแนวคิดเดียวกับ Barr and Macdonald (1978 และ 1979) และ Bunopas and Vella (1983) และได้จำแนกกลุ่มหินบะซอลต์ เป็น 2 กลุ่ม เช่นเดียวกับ Barr and Macdonald (1978) คือ กลุ่ม "บาซานิตอยด์ (basaltoid)" ซึ่งสัมพันธ์กับฟลอย มีค่าเคมีอยู่ในช่วง alkaline ถึง strongly alkaline ขณะที่กลุ่ม "ฮาวายอิต (hawaiiite)" มีค่าเคมีอยู่ในช่วง alkaline

Aranyakanon and Vichit (1983) ได้รวบรวมและนำเสนอภาพรวมแหล่งแร่อัญมณีชนิดต่างๆ ของไทย โดยเฉพาะแหล่งฟลอยตระกูลคอร์รันดัม (ทับทิม-แซปไฟร์) ซึ่งชนิดแร่อัญมณีที่สำคัญที่สุดของไทย โดยแหล่งฟลอยแซปไฟร์สามารถพบได้ในหลายบริเวณตามภาคต่างๆ ยกเว้นภาคใต้ แต่การกระจายตัวของแหล่งฟลอยชนิดทับทิมจะจำกัดอยู่เฉพาะในบางบริเวณของภาคตะวันออกเฉียงใต้ตอนล่าง เท่านั้น ได้แก่ (1) บริเวณเขตต่อจังหวัดจันทบุรี (อำเภอขลุง-โป่งน้ำร้อน) กับ ตราด (อำเภอเขาสมิง-บ่อไร่) (2) บริเวณเขตตำบลบ่อฟลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด และ(3) บริเวณเขตต่อจังหวัดศรีสะเกษ (อำเภอกันทรลักษณ์) กับ อุบลราชธานี (อำเภอน้ำยืน)

Hughes (1997) ได้รวบรวมข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งฟลอยทับทิมและแซปไฟร์และรูปแบบการทำเหมืองฟลอย รวมถึงได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟลอย ลักษณะและชนิดมลทินในตัวอย่างฟลอยจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลก รวมทั้งจากแหล่งในจังหวัดจันทบุรีและตราด

โดยพบว่าทับทิมจากแหล่งจันทบุรีและตราดมีลักษณะภายใน (internal features) ต่างๆ เหมือนกับทับทิมจากแหล่งไพลิน ประเทศกัมพูชา มีลักษณะเด่น คือ มีผลึกมลทินของแข็งเล็กๆ ที่ล้อมรอบด้วยมลทินของไหลลายนิ้วมือ/ลายขนนก (fluid fingerprints/feathers) มีมลทินคล้ายวงแหวนดาวเสาร์ (Saturn inclusions) แต่ลักษณะแถบเส้นสี (color zoning) นั้นแทบไม่พบ และไม่มีลักษณะการเรียงตัวของผลึกแร่รูไทล์ที่คล้ายสายไหม (rutile silk)

Promprated *et al.* (1999) ศึกษาลักษณะทางศิลาเคมีของชั้นเนื้อโลก (mantle) ได้ในประเทศไทยโดยใช้ก้อนหินแปลกปลอมประเภทหินเพอริโดไทต์ (peridotite xenoliths) จากหย่อมหินบะซอลต์ในหลายบริเวณ อาทิ ภาคตะวันออก (จันทบุรี-ตราด) ภาคตะวันตก (กาญจนบุรี) ภาคกลาง (เพชรบูรณ์) และภาคเหนือ (แพร่-ลำปาง) เป็นตัวแทนสำหรับเปรียบเทียบลักษณะของชั้นเนื้อโลกในส่วนที่อยู่ใต้แผ่นอนุทวีปฉานไทย (Shan-Thai microcontinent) กับส่วนที่อยู่ใต้แผ่นอนุทวีปอินโดไชนา (Indochina microcontinent) ซึ่งได้ข้อสรุปว่าชั้นเนื้อโลกทั้งสองส่วนมีสมดุลภาวะเชิงอุณหภูมิ-ความดันในช่วงเดียวกัน ประมาณ 1003-1132°C และ 8-20 กิโลบาร์ แต่ชั้นเนื้อโลกใต้แผ่นอนุทวีปอินโดไชนานั้นมีการเปลี่ยนสภาพที่ได้รับอิทธิพลจากการไหลผ่านของของไหลหรือหินหนืดที่ถูกออกซิไดซ์ (oxidized fluids or melts) มากกว่า

Sutthirat *et al.* (2001) ศึกษาผลึกแร่แปลกปลอม ชนิดไคลโนไพรอกซีน (clinopyroxene xenocryst) ที่มีแร่คอร์ันดัมชนิดทับทิมเกิดเป็นผลึกมลทินอยู่ข้างใน จากบ้านหนองบอน อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด พบว่าในโครงสร้างผลึกแร่แปลกปลอมนี้มีสัดส่วนของอะตอมของธาตุโซเดียมพอประมาณ (0.12-0.14 Na) มีอะตอมของอะลูมิเนียมสูง (0.31-0.33 Al<sup>IV</sup>, 0.36-0.40 Al<sup>VI</sup>) ต่อ 6 อะตอมออกซิเจน (O) และค่าแมกนีเซียมสูง (Mg/Mg+Fe<sup>2+</sup> >0.9) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกไคลโนไพรอกซีนที่เกิดเป็นแร่มลทินในเนื้อพลอยทับทิมที่ได้จากชั้นกะสะทางน้ำ พบว่ามีลักษณะทางเคมีไม่แตกต่างกันนัก และสรุปว่าผลึกแร่แปลกปลอมนี้น่าจะตกผลึกจากหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีแบบเมฟิก (mafic) เช่น หินการ์เนท-ไคลโนไพรอกซีนิต (garnet-clinopyroxenites) หรือ หินการ์เนท-ไพริคลาไซต์ (garnet-pyroxenites) ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,150±100°C และความดัน 10-25 กิโลบาร์ (เทียบเท่าช่วงความลึก 35-88 กม.) ภายในชั้นเนื้อโลกส่วนบน

Promprated and Taylor (2003) ได้ศึกษาหินแปลกปลอม ชนิดเมฟิกแกรนูลิต (mafic granulite) ในหินบะซอลต์จากจังหวัดจันทบุรี เพื่อที่จะนำไปสู่ความเข้าใจในธรรมชาติของชั้นเปลือกโลกใต้ที่รองรับอยู่ใต้ประเทศไทย และให้ข้อสรุปว่าหินแปลกปลอมชนิดนี้แปรสภาพมาจากหินดั้งเดิมที่เป็นหินอัคนี (igneous protolith) ที่ก่อตัวเป็นชั้นเปลือกโลกส่วนล่างและมีองค์ประกอบทางเคมีเทียบเคียงได้กับหินตระกูลบะซอลต์ อาทิ หินทรอคโทไลต์ (troctolite) และโอลิวีนบะซอลต์ (olivine basalt) ซึ่งเนื้อหินได้เกิดแปรสภาพไปเป็นหินแกรนูลิต ด้วยปฏิกิริยา โอลิวีน + แพลจีโอเครส = การ์เนท + ไคลโนไพรอกซีน โดยหินเข้าสู่สมดุลสภาวะหลังสุดภายใต้อุณหภูมิประมาณ 1100-1200°C และความดัน 15-18 กิโลบาร์ (เทียบเท่าระดับความลึกประมาณ 50-60 กม.) ก่อนที่จะถูกนำขึ้นสู่ผิวโลกด้วยการปะทุของหินหนืดบะซอลต์ ในช่วงปลายของมหายุคใหม่ (Late Cenozoic) นอกจากนี้ยังพบว่าหินแปลกปลอมบางก้อนมีคอร์ันดัมเกิดเป็นผลึกแร่มลทิน

ขนาดเล็กอยู่ภายในผลึกแร่แฟลจีโอเครสต์ด้วย และได้ตีความว่าแร่มสทินคอร์นดัมนี้ เป็นผลของการหลอมแปรภาค (incongruent melting) ของแฟลจีโอเครสต์

**ด้านที่เห็นทางธรณีกาลวิทยา (Geochronology)** เพื่อศึกษาหาอายุสัมบูรณ์ของหิน ด้วยวิธีการต่างๆ อาทิ

Carbonnel *et al.* (1972) ใช้วิธี Fission Track Dating บนผลึกแร่เซอร์คอน (zircon) เพื่อหาอายุหินบะซอลต์ บริเวณอำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี ได้อายุ  $2.57 \pm 0.2$  ล้านปี (Ma)

Bignell and Snelling (1977) อาศัยวิธี  $^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$  Dating หาอายุสัมบูรณ์ (absolute age) ของหินบะซอลต์บริเวณเกาะกูด จังหวัดตราด ได้  $8.5 \pm 1.0$  ล้านปี

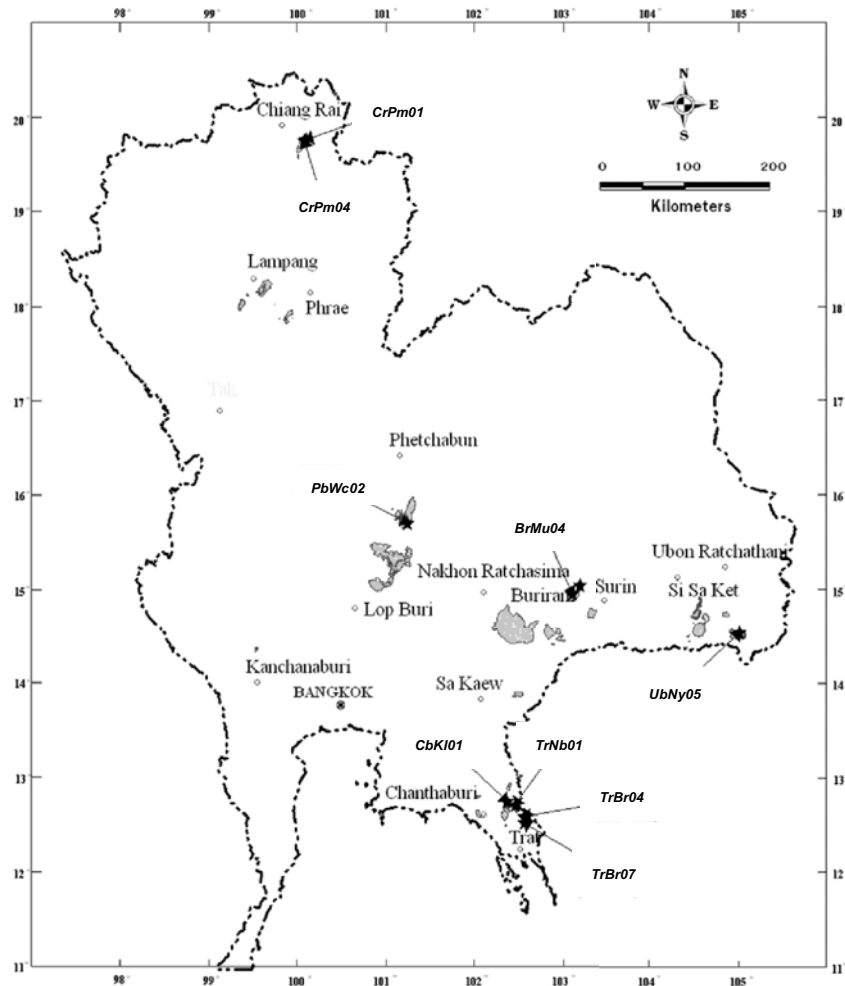
Barr and Macdonald (1981) ได้เสนอผลการศึกษาด้านธรณีเคมีของหินบะซอลต์ยุคใหม่ในหลายบริเวณของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และได้รวบรวมและหาอายุหินบะซอลต์เพิ่มเติม ด้วยวิธี  $^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$  Dating สำหรับประเทศไทยมีหลายบริเวณ อาทิ บริเวณบ้านช่างเคี่ยน อำเภอพญาเม็งราย ได้อายุ  $1.69 \pm 1.25$  ล้านปี และบริเวณริมแม่น้ำโขง อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย ได้อายุ  $1.74 \pm 0.12$  ล้านปี ตามลำดับ บริเวณอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่  $5.64 \pm 0.28$  ล้านปี บริเวณบ้านลำนารายณ์ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี  $11.29 \pm 0.64$  ล้านปี บริเวณอำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี  $3.14 \pm 0.17$  ล้านปี บริเวณเขากระโดง จังหวัดบุรีรัมย์  $0.92 \pm 0.3$  ล้านปี บริเวณภูฝ้าย อำเภอขุนหาญ จังหวัดศรีสะเกษ  $3.28 \pm 0.48$  ล้านปี บริเวณเขาพลอยแหวน อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี  $0.44 \pm 0.11$  ล้านปี และบริเวณบ้านหนองบอน อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด  $1.31 \pm 0.17$  ล้านปี

Sutthirat *et al.* (1994) ได้นำเสนอผลการตรวจหาอายุตัวอย่างหินบะซอลต์ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยใช้วิธี  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  จาก 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณเขาวัว อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี วัดได้  $3.0 \pm 0.19$  ล้านปี และบริเวณบ้านหนองบอน อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด มีค่า  $2.38 \pm 0.16$  ล้านปี

## บทที่ 2: ธรณีวิทยาและธรณีวิทยาแหล่งแร่

### 2.1 ลักษณะทั่วไปของหินบะซอลต์มหายุคซีโนโซอิก

หย่อมหินบะซอลต์มหายุคซีโนโซอิก ที่พบในประเทศไทยมีลักษณะการแผ่กระจายตัวเป็นหย่อมๆ ในหลายส่วนของประเทศ ทั้งในบริเวณภาคเหนือ กลาง ตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนล่าง ตะวันออก และตะวันตก เป็นจำนวนรวมราว 70 หย่อมพื้นที่ (รูปที่ 1) ซึ่งเป็นผลจากการปะทุขึ้นมาของลาวาที่ไหลป่าไปตามสภาพพื้นผิวโบราณ (paleotopography) ก่อนที่จะแข็งตัวเป็นพืดหินบะซอลต์ โดยเหลือปรากฏเป็นชั้นหิน หรือบางพื้นที่ผุจนกลายเป็นชั้นดิน แผ่ปกคลุมอยู่เหนือชั้นหินฐานอายุก่อนควอเทอร์นารี (Pre-Quaternary basement rocks) แต่ในหลายบริเวณพบปิดทับบนชั้นตะกอนยุคใหม่ที่ยังไม่แข็งตัว และจากการรวบรวมผลการศึกษาด้านธรณีกาลหินบะซอลต์พบว่าหย่อมหินบะซอลต์เหล่านี้มีอายุอยู่ในช่วงตั้งแต่ Late Oligocene (~24 ล้านปี) ถึง Pleistocene (~0.32 ล้านปี) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปในบทที่ 5



รูปที่ 1 แผนที่แสดงการกระจายตัวของหย่อมหินบะซอลต์มหายุคซีโนโซอิก (พื้นที่สีเทา) ในประเทศไทย (ที่มา: ดัดแปลงจากชั้นข้อมูลหินบะซอลต์ ในฐานข้อมูลดิจิทัลแผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย 1:1,000,000) พร้อมจุดเก็บตัวอย่าง (ดาวสีดำ) ที่นำมาตรวจอายุด้วยวิธี  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$

หินบะซอลต์ในมหายุคนี้ สามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มที่ไม่สัมพันธ์กับแหล่งพลอย (corundum-barren basalt) และกลุ่มหินบะซอลต์ที่สัมพันธ์กับแหล่งพลอย (corundum-related basalt) (Jungyusuk and Khositanont 1992; Vichit 1992) โดยกลุ่มแรกเป็นหินบะซอลต์เนื้ออัลคาไล (alkali) ถึง กึ่งอัลคาไล และเนื้อโธลิไอต์ (subalkali/tholiite) ประเภท "hawaiite basalts" ประกอบด้วย หินจำพวก alkali olivine basalt, hawaiite และ mugearite ส่วนหินบะซอลต์ในกลุ่มหลังที่สัมพันธ์กับพลอย เป็นหินบะซอลต์เนื้ออัลคาไล ประเภท "basanitoids" ประกอบด้วย หินจำพวก nephelinite, basanite, nepheline hawaiite และ nepheline mugearite (Barr and Macdonald, 1978, 1981; Vichit *et al.*, 1978 Jungyusuk and Sirinawin, 1983) นอกจากความต่างในเชิงธรณีเคมีแล้ว หินบะซอลต์ทั้งสองกลุ่มยังมีความต่างในเชิงกายภาพที่พอสั่งเกตได้ในสนาม โดยกลุ่มแรกมีเนื้อหินที่ฝังประดับด้วยแร่ดอกขนาดเล็ก (<2 มม.) ของแร่โอลิวีนประปราย แต่ไม่ค่อยพบก้อนหินแร่แปลกปลอมระดับลึก ทำให้ลักษณะผิวหินผุแลดูเกลี้ยง ในขณะที่ผิวหินและเนื้อหินของกลุ่มที่สองโดยรวมแลดูสกปรกกว่า เพราะมักมีก้อนหินแปลกปลอมระดับลึก (deep-seated xenoliths) ชนิดเลอโซไลต์ (Iherzolite) และดันไนต์ (dunite) และผลึกแร่แปลกปลอม (xenocrysts) ชนิดนิลตะโก (spinel) โกเมน ชนิดไพโรป (pyropic garnet) เพทาย (zircon) นิลติดแม่เหล็ก (ilmeno-magnetite) และ/หรือ ผลึกแร่โต (megacrysts) ชนิดนิลเสียน (pyroxene) และอัลคาไลเฟลด์สปาร์ (alkali feldspar) เช่น ซานิดีน (sanidine) ฝังประในหิน ทำให้ผิวหินและเนื้อหินโดยพื้นหินบะซอลต์ในพื้นที่ศึกษาจัดเป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มที่สัมพันธ์กับแหล่งพลอย

## 2.2 ธรณีวิทยาในพื้นที่

ข้อมูลลักษณะธรณีวิทยาทั่วไปที่เกี่ยวกับการลำดับชั้นหิน การเรียกชื่อชั้นหิน และอายุของชั้นหินในพื้นที่ศึกษา ได้ประมวลสรุป และอ้างอิงตาม รายงานการสำรวจธรณีวิทยาจังหวัดจันทบุรี ในมาตราส่วน 1:250,000 (วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และนรรรัตน์ บุญกันภัย, 2545) เป็นหลัก แต่ได้มีการปรับขอบเขตหน่วยหินไปบ้างเล็กน้อย

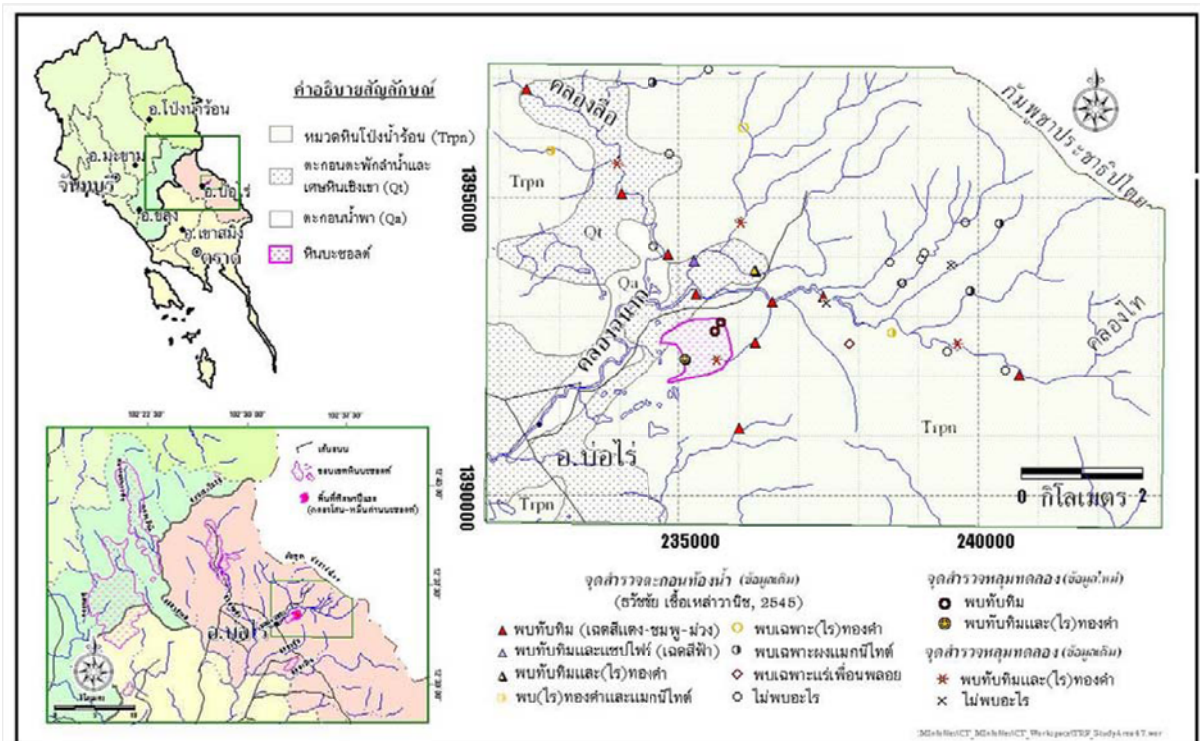
สภาพทางธรณีวิทยาที่พบโดยรอบพื้นที่ศึกษา ส่วนใหญ่ปกคลุมด้วย หินตะกอนหมวดหินโป่งน้ำร้อน ซึ่งเป็นหินยุคไทรแอสซิก (Triassic) ที่โผล่ปรากฏเป็นหินอายุเก่าแก่ที่สุด และบางส่วนของพื้นที่จะปกคลุมด้วยชั้นตะกอนมหายุคใหม่ (Cenozoic) ที่ยังไม่แข็งตัวเป็นหิน และหินอัคนีภูเขาไฟชนิดหินบะซอลต์ เป็นหลัก (รูปที่ 2) โดยมีรายละเอียดลำดับชั้นหิน ดังนี้

### 2.2.1 หินตะกอน

**หินยุคไทรแอสซิก (Triassic rocks)** เป็นกลุ่มหินที่มีการโผล่ปรากฏเป็นบริเวณกว้างขวางในภาคตะวันออกและครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดจันทบุรีและตราด ประกอบด้วย 3 หมวดหิน ได้แก่ หมวดหินเขาวงศ์ หมวดหินเนินโพธิ์ และหมวดหินโป่งน้ำร้อน แต่ในบริเวณพื้นที่สำรวจมีปรากฏเพียงหมวดหินเดียวคือ หมวดหินโป่งน้ำร้อน (Trpn) ซึ่งประกอบด้วย หินทรายเนื้อสกปรก (graywacke) เป็นหลัก และเป็นหินที่มีลักษณะเด่นเฉพาะตัวคือ มีสีเทาอม

เขียว ถึง เขียว บางครั้งมีสีเทาดำ ภายในเนื้อหินมีเศษหินขนาดเล็กๆ ประกอบอยู่ด้วยมากมาย มีการเกาะตัวของเม็ดตะกอนที่แน่นและเริ่มเชื่อมประสานตัว ในลักษณะกึ่งหินแปร ทำให้เนื้อหินสดมีความแกร่งสูงในบางช่วงชั้นหิน มีการวางชั้นสลับกับหินโคลนและ/หรือหินดินดานที่แสดงชั้นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบหินกรวดมน ชนิด para-conglomerate ปรากฏเป็นหย่อมเล็กๆ โดยหินกรวดมนนี้ประกอบด้วยก้อนกรวดที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ (เฉลี่ย 10-20 ซม.) ที่มีลักษณะกลมมนดีมาก (very well-rounded) แต่การคัดขนาดของกรวดไม่ดีนัก มีการประสานตัวในลักษณะ sandy matrix-supported มีเนื้อพื้นเป็นทรายหยาบถึงปานกลาง (coarse- to medium-sand) ชนิดก้อนกรวด (clasts) ส่วนใหญ่เป็นหินอัคนีบาดาลที่องค์ประกอบแร่อยู่ในกลุ่มหินแกรนิต ถึง หินแกรนไดโอไรต์ มีกรวดหินชีรต์ ควอตซ์น้ำนม และหินทรายเนื้อเฟลด์สปาร์ (arkosic sandstone) สีแดงปนบ้าง

หินตะกอนนี้เป็นส่วนหนึ่งชุดหินที่เกิดสะสมตามร่องทะเลลึก (Trench) ตรงบริเวณที่เกิดการชนกัน ของสองแผ่นอนุทวีป คือ แผ่นอนุทวีปฉาน-ไทย และ แผ่นอนุทวีปอินโดจีน่า (ได้แก่ บริเวณอำเภอโป่งน้ำร้อน ชลุม และบ่อไร่ ในปัจจุบัน) ที่เริ่มต้นในช่วงต่อของยุคเพอร์เมียน (Permian) และไทรแอสซิก (หรือเมื่อช่วงประมาณ 250 ล้านปีก่อน) โดยการสะสมตัวของตะกอนในลักษณะนี้เกิดต่อเนื่องจนกระทั่งการเคลื่อนตัวชนกันหยุดลงในช่วงตอนต้นของยุคจูแรสซิก (Early Jurassic) (หรือเมื่อช่วงประมาณ 200 ล้านปีก่อน) (วีระพงศ์ ต้นสุวรรณ และนวรรณ์ บุญกันภัย, 2533 และพล เชาวดำรงค์, 2535)



รูปที่ 2 แผนที่แสดงที่ตั้งพื้นที่ศึกษา ลักษณะทางธรณีวิทยาโดยรอบ ตำแหน่งหลุมทดลองและจุดร่อนเลียงตะกอนพร้อมชนิดของพลอยคอร์ันดัมและเฟือนแร่ที่พบในแต่ละจุด ในบริเวณ ต.บ่อพลอย อ.บ่อไร่ จ.ตราด

**ตะกอนยุคควอเทอร์นารี (Quaternary sediments)** ที่พบเป็นตะกอนที่สะสมตัวจากการของทางน้ำ ซึ่งพบได้ใน 2 ลักษณะ คือ (1) หน่วยตะกอนตะพักเก่า (old terrace deposits; Q) มีภูมิฐานเป็นเนินเตี้ย และ (2) หน่วยตะกอนที่ราบน้ำพาปัจจุบัน (recent alluvial sediment; Qa) ซึ่งสะสมตัวตามร่องทางน้ำและที่ราบน้ำท่วมถึงในปัจจุบัน และจะไม่ขอกกล่าวในรายละเอียดต่อไป

สำหรับหน่วยตะกอนหน่วยแรกเป็นตะกอนตะพักเก่า ซึ่งรองรับด้วยชั้นหินฐานหมวดโป่งน้ำร้อน และปิดทับด้วยชั้นหินบะซอลต์ โดยความร้อนจากชั้นลาวาได้เผาไหม้ตะกอนบริเวณใต้แนวสัมผัสจนเป็นสีน้ำตาลดำ เกิดเป็นแนวของ “พื้นผิวไหม้ (baked surface)” ที่เห็นได้ชัดเจน (รูปที่ 3 และ รูปที่ 4) หน่วยชั้นตะกอนหน่วยนี้ประกอบด้วยที่เป็นชั้นกรวด 2 ชั้น คั่นกลางด้วยชั้นตะกอนละเอียด (รูปที่ 3) โดยหน่วยชั้นกรวดแรก (Q1; รูปที่ 3ข) มีอายุเก่าที่สุดเป็นชั้นกรวดปนดินเหนียวมีการจับตัวที่แน่น ส่วนชั้นกรวดที่สอง (Q2; รูปที่ 3ค) เป็นชั้นกรวดปนทรายที่มีเลนส์ของตะกอนโคลน (mud) ปนทรายละเอียดที่มีซากใบไม้แทรกในบางช่วง การจับตัวกันของเม็ดกรวดในชั้นนี้ไม่ดีนัก แต่มีการค้ำขนาดดีกว่าชั้นกรวดแรก ซึ่งชนิดกรวดส่วนใหญ่ของทั้งสองชั้นเป็นหินทรายเกรย์แคว มีการกรวดหินควอตซ์สีน้ำตาลปนบ้างเล็กน้อย และมีเศษท่อนไม้สะสมตัวในชั้นด้วย หน่วยที่สองนี้เป็นหน่วยที่สะสมตัวตามท้องน้ำที่ตัดทะลุชั้นกรวดหน่วยแรกอีกทอดหนึ่ง หน่วยที่สาม (Q3) เป็นชั้นทรายละเอียดปนทรายแป้งที่มีชั้นไม้สะสมตัวเป็นช่วงๆ เช่นกัน โดยตะกอนหน่วยนี้สะสมตัวต่อเนื่องอยู่บนหน่วยที่สอง แต่วางตัวไม่ต่อเนื่องกับหน่วยแรกโดยมีแนวสัมผัสแบบเชิงมุม (angular unconformity)

จากการหาอายุชั้นไม้ ที่เก็บจากหน่วยที่สอง หน่วยสาม และชั้นถ่าน จากบริเวณส่วนต่อระหว่างชั้นตะกอนและชั้นหินบะซอลต์ ด้วยวิธี คาร์บอน-14 โดยส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แต่ไม่สามารถวัดค่าเนื่องจากค่าอายุของชั้นไม้โบราณสูงเกินขอบเขตที่จะตรวจวัดได้ด้วยวิธีดังกล่าว ทำให้ยังไม่สามารถระบุอายุที่แน่ชัดของชั้นตะกอนได้ เพียงแต่บ่งชี้ได้ว่าหน่วยตะกอนเหล่านี้มีอายุไม่ต่ำกว่า 35,000 ปี โดยคาดว่าตะกอนชุดนี้มีการสะสมตัวในช่วงยุคน้ำแข็ง (Pleistocene) หรือก่อนหน้านั้น (ธวัชชัย เชื้อเหล่านิช และคณะ 2548)

## 2.2.2 หินอัคนี

หินอัคนีในพื้นที่ศึกษา พบได้เฉพาะหินอัคนีพุ (extrusive igneous rocks) ชนิดหินบะซอลต์ เท่านั้น ซึ่งโผล่ปรากฏเป็นหย่อมพืดหินเล็กๆ ปกคลุมเนิน ในบริเวณคาบเกี่ยวระหว่างบ้านคลองโสน บ้านหนองใหญ่ และบ้านหมื่นดำน ในเขต ตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด ซึ่งสภาพพื้นผิวดั้งเดิมได้ถูกทำลายจากท่าเหมืองพลอยในอดีต และปัจจุบันมีเนื้อที่หินบะซอลต์หลงเหลือ ประมาณ 2 ตร.กม. โดยเป็นไปได้ว่าหินบะซอลต์นี้อาจจะเกิดจากลาวาที่ไหลบ่าออกมาจากปล่องภูเขาไฟขนาดเล็ก (plug) ที่พบอยู่บริเวณบ้านจัดสรร (ปัจจุบันกลายเป็นแอ่งน้ำ) ซึ่งห่างออกไปทางตะวันตกประมาณ 1 กิโลเมตร

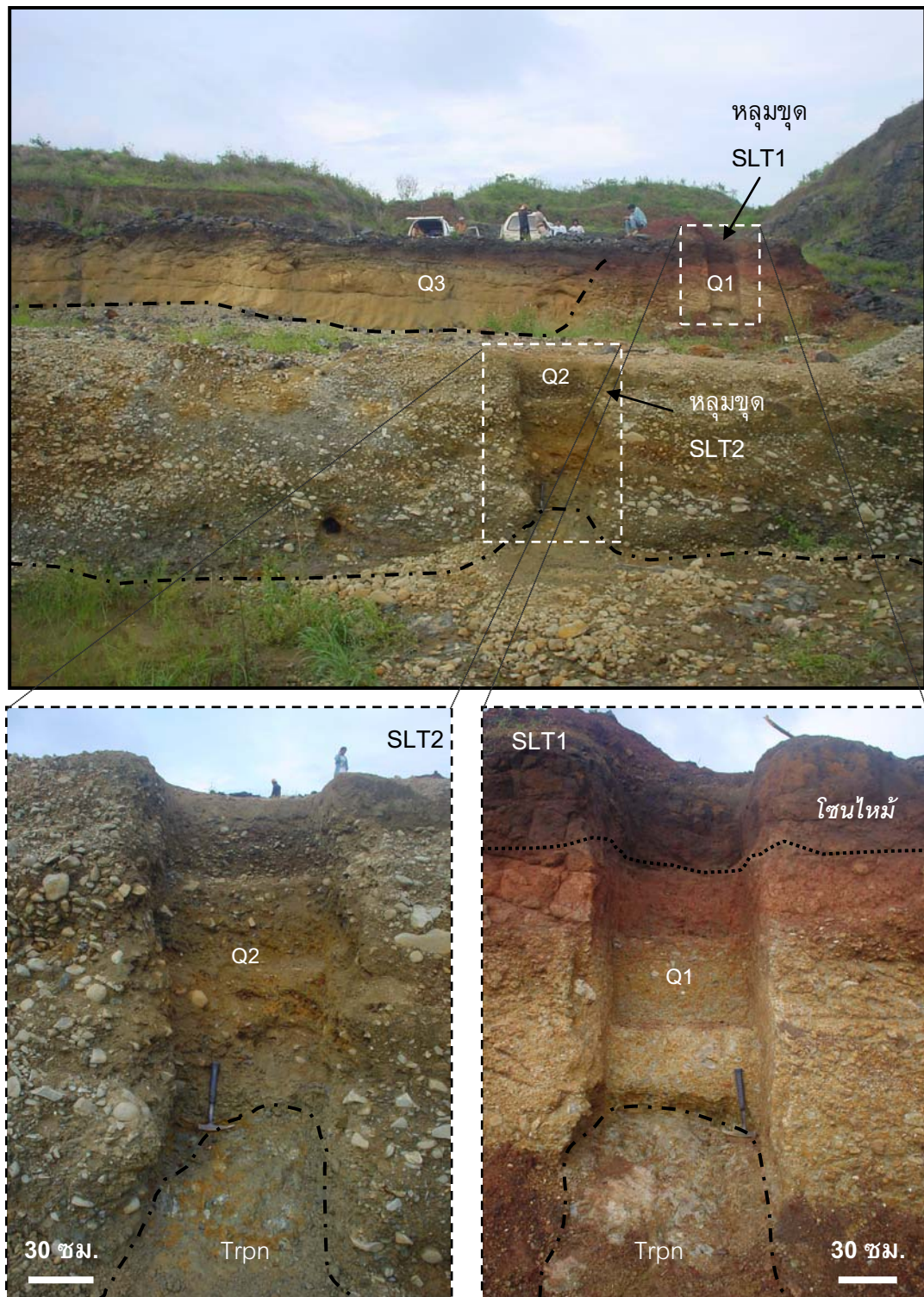
จากการศึกษาหน้าตัดชั้นหินในขุมเหมืองหินศิลาทองสำราญสุข ทำให้เห็นชัดเจนว่าลาวาปะชอลต์ได้ไหลมาเข้ามาในพื้นที่ตามร่องต่ำและปากกลุ่มพื้นผิวตามสภาพความสูงต่ำของภูมิประเทศดั้งเดิม (paleo-topography) โดยไหลปิดทับบนชั้นตะกอนตะพักเก่าและชั้นหินของหมวดหินโป่งน้ำร้อนบางส่วน ก่อนจะแข็งตัวเป็นชั้นหินปะชอลต์ ที่ปัจจุบันเหลือความหนาราว 6-10 เมตร โดยชั้นหินปะชอลต์นี้แสดงลักษณะฐานแบบ 2-fold morphology (รูปที่ 3ก) ที่เกิดจากการเย็นตัวของชั้นลาวาที่เนื้อหินหลอมเหลวในแต่ละส่วนมีอัตราการแข็งตัวและหดตัวไม่เท่ากัน ก่อให้เกิดลักษณะการแตกของเนื้อหินในแต่ละส่วนแตกต่างกัน โดยในเนื้อหินส่วนบนแสดงลักษณะฐานแบบ entablature ที่ปัจจุบันกลายเป็นชั้นหินที่มีความหนาเฉลี่ยเหลือเพียง 2-3 เมตร มีระบบการแตกแบบพัด (fan jointing) ซึ่งให้รอยแตกถี่ตัดกันไปตามทิศทางต่างๆ ส่งผลให้เนื้อหินเกิดการแตกหักเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อย ที่เอื้อต่อการไหลซึมของน้ำ แล้วเกิดการผุสลายในแบบกาบหอม (spheroidal weathering; รูปที่ 3ข) และเนื้อหินส่วนล่างที่ยังคงความสดของเนื้อหินอยู่ แสดงลักษณะฐานแบบ colonnade มีระบบการแตกในแนวตั้งห่างๆ คล้ายแท่งเสา มีความหนาเฉลี่ย 4-6 เมตร และมีโซนแคบๆ ของเนื้อหินที่แสดงลักษณะการแตกในแนวระนาบ (platy cleavage zone) เกิดขึ้นเป็นช่วงรอยต่อระหว่างส่วนทั้งสอง เมื่อต่อมาเนื้อหินในส่วนบนเกิดการผุสลายรุนแรงกว่าเนื้อหินในส่วนล่างมากจนในบางบริเวณโครงสร้างเนื้อหินเดิมถูกทำลายกลายเป็นชั้นดินเหนียวฝังประดับด้วยก้อนกรวดปะชอลต์รูปรูปร่างกลมมน (รูปที่ 3ค) ทำให้มีลักษณะปรากฏที่แยกชั้นหินเป็น 2 ส่วนชัดเจน จนดูเสมือนว่าชั้นหินสองส่วนนี้คั่นกลางด้วยแนวสัมผัสแบบเฉียบพลัน (sharp contact) ที่น่าจะเกิดขึ้นจากการไหลของลาวา 2 ครั้ง และในบางบริเวณที่ร่องรอยโครงสร้างของการแตกแบบกาบหอมเลือนหายไปหมดแล้วนั้น ทำให้ดูเผินๆ คล้ายกับว่าชั้นหินปะชอลต์ผุส่วนบนนี้เป็นชั้นกรวดที่เกิดสะสมตัวโดยอิทธิพลของระบบทางน้ำในอดีต

### 2.3 ธรณีวิทยาแหล่งแร่

ในเขต ตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด ซึ่งในอดีตเคยเป็นพื้นที่แหล่งทำเหมืองพลอยทับทิมที่สำคัญที่สุดของประเทศ ซึ่ง รัชชชัย เชื้อเหล่านิช (2545) ได้สำรวจโดยเลือกสุ่มเก็บตะกอนตัวอย่างระดับต้นจากชั้นกรวดท้องน้ำ ชั้นกรวดริมตลิ่ง และชั้นกรวดตะพักเก่า รวมทั้งการขุดหลุมทดลอง จากนั้นชักตัวอย่างมาส่องแสง พบว่ามีพลอยทับทิมและ/หรือแร่เพื่อนพลอย ชนิดแมกนีไทต์-อิลเมไนต์ (magnetite-illmenite) ไพรอกซีน (pyroxene) และการ์เนทสีน้ำปลา (pyropic garnet) สะสมตัวในหลายจุด โดยเฉพาะ ตามบริเวณคลองไท-คลองฉนาก และคลองลือ (รูปที่ 2)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการขุดหลุมทดลองเพิ่มเติมในบริเวณห่อมหินปะชอลต์ในเขตเหมืองหินศิลาทองสำราญสุข จำนวน 4 หลุม โดยสองหลุมแรก (หมายเลขหลุม SLT 1 และ SLT 2) ขุดในชั้นกรวดใต้ชั้นปะชอลต์ และอีกสองหลุม (หมายเลขหลุม SLT 3 และ SLT 4) ขุดในชั้นหินปะชอลต์ในส่วนบนที่เป็นเนื้อผุ ซึ่งได้ผลดังนี้

จากการขุดหลุมทดลอง SLT 1 ผ่านชั้นกรวดหน่วยแรก (รูป 3ข) พบว่า มี(ไร)ทองคำสะสมตัวอยู่ แต่ยังไม่พบพลอยหรือแร่เพื่อนพลอยร่วมด้วย ส่วนผลการขุดหลุมทดลอง SLT 3



- รูปที่ 3 ก) ชั้นตะกอนยุคใหม่ใต้ชั้นหินปะชอลต์ในบริเวณเหมืองหินศิลาทอง ที่แสดง “ผิวใหม่” (สีน้ำตาลเข้ม) ใต้บริเวณแนวสัมผัส (มุมมอง  $\sim 0^\circ$ );
- ข) (รูปล่างขวา) ส่วนขยายชั้นกรวด Q1 ที่พบไรทองคำจากการขุดหลุมทดลองแร่ SLT1 และชั้นกรวด Q2;
- ค) (รูปล่างซ้าย) ที่พบทั้งทับทิม แร่เพื่อนพลอยและไรทองคำจากการขุดหลุมทดลองแร่ SLT2



- รูปที่ 4 ก) ชั้นหินบะซอลต์เหนือชั้นตะกอนยุคใหม่ในบริเวณเหมืองหินศิลาทองแสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อหินแบบเฉียบพลัน ระหว่างส่วนเนื้อผุ (ส่วนบน; สีส้มอมเหลือง) กับส่วนเนื้อหินสด (ส่วนล่าง; ชั้นสีเทา) ทำให้ดูเสมือนว่าจะเป็นชั้นหินลาวา 2 ชั้น (มุมมอง  $\sim 80^\circ$ );
- ข) (รูปล่างซ้าย) ภาพขยายเนื้อหินของบะซอลต์ผุ โดยแสดงลักษณะการผุแบบ spheroidal ในส่วนบนของชั้นบะซอลต์;
- ค) (รูปล่างขวา) บริเวณที่ชั้นหินผุมากจนโครงสร้างการผุแบบ spheroidal เลื่อนไปทำให้ดูคล้ายเป็นชั้นตะกอนดินเหนียวที่มีกรวดกลมมนฝังปะอยู่

ผ่านชั้นกรวดหน่วยที่สอง (รูป 3ค) พบทับทิม สะสมตัวรวมกันแร่แมกนีไทต์-อิลิเมไนต์ เป็นหลัก ส่วนแร่เพื่อนพลอย ชนิดไพโรอกซีน และการ์เนท พบในปริมาณน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับแมกนีไทต์-อิลิเมไนต์ โดยเกร็ดทับทิมขนาดเล็ก (<2 มม.) สะสมตัวในบริเวณส่วนล่างของชั้นกรวดใกล้ถึงหินดาน นอกจากนี้ยังพบไรทงคำสะสมตัวร่วมด้วย ซึ่งการพบทับทิมและแร่เพื่อนพลอยในชั้นกรวดนี้ เป็นข้อบ่งชี้ที่ดีว่าในบริเวณพื้นที่ศึกษานี้บางส่วนเคยปกคลุมด้วยหินบะซอลต์ชนิดนำพลอย (แม้ว่าจะยังไม่พบก้อนกรวดของหินบะซอลต์ในชั้นกรวดดังกล่าว) มาแล้วอย่างน้อยหนึ่งช่วงเวลาก่อนที่ลาวาที่ให้หินบะซอลต์ชุดที่ปรากฏอยู่ในปัจจุบันจะไหลบ่ามาปิดทับอีกระลอกหนึ่งในภายหลัง

จากการชุดหลุมทดลอง SLT 3 และ SLT 4 ในชั้นเนื้อหินบะซอลต์ผุ (รูป 4ก) พบทั้งทับทิมและแร่เพื่อนพลอยหลายชนิด ได้แก่ แมกนีไทต์-อิลิเมไนต์ ไคลโนไพโรอกซีนสีดำ (augitic clinopyroxene) ไคลโนไพโรอกซีนสีเขียวมรกต (diopsidic clinopyroxene) การ์เนท และ เซอร์คอน (zircon) โดยทับทิมที่ได้มีขนาดไม่ใหญ่ ( $\leq 2$  มม.) ซึ่งเกร็ดทับทิมที่ได้ไม่มีความแตกต่างทางลักษณะกายภาพกับเม็ดแร่ทับทิมที่พบฝังในก้อนหินแปรกล่อมอุ้มพลอยที่ได้จากส่วนเนื้อหินสด ดังนั้นอาจอนุมานได้ว่าเกร็ดทับทิมที่ฝังประในเนื้อหินบะซอลต์ผุนั้นน่าเป็นแร่ที่หลงเหลือจากผุสลายของก้อนหินแปรกล่อมอุ้มพลอย

ผลที่ได้จากการชุดหลุมทดลองนี้ได้พิสูจน์ยืนยันว่าชั้นหินบะซอลต์ผุที่ปรากฏอยู่เป็นหินที่นำพลอยทับทิมขึ้นมา โดยหินสดบางส่วนได้ผุสลายไปเป็นดิน ขณะที่แร่คอร์ันดัม (ทับทิม) และเพื่อนแร่ ที่ทนต่อการผุสลายยังคงสภาพเดิมอยู่ ต่อมาเมื่อชั้นหินผุบางส่วนผุพังลง ทับทิมและแร่เพื่อนพลอยดังกล่าว (รูปที่ 5) บางส่วนได้หลุดจากชั้นหินผุไปสะสมตัวใหม่เป็นแหล่งพลอยทุติยภูมิในบริเวณใกล้เคียงโดยรอบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าพื้นที่บริเวณนี้ยังมีศักยภาพของการเป็นแหล่งพลอยทุติยภูมิทั้งแบบสะสมตัวอยู่กับที่ (in situ deposit) และแบบลานแร่ (placer deposit) หลงเหลืออยู่ ทั้งในส่วนที่เป็นชั้นกรวดทางน้ำปัจจุบัน และชั้นกรวดเก่าใต้ชั้นหินบะซอลต์ ประกอบกับการพบก้อนหินแปรกล่อมอุ้มทับทิม (แร่คอร์ันดัมที่มีสีเจดชมพู-ม่วง) ฝังในเนื้อหินบะซอลต์สดในบริเวณนี้ เป็นข้อยืนยันอีกชั้นหนึ่งว่า พืดหินบะซอลต์ที่หลงเหลืออยู่บริเวณบ้านหนองโสนและบ้านหมื่นดำนนี้เป็นชนิดที่นำพลอยขึ้นมา ทั้งนี้ลักษณะของเม็ดแร่พลอยทับทิม ที่พบฝังในก้อนหินแปรกล่อม แสดงให้เห็นว่าทับทิมไม่ได้ตกผลึกโดยตรงจากหินหนืดบะซอลต์ เพียงแต่อาศัยหินหนืดเป็นตัวกลางนำขึ้นมาสู่ผิวโลก และยังบ่งชี้ในเบื้องต้นว่าหินบะซอลต์บริเวณนี้เกิดจากการหลอมตัวของชั้นหินที่อยู่ในระดับที่ลึกกว่าระดับของชั้นหินที่แร่พลอยทับทิมถือกำเนิด



รูปที่ 5 เกร็ดพลอยทับทิมและเพื่อนแร่บางตัว ได้แก่ เซอร์คอน และอิลเมโนแมกนีไทต์ ที่ได้จากการสำรวจ  
ในบริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษา (จาก ธวัชชัย เชื้อเหล่าวานิช และคณะ 2548)

## บทที่ 3: ศิลาบรรณนาและศิลาเคมี

### 3.1 ศิลาบรรณนา

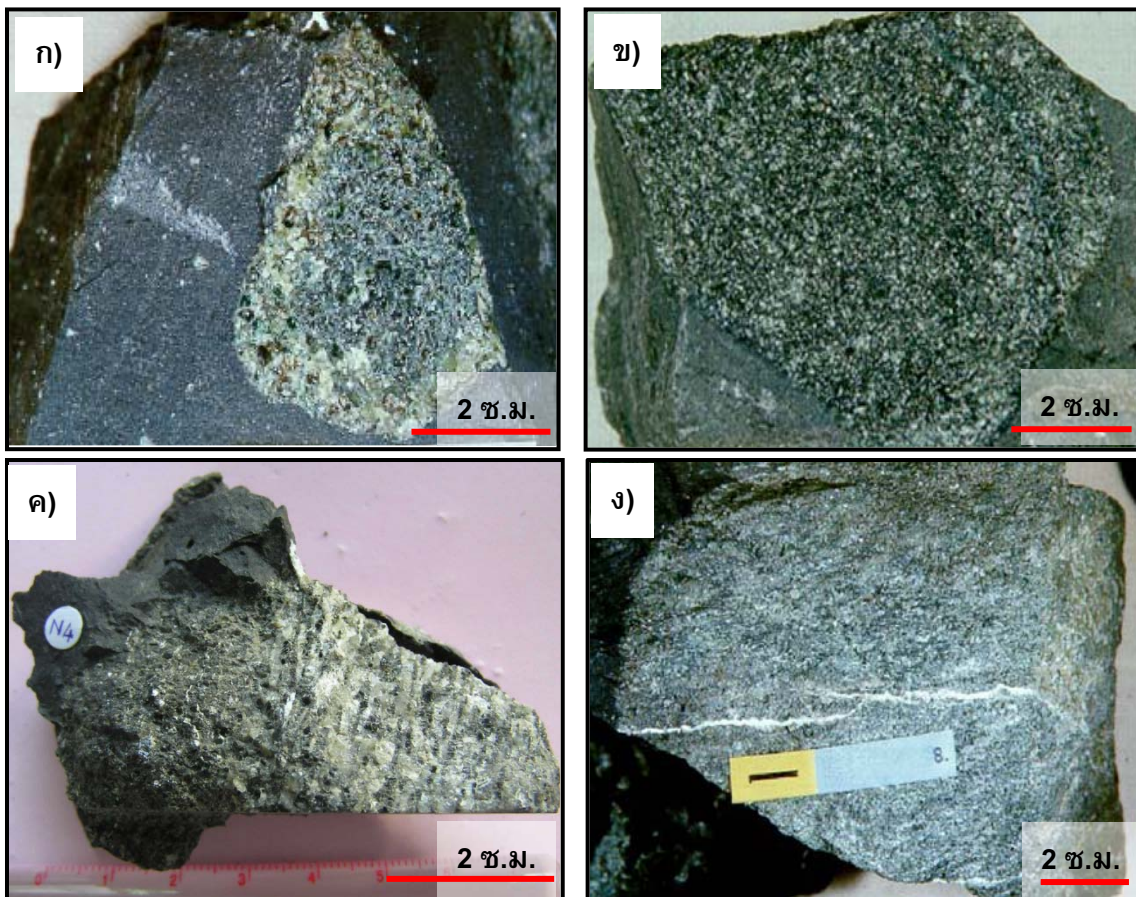
ลักษณะเด่นทางกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าของหินบะซอลต์ในบริเวณนี้คือ เป็นหินโอลิวีนบะซอลต์ที่มีเนื้อพื้นขนาดละเอียดมาก (aphanitic groundmass) โดยผลึกแร่ดอกขนาดเล็ก (<2 มม.) ของแร่โอลิวีน ฝังประห่างๆทั่วไปเนื้อหิน คิดเป็นสัดส่วนน้อยกว่าร้อยละห้า โดยพื้นที่ และมีก้อนมลทิน (inclusions) ซึ่งประกอบด้วยก้อนหินแปลกปลอม (xenoliths) ผลึกแร่ดอกขนาดใหญ่ (megacrysts) และแร่แปลกปลอม (xenocrysts) ขนาดต่างๆ ฝังประเป็นหย่อมๆ และด้วยลักษณะเนื้อหินที่ต่างกันระหว่างเนื้อพื้นที่เป็นบะซอลต์ (basalt matrix) กับเนื้อของเหล่าก้อนมลทินกับทำให้ลักษณะหินดูโดยรวมแล้วคล้ายกับผิวที่เป็นปาน (รูปที่ 6ก-ข) ซึ่งก้อนมลทินแปลกปลอมนี้มีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 2 ซม. ถึงกว่า 25 ซม. และมีรูปร่างมน ชนิดหินแปลกปลอมส่วนใหญ่เป็นหินอัคนีบาดาลระดับลึกในกลุ่มอัลตราเมฟิก (ultramafic) และบางก้อนเป็นหินแปรเกรดสูง ชนิด plagioclase-bearing granulitic rocks ที่มีองค์ประกอบทางแร่เทียบเคียงได้กับหินอัคนี กลุ่มเมฟิก (mafic) โดยปกติแถบปฏิกิริยาเคมี (reaction band) มักพบเกิดขึ้นล้อมรอบและกินเข้าไปในเนื้อของก้อนหินแปลกปลอม ก้อนแร่ดอกแปลกปลอม และก้อนแร่ดอกขนาดใหญ่ชนิดต่างๆ โดยเฉพาะกับก้อนที่เป็นแร่ไพรอกซีนสีดำเจือเขียว (นิลเสี้ยน) ซึ่งเนื้อแร่บางก้อนที่แปรสภาพไปจากเนื้อแร่ดั้งเดิมทั้งหมด ดูเผินๆคล้ายเนื้อหินดินดานสีออกโทนชมพูจางๆ ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอสาร (metasomatism) กับแมกมา สำหรับก้อนแร่แปลกปลอมที่เป็นกระจกแร่ไมก้าสีเข้ม (phlogopite?) พบเห็นบ้างไม่บ่อยนัก เช่นเดียวกับแร่แปลกปลอมที่เป็นการ์เนท ขนาดแร่ดอกแปลกปลอมที่พบมักมีขนาดตั้งแต่ 1-5 ซม. ส่วนหินแปลกปลอมที่เป็นหินตะกอนท้องที่ เช่น หินทรายเกรย์เวด และหินดินดาน สามารถพบได้ประปราย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะให้ความสำคัญกับหินแปลกปลอมที่เป็นหินอัคนีระดับลึก และหินแปรเกรดสูง เป็นหลัก

ด้วยลักษณะทางศิลาบรรณนาเบื้องต้น สามารถแบ่งหินแปลกปลอมชนิดหินอัคนีบาดาลระดับลึก เป็น 3 จำพวกหลัก ได้แก่

(1) เลอโซไลต์ (Iherzolite; รูปที่ 6ก) เป็นหินอัลตราเมฟิกที่มีสีเขียวอมเหลือง มีแร่โอลิวีนเป็นส่วนประกอบหลักและมีไพรอกซีนเป็นแร่รอง ซึ่งหินแต่ละก้อนแสดงลักษณะเนื้อหินแบบผลึกแร่ขนาดเดียว (equigranular) เม็ดแร่เกาะตัวกันไม่ตึก โดยเนื้อหินมีขนาดตั้งแต่ เนื้อละเอียด (~1 มม.) ถึงค่อนข้างหยาบ (~4 มม.)

(2) ไพรอกซีนไนต์ (pyroxenite; รูปที่ 6ข) เป็นหินอัลตราเมฟิกที่มีแร่รองประกอบหลักเป็นแร่ไพรอกซีนและมีโอลิวีนเป็นแร่รอง มีลักษณะเนื้อหินคล้ายกับจำพวกแรก แต่มีเข็มออกปาทงดำเจือเขียว มีขนาดเม็ดแร่ในช่วงละเอียดถึงปานกลาง (~1-3 มม.) เป็นหลัก โดยบางก้อนมีแร่การ์เนทเป็นแร่เสริม (accessory mineral)

(3) ไพริคลาไซต์ (pyriclasite; รูปที่ 6ค-ง) เป็นหินในกลุ่มเมฟิกแกรนูไลต์ที่มีแร่รองประกอบหลักเป็นแพลจิโอเคลส และไพรอกซีน โดยมีสัดส่วนของไพรอกซีนไม่ต่ำกว่าร้อยละสิบห้า

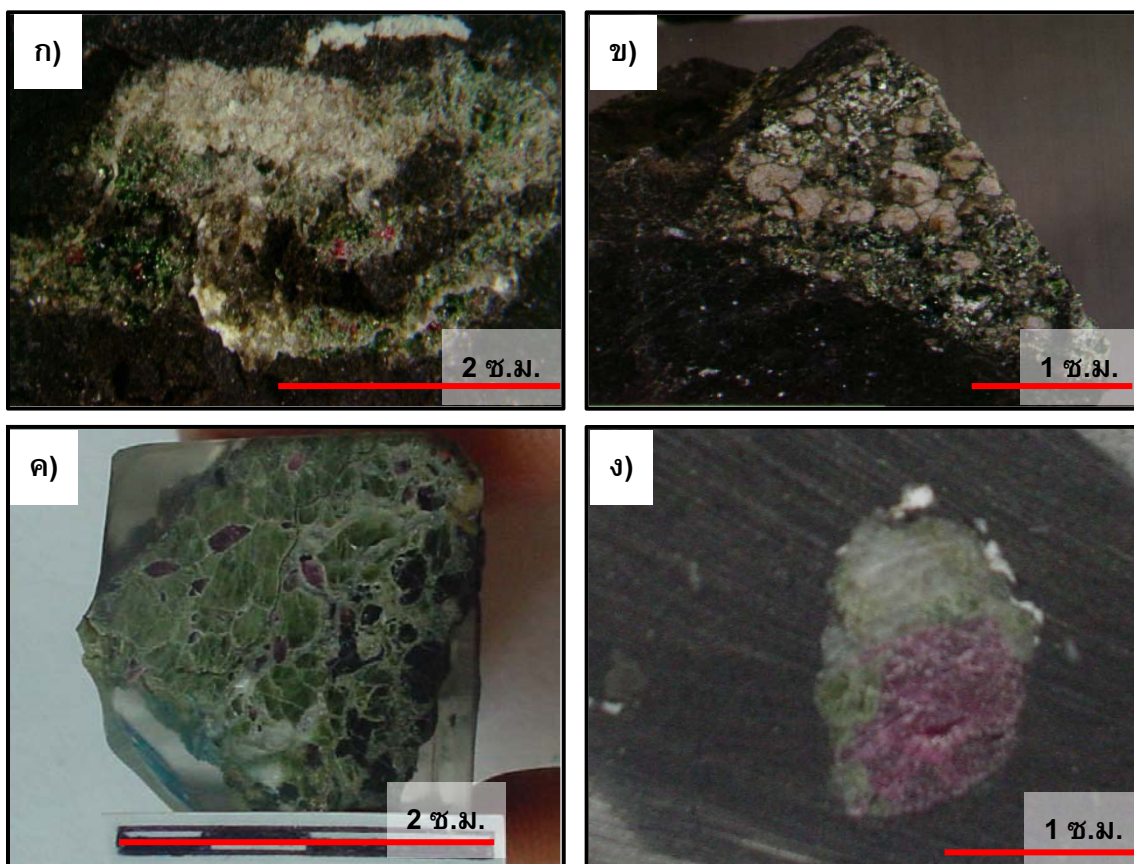


รูปที่ 6 ตัวแทนหินแปลกปลอมอัลตราเมฟิกและเมฟิกในหินบะซอลต์:

- ก) หินเลอโซไลต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว (equigranular) เม็ดแร่ขนาดปานกลาง;
- ข) หินไพรอกซีนิต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว (equigranular) เม็ดแร่ขนาดเล็ก;
- ค) หินไพรอกซีนิต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว แทรกชั้นกับหินไพริคลาไซต์ เนื้อริ้ว (floriated) เม็ดแร่ขนาดปานกลางถึงหยาบ;
- ง) หินไพริคลาไซต์ เนื้อผลึกขนาดเดียว เม็ดแร่ขนาดเล็ก

(ตามคำนิยามจาก Sutthirat, 2001) แร่ไพรอกซีนส่วนใหญ่มีโทนสีเขียวตุ่น (pastel green) ถึงเขียวมรกต มักมีแร่การ์เนทเกิดร่วมด้วย บางตัวอย่างมีการ์เนทมากกว่าร้อยละสิบ หินจำพวกนี้มีทั้งชนิดที่มีเนื้อเป็นแร่ขนาดเดียวและหลากหลายขนาด (inequigranular) แต่ส่วนใหญ่เป็นชนิดที่มีเนื้อแร่หลากหลายขนาด และมักแสดงการเรียงตัวของเม็ดแร่ให้เห็นทั้งในระดับที่มองด้วยตาเปล่าและภายใต้กล้องจุลทรรศน์ สำหรับตัวอย่างก้อนหินแปลกปลอมอัมพลอย (ruby-bearing xenolith; รูปที่ 7) นั้น ในเบื้องต้นจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกับหินไพริคลาไซต์ เนื่องจากมีลักษณะปรากฏ และชนิดแร่องค์ประกอบคล้ายกับหินไพริคลาไซต์ ที่ประกอบด้วยแร่ไพรอกซีนโทนสีเขียวสดเป็นหลัก (โดยอาจมีปริมาณสูงถึงกว่า ร้อยละ 90) มีแร่คอร์ันดัมชนิดทับทิมเป็นแร่รองหลัก และอาจมีแร่การ์เนทและ/หรือแพลจีโอเครส เป็นแร่รองเสริม ซึ่งตัวอย่างที่พบส่วนใหญ่มีลักษณะเนื้อหินเป็นเนื้อผลึกแร่ขนาดเดียวที่มีขนาดเม็ดแร่ประมาณ 1.5-3 มม. (รูปที่ 7ก-ค) แต่บางก้อนตัวอย่างแสดงลักษณะ

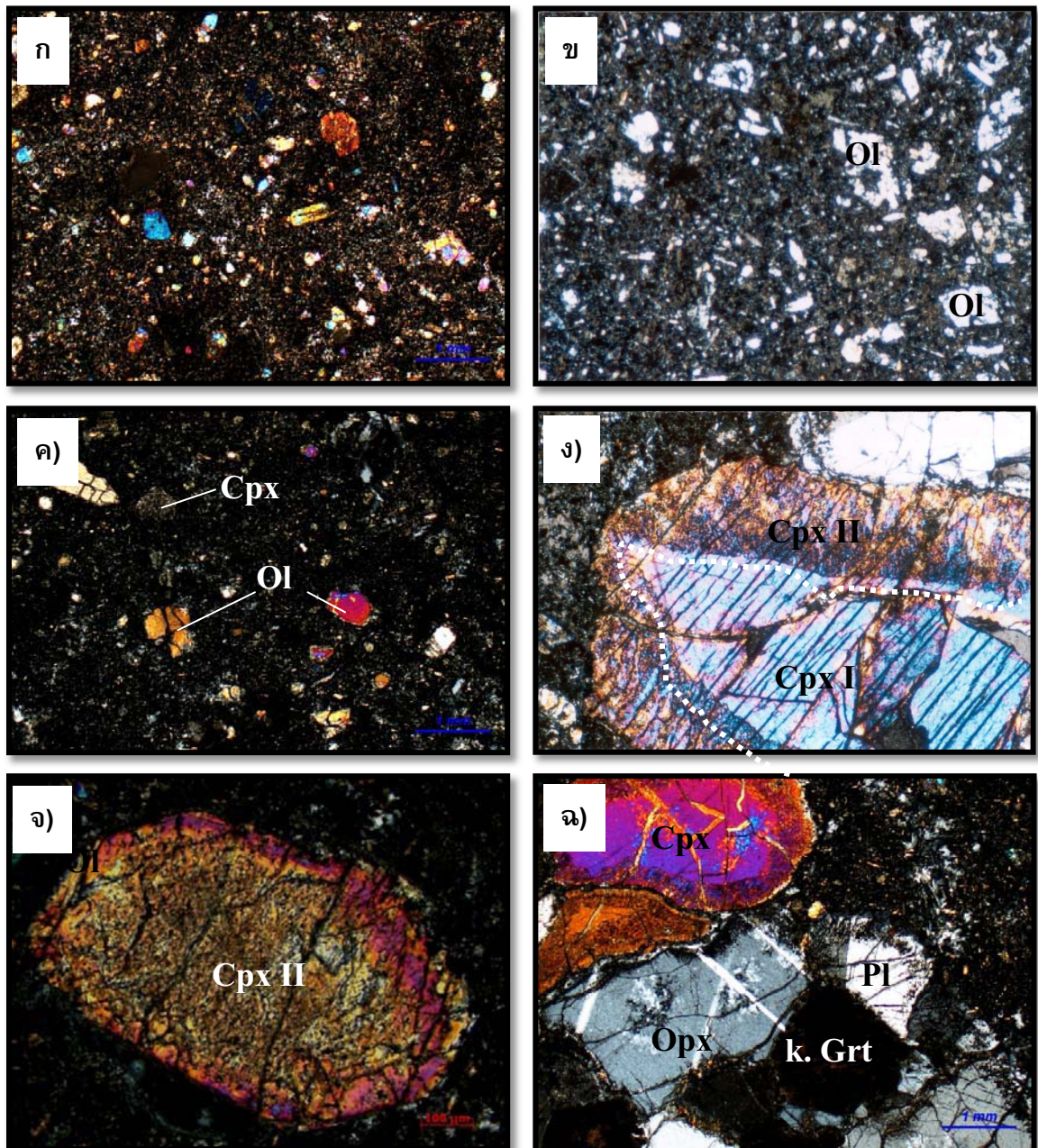
เนื้อผลึกหลากหลายขนาด ที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดแร่ทับทิมอาจใหญ่ถึงเกือบ 1 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 7ง ได้เช่นกัน



รูปที่ 7 ตัวแทนหินแปรกล่อมอุ้มพลอยในหินบะซอลต์:

- ก) TrBRc 2 และ ข) TrBRc 3 มีเนื้อหินขนาดปานกลาง ประกอบด้วยแร่ไพรอกซีน ชนิดไดออปไซด์ (สีเขียวใบไม้) คอร์รันดัม ชนิดทับทิม (สีแดงชมพู) แพลจิโอเคลส (สีขาวนํ้านม) และคาร์ฟติก การ์เนท (สีขาวขุ่นอมชมพู);
- ค) TrBRc 4 มีเนื้อผลึกขนาดปานกลางถึงหยาบ ที่ประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ และทับทิม ที่มีขอบปฏิกิริยาบาง ๆ หุ้มรอบผลึกทับทิม;
- ง) TrBRc 1 มีเนื้อหยาบที่ประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ แพลจิโอเคลส และเม็ดแร่พลอยขนาดใหญ่ เนื้อหยาบที่ประกอบด้วยแร่ไดออปไซด์ แพลจิโอเคลส และเม็ดแร่พลอยขนาดใหญ่

ลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินบะซอลต์ เป็นหินเนื้อละเอียดฝังประดับด้วยแร่ดอกขนาดเล็ก (microporphyritic) โดยเนื้อพื้นเป็นเนื้อผลึกล้วน (holocrystalline; รูปที่ 8ก) ที่มีแร่แพลจิโอเคลส เป็นเนื้อพื้น มีแร่โอลิวีนและไคลโนไพรอกซีนเป็นแร่ดอกขนาดเล็กที่แสดงขอบหน้าผลึกบางส่วนถึงมีหน้าสมบูรณ์ (subhedral to euhedral) ไม่มีแนวปฏิกิริยาระหว่างเนื้อพื้นกับแร่ดอกเหล่านี้ให้เห็นชัดเจนนัก เว้นแต่มีลักษณะการกร่อน (corroded) นอกจากนี้ตามขอบแร่ดอกมีให้เห็นบ้าง ส่วนในบริเวณที่เนื้อบะซอลต์สัมผัสกับผลึกแร่ไพรอกซีนในหินแปรกล่อมมักพบวงแถบปฏิกิริยาที่ดูคล้ายฟองน้ำ (spongy-textured reaction rind; รูปที่ 8ข) คั่นกลาง เช่นเดียวกับ บริเวณ



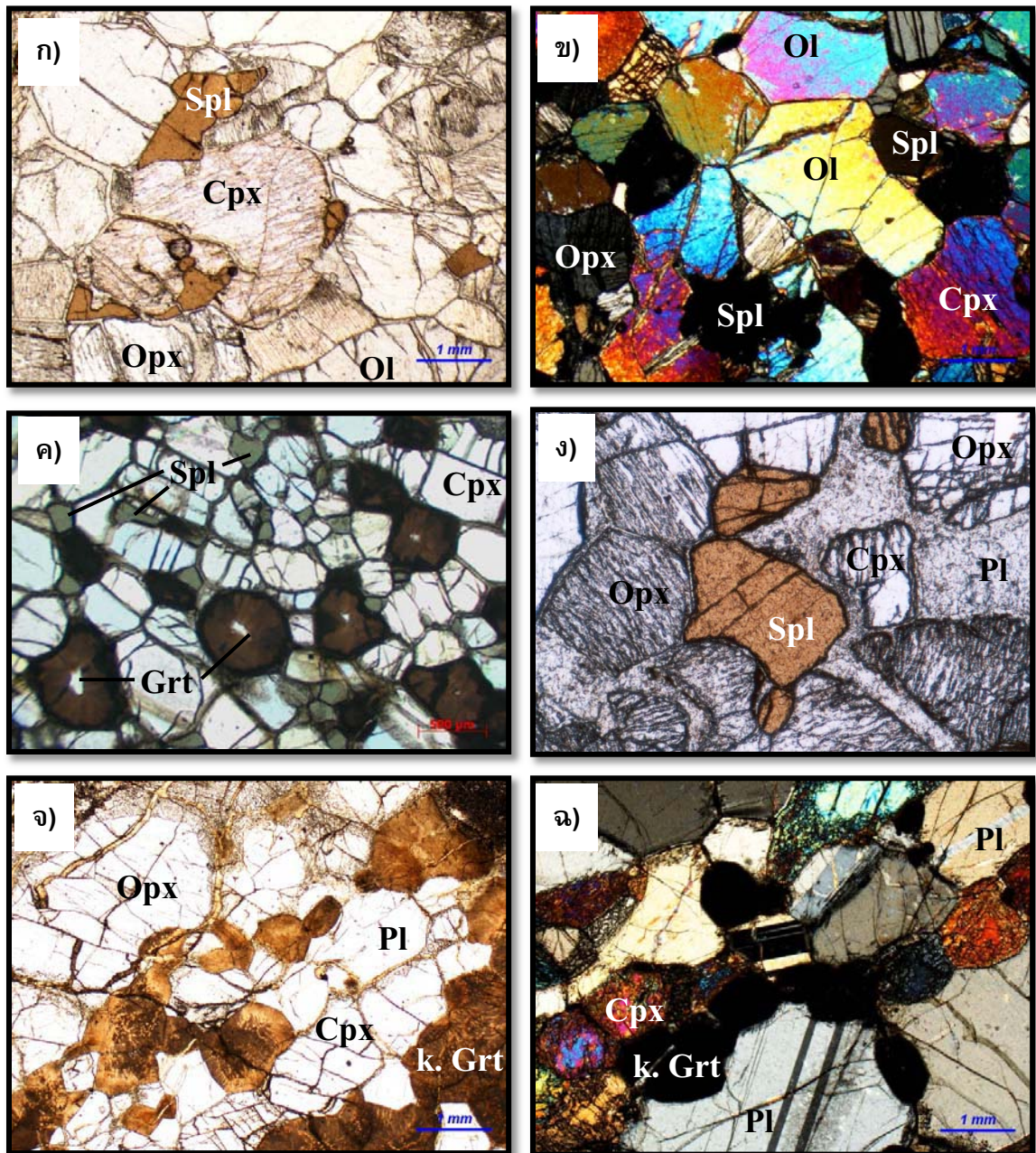
รูปที่ 8 ลักษณะเนื้อหินบะซอลต์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ภายใต้กำลังขยาย 40x:

- ก) และ ข) เนื้อพื้น ที่มีผลึกแร่ดอกขนาดเล็กของโอลิวีน (Ol) ผังประและเหมือนว่าผลึกแท่ง (laths) แพลจิโอเครส (Pl) มีการวางตัวไปในทิศทางเดียวกัน;
- ค) เนื้อพื้นที่มีขนาดละเอียดกว่าและไม่แสดงการเรียงตัวของผลึกแท่งแพลจิโอเครส;
- ง) ขอบปฏิกิริยา 2 ชั้นของแร่โคลโนไพรอกซีนทุติยภูมิ (Cpx II) รอบผลึกแร่โคลโนไพรอกซีนปฐมภูมิ (Cpx I) ที่สัมผัสกับบะซอลต์โดยขอบปฏิกิริยาชั้นในแสดงลักษณะเนื้อคล้ายฟองน้ำ;
- จ) ผลึกแร่โคลโนไพรอกซีน ปฐมภูมิ (Cpx I) ที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแร่โคลโนไพรอกซีนทุติยภูมิ (Cpx II) ทั้งหมด โดยที่เนื้อผลึกส่วนในแสดงลักษณะเนื้อคล้ายฟองน้ำ;
- ฉ) ขอบปฏิกิริยารอบผลึกแร่ต่าง ๆ ในชิ้นส่วนของหินแปรกล่อมที่เป็นผลึกจากการทำปฏิกิริยากับบะซอลต์

ขอบผลึกและตาม รอยแตกภายในแร่ไพรอกซีนในหินแปรกล่อม และบางครั้งแสดงขอบปฏิกิริยา 2 ชั้น ให้เห็นด้วยเช่นกัน ซึ่งลักษณะแถบปฏิกิริยาที่ดูคล้ายฟองน้ำนี้ Taylor and Neal (1989) ได้ตีความว่าเป็นผลของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอสารในระหว่างที่ลอยอยู่ในแมกมา โดยมีการชะละลายธาตุ Na และ Al ออกไปจากโครงสร้างผลึกแร่โคลโนไพรอกซีนปฐมภูมิ เกิดเป็นแถบปฏิกิริยาที่กลายเป็นแร่โคลโนไพรอกซีนทุติยภูมิ ทำให้โครงสร้างผลึกแร่ในบริเวณดังกล่าวมีปริมาตรลดลง เกิดเป็นรอยแตกขึ้นภายในผลึกแต่ไม่ทำให้คุณสมบัติทางแสงระหว่างแกนกลางกับขอบแร่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป และลักษณะขอบปฏิกิริยาแบบนี้สามารถพบได้ในหินแปรกล่อมเลอโซไลต์จากประเทศจีนเช่นกัน

สำหรับลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรกล่อมส่วนใหญ่มักแสดงลักษณะเม็ดแร่ขนาดปานกลางถึงหยาบ เป็นเนื้อผลึกแร่แบบหลายเหลี่ยม (polygonal texture) โดยมีการประสานตัวของผลึกแร่หลักในรูปแบบของ mosaic ที่มีมุมผลึกต่อกัน (dihedral angle) ประมาณ  $120^{\circ}$  ซึ่งบ่งชี้สภาพการก่อตัวของหินแปรกล่อมเหล่านี้ว่า เกิดขึ้นภายใต้สมดุลภาวะทั้งเชิงเคมีและเชิงกล ในจำพวกหินเลอโซไลต์ที่มีแร่โอลิวีน โคลโนไพรอกซีน และออร์โทไพรอกซีน เป็นแร่องค์ประกอบหลัก และมีแร่สปิเนลเป็นแร่เสริมที่สำคัญ (รูปที่ 9ก-ข) ในขณะที่แร่การ์เนทมักพบเป็นแร่เสริมที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในหินไพรอกซีนิต์และไพริคลาไซต์ โดยผลึกการ์เนท ส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสภาพจากเนื้อแร่เดิมไปเป็นกระจกแร่เสียนทุติยภูมิ Kalyphite สีน้ำตาลแดงที่ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกเดิมของการ์เนทไว้ (รูปที่ 9ค-ง) นอกจากนี้ในหินไพรอกซีนิต์บางส่วนและส่วนใหญ่ของหินไพริคลาไซต์ยังสามารถพบลักษณะเนื้อหินแบบ porphyroblastic texture เกิดควบคู่กับลักษณะของเนื้อรวิหยาบ (crude foliated texture) ที่แสดงแถบการเรียงตัวของแร่เป็นรูปเลนส์ (mineral banding lens) ของแร่สีเข้มสลับกับแร่สีอ่อนแต่เม็ดแร่ไม่แสดงลักษณะเด่นชัดใดๆที่บ่งว่าเนื้อหินนี้ก่อตัวภายใต้ภาวะแรงเครียด (stress texture) และการประสานตัวของผลึกแร่ส่วนใหญ่ยังคงลักษณะความเป็น mosaic อยู่

ส่วนลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรกล่อมอัมพลอย (รูปที่ 10) นั้นส่วนใหญ่มีเม็ดแร่ขนาดปานกลาง ที่แสดงลักษณะเป็นเนื้อผลึกแร่แบบหลายเหลี่ยม (polygonal texture) จะพบเม็ดผลึกแร่คอร์ันดัม (corundum) สีชมพูอมม่วง (หรือที่เรียกว่า พลอยทับทิม) ส่วนใหญ่เกิดเป็นผลึกแท่ง (prismatic) ขนาดเล็ก มีขนาด 0.1-3 มม. ที่มักแสดงหน้าผลึกที่สมบูรณ์ถึงสมบูรณ์ฝั่ประในเนื้อหิน และมักไม่แสดงหน้าผลึกเมื่อมีขนาดใหญ่ โดยแร่คอร์ันดัมเกิดร่วมในภาวะสมดุลกับแร่อื่นๆ อีก 5 ชนิด คือ ไดออปซิติกไพรอกซีน สปิเนล การ์เนท และ แพลจิโอเคลส แต่แสดงความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับแร่ไพรอกซีนมากกว่ากับแร่เกิดร่วมตัวอื่นๆ ซึ่งแร่ไดออปซิติกไพรอกซีน จะแสดงลักษณะ poikilitic หุ้มผลึกคอร์ันดัมเสมอ และในบางบริเวณของตัวอย่าง TrBr2 (ดูรูป ในภาพผนวก) พบคอร์ันดัมแสดงการตกผลึกในลักษณะคล้ายรูปแบบของ crescumulatic texture นอกจากนี้พบว่าแร่การ์เนทที่เกิดร่วมส่วนใหญ่มีการกลายสภาพไปเป็นกระจกแร่เสียนทุติยภูมิ (kalyphite) สีขาวขุ่นอมชมพูในเนื้อหิน (แต่มีสีน้ำตาลภายใต้กล้องจุลทรรศน์) โดยยังคงรักษาสภาพโครงสร้างผลึกของการ์เนทเดิมไว้

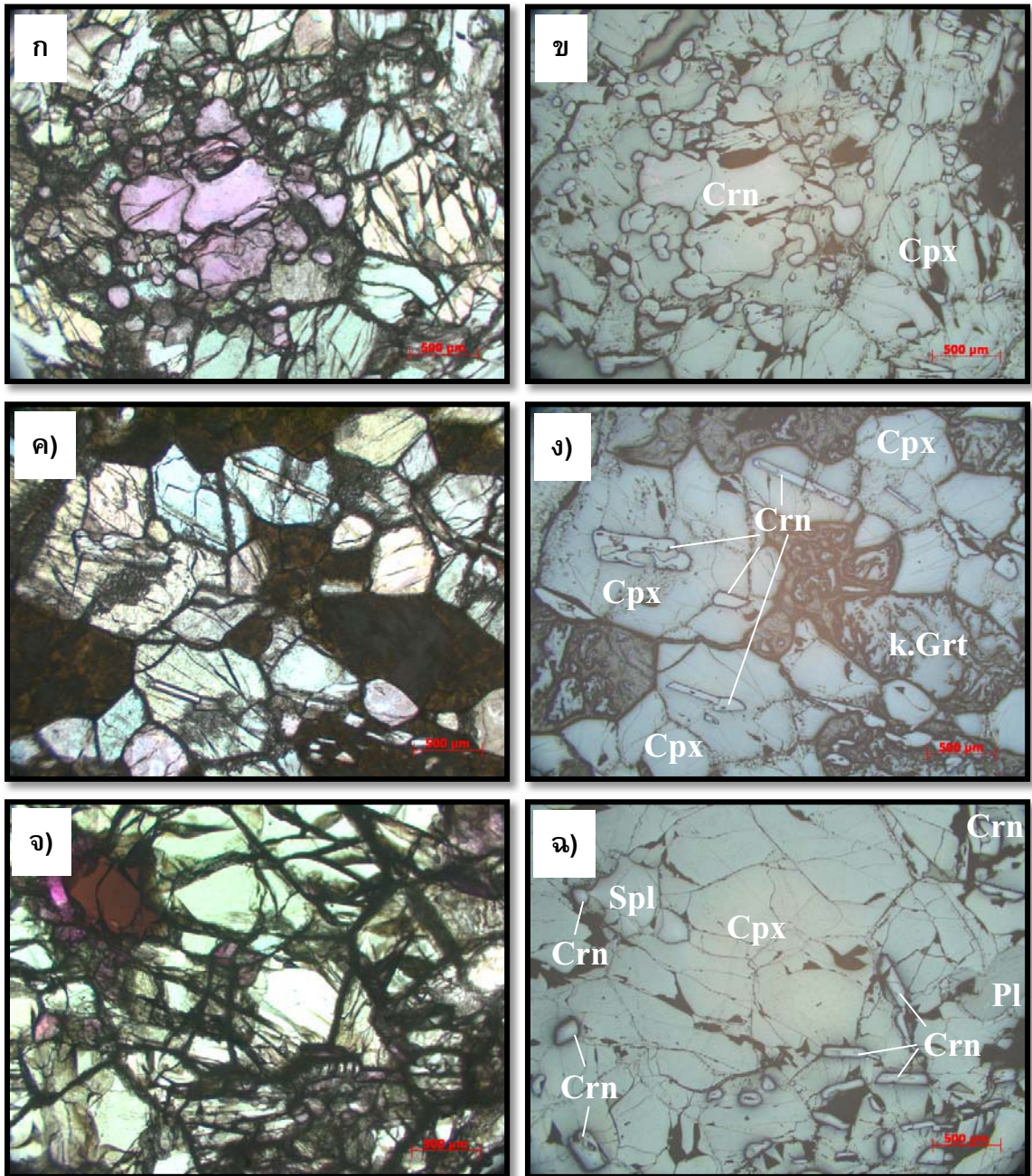


รูปที่ 9 ลักษณะเนื้อหินแปรกลบลงภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยใช้กำลังขยาย 40x ที่บ่งถึงสภาวะสมดุลในการก่อตัวของแร่ประกอบหินที่ชัดเจน:

ก) และ ข) เนื้อหินสปิเนล เลอโซไรต์ (TrBr5);

ค) เนื้อหินการเนท - สปิเนล ไพรอกซีไนต์ (TrBr9-3) และ ง) เนื้อหินสปิเนล ไพรอกซีไนต์ (TrBr20);

จ) และ ฉ) เนื้อหินไพริคลาไซต์ (TrBr31 และ N8) ที่แสดงลักษณะของเนื้อริ้วหายาบ

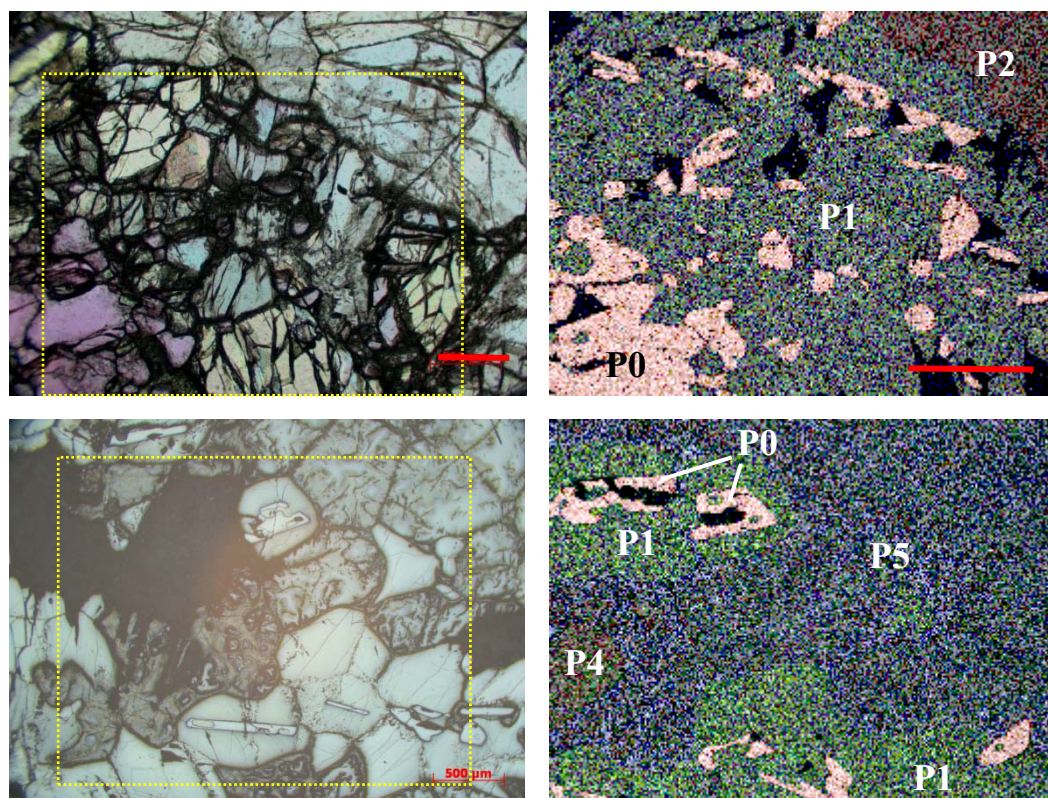


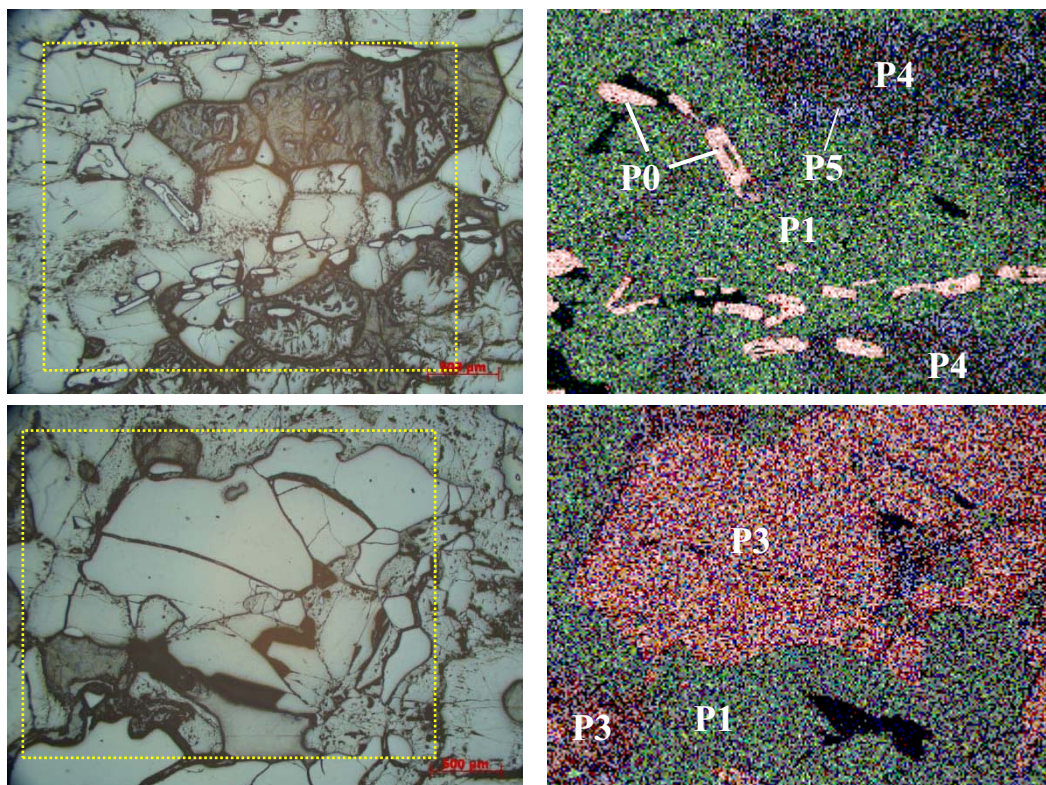
รูปที่ 10 เปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินแปรกล่อมอุ้มพลอยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 40x) โดยใช้แสงทะลุผ่าน (ซีกซ้าย) และแสงสะท้อน (ซีกขวา) ซึ่งเนื้อหินบ่งถึงสภาวะสมดุลในการก่อตัวของแร่ประกอบหินที่ชัดเจน:

- ก) และ ข) ตัวอย่าง TrBRc 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแร่คอร์ันดัม (ทับทิม: Crn) กับไดออปไซด์ (Cpx);
- ค) และ ง) ตัวอย่าง TrBRc 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแร่คอร์ันดัม ไดออปไซด์ และ การ์เนท (คาลิไฟต์: k.Grt)
- จ) และ ฉ) ตัวอย่าง TrBRc 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แร่คอร์ันดัม สปิเนล (Spl) ไดออปไซด์ และแพลจีโอเครส (Pl);

### 3.2 ศิลาเคมี

ในการศึกษาทางศิลาเคมีเบื้องต้น ได้คัดเลือกตัวอย่าง จำนวน 13 ตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ด้วยวิธี X-ray mapping โดยการกวาดรังสีเอ็กซ์ลงบนผิวแผ่นหินบาง ขัดมัน ตามบริเวณต่างๆ ของเนื้อหินแปรกลบหลอม และหินแปรกลบหลอมอุ้มพลอยโดยแบ่งตัวอย่าง เป็น 2 ชุดๆ แรกจำนวน 7 แผ่นตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ภายใต้เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) ณ ศูนย์เครื่องมือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการวิเคราะห์กวาดรังสีเอ็กซ์ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณเล็กๆ มากกว่า 1 บริเวณต่อ 1 แผ่นตัวอย่าง รวม 31 บริเวณวิเคราะห์ เพื่อหารูปแบบการกระจายตัวและความเข้มข้นเชิงคุณภาพของเคมีธาตุหลักจำนวน 6 ธาตุ ได้แก่ Al, Si, Mg, Fe, Ca และ Na จากนั้นนำภาพผลวิเคราะห์มาพิจารณาเปรียบเทียบ โดยใช้โปรแกรม จัดการภาพ (image processing program) แปลงไฟล์รูปโทนสีเทาของแต่ละธาตุให้เป็นรูปที่มีโทนสี ต่างกัน [Al (จุดโทนสีชมพู), Si (จุดโทนสีเทา), Mg (จุดโทนสีน้ำเงินฟ้า), Fe (จุดโทนสีม่วง), Ca (จุด โทนสีเขียว) และ Na (จุดโทนสีเหลือง)] จากนั้นคัดเลือกธาตุมาซ้อนทับกันแล้วรวมภาพ สร้างเป็น ภาพสีผสมขึ้นมาใหม่ แล้วนำภาพทั้งหมดมาพิจารณาแยกเฟสแร่โดยเปรียบเทียบจากรูปแบบการ กระจายตัวและความเข้มข้นของธาตุ (ภาพผลวิเคราะห์แยกธาตุ ดู ภาคผนวก ก) และ ชุดสอง ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างหินแปรกลบหลอมอุ้มพลอยจำนวน 2 แผ่นตัวอย่างภายใต้เครื่อง EPMA (Electron Probe Micro-Analyzer) ณ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย โดยทำการวิเคราะห์กวาดเป็นบริเวณกว้าง 2 บริเวณต่อ 1 แผ่นตัวอย่าง รวม 4 บริเวณวิเคราะห์ (รูปที่ 11)





รูปที่ 11 เปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินภายใต้กล้องจุลทรรศน์ของหินแปรกล่อมอุ้มพลอย TrBRc2-1 (ฝั่งซ้าย) กับภาพสีผสมแสดงรูปแบบการกระจายตัวของธาตุและปริมาณความเข้มข้นเชิงคุณภาพที่ได้จากการวัดค่าแบบกวาดรังสี (ฝั่งขวา) ที่สามารถช่วยจำแนกชนิดแร่ประกอบหินออกจากกันได้ชัดเจน:

- ก) และ ข) ตัวอย่าง TrBRc3 (ตำแหน่ง 1) พบแร่คอร์รันดัม (P0) ไดออปไซด์ (P1) และ แพลจิโอเคลส (P2);
- ค) และ ง) ตัวอย่าง TrBRc3 (ตำแหน่ง 2) พบแร่คอร์รันดัม (P0) ไดออปไซด์ (P1) และ คาลิไฟต์ (P5) ที่ยังคงมีแกนเนื้อการ์เนท (P4) เหลืออยู่บางส่วน;
- จ) และ ฉ) ตัวอย่าง TrBRc2 (ตำแหน่ง 1) พบแร่คอร์รันดัม (P0) ไดออปไซด์ (P1) และ การ์เนท (P4) ที่มีขอบปฏิกิริยาคาลิไฟต์ (P5) ล้อมรอบ;
- ช) และ ซ) ตัวอย่าง TrBRc2 (ตำแหน่ง 2) พบแร่สปิเนล (P3) และ ไดออปไซด์ (P1)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นความสัมพันธ์และสามารถจำแนกชนิดแร่เทียบเคียงออกจากกันด้วยการเปรียบเทียบความเข้มข้นและลักษณะการกระจายตัวของแต่ละธาตุดังกล่าวร่วมกัน ได้เป็น 8 เฟสแร่ (mineral phases) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเฟสแร่ส่วนใหญ่ อาทิ เฟส P0 ที่แสดงการกระจายตัวของธาตุองค์ประกอบ (ธาตุ Al เพียงธาตุเดียว) เทียบเคียงได้กับแร่คอร์รันดัม (corundum) เฟส P1 ที่เทียบเคียงได้กับแร่ไดออปไซด์/ไดออปซิดิกไพโรซีน (diopside/diopside pyroxene) จะแสดงความเข้มข้นของธาตุ Ca และ Mg ที่เด่นกว่าแร่เฟสอื่น เฟส P3 ที่เทียบเคียงได้กับแร่สปิเนล (spinel) จะแสดงความเข้มข้นของธาตุ Al และ Mg ที่เด่น

เฟส P4 ที่เทียบเคียงได้กับแร่การ์เนท (garnet) จะแสดงความเข้มข้นของธาตุ Mg, Si และ Al i ระดับปานกลาง และเฟส P6 ที่เทียบเคียงได้กับแร่โอลิวีน (olivine) จะแสดงความเข้มข้นของธาตุ Mg ที่เด่น และ Si ระดับปานกลาง ซึ่งสามารถแยกออกจากแร่เฟสอื่นได้ดี และแม้ว่าเฟส P6 (โอลิวีน) จะสามารถแยกแยะแร่ออกเป็นเฟสต่างๆได้ แต่ด้วยความใกล้เคียงกันเชิงเคมีระหว่างโอลิวีน (P6) กับออร์โทไพรอกซีน (P7) ทำให้แยกแยะจากกันยากในบางตัวอย่างโดยเฉพาะสำหรับหินแปรผลปปลอม กลุ่มเพอริโดไทต์ และประกอบกับความซับซ้อนเชิงเคมีของแร่กลุ่มไพรอกซีน (pyroxene) ทำให้การจำแนกเฟสแร่ย่อยของแร่ในกลุ่มนี้ บางตัวออกจากกันทำได้ไม่ดีนัก

จากการวิเคราะห์ภาพแสดงการกระจายตัวของธาตุโดยรวมแล้ว พบว่าเนื้อหินบะซอลต์ ในบริเวณที่สัมผัสกับหินแปรผลปปลอม มีปริมาณธาตุ Al, Fe, Na สูงกว่า แต่มี Mg ต่ำกว่าเนื้อหินแปรผลปปลอม (จาก TrBr 5-P3 และ TrBr 20-P3) แต่เมื่อเทียบกับเนื้อหินแปรผลปปลอมที่อุ้มพลอย (TrBrc 1-P7) แล้วพบว่าเนื้อหินบะซอลต์มีปริมาณธาตุ Al, Fe, Na ต่ำกว่า แต่มี Ca และ Mg สูงกว่า และพบว่าแร่คอร์ันดัมในหินแปรผลปปลอมอุ้มพลอย (TrBrc 2 และ 3) ร่วมกับแร่อีก 5 ชนิด คือ ไดออปไซด์ สปิเนล การ์เนท และ แพลจิโอเคลส อย่างสมดุลเคมี

ตารางที่ 1 ผลการจำแนกแร่บนแผ่นหินบางชั้นที่ SEM ซึ่งเปรียบเทียบโดยอาศัยลักษณะการกระจายตัวของเคมีธาตุ (+ = พบแร่; -- = ไม่พบ; -? = ไม่แน่ใจ เนื่องจากผลวิเคราะห์ไม่ดี)

Mineral phase	การกระจายตัว		ชนิดแร่ เทียบเคียง	Crn-Pl-bearing pyroxenite		Peridotite			Pyroxenite	
	ธาตุเด่น	ธาตุรอง		TrBrc1	TrBRc2	TrBr9-3	TrBr20	TrBr5	TrBr31	N8
P0	Al	--	Corundum (Cm)	+	+	--	--	--	--	--
P1	Mg, Ca	Si	Diopside pyroxene (Cpx)	+	+	--	--	--	+	+
P2	Al, Si, Na	Ca	Plagioclase (Pl)	--	--	--	--	--	+	+
P3	Al, Mg	Fe	Spinel (Spl)	--	--	+	+	+	--	--
P4	Mg, Si, Al	--	Kalyphitic garnet (k. Grt)	+	--	+	--	--	+	+
P5	Mg, Fe	Si, Al	Kalyphite (Kaly)	--	+	--	--	--	+	+
P6	Mg > Si	--	Olivine (Ol)	--	--	+	+	+	+	+
P7	Si > Mg	(Al)	Orthopyroxene (Opx)	?	--	?	+	+	+	+
P8	Si, Mg, Na	Al, Ca	Clinopyroxene/ Augitic pyroxene	--	+	+	--	+	--	--
P9	Ca, Si	Na	2 <sup>nd</sup> material	+	+	--	+	+	--	--
จำนวนพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ (31 พื้นที่)				7 (ใช้ได้ 2)	6	3	4	4	5	2

## บทที่ 4: ธรรณีเคมี

ในการวิจัยศึกษาภาคสนามได้ทำการเก็บตัวอย่างหินเพื่อนำมาศึกษาวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติทางเคมี ด้วยวิธี X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) เพื่อหาปริมาณค่าออกไซด์หลัก (major oxides) และวิธี Induced Couple Plasma Mass Spectrometry (ICPMS) เพื่อหาปริมาณค่าธาตุรอง (minor elements) และธาตุร่องรอย (trace elements) ในหิน ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดเก็บจากบริเวณหน้าเหมืองของเหมืองหินศิลาทอง ต.บ่อพลอย อ.บ่อไร่ จ.ตราด โดยได้เก็บตัวอย่างหินบะซอลต์โดยตรงจากชั้นที่เป็นเนื้อหินสดที่ทางเหมืองระเบิดเปิดหน้าไว้ ทำการเก็บในแนวตั้งเป็นช่วงๆ ละประมาณ 1 เมตรเริ่มจากแนวที่สัมผัสกับส่วนที่เป็นเนื้อบะซอลต์ผุลงมาจนถึงแนวสัมผัสล่างของชั้นบะซอลต์สดหรือถึงบริเวณล่างสุดของการเปิดหน้าหิน และได้คัดเลือกมาเพื่อทำการวิเคราะห์ 3 จุดตำแหน่ง (รวม 15 ตัวอย่าง) คือตำแหน่ง P2 (พิกัด 235177ตะวันออก 1392296เหนือ) จำนวน 6 ตัวอย่าง ตำแหน่ง P3 (พิกัด 235177ตะวันออก 1392324เหนือ) จำนวน 5 ตัวอย่าง และตำแหน่ง P4 (พิกัด 235070ตะวันออก 1392322เหนือ) จำนวน 4 ตัวอย่าง ตามลำดับ เพื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงเปรียบเทียบในแนวระนาบ ส่วนตัวอย่างหินแปลกปลอม(11ตัวอย่าง)ได้เก็บตามหน้าเหมืองโดยพยายามคัดเลือกเฉพาะก้อนที่มีเนื้อค่อนข้างสด รวมจำนวนตัวอย่างหิน 26 ตัวอย่างและมีผลวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

### 4.1 คุณสมบัติเชิงค่าออกไซด์หลัก

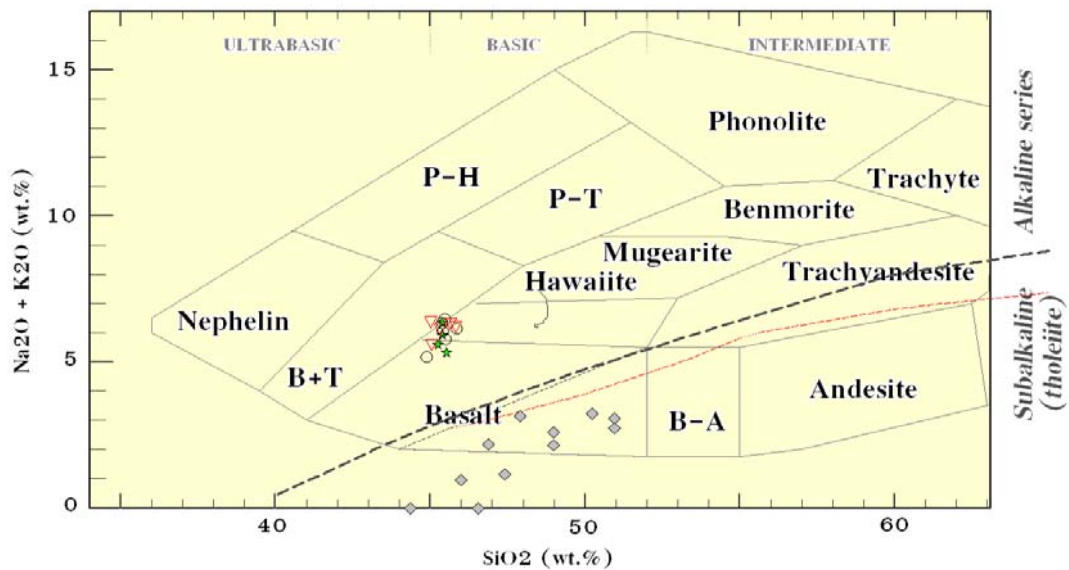
จากลักษณะทางเคมี โดยพิจารณาจากค่าอัลคาไลรวม(total alkali (TAS) = %Na<sub>2</sub>O + %K<sub>2</sub>O) หินบะซอลต์ในบริเวณนี้ จัดอยู่กลุ่มอัลคาไลบะซอลต์ (alkali basalt) ซึ่งคาบเกี่ยวระหว่างความเป็น alkalic กับ strongly alkalic ที่มีค่า nepheline (Ne) และ olivine (Ol) normative (คำนวณด้วยโปรแกรม NewPet) ขึ้นทุกตัวอย่าง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 11.21 และ 19.43 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมีผลการจำแนกชนิดหินตามหลักการของ Cox et al. (1979) คาบเกี่ยวระหว่างชนิดฮาวาไอต์ (Hawaiite) และ บะซอลต์ (Basalt) ที่ค่อนข้างไปทาง บาชานไนต์-เทไฟต์ (Basanite-Tephite) (รูปที่ 12) แต่เมื่อใช้หลักการจำแนกของ Le Maitre et al. (1979) พบว่าทุกตัวอย่างหินบะซอลต์มีค่าองค์ประกอบตกอยู่ในช่วงของ บาชานไนต์ (Basanite) ทั้งสิ้น (รูปที่ 13) เมื่อพิจารณาค่า SiO<sub>2</sub> พบว่าหินบะซอลต์บริเวณนี้แทบไม่มีช่วงความแตกต่างปรากฏทั้งในแนวตั้งและแนวระนาบ และจัดเป็นหินที่มีค่าความเป็นด่าง (basic) สูงจนเกือบเป็นด่างมาก (ultrabasic) โดยเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์ปริมาณอัลคาไลรวมที่ได้จากหินแปลกปลอมทุกตัวอย่างจะต่ำกว่าของหินบะซอลต์ โดยอยู่ในช่วงของ กึ่งอัลคาไล (subalkaline) หรือ tholeiite series แต่มีช่วงของความแตกต่างที่เห็นชัดเจน เช่นเดียวกับช่วงค่า SiO<sub>2</sub> ที่กว้างกว่าจาก ultrabasic ถึงเกือบเป็น intermediate ส่วนค่า CIPW Norms ของหินแปลกปลอมนั้นมีความหลากหลาย แต่ทุกตัวอย่างมีเป็น olivine (Ol) normative และมี 1 ตัวอย่าง(BR-R-4) มีค่า corundum (C) normative ขึ้นร้อยละ 3.47 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะต้องมีการศึกษาในรายละเอียดเพิ่มเติมต่อไป

ตารางที่ 2 ค่า Wt.% ออกไซด์หลัก และ Norms (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของหินบะซอลต์ในบริเวณเหมืองหินศิลาทอง อ.ปอไร่ จ.ตราด (TAS และ SI เป็นค่า H<sub>2</sub>O-free normalized)

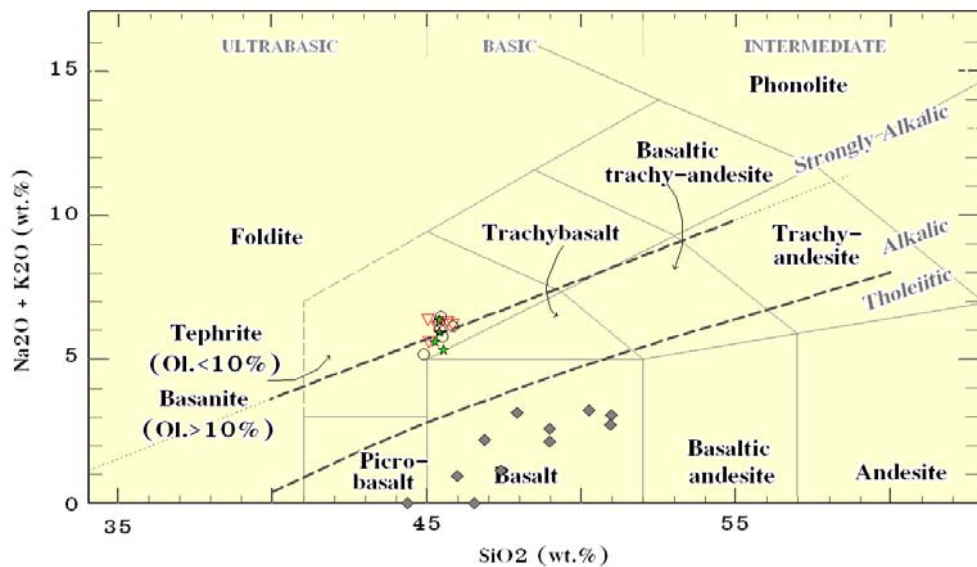
ปอไร่	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P2-6	P3-1	P3-2	P3-3	P3-4	P3-5	P4-1	P4-2	P4-3	P4-4	Average
SiO <sub>2</sub>	42.75	42.99	42.95	43.31	42.23	42.76	42.36	42.49	43.46	42.82	43.18	42.61	42.80	42.25	42.57	42.73
TiO <sub>2</sub>	2.62	2.58	2.66	2.64	2.52	2.81	2.67	2.69	2.59	2.71	2.73	2.77	2.74	2.79	2.86	2.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.42	14.58	14.65	14.53	15.17	14.69	14.22	14.48	14.12	13.98	13.91	13.99	14.03	13.96	14.40	14.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.53	11.24	11.15	11.06	11.37	11.99	11.48	11.46	11.05	11.64	11.83	11.59	11.41	11.54	11.72	11.52
MnO	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.20	0.17
MgO	8.37	8.58	8.67	8.59	8.88	7.83	8.88	8.75	9.64	9.38	8.87	8.97	8.93	8.91	8.17	9.06
CaO	8.56	8.53	8.08	8.39	8.80	8.15	7.94	8.33	7.90	7.85	7.78	8.05	8.07	8.33	8.42	8.07
Na <sub>2</sub> O	5.16	5.46	5.49	5.14	4.29	4.66	4.67	5.43	5.25	4.85	4.99	4.58	4.90	4.23	4.01	4.77
K <sub>2</sub> O	0.52	0.52	0.62	0.65	0.58	0.78	0.58	0.57	0.62	0.92	0.96	0.99	1.10	1.02	0.98	0.86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.18	1.17	1.15	1.12	1.20	1.32	1.22	1.14	1.18	1.31	1.31	1.32	1.32	1.32	1.34	1.27
LOI	3.36	2.99	2.91	3.06	3.54	3.65	3.65	3.20	3.24	3.50	3.16	3.78	3.39	4.54	4.22	3.63
H <sub>2</sub> O-	0.89	0.73	1.04	0.89	0.79	0.71	0.70	0.84	0.31	0.42	0.63	0.72	0.68	0.47	0.63	0.60
Total	99.53	99.54	99.53	99.54	99.54	99.52	99.53	99.54	99.53	99.55	99.52	99.53	99.53	99.52	99.52	99.53
TAS	5.96	6.24	6.39	6.06	5.12	5.72	5.52	6.28	6.12	6.03	6.22	5.86	6.29	5.55	5.27	5.91
SI	32.72	33.26	33.44	33.77	35.35	31.00	37.13	33.38	36.30	35.01	33.28	34.33	33.90	34.67	32.84	34.55
<b>Norms (Wt %)</b>																
Or	2.31	3.13	3.72	3.90	3.49	4.67	3.49	3.43	3.72	5.56	5.79	5.97	6.62	6.15	5.91	5.14
Ab	21.52	19.75	20.27	20.99	19.59	22.80	20.83	18.88	21.78	20.21	21.32	20.20	18.79	19.46	21.81	20.34
An	15.29	13.94	13.73	14.90	20.77	17.16	16.37	13.68	13.38	13.87	12.96	14.91	13.25	16.35	18.68	14.82
Ne	12.41	14.74	14.60	12.55	9.37	9.37	10.49	15.18	12.63	11.65	11.69	10.41	12.65	9.17	6.88	11.21
Di	16.23	17.24	15.65	16.10	12.63	12.36	12.55	16.80	15.01	13.76	14.24	13.68	15.09	13.67	12.08	14.13
Ol	17.59	17.38	17.89	17.52	19.72	18.18	21.46	17.90	19.82	20.27	19.35	19.41	18.73	19.24	18.61	19.43
Mt	2.55	2.48	2.46	2.44	2.51	2.65	2.54	2.53	2.44	2.57	2.62	2.56	2.52	2.55	2.59	2.55
Il	5.05	4.98	5.13	5.09	4.86	5.43	5.15	5.18	4.99	5.22	5.28	5.36	5.28	5.39	5.53	5.26
Ap	2.84	2.82	2.77	2.70	2.89	3.17	2.94	2.75	2.84	3.15	3.15	3.17	3.17	3.17	3.22	3.06

ตารางที่ 3 ค่า Wt.% ออกไซด์หลัก และ Norms (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) ของหินแปรบดละเอียดในบริเวณเหมืองหินซิลิกาของ อ.บ่อไร่ จ.ตราด (TAS และ SI เป็นค่า normalized)

ไม่ใส่	BR-R-1	BR-R-2	BR-R-3	BR-R-4	BR-R-5	BR-R-6	BR-R-8	BR-U-2	BR-U-2-3	BR-U-6	BR-U-7
SiO <sub>2</sub>	45.13	47.47	47.39	44.82	46.12	48.23	46.45	49.63	49.56	42.93	44.98
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.17	0.11	0.13	0.20	0.17	0.08	0.18	0.17	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.21	23.66	17.63	18.56	20.14	19.51	19.20	19.43	19.75	2.86	1.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	4.94	5.58	7.06	8.09	3.95	5.18	5.73	6.04	6.08	10.41	7.63
MnO	0.11	0.09	0.13	0.13	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.14	0.13
MgO	9.21	7.03	14.03	18.10	9.10	10.01	15.37	9.67	9.85	38.83	42.74
CaO	14.97	10.97	9.02	7.51	13.64	10.24	10.52	9.97	9.72	2.63	0.89
Na <sub>2</sub> O	1.85	2.34	1.86	0.82	2.55	2.88	1.13	2.83	2.53	-	-
K <sub>2</sub> O	0.26	0.18	0.22	0.12	0.47	0.21	-	0.14	0.12	-	-
F <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.78	-	-	-	0.40	-	-	-	-	-	-
LOI	2.10	1.32	1.41	0.79	2.29	2.13	0.49	1.06	0.70	1.30	1.42
H <sub>2</sub> O-	0.65	0.70	0.66	0.45	0.59	0.89	0.41	0.48	0.94	0.60	1.01
<b>Total</b>	<b>99.53</b>	<b>99.51</b>	<b>99.54</b>	<b>99.52</b>	<b>99.54</b>	<b>99.54</b>	<b>99.48</b>	<b>99.53</b>	<b>99.53</b>	<b>99.70</b>	<b>99.83</b>
TAS	2.18	2.58	2.13	0.96	3.12	3.20	1.15	3.03	2.71	-	-
SI	56.64	46.46	60.50	66.72	56.63	54.76	69.14	51.77	53.01	78.86	84.85
<b>Norms (Wt.%)</b>											
C	-	-	-	3.47	-	-	-	-	-	-	-
Or	1.54	1.06	1.30	0.71	2.78	1.24	-	0.83	0.71	-	-
Ab	11.52	19.97	15.91	7.02	12.90	24.62	9.65	24.20	21.66	-	-
An	43.76	54.12	39.59	37.76	42.50	40.08	47.55	40.34	42.65	7.91	2.84
Ne	2.33	-	-	-	4.79	-	-	-	-	4.21	-
Di	20.79	0.72	4.55	-	16.39	6.95	3.92	7.74	4.90	20.30	1.28
Hy	-	10.67	15.95	27.12	-	3.51	16.61	12.05	18.24	63.51	31.38
Ol	13.63	9.93	18.96	20.76	13.60	17.17	19.74	11.71	6.62	2.29	60.49
Mt	1.09	1.23	1.56	1.76	0.67	1.14	1.26	1.33	1.34	-	1.67
Il	0.61	0.32	0.21	0.25	0.36	0.32	0.15	0.34	0.32	-	-
Ap	1.87	-	-	-	0.95	-	-	-	-	-	-



รูปที่ 12 แผนภาพ TAS จำแนกชนิดหินบะซอลต์ ตามหลักการของ Cox et al., 1979 (รูปหลายเหลี่ยม); เส้นประสีเทา ได้จาก Irvine and Baragar (1971) และเส้นประสีแดงได้จาก Kuno (1968) [สัญลักษณ์ตัวอย่างหินบะซอลต์ วงกลม = จากจุดเก็บ P2, สามเหลี่ยมหัวกลับสีแดง = จากจุดเก็บ P3, ดาวเขียว = จากจุดเก็บ P4 และ ตัวอย่างหินแปรกลบปลอม = ข้าวหลามตัดสีเทา]

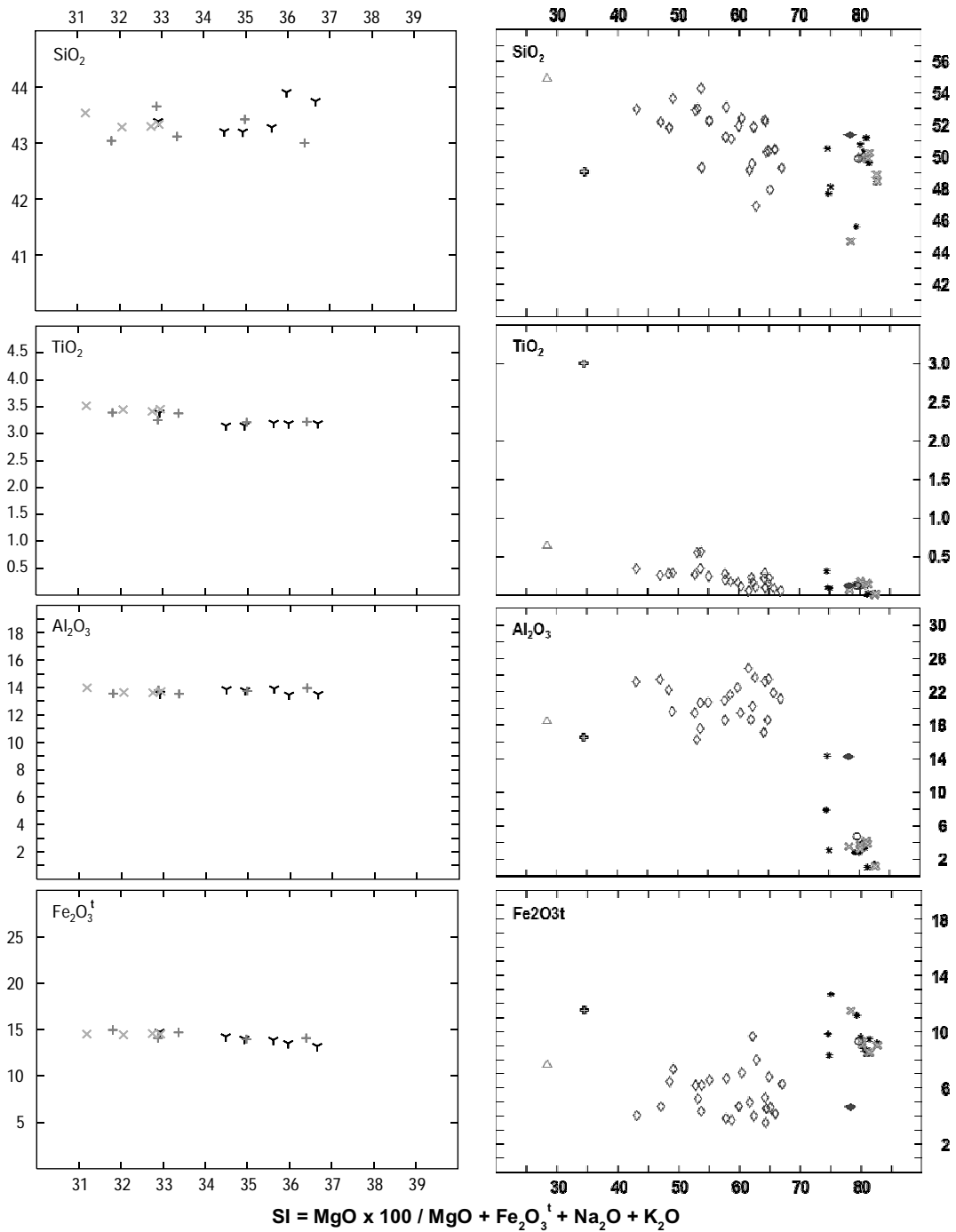


รูปที่ 13 แผนภาพ TAS จำแนกชนิดหินบะซอลต์ ตามหลักการของ Le Maitre et al., 1979 [สัญลักษณ์ตัวอย่างหินบะซอลต์ ดูรูปที่ 12]

จากแผนภาพ variation diagrams ตามหลักการของ Kuno (1968) ที่กำหนดให้ค่าดัชนีการแข็งตัว (solidification index:  $SI = \%MgO \times 100 / \%MgO + \%Fe_2O_3 + \%Na_2O + \%K_2O$ ) เป็นแกนนอน เทียบกับค่าออกไซด์หลักแต่ละตัวที่เป็นแกนตั้ง (รูปที่ 14) แสดงให้เห็นว่าหินบะซอลต์ทั้งหมดในบริเวณศึกษามีค่าออกไซด์หลักใกล้เคียงกันและมีช่วงค่าดัชนีการแข็งตัวที่แคบ (มีค่าในช่วงประมาณ 31-37) ซึ่งช่วงของค่า SI ที่เกิดขึ้นสเหมือนจะมีความสัมพันธ์เบื้องต้นในลักษณะผันตรงต่อความหนาของชั้นหินบะซอลต์ กล่าวคือที่บริเวณหน้าตัดชั้นหินบะซอลต์สด ตำแหน่ง P2 ซึ่งชั้นหินมีความหนามากสุด (~6 เมตร) SI จะมีช่วงค่า SI ที่กว้างมากที่สุด (ประมาณ 33-37) ถัดมาในตำแหน่ง P3 ที่ชั้นหินมีความหนา ~5 เมตร จะมีช่วงค่า SI ประมาณ 32-36.5 และในตำแหน่ง P4 ที่ชั้นหินมีความบางที่สุด (~4 เมตร) จะแสดงช่วงค่า SI ที่แคบที่สุด (ประมาณ 31-33) ด้วยเช่นกัน ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างหินแปรกล่อมที่ศึกษาจะมีช่วงค่าดัชนีการแข็งตัว (SI) ที่กว้าง และสูงกว่า (46.5-85) ของหินบะซอลต์ที่นำขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด

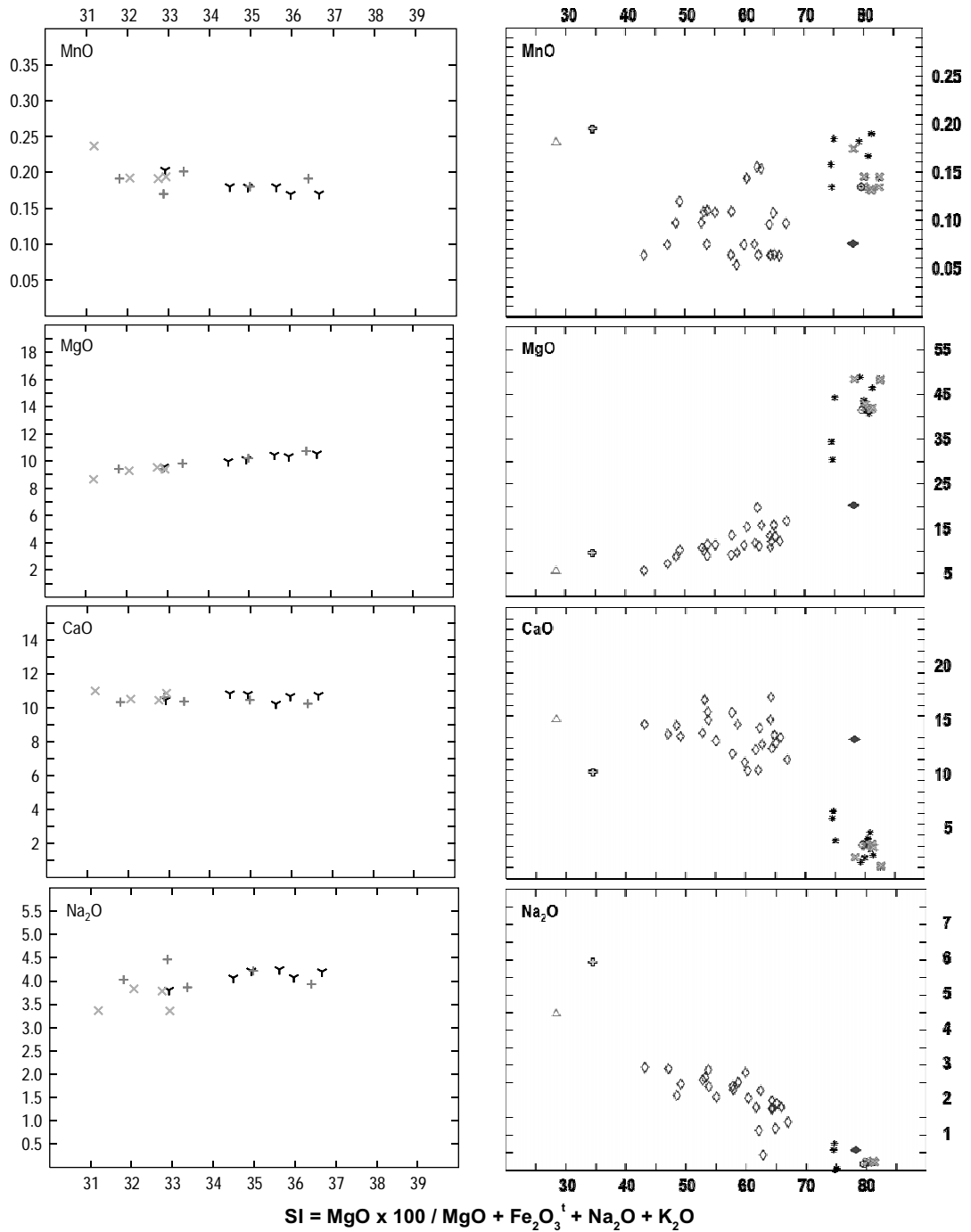
เมื่อพิจารณาลักษณะความสัมพันธ์ทางเคมีระหว่างค่าออกไซด์หลักแต่ละตัวเทียบกับค่าดัชนีการแข็งตัว พบว่ากลุ่มตัวอย่างหินบะซอลต์มีค่าที่เกือบจะไม่แตกต่างกันสำหรับออกไซด์หลักแต่ละตัว และต่างแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแนวราบกับค่า SI ในขณะที่กลุ่มตัวอย่างหินแปรกล่อมที่ศึกษา จะมีค่าที่แตกต่างกันพอสมควรสำหรับค่าออกไซด์หลักแต่ละตัว และคล้ายมีความสัมพันธ์ในเบื้องต้นต่อกัน โดยเฉพาะระหว่างตัวอย่างหินการเนทไฟริคลาไซต์ หินแพลจิโอเครสไฟริคลาไซต์ และหินไพรอกซิไนต์อัลมพลอย (รูปที่ 14) โดยแสดงแนวการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับค่า SI กล่าวคือค่า  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  และ TAS มีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับค่า SI ในขณะที่ค่า  $MgO$  และ  $Cr_2O_3$  มีความสัมพันธ์เชิงผันตรงกับค่า SI ในขณะที่  $Al_2O_3$  และ  $Fe_2O_3$  แสดงแนวความสัมพันธ์กับค่า SI ที่ชัดเจน สำหรับกลุ่มตัวอย่างหินแปรกล่อมชนิดเลอโซไลต์กับหินแปรกล่อมชนิดอื่นที่พบร่วมในบริเวณเดียวกัน แม้ว่าจะแสดงความสัมพันธ์เชิงเคมีระหว่างกันในบางส่วนสำหรับค่าออกไซด์หลักบางตัว แต่ทั้งนี้ความสัมพันธ์โดยรวมยังไม่สรุปได้ชัดเจน และสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยออกไซด์หลักของหินบะซอลต์กับของกลุ่มตัวอย่างหินแปรกล่อมทุกชนิดที่ศึกษายังไม่ปรากฏชัดเจน และดูเหมือนว่าจะไม่มีความสัมพันธ์ใดๆต่อกัน

กล่าวโดยสรุปจากลักษณะทางเคมีของค่าออกไซด์หลักของหินถือได้ว่าแมกมาที่ปะทุขึ้นมาแล้วเย็นตัวเป็นชั้นหินบะซอลต์ในบริเวณเหมืองหินมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่แสดงลักษณะของการ differentiation ที่ชัดเจน และไม่ตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของกระบวนการตกผลึกลำดับส่วน (fractional crystallization) ซึ่งบ่งว่าแมกมาได้ปะทุขึ้นมาโดยตรงจากแหล่งหินหลอมละลายต้นกำเนิดสู่วิโลกโดยไม่มีการพักช่วง ทั้งนี้ในเบื้องต้นยังไม่พบความสัมพันธ์ทางเคมีที่เด่นชัดต่อกันระหว่างหินหนืดบะซอลต์กับหินแปรกล่อมส่วนใหญ่ที่ศึกษา บ่งบอกเป็นนัยว่าหินบะซอลต์กับหินแปรกล่อมที่ถูกนำขึ้นมาไม่น่าจะมีความเกี่ยวข้องกันในแง่ของแหล่งหินต้นกำเนิด โดยหินหนืดบะซอลต์นี้ได้ก่อตัวขึ้นในระดับลึกและได้นำเอาเศษหินแปรกล่อมซึ่งถือกำเนิดอยู่ก่อนแล้วในระดับที่ตื้นกว่าติดขึ้นมาสู่วิโลกด้วยในระหว่างที่หินหนืดเคลื่อนตัวตัดผ่านชั้นของหินแปรกล่อมแต่ละชนิดดังกล่าว



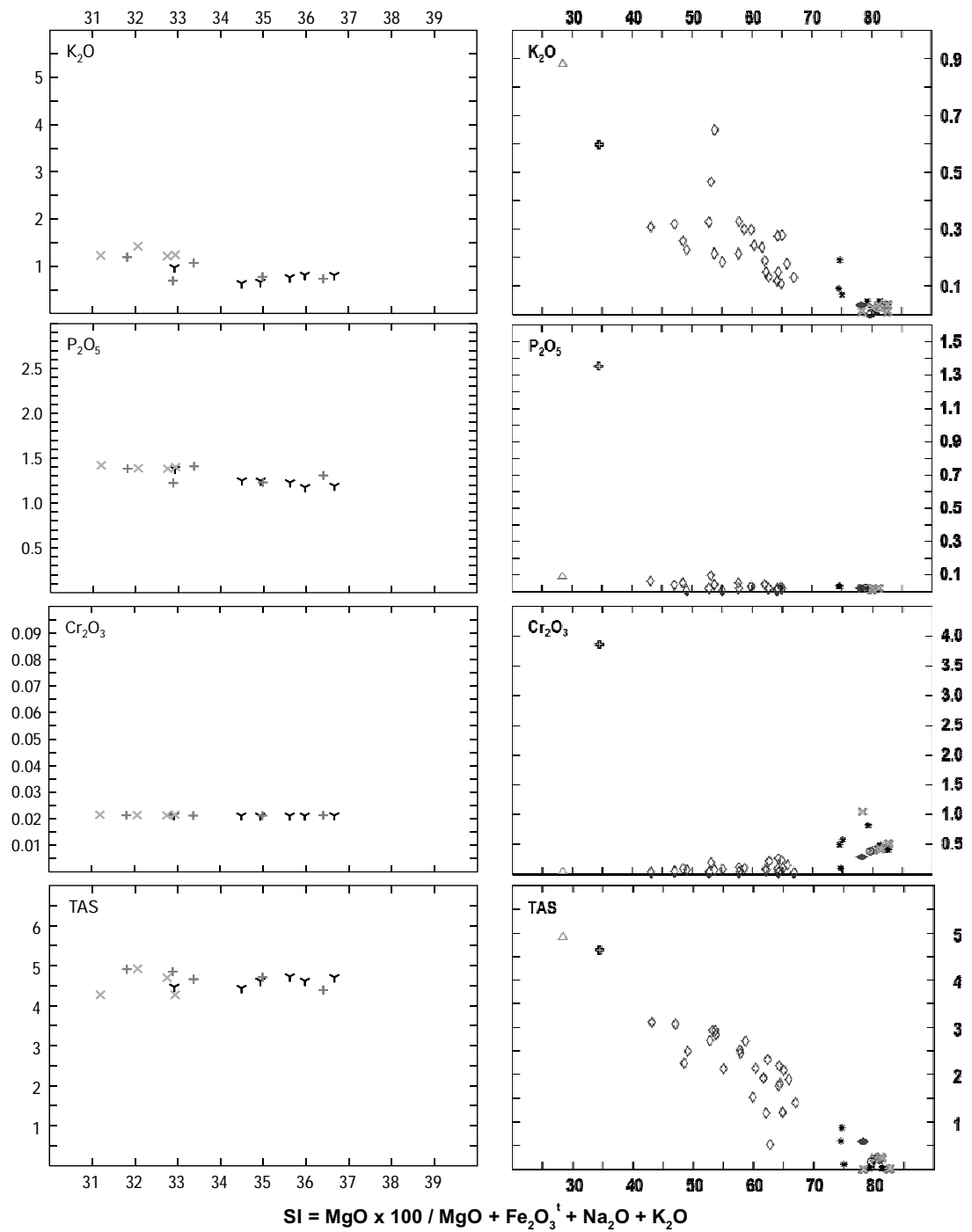
- Υ Basalts from P2 section
+ Basalts from P3 section
× Basalts from P4 section
- ⊕ Average basalt (Sllathong)
◇ Garnet pyroxenite
△ Plagioclase-rich pyroxenite
- Spinel ilmenite (Ploywaen)
\* Lherzolithic peridotite
✱ Pyroxenitic peridotite

รูปที่ 14 แผนภาพแสดงจุดค่าออกไซด์หลักชนิดต่างๆ เทียบกับค่าดัชนีการแข็งตัว(SI) ของหินบะซอลต์ และหินแปรกล่อมที่พบในบริเวณเดียวกัน (◇ = หินแปรกล่อมให้พลอยชนิดไพโรอกซิไนต์)



- Y Basalts from P2 section
+ Basalts from P3 section
x Basalts from P4 section
- ⊕ Average basalt (Silathong)
◇ Garnet pyroxenite
△ Plagioclase-rich pyroxenite
- Spinel ilmenite (Ploywaen)
\* Lherzolitic peridotite
✱ Pyroxenitic peridotite

รูปที่ 14 (ต่อ) แผนภาพแสดงจุดค่าออกไซด์หลักชนิดต่างๆ เทียบกับค่าดัชนีการแข็งตัว (SI) ของหินบะซอลต์ และหินแปรกลปอมที่พบในบริเวณเดียวกัน (< = หินแปรกลปอมให้พลอยชนิดไพรอกซิไนต์)



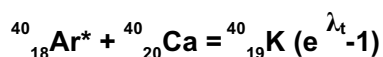
- Y Basalts from P2 section      + Basalts from P3 section      X Basalts from P4 section
- ⊕ Average basalt (Silathong)      ◇ Garnet pyriclasite      △ Plagioclase-rich pyriclasite
- Spinel lhezolite (Ploywaen)      \* Lhezolitic peridotite      ✕ Pyroxenitic peridotite

รูปที่ 14 (ต่อ) แผนภาพแสดงจุดค่าออกไซด์หลักชนิดต่างๆ เทียบกับค่าดัชนีการแข็งตัว (SI) ของหินบะซอลต์ หินแปรกลบอมที่พบในบริเวณเดียวกัน ( <math>\diamond</math> = หินแปรกลบอมให้พลอยชนิดไพโรอกซิไนต์)

## บทที่ 5: ธรณีกาลวิทยาหินบะซอลต์

### 5.1 หลักและวิธีการการวัดอายุหินบะซอลต์

การวัดหาอายุด้วยวิธี  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ไอโซโทป นั้นเป็นวิธีการวัดหาอายุสมบูรณ์ (absolute age) ของหินและแร่ในทางธรณีกาลวิทยา (Geochronology) วิธีหนึ่งที่จะให้ค่าที่มีความน่าเชื่อถือสูง และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เป็นวิธีที่พัฒนาต่อยอดมาจากวิธี potassium-argon ( $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ ) isotopic dating ซึ่งอาศัยหลักการของการสลายตัวตามธรรมชาติของธาตุไอโซโทปกัมมันต์ตั้งต้น (parental radiogenic isotope) ชนิดโพแทสเซียม-40 ( $^{40}\text{K}$ ) ไปเป็นธาตุไอโซโทปลูก (daughter isotopes) หลักๆ 2 ชนิด ได้แก่ ธาตุอาร์กอน-40 ( $^{40}\text{Ar}$ ) และ แคลเซียม-40 ( $^{40}\text{Ca}$ ) ที่มีเสถียรภาพ ซึ่งประมาณร้อยละ 11 ของ  $^{40}\text{K}$  จะสลายตัวไปเป็น  $^{40}\text{Ar}$  ด้วยการ กักเก็บอนุภาคอิเล็กตรอน (electron capture) แล้วปลดปล่อยอนุภาคโพสิตรอน (positron emission) ที่มีมวลเท่ากับอิเล็กตรอนแต่มีประจุไฟฟ้าบวกออกมา และอีกประมาณร้อยละ 89 ของ  $^{40}\text{K}$  จะสลายตัวเป็น  $^{40}\text{Ca}$  ด้วยการปลดปล่อยอนุภาครังสีเบต้า ( $\beta^-$  decay) ดังสมการข้างล่างนี้



โดยที่  $\lambda$  = total decay constant ของ  $^{40}\text{K}$

$t$  = อายุของตัวอย่าง (ปี) หรือช่วงเวลาที่ธาตุไอโซโทปกัมมันต์สลายตัว โดยเริ่มตั้งแต่หินหรือแร่ที่ก่อตัวขึ้น จนถึงเวลาที่ทำการวิเคราะห์

$^{40}\text{Ar}^*$  = แก๊สอาร์กอนที่ได้จากการสลายตัวของ  $^{40}\text{K}$  และถูกกักเก็บไว้ในโครงสร้างผลึกแร่ ส่วนแก๊สอาร์กอนอื่นๆที่ไม่ได้จากการสลายตัวของ  $^{40}\text{K}$  แต่ได้ถูกกักเก็บเอาไว้ระหว่างที่หินเย็นตัวลง เรียกว่า Trapped argon โดยทั่วไปจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัดส่วนแก๊สอาร์กอนในบรรยากาศ (atmospheric argon) ซึ่งมีค่า  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  เท่ากับ 295.5 (Steiger and Jeger, 1977) รายละเอียดในหลักการนี้สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก McDougall and Harrison (1999)

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้แร่ไบโอไทต์ (biotite) LP-6 เป็นตัวอย่างมาตรฐาน (standard sample) (Odin *et al.*, 1982) และตัวอย่างหินบะซอลต์ทั้งหมดได้ดำเนินการวิเคราะห์ที่ประเทศไต้หวัน โดยตัวอย่างหินได้รับการอาบกระตุ้นด้วยรังสีนิวตรอน (Neutron-activated irradiation) ที่มหาวิทยาลัยชิงหัว (Tsing Hua University) พร้อมกับ ซึ่งแต่ละตัวอย่าง (~200 มก.) รวมถึงตัวอย่างแร่มาตรฐานไบโอไทต์ LP-6 จะแยกบรรจุไว้ในช่องอลูมิเนียม แล้วจัดวางในลักษณะ VT-C position ในเครื่องปฏิกรณ์ Tsing-Hua Open-Pool Reactor (THOR) อาบรังสีเป็นเวลา 30 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 2 เดือน ก่อนที่จะนำมาทำการวิเคราะห์หาอายุ ณ ห้องปฏิบัติการธรณีกาลแก๊สอาร์กอน (Ar/Ar Geochronology Laboratory) ภาควิชาธรณีศาสตร์ (Department of Geosciences) มหาวิทยาลัยแห่งชาติไต้หวัน (National Taiwan University) โดยใช้วิธีการเผาเพิ่มอุณหภูมิทีละขั้น (incremental step heating technique) ภายในเตาเผาไทเทเนียมระบบสุญญากาศ สองชั้น (double vacuum Ti-furnace) โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นการเผาจะอยู่ในช่วง 50-100°C และปริมาณแก๊ส

ที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผา จะถูกทำให้บริสุทธิ์ขึ้นก่อนจะส่งผ่านเข้าเครื่อง VG1200 mass spectrometer เพื่อวัดปริมาณสัมพัทธ์ของแก๊สอาร์กอนแต่ละไอโซโทป จากนั้นนำค่าอัตราส่วน  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ที่วัดได้จากเครื่อง mass spectrometer มาปรับแก้ค่าเพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริง ( $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ ) ตามสมการ

$$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K = (^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{ที่วัดได้}} - 295.5 (^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{ที่วัดได้}}$$

ซึ่งค่า  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K$  ที่ได้ในแต่ละขั้นการเผา จะนำมาคำนวณหาอายุปรากฏ (apparent age) ของแต่ละช่วงอุณหภูมิ เทียบกับปริมาณแก๊สอาร์กอน-39 ที่ปลดปล่อยออกมา ( $^{39}\text{Ar}$  released) ตามสมการ

$$t = 1/\lambda \ln (^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K)^{J+1}$$

โดยที่  $t$  = อายุปรากฏ

$\lambda$  = total decay constant ของ  $^{40}\text{K}$

$J$  = irradiation parameter ของตัวอย่าง

จากนั้นนำค่าที่ได้มาแสดงในรูปกราฟ Age spectrum โดยใช้อายุปรากฏที่ได้ในแต่ละขั้นอุณหภูมิการเผา (แกน Y) เทียบกับค่าปริมาณสะสมของ  $^{39}\text{Ar}$  ที่ปลดปล่อยออกมา (% cumulative  $^{39}\text{Ar}_K$  released: แกน X) และคำนวณหาอายุสมบูรณ์ของตัวอย่างภายในเงื่อนไขที่ว่า age spectra ที่จะใช้คำนวณ จะต้องเรียงต่อกันตามแนวระนาบ (flat pattern) ในระดับความเชื่อถือที่ 95% โดยค่าความต่างระหว่างขั้นอายุปรากฏที่อยู่ติดกันจะต้องอยู่ในช่วง  $2\sigma$  และค่าเฉลี่ยของอายุจาก flat pattern จะต้องได้จากขั้นอายุปรากฏที่ความต่อเนื่องอย่างน้อย 3 ขั้น และให้ค่าปริมาณสะสมของ  $^{39}\text{Ar}$  ที่ปลดปล่อยออกมารวมกันมากกว่าร้อยละ 50 โดยความคลาดเคลื่อนของค่าอายุปรากฏแต่ละขั้นจะไม่เกิน  $1\sigma$  พร้อมทั้งต้องนำค่า Ca/K และค่า Cl/K มาพิจารณาควคู่กันไปด้วย ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดในส่วนขั้นตอนการวิเคราะห์เพิ่มเติมได้จาก Lo et al. (2002) และรายละเอียดในส่วนของหลักการประเมินอายุ จาก McDougall and Harrison (1999)

## 5.2 ผลการวิเคราะห์หาอายุหินบะซอลต์

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างที่นำมาหาอายุ ด้วยวิธี  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ไอโซโทปของหินบะซอลต์จำนวน 10 ตัวอย่าง พบว่าตัวอย่างส่วนใหญ่แสดงชั้นของค่าอายุปรากฏ (apparent age) ที่มีความต่อเนื่องในแนวระดับดี, ยกเว้น TrBr07 ทำให้ค่า plateau age, integrated age และ isochron age ของแต่ละตัวอย่างมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน บ่งบอกว่าค่าอายุสมบูรณ์ที่ได้มีระดับความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ติดตามหลักวิชา โดยได้สรุปผลค่าอายุสมบูรณ์สมบูรณ์ที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 และนำมาแสดงผลในรูปของแผนภูมิต่าง ๆ ได้แก่ age spectrum diagrams, Ca/K plots และ Cl/K plots (ดูรูปใน ภาคผนวก ข) พร้อมกับตารางแสดงรายละเอียดค่าวิเคราะห์ต่าง ๆ (ภาคผนวก ข)

ซึ่งในภาพรวมผลวิเคราะห์หาอายุของแต่ละตัวอย่างมีความสอดคล้องกับค่าอายุของหินบะซอลต์ในบริเวณใกล้เคียงกันที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น (ตารางที่ 5)

ผลคำนวณค่าอายุสัมบูรณ์ของตัวอย่างทั้งหมดบ่งชี้ว่า หินบะซอลต์ไหลบริเวณอำเภอพญาเม็งราย ในเขตจังหวัดเชียงราย มีช่วงค่าอายุสัมบูรณ์เก่าที่สุด คือ  $9.85 \pm 0.05$  (CrPm01) ถึง  $10.61 \pm 0.08$  (CrPm04) ล้านปี และหย่อมหินเขากระโดง ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ มีช่วงค่าอายุอ่อนที่สุด คือ  $0.32 \pm 0.01$  (BrMu03) ถึง  $0.43 \pm 0.02$  (BrMu04) ล้านปี ส่วนหย่อมหินบะซอลต์บริเวณอำเภอน้ำยืน (UbNy05) จังหวัดอุบลราชธานีให้ผลค่าอายุ ( $3.14 \pm 0.03$  ล้านปี) สูงกว่าหย่อมอื่นๆในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออก สำหรับตัวอย่างหินบะซอลต์จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีช่วงอายุตั้งแต่  $0.69 \pm 0.01$  (TrNb01) ถึง  $1.94 \pm 0.02$  (CbKI01) ล้านปี

ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์หาอายุสัมบูรณ์ของตัวอย่างหินบะซอลต์จากบริเวณต่าง ๆ ด้วยวิธี  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ไอโซโทป

หมายเลข ตัวอย่าง	ปริมาณ (mg)	Plateau age (Ma)	Integrated age (Ma)	Isochron Age (Ma)	% $^{39}\text{Ar}_k$ release
CrPm01	203.5	9.85 $\pm$ 0.05	10.07 $\pm$ 0.06	9.67 $\pm$ 0.11	66.80
CrPm04	201.6	10.61 $\pm$ 0.08	10.41 $\pm$ 0.1	11.70 $\pm$ 0.58	64.00
PbWc02	201.7	9.84 $\pm$ 0.06	9.60 $\pm$ 0.07	9.58 $\pm$ 0.26	79.88
CbKI01	200.1	1.94 $\pm$ 0.02	2.20 $\pm$ 0.03	1.46 $\pm$ 0.30	67.30
TrNb01	204.7	0.69 $\pm$ 0.01	0.65 $\pm$ 0.01	0.72 $\pm$ 0.07	87.10
TrBr04	202.9	1.33 $\pm$ 0.09	1.59 $\pm$ 0.08	1.40 $\pm$ 0.09	58.10
TrBr07	201.6	1.60 $\pm$ 0.05	1.44 $\pm$ 0.05	3.08 $\pm$ 0.28	62.20
BrMu03	200.0	0.32 $\pm$ 0.01	0.22 $\pm$ 0.02	0.73 $\pm$ 0.07	71.10
BrMu04	201.2	0.43 $\pm$ 0.02	0.34 $\pm$ 0.02	0.45 $\pm$ 0.05	78.50
UbNy05	200.1	3.14 $\pm$ 0.03	3.04 $\pm$ 0.03	3.07 $\pm$ 0.2	64.20

แหล่งตัวอย่าง: (1) CrPm = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณอำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย

(2) PbWc = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณอำเภอเวียงชัยบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์

(3) CbKI = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณคลองอีตัก อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี

(4) TrNb = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณบ้านเนินตากแดด อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด

(5) TrBr = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณตำบลบ่อพลอย อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด

(6) BrMu = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณเขากระโดง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

(7) UbNy = หย่อมหินบะซอลต์ บริเวณอำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี

### 5.3 ลำดับเหตุการณ์การเกิดหินบะซอลต์

จากการรวบรวมผลการวัดอายุหินบะซอลต์ในหลายๆแหล่งที่กระจายตัวอยู่ตามบริเวณต่างๆ ของประเทศไทย ประกอบเข้ากับผลการศึกษาในครั้งนี้ (รูปที่ 5.1) พบว่าการปะทุของลาวาบะซอลต์ขึ้นสู่ผิวโลกในช่วงมหายุคซีโนโซอิก เกิดขึ้นตั้งแต่ Late Oligocene (~24 Ma) ถึง Pleistocene (~0.32 Ma) สามารถจัดแบ่งลำดับช่วงการปะทุของหินบะซอลต์ในมหายุคนี้ ออกเป็น 6 ช่วงอายุย่อย (ตารางที่ 5.2) ดังนี้

ในช่วง (I) Late Oligocene (~25-23 Ma) ลาวาบะซอลต์ได้เริ่มต้นปะทุขึ้นเมื่อประมาณ 24 ล้านปีก่อน ในบริเวณลำนารายณ์ จังหวัดลพบุรี (Ar/Ar โดย Intasopa, 1993) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการคลายตัวอย่างเร็ว (rapid extension) ของเปลือกโลกบริเวณนี้ที่พัฒนาขึ้นเป็นแนวร่องทรุดตัวลพบุรี (Lop Buri continental rift zone) วางตัวประมาณเหนือ-ใต้ (Intasopa, 1993) และเกิดขึ้นในช่วงเวลาใกล้เคียงกับเหตุการณ์การเคลื่อนขยับตัว (displacement event) ของ Ailao-Shan/Red River metamorphic belt ในทิศทางวนซ้าย (sinistral) ตามแนวรอยเลื่อนแม่น้ำแดง (Red River Fault) ที่เกิดขึ้นเมื่อประมาณ 23 ล้านปีก่อน (K-Ar age โดย Tapponnier et al., 1990) ซึ่งทั้งหมดเป็นผลสืบเนื่องมาจากการชนกันของแผ่นทวีปอินเดียเข้ากับแผ่นทวีปยูเรเชีย

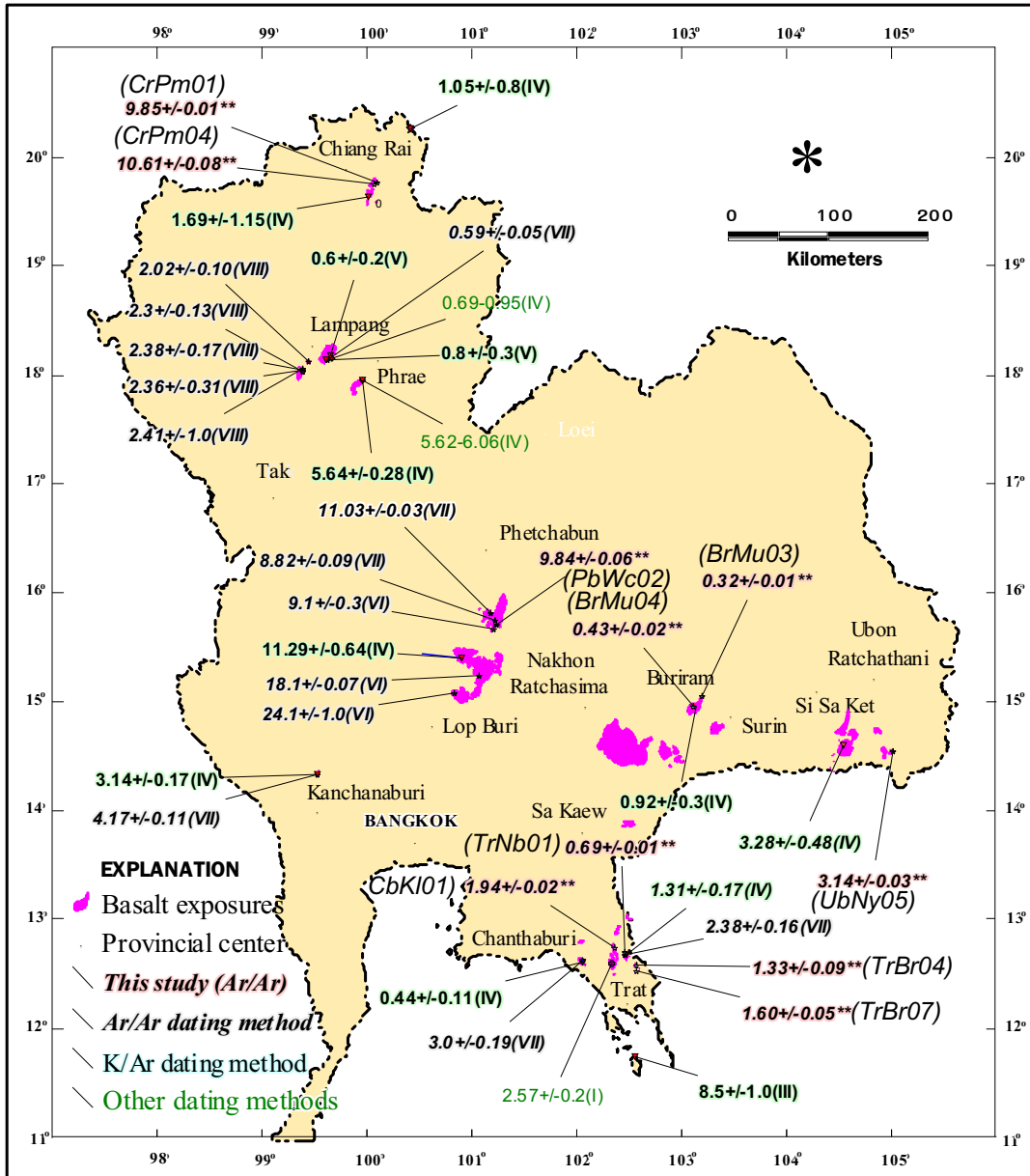
ในช่วง (II) Early Miocene (~19-18 Ma) เหตุการณ์การปะทุของชุดลาวาที่มีองค์ประกอบตั้งแต่บะซอลต์ ถึง ไรโอไลต์ได้เกิดขึ้นซ้ำในบริเวณลำนารายณ์ จังหวัดลพบุรี จนถึงเมื่อประมาณ 18 ล้านปีก่อน (Ar/Ar โดย Intasopa, 1993)

ในช่วง (III) Middle to Late Miocene (~12-7 Ma) มีเหตุการณ์การปะทุของชุดลาวาบะซอลต์-ไรโอไลต์เกิดขึ้นซ้ำในบริเวณลำนารายณ์ จังหวัดลพบุรี และได้ขยายอาณาเขตต่อเนื่องขึ้นไปทางเหนือ ทำให้เกิดการปะทุลาวาบะซอลต์เป็นช่วงๆ (~11-8.8 Ma) ในบริเวณอำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์ (Ar/Ar โดย Intasopa, 1993; Sutthirat et al., 1994 และในงานวิจัยนี้) ในแอ่งสะสมตะกอนพิษณุโลก (Pissanulok basin) จังหวัดพิษณุโลก เมื่อประมาณ 10.3 ล้านปีก่อน (K/Ar โดย Knox and Wakefield, 1983) และในบริเวณอำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย มีอายุ 9.8-10.6 ล้านปีก่อน (Ar/Ar โดย งานวิจัยนี้) ขณะเดียวกันในช่วงปลายไมโอซีน (~8.5 Ma) เหตุการณ์ภูเขาไฟปะทุในภาคตะวันออกเฉียงใต้เริ่มเกิดขึ้น โดยอาศัยหลักฐานการกระจายตัวของหย่อมหินไรโอไลต์และบะซอลต์ ที่เกาะกูด จังหวัดตราด (K/Ar โดย Bignell and Snelling, 1977)

ในช่วง (IV) Early Pliocene (~6-4 Ma) ได้มีเหตุการณ์ลาวาบะซอลต์ปะทุขึ้นในบริเวณอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่ ที่มีอายุอยู่ในช่วงประมาณ 5.6-6 ล้านปีก่อน (K/Ar และ paleomagnetism โดย Barr and Macdonald, 1981) และที่บริเวณเขาลั่นทม อำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อประมาณ 4.17 ล้านปีก่อน (Ar/Ar โดย Sutthirat et al., 1994)

ในช่วง (V) Late Pliocene (~3.6-1.8 Ma) ลาวาบะซอลต์ได้ปะทุขึ้นอีกเมื่อประมาณ 3 ล้านปีก่อน โดยเกิดขึ้นหลายบริเวณในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน อาทิ ในภาคตะวันตกที่บริเวณเขาลั่นทม อำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อประมาณ 3.14 ล้านปีก่อน (K/Ar โดย Barr and Macdonald, 1981) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง ที่บริเวณภูผ้าย อำเภอบุพผา

จังหวัดศรีสะเกษ เมื่อประมาณ 3.28 ล้านปีก่อน (K/Ar โดย Barr and Macdonald, 1981) และ บริเวณอำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานีประมาณ 3.14 ล้านปี (Ar/Ar โดย งานวิจัยนี้)



รูปที่ 15 แผนที่แสดงค่าอายุหินบะซอลต์ใหม่บริเวณต่างๆของประเทศไทย (ที่มา: (I) Carbonnel et al., 1972; (II) Barr et al., 1976; (III) Bignell and Snelling, 1977; (IV) Barr and Macdonald, 1981; (V) Sasada et al., 1987; (VI) Intasopa, 1993; (VII) Sutthirat et al., 1994; (VIII) Sutthirat et al., 1995; และ \*\* ในงานวิจัยนี้)

ตารางที่ 5 รวบรวมอายุหินบะซอลต์ซีโนโซอิกในประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน โดยปรับปรุงเพิ่มเติมจาก Sutthirat et al., (1994) (แหล่งที่มาของค่าอายุโปรดดูจากรูปที่ 15)

ช่วงเวลาการเกิดของ หินบะซอลต์ -บริเวณจุดเก็บตัวอย่าง	อายุหินบะซอลต์ (ล้านปี)			
	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Plateau age)	K/Ar (Integrated age)	Paleomagnetic	Fission Track
<b>I. Late Oligocene</b> (~25-23Ma) -ลำนารายณ์ (ลพบุรี)	24.1±1.0 <sup>(VI)</sup>			
<b>II. Early Miocene</b> (~19-18Ma) -ลำนารายณ์ (ลพบุรี)	18.1±0.7 <sup>(VI)</sup>			
<b>III. Middle-Late Miocene</b> (~12-7Ma) -ลำนารายณ์ (ลพบุรี) -วิเชียรบุรี (เพชรบูรณ์) -บ.วังหินกอง <sup>#</sup> -บ.เขาน้อย <sup>#</sup> -บ.เขาสูง <sup>#</sup> -แอ่งพิษณุโลก (พิษณุโลก) -บ.ห้วยท่างราษฎร์ (เขียงราย) -เกาะกูด (ตราด)	11.03±0.03 <sup>(VII)</sup> 9.84±0.06 <sup>**</sup> 9.08±0.29 <sup>(VI)</sup> 8.82±0.09 <sup>(VII)</sup> 10.61±0.08 <sup>**</sup> 9.85±0.05 <sup>**</sup>	11.29±0.64 <sup>(IV)</sup>    10.3 <sup>(X)</sup>  8.5±1.0 <sup>(III)</sup>		
<b>IV. Early Pliocene</b> (~6-4Ma) -เด่นชัย (แพร่) <sup>#</sup> -เขาลั่นทม อำเภอปอพลอย (กาญจนบุรี) <sup>#</sup>	4.17±0.11 <sup>(VII)</sup>	5.64±0.28 <sup>(IV)</sup>	5.62–6.06 <sup>(IV)</sup>	
<b>V. Late Pliocene</b> (~3.6-1.8Ma) -ปอพลอย (กาญจนบุรี) <sup>#</sup> -ภูผ้าย (ศรีสะเกษ) <sup>#</sup> -น้ำยืน (อุบลราชธานี)	3.14±0.03 <sup>**</sup>	3.14±0.17 <sup>(IV)</sup> 3.28±0.48 <sup>(IV)</sup>		

<sup>#</sup> = พืดหินบะซอลต์ที่มีแนวโน้มให้ผลอายุที่ใกล้เคียงในบริเวณที่มีรายงานการพบพลอย

ตารางที่ 5(ต่อ) รวบรวมอายุหินบะซอลต์ซีโนโซอิกในประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน โดยปรับปรุงเพิ่มเติม จาก Sutthirat et al., 1994 (แหล่งที่มาของค่าอายุโปรดดูจากรูปที่ 15)

ช่วงเวลาการเกิดของ หินบะซอลต์ -บริเวณจุดเก็บตัวอย่าง	อายุหินบะซอลต์ (ล้านปี)			
	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Plateau age)	K/Ar (Integrated age)	Paleomagnetic	Fission Track
<b>V. Late Pliocene(ต่อ)</b> (~3.6-1.8Ma) -เขาหัว อำเภอท่าใหม่ (จันทบุรี) # -ขลุง (จันทบุรี) # -บ.หนองบอน อำเภอบ่อไร่ (ตราด) # -เกาะคา-สบปราบ (ลำปาง)  -บ.น้ำใจ อำเภอสบปราบ (ลำปาง) # -คลองอีตัก อำเภอขลุง (จันทบุรี)	3.00±0.19 <sup>(VII)</sup>   2.38±0.16 <sup>(VII)</sup> 2.41±0.17 <sup>(VIII)</sup> 2.38±0.17 <sup>(VIII)</sup> 2.30±0.13 <sup>(VIII)</sup> 2.02±0.10 <sup>(VIII)</sup> 1.94±0.02 <sup>**</sup>			2.57±0.2 <sup>(I)</sup>
<b>VI. Quaternary (&lt;1.8Ma)</b> -บ.ช่างเคียน (เชียงราย) -ริมโขง อำเภอเชียงของ (เชียงราย) -แม่ทะ (ลำปาง)  -บ.สระใหญ่ อำเภอบ่อไร่ (ตราด) # -บ.คลองโสน อำเภอบ่อไร่ (ตราด) # -บ.หนองบอน อำเภอบ่อไร่ (ตราด) # -บ.เนินตากแดด (ตราด) # -เขาพลอยแหวน อำเภอท่าใหม่ (จันทบุรี) # -เขากระโดง อำเภอเมือง (บุรีรัมย์) -บ.มะขามป้อม อำเภอเมือง(บุรีรัมย์) -บ.กสิณพุม อำเภอเมือง (บุรีรัมย์)	0.59±0.05 <sup>(VII)</sup>  1.58±0.05 <sup>**</sup> 1.33±0.09 <sup>**</sup>  0.69±0.01 <sup>**</sup>  0.42±0.02 <sup>**</sup> 0.32±0.01 <sup>**</sup>	1.69±1.25 <sup>(IV)</sup> 1.05±0.81 <sup>(IV)</sup>  0.8±0.3 <sup>(III)</sup> 0.6±0.2 <sup>(III)</sup>  1.31±0.17 <sup>(IV)</sup>  0.44±0.11 <sup>(IV)</sup>  0.92±0.30 <sup>(IV)</sup>	0.69-0.95 <sup>(IV)</sup>	
รวม 50 จุดตัวอย่าง	(24 จุด ตัวอย่าง)	(13 จุดตัวอย่าง)	(2 จุดตัวอย่าง)	(1 จุด ตัวอย่าง)

# = พืดหินบะซอลต์ที่มีแนวโน้มให้พลอย ที่โผล่ในบริเวณที่มีรายงานการพบพลอย

ในช่วง (VI) Quaternary (<1.8 Ma) โดยในภาคเหนือเกิดขึ้นในเขตอำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย เมื่อประมาณ 1.05 ล้านปีก่อน (K/Ar โดย Barr and Macdonald, 1981) และในบริเวณอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปางในช่วงประมาณ 0.6-0.9 ล้านปีก่อน (Barr and Macdonald, 1981 และ Sutthirat et al., 1994) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในบริเวณเขาพลอยแหวน อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี (~0.44 Ma โดย Barr and Macdonald, 1981) และในบริเวณจังหวัดตราดได้เกิดการปะทุซ้ำขึ้นหลายครั้ง ในบริเวณใกล้เคียงกันหลายจุด โดยเริ่มจากที่บริเวณบ้านสระใหญ่ เมื่อประมาณ 1.58 ล้านปี ที่บ้านคลองโสน เมื่อประมาณ 1.33 ล้านปีก่อน ที่บ้านหนองบอน เมื่อประมาณ 1.31 ล้านปีก่อน (Ar/Ar โดย Sutthirat et al., 1994) และ ที่บ้านเนินตากแดด เมื่อประมาณ 0.69 ล้านปีก่อน สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ห�่อมบะซอลต์เขากระโดง ในเขตจังหวัดบุรีรัมย์ ให้ค่าอายุใกล้เคียงกัน คือประมาณ 0.92 (K/Ar โดย Barr and Macdonald, 1981) 0.42 และ 0.32 ล้านปีก่อน ตามลำดับ และจากข้อมูลอายุหินบะซอลต์ ที่บ้านกลั่นปทุม (*BrMu03*) ของห�่อมบะซอลต์เขากระโดง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ บ่งชี้ว่าเหตุการณ์ภูเขาไฟที่เกิดขึ้นในประเทศไทยอาจสิ้นสุดลงเมื่อประมาณสามแสนปีที่ผ่านมา

#### 5.4 ลำดับช่วงเวลากำหนดนำพลอยขึ้นสู่ผิวโลก

แม้ว่าเหตุการณ์ปะทุของลาวาบะซอลต์ในมหายุคซีโนโซอิกในประเทศไทยได้เริ่มขึ้นตั้งแต่เมื่อประมาณ 24 ล้านปีก่อน (Late Oligocene) แต่หลักฐานที่อนุমানถึงช่วงเวลากำหนดเริ่มต้นปะทุของลาวาที่นำพลอย (ทั้งทับทิมและแซปไฟร์) ขึ้นถึงผิวโลกนั้น อยู่ในช่วง Late Miocene – Pleistocene คือตั้งแต่ประมาณ 11 ล้านปีก่อน ถึง 0.44 ล้านปีที่ผ่านมาซึ่งแหล่งพลอยแซปไฟร์วิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์มีช่วงอายุการเกิดแก่ที่สุด (11.03?-8.82 Ma) โดยกินเวลาประมาณ 2.2 ล้านปี ขณะที่แหล่งพลอยแซปไฟร์ภาคเหนือ ในเขตจังหวัดลำปาง-แพร่ และภาคตะวันตก ในเขตจังหวัดกาญจนบุรี มีอายุการเกิดอยู่ในช่วงกลางๆ คือ 6.06-5.62 และ 4.17-3.14 ล้านปี โดยกินเวลาประมาณ 0.4 และ 1 ล้านปี ตามลำดับ สำหรับแหล่งพลอยทับทิมและแซปไฟร์ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ในเขตจังหวัดจันทบุรี-ตราด นั้น มีช่วงอายุการเกิดอ่อนที่สุด (3.14-0.44 Ma) แต่กินเวลายาวที่สุดประมาณ 2.7 ล้านปีและเกิดการปะทุซ้ำในพื้นที่มากที่สุด และเป็นที่น่าสังเกตว่าอายุหินบะซอลต์ที่นำพลอยทับทิมจะไม่เกิน 3.3 ล้านปี ลำดับเหตุการณ์ปะทุของลาวาที่นำพลอยในพื้นที่ต่างๆ สามารถสรุปได้โดยสังเขปได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6

โดยสรุปอาจกล่าวได้ว่าเหตุการณ์ปะทุของลาวาบะซอลต์นำพลอยในประเทศไทยได้เกิดขึ้นมาแล้วประมาณ 18 ครั้ง โดยมีเหตุการณ์เกิดถี่ที่สุดในระหว่างช่วงกลางยุคไพลโอซีน (Pliocene) ถึงยุคน้ำแข็งตอนต้น (3.3-0.4 Ma) ซึ่งเกิดขึ้นไม่น่าจะต่ำกว่า 11 ครั้ง และเหตุการณ์ที่หินหนืดบะซอลต์นำพลอยทับทิมขึ้นสู่ผิวโลกจะเกิดขึ้นภายหลังเหตุการณ์ที่นำพลอยแซปไฟร์ และแหล่งพลอยทับทิมมีขอบเขตการกระจายตัวจำกัดอยู่เฉพาะในบริเวณใกล้เขตแดนไทย-กัมพูชา ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง

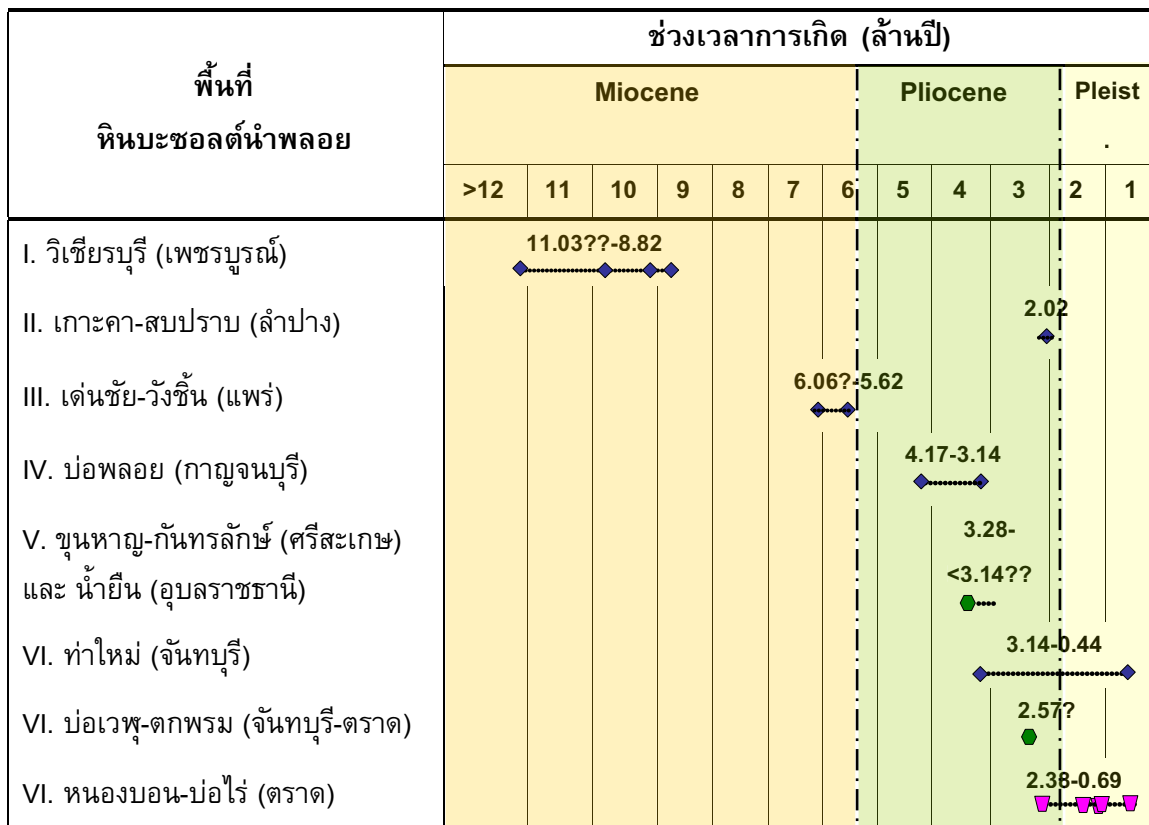
**ตารางที่ 6 สรุปช่วงเวลาการเกิดหินบะซอลต์นำพลอยในประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน**

ตำแหน่งที่วางสัญลักษณ์ คือ เวลาที่เกิดการปะทุของลาวาที่นำพลอยแต่ละชนิดขึ้นมา

◆ = แหล่งแฮปไฟร์      ▼ = แหล่งทับทิม      ● = แหล่งแฮปไฟร์-ทับทิม

? = เป็นการกำกับว่าตัวเลขดังกล่าวเป็นการอนุมานโดยอาศัยผลของการวัดอายุด้วยวิธีอื่นที่ไม่ใช่ Ar/Ar หรือ K/Ar

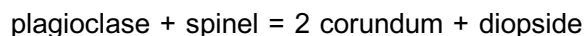
?? = เป็นการกำกับว่าตัวเลขดังกล่าวเป็นการอนุมานโดยอาศัยอายุหินบะซอลต์ที่อาจไม่ใช่ชนิดนำพลอย แต่พบในบริเวณพื้นที่แหล่งพลอย



## บทที่ 6: บทวิจารณ์และข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทวิจารณ์

จากลักษณะเนื้อหินแปรกล่อมอุ้มพลอยที่พบ บ่งชี้เบื้องต้นว่าหินเหล่านี้ได้ก่อตัวและมีการปรับสมดุลภาวะภายใต้อิทธิพลของกระบวนการแปรสภาพ นอกจากนี้ผลการศึกษาดังกล่าวและศิลาเคมี แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของแร่ทั้งเชิงกายภาพและเชิงเคมีที่ชัดเจนว่าแร่พลอยคอร์ันดัม และแร่เกิดร่วม ชนิดไดออปไซด์ (คาลิฟิติก) การ์เนท และสปิเนล มีสมดุลภาวะทางแร่และทางเคมีระหว่างกัน ในขณะที่แร่แพลจิโอเคลสมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับสปิเนล ไดออปไซด์ และการ์เนท มากกว่ากับคอร์ันดัม และเมื่อนำข้อเท็จจริงที่ได้มาวิเคราะห์เทียบเคียงกับผลงานวิจัยอื่น พบว่าของหินแปรกล่อมอุ้มทับทิมนี้ มีลักษณะใกล้เคียงกับหินแปรกล่อม garnet-rich granulite ที่มีคอร์ันดัมเป็นแร่หลัก (Promprated and others, 2003) และก้อนแร่แปรกล่อมไพรอกซีนที่มีคอร์ันดัมเกิดเป็นผลึกมลทิน (Sutthirat and others, 2001) ที่พบจากแหล่งพลอยใกล้เคียง และหิน corundum-bearing mafic rock จาก Horoman Peridotite Complex ของ ญี่ปุ่น (Morishita and Arai, 2001) เป็นอย่างยิ่ง ซึ่ง Morishita and Arai (2001) ได้เสนอว่าหินเมฟิกแกรนูลไลต์ดังกล่าวเกิดจากการแปรสภาพของหินต้นแบบ (protolith) ที่ประกอบไปด้วยแร่โอลิวีน แพลจิโอเคลส และโคลโนไพรอกซีน (ซึ่งมีองค์ประกอบทางแร่เทียบเคียงได้กับหินบะซอลต์หรือแกบโบร) ภายใต้ช่วงความดันระหว่าง 1.5-1.8 GPa และแร่คอร์ันดัมในหินก่อตัวขึ้นด้วยปฏิกิริยา:



ซึ่งมีความสอดคล้องกันดีกับผลการคำนวณ P-T constraint ของ Promprated and others (2003) และ Sutthirat and others (2001) เมื่อนำมาเทียบกับลักษณะเนื้อหินและกลุ่มแร่ที่พบในหินแปรกล่อมอุ้มทับทิมของไทยพบว่ามีคุณสมบัติที่เหมือนกัน นอกจากนี้ Morishita and others (2004) ได้ทำการทดลองและพบว่าพลอยสามารถอยู่ในสมดุลภาวะร่วมกับหินเพอริโดไทต์ภายในสภาพแวดล้อมของชั้นเนื้อโลกส่วนบนได้ ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองของ Hong-sen and others (2002) และของ Kornprobst and others (1990 ใน Morishita and others, 2004) และสอดคล้องกับลักษณะและชนิดของหินแปรกล่อมจำพวกเพอริโดไทต์ที่พาขึ้นมาโดยลาวาบะซอลต์ในบริเวณที่พบหินแปรกล่อมอุ้มพลอยด้วยเช่นกัน

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่ารูปแบบการกำเนิดของพลอยทับทิมไทยโดยเฉพาะจากแหล่งพลอยภาคตะวันออก น่าจะถือกำเนิดขึ้นจากหินต้นแบบที่มีองค์ประกอบเคมีเทียบเคียงได้กับหินอัลคาไลบะซอลต์ซึ่งอาจถูกนำลงสู่ระดับความลึกประมาณ 50-60 กม. ในบริเวณช่วงต่อระหว่างชั้นเนื้อโลกส่วนบนกับเปลือกโลกส่วนล่าง (เทียบเท่าความดัน 1.5-1.8 GPa) และมีช่วงอุณหภูมิ 1,100-1,200 °C โดยการมุดตัวของเปลือกโลกทำให้หินเกิดการแปรสภาพเป็นหินแกรนูลไลต์ และแร่พลอยได้ก่อตัวขึ้นด้วยปฏิกิริยา:  $\text{plagioclase} + \text{spinel} = 2 \text{ corundum} + \text{diopside}$  ก่อนที่จะเกิดปรากฏการณ์ที่ทำให้ชั้นเนื้อโลกในระดับลึกคลายความกดดันลง ซึ่งอาจเป็นผลจากเหตุการณ์ extensional rifting ในช่วงปลายยุค Cenozoic ส่งผลให้ชั้นเนื้อโลกเกิดการหลอมละลายบางส่วน

เป็นหินหนืดบะซอลต์เนื้ออัลคาไลที่เคลื่อนตัวผ่านชั้นหินอุ้มพลอยที่ก่อดำอยู่ในระดับที่ตื้นกว่าพร้อม กับอมเอาพลอยและหินเนื้อโลกบางส่วนปะทุขึ้นมาสู่ผิวโลกแล้วแข็งตัวเป็นชั้นหินบะซอลต์น้ำพลอย และผุสลายให้แหล่งพลอยทุติยภูมิในภายหลัง และจะเห็นได้ว่ารูปแบบการกำเนิดพลอยทับทมนี้ มีความแตกต่างไปจากรูปแบบการกำเนิดพลอยแซปไฟร์ทั่วไป

ผลการศึกษาทางธรณีเคมีในครั้งนี้พบว่า พบว่าหินบะซอลต์จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทั้งชนิดที่มีลักษณะปรากฏแบบให้พลอย และไม่ให้พลอย ได้เกิดจากกระบวนการหลอมเหลวบางส่วนของชั้นหินต้นกำเนิดที่มืองค์ประกอบทางเคมีแบบเดียวกัน แต่ต่างกันที่ชั้นหินต้นกำเนิดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีสัดส่วนร้อยละของปริมาณการหลอมเหลวบางส่วนต่ำกว่า และมีความต่างกับหินบะซอลต์จากเพชรบูรณ์และเชียงใหม่ในแง่ขององค์ประกอบเคมีของชั้นต้นกำเนิดบ้างเล็กน้อย ขณะที่กลุ่มหินจากสองจังหวัดนี้มีแหล่งต้นกำเนิดคล้ายคลึงกัน โดยกระบวนการก่อเกิดหินบะซอลต์ทั้งหมดที่ศึกษานั้น สัมพันธ์โดยตรงกับกระบวนการเกิดร่องหุบเขาทรุดในแผ่นทวีป (continental rift) และผลจากข้อมูลธรณีเคมีนำไปสู่ข้อสรุปที่ได้ในเบื้องต้นว่า องค์ประกอบทางเคมีของหินบะซอลต์เนื้ออัลคาไลอาจไม่ได้เป็นตัวแปรหลักในการบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่จะเกี่ยวข้องกับการนำหรือไม่นำพลอยของแมกมาบะซอลต์ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญกว่าจะขึ้นกับว่า (1) ภายใต้อันเนื่องมาจากการนำหรือไม่นำพลอยของแมกมาบะซอลต์ที่ตัดผ่านนั้น มีชั้นหินต้นกำเนิดที่แท้จริงของพลอยวางตัวอยู่หรือไม่ และ(2) ระหว่างที่แมกมาต้นตัวขึ้นมาได้มีการหยุดพักช่วงระหว่างทางหรือไม่

จากผลการวัดอายุโดยวิธี  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  พบว่าบริเวณภาคกลางตอนบนและภาคเหนือ ได้เกิดเหตุการณ์ปะทุของลาวาบะซอลต์ก่อนภูมิภาคอื่น ๆ ในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียง การปะทุได้เริ่มขึ้นใกล้เคียงกันในบริเวณอำเภอขุนหาญ จังหวัดศรีสะเกษ กับอำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี ในช่วงประมาณ 3 ล้านปีก่อน และสิ้นสุดเมื่อประมาณ 3 แสนปีที่ผ่านมามีบริเวณเขากระโดง จังหวัดบุรีรัมย์ และการปะทุของลาวาบะซอลต์ที่นำพลอยซึ่งได้เกิดขึ้นซ้ำหลายครั้งและเกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดในระหว่างช่วงยุคไพลโอซีนตอนปลาย (Pliocene) ถึงยุคน้ำแข็ง โดยเกิดขึ้นไม่น่าจะต่ำกว่า 8 ครั้ง ซึ่งการปะทุสองครั้งหลังสุดที่เกิดขึ้นในแหล่งพลอยบริเวณบ้านเนินตากแดด อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อประมาณเกือบ 7 แสนปีที่ผ่านมา และในแหล่งพลอยบริเวณเขาพลอยแหวน อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 4 แสนปีที่ผ่านมา ซึ่งผลรวมที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้บ่งว่าแหล่งพลอยหลายแหล่งที่ผ่านการทำเหมืองจากชั้นเปลือกดินเหนียวชั้นหินบะซอลต์ไปแล้ว ยังอาจมีศักยภาพของการเป็นแหล่งพลอยหลงเหลืออยู่ โดยอาจยังคงซุกซ่อนอยู่ใต้ชั้นหินบะซอลต์ดังกล่าว

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรหาตัวอย่างหินแปรลอมอุ้มพลอยให้ได้จำนวนมากขึ้น เพื่อนำมาศึกษาเพิ่มเติมด้านเคมีเชิงปริมาณ และด้านไอโซโทป เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ และให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มากพอที่จะนำไปทำการคำนวณหาสภาพระดับความดันและอุณหภูมิในการ

ก่อตัวของพลอยและชั้นหินอุ้มน้ำพลอย รวมถึงหินต้นกำเนิดดั้งเดิมก่อนที่จะแปรสภาพมาเป็นหินอุ้มน้ำพลอย และอาจนำไปสู่ความเข้าใจในธรณีประวัติของพื้นที่นี้ในช่วงที่ชั้นหินอุ้มน้ำพลอยก่อตัวขึ้น

(2) ควรมีการศึกษาด้านไอโซโทปของหินบะซอลต์เพิ่มเติม เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการประมวลลักษณะทางธรณีเคมีเบื้องต้น รวมถึงมีการตรวจอายุหินบะซอลต์ในบริเวณอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อจะได้เข้าใจในวิวัฒนาการของการเกิดภูเขาไฟในช่วงมหายุคใหม่ได้ชัดเจนขึ้น และเป็น การตรวจทานตรวจย้ำถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูลในเชิงสถิติ โดยเฉพาะในบริเวณพืดหินบะซอลต์ ในเขตจังหวัดเชียงราย เนื่องจากยังมีข้อขัดแย้งในเรื่องของอายุหินอยู่

(3) ควรมีการปรับปรุงข้อมูลแผนที่ให้มีความทันสมัยมากขึ้นและควรจัดทำและ รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในรูปของฐานข้อมูลดิจิทัล พร้อมกับส่งเสริมให้มีการศึกษาเปรียบเทียบกับ พื้นที่หินบะซอลต์ในประเทศเพื่อนบ้านใกล้เคียงเพื่อนำไปสู่ความเข้าใจในภาพรวมของเหตุการณ์ทาง ธรณีวิทยาในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ดียิ่งขึ้น และ

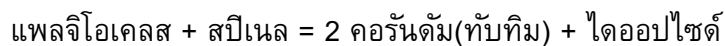
(4) ในการสำรวจหาคัดแยกภาพแหล่งพลอยใต้ชั้นบะซอลต์จำเป็นต้องอาศัยวิธีการ ทางธรณีฟิสิกส์เข้ามาช่วยร่วมกับการเจาะสำรวจทะลวงผ่านชั้นหินบะซอลต์ลงไป

## บทที่ 7: บทสรุป

ผลที่ได้จากการศึกษาภาคสนาม พิสูจน์ยืนยันว่าหินบะซอลต์บริเวณพื้นที่ศึกษา บ้านหนองใหญ่-หมื่นดำน ตำบลบ่อพลอย จังหวัดตราดนี้เป็น ชนิดที่ให้พลอยทับทิม โดยเป็นตัวนำพาแร่พลอยขึ้นมาจากที่ลึกใต้เปลือกโลก แต่ไม่ได้เป็นต้นกำเนิดที่แท้จริงของแร่พลอย โดยการปะทุขึ้นมาสู่ผิวโลกของบะซอลต์นำพลอยนี้เกิดขึ้นไม่ต่ำกว่าสองครั้งในช่วงเวลาที่ไม่ต่างกันมากนัก และพบว่าพื้นที่ศึกษายังมีศักยภาพของการเป็นแหล่งพลอยทับทิมแบบทุติยภูมิครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1 ตร.กม. ทั้งชนิดที่เกิดในลักษณะสะสมตัวอยู่กับที่ (in situ deposit) ในชั้นบะซอลต์ผุ และในลักษณะสะสมตัวในชั้นกรวดร่องน้ำเก่า (paleo-channel filled deposit) ใต้ชั้นหินบะซอลต์ ซึ่งอาจมีทองคำเป็นแร่พลอยได้จากการทำพลอยในชั้นกรวด

การศึกษาในเชิงปฏิบัติการ ให้ข้อสรุปเบื้องต้นว่าพืดหินบะซอลต์สดในบริเวณนี้มีลักษณะเชิงเคมีที่ถือได้ว่ามีความเป็นเนื้อเดียวกัน ตลอดความกว้างและความหนาของชั้นหินปรากฏ จัดเป็นหินบะซอลต์ชนิด บาชานิต (basanite) ที่มีค่า nepheline normative และมีค่าความเป็นอัลคาไลสูง มีต้นกำเนิดในระดับที่ลึกกว่าหินบะซอลต์ทั่วไปที่ไม่นำพลอย อีกทั้งเป็นหินที่เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากหินหนืดที่มีองค์ประกอบเคมีแบบดั้งเดิม (primitive magma) ไม่ผ่านการเปลี่ยนแปลงโดยขั้นตอนตามลำดับขั้นการตกผลึก (differentiation) มากนัก

หินแปรกล่อมอุ้มทับทิมที่พบจัดเป็นหินแปรเกรดสูงในตระกูลหินแกรนูลอิด ที่มีองค์ประกอบทางแร่คาบเกี่ยวระหว่างหินไพโรอกซีนิต และหินไพโรคลาไซต์ โดยพลอยทับทิมจากแหล่งบริเวณบ่อไร่ จ.ตราด น่าจะก่อตัวขึ้นจากปฏิกิริยา:



ภายใต้ช่วงอุณหภูมิ  $\sim 1,100-1,200$  °C และในช่วงความดัน  $\sim 15-18$  Kb เทียบเท่าระดับความลึกประมาณ 50-60 กม. ในบริเวณเขตรอยต่อของชั้นเนื้อโลกส่วนบนกับชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง

ทั้งนี้ได้ข้อสรุปเป็นนัยว่า (1) หินแปรกล่อมอัลตราเมฟิกและหินแปรกล่อมอุ้มทับทิมที่พบไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงที่เด่นชัดในแง่ของการกำเนิดกับหินบะซอลต์ที่นำขึ้นมา แต่ยังคงมีความสัมพันธ์ระหว่างกันในบางแง่ โดยการกำเนิดของทับทิมเกี่ยวข้องโดยตรงกับแร่ที่พบร่วมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับแร่ไคลโนไพโรอกซีนสีเขียวมรกต (ไดออปไซด์) ซึ่งพบว่าทับทิมก่อตัวในภาวะที่สมดุลกับแร่ไดออปไซด์ แพลจิโอเคลส สปิเนล และ (ออลิวีน?)ไพโรอกซีน และ (2) พลอยทับทิม และ แชนไพร์ไทยมีรูปแบบการกำเนิดที่แท้จริงแตกต่างกันแม้ว่าต่างถูกพาขึ้นมาสู่ผิวโลกด้วยหินหนืดบะซอลต์แบบเดียวกันก็ตาม โดย

## บรรณานุกรม

- การุณ ดันธงชัย, 2545, ธรณีวิทยาแหล่งแร่รัตนชาติ อำเภอบึงนาราง จังหวัดจันทบุรี: รายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ กศ 4/2543, กองเศรษฐธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี, 77 หน้า.
- ปานใจ สารพันโชติวิทยา และประวดี ตั้งพงษ์, 2545, การสำรวจธรณีวิทยาแหล่งแร่รัตนชาติ ชั้นกึ่งรายละเอียด บริเวณอำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด และอำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี: รายงานความก้าวหน้า ฉบับที่ กศ 10/2545, กองเศรษฐธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี, 173 หน้า.
- พงศ์ศักดิ์ วิชิต, 2516, แหล่งพลอยจันทบุรีและตราด: พลอยแซปไฟร์ (เอกสารสำหรับประชาชน ฉบับที่ 22), กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์สำนักทำเนียบนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ, หน้า 32-42.
- พล เซาว์ดำรงค์, 2535, รายงานผลการสำรวจหาความต่อเนื่องทางธรณีวิทยาพื้นที่ภาคตะวันออก มาตรฐาน 1:250,000: รายงานการสำรวจธรณีวิทยา ฉบับที่ 0187, กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี, 39 หน้า.
- วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และนรรรัตน์ บุญกันภัย, 2540, รายงานการสำรวจธรณีวิทยา มาตรฐาน 1: 250,000 จังหวัดจันทบุรี: รายงานการสำรวจธรณีวิทยา, กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี.
- วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และนรรรัตน์ บุญกันภัย, 2541, สำรวจธรณีวิทยา มาตรฐาน 1: 50,000 ราวแก้อำเภอบึงนาราง(5434 I) และ ราวแก้อำเภอบึงนาราง (5435 II): รายงานการสำรวจธรณีวิทยา, กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี.
- วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และเด่นโชค มั่นใจ, 2542, สำรวจธรณีวิทยา มาตรฐาน 1: 250,000 จังหวัดตราด: รายงานการสำรวจธรณีวิทยา, กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี.
- Barr, S.M., and Macdonald, A.S., 1978, Geochemistry and Petrogenesis of Late Cenozoic Alkaline Basalts of Thailand. Geological Society of Malaysia Bulletin, v. 10, pp.25-52.
- Barr, S.M., and Macdonald, A.S., 1981, Geochemistry and Geochronology of late Cenozoic Basalts of Southeast Asia. Geological Society of America Bulletin, Part III, v. 92, pp.1062-1142.
- Coenraads, R.R., Vichit, P., and Sutherland, F.L., 1995, An unusual sapphire-zircon-magnetite xenoliths from the Chanthaburi Gem Province, Thailand. Mineralogical Magazine, v.59, pp.465-479.
- Cox, K.G., Bell, J.D., and Pankhurst, R.J., 1979, The interpretation of igneous rocks. George Allen and Unwin, London, 450p.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 8, pp.523-548.

- Kuno, H., 1968, Differentiation of Basalt Magmas. *In* BASALTS The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition Volume 2. Interscience Publishers, New York, pp.624-688
- Promprated, P., Taylor, L.A., and Snyder, G.A., 1999, Petrochemistry of the Mantle beneath Thailand: Evidence from Peridotite Xenoliths. *International Geology Review*, v. 41, pp. 506-530.
- Rollinson, H.R., 1992, *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Scientific&Technical, New York, 352p.
- Suttirat, C., Droop, G.T.R., Henderson, C.M.B., and Manning, D.A.C., 1999, Petrography and Mineral Chemistry of Xenoliths and Xenocrysts in Thai Corundum-related Basalts: Implications for the Upper Mantle and Lower Crust beneath Thailand. *in* Proceedings of Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand: Towards the Year 2000. Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, pp.152-161.
- Suttirat, C., Saminpanya, S., Droop, G.T.R., Henderson, C.M.B., and Manning, D.A.C., 2001, Clinopyroxene-Corundum Assemblages from Alkali Basalt and Alluvium, Eastern Thailand: Constraints on the Origin of Thai Rubies. *Mineralogical Magazine*, 65(2), pp.277-295.
- Suttirat, C., 2001, Petrogenesis of Mantle and Crustal Xenoliths and Xenocrysts in Basaltic Rocks Associated with Corundum Deposits in Thailand. Ph.D. thesis (unpublished), Department of Earth Sciences, Faculty of Science and Engineering, University of Manchester, England, 445p.
- Suttirat, C., Charusiri, P., Farrar, E. and Clark, A.H., 1994, New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology and Characteristics of some basalts in Thailand. *in* Proceedings of the International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia 15-20 November 1994. Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, pp.306-320.
- Vichit, P., 1992, Gemstone in Thailand. *in* Proceedings of a National Conference on Geologic Resources of Thailand, Potential for Future Development. Bangkok, Thailand, 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, pp.126-134.
- Vichit, P., Vudhichativanich, S., and Hansawek, R., 1978, The distribution and some Characteristics of corundum bearing basalts in Thailand. *Journal of Geological Society of Thailand*, v. 3, pp.M4-1-M4-38.