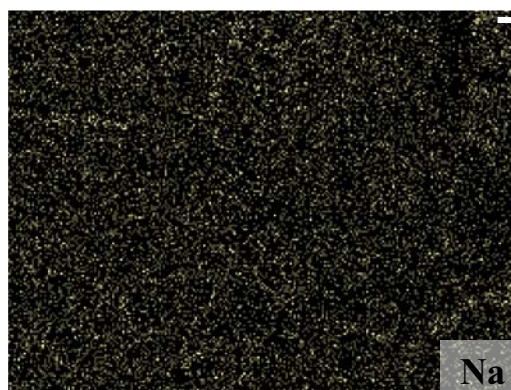
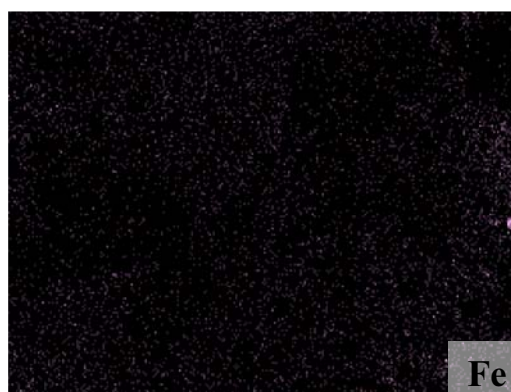
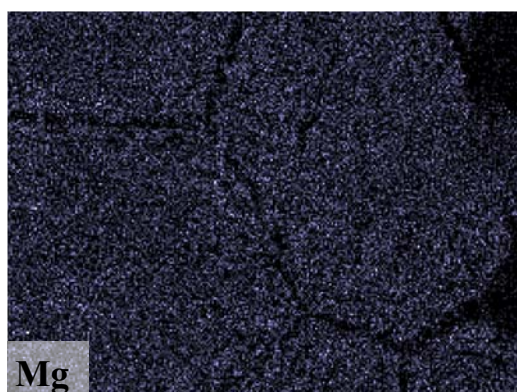
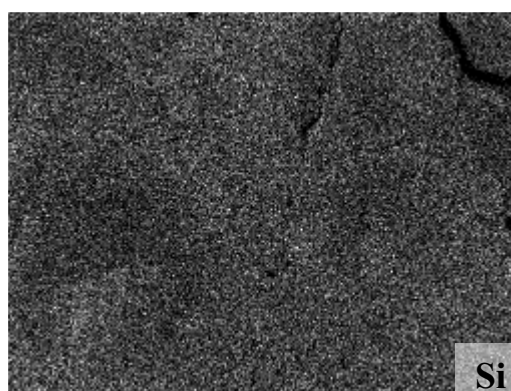
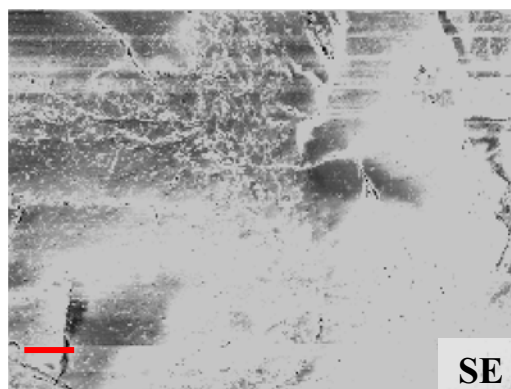
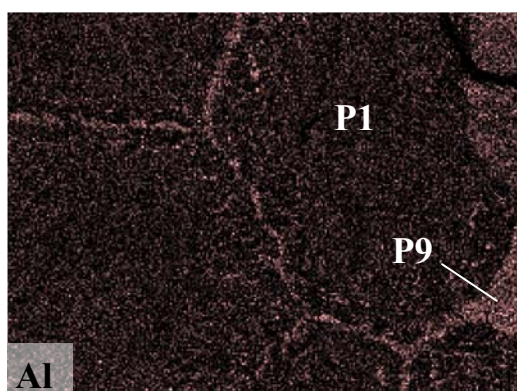
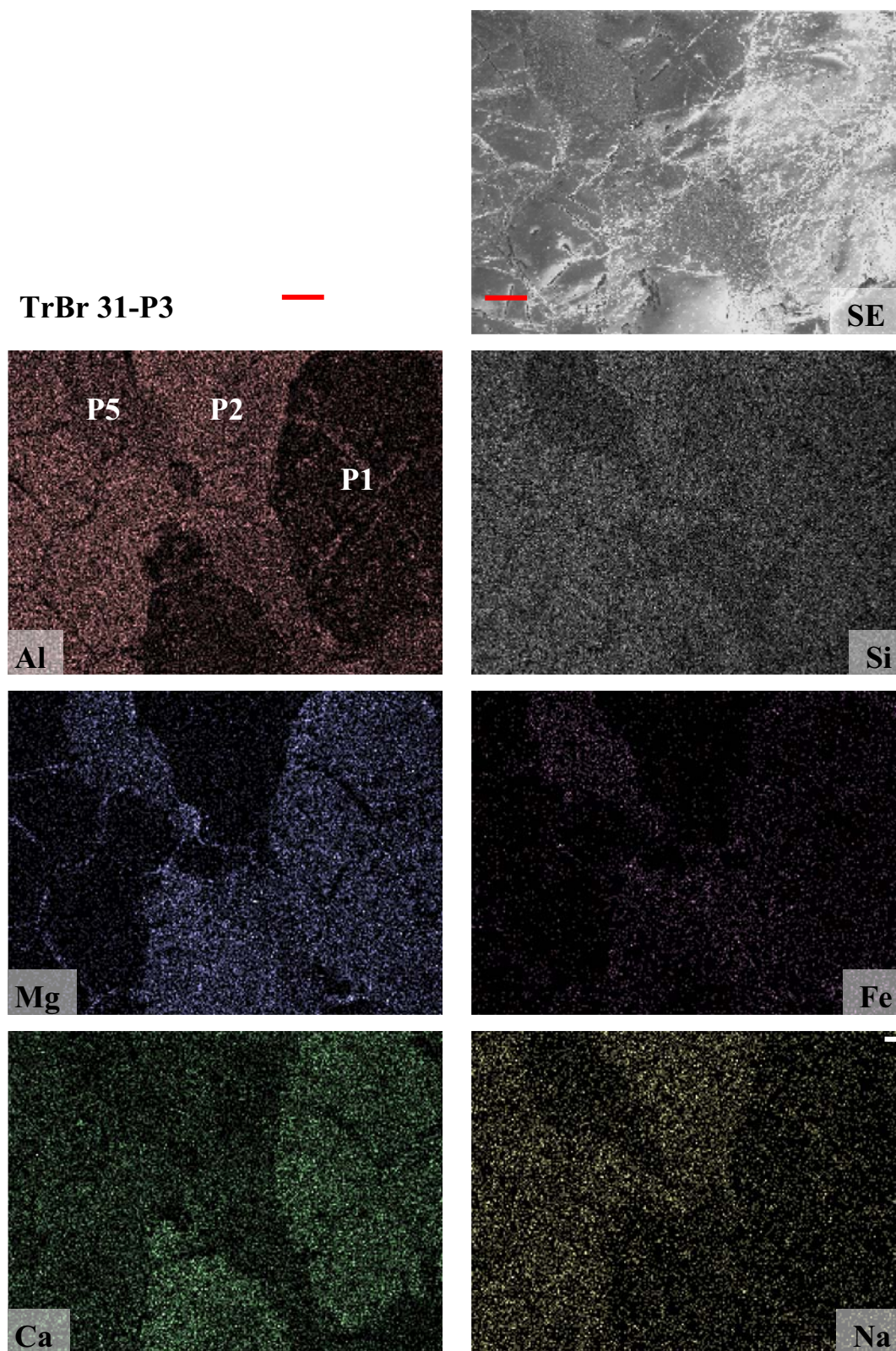


TrBr 31-P2

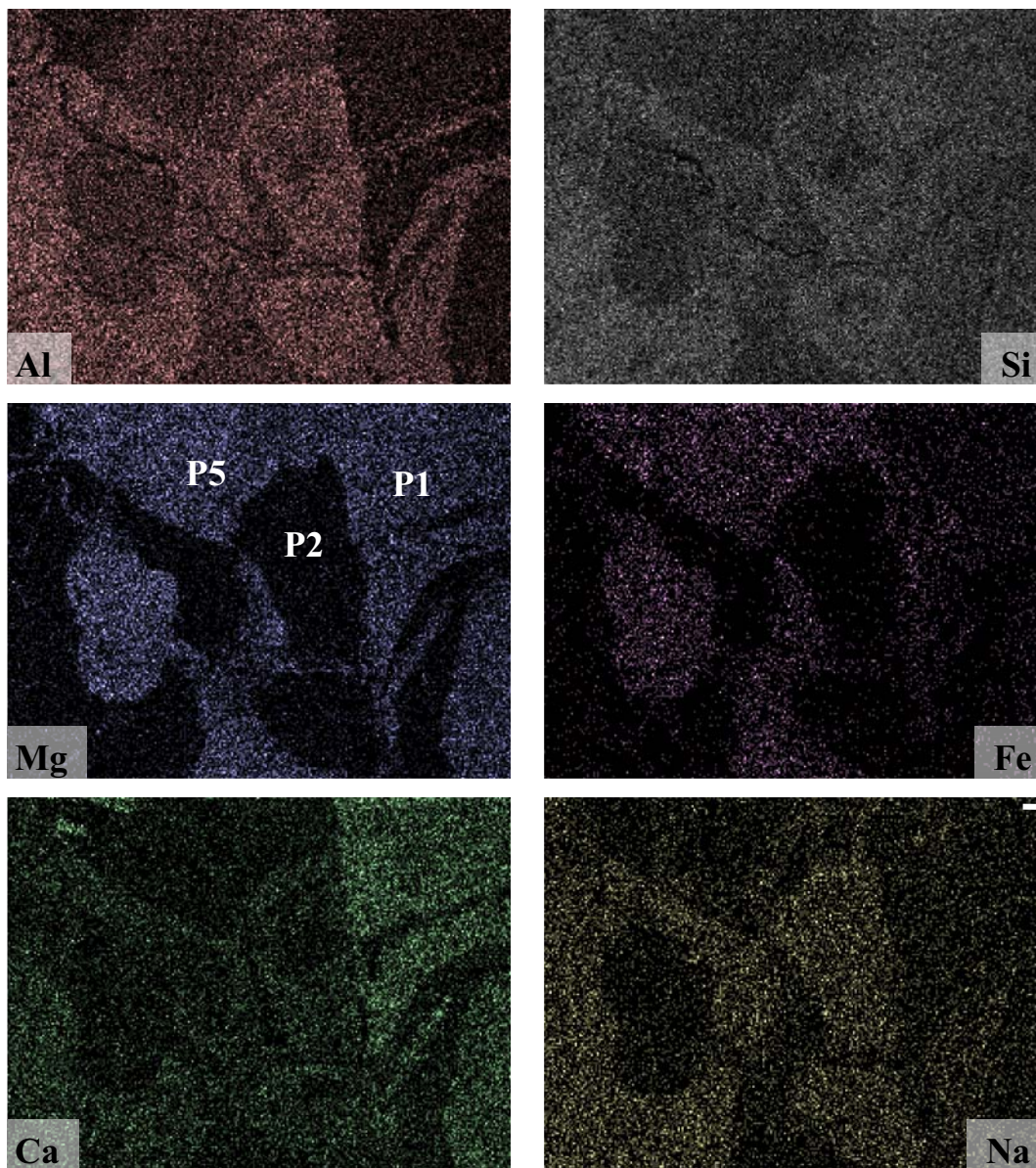


รูปที่ 5-2 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน TrBr 31 ในตำแหน่งที่ 2 จำแนกแร่ได้ 2 phases ได้แก่ P1 (diopsidic clinopyroxene) และ P9 (2nd material) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

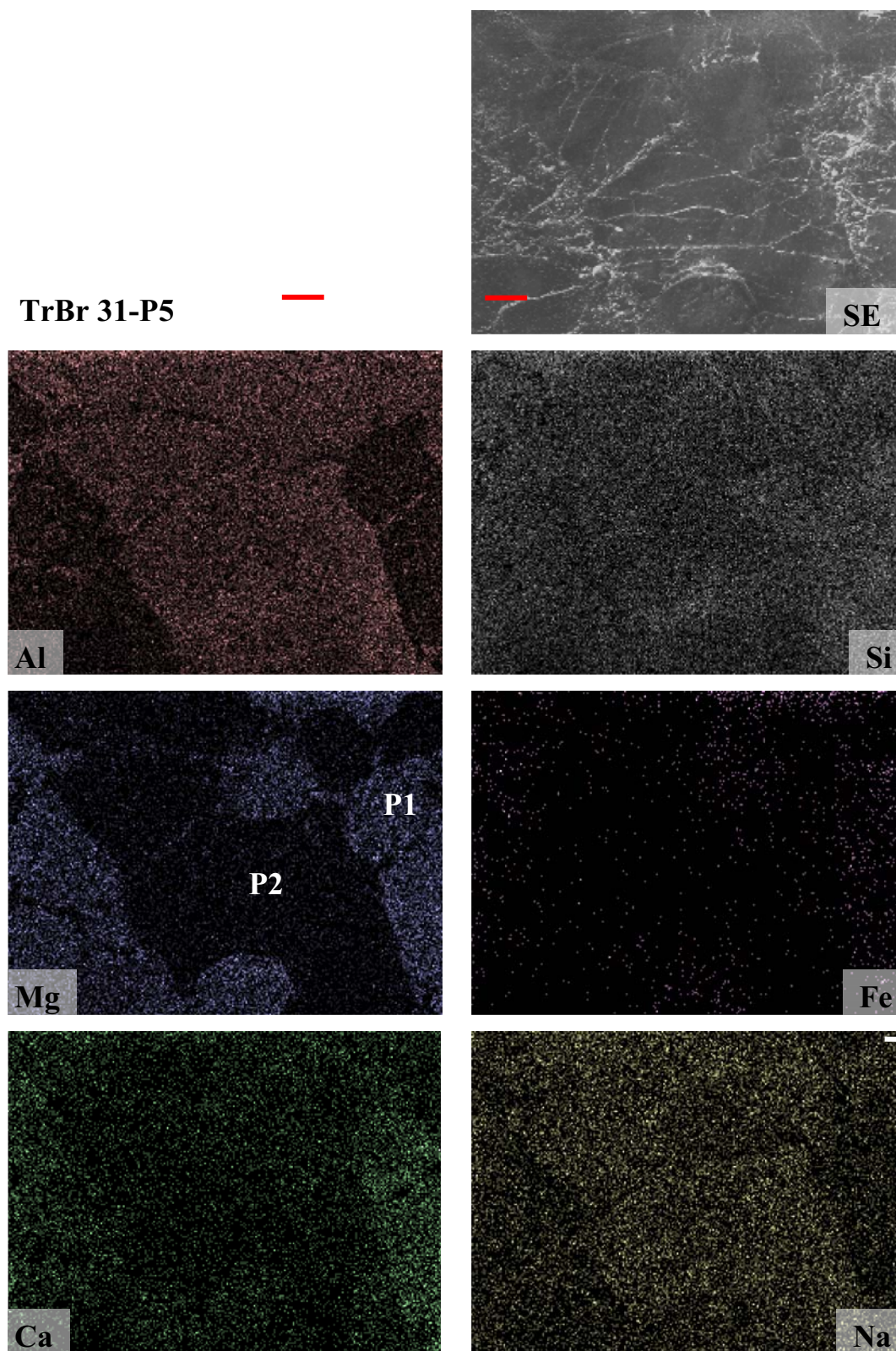


รูปที่ 5-3 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน TrBr 31 ในตำแหน่งที่ 3 จำแนกแร่ได้ 3 phases ได้แก่ P1 (diopsidic clinopyroxene), P2 (plagioclase) และ P5 (kalyphite) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

TrBr 31-P4

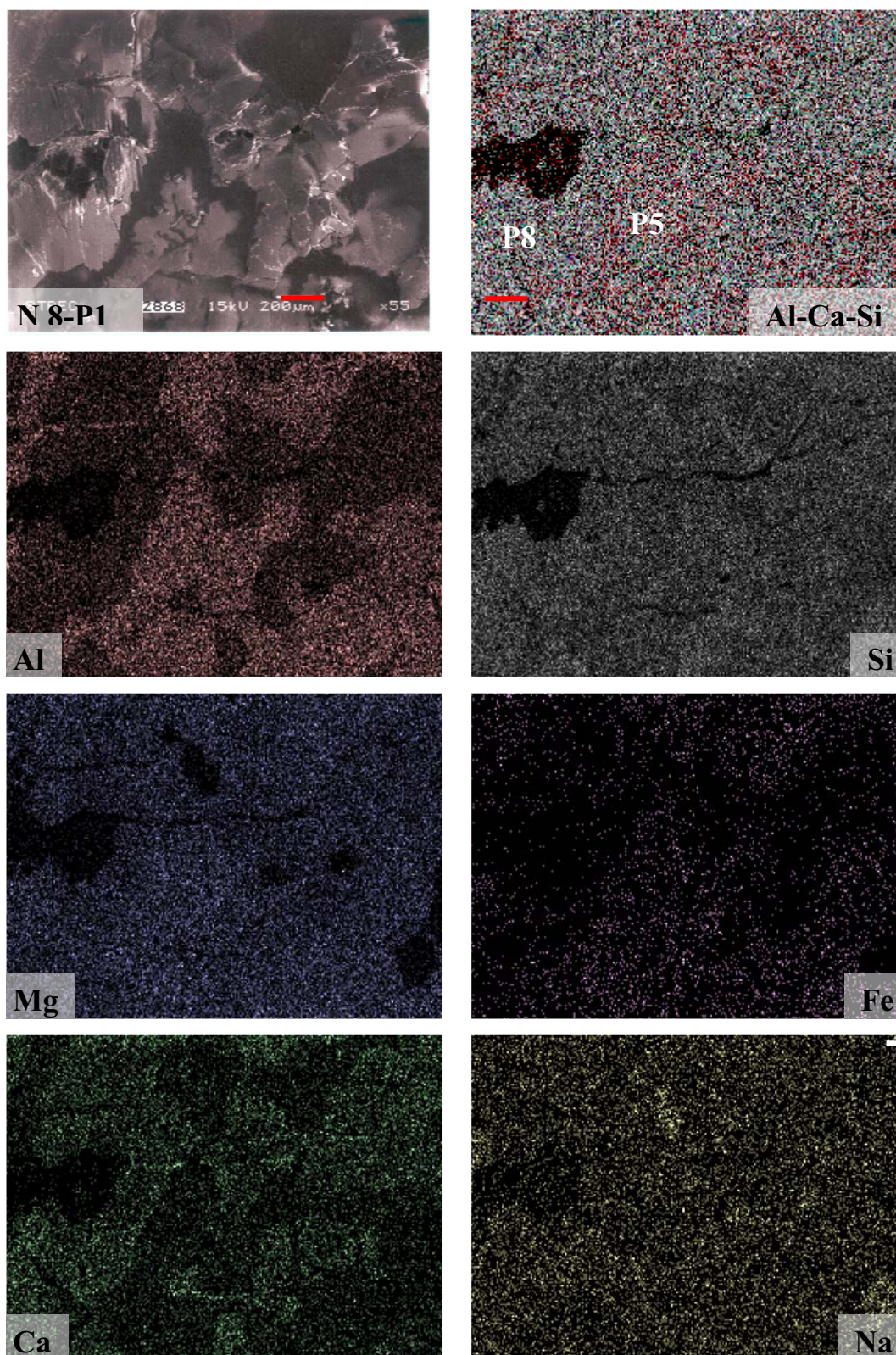


รูปที่ 5-4 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน TrBr 31 ในตำแหน่งที่ 4 จำแนกแร่ได้ 3 phases ได้แก่ P1 (diopsidic clinopyroxene), P2 (plagioclase) และ P5 (kalyphite) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

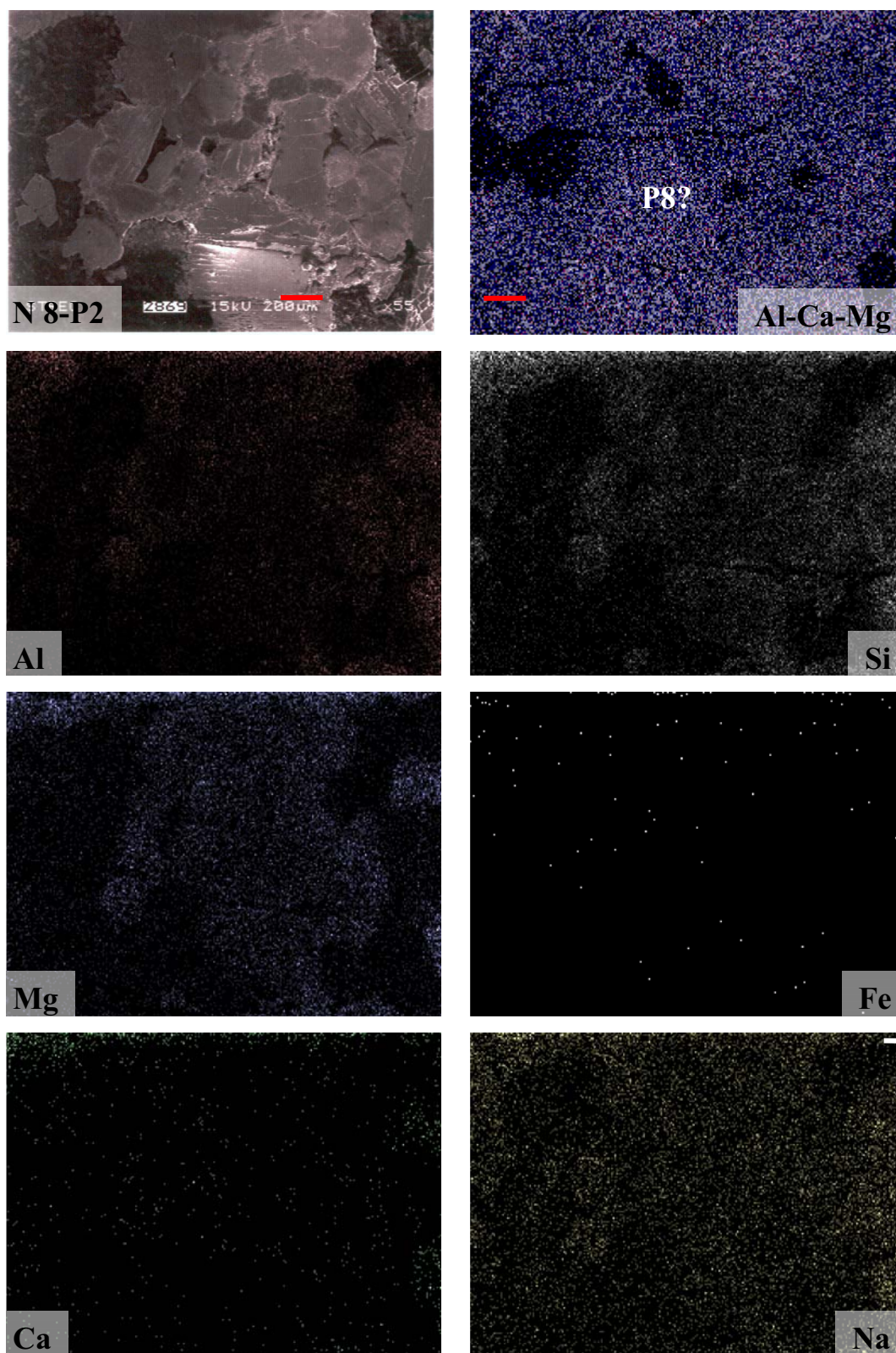


รูปที่ 5-5 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน TrBr 31 ในตำแหน่งที่ 5 จำแนกแร่ได้ 2 phases ได้แก่ P1 (diopsidic clinopyroxene) และ P2 (plagioclase) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

6. ตัวอย่างหิน N 8: Pyriclasite

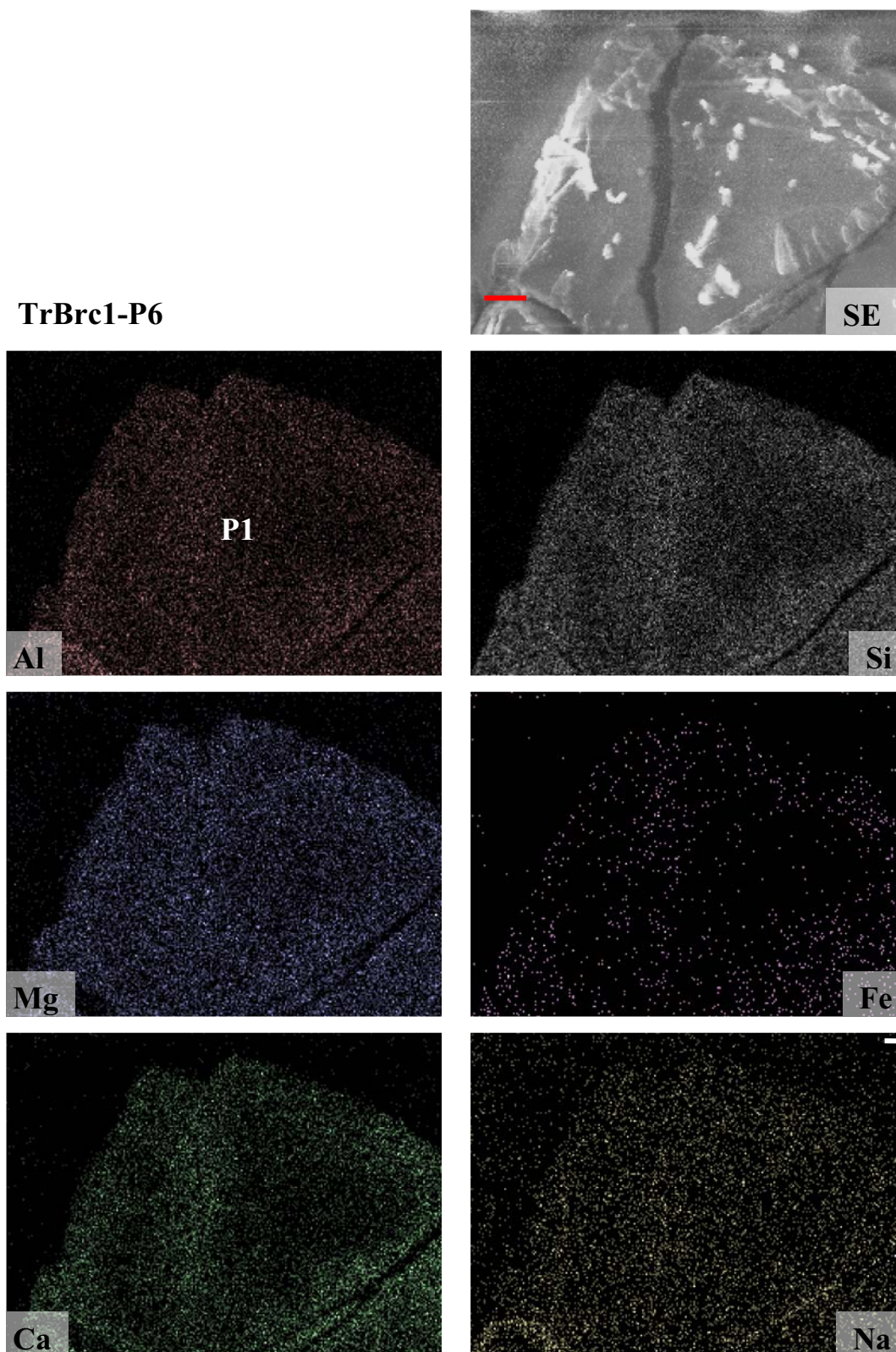


รูปที่ 6-1 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน N 8 ในตำแหน่งที่ 1 จำแนกแร่ได้ 2 phases ได้แก่ P8 (clinopyroxene) และ P5 (kalyphite) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

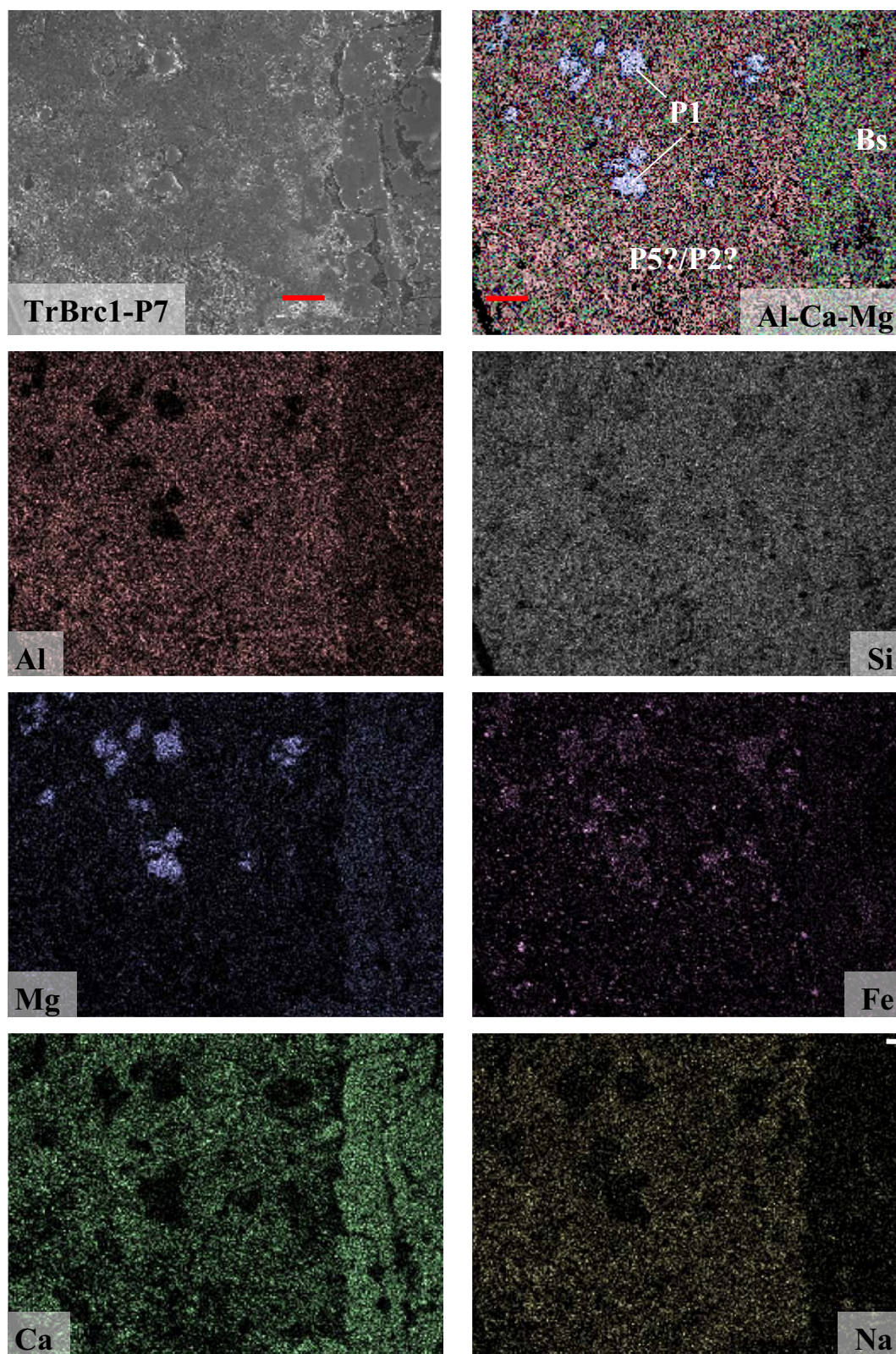


รูปที่ 6-2 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน N 8 ในตำแหน่งที่ 2 จำแนกแร่ได้ 1 phase ได้แก่ P8? (clinopyroxene?) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

7. ตัวอย่างหิน TrBrc 1: Corundum – plagioclase bearing clinopyroxinite



รูปที่ 7-1 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน TrBrc 1 ในตำแหน่งที่ 6 จำแนกแร่ได้ 1 phases คือ P1 (diopsitic pyroxene) [มาตรฐาน = 0.2 มม.]

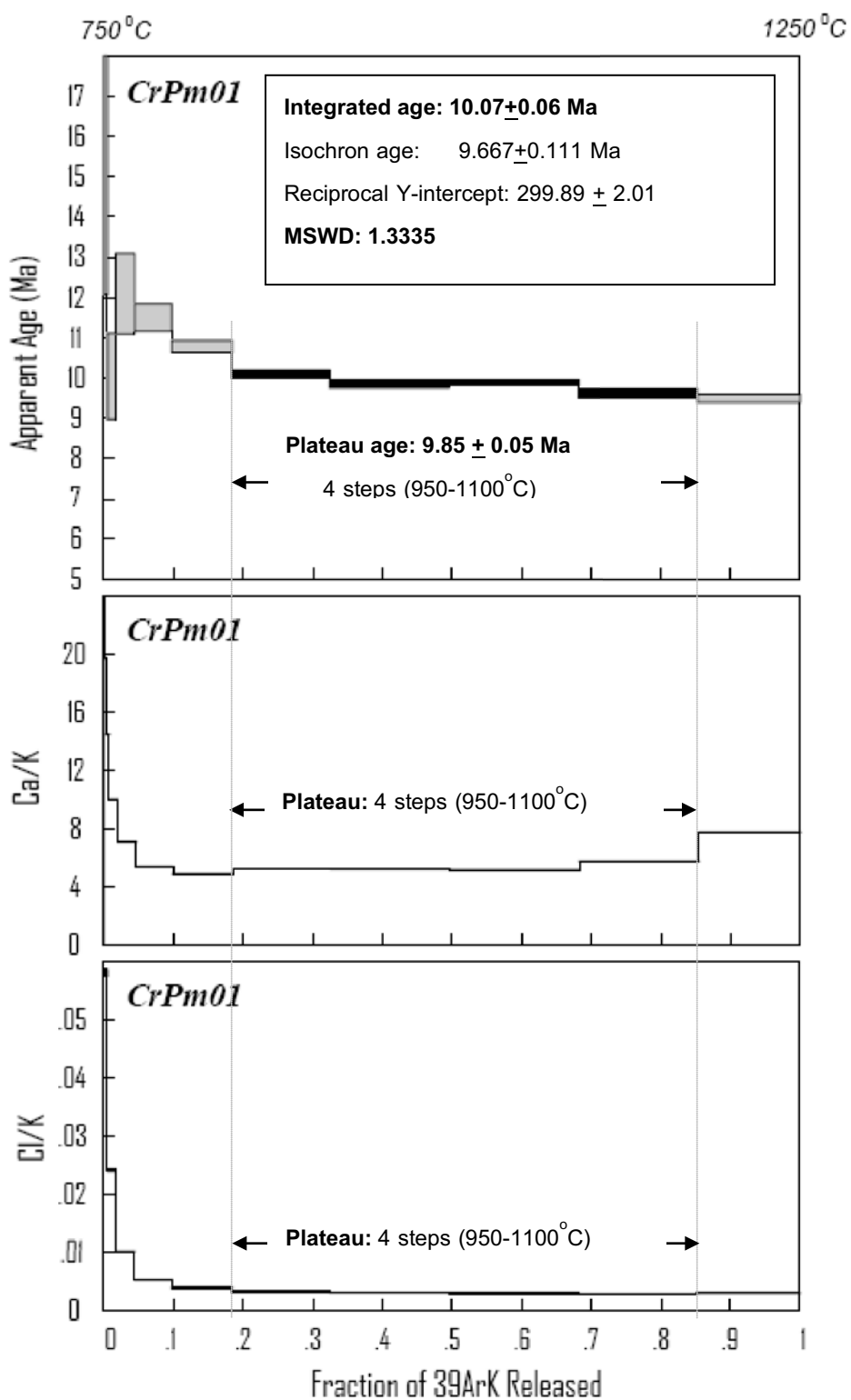


รูปที่ 7-2 ผลวิเคราะห์ SEM ของตัวอย่างหิน TrBrcl 1 ในตำแหน่งที่ 7 จำแนกแร่ได้ 3 phases ได้แก่ P5?/P2? (kalyphite? or plagioclase?) P7? (orthopyroxene?) และแนวสัมผัสกับหิน บะซอลต์ (Bs) [มาตราส่วน = 0.2 มม.]

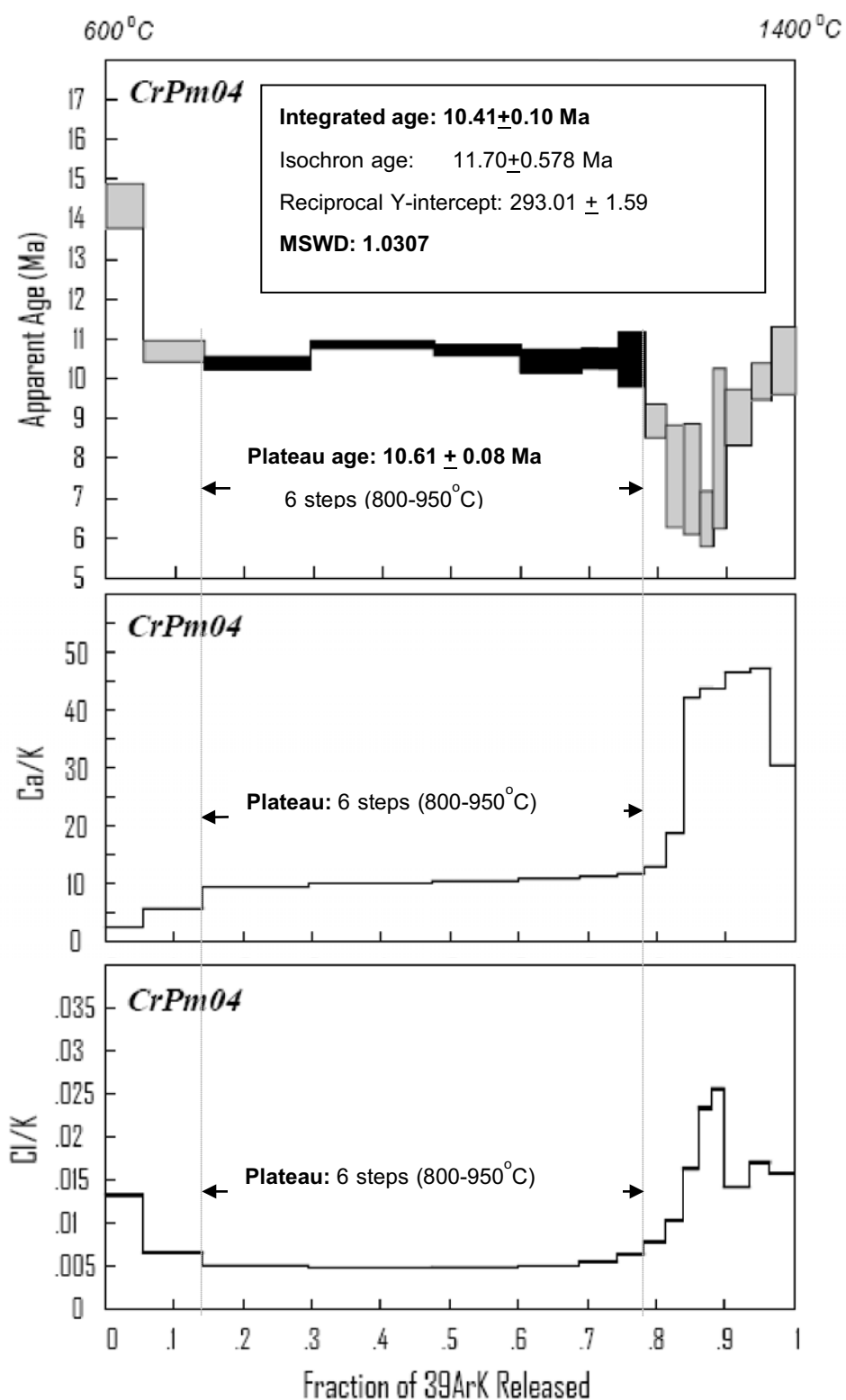
ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข1

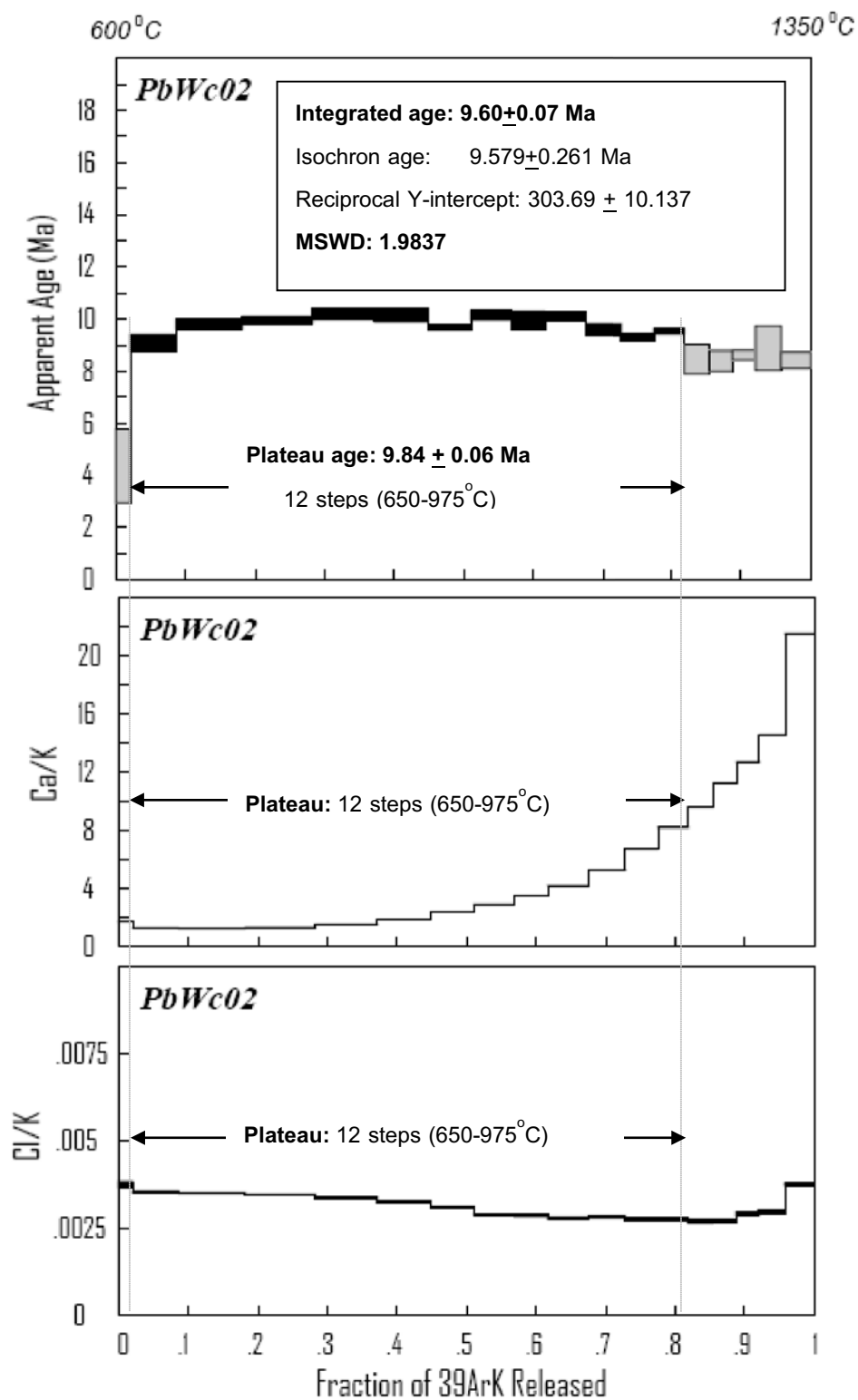
แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า age spectrum, Ca/K และ Cl/K
เทียบกับปริมาณแก๊ส ^{39}Ar ที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละชั้นอุณหภูมิของการเผา



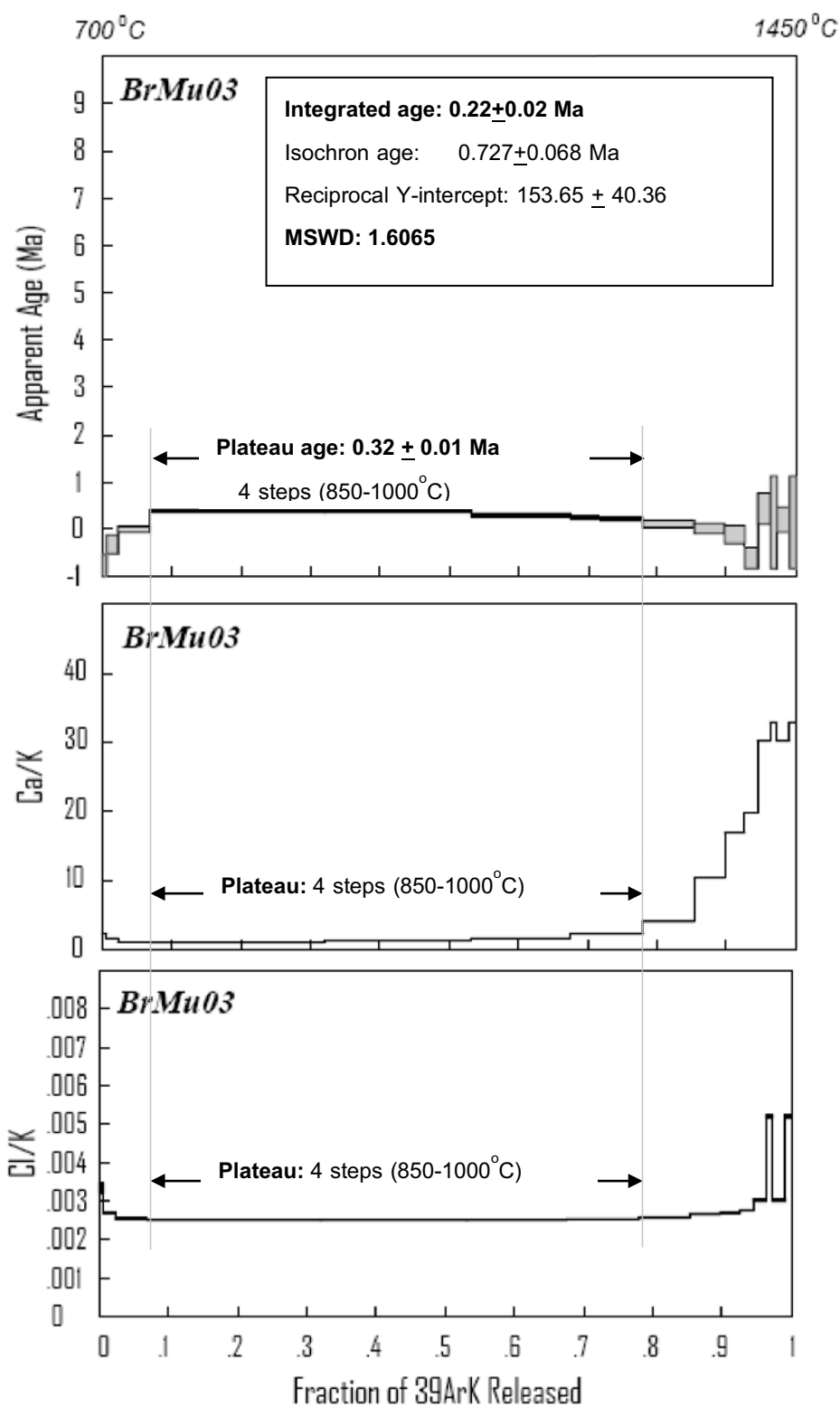
รูปที่ ข1-1 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ CrPm01 จากห้วย่อมหินอำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย



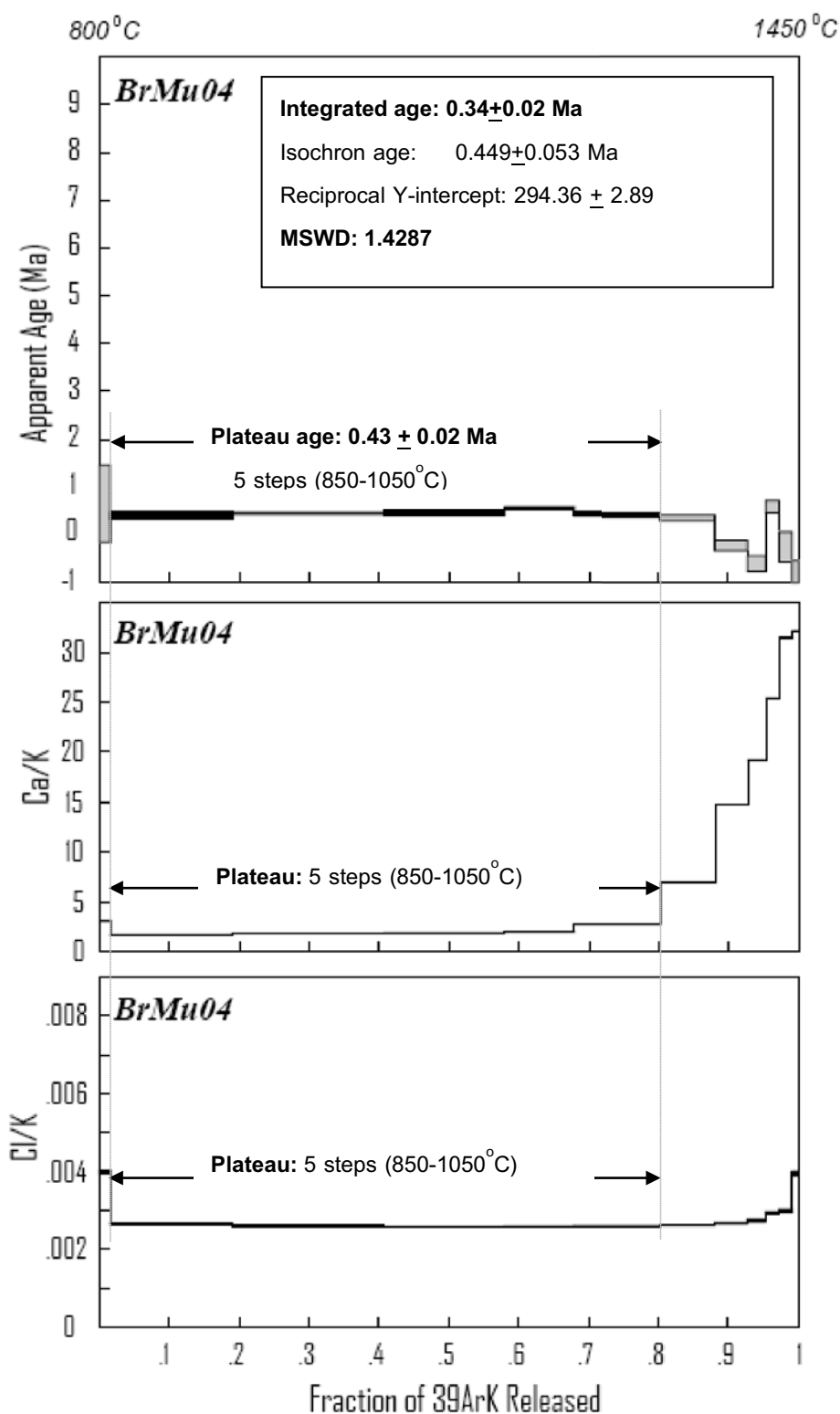
รูปที่ ข1-2 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ CrPm04 จากห้วยมหินอำเภอพญาเม็งราย จังหวัดเชียงราย



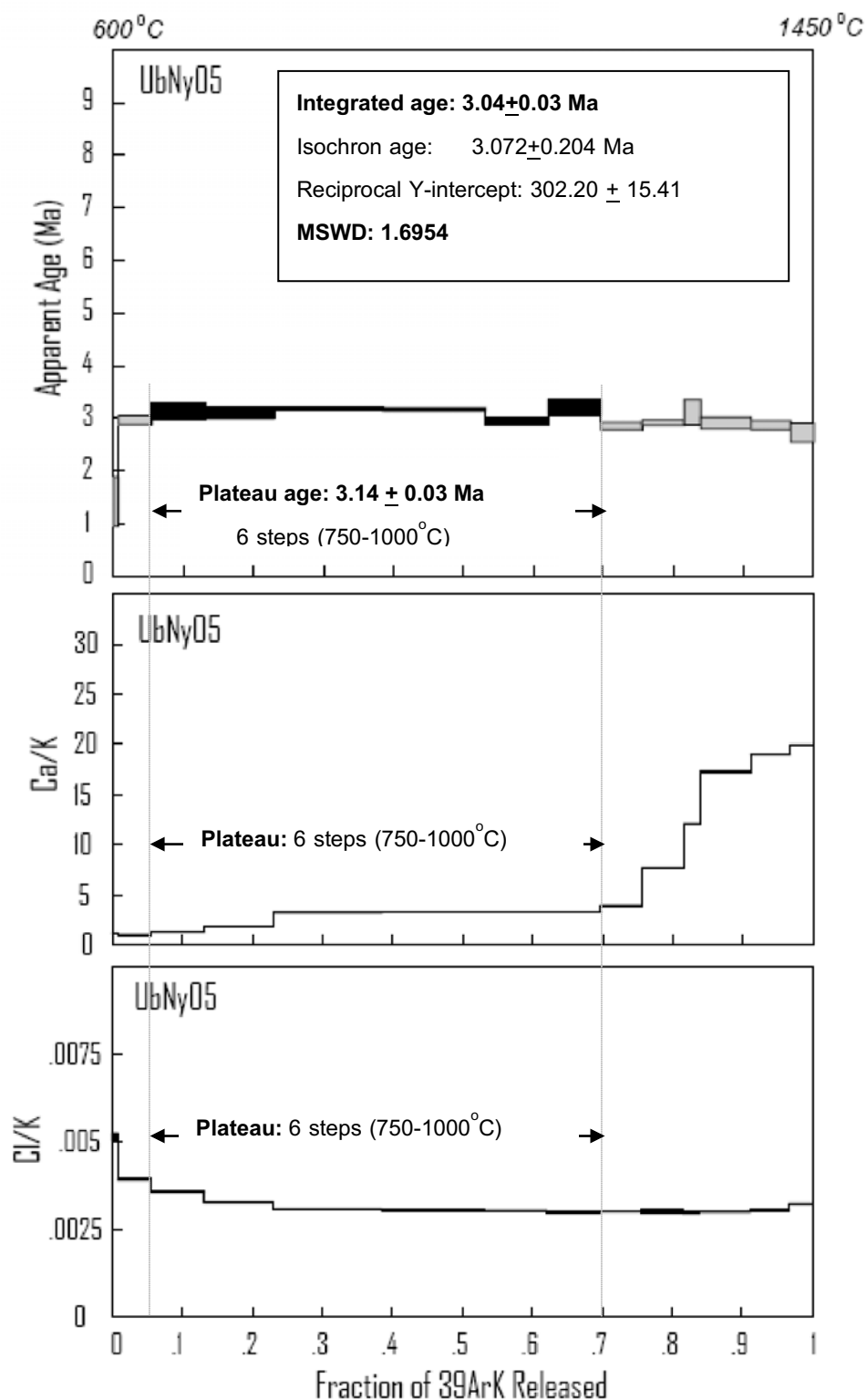
รูปที่ ข1-3 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_k$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ PbWc02 จากห่ยมหินอำเภวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์



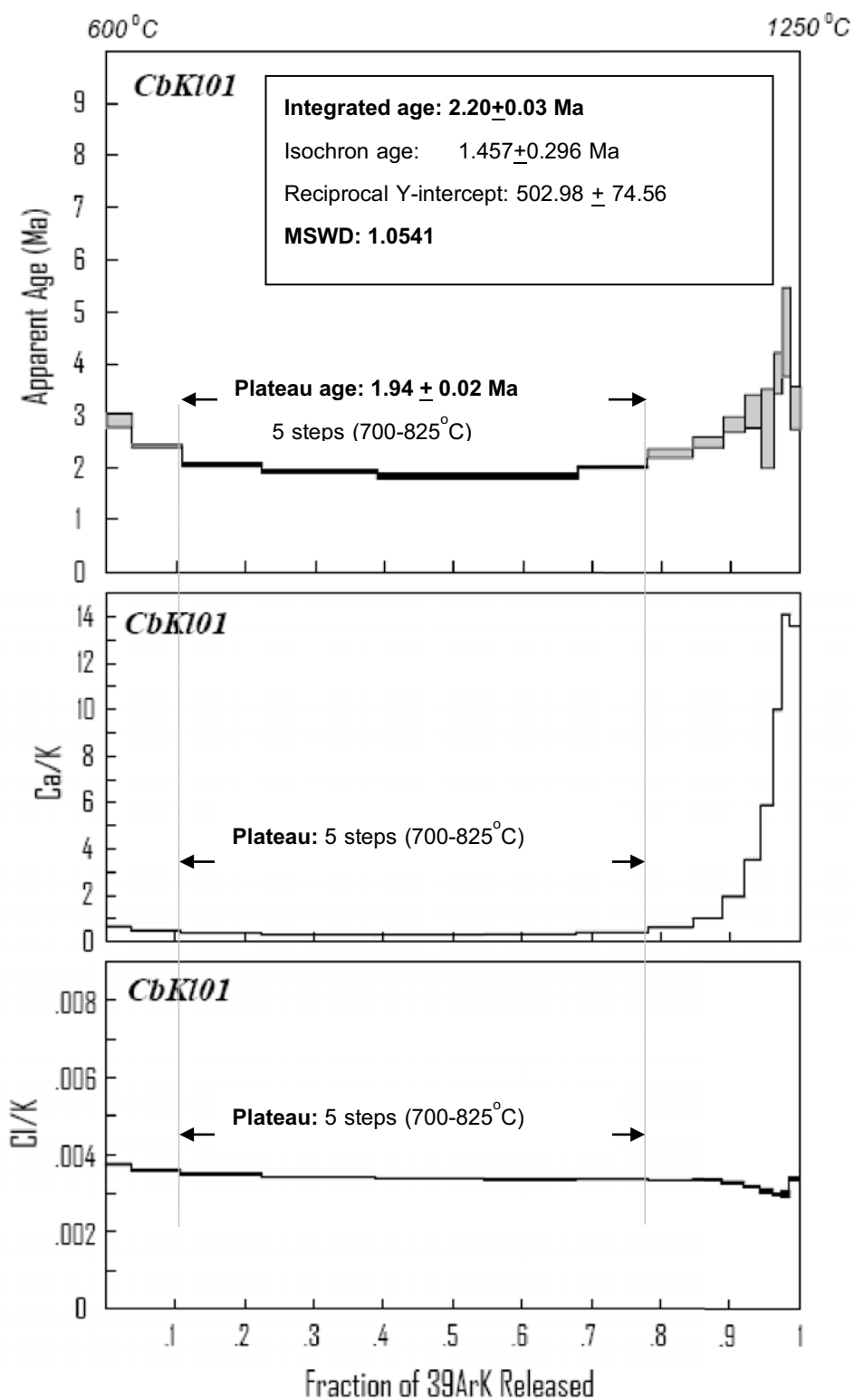
รูปที่ ข1-4 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ BrMu03 จากห้วยอมหินอำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์



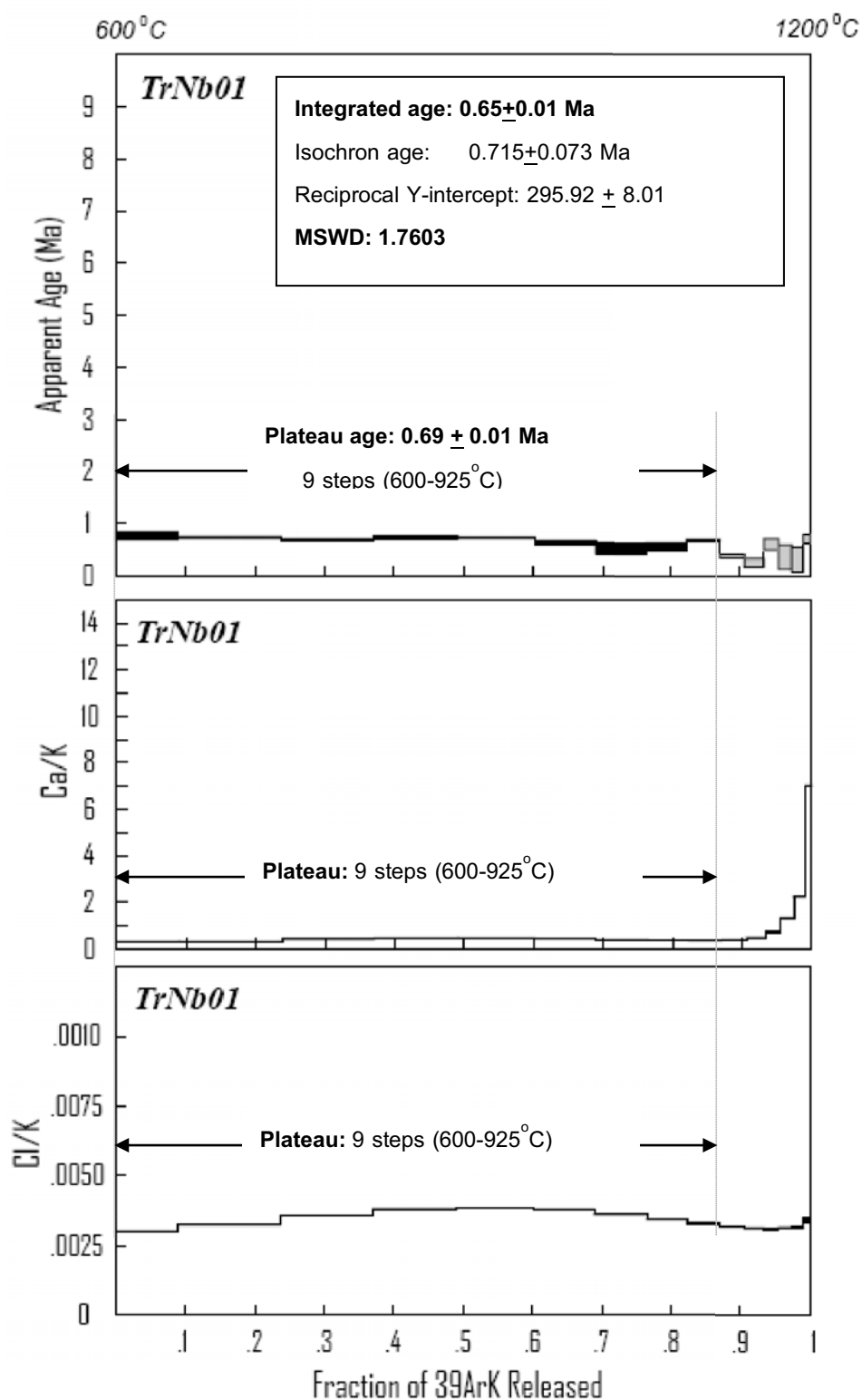
รูปที่ ข1-5 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ BrMu04 จากห่อมหินอำเภอมือง จังหวัดบุรีรัมย์



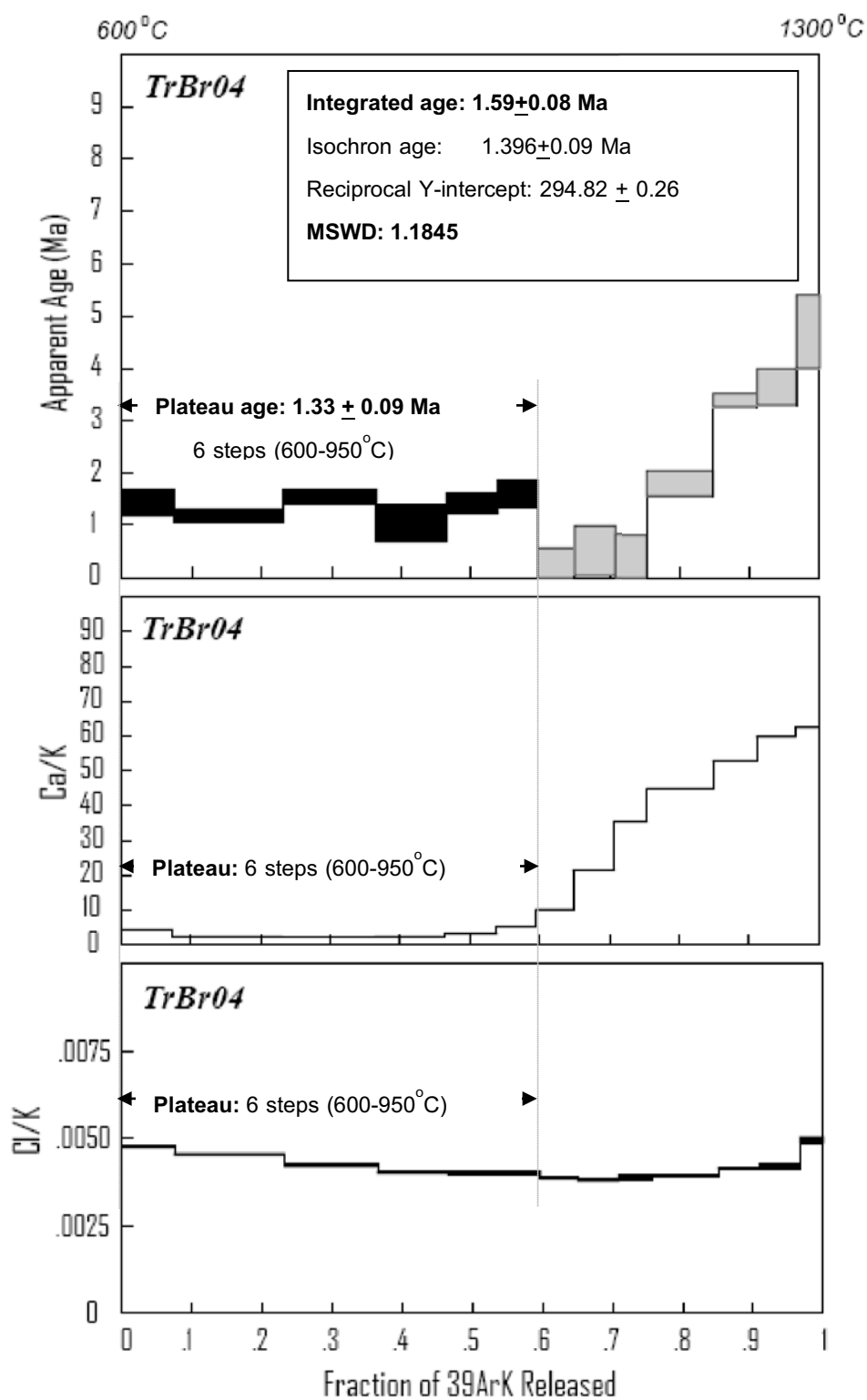
รูปที่ ข1-6 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ UbNy05 จากห้วยมหินอำเภอน้ำยืนจังหวัดอุบลราชธานี



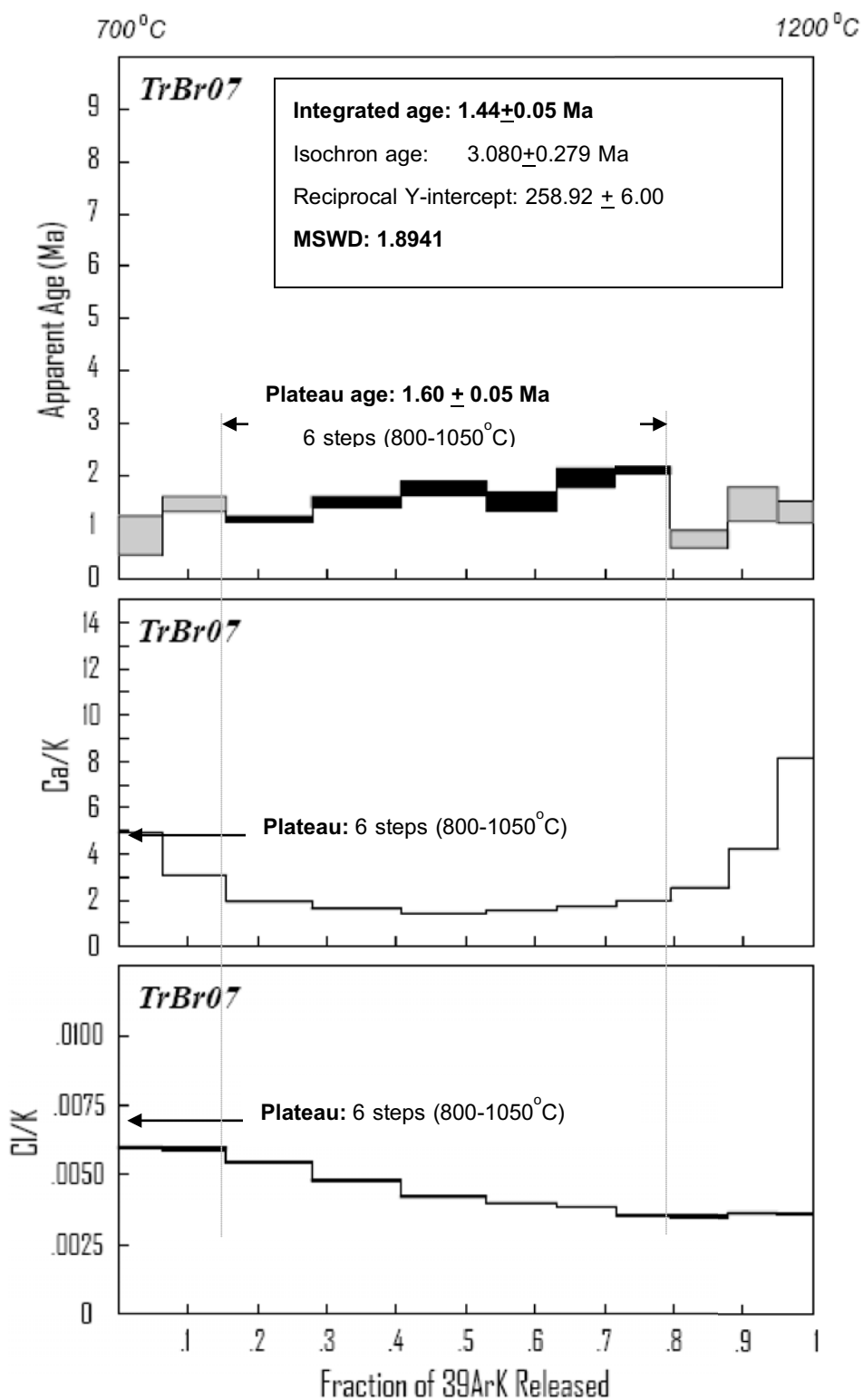
รูปที่ ข1-7 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ CbK101 จากห่อมหินอำเภอลำลูกกระบุง จังหวัดจันทบุรี



รูปที่ ข1-8 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_k$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ TrNb01 จากห่อมหินบ้านหนองบอนอำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด



รูปที่ ข1-9 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_k$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ TrBr04 จากห่อมหินบ้านคลองโสน อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด



รูปที่ ข1-10 แผนภูมิแสดงลักษณะ (บน) age spectra (กลาง) Ca/K และ (ล่าง) Cl/K เทียบกับ cumulative $^{39}\text{Ar}_K$ released ของตัวอย่างหินบะซอลต์ TrBr07 จากห่อมหินบ้านคลองโสน อำเภอบ่อไร่ จังหวัดตราด

ภาคผนวก ข2

ตารางแสดงรายละเอียดค่าวิเคราะห์ต่าง ๆ ที่ได้ตามขั้นตอนการหาอายุ
ด้วยวิธี $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ไอโซโทป

ตารางที่ ข-1 แสดงรายละเอียดค่าผลวิเคราะห์และสัดส่วนระหว่างค่า Ar ไอโซโทปต่าง ๆ ที่วัดได้ ของตัวอย่างหินจากภาคเหนือ

T(°C)	Age (Ma)	+/-	Cum. ³⁹ Ar _k	Atmos.(%)	Ca/K	+/-	Cl/K	+/-	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
1. CrPm01													
(203.5 mg)													
			Plateau Age = 9.85+/-0.05 Ma				Integrated Age = 10.07+/-0.06 Ma				Isochron Age = 9.667+/-0.111 Ma		
750	10.04	1.07	0.019	99.218	5.7258	0.0058	0.0241	2E-04	0.1889	2.2130	0.0454	57.22	303.00
800	12.01	1.00	0.046	97.281	4.0330	0.0011	0.0100	1E-04	0.0647	1.6860	0.0238	20.50	316.80
850	11.51	0.34	0.099	92.773	3.0726	0.0013	0.0053	0.0000	0.0288	1.5340	0.0175	9.81	340.60
900	10.78	0.15	0.186	85.827	2.7948	0.0013	0.0039	0.0000	0.0133	1.6360	0.0146	5.12	386.30
950	10.10	0.09	0.325	74.512	2.9808	0.0011	0.0032	0.0000	0.0069	1.6340	0.0136	3.21	465.40
1000	9.85	0.09	0.497	60.19	2.9772	0.0008	0.0030	0.0000	0.0044	1.6180	0.0133	2.49	561.20
1050	9.89	0.07	0.682	48.309	2.9470	0.0009	0.0029	0.0000	0.0033	1.8020	0.0130	2.09	642.40
1100	9.62	0.10	0.854	40.058	3.2834	0.0012	0.0029	0.0000	0.0035	2.4270	0.0134	2.11	597.90
J-value = 0.004319107+/-0.0000005036			39Ar volume = .2682E-09 ccSTP/g			Reciprocal Y-intercept = 299.89+/-2.01							
Air-shot_ratio = 298.4286			40Ar* volume = .3458E-09 ccSTP/g			MSWD = 1.3335							

T(°C)	Age (Ma)	+/-	Cum. ³⁹ Ar	Atmos.(%)	Ca/K	+/-	Cl/K	+/-	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
3. TrBr04													
(202.9 mg)													
Plateau Age = 1.33+/-0.09 Ma													
600	1.42	0.26	0.073	97.166	2.4024	0.0013	0.0048	0.0000	0.0215	1.3190	0.0217	6.47	300.70
700	1.16	0.12	0.225	95.270	1.2583	0.0005	0.0046	0.0000	0.0103	0.6911	0.0207	3.18	307.70
800	1.54	0.15	0.356	92.371	1.1839	0.0005	0.0042	0.0000	0.0083	0.6502	0.0193	2.63	317.00
850	1.03	0.35	0.454	94.448	1.2840	0.0006	0.0040	0.0000	0.0078	0.7052	0.0183	2.40	309.30
900	1.42	0.21	0.526	92.231	1.6836	0.0010	0.0040	0.0000	0.0075	0.9245	0.0182	2.37	314.20
950	1.59	0.27	0.581	89.951	2.8471	0.0010	0.0040	0.0001	0.0066	1.5630	0.0183	2.06	313.00
1000	0.20	0.36	0.634	98.395	5.6039	0.0025	0.0039	0.0000	0.0060	3.0730	0.0176	1.61	266.10
1050	0.51	0.46	0.690	95.151	11.7658	0.0059	0.0038	0.0000	0.0060	6.4380	0.0173	1.38	230.10
1100	0.24	0.58	0.736	98.372	19.4073	0.0053	0.0039	0.0001	0.0091	10.5900	0.0175	1.94	214.20
1150	1.81	0.24	0.829	88.006	24.6674	0.0113	0.0039	0.0000	0.0091	13.4400	0.0177	1.95	213.00
1200	3.40	0.12	0.890	86.696	28.9253	0.0082	0.0042	0.0000	0.0135	15.7300	0.0187	3.28	242.00
1250	3.65	0.34	0.945	89.339	32.7821	0.0096	0.0042	0.0001	0.0177	17.8000	0.0189	4.38	247.50
1300	4.70	0.70	0.977	93.509	34.1923	0.0244	0.0050	0.0001	0.0338	18.5600	0.0223	9.23	272.60
1450	8.34	1.38	1.000	96.102	30.3780	0.0242	0.0070	0.0001	0.0928	16.5100	0.0317	27.27	293.80
J-value = 0.004319107+/-0.000005036													
39Ar volume = .1891E-09 ccSTP/g													
40Ar* volume = .4228E-10 ccSTP/g													
Air-shot_ratio = 297.4555													
Reciprocal Y-intercept = 294.82+/-0.26													
MSWD = 1.1845													

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) แสดงรายละเอียดค่าผลวิเคราะห์และสัดส่วนระหว่างค่า Ar ไอโซโทปต่างๆ ที่วัดได้ ของตัวอย่างหินจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

T(°C)	Age (Ma)	+/-	Cum. ³⁹ Ar	Atmos.(%)	Ca/K	+/-	C/K	+/-	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar
2. BrMu04													
(201.2 mg)													
Plateau Age = 0.43+/-0.02 Ma					Integrated Age = 0.34+/-0.02 Ma					Isochron Age = 0.449+/-0.053 Ma			
600	-11.90	8.03	0.001	*****	4.8124	0.0330	0.0141	0.0009	0.2839	2.6400	0.0640	82.19	289.50
700	-2.15	1.22	0.005	*****	3.6663	0.0045	0.0093	0.0002	0.1406	2.0120	0.0423	41.16	292.70
800	0.64	0.82	0.019		1.6734	0.0017	0.0044	0.0010	0.0404	0.9189	0.0202	11.98	296.50
850	0.37	0.07	0.194		96.947	0.0005	0.0030	0.0000	0.0053	0.5185	0.0134	1.59	302.60
900	0.42	0.02	0.410		94.937	0.0003	0.0029	0.0000	0.0035	0.5638	0.0132	1.09	306.70
950	0.45	0.05	0.581		93.141	0.0004	0.0029	0.0000	0.0028	0.5690	0.0131	0.86	311.00
1000	0.54	0.05	0.680		89.416	0.0004	0.0029	0.0000	0.0021	0.6017	0.0131	0.69	320.20
1050	0.41	0.04	0.804		89.925	0.0006	0.0029	0.0000	0.0018	0.8198	0.0131	0.55	306.30
1100	0.35	0.06	0.881		90.892	0.0018	0.0029	0.0000	0.0020	2.0880	0.0132	0.52	254.40
1150	-0.22	0.10	0.927	*****	8.1053	0.0034	0.0030	0.0000	0.0031	4.4410	0.0135	0.59	188.20
1200	-0.61	0.16	0.953	*****	10.5462	0.0040	0.0030	0.0000	0.0048	5.7730	0.0138	0.94	195.00
1250	0.59	0.13	0.972		94.275	0.0047	0.0033	0.0000	0.0061	7.6140	0.0148	1.34	218.80
1300	-0.26	0.32	0.990	*****	17.2603	0.0062	0.0033	0.0000	0.0086	9.4260	0.0150	1.82	212.30
1450	-1.05	0.51	1.000	*****	17.6471	0.0060	0.0044	0.0001	0.0321	9.6350	0.0198	8.66	269.60
J-value = 0.004319107+/-0.0000005036					39Ar volume = .6941E-09 ccSTP/g					Reciprocal Y-intercept = 294.36+/-2.89			
Air-shot_ratio = 298.477					40Ar* volume = .2898E-10 ccSTP/g					MSWD = 1.4287			

ภาคผนวก ค

หินแปลกปลอมอุ้มทับทิม : หลักฐานใหม่กับอีกหนึ่งความเป็นไปได้ของ การกำเนิดพลอยคอรันดัมของไทย

Ruby-bearing xenoliths: new evidence and another possibility of Thai-corundum genesis

Tawatchai Chualaowanich,^{a,*}

Visut Pisutha-Arnond^{b,c} and Chakkaphan Suthirat^{b,c}

^aDepartment of Mineral Resources, Rama VI Rd., Ratchathewi, Bangkok 10400

^b Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai, Bangkok 10330

^c Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT), Chulalongkorn University, Phayathai, Bangkok 10330

Extended Abstract

Based on several field evidences, the alkali basaltic rock exposed in the vicinity of Borai area in Trat province is proved to be a corundum-carrying type. The newly-found corundum(ruby)-bearing xenoliths enclosed within the basalt, classified as basanite with olivine and nepheline normative, are the most essential clue among them. This discovery yields a rare opportunity to investigate the conditions under which Thai ruby could have been formed underneath the earth crust.

Petrologically, the ruby-bearing xenoliths have compositions ranging between garnet clinopyroxenite and garnet-bearing pyroclastic (Figure 1A-1D). The xenoliths exhibit metamorphic textures of granoblastic, equigranular and polygonal with 120° triple junction grain boundaries (Figure 2A-B). They consist of green diopsidic clinopyroxene (25-95%), plagioclase (0-45%), kalyptitic garnet (0-20%), purplish pink to magenta corundum (5-50%), and spinel (0-2%). However, majority of the xenoliths observed normally comprise only 2 phases-clinopyroxene and ruby. Ruby is textural equilibrium with clinopyroxene and garnet and some grains are enclosed entirely within those minerals (Figure 2C-D). Ruby grains are barely observed to have direct contacts with plagioclase, except one specimen that found a large corundum grain mantling plagioclase. Chemically, clinopyroxene contains high portion of Ca-Tschermak and plagioclase has about An₉₀ content. Garnet grains are wholly converted to kalyptite, but still retain high Mg content suggesting pyrope origin. Spinel has high chrome content, 60-65%Cr₂O₃ by average. By compilation with previous related studies, the formation of these xenoliths is likely constrained to a high-pressure metamorphic process within the upper mantle-lower crust transitional zone (Kornprobst et al., 1990; Suthirat, 2001; Morishita and Arai, 2001; Promprated et al., 2003; Morishita et al., 2004) and ruby possibly crystallized by the reaction: **plagioclase + spinel = 2 corundum + diopside**, under an approximate P-T ranges of 1.5-1.8 GPa and 1,100-1,200 °C, at equivalent depth of around 50-60 km. beneath the surface and latterly was brought up by basaltic magma.

Significantly, this finding reveals parts of the long-been mystery of the true origin of Thai corundum particularly of red variety, widely known as Siamese ruby; although the figure of original parental rock type prior to transformation as well as the actual process cannot be obtained at this point. The ruby-bearing xenoliths themselves,

then, have ruled the once-favored idea proposed corundum directly crystallizing from the corundum-carrying basaltic magma (Barr and Macdonald, 1977; Vichit et al., 1978) out of a possible genesis model of the ruby from this area. They also put further constraints ensuring that the genesis of the ruby could actually be somewhat different from those of sapphire found elsewhere in Thailand, even that from Chantaburi in the same Eastern gem field as suggested by some authors (e.g. Pisutha-Armond et al., 1998; Sutthirat, 2001; Promprated et al, 2003).

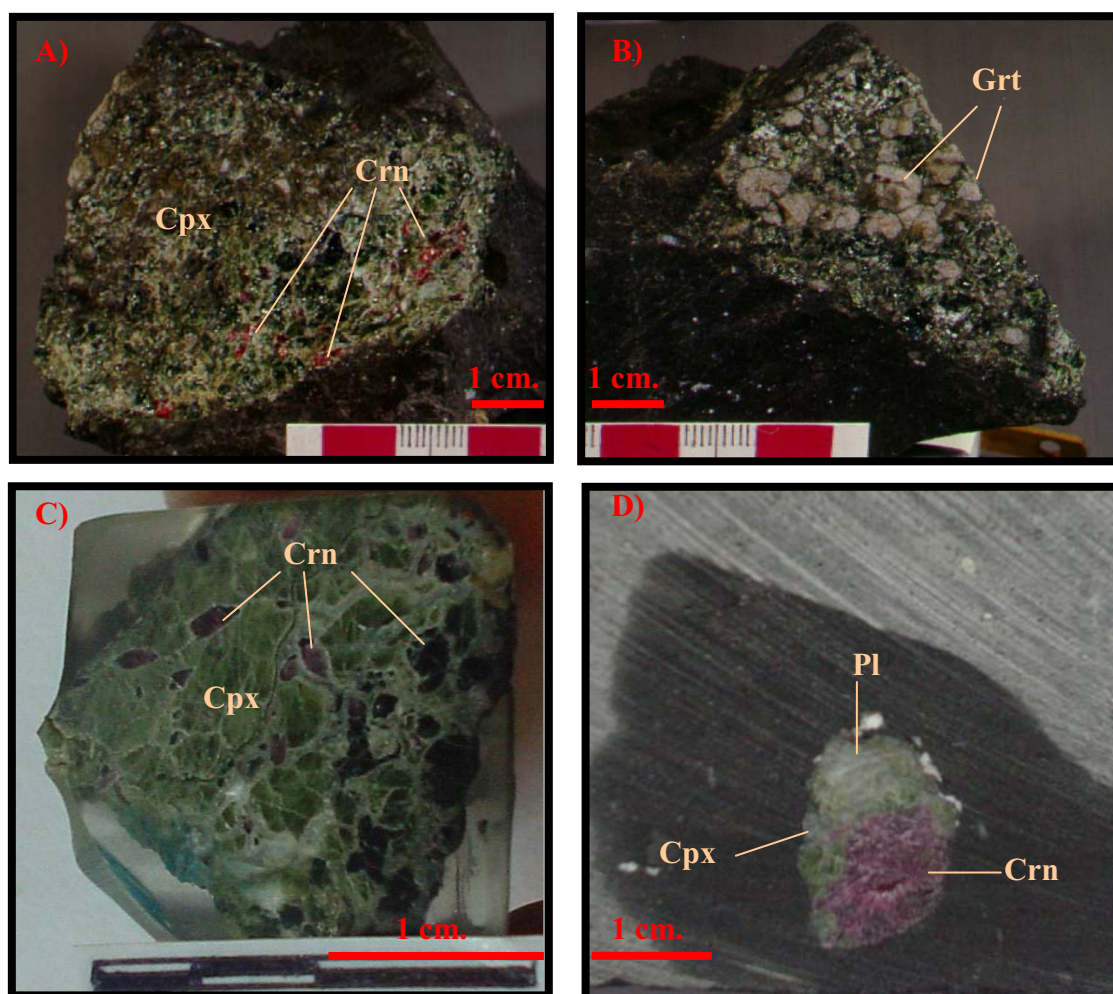


Fig. 1 Showing ruby-bearing xenoliths from Ban Muendan-Ban Klong Sano basaltic field. **A)** A garnet clinopyroxinite (the specimen belongs to Rak Hansawek) show a good reddish color of ruby grains scattering within green clinopyroxene matrix. **B)** The garnets (Grt) were entirely kalthitized. **C)** A clinopyroxinite specimen, the most commonly found, comprises only clinopyroxene (Cpx) and ruby (Crn). **D)** A pyroxenite specimen, containing large portions of both ruby (Crn) and plagioclase (Pl), is enclosed in fresh basalt.

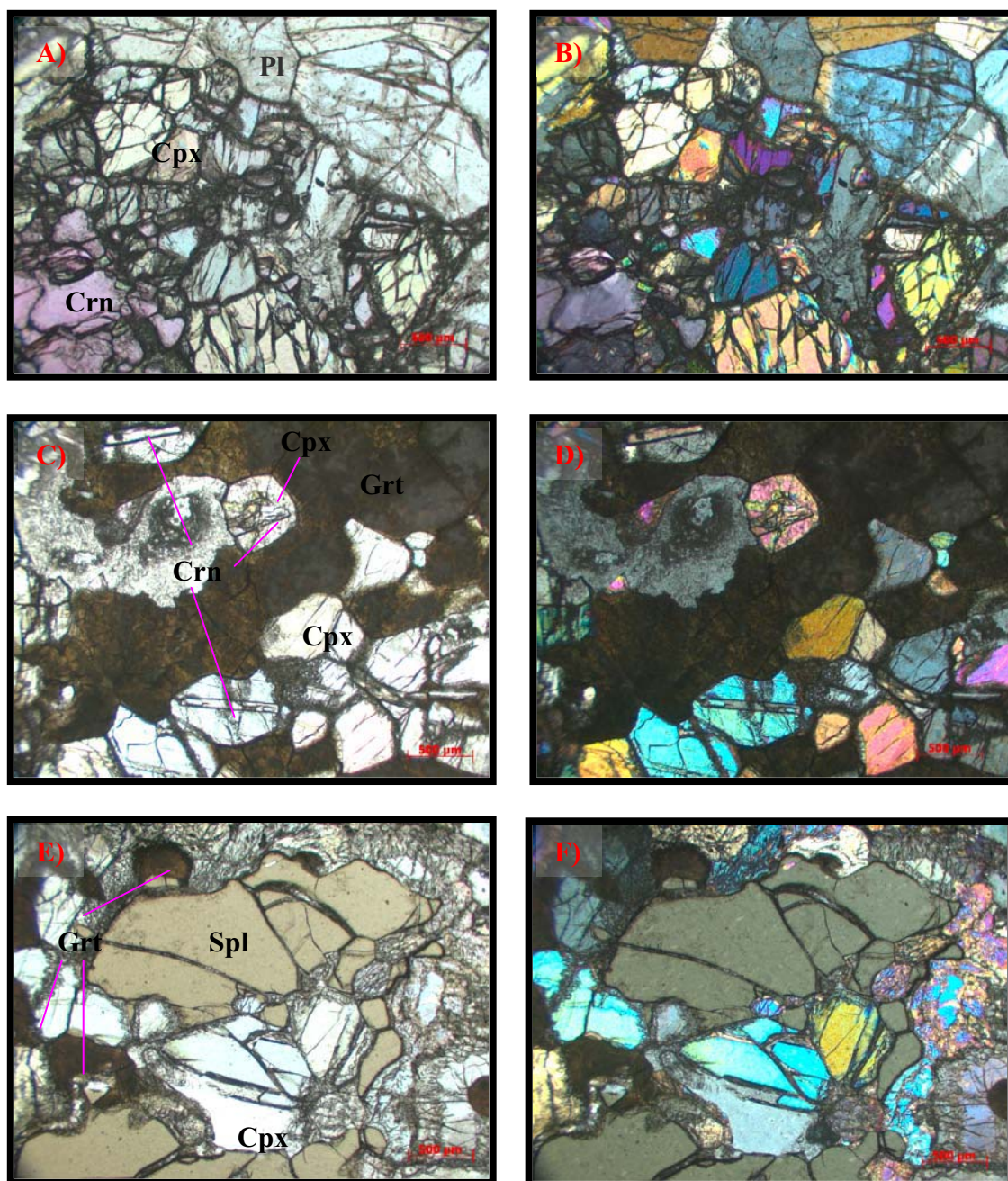


Fig. 2 Photomicrographs show rock textures of ruby-bearing xenoliths under PPL (left) and XPL (right). The scale bars are 500 microns. **A-B)** The rock contains ruby (Crn), clinopyroxene (Cpx), and plagioclase (Pl) exhibiting polygonal texture. **C-D)** The rock, comprising kalyptitic garnet (Grt), clinopyroxene (Cpx) and ruby (Crn), display prismatic laths of corundum enclosed within Cpx grains and some those in turn wrapping Cpx inside. All garnet grains are converted into kalyptites. **E-F)** The rock is composed of greenish brown spinel (Spl), clinopyroxene (Cpx) and kalyptitic garnet (Grt). Some clinopyroxenes have reaction rinds around the grains.

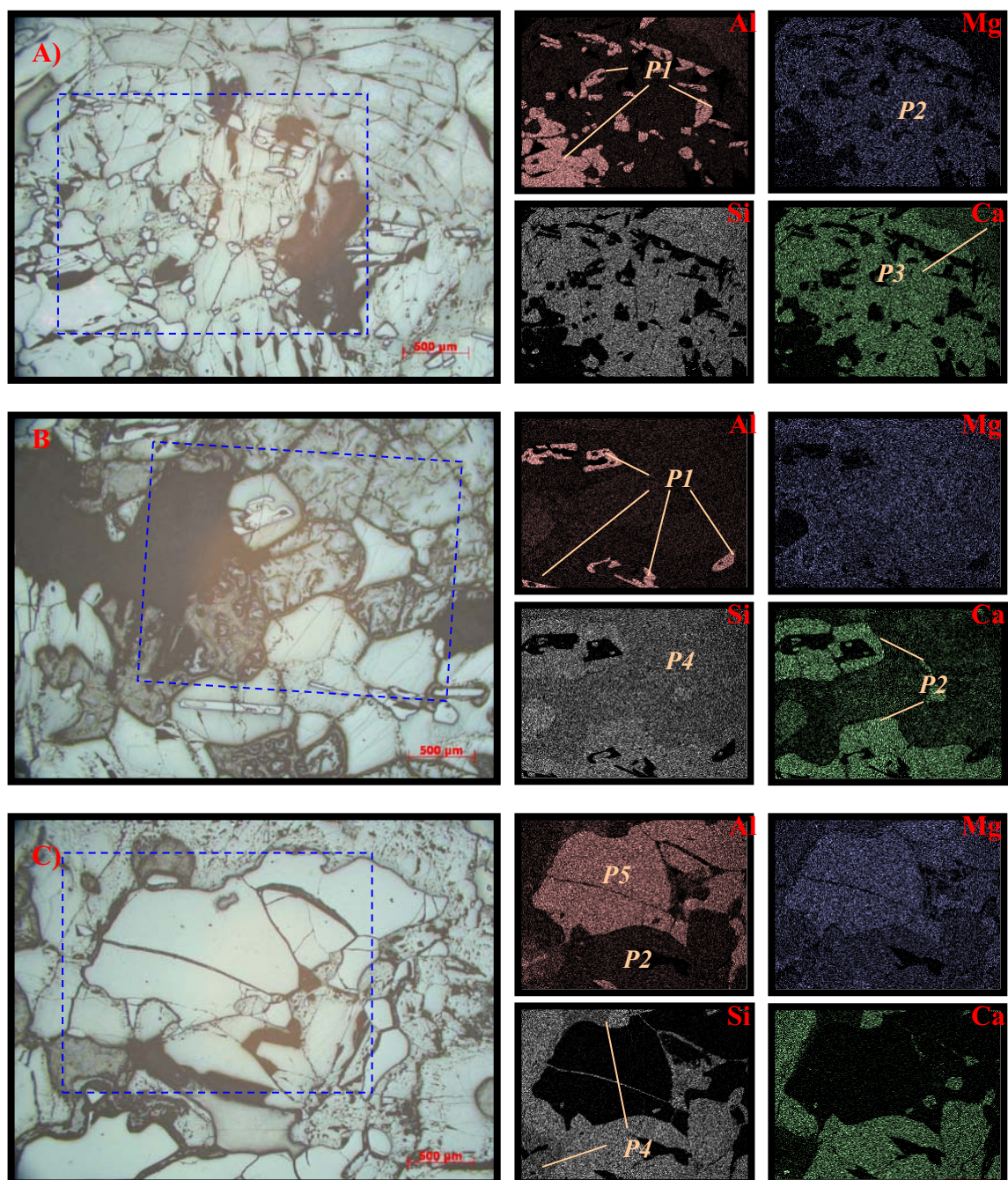


Fig. 3 Photomicrographs taken under reflected light (left) are compared to a suite of SEM images (right) of 4 selected elements; i.e. alumina (Al), magnesium (Mg). Blue dashed frames represent the scanned areas. **A)** 3 phases; corundum (*P1*), clinopyroxene (*P2*) and plagioclase (*P3*), can be identified. Corundum is outstanding by its high Al, but nil in other contents. Plagioclase can be differentiated from clinopyroxene by lower contents of Al, Mg, and Ca. **B)** Kalyptitic garnet phase (*P4*) is distinguished by lower Si and Ca, but slight higher in Al and Mg compared to clinopyroxene. The SEM images, particularly of Ca, display closed textural relationship between corundum and clinopyroxene; of which the clinopyroxene is both mantling and enveloping corundum. **C)** Spinel (*P5*) can be noticed by its pronouncingly high Al and Mg content, but low in others.

Acknowledgements

The authors are grateful to Rak Hansawek for informing about the finding of ruby-bearing xenoliths and Boonmee Maneerat and his family for letting us collect specimens in their property, conveniently. We would like to extend our thanks to Charoemwong Ingkasumphon and Phissanu Yingyud for preparing polished thin sections and Panjai Saraphanchotwithaya for field assistances. We are also indebted to Geology Department of Chulalongkorn University for the support on microprobe analyses. This research was financially supported by the Department of Mineral Resources under the fiscal budget of 2004 and 2005 and in part funded by Thailand Research Fund (TRF)-TRG4680004.

Reference

- Barr, S.M. and Macdonald, A.S., 1977, Geochemistry and Petrogenesis of Late Cenozoic Alkaline Basalts of Thailand: Preprint-manuscript submitted to Bulletin of Geol. Soc. Malaysia., in April, 1977.
- Coenraads, R.R., Vichit, P., and Sutherland, F.L., 1995, An unusual sapphire-zircon-magnetite xenoliths from the Chanthaburi Gem Province, Thailand. *Min. Mag.* 59, 465-479.
- Kornprobst, J., Piboule, M., Roden, M., and Tabit, A., 1990, Corundum-bearing garnet clinopyroxenites at Beni Bousera (Morocco): Original plagioclase-rich gabbros recrystallized at depth within mantle. *Jour. Petrol.* 31, 717-745.
- Morishita, T. & Arai, S., 2001, Petrogenesis of corundum-bearing mafic rock in the Horoman Peridotite Complex, Japan. *Jour. Petrol.* 42, 1279-1299.
- Morishita, T., Arai, S., and Green, D. H., 2004, Possible Non-melted Remnants of Subducted Lithosphere: Experimental and Geochemical Evidence from Corundum-Bearing Mafic Rocks in the Horoman Peridotite complex, Japan. *Jour. Petrol.* 45, 235-252.
- Pisutha-Arnord, V., Wathanakul, P., Intasopa, S., and Griffin, W.L., 1998, Corsilzirspite, a corundum-silimanite-zircon-hercynite rock: New evidence on the origin of Kanchanaburi sappire, Thailand: Proceedings of the 9th Regional Congress on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia (GEOSEA 98), Kuala Lumpur, Malaysia, 117(abstrat).
- Promprated, P., Taylor, L.A., and Neal, C.R., 2003, Petrochemistry of Mafic Granulite Xenoliths from the Chantaburi Basaltic Field: Implications for the Nature of the Lower Crust beneath Thailand. *Inter. Geol. Rev.* 45, 383-406.
- 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. *Mineral. Mag.* 65(2), 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.
- 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, Dept. Min. Res., Bangkok, Thailand, 126-134.
- Vichit, P., Vudhichativanich, S., and Hansawek, R., 1978, The distribution and some Characteristics of corundum bearing basalts in Thailand. *Jour. Geol. Soc. Thailand* 3, M4-1-M4-38.

หินแปลกปลอมอุมทับทิม : หลักฐานใหม่ กับอีกหนึ่งความเป็นไปได้ของการกำเนิดพลอยคอรัันดัมของไทย

ธวัชชัย เชื้อเหล้าวานิช¹, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์^{2,3} และวิสุทธิ์ พิสุทธิอนันท์^{2,3}

1. ส่วนทรัพยากรแร่ 3 สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี

ถ.พระราม 6 เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400,

2. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ. พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

3. สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ. พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

หินแปลกปลอมอุมทับทิมที่พบฝังในเนื้อหินบะซอลต์สด เป็นหลักฐานบ่งชี้ชัดเจนว่า หินบะซอลต์ที่โผล่ปรากฏในบริเวณบ้านคลองโสน-หมื่นดำน ต.บ่อพลอย อ.บ่อไร่ จ.ตราด เป็นชนิดที่ให้พลอย แต่ไม่ได้เป็นหินต้นกำเนิดที่แท้จริงของพลอย จากการศึกษาทางศิลาวรรณและศิลาเคมีพบว่าหินแปลกปลอมอุมทับทิมนี้ จัดเป็นหินแปรเกรดสูงในตระกูลหินแกรนูลอิต ที่มีองค์ประกอบทางแร่คาบเกี่ยวระหว่างหินไพโรกซีนิต และหินไพโรคลาไซต์ ซึ่งแร่ออร์นิตัม(ทับทิม)ในเนื้อหินแสดงสภาวะสมดุลทางแร่กับแร่ไดออปไซด์ และการเนท(โกเมน) โดยมีแพลจิโอเคลสและสปิเนล(นิลตะโก) เกิดร่วม ในเบื้องต้นสรุปได้ว่าทับทิมน่าจะก่อตัวขึ้นจากปฏิกิริยา:

แพลจิโอเคลส(Plagioclase) + สปิเนล(Spinel) = 2 ทับทิม(Corundum) + ไดออปไซด์(Diopside)

ภายใต้ช่วงความดัน 15-18 Kb และช่วงอุณหภูมิ ~1,100-1,200 °C ที่ระดับความลึกประมาณ 50-60 กม. ในบริเวณเขตรอยต่อของชั้นเนื้อโลกส่วนบนกับชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง และภายหลังได้ถูกนำขึ้นมาสู่ผิวโลกโดยการปะทุของหินหนืด(แมกมา)บะซอลต์ที่เป็นผลจากการหลอมละลายบางส่วนของหินเนื้อโลกที่ระดับลึกกว่า ผลของการศึกษาในครั้งนี้ได้ช่วยให้ความเข้าใจในกระบวนการกำเนิดของทับทิมสยามกระจ่างชัดขึ้นในบางแง่มุมและทำให้ได้ข้อยืนยันสนับสนุนแนวความคิดที่ว่าทับทิมไทยมีกระบวนการก่อกำเนิดแตกต่างไปจากของพลอยแซปไฟร์ที่พบในบริเวณจังหวัดจันทบุรี หรือบริเวณอื่นๆของประเทศ ถึงกระนั้นรายละเอียดของรูปแบบกระบวนการแปรสภาพเป็นหินแกรนูลอิตให้พลอยรวมถึงชนิดและที่มาของหินต้นกำเนิดดั้งเดิมที่ได้นั้นยังไม่ชัดเจนต้องอาศัยผลการศึกษาเชิงลึกต่อไป

คำสำคัญ: หินแปลกปลอมอุมพลอย ทับทิม แซปไฟร์ การกำเนิด ตราด

บทนำ

ประเทศไทย มีประวัติการทำเหมืองพลอยตระกูลคอรัันดัมที่สืบเนื่องยาวนานเป็นร้อยปี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “พลอยแดง” จากภาคตะวันออก ซึ่งเป็นที่รู้จักดีในตลาดพลอยโลกภายใต้ชื่อ “ทับทิมสยาม (Siamese Ruby)” แต่ทว่าความเข้าใจในกระบวนการและธรณีวิทยาการก่อกำเนิดที่แท้จริงของพลอยไทยชนิดนี้ กลับยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร และแม้ว่าได้มีการนำเสนอแนวคิดของกระบวนการกำเนิด

พลอยตระกูลคอรัันดัมของไทยไว้หลายรูปแบบแล้วก็ตาม กระนั้นงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาในพื้นที่ที่ให้พลอยคอรัันดัมชนิดแซปไฟร์ จึงยังคงมีบางแง่มุมที่ยังขาดความกระจ่างชัด และยังมีการวิพากษ์ในแวดวงวิชาการกันอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการการกำเนิดของทับทิมไทยว่ามีความเหมือนหรือต่างจากของแซปไฟร์หรือไม่ อย่างไร

ในบทความนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกเป็นการนำเสนอรูปแบบแนวคิดต่างๆของ

การกำเนิดของพลอยคอร์ันดัมที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์ ที่เป็นผลจากกรณีศึกษาวิจัยของแหล่งพลอยบริเวณต่างๆที่เคยมีการตีพิมพ์เผยแพร่(เท่าที่พอจะรวบรวมได้)ไว้โดยสังเขป และในส่วนหลังเป็นการนำเสนอผลการศึกษาค้นคว้าที่แปลกปลอมอุ้มทับทิมในเบื้องต้นซึ่งเป็นผลที่ได้ส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาวิจัยการกำเนิดของทับทิมสยามที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์:จากแหล่งพลอยบริเวณภาคตะวันออกของประเทศไทย ผู้เขียนหวังว่า(อย่างน้อย)สิ่งที่ได้นำเสนอนี้จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการและธรรมชาติการก่อกำเนิดที่แท้จริงของพลอยคอร์ันดัมของไทย โดยเฉพาะ “พลอยแดง” นี้ได้ชัดเจนขึ้น อันอาจจะใช้เป็นปัจจัยเสริมที่ช่วยให้การสำรวจหาแหล่งพลอยใหม่ๆ มีโอกาสและขีดความสามารถในการค้นพบสูงขึ้น

แนวคิดการกำเนิดของพลอยดวรัตน์

ในช่วงเริ่มแรกนักวิจัยนิยมแนวคิดที่ว่าพลอยตระกูลคอร์ันดัม(ทั้งทับทิมและแซปไฟร์)ที่พบสะสมตัวในบริเวณพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยหินภูเขาไฟ ชนิดหินบะซอลต์(ซึ่งรวมถึงแหล่งพลอยคอร์ันดัมทุกแหล่งของไทย)นั้นน่าจะก่อกำเนิดขึ้นจากการตกผลึกโดยตรงจากแมกมาบะซอลต์ประเภทอัลคาไล ที่ปะทุขึ้นมาและแข็งตัวเป็นหินบะซอลต์นำพลอยในบริเวณดังกล่าว โดยอาศัยข้อสมมติฐานจากการพบผลึกแซปไฟร์ฝังในเนื้อหินบะซอลต์ อาทิ Barr and MacDonald (1978) MacNevin (1972) Vichit (1975) และ Vichit and others (1978) ซึ่งผู้เขียนภายหลังได้ให้รายละเอียดเพิ่มเติมในกรณีของพลอยคอร์ันดัมของไทยว่าการตกผลึกของพลอยอาจเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณ Al_2O_3 สืบเนื่องจากกระบวนการผลึกลำดับส่วน (fractionation) ที่เกิดขึ้นภายในกระเปาะแมกมาบะซอลต์หลังจากที่แมกมาซึ่งเกิดจากการหลอมละลายบางส่วน (partial melting) ของเนื้อโลก(mantle)ที่ช่วงความลึกประมาณ 65-95 กม. (20-30 Kb) ได้เคลื่อนขึ้นมาพักตัวที่ระดับความลึกประมาณ 25-35 กม. ? (7-10 Kb) เป็นระยะเวลาหนึ่ง(แต่นานพอที่พลอยจะตกผลึก) และอาจมีการปนเปื้อนจากหินรอบข้างเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ก่อนที่จะปะทุและนำพลอยขึ้นมาสู่ผิวโลก

ต่อมาแนวคิดของการกำเนิดพลอยคอร์ันดัมได้ปรับเปลี่ยนและมีหลากหลายรูปแบบมากขึ้น โดยนิยมกรอบ

แนวคิดหลักที่ว่าแมกมาบะซอลต์เนื้ออัลคาไลที่ให้พลอย (corundum-bearing alkali basaltic magma) นั้นเป็นแต่เพียงตัวกลางนำพลอยขึ้นมาสู่ผิวโลก ซึ่งอาจจำแนกกรอบแนวคิดใหญ่นี้ ได้เป็นสองกลุ่มคร่าวๆ กลุ่มแรกมีความเกี่ยวข้องกับการตกผลึกของคอร์ันดัมที่เชื่อมโยงกับหินอัคนีบาดาล(plutonic crystallization) อาทิ Irving (1986 ใน Sutherland and others, 1998) กล่าวว่าพลอยเกิดจากอนุพันธ์หินหลอมละลายเฟลสิกที่ไม่อิ่มตัว(undersaturated fractionated felsic melts) เช่น หิน phonolite ที่ระดับความกดดันสูง หรือจากหินหลอมละลายชนิดไซไนต์(syenitic melts) ที่มีแหล่งต้นกำเนิดมาจากหินที่อยู่ในช่วงเปลือกโลก(crustal)ถึงเนื้อโลกส่วนบน(upper mantle) ที่เสนอโดย Aspen (1990 ใน Sutherland and others, 1998) และ Gameir and others (2005) ส่วน Coenraads and others (1990) และ Oakes and others (1996 ใน Sutherland and others, 1998) เสนอว่า พลอยตกผลึกจากหินหลอมละลายที่เกิดจากกระบวนการหลอมเหลวบางส่วนในระดับต่ำของเนื้อโลก(low degrees of partial melting of mantle) ชนิดอัลคาไลน์ที่มีสารไอระเหยสูง(volatile-rich alkaline melts) แต่ Sutherland (1996) ให้ความเห็นว่า หินหลอมละลายชนิดอัลคาไลน์ที่เป็นต้นกำเนิดของพลอยนั้นน่าจะได้อามาจากการหลอมเหลวของหินที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพแบบแลกเปลี่ยนไอสาร (metasomatized rocks) ที่เกิดขึ้นภายในธรณีภาคชั้นนอก (lithosphere) ส่วน Guo et al., (1996a) นำเสนอรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับการผสมรวมของหินหลอมละลายคาร์บอนเนไทต์(carbonetitic melts)เข้ากับ silicic magmas ที่ระดับความลึกประมาณช่วงกลางของชั้นเปลือกโลก แล้วตกผลึกให้พลอยขึ้นมา ขณะที่ Sutherland and others (1998) ได้เสนอเพิ่มเติมว่าพลอยชนิดแซปไฟร์น่าจะก่อกำเนิดจากหินในส่วนธรณีภาคชั้นนอกที่มีแร่แอมฟิโบล(amphibole-bearing)เป็นองค์ประกอบที่หลอมละลายเนื่องจากเกิด magmatic plume สำหรับแนวคิดกลุ่มที่สองมีการแปรสภาพ(metamorphism) ระดับลึก เป็นปัจจัยเกี่ยวข้องสำคัญ อาทิ Levinson and Cook (1994) และ Barron and others (1996) เสนอว่าพลอยก่อตัวขึ้นด้วยกระบวนการตกผลึกใหม่ที่เป็นผล

จากแปรสภาพ(metamorphic recrystallization) ของชนิดหินเนื้ออะลูมินา(aluminous rocks)ที่ถูกพาลงอยู่ใต้แผ่นเปลือกทวีป (continental lithosphere) โดยการมุดตัว(subduction) ของแผ่นเปลือกโลก Sutherland and Coenraads (1996) ได้นำเสนอว่า การตกผลึกใหม่อันเนื่องมาจากการแปรสภาพ/แปรเปลี่ยนโดยการแลกเปลี่ยนไอสารของชนิดหินที่มีอะลูมินาสูงด้วยกระบวนการแปรสัมผัสด้วยความร้อน (contact thermal processes) เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการกำเนิดพลอย เช่นเดียวกับ Pisutha-Armond and others (1999) ที่เสนอว่า การกำเนิดของแซปไฟร์ไทยจากแหล่งพลอยกาญจนบุรีมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรสภาพแบบสัมผัส/การแปรสภาพแบบแลกเปลี่ยนไอสาร และการปนเปื้อนของหินหลอมละลายแกบโบร(contamination of gabbroic melt) ต่อมา Sutthirat and others (2001) และ Sutthirat (2001) ได้ศึกษาแร่ดอกแปกปลอมไพรอกซีน(pyroxene megacryst)ที่มีผลึกคอร์ันดัมเป็นแร่ลทินที่พบในบริเวณบ้านหนองบอน อ.บ่อไร่ จ.ตราด และเสนอแนวคิดที่ว่าทับทิมและแซปไฟร์ในบริเวณจังหวัดตราดและจันทบุรี มีต้นกำเนิดที่แตกต่างกัน โดยทับทิมน่าจะก่อตัวโดยตกผลึกอยู่ภายในหินเมฟิกแกรนูลิต์ที่มีอะลูมินาสูง (Al-rich mafic granulite) ที่ช่วงความลึก 45-65 กม. ซึ่งอาจอยู่ในชั้นเนื้อโลกส่วนบน(upper mantle) หรือในบริเวณช่วงต่อระหว่างเนื้อโลกส่วนบนกับชั้นเปลือกโลกที่มีความหนา(thick crust) แต่การก่อตัวของแซปไฟร์น่าจะเกิดขึ้นภายในชั้นเปลือกโลกที่ระดับความลึกที่ตื้นกว่าของทับทิม ขณะที่ Promprated and others (2003) สรุปว่าผลึกแร่ลทินคอร์ันดัมขนาดเล็กที่พบในหินแปกปลอมแกรนูลิต์จากแหล่งพลอยบริเวณบ้านบ่อเวฬุ-บ้านนาง อ.ขลุง จันทบุรี นั้นเป็นผลจาก incongruent melting ของแพลจิโอเคลสที่ระดับความลึกประมาณ 50-60 กม. ก่อนที่กระบวนการกลายสภาพของหินต้นแบบ(protolith) ไปเป็นหินการ์เนตแกรนูลิต์(garnet granulite)จะเสร็จสมบูรณ์

ธรณีวิทยาทั่วไป หินบะซอลต์ และหินแปกปลอมทับทิม

พื้นที่ที่พบหินแปกปลอมอุ้มทับทิมนี้ ตั้งอยู่ในเขตคาบเกี่ยวระหว่างบ้านหมื่นด่านและบ้านคลองโสน ต.บ่อพลอย อ.บ่อไร่ จ.ตราด พบฝังอยู่ในเนื้อหินอัคนีภูเขาไฟชนิดบะซอลต์

ที่โผล่ปรากฏเป็นหย่อมเล็กๆ ครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 2 ตร.กม. มีสภาพทางธรณีวิทยาทั่วไปโดยรอบประกอบด้วยหินฐานที่เป็นหินตะกอนยุคไทรแอสสิก(Triassic) หวดหินโป่งน้ำร้อน ชั้นตะกอนยุคใหม่(Cenozoic)ที่ยังไม่แข็งตัว และหินโอลีวินบะซอลต์อายุอ่อน (วีระพงศ์ ต้นสุวรรณ และเด่นโชค มั่นใจ, 2542 และพล เชาวดำรงค์, 2535) ซึ่งเกิดจากการหลอมละลายเนื่องจากการคลายแรงกดดันของเปลือกโลก(decompressional melting) ที่อาจสัมพันธ์กับการแตกของแผ่นเปลือกโลกที่เกิดจากการยืดตัว(extensional rifting)ในช่วงปลายของยุคใหม่(late Cenozoic) (Bar and Macdonald, 1978 และ Bunopas and Vella, 1992 ใน Promprated and others, 2003; Mukasa and others, 1996) แล้วปะทุเป็นลาวาไหลบ่าปกคลุมพื้นผิวตามสภาพความสูงต่ำของภูมิประเทศดั้งเดิม (paleo-topography) โดยบางส่วนไหลปิดทับอยู่บนหวดหินโป่งน้ำร้อน และบนชั้นตะกอนยุคใหม่ที่เป็นตะพักลำน้ำเก่า(old terrace) ซึ่งสะสมตัวอยู่บนหินฐานอีกทอดหนึ่ง (รูปที่ 1ก) จากผลการสำรวจภาคสนาม(โดยผู้เขียนคนแรก) พบว่าชั้นกรวดใต้ชั้นบะซอลต์นี้มีทับทิมสะสมตัวอยู่ โดยมีแมกนีไทต์(นิลิตเดเหล็ก)และเซอร์คอน(เพทาย) เป็นเพื่อนแร่ (รูปที่ 1ข) และพบ(ไร)ทองคำสะสมตัวร่วมด้วย

ลักษณะทางเคมีของหินบะซอลต์บริเวณนี้จัดเป็นหินภูเขาไฟเนื้ออัลคาไล(alkali volcanic rock) ชนิดบาซาไนต์ ที่แสดงค่า olivine และ nepheline normative ที่มีเนื้อพื้นขนาดละเอียดมาก(aphanitic groundmass) โดยผลึกแร่ดอก(phenocrysts)ขนาดเล็ก (<2 มม.)ของโอลีวิน จำนวนน้อย (น้อยกว่าร้อยละห้าโดยพื้นที่) ฝังประห่างๆ แต่มีหินแปกปลอม(xenoliths)และดอกแร่แปกปลอม(xenocrysts/megacrysts) ขนาดต่างๆกัน ฝังประทั่วไปในเนื้อคล้ายกับผิวเป็นปาน หินแปกปลอมส่วนใหญ่เป็นหินอัคนีบาดาลระดับลึกในกลุ่ม ultramafic ถึง mafic หินแปกปลอมมีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 2 ซม. ถึงกว่า 25 ซม. และมีรูปร่างมน ซึ่งมักพบแถบปฏิกิริยาเคมี(reaction band)เกิดโดยรอบก้อนแร่แปกปลอมไพรอกซีนและรอบหินแปกปลอม

ส่วนหินแปกปลอมอุ้มทับทิม จัดเป็นหินในตระกูลหินแกรนูลิต์ เนื้อปานกลางถึงหยาบ มีสีเขียวสด

ถึงเขียวตุ่น(pastal green)ของแร่ไพรอกซีน ฝังปะด้วยเม็ดแร่คอร์ันดัมสีแดงเจือม่วงถึงชมพูม่วง(purplish magenta) มีขนาดเฉลี่ย 1-3 มม. และใหญ่สุดประมาณ 1 ซม. หินอุ้มพลอยบางก้อนมีแร่การ์เนทที่ถูกเปลี่ยนสภาพเป็นแร่ทุดิตูมิและ/หรือแร่แพลจิโอเคลสเกิดร่วมด้วย (รูปที่ 2ก-ง) ซึ่งก้อนหินแปลกปลอมลักษณะนี้ยังไม่เคยมีรายงานว่าพบในพื้นที่ใดของประเทศมาก่อน

ศิลาวรรณา/ศิลาดม และ การกำเนิดของหินแปลกปลอมอุ้มทับทิม

ในเชิงศิลาวรรณา (รูปที่ 3) หินแปลกปลอมอุ้มทับทิม(ruby-bearing xenolith) ส่วนใหญ่แสดงลักษณะเนื้อหินขนาดเตี๋ยว(equigranular) แบบเนื้อผลึกหลายเหลี่ยม (polygonal) ซึ่งเนื้อหินบางส่วนแสดง 120° junction grain boundaries ที่มีขนาดเม็ดแร่ประมาณ 1.5-3 มม. แต่บางส่วนแสดงลักษณะ granoblastic ให้เห็น เนื้อหินประกอบด้วยแร่โคลโนไพรอกซีน ชนิดไดออปไซด์ (25-95%), แพลจิโอเคลส (0-45%) คาลิฟติก (kalyphitic) การ์เนท (0-20%) คอร์ันดัม(ทับทิม) (5-50%) และสปิเนล(นิลตะโก) (0-2%) ซึ่งเมื่อจำแนกตามสัดส่วนองค์ประกอบทางแร่ หินอุ้มพลอยจะมีชื่อเรียกย่อยได้ 4 ชนิด คือ หินไพรอกซีนไนต์(pyroxenite) หินการ์เนทไพรอกซีนไนต์(garnet pyroxenite) หินแพลจิโอเคลส-แบร์ริงการ์เนทไพรอกซีนไนต์(plagioclase-bearing garnet pyroxenite) และหินไพริคลาไซต์(pyriclasite: เป็นหินที่มีแร่องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแพลจิโอเคลสและไพรอกซีน โดยมีสัดส่วนของแร่ไพรอกซีนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 15, อาศัยคำนิยามจาก Sutthirath, 2001) แต่ทว่าก้อนหินอุ้มทับทิมที่พบเห็นส่วนใหญ่ มักประกอบด้วยเพียง 2 ตัวคือไดออปไซด์และทับทิมเท่านั้น ดังนั้นเมื่อมองโดยรวมแล้วชื่อหิน “แพลจิโอเคลส-แบร์ริง การ์เนท ไพโรกซีนไนต์” น่าจะเป็นชื่อที่เหมาะสมที่สุด

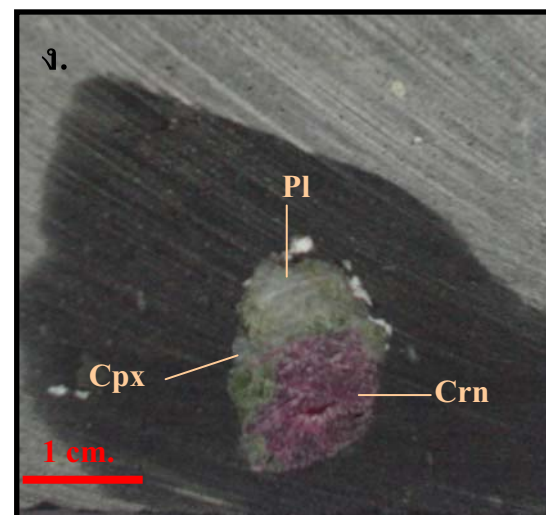
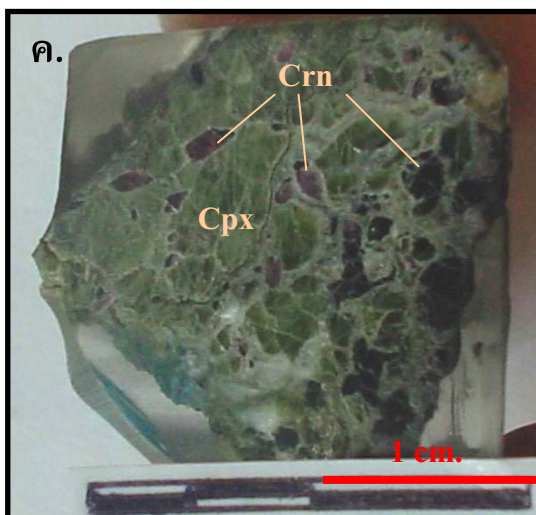
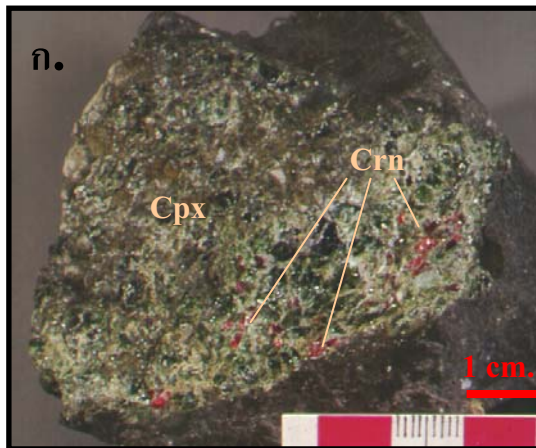
ผลึกแร่พลอยมักโอบล้อมด้วยแร่ไดออปไซด์ (รูปที่ 3ก-ง และ 4ก-ง) โดยเม็ดแร่คอร์ันดัม(ทับทิม) ที่มีขนาดเล็กมักเกิดเป็นแท่งผลึกสมบุรณ์(euhedral prismatic) ที่แสดงการเรียงตัวของเม็ดแร่เป็นแนว (รูปที่ 3ค, 3ฉ และ 4ก-ง) บางครั้งพบเป็นแท่งผลึกอยู่ภายในผลึกของไดออปไซด์หรือในคาลิฟติก การ์เนท (รูปที่ 3ค, 3ฉ และ 4ค-ง) บางครั้งพบว่าไดออปไซด์เกิดเป็นแกนของผลึกคอร์ันดัม

ด้วยเช่นกัน (รูปที่ 4ค-ง) และแร่ไดออปไซด์บางส่วนได้รับผลกระทบจากปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอสาร (metasomatism) ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของขอบปฏิกิริยา 2 ชั้น(rind texture; รูปที่ 3จ และ 4จ) และจากการวิเคราะห์ด้วย SEM(Scanning Electron Microscope) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแร่โคลโนไพรอกซีนที่สัมพันธ์กับพลอยมีสัดส่วน Ca-Tsechermax ในโครงสร้างแร่ว่ามีสูงกว่า Mg-Tsechermax โดยเปรียบเทียบ(รูปที่ 4ง) สำหรับแร่แพลจิโอเคลสมักพบอยู่ร่วมกับไดออปไซด์ สปิเนลและการ์เนท แต่จะไม่น่าจะมีผิวสัมผัสโดยตรงกับแร่พลอย (รูปที่ 3ง และ 4ก-ข) และมีค่า An90 แร่การ์เนทในเนื้อหินนั้นได้ถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นแร่ทุดิตูมิในรูปของ kalyphite แต่ยังคงรักษาโครงสร้างผลึกเดิมของการ์เนทไว้ (รูปที่ 3ข, 3จ-ฉ และ 4ค-ง) และจากภาพผลการวิเคราะห์ด้วย SEM (รูปที่ 4ง) ที่มีค่า Mg สูง ซึ่งแนะว่าแร่การ์เนทเดิมน่าจะมี pyropic composition ส่วนแร่สปิเนลที่พบมี 2 ชนิด คือ แมกนีเซียมสปิเนล(สีน้ำตาลแดง; รูปที่ 3ก) และโครมสปิเนล(สีน้ำตาลแกมเหลือง/แกมเขียว; รูปที่ 3จ และ 4จ-ฉ) ซึ่งมีค่า Cr₂O₃ เฉลี่ยอยู่ในช่วง 60-65%

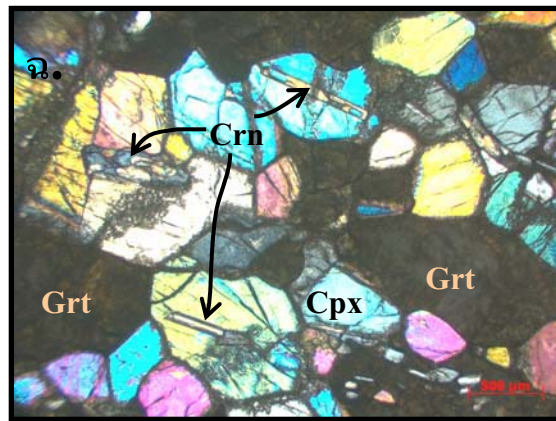
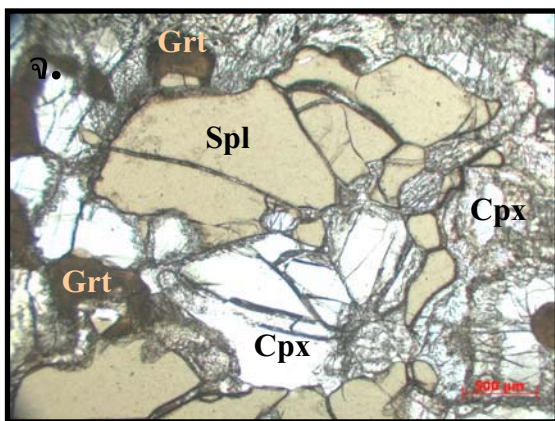
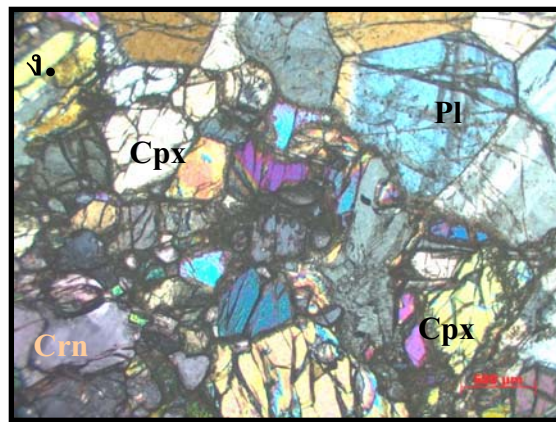
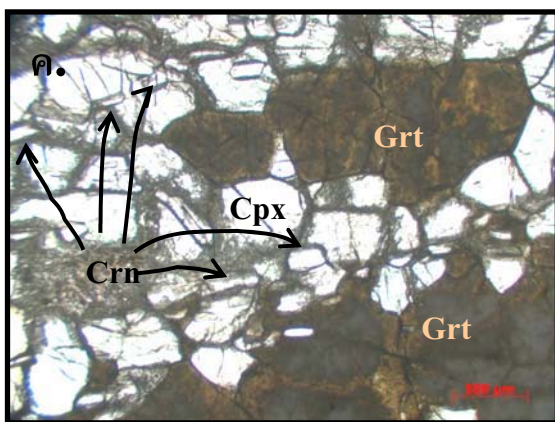
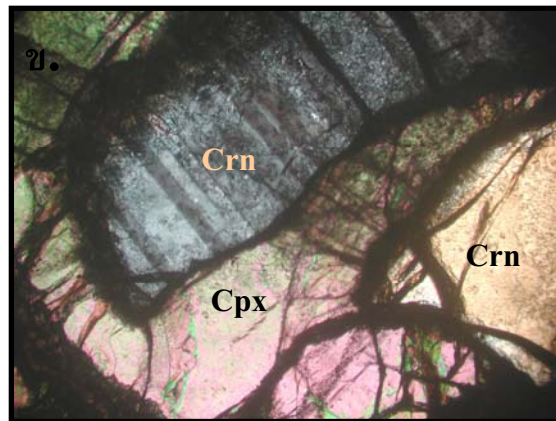
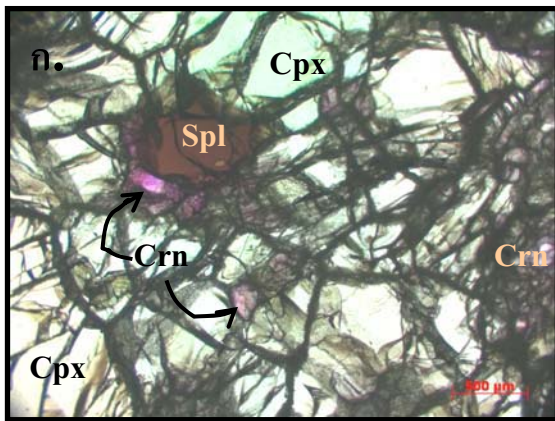
จากลักษณะเนื้อหินข้างต้นเป็นข้อบ่งชี้ว่าหินแปลกปลอมอุ้มพลอยนี้ได้ก่อตัวและมีการปรับสมดุลภาวะภายใต้อิทธิพลของกระบวนการแปรสภาพ นอกจากนี้ความสัมพันธ์เชิงแร่ที่ได้จากการศึกษาศิลาวรรณาและศิลาดม บ่งชี้ว่าแร่พลอย ไดออปไซด์ และ (คาลิฟติก)การ์เนท มีสมดุลภาวะทางแร่ระหว่างกัน ขณะที่แร่แพลจิโอเคลสมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับสปิเนล ไดออปไซด์ และการ์เนท และเมื่อนำข้อเท็จจริงที่ได้มาวิเคราะห์เทียบเคียงกับผลงานวิจัยอื่น พบว่าของหินแปลกปลอมอุ้มทับทิมนี้ มีลักษณะใกล้เคียงกับหินแปลกปลอม garnet-rich granulite ที่มีคอร์ันดัมเป็นแร่มลทิน (Promprated and others, 2003) และก้อนแร่แปลกปลอมไพรอกซีนที่มีคอร์ันดัมเกิดเป็นผลึกมลทิน (Sutthirath 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) ได้เสนอว่าหินเมฟิกแกรนูลอิต์ดังกล่าวเกิดจาก



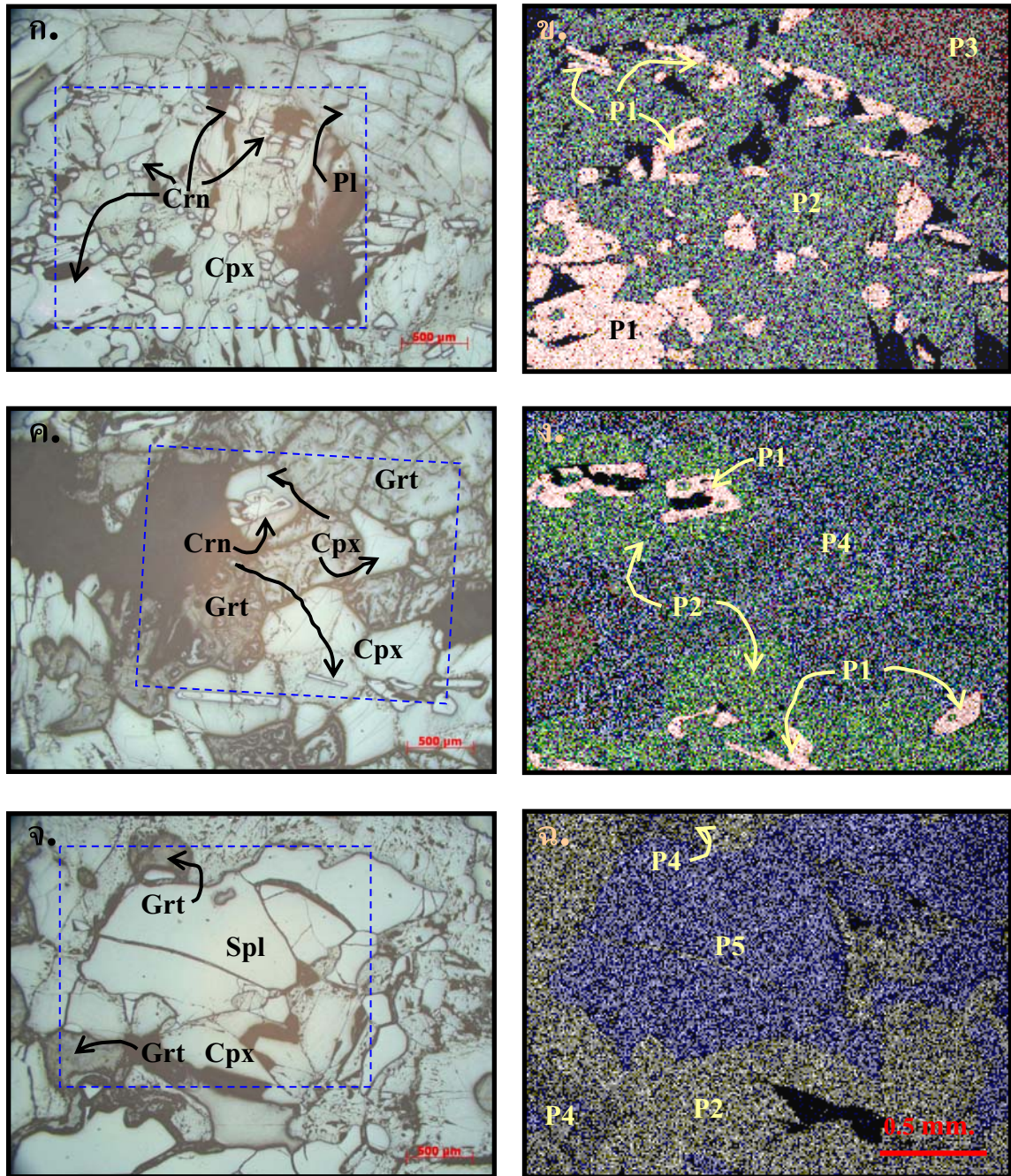
รูปที่ 1 ก. ลักษณะหน้าตัดชั้นหินบะซอลต์ให้พลอย วางตัวปิดทับชั้นตะกอนยุคใหม่ บริเวณบ้านหมื่นด่าน-บ้านคลองโสน ต. บ่อพลอย อ. บ่อไร่ จ. ตราด ลักษณะทับทิม (เจดสีชมพู-แดง) และแร่เพื่อนพลอย ที่พบสะสมตัวในชั้น กรวดใต้ชั้นบะซอลต์ดังกล่าว



รูปที่ 2 ลักษณะหินแปลกปลอมอุ้มทับทิมแบบต่างๆที่พบในบริเวณพื้นที่ศึกษา ก.-ข. เนื้อหิน garnet clinopyroxenite ที่มีแร่แกรนิต (Grt) เกิดร่วม (รัก หรรษาเวก เอื้อเฟื้อตัวอย่างสำหรับถ่ายภาพ) ค. เนื้อหิน clinopyroxenit ที่มีเฉพาะแร่ไดออปไซด์ (Cpx) และทับทิม(Crn) ง. เนื้อหิน pyriclasite ที่มีแร่แพลจีโอเคลส (PI)



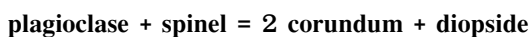
รูปที่ 3 ลักษณะหินแปรกล่อมอุ้มทับทิมจากกล้องจุลทรรศน์ ถ่ายภาพภายใต้ (ฝั่งซ้าย) แสง PPL และ (ฝั่งขวา) XPL ก. เนื้อหินที่ประกอบด้วยแร่โคลโนไพโรอกซีน (Cpx) ทับทิม (Cm) และสปิเนล (Spl) สีน้ำตาลแดง ข. แสดงโซนนิ่งในผลึกทับทิม (Cm) ขนาดใหญ่ ค. เนื้อหินที่ประกอบด้วยแร่โคลโนไพโรอกซีน (Cpx) คาลิฟติก การ์เนท (Grt) และแท่งผลึกทับทิม (Cm) ที่มีการเรียงตัวให้เห็น ง. เนื้อหินที่ประกอบด้วยแร่โคลโนไพโรอกซีน (Cpx) แพลจิโอเคลส (Pl) และทับทิม (Cm) และแสดงลักษณะ polygonal ที่ชัดเจนในบางส่วน จ. เนื้อหินที่ประกอบด้วยแร่สปิเนล (Spl) สีน้ำตาลอมเหลือง โคลโนไพโรอกซีน (Cpx) ที่มีขอบปฏิกิริยา (reaction rind) เกิดขึ้น (บริเวณซีกซ้ายมือของภาพ) และคาลิฟติก การ์เนท (Grt) ฉ. เนื้อหินที่แสดงสภาวะสมดุลทางแร่ระหว่างแร่โคลโนไพโรอกซีน (Cpx) คาลิฟติก การ์เนท (Grt) และทับทิม (Cm) ที่ตกผลึกในลักษณะแท่งเข็มภายในผลึกโคลโนไพโรอกซีน



รูปที่ 4 เปรียบเทียบลักษณะเนื้อหินแปรกล่อมอุ้มทับทิมภายใต้แสงสะท้อนของกล้องจุลทรรศน์ (ซีกซ้าย) กับภาพ SEM (ซีกขวา) แสดงความเข้มข้นของธาตุ (เชิงคุณภาพ) การที่กระจายตัวอยู่ในแต่ละบริเวณของเนื้อหิน [กรอบเส้นประสีน้ำเงินแสดงบริเวณที่ผ่านการตรวจวิเคราะห์ภายใต้เครื่อง SEM และ เส้นมาตราส่วนยาวเทียบเท่า 0.5 มม.] เพื่อการจำแนกกำหนดขอบเขตของชนิดแร่ได้แม่นยำขึ้น ก.-ข. แสดงการซ้อนทับภาพของ 3 ธาตุ (อะลูมินา:สีชมพู; แมกนีเซียม:สีน้ำเงิน; และแคลเซียม:สีเขียว) ซึ่งสามารถแร่ออกเป็น 3 เฟส คือ คอแรนดัม (P1) ไคลโนไพรอกซีน (P2) และแพลจิโอเคลส (P3) ออกจากกันได้ชัดเจน ค.-ง. แสดงการซ้อนทับภาพของ 3 ธาตุ (อะลูมินา:สีชมพู; แมกนีเซียม:สีน้ำเงิน; และแคลเซียม:สีเขียว) ซึ่งสามารถแร่ออกเป็น 3 เฟส คือ คอแรนดัม (P1) ไคลโนไพรอกซีน (P2) และคาลิฟติก การ์เนท (P4) และ จ.-ฉ. แสดงการซ้อนทับภาพของ 2 ธาตุ (แมกนีเซียม:สีน้ำเงิน; และ ซิลิกา:สีเทา) ซึ่งสามารถแร่ออกเป็น 3 เฟส คือ สปิเนล (P5) ไคลโนไพรอกซีน (P2) และการ์เนท (P4) (พื้นที่สีดำเป็นบริเวณช่องว่างที่ไม่มีเนื้อหิน)

การแปรสภาพของหินต้นแบบ(protolith)ที่ประกอบไปด้วยแร่โอลิวีน แพลจิโอเคลส และโคลโนไพรอกซีน(ซึ่งมีองค์ประกอบทางแร่เทียบเคียงได้กับหินบะซอลต์หรือแกรบิโอ) ภายใต้ช่วงความดันระหว่าง 1.5–1.8 GPa และแร่คอร์ันดัมในหินก่อตัวขึ้นด้วยปฏิกิริยา: $\text{plagioclase} + \text{spinel} = 2 \text{ corundum} + \text{diopside}$ ซึ่งมีความสอดคล้องกันดีกับผลการคำนวณ P-T constraint ของ Promprated and others (2003) และ Sutthirath and others (2001) เมื่อนำมาเทียบกับลักษณะเนื้อหินและกลุ่มแร่ที่พบในหินแปรกล่อมอุ้มทับทิมของไทยพบว่ามีความสอดคล้องดีเช่นกัน นอกจากนี้ และ Morishita and others (2004) ได้ทำการทดลองและพบว่าพลอยสามารถอยู่ในสมดุลภาวะร่วมกับหินเพอริโดไทต์ภายในสภาพแวดล้อมของชั้นเนื้อโลกส่วนบนได้ ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองของ Hong-sen and others (2002) และของ Kornprobst and others (1990 ใน Morishita and others, 2004) และสอดคล้องกับลักษณะและชนิดของหินแปรกล่อมจำพวกเพอริโดไทต์ที่พบบนผิวโลกโดยแมกมาบะซอลต์ในบริเวณที่พบหินแปรกล่อมอุ้มพลอยด้วยเช่นกัน

ดังนั้นในขั้นต้นอาจกล่าวได้ว่าพลอยทับทิมไทยโดยเฉพาะจากแหล่งพลอยภาคตะวันออกน่าจะถือกำเนิดขึ้นจากหินต้นแบบที่มีองค์ประกอบเคมีเทียบเคียงได้กับหินอัลคาไลบะซอลต์ซึ่งอาจถูกนำลงลึกสู่ระดับลึกประมาณ 50–60 กม. ในบริเวณช่วงต่อระหว่างชั้นเนื้อโลกส่วนบนกับเปลือกโลกส่วนล่าง(เทียบเท่าความดัน 1.5–1.8 GPa)และมีช่วงอุณหภูมิ 1,100–1,200 °C โดยการมุดตัวของเปลือกโลกทำให้หินเกิดการแปรสภาพเป็นหินแกรนูลิต และแร่พลอยได้ก่อตัวขึ้นด้วยปฏิกิริยา:



ก่อนที่จะเกิดปรากฏการณ์ที่ทำให้ชั้นเนื้อโลกในระดับลึกคลายความกดดันลง ซึ่งอาจเป็นผลจากเหตุการณ์ extensional rifting ในช่วงปลายยุค Cenozoic ส่งผลให้เนื้อโลกเกิดการหลอมละลายบางส่วนเป็นแมกมาบะซอลต์เนื้ออัลคาไลที่ปะทุผ่านชั้นหินอุ้มพลอยที่ก่อตัวอยู่ในระดับที่ตื้นกว่าพร้อมกับบอมเอาพลอยและหินเนื้อโลกบางส่วนขึ้นมาสู่ผิวโลกแข็งตัวเป็นหินบะซอลต์นำพลอยและผลุสลายให้แหล่งพลอยทุติยภูมิในภายหลัง และจะเห็นได้ว่ารูปแบบการกำเนิดพลอยทับทิมนี้ มีความแตกต่างไปจากรูปแบบการกำเนิดพลอยแซปไฟร์ทั่วไป

ที่มีการนำเสนอไว้ (โปรดดูเนื้อหาในหัวข้อแนวความคิดการกำเนิดพลอยคอร์ันดัมประกอบ)

อย่างไรก็ตามรูปแบบการกำเนิดของทับทิมไทยที่นำเสนอในครั้งนี้ใช้ผลการศึกษาด้านศิลาวรรณมาประกอบกับผลทางศิลาเคมีบางส่วนเป็นเกณฑ์หลักในการอนุมานเทียบเคียง จึงจำเป็นอย่างยิ่งต้องอาศัยข้อมูลผลการศึกษาเชิงลึกมาสนับสนุนยืนยันในภายหลัง

unสรุป

หินแปรกล่อมอุ้มทับทิมที่พบ จัดเป็นหินแปรเกรดสูงในตระกูลหินแกรนูลิต ที่มีองค์ประกอบทางแร่คาบเกี่ยวระหว่างหินไพรอกซีนิต และหินไพริคลาไซต์ และถือเป็นหลักฐานที่พิสูจน์ยืนยันว่าผิวดินบะซอลต์ที่ยังเหลือปรากฏอยู่บริเวณบ้านหมื่นด่าน-บ้านคลองโสน ต.บ่อพลอย อ.บ่อไร่ จ.ตราด แหล่งให้พลอยทับทิม ขณะเดียวกันก็บ่งชี้ว่าหินบะซอลต์ชั้นให้พลอยนี้ไม่ได้เป็นหินต้นกำเนิดที่แท้จริงของพลอย ซึ่งในขั้นต้นนี้สรุปว่าพลอยทับทิม และแซปไฟร์ไทยมีรูปแบบการกำเนิดที่แตกต่างกัน โดยพลอยทับทิมจากแหล่งบริเวณอ.บ่อไร่ จ.ตราด น่าจะก่อตัวขึ้นจากปฏิกิริยา:

$\text{แพลจิโอเคลส} + \text{สปิเนล} = 2 \text{ คอร์ันดัม} (\text{ทับทิม} + \text{ไดออปไซด์})$ ภายใต้ช่วงอุณหภูมิ ~1,100–1,200 °C และในช่วงความดัน ~15–18 Kb เทียบเท่าระดับความลึกประมาณ 50–60 กม. ในบริเวณเขตรอยต่อของชั้นเนื้อโลกส่วนบนกับชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง และภายหลังได้ถูกนำขึ้นมาสู่ผิวโลกโดยการปะทุของหินหนืด(แมกมา)บะซอลต์ที่เป็นผลจากการหลอมละลายบางส่วนของหินเนื้อโลกที่ระดับลึกกว่า

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณรัก หรรษาเวทที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการพบหินแปรกล่อมอุ้มพลอย อันเป็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยชิ้นนี้ คุณบุญมี มณีรัตน์ และครอบครัว รวมถึงคุณพิพัฒน์ วิสุทธาภรณ์ ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลสนามและหินตัวอย่าง และให้ข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งพลอยและการทำเหมืองพลอยในพื้นที่เป็นอย่างดี ขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับ

ความอ่อนเคราะที่ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ EPMA และบริษัท Rushmore Precision จำกัด ที่เอื้อให้ยืมใช้งานกล้องถ่ายภาพดิจิทัลสำหรับติดกล้องจุลทรรศน์ และคำขอขอบคุณสำหรับคุณเฉลิมวงศ์ อิงคสัมพันธ์และคุณพิษณุ ยิ่งยวด ที่ช่วยเตรียมตัวอย่างและจัดทำหินบางขัดมัน คุณปานใจ สารพันโชติวิทยา สำหรับความช่วยเหลือในงานสนามและงานจิปาละอื่นๆ และคุณกฤตยา ปัทมลัย ในการตรวจทานและปรับแต่งรูปแบบบทความ

งานวิจัยนี้อยู่ภายใต้แผนงบประมาณ ปี 2547 และ 2548 ของกรมทรัพยากรธรณี และส่วนหนึ่งได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งผู้เขียนขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- พล เชาว์ดำรงค์, 2535, รายงานผลการสำรวจหาความต่อเนื่องทางธรณีวิทยาพื้นที่ภาคตะวันออก มาตราส่วน 1:250,000: รายงานการสำรวจธรณีวิทยา, กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี, ฉบับที่ 0187, 39 หน้า.
- วีระพงษ์ ต้นสุวรรณ และเด่นโชค มั่นใจ, 2542, สำรวจธรณีวิทยา มาตราส่วน 1: 250,000 จังหวัดตราด: รายงาน การสำรวจธรณีวิทยา, กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี.
- Barron L.M., Lishmund, S.R., Oakes, G.M., Barron B.J., and Sutherland, F.L., 1996, Subduction Model for the Origin of some Diamonds in the Paleozoic of Eastern New SouthWales: Aus. Jour. Earth Sci., Vol.43, p.257-267.
- Bunopas, S., and Vella, P., 1992, Geotectonic and geologic Evolution of Thailand in Proceedings of National Conference on the Geological Resources of Thailand: Potential for Future Development. Bangkok, Thailand, p.209-228.
- Coenraads, R. R., Sutherland, F. L., and Kinney, P. D., 1990, The Origin of Sapphires: U-Pb Dating of Zircon inclusions Sheds New Light: Min. Mag., Vol.54, p.113-122.
- Coenraads, R.R., Vichit, P., and Sutherland, F.L., 1995, An unusual Sapphire-zircon-magnetite Xenoliths from the Chanthaburi Gem Province, Thailand: Min. Mag., Vol.59, p.465-479.
- Garneir, V., Ohnensteter, D., Giuliani, G., Fallick, A.E., Trong, T. P., Quang, V., H., Van, L., P., and Schwarz, D., 2005, Basalt Petrology, Zircon Ages and Sapphire genesis from Dak Nong, Southern Vietnam: Min. Mag., Vol.69(1), p.21-38.
- Guo, J.F., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., 1996a, Corundum from Basaltic Terrains: A Mineral Inclusion Approach to the Enigma: Contrib. Mineral. Petrol., Vol.122, p.368-386.
- Hong-sen, X., Wei-go, Z., Wei, H., Wen-ge, Z., Jie, G., and Ji-an, Xu, Discovery of Corundum in Alkali Basalt at High Temperature and High Pressure: J. Phy.:Condens. Matter, Vol.14, p.11,365-11,368.
- Irving A.J., 1986, Polybaric Magma Mixing in Alkali Basalts and Kimberlites: Evidence from Corundum, Zircon, Ilmenite Megacrysts. 4th Int. Kimberlite Conf. Perth: Geol. Soc. Aust. Abstr. Ser., Vol.16, p.262-264.
- Levinson A.A., Cook, F.A., 1994, Gem Corundum in Alkali Basalt: Origin and Occurrence: Gem. Gemol., Vol.30, p.253-262.
- Limtrakul, P., Zaw, K., Ryann, C.G., and Mernagh, T.P., 2001, Formation of the Denchai Sapphires, Northern Thailand: Evidence from Mineral Chemistry and Fluid/Melt Inclusion characteristics: Min. Mag., Vol.65, p.725-735.
- Morishita, T. & Arai, S., 2001, Petrogenesis of Corundum-bearing Mafic Rock in the Horoman Peridotite Complex, Japan: Jour. Petrol., Vol.42, p.1279-1299.
- Morishita, T., Arai, S., and Green, D. H., 2004, Possible Non-melted Remnants of Subducted Lithosphere: Experimental and Geochemical Evidence from Corundum-bearing Mafic Rocks in the Horoman Peridotite Complex, Japan: Jour. Petrol., Vol.45, p.235-252.
- Pisutha-Arnord, V., Wathanakul, P., Intasopa, S., and Griffin, W.L., 1998, Corsilzirspite, a Corundum-silimanite-zircon-hercynite Rock: New Evidence on the Origin of Kanchanaburi Sapphire, Thailand: Proceedings of the 9th Regional Congress on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia (GEOSEA 98), Kuala Lumpur, Malaysia, p.117(abstrat).
- Promprated, P., Taylor, L.A., and Neal, C.R., 2003, Petrochemistry of Mafic Granulite Xenoliths from the Chantaburi Basaltic Field: Implications for the Nature of the Lower Crust beneath Thailand: Inter. Geol. Rev., Vol.45, p.383-406.
- Sutherland, F.L., and Coenraads, R.R., 1996, An Unusual Ruby-sapphire-sappharine-spinel Assemblage from the Berington Volcanic Province, New South Wales, Australia: Min. Mag., Vol.60, p.623-638.
- Sutherland, F.L., Hoskin, P.W.O., Fanning, C.M., Coenraads, R.R., 1998, Model of Corundum Origin from Alkali Basaltic Terrains: A Reappraisal: Contrib. Mineral. Petrol., Vol.133, p.356-372.
- Sutthirath, 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: Min. Mag., Vol.65(2), p.277-295.
- Sutthirath, 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.
- Vichit, P., Vudhichatvanich, S., and Hansawek, R., 1978, The Distribution and some Characteristics of Corundum-bearing Basalts in Thailand: Jour. Geol. Soc. Thailand, Vol.3, p.M4-1-M4-38.

สัมนา ธรณีวิทยา



Proceedings of the International Conference on GEOLOGY, GEOTECHNOLOGY AND MINERAL RESOURCES OF INDOCHINA (GEOINDO 2005)

28-30 November, 2005, Kosa Hotel, Khon Kaen Thailand

Organizer:

The Department of Geotechnology
Faculty of Technology
Khon Kaen University (KKU)

Co-Organizer:

The Geological Society of Thailand (GST)
The Department of Geology, Chulalongkorn University (CU)
The Department of Geological Science, Chiang Mai University (CMU)
The Department of Mining and Materials Engineering, Prince of Songkhla (PSU)
The Institute of Engineering, Suranaree University of Technology (SUT)
The Department of Mineral Resources (DMR)
The Department of Mineral Fuels (DMF)
The Department of Groundwater Resources (DGR)



CU



SUT



DMF



PSU



DMR



GST



CMU



DGR

Conference committee Advisory Board

Somsak
Pakdi
Ruangsak
Nares

Potisat,
Thanvarachorn
Vajarapong
Satlayarak

Pitsanu
Viroj
Lek
Tara

Wongpornchai,
Daorerk
Sikong
Lekuthai

Organizing Committee and Editorial Board

Kriengsak
Patchrasu
Ladda
Sarunya

Srisuk (Chairman)
Wannakao (Vice-chairman)
Wannakao (Secretariat)
Promkotra (Assistant-Secretariat)
Chalong Buaphan
Laa Archwichai
Montere Boonsener

Rungruang
Winit
Peangta
Thanuchai
Surachai
Kiatisak

Lertsirivorakul
Youngme
Satarugsa
Silaratana
Sompadung
Sornpirom

Editors:

Ladda
Kriengsak

Wannakao,
Srisuk,

Winit
Rungruang

Youngme
Lertsirivorakul

In commemoration of the 30th Anniversary of the
Department of Geotechnology, KKU

Another Constraint on Thai-corundum Genesis: New Evidence from Ruby-bearing Xenoliths from the Eastern Gem Field, Thailand

Tawatchai Chualaowanich
Geologist

Dept. of Mineral Resources,
Rama VI Rd., Ratchathewi,
Bangkok 10400, Thailand.
Telephone: (66-2) 202-3860

E-mail: tc_chaeng@yahoo.com

Christoph Harzenberger
Associate Professor

Dept. of Earth Sciences,
Karlz-Fan University of Graz,
Graz, Austria

Chakkaphan Sutthirat

Assistant Professor

Dept. of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn
University, Phayathai, Bangkok 10330, Thailand
Telephone: (66-2) 218-5448

E-mail: c.sutthirat@gmail.com

Visut Pisutha-Arnond

Associate Professor

Dept. of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn
University, Phayathai, Bangkok 10330, Thailand
Telephone: (66-2) 218-5443

E-mail: pvisut@geo.sc.chula.ac.th

ABSTRACT

*This paper reports initial investigation on the newly-discovered the corundum(ruby)-bearing xenoliths to constrain the origin of the so-called "Siamese ruby.". These xenoliths are enclosed within a fresh alkali basaltic flow of the eastern gem field of Thailand. The xenoliths are classified as "corundum-plagioclase-bearing garnet clinopyroxenite." They exhibit metamorphic textures, commonly with 120° triple junction grain boundaries. The mineral assemblage is composed of diopsidic clinopyroxene, plagioclase, kalyptitic garnet, corundum (of ruby variety), and spinel. The petrographical characteristics suggest the xenoliths were formed under a high-pressure metamorphic process and the ruby was possibly generated by the reaction: **Plagioclase + Spinel = 2 Corundum + Diopside**, within a possible P-T range of 1.5-1.8 GPa and 1,100-1,200 °C. Significantly, this finding confirms that the formation of Thai ruby was pre-existed prior to the eruption of the basaltic magma, but not crystallized from the magma. Additionally, the xenoliths yield genetic constraints ensuring the formation of the ruby is actually different from that of the sapphire found elsewhere in Thailand. Nevertheless, further detail investigation on mineral chemistry need to be undertaken to better quantify the genesis of the ruby.*

Keywords : ruby -bearing xenolith, corundum genesis, alkali basalt, Thailand

Genetic Constraints of Siamese Ruby: Evidence from Ruby-bearing Xenoliths and a New ⁴⁰Ar/³⁹Ar Age of the Host Basalt from the Eastern Gem Field, Thailand

Tawatchai Chualaowanich¹, Chakkaphan Sutthirat², Visut Pisutha-Arnond²,
Christoph Hauzenberger³, and Punya Charusiri²

¹ Dept. of Mineral Resources, Rama VI Rd., Ratchathewi, Bangkok, Thailand.

² Dept. of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai, Bangkok, Thailand

³ Dept. of Earth Sciences, Karlz-Fan University of Graz, Graz, Austria

Extended Abstract

Corundum-bearing xenoliths are very crucial for solving the enigmatic origin of the basalt-related corundum, but they are rarely obtainable for detail investigation until recently. This article is aim to report on investigation results based upon field relationship evidences, petrographic study and multi-element SEM scanning done on corundum(ruby)-bearing xenoliths collected from the eastern gem field of Thailand in the vicinity of Amphoe Bo Rai, Trat province (Figure 1). These xenoliths were found enclosed within a fresh alkali basaltic flow, chemically classified as “foiidite-basanite” with olivine and nepheline normative. Additionally, a new ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of the host basalt is provided to constrain the time of eruption. As a suit these ruby-bearing xenoliths are classified as a “corundum-bearing clinopyroxenite.” They exhibit granoblastic polygonal textures and contain an assemblage of emerald-green clinopyroxene (25-95%), plagioclase (0-45%), kalyphitite after garnet (0-20%), purplish pink-magenta-red corundum (5-50%), and spinel (0-2%). The corundum is in equilibrium, both texturally and chemically, with the clinopyroxenes and the kalyphited garnets and some corundum grains are enclosed entirely within those minerals (Figure 2A-B). However, the plagioclases are never been observed in direct contact with the ruby. According to SEM images (Figure 2C-F), the clinopyroxenes display high portion of Ca-Tschemark. All garnets are wholly converted to kalyphite, but still retain high Mg content suggesting pyropic origin. The plagioclases contain high An-content. By compilation with previous related studies, the formation of these xenoliths is likely constrained to a high P-T metamorphic process (i.e. Kornprobst et al., 1990; Morishita and Arai, 2001) within the upper mantle-lower crust transitional zone (Sutthirat, 2001), within a possible P-T range of 15-18 kb and 1,100-1,200°C (Promprated et al., 2003), and the rubies likely crystallized under subsolidus condition by two prograde reactions;

(1) *Plagioclase + Spinel = 2Corundum + Diopsidic pyroxene* and

(2) *3Plagioclase + 3Spinel = 4Corundum + Pyrope + Grossular*

These ruby-bearing clinopyroxenites could possibly be transformed from an alkali basaltic/gabbroic protolith that was brought down by subduction (Morishita et al.,

2004) during the Shan-Thai-Indochina plate collision event.

Significantly, this finding confirms that the formation of Thai ruby was already pre-existed prior to be involved with the host basaltic magmas, but not directly crystallized from the hosts as previously proposed (i.e. Barr and Macdonald, 1977; Vichit et al., 1978). These xenoliths yield an additional genetic constraint ensuring that the formation of the ruby is actually different from that of the sapphire found elsewhere (i.e. Coenraads, et al., 1990&1995; Pisutha-Arnond et al., 1998&1999; Limtrakun et al., 2001; Sutthirat, 2001; Promprated et al, 2003; Sutherland et al, 2003). The new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age, $1.33\pm0.09\text{Ma}$, together with the other existing radiogenic ages of nearby ruby-bearing basalt patches (Barr and Macdonald, 1977; Sutthirat et al, 1994; Chualaowanich et al, 2008) all point out that the eruption episode of these magmas was confined to Cenozoic, but periodically occurred at least 3 times during Pleistocene. Nonetheless, more detail investigation on mineral chemistry is needed to be undertaken to better quantify the genesis of the ruby.

Keywords: Siamese ruby, corundum-bearing xenolith, alkali basalt, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age, Cenozoic.

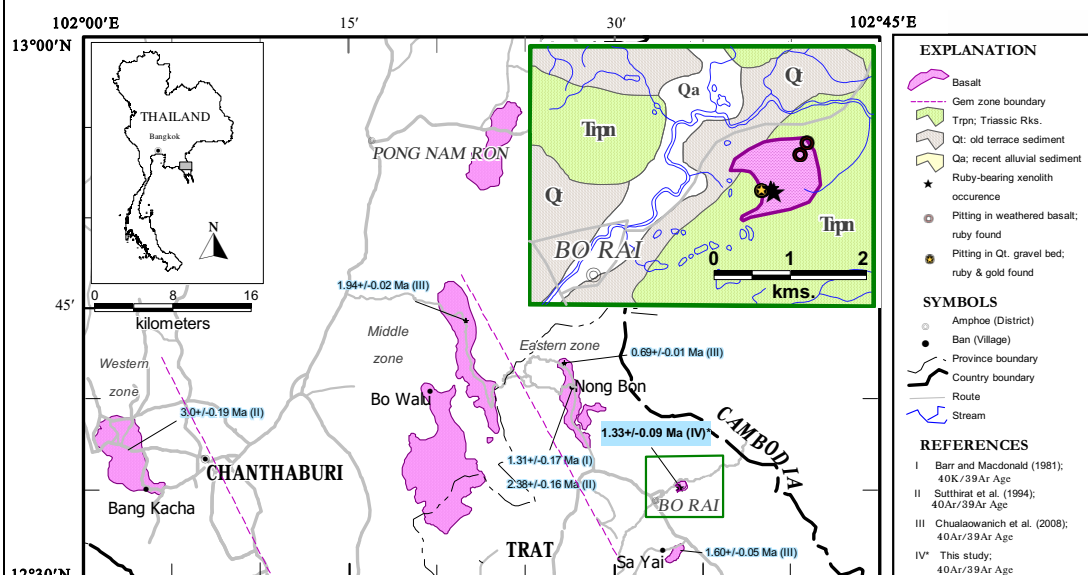


Figure 1 Distribution of gem-related alkali basalt in the eastern gem field of Thailand (modified from Vichit et al., 1992) with radiometric ages and geology in vicinity of the study site (in the upper right corner; from Chualaowanich, 2004).

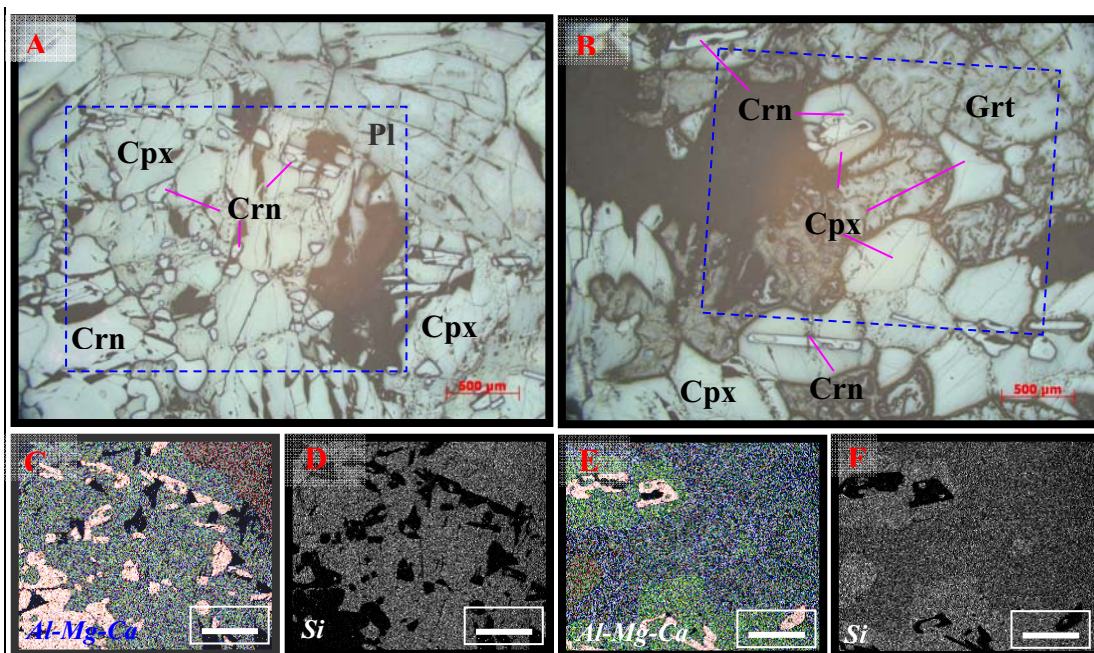


Figure 2 Photomicrographs taken under reflected light showing rock textures of the ruby-bearing xenoliths (A-B) are compared to a suite of multi-element SEM images (C-F) of 4 selected elements; i.e. alumina (Al, in pink), magnesium (Mg, in blue), calcium (Ca, in green) and silicon (Si, in grey). Blue dashed frames represent the scanned areas. E and D represent Al-Mg-Ca color combination. The scale bars are 500 microns.

Acknowledgements

The authors are grateful to Mr. Rak Hansawek for informing about the ruby-bearing xenoliths location and Boonmee Maneerat for permitting us to collect the specimens in their private properties, conveniently. We thanks to Charoemwong Ingkasumphan and Phissanu Yingyau for preparing thin polished sections and Panjai Saraphanchotwitthaya and Dr. Darunee Saisutthichai for field assistances. We would like to extend our thanks to Prof. Ching-Hua Lo of National Taiwan University and his personnel for Ar-Ar laboratory support. We are also grateful to Drs Tung-Yi Lee and Mong-Wan Ye, of the Department of Earth Sciences of National Taiwan Normal University, and their graduate students for their sincere help and kind hospitality. This study benefited from financial supported by the fiscal budget of the Department of Mineral Resources and Thailand Research Fund (TRF)-TRG4680004.

References

- Barr, S. M. a. M., A.S., 1981. Geochemistry and geochronology of Late Cenozoic alkaline basalts of Southeast Asia. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 10, 21-48.
- Chualaowanich, T., 2004. Gem corundum exploration in the areas of amphoe Klung, Chanthaburi and amphoe Bo Rai, Trat (In Thai). Progress report (unpublished). Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, 54p.
- Chualaowanich, T., Saisutthichai, D., Saraphanchotewittaya, P., Charusiri, P., Sutthirat, C., Lo, C.-H., Lee,

- T.-Y., and Yeh, M.-W., 2008. New ⁴⁰Ar/³⁹Ar Ages of some Cenozoic Basalts from the East and Northeast of Thailand. *In* Proceedings of an International Symposium on: Stratigraphic Correlation of Southeast Asia, Bangkok, Thailand, Bangkok, Thailand, (abstract).
- Coenraads, R. R., Sutherland, F. L., and Kinney, P. D., 1990. The Origin of Sapphires: U-Pb Dating of Zircon inclusions Sheds New Light. *Min. Mag.*, 54, 113-122.
- Coenraads, R.R., Vichit, P., and Sutherland, F.L., 1995. An unusual Sapphire-zircon-magnetite Xenoliths from the Chanthaburi Gem Province, Thailand. *Min. Mag.*, 59, 465-479.
- Kornprobst, J., Piboule, M., Roden, M., and Tabit, A., 1990. Corundum-bearing Garnet Clinopyroxenites at Beni Bousera (Morocco): Original Plagioclase-rich Gabbros Recrystallized at Depth within Mantle?. *Jour. Petrol.* 31(3): 717-745.
- Limtrakun, P., Zaw, K., Ryyan, C.G., and Mernagh, T.P., 2001. Formation of the Denchai Sapphires, Northern Thailand: Evidence from Mineral Chemistry and Fluid/Melt Inclusion characteristics. *Min. Mag.*, 65, 725-735.
- Morishita, T. and Arai, S., 2001. Petrogenesis of Corundum-bearing Mafic Rock in the Horoman Peridotite Complex, Japan. *Jour. Petrol.*, 42(7), 1279-1299.
- Morishita, T., Arai, S., and Green, D. H., 2004. Possible Non-melted Remnants of Subducted Lithosphere: Experimental and Geochemical Evidence from Corundum-bearing Mafic Rocks in the Horoman Peridotite Complex, Japan. *Jour. Petrol.*, 45(2), 235-252.
- Pisutha-Arnord, V., Wathanakul, P., Intasopa, S., and Griffin, W.L., 1998. Corsilzirsipite, a Corundum-silimanite-zircon-hercynite Rock: New Evidence on the Origin of Kanchanaburi Sapphire, Thailand. *In* Proceedings of the 9th Regional Congress on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia (GEOSEA 98), Kuala Lumpur, Malaysia, 117 (abstract).
- Pisutha-Arnord, V., Wathanakul, P., and Intasopa, S., 1999. New Evidences on the Origin of Kanchanaburi Sapphire, *in* Proceedings of Symposium on Mineral, Energy, and Water Resources of Thailand: Towards the year 2000, Bangkok, Thailand, 600 (abstract).
- Promprated, P., Taylor, L.A., and Neal, C.R., 2003. Petrochemistry of Mafic Granulite Xenoliths from the Chantaburi Basaltic Field: Implications for the Nature of the Lower Crust beneath Thailand. *Inter. Geol. Rev.*, 45, 383-406.
- Sutherland, F.L., Coenraads, R.R., Schwarz, D., Raynor, L.R., Barron, B.J., and Webb, G.B. (2003). Al-rich Diopside in Alluvial Ruby and Corundum-bearing Xenoliths, Australia and SE Asian Basalt Fields. *Min. Mag.* 67(4), 717-732.
- Sutthirath, C., Charusiri, P., Farrar, E., and Clark, A.H. (1994). New ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology and Characteristics of some Cenozoic Basalts in Thailand. *International Symposium on: Stratigraphic Correlation of Southeast Asia, Bangkok, Thailand*, 306-321.
- Sutthirath, 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. *Min. Mag.*, 65(2), 277-295.
- Vichit, P., 1992. Gemstone in Thailand. *in* Proceedings of a National Conference on Geologic of Thailand: Potential for Future Development. Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, 17-24 November, 124-150.
- Vichit, P., Vudhichativanich, S., and Hansawek, R., 1978. The Distribution and some Characteristics of Corundum-bearing Basalts in Thailand. *Jour. Geol. Soc. Thailand*, 3, M4-1-M4-38.

Corresponding Author

Full name : Tawatchai Chualaowanich

Affiliation : Geologist (Government agency)

Dept. of Mineral Resources, Rama VI Rd., Ratchathewi,
Bangkok 10400, Thailand.

Telephone : (66-2) 202-3860; E-mail: tc_chaeng@yahoo.com

New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of some Cenozoic Basalts from the East and Northeast of Thailand

Tawatchai Chualaowanich^{1*}, Darunee Saisuttichai¹, Panjai Sarapanhotwittaya¹,
Punya Charusiri², Chakkaphan Sutthirat², Ching-Hua Lo³, and Tung-Yi Lee⁴

1. Department of Mineral Resources, Rama VI Rd., Ratchthewee, Bangkok, 10400, Thailand

2. Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

3. Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan

4. Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, Taipei 106, Taiwan

*E-mail: tc_chaeng@yahoo.com

Extended Abstract

The present study carried out geochemical analyses and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental heating experiments on 2 groups of whole-rock specimens taken from 5 discrete patches of Cenozoic basalts in Thailand (Figure 1), in order to define their eruption ages and to compare with the available radiogenic ages of basaltic bodies distributed nearby. The first group specimens (TrNb01, TrBr07, and CbKl01) were collected from the Chanthaburi-Trat gem (corundum) field of the east. They unconformably overlie Triassic clastic strata of Pong Nam Ron Formation (Chualaowanich, 2004). Whereas, the second group specimens were collected from the northeast provinces, which are Buriram (BrMu04) and Ubol Ratchthani (UbNy05). In the field, the basaltic bodies of second groups are underlain by Cretaceous red-bed formations of Khorat Group, namely Maha Sarakham and Khok Khruat Formation, respectively (Department of Mineral Resources, 1987). Geochemically, basalts of the first group are all plotted within “basanite” field and those of the second group are defined as “trachybasalt” (Figure 2a). All the samples exhibit chemical composition of high alkalic series, falling in the field of alkali basalt toward the foidite bound (Figure 2b). Trace-element discrimination plots (Figure 3a-c) also suggest that all the samples are of a within-plate alkali affinity, generated under a rifting environment. The chemical compositions of all samples are shown in Table 1.

Geochronologically, all the samples, along with LP-6 biotite standards, were irradiated at the VT-C position of Tsing-Hua Open-Pool Reactor (THOR), for 30hrs. The irradiated samples were later heated stepwisely using a double vacuum Ta furnace, and the gas was analyzed VG1200 mass spectrometer at the Department of Geosciences, National Taiwan University. Detailed analysis procedure was outlined by Lo et al. (2002). The experiments yield well defined plateaus for most samples, except TrBr07. The plateau ages are 0.69 ± 0.01 , 1.60 ± 0.05 and 1.94 ± 0.02 Ma for the specimens from the east and 0.43 ± 0.02 and 3.28 ± 0.03 Ma for those from the northeast. These ages are generally concordant with their respective total-fusion ages (Figure 4).

These new Ar ages are generally consistent with the published K-Ar and fission track ages obtained from nearby basaltic bodies, but all of the new ages appear to be younger and better confined. The discrepancy of ages observed among the specimens from different basalt patches implies that there were periodically eruption events, but not voluminous at the time, during the Neogene Period. The age data suggest the eruption began as early as Late Pliocene, starting in the eastern-most of the NE region. It is also suggested that the Chanthaburi-Trat gem field was formed by the eruptions of multiple corundum-bearing basalts during Pleistocene Times. In

addition, the age obtained from BrMu04 (0.43 ± 0.02 Ma) is the youngest one that has ever been reported in Thailand, compared to Mae Tha basalt (0.59 ± 0.05 Ma *in* Sutthirat et al., 1995) exposed in Lampang province of the north and Tha Mai basalt (0.44 ± 0.11 Ma *in* Carbonnel et al., 1972) cropped out in the western part of Chanthaburi. These Cenozoic eruptions are thought to be consequences of Neotectonic activities (Bunopas and Vella, 1992 and Charusiri et al., 2002).

Key words: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages, Alkali basalt, Corundum-bearing, Cenozoic, Thailand

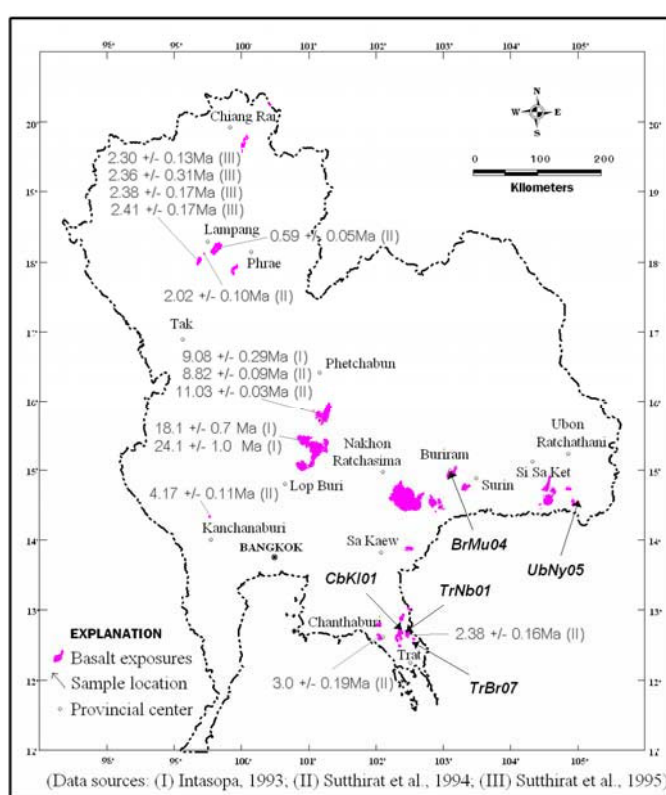


Figure 1 Map showing available Ar-Ar ages of basaltic bodies distributed in Thailand and sample locations collected for this investigation (modified after Sutthirat et al., 2005).

Table 1 Major (wt%), selected trace element and REE compositions for the samples.

Sample	CbKI01	TrNb01	TrBr07	BrMu04	UbNy05
SiO ₂	44.60	41.50	41.80	49.20	46.90
TiO ₂	2.86	3.41	3.15	3.07	2.03
Al ₂ O ₃	12.90	12.20	12.60	14.00	14.30
Fe ₂ O ₃ ^t	13.70	15.20	12.60	11.50	12.40
MnO	0.22	0.21	0.17	0.14	0.16
MgO	8.57	8.24	9.41	6.95	7.98
CaO	9.36	10.30	9.93	7.49	7.97
Na ₂ O	3.11	4.24	3.82	3.52	3.65
K ₂ O	1.99	2.60	0.81	1.99	1.95
P ₂ O ₅	0.89	1.28	1.28	0.59	0.57
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.02	0.03	0.03
LOI	2.66	1.50	5.32	2.03	1.57
Total	100.89	100.68	100.91	100.51	99.51
Zr	284.00	334.00	238.00	212.00	160.00
Nb	76.00	104.00	81.00	55.00	46.00
La	48.20	72.20	56.40	20.70	26.70
Ce	90.40	136.00	103.00	43.10	50.70
Pr	10.30	15.30	11.70	5.87	6.01
Nd	41.90	60.80	45.80	27.40	24.30
Sm	8.50	11.80	9.10	7.20	5.70
Eu	3.00	3.87	3.08	2.59	1.96
Gd	9.01	11.70	9.05	6.86	6.25
Tb	1.23	1.50	1.30	0.90	0.81
Dy	6.06	7.20	5.72	4.77	4.46
Ho	1.03	1.21	0.97	0.74	0.76
Er	2.90	2.74	2.40	1.97	2.06
Tm	0.34	0.31	0.28	0.22	0.24
Yb	2.00	1.80	1.60	1.30	1.50
Lu	0.35	0.39	0.18	0.16	0.23
Y	27.90	30.60	24.50	20.00	20.50
Ta	4.90	6.20	4.40	3.70	3.60
Th	8.30	10.50	9.60	3.00	3.90

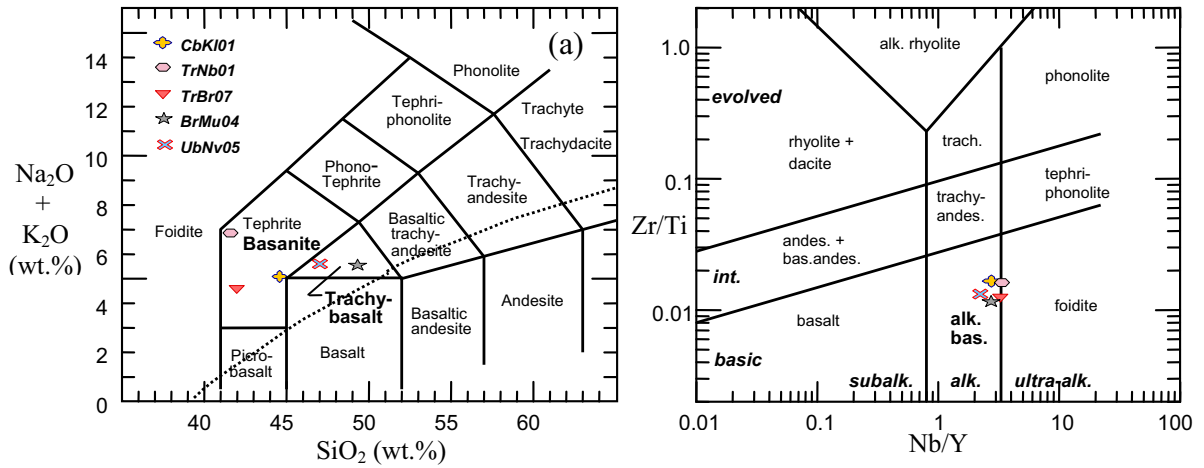


Figure 2 (a) The chemical classification and nomenclature of the basaltic specimens using the TAS diagram of Le Maitre et al. (1986) with line separating fields of alkaline and subalkaline magma series of Irvine and Baragar (1971); (b) the revised Nb/Y-Zr/Ti discrimination plot (after Winchester and Floyd, 1977 and Pearce, 1996).

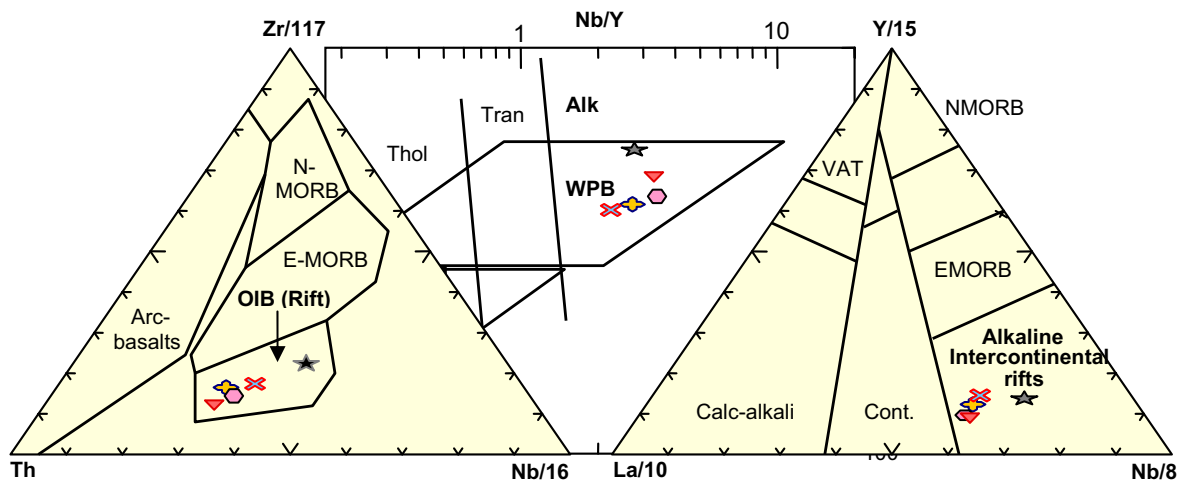


Figure 3 Discrimination diagrams for basalts based upon (a) Nb/Y-Ti/Y variation from Pearce (1982); (b) Zr/117-Th-Nb/16 variation from Wood (1980); and (c) Y/15-La/10-Nb/8 variation from Cabanis and Lacolle (1989).

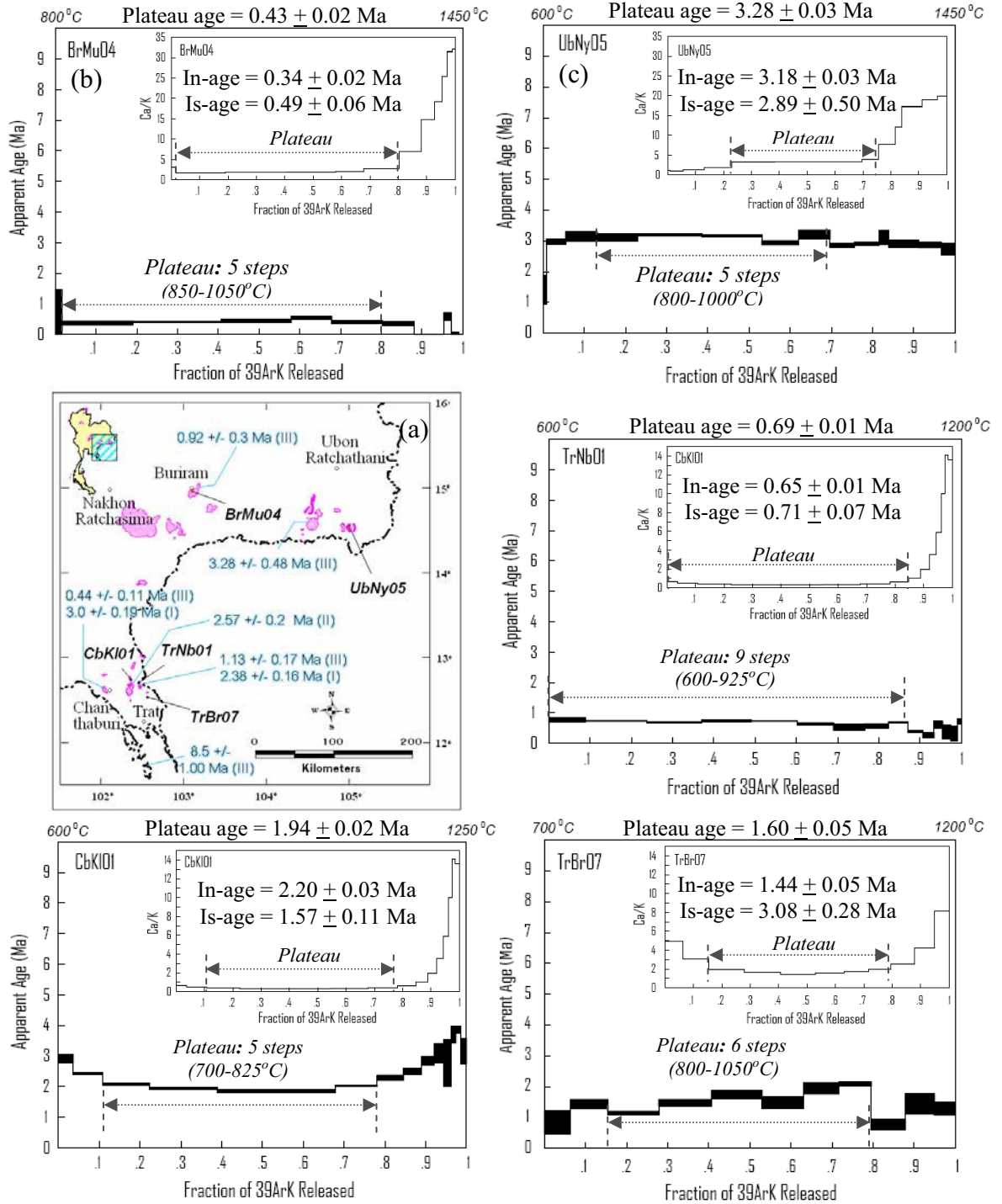


Figure 5 (a) Map showing available radiogenic ages of the basaltic bodies distributed nearby, of which (I) are Ar-Ar ages from Sutthirat et al. (1994); (II) represent K-Ar ages from Bar and McDonald (1981) and (III) is a fission-track age from Carbonnel et al. (1972). (b)-(f) Diagrams showing $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra for samples (In-age = total fusion age and Is-age = reversed isochron age).

Acknowledgements

The authors are grateful to Assist. Prof. Dr. Mong-Wan Ye, Mr. Light Wu, personnel of Ar-Ar Geochronological Lab of National Taiwan University, and graduate students of the Department of Earth Sciences of National Taiwan Normal University for their sincere help and kind hospitality. This study benefited from financial supported by the fiscal budget of the Department of Mineral Resources and Thailand Research Fund (TRF)-TRG4680004.

References

- Barr, S.M. and McDonald, A.S. 1981. Geochemistry and geochronology of Late Cenozoic alkaline basalts of Southeast Asia. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 10, 21-48.
- Bunopas, S., and Vella, P. 1992. Geotectonics and geologic evolution of Thailand, *in* Proceeding of National Conference on Geological Resources of Thailand: Potential for Future Development. Bangkok, Thailand, Department of Mineral Resources, 209-228.
- Cabanis, B. and Lecolle, M. 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. *C.R. Acad. Sci. Ser. II*, 2023-2029.
- Carbonnel, J. P., Duplaix, S., and Selo, M. 1972. La methode des traces de fission de l' uranium appliquee a la geochronology: Datation du magmatisme recent de l' Asie du Sudest. *Revue De Geographie Physique et de Geologie Dynamique*, 14, 1, 29-46.
- Charusiri, P., Ampaiwan, T., Hisada, K., Khaowiset, K., Kosuwan, S., and Daorerk, V. 2002. Geotectonic evolution of Thailand: Compilation and new synthesis. *J. Scientific Research*, 1, 69-108.
- Chualaowanich, T. 2004. Gem corundum exploration in the areas of amphoe Khlung, Chanthaburi and amphoe Borai, Trat (*in Thai*). Progress report (unpublished). Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, 54p.
- Department of Mineral Resources. 1987. Geological map of Thailand 1:250,000. Geological Survey Division, Rama VI, Bangkok, Thailand.
- Intasopa, S. 1993. Petrology and geochronology of the volcanic rocks of the Central Thailand volcanic belt. Ph.D. thesis (unpublished). the University of New Brunswick, Canada, 242p.
- Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- LeBas, M.J., LeMaitre, R.W., Streckeisen, A., and Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *J. Pet.*, 27, 745-750.
- Lo, C.-H., Chung, S.-L., Lee, T.-Y. and G.-Y. Wu 2002. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events. *Earth Planet. Sci. Lett.* 198, 449-458.
- Sutthirat, C., Charusiri, P., Farrar, E., and Clark, A.H. 1994. New ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology and Characteristics of some Cenozoic Basalts in Thailand, *in* Proceeding of International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia. Bangkok, Thailand, 306-321.
- Sutthirat, C., Charusiri, P., Pongsapitch, W., Farrar, E., and Landgridge, R. 1995. A Late Pliocene Ko Kha - Sop Prap and Nam Cho Basaltic Eruption, Northern Thailand: Evidences from Geology and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology, *in* Proceeding of International Symposium Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (Geo-Indo '95). Khon Kaen, Thailand, 247-253.
- Pearce, J.A. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams, *in* Trace element geochemistry of volcanic rocks; applications for massive sulphide exploration, Short Course Notes - Geological Association of Canada, 12, 79-113.

- Pearce, J.A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *in* Thorpe, R.S., ed., *Andesites*, Chichester, Wiley, 524-548.
- Wood, D.A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lava of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50, 11-30.
- Sutthirat, C., Droop, G., and Henderson, M. 2005. Thermobarometry and Speedometry of Thai Corundum-Relted Basalts: Evidences for their Petrogenesis, *in* *Proceeding of International Symposium Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina (GEO-INDO 2005)*. Khon Kaen, Thailand, 330-337.
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 4, 325-343.

