



07

เทคโนโลยีการถลุงเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาต๋ม เมืองลองโบราณ จังหวัดแพร่*

The Ancient Iron Smelting Technology at
Ban Na Tum Archaeological Site, Ancient
Muaeng Long Town, Phrae Province,
Thailand

Received: August 1, 2022 | Revised: October 2, 2022 | Accepted: October 19, 2022

พลพยุหะ ไชยรส**

Phonphayuha Chaiyarot

* บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท เรื่อง “โบราณโลหะวิทยาของเมืองลอง: ความสำคัญของเหล็กต่อประวัติศาสตร์และผู้คนในดินแดนล้านนา”

This academic article is part of a Master's thesis titled “Archaeometallurgy of Muang Long: The Significance of Iron in the History and People of Lanna”

** นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาโบราณคดี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อีเมล: PhonphayuhaChon@gmail.com

Master's student of Program in Archaeology, Graduate School, Silpakorn University.
email: PhonphayuhaChon@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นผลการศึกษาทางด้านโบราณโลหวิทยา (Archaeometallurgy) โบราณคดี (Archaeology) และประวัติศาสตร์ (History) ของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มซึ่งเป็นแหล่งถลุงเหล็กของเมืองลองโบราณ จังหวัดแพร่ ที่มีการถลุงเหล็กอยู่ในช่วงพุทธศตวรรษที่ 23–25 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างภาพกระบวนการถลุงเหล็กสมัยโบราณ (Chaîne opératoire of iron ingot production) โดยวิเคราะห์ตีความ และสังเคราะห์องค์ความรู้ จากข้อมูลหลักฐานทางโบราณโลหวิทยา หลักฐานทางโบราณคดี หลักฐานทางประวัติศาสตร์และผลการวิเคราะห์ทางโบราณโลหวิทยา

จากการศึกษาพบว่าการถลุงเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มใช้เตาถลุงเหล็กทรงสูง (Shaft Furnace) ที่มีการสร้างช่องระบายตะกรันยื่นออกทางด้านหน้าเตา สูงประมาณ 70-80 เซนติเมตร มีระบบเครื่องสูบลมแบบสองลูกสูบหรือเส้า (Double piston bellows) โดยมีช่องสอดท่อลมและปลายหุ้มท่อลมดินเผาอยู่ทางด้านหลังเตาเพียงช่องเดียว สำหรับเทคนิคการถลุงเป็นการถลุงเหล็กแบบทางตรง (Direct Process) อุณหภูมิถลุงอยู่ที่ 1,175–1,200 องศาเซลเซียสสินแร่เหล็กที่นำมาถลุงเป็นชนิดฮีมาไทต์ (Hematite) ซึ่งมีการทำเหมืองอยู่ที่ดอยเหล็ก มีอัตราส่วนระหว่างสินแร่เหล็กและเชื้อเพลิง (ถ่านไม้เนื้อแข็ง) อยู่ที่ 1 ต่อ 2 การถลุงเหล็กบ้านนาตุ้มเป็นการผลิตมวลเหล็ก (Iron Ingot) ทั้งเพื่อการส่งส่วยเหล็กแก่ราชสำนักเมืองนครลำปางและใช้แปรรูปเป็นเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือนท้องถิ่น เมืองลองโบราณสามารถผลิตมวลเหล็กได้ปริมาณอย่างน้อย 40 หาบ หรือ 2.4 ตัน ต่อปี โดยมวลเหล็กที่ผลิตจากเมืองลองถือว่ามีความคุณภาพ ดังปรากฏในงานวรรณกรรม เช่น คำวอลงคัมพหลวงของเจ้าหลวงนครแพร่ของศรีวิไชยกวี ในราชสำนักแพร่ เมื่อ พ.ศ. 2453 กล่าวว่า “...ห้าสิบสอง เหล็กลองไหลด้นข้ามคกงะพันมากนัก...” หรือสำนวนโบราณของชาวล้านนาที่กล่าวว่า “เหล็กดีเมืองลอง ทองดีเมืองพะเยา” เป็นต้น

คำสำคัญ: เมืองลอง, เหล็ก, การถลุงเหล็ก, การถลุงเหล็กทางตรง, การส่งส่วย

A b s t r a c t

This article aims to provide an Archaeometallurgical, Archaeological, and Historical study of Ban Na Tum Archaeological Site, which was Maung Long's iron smelting site from 18th-20th century. The objective of the article is to reconstruct the ancient iron smelting process (Chaîne opératoire of iron ingot production) by using archaeometallurgical data, archaeological evidence, and historical record.

The result demonstrates that Ban Na Tum's smelting furnace structure is 80 cm high and takes a shaft furnace shape with a double piston bellow system. The smelting technique is a "Direct Process" and requires higher temperatures of approximately 1,175-1,200 celsius degrees. The iron ore is hematite, which was mined at Doi Lek Mountain. The ratio of iron ore and fuel is 1: 2. The iron ingot is both the annual tribute payment to the ruler of Muang Lampang and the material used to produce iron equipment in Muang Long. Muang Long could produce at least 2.4 tons of iron ingot per year. The iron of Maung Long is of good quality. The Lanna people always say "The best quality iron is from Muang Long! The best quality gold is from Maung Phayao!". Moreover, in some Northern Thailand literature, such as "The poem of the ruler of Maung Phrae's palace celebration; Sriwijaya, 1832 A.D.", describes iron from Maung Long as not only strong but also sacred.

Keywords: Maung Long, Iron, Iron smelting, direct process smelting and tribute payment

บทนำ

“เหล็ก” ถือเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสังคมจากชุมชนหมู่บ้านเข้าสู่ชุมชนเมืองด้วยสัมพันธ์กับเทคโนโลยีและระบบการผลิตที่ต้องอาศัยองค์ประกอบต่างๆ เช่น ความรู้เชิงช่าง แรงงาน ช่างและเครือข่ายที่สนับสนุนทรัพยากรที่จำเป็นต่อการผลิต รวมถึงเครือข่ายการแลกเปลี่ยนสิ่งของทั้งภายในและภายนอกรัฐ

ข้อมูลทางโบราณคดีและประวัติศาสตร์ของดินแดนล้านนาหรือพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย แสดงถึงบทบาทสำคัญของเหล็กต่อการเกิดขึ้นและคงอยู่ของรัฐในบริเวณนี้ในหลายมิติ อย่างไรก็ตามที่ผ่านมาไม่เคยมีการศึกษาเหล็กในฐานะของเทคโนโลยีสมัยโบราณ โดยเฉพาะเรื่องกระบวนการผลิตมวลเหล็ก (Chaîne opératoire of iron ingot production) จากสินแร่เหล็ก (Iron Ore) สู่การเป็นมวลเหล็ก (Iron ingot) ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและอิทธิพลของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการพัฒนาเทคโนโลยีเหล็ก โดยประยุกต์ใช้แนวคิดและวิธีวิทยาวิจัยทางโบราณโลหะวิทยา (Archaeometallurgy) ร่วมกับการวิเคราะห์หลักฐานทางโบราณคดีและประวัติศาสตร์ (Miller 2009: 154-155) ถือเป็นประเด็นการศึกษาใหม่ในงานศึกษาโบราณคดีพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลการศึกษาเทคโนโลยีการถลุงเหล็กโบราณของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มซึ่งเป็นแหล่งถลุงเหล็กของเมืองลองโบราณ จังหวัดแพร่ โดยการสร้างภาพเทคโนโลยีการถลุงเหล็กที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทางโบราณโลหะวิทยา (การวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมี การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ การคำนวณประสิทธิภาพการถลุงและอุณหภูมิ ฯลฯ) หลักฐานทางโบราณคดีที่ได้จากการสำรวจและขุดค้นทางโบราณคดี รวมทั้งหลักฐานทางประวัติศาสตร์ที่ค้นพบ ซึ่งแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มถือเป็นแหล่งโบราณคดีที่มีศักยภาพทางองค์ความรู้เรื่องการถลุงเหล็กสมัยโบราณในช่วงยุคสุดท้าย (พุทธศตวรรษที่ 23-25) ของภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย (ดินแดนล้านนา) ก่อนการเข้ามาของเหล็กอุตสาหกรรมสมัยใหม่จากตะวันตกที่จะทำให้การถลุงเหล็กในระดับรัฐลดบทบาทในการผลิตลงไป

การถลุงเหล็กของเมืองลองในสมัยรัตนโกสินทร์

เอกสารทางประวัติศาสตร์หลายฉบับโดยเฉพาะบันทึกการเดินทางชาวตะวันตกต่างระบุว่าพื้นที่เมืองลอง (ภายใต้การปกครองของราชสำนักเมืองนครลำปางหรือเมืองละคอน) เป็นแหล่งทรัพยากรแร่เหล็กที่สำคัญและมีคุณภาพของดินแดนล้านนา เช่น บันทึกของคาร์ล อัลเฟรด บ็อค (Carl Alfred Bock) กล่าวว่า “...รอบๆ พื้นที่เมืองละคอน นอกจากจะมีป่าไม้ที่

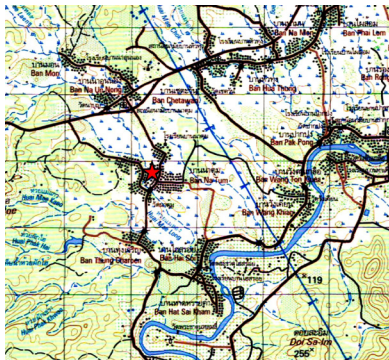
อุดมสมบูรณ์แล้ว ยังมีแหล่งสินแร่มากมาย ใกล้เคียง เมือง (ละคอน) ปรากฏ การทำเหมืองเหล็กที่อุดมไปด้วยสินแร่เหล็กในปริมาณมาก...” (Bock 1884: 174, แปลโดยผู้เขียน) หรือบันทึกของฮิวจ์ เทย์เลอร์ (Hugh Taylor) ที่กล่าว ไว้ในหนังสือ “Missionary in Siam vol.1” ความว่า “...จากเมืองแพร่ เรา ได้เดินทางต่อไปยังเมืองลอง เมืองทางตะวันตกซึ่งได้ระงับการทำเหมืองแร่ เหล็กในเมืองหลายปีมาแล้วเนื่องจากได้มีการนำเข้าเหล็กหลอม ซึ่งคุณภาพ อาจไม่ดีเท่าไรแต่สามารถขนส่งไปกรุงเทพได้มากกว่า...” (Taylor 1909, อ้างถึงใน ปรีดี พิศภูมิวิถี และคณะ 2561: 156)

นอกจากนี้ในงานวรรณกรรมยังปรากฏการกล่าวถึงคุณภาพของเหล็ก ลองอีกด้วย เช่น คำฉลองคัมหลวงของเจ้าหลวงนครแพร่ของศรีวิไชยภวีนี ราชสำนักนครแพร่ เมื่อ พ.ศ. 2453 ความว่า “...มีเจ็ดสิบสอง เหล็กลองกล่ม เกลี้ยงจตจันเจียงแซ่ไว้...ห้าสิบสอง เหล็กลองไหลด้นข้ามคงกะพันมากนัก... ถ้วนเจ็ดสิบสอง เหล็กลองแข็งนักดำหนักมึงแก้วมงคล...” (ภูเดช แสนสา 2554: 137-138) หรือพระพรหมโวหารกวีสำคัญของราชสำนักนครลำปาง กล่าวถึงเหล็กลองไว้ว่า “...ชาติเหล็กดำปิว (เหล็กลองน้ำหนึ่งจัดเป็นเหล็กที่ นำไปตีทำดาบ) บ่จัดเลือกเนื้อ ปั้นเก่าเกื้อโบราณ...จักขัดขวาง บ่เมื่อสู่ห้อง กลัวเหล็กเมืองลอง ว่องคึด” (อุดม รุ่งเรืองศรี 2524: 9)

ด้วยคุณภาพของเหล็กลองทำให้เมืองลองต้องส่งส่วยเหล็กต่อหัวเมือง ที่ปกครองตนตั้งแต่สมัยล้านนาจนถึงสมัยรัตนโกสินทร์ (ภูเดช แสนสา 2554: 247-248) โดยในสมัยรัตนโกสินทร์เมืองลองต้องส่งส่วยเหล็กให้ราชสำนัก นครลำปางปีละ 40 หาบ หรือประมาณ 2,400 กิโลกรัม (2.4 ตัน) ดังปรากฏ ในจดหมายเหตุความว่า “เขตแขวงเมืองลอง นครลำปางต่อกันกับเมืองลอง นั้นเรียกว่า หนองม้า หนองม้าขึ้นอยู่กับยอดเขาทางที่จะไปเมืองลอง มีเขาคั่นกันอยู่ถึงเมืองเถิน ที่เมืองลองเสียส่วยแก่เมืองนครมีแต่เหล็กสิ่งเดียว ถ้ามี ราชการขึ้นก็จะเกณฑ์เอากับแสนหลวงเจ้าเมืองลองตามการใหญ่แลน้อย ถ้า เป็นการใหญ่ก็เคยเกณฑ์ตั้งแต่ 50 40 คนลงมา บัญชีคนชะกันสำมะโนครัว เมืองลองไม่มีมาแต่เดิมจะมีคนมาน้อยเท่าไรก็เรียกส่วยปีละ 40 หาบ

เท่านั้น...เมืองเววาทะภาชี มีพงศาวดารมาแต่ครั้งก่อน แต่สินค้าที่เมืองลอง มีไม้ซุงเหล็ก เข้าเปลือก ฝ้าย ยาสูบ ขี้ผึ้ง ราคาเหล็กขังละสลึง...” (พระพรหมบริรักษ์กราบทูลสมเด็จพระเจ้า กจข.ร.5 ม 55 นก/33(20)) นอกจากการส่งส่วยเหล็กแล้วการถลุงเหล็กของเมืองลองยังเป็นการผลิตเพื่อใช้ในท้องถิ่นครัวเรือนอีกด้วย เช่น มีดพรว้า ดาบหรือเครื่องมือทางเกษตรกรรม เป็นต้น (UDS and Thai Royal Department of Mines 1975: 75) โดยการถลุงเหล็กดำเนินการที่แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม ในท้องที่หมู่ที่ 1 บ้านนาตุ้ม ตำบลบ่อเหล็กทอง อำเภอลอง จังหวัดแพร่

การดำเนินงานทางโบราณคดีแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม



แผนที่ที่ 1 ที่ตั้งแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มในแผนที่ทางทหาร มาตราส่วน 1: 500000 ลำดับชุด L7018 ระวาง อำเภอลอง 4945 II

(ที่มา: กรมแผนที่ทหาร กระทรวงกลาโหม)



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายมุมสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Drone) แสดงที่ตั้งของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม อำเภอลอง จังหวัดแพร่ (กรอบสีแดง)

(ที่มา: สำนักศิลปากรที่ 7 เชียงใหม่ กรมศิลปากร)

แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม ตั้งอยู่ริมห้วยแม่ลอง ด้านหลังโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านนาตุ้ม จากการสำรวจทางโบราณคดีของกรมศิลปากรเมื่อ พ.ศ. 2561 พบเตาถลุงเหล็กไหลพื้นผิวดิน จำนวน 2 เตา ร่วมกับตะกรัน ทั้งหิน พะเนินหิน ท่อดินเผาหุ้มปลายท่อลม (Tuyère) และเศษภาชนะดินเผาเนื้อแกร่งพิมพ์ลายสีน้ำเงินได้เคลือบซึ่งเป็นที่นิยมในประเทศจีนและประเทศญี่ปุ่นในราวพุทธศตวรรษที่ 25 (พลพยุหะ ไชยรส 2561:

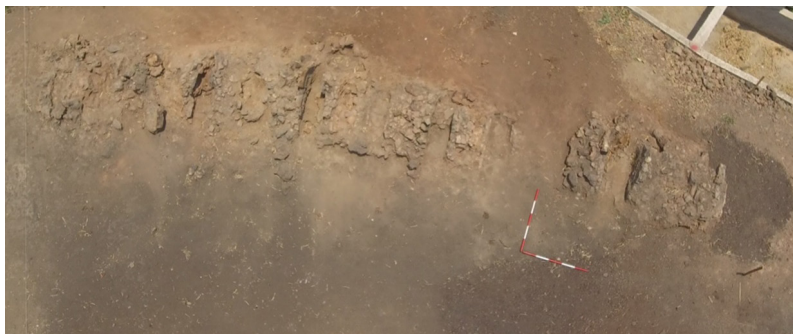
38-44) ต่อมาใน พ.ศ. 2562 กรมศิลปากรได้ดำเนินการขุดค้นทางโบราณคดี โดยค้นพบเตาถลุงเหล็กจำนวน 9 เตา พร้อมกับหลักฐานทางโบราณคดีอื่นๆ เช่น ปลายหุ้มท่อลมดินเผา เศษเครื่องถ้วยจีนสมัยราชวงศ์ซิง เศษเครื่องถ้วยล้านนา เศษสินแร่เหล็กและตะกรันประเภทต่างๆ มีการกำหนดอายุตัวอย่างถ่านภายในตะกรันจำนวน 1 ชิ้น ที่ได้จากการขุดค้นทางโบราณคดี ด้วยเครื่องเร่งและแยกจำนวนไอโซโทปของคาร์บอน (Accelerator Mass Spectrometry-AMS) ผลจากห้องปฏิบัติการบ่งชี้ว่ากิจกรรมการถลุงเหล็กที่แหล่งโบราณคดีแห่งนี้อยู่ในช่วงพุทธศตวรรษที่ 23-24 ($202 \pm 16\text{BP}$) มีความสอดคล้องกับอายุของเศษเครื่องถ้วยจีนเนื้อแกร่งเขียนลายสีน้ำเงินใต้เคลือบจากแหล่งเตาในมณฑลฝูเจี้ยนที่พบจากการขุดค้นทางโบราณคดีโดยกำหนดอายุไว้ในสมัยราชวงศ์ซิง (พุทธศตวรรษที่ 23-24) (จตุรพร เทียมทินกฤต และ พลพยุหะ ไชยรส 2562: 143) ทั้งนี้ การถลุงยังคงมีต่อเนื่องมาจนถึงพุทธศตวรรษที่ 25 ดังปรากฏเศษเครื่องถ้วยเนื้อแกร่งพิมพ์ลาย (Transfer Print) และหลักฐานเอกสารระบุว่าในช่วงพุทธศตวรรษที่ 25 เมืองลองต้องจัดส่งมวลเหล็กที่ถลุงได้ให้เมืองนครลำปางจำนวน 40 หาบเป็นประจำทุกปีดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



ภาพที่ 2 โครงสร้างเตาถลุงเหล็กในแหล่ง



ภาพที่ 3 ช่องสอดปลายหุ้มท่อลมดินเผาต้านท้ายเตาถลุงเหล็ก



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายมุมสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Drone) แสดงที่ตั้งของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม (ที่มา: สำนักศิลปากรที่ 7 เชียงใหม่ กรมศิลปากร)

การวิเคราะห์ทางโบราณโลหวิทยาเกี่ยวกับตะกรันเหล็ก

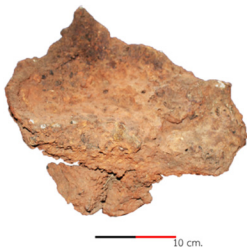
เพื่อสร้างภาพเบื้องต้นของเทคโนโลยีการถลุงเหล็กที่แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม การวิเคราะห์จึงเน้นที่ตัวอย่างตะกรันเหล็ก จำนวนทั้งสิ้น 105 ตัวอย่าง โดยวิเคราะห์ใน 2 ประเด็น คือลักษณะทางกายภาพพระดัมมหภาค และจุลภาค (Macrostructure and Microstructure Analysis) และองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition Analysis) โดยมีผลการศึกษาเบื้องต้น ดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างตะกรัน สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

1.1 ตะกรันก้อนเตา (Slag Cake) มีลักษณะเป็นก้อนตะกรันที่มักมีก้อนถ่านปะปนร่วมด้วย ผิวด้านบนมักแบนราบและขรุขระ ผิวด้านข้างของตะกรันมักโค้งเว้าซึ่งเป็นการก่อตัวจากการสัมผัสกับผนังของเตาถลุง ในบางก้อนอาจปรากฏจุดสีส้มซึ่งเป็นสนิมอยู่ด้านบนก้อนตะกรัน ซึ่งพื้นผิวดังกล่าวแต่เดิมเป็นพื้นผิวที่มีการสัมผัสหรืออยู่ติดกับก้อนเหล็กแข็งหรือกึ่งของแข็งมีตะกรันปะปน (Bloom) ในบางกรณีผิวใต้ตะกรันมีการก่อตัวโดยไม่สัมผัสกับก้อนเตาซึ่งในกรณีนี้จะเกิดก้อนตะกรันที่มีลักษณะไหลย้อย (Slag Flow) ต่อออกจากผิวด้านใต้ของตะกรันได้

1.2 ตะกรันหยดน้ำ (Slag Prill) เป็นตะกรันที่มีลักษณะคล้ายหยดน้ำหรือการไหลของน้ำตาเทียน เป็นตะกรันที่เกิดการเย็นตัวอย่างฉับพลัน มีลักษณะเป็นแท่งยาวปรากฏร่องรอยการไหลตัวของตะกรันเหลวในแนวตั้ง มีสีเทา สีเขียวอมเทาหรือสีดำ

1.3 ตะกรันแผ่น (Slag Tap) เป็นตะกรันเหลวที่ถูกระบายออกจากช่องระบายตะกรันด้านหน้าเตาถลุงเหล็ก อาจมีการก่อตัวด้านนอกหรือด้านในเตาถลุง ด้านบนของก้อนตะกรันจะปรากฏริ้วรอยคล้ายน้ำไหลแสดงการไหลหนืด (ไหลอย่างช้าๆ) ของตะกรันหลอมเหลว ส่วนด้านใต้มักมีเศษทราย กรวด หรืออินทรีย์วัตถุปะปน ซึ่งเกิดจากการไหลหนืดของตะกรันหลอมเหลวที่ไหลออกนอกตัวเตา ภายในเนื้อตะกรันมักมีฟองอากาศขนาดใหญ่ เนื้อตะกรันมักมีสีดำ สีเทาอมดำ หรือสีเทาอมแดง



ภาพที่ 5 ตะกรันก้อนเตา
(Slag Cake)



ภาพที่ 6 ตะกรันหยดน้ำ
(Slag Prill)

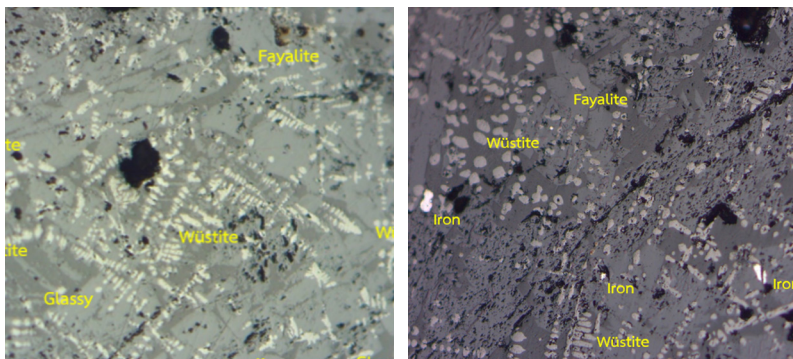


ภาพที่ 7 ตะกรันแผ่น
(Slag Tap)

2. ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของตะกรัน

ผู้เขียนได้สุ่มเลือกตัวอย่างตะกรันจากทุกประเภท จำนวน 20 ชิ้น มาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยนำไปขึ้นเรือนแบบเย็นในเรซิน มีการขัดหยาบและละเอียดแล้วจึงส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ รุ่น “Zeiss Axio Lab. A1” และ บันทึกภาพด้วยกล้อง “AxioCam ERc 5s” เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างหรือเฟส (Phase) ที่ปรากฏในเนื้อตะกรัน การระบุเฟสในที่นี้ใช้การเปรียบเทียบกับลักษณะฐานของเฟสในรายงานผลการศึกษาตะกรันจากแหล่งโบราณคดีอื่นๆ ทั้งในและต่างประเทศ

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างตะกอนพบว่ามีความคล้ายคลึงกันทั้งหมด โดยพบเฟสทั้งหมด 4 เฟส คือ ฟายาไลต์ (Fayalite) ที่มีลักษณะเป็นผลึกแท่งยาวขนาดใหญ่ (Elogated) วูสไทต์ (Wüstite) ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ “Rounded Dendrites” เฟสที่คล้ายแก้ว (Glassy Matrix) และโลหะเหล็ก (Iron) โดยผลึกฟายาไลต์ที่ใหญ่ สะท้อนให้เห็นว่าตะกอนที่อยู่ในเตาอาจถูกปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ส่งผลให้เฟสของฟายาไลต์ (Fayalite) ขยายใหญ่ ส่วนโลหะเหล็กจะมีลักษณะกลม สะท้อนแสง เป็นเหล็กที่ตกค้างที่บางส่วนไม่สามารถเคลื่อนที่ไปรวมตัวกันกับกลุ่มเหล็กก้อนหลักได้ในขณะทำการถลุง จึงคงหลงเหลือค้างอยู่ในเนื้อตะกอนซึ่งมักปรากฏเป็นจำนวนน้อย



ภาพที่ 8 และ 9 ลักษณะเฟสแบบต่างๆ ที่ปรากฏในโครงสร้างผลึกตะกอนเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอน

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากตัวอย่างตะกอนเหล็กจำนวน 105 ชิ้น ปฏิบัติการด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แบบมือถือ (hHandheld x-ray Fluorescence: HHXRF) ยี่ห้อ “Olympus” รุ่น “Delta Professional” ซึ่งใช้ “Rh anode x-ray tube” เป็นแหล่งกระตุ้นพลังงานและหัววัดรังสีเอ็กซ์ (Detector) เป็นแบบ “SDD” (Silicon drift Detector) การวิเคราะห์ใช้โหมด “Geochem” ตั้งค่าพลังงาน

ที่ 40 kV บีมที่ใช้วิเคราะห์มีขนาด 10 และ 3 มิลลิเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่วิเคราะห์และใช้เวลาในการวิเคราะห์แต่ละตัวอย่างนาน 90 วินาที โดยยิงรังสีเป็นจำนวน 3 ครั้งต่อตัวอย่าง แล้วนำค่าที่ได้ทั้งสามค่ามาหาค่าเฉลี่ยด้วยเครื่องวิเคราะห์รับการตรวจเทียบ (Calibration) ค่าปริมาณในผลการดำเนินงานนี้เลือกแสดงเฉพาะออกไซด์หลักบางตัวที่มีนัยยะสำคัญต่อกระบวนการถลุงเหล็ก ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO₂) โพแทสเซียมออกไซด์(K₂O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมงกานีสออกไซด์ (MnO) และเหล็กออกไซด์ (FeO) โดยผลรวมทั้งหมดจะคำนวณให้มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 100 (Normalisation) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างได้ และเป็นการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ (semi-quantitative)

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตะกั่วเหล็กแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มพบว่ามีปริมาณเหล็กออกไซด์ (FeO) มีปริมาณมากที่สุด อยู่ระหว่าง 63–86 wt% ซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO₂) อยู่ระหว่าง 3–20 wt% อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) อยู่ระหว่าง 1–8 wt% แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) อยู่ระหว่าง 2–5 wt% แคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ระหว่าง 0.5–6 wt% แมงกานีสออกไซด์ (MnO) อยู่ระหว่าง 1–4 wt% และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) อยู่ระหว่าง 0.1–2 wt% โดยมีค่าเฉลี่ยของออกไซด์ต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วเหล็กแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม (จำนวน 105 ชิ้น)

N=105	องค์ประกอบทางเคมี								
	wt%							F-Value	RII
	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MnO	FeO		
Min	2.065170801	1.905713937	3.822154511	0.154539572	0.56728337	0.06811018	63.72841862	1.92	0.14
Max	5.189327601	8.204106992	20.66761298	2.648927997	6.964012135	4.273968697	86.15302232	2.51	0.54
Average	3.234229896	5.148998385	10.93011947	0.890793322	2.011909872	0.917158375	76.86679068	2.12	0.33
SD	0.60	1.22	3.10	0.41	1.17	0.61	4.52		

ผลองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างตะกรัน สอดคล้องกับลักษณะของเฟสที่ปรากฏจากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างตะกรันที่มีเฟสฟายาไลต์และวูสไทต์เป็นเฟสหลักและตัวอย่างวิเคราะห์มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีความคล้ายคลึงกันระหว่างตัวอย่างทั้งหมด โดยสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือค่า “SD” (Standard Deviation) ที่ค่อนข้างต่ำ จึงไม่ปรากฏนัยยะที่แสดงความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีระหว่างประเภทของตะกรันทั้งหมด

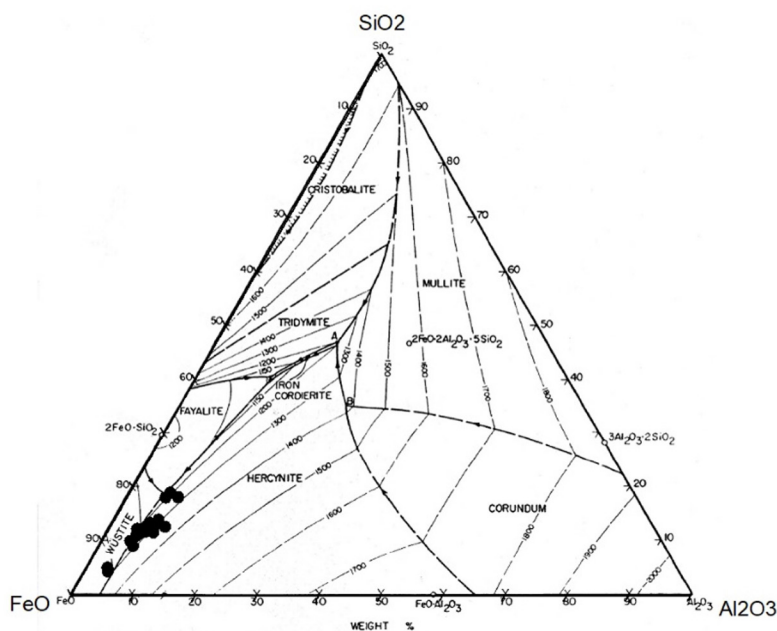
ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างที่มีเฟสฟายาไลต์และวูสไทต์รวมกับองค์ประกอบทางเคมีของการเกิดตะกรันเหล็กที่พบแหล่งโบราณคดีบ้านนาคุ้มมีความสัมพันธ์กับเทคนิคการถลุงเหล็กด้วยวิธีทางตรง (Direct Process) ซึ่งเป็นการถลุงได้ผลผลิตเป็นก้อนเหล็กอยู่ในรูปของแข็งหรือกิ่งของแข็งปะปนตะกรัน (Bloom) มีปริมาณคาร์บอนไม่สูงและไม่เท่ากันทั่วทั้งก้อน ซึ่งจำเป็นต้องผ่านกระบวนการตีเหล็กขั้นต้น (Primary Smithing) เพื่อกำจัดตะกรันออก เพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเหล็กและตีอัดเหล็กให้รวมเป็นมวลเหล็ก ก่อนการนำไปใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้ต่อไป โดยวิธีดังกล่าวพบหลักฐานทางโบราณคดีตั้งแต่สมัยเหล็กแรกเริ่มของมนุษย์ในเขตโลกเก่า (Tylecote 1992: 47) รวมถึงประเทศไทยที่รู้จักการนำสินแร่เหล็กมาเปลี่ยนเป็นมวลเหล็กเมื่อประมาณ 2,500 ปีมาแล้ว (สุรพล นาถะพินิจ 2550: 174)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมียังสะท้อนให้เห็นข้อสังเกตเบื้องต้นบางประการเกี่ยวกับเทคนิคการถลุงเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาคุ้ม ดังนี้

อุณหภูมิในการถลุงเหล็ก

อุณหภูมิที่ใช้ในการถลุงเหล็กสามารถคาดคะเน (Estimate) โดยใช้ข้อมูลปริมาณออกไซด์ของตะกรันจำนวน 3 ชนิด คือ เหล็กออกไซด์ (FeO) ซิลิกอนไดออกไซด์หรือซิลิกา (SiO_2) และอะลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินา (Al_2O_3) วาด (plot) ลงบนแผนภูมิสมมูลของเฟส “FeO-SiO₂-Al₂O₃”

(Ternary Phase Diagram) ที่ปรากฏข้อมูลอุณหภูมิโดยประมาณของ ตะกรันที่มีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในจุดหลอมเหลว



แผนภูมิที่ 1 จุด Plot อุณหภูมิเตาถลุงเหล็กแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มในแผนผังสมดุลของเฟส “FeO-SiO₂-Al₂O₃” (Ternary Phase Diagram)

จากผลการคาดคะเนข้างต้นทำให้ทราบว่าในระบบการถลุงเหล็กของ แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม มีอุณหภูมิในการถลุงเหล็กทางตรงประมาณ 1,175–1,200 องศาเซลเซียส (Joosten 2004: 39) ก่อให้เกิดก้อนตะกรัน เหล็กแบบฟายาลไลต์ (Fayalite) หรือตะกรันแบบไหลที่มีความหนืดต่ำ สามารถเคลื่อนตัวได้อิสระภายในเตาถลุง ซึ่งเป็นประโยชน์ในการแยกโลหะ เหล็กออกจากตะกรันและมลทินต่างๆ โดยตะกรันที่มีความหนืดต่ำสามารถ เคลื่อนย้ายเหล็กออกไซด์ไปรวมตัวกันเป็นก้อนเหล็ก (โดยปกติมักรวมตัว อยู่บริเวณที่มีลมอัดเข้ามาในระบบเตาถลุง หรือบริเวณปลายหุ้มท่อลมดิน เพา (Tuyère)) ได้ดีมากกว่าตะกรันที่มีความหนืดสูงหรือตะกรันที่มีการ

หลอมละลายของซิลิกาจากผนังเตาถลุงสูงและตะกรันเหล็กแบบหนืดต่ำมักจะไม่หลงเหลือเหล็ก (Iron) หรือหลงเหลือน้อยมากในเนื้อตะกรันเมื่อส่องตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

ข้อสังเกตเรื่องสินแร่เหล็ก

จากการขุดค้นทางโบราณคดีพบเศษก้อนแร่เหล็ก กระจายตัวอยู่ทางด้านท้ายเตาถลุงเหล็ก โดยก้อนแร่เหล็กที่พบมีเนื้อสีแดงอมน้ำตาล ขนาดระหว่าง 1-3 เซนติเมตร บางก้อนมีสภาพผุกร่อนและมีคราบสีเหลือง เมื่อนำแม่เหล็กมาทดสอบการเหนี่ยวนำแม่เหล็กพบว่าตัวอย่างแร่ไม่มีปฏิกิริยากับแม่เหล็กจึงเป็นไปได้สูงว่าเป็นแร่เหล็กชนิดฮีมาไทต์ (Hematite) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแร่เหล็กพบว่ามีความใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เป็นสินแร่เหล็กที่มีคุณภาพสูงโดยมีปริมาณเหล็กออกไซด์เฉลี่ย 89 wt%

ตารางที่ 2 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมี (Wt%) ของสินแร่เหล็กที่ขุดค้นพบในแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม จำนวน 10 ตัวอย่าง

ID	POSITION	องค์ประกอบทางเคมี								
		wt%								
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MnO	FeO	รวม	
080620_#66	บ้านนาตุ้ม	4.2393128	3.915975383	3.664490726	0.430637538	0.103827237	0.165021837	87.48073448	100	
080620_#67	บ้านนาตุ้ม	3.799093458	2.465242463	3.608543316	0	0.159585744	0.051686726	89.91584829	100	
080620_#68	บ้านนาตุ้ม	3.795689702	2.737276228	2.725110556	0.024574658	0.115938855	0.05231239	90.54909761	100	
080620_#69	บ้านนาตุ้ม	3.490331428	2.747456834	4.386497606	0.014385825	0.115794103	0.053416221	89.19211798	100	
080620_#71	บ้านนาตุ้ม	4.657844023	2.228179838	1.837063164	0	0.1278833	0.054400774	91.0946289	100	
080620_#78	บ้านนาตุ้ม	4.192755541	4.493032463	4.971251265	0.166042017	0.110435179	0.031584684	86.03489885	100	
080620_#73	บ้านนาตุ้ม	3.737897669	3.181944535	3.536808238	0.09297429	0.099834988	0.055003874	89.29553641	100	
080620_#75	บ้านนาตุ้ม	3.819063354	3.24326611	3.313771895	0.050411636	0.119272286	0.123385124	89.33082959	100	
080620_#76	บ้านนาตุ้ม	4.108336135	2.318111451	7.080568144	0	0.134037335	0.095363892	86.26358304	100	
080620_#77	บ้านนาตุ้ม	4.318736863	2.476232278	1.865975982	0	0.098462506	0.065954623	91.17463775	100	
ค่าเฉลี่ย		4.015906097	2.980671758	3.699008089	0.077902596	0.118507154	0.074813014	89.03319129	100	

นอกจากนี้ข้อมูลทางธรณีวิทยาบ่งชี้ว่ามีแหล่งสินแร่เหล็กหรือดอยเหล็กซึ่งอยู่ห่างออกไปทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มประมาณ 1 กิโลเมตร โดยเป็นแหล่งทรัพยากรสินแร่เหล็กที่มีคุณภาพสูงจากการสำรวจทางธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณีเมื่อ ปี พ.ศ. 2518 พบว่าสินแร่เหล็กที่พบในดอยเหล็กมีค่าเหล็กออกไซด์เฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 70 (UDS and Thai Royal Department of Mines 1975 : 76) และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพสินแร่เหล็กขององค์การกำหนดมาตรฐานสากล (International Organization for Standard) มาตรฐานที่ “ISO/R1248-1970.E” ซึ่งจัดแบ่งตามกลุ่มสีโดยสินแร่เหล็กที่ได้จากดอยเหล็กถือเป็นสินแร่เหล็กสีแดง (Red Iron Ore) เกรด “B” ที่มีเหล็กออกไซด์ในก้อนแร่เฉลี่ยไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70-90 (พจนีย์ ไพศาลตันติวงศ์ 2546: 21)

แหล่งแร่เหล็กดอยเหล็กมีการกล่าวถึงกิจกรรมการทำเหมืองตั้งแต่พุทธศตวรรษที่ 23 เป็นอย่างน้อย(ภูเดช แสนสา 2554: 119-120) สอดคล้องกับการสำรวจทางโบราณคดีที่พบร่องรอยการทำเหมืองบนดอยเหล็ก จึงมีความเป็นไปได้ว่าช่วงถลุงเหล็กจากแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มจะใช้ประโยชน์จากสินแร่เหล็กของดอยเหล็กมาถลุง

ตารางที่ 3 แสดงค่าองค์ประกอบทางเคมี (Wt%) ของสินแร่เหล็กที่พบในแหล่งโบราณคดีดอยเหล็ก จำนวน 4 ตัวอย่าง

ID	POSITION	องค์ประกอบทางเคมี						
		wt%						
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	MnO	FeO
080620_#54	ดอยเหล็ก	4.245524656	2.187088459	1.777740352	0.009941311	0.154031845	0.001871306	91.62380207
080620_#80	ดอยเหล็ก	4.721258753	2.851453306	9.430831222	0	0.164309154	0.326982227	82.50516534
080620_#56	ดอยเหล็ก	4.887511061	2.004231155	1.488522553	0	0.121660347	0.077004671	91.42107021
080620_#70	ดอยเหล็ก	2.803496463	2.815477217	2.216439512	0.093330075	0.091892384	0.110941783	91.86842257
ค่าเฉลี่ย		4.164447733	2.464562534	3.72838341	0.025817846	0.132973432	0.129199997	89.35461505



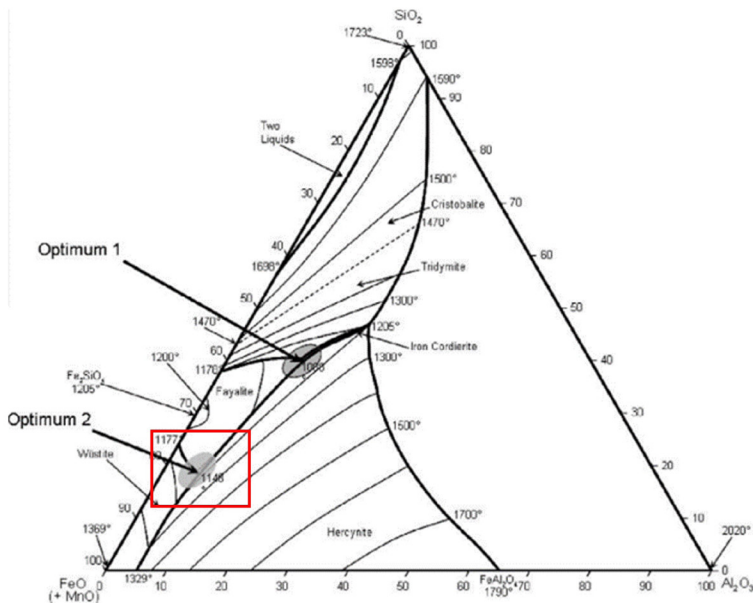
ภาพที่ 10 และ 11 ลักษณะสินแร่เหล็กที่ถูกย่อยแล้วจากการขุดค้นพบในแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม

ประสิทธิภาพในการถลุง

ประสิทธิภาพในการถลุงสามารถวิเคราะห์ได้จากการตรวจสอบและการประเมินความสามารถในการผลิตโลหะเหล็กจากค่า RII หรือ “Reducible Iron Index” ซึ่งเป็นค่ากลางที่มาจากสัดส่วนของเหล็กออกไซด์อิสระที่หลงเหลืออยู่ในตะกรัน มีสูตรคำนวณ คือ $\frac{(2.39 \times \text{SiO}_2)}{(\text{FeO} + \text{MnO})}$ โดยผลการคำนวณค่า RII ของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มมีค่าเท่ากับ 0.33 หรือน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าการถลุงไม่สามารถเปลี่ยนเหล็กออกไซด์อิสระ (Free Iron oxide) ให้กลายเป็นโลหะเหล็กได้ทั้งหมด ทำให้คงเหลืออยู่ในตะกรันมากถึง 60–90 %wt ดังนั้นจึงอาจสะท้อนให้เห็นว่า การถลุงเหล็กที่แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มอาจไม่เข้มงวดหรือไม่จำเป็นที่ช่างจะต้องปรับสภาพภายในเตาถลุง เช่น อุณหภูมิหรือปริมาณลมที่สูบอัดเข้าไปในระบบถลุง เป็นต้น เพื่อเพิ่มผลผลิตจากการถลุงให้ได้เหล็กในปริมาณมาก

นอกจากนี้เมื่อสังเกตตำแหน่งของตะกรันในแผนภูมิเฟส “FeO-SiO₂-Al₂O₃” (Ternary Phase Diagram) จะพบว่าอุณหภูมิของตะกรันของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มเกาะกลุ่มในพื้นที่ที่เรียกว่า พื้นที่ “Optimum 2” ซึ่งมีข้อสังเกตว่าพฤติกรรมของการถลุงในพื้นที่นี้จะใช้ปริมาณเชื้อเพลิงน้อยในอัตราส่วนระหว่างแร่และเชื้อเพลิงที่ 1 : 2 หรือ 1 : 1.2 และไม่มีความเข้มงวด

ในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลาเพื่อให้ตะกรันหลอมเหลวหรืออีกแง่หนึ่งมีความยืดหยุ่นในการปรับลดอุณหภูมิในห้องถลุง และปริมาณของโลหะเหล็กที่ได้จากการถลุงจะมีปริมาณที่น้อยกว่าการถลุงในพื้นที่ “Optimum 1” ที่จะใช้เชื้อเพลิงมากเพื่อสร้างสภาวะภายในเตาให้มีสภาวะที่เอื้อต่อการถลุงสูง สามารถเพิ่มผลผลิตที่เป็นโลหะเหล็กในปริมาณมากได้ (Charlton 2010: 357) ซึ่งการถลุงในช่วงอุณหภูมิ “Optimum 1” อาจมีแรงกดดันให้ช่างถลุงเหล็กต้องหาเชื้อเพลิงเพิ่มมากยิ่งขึ้นและต้องการแรงงานอย่างมากในการสูบลมเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในห้องถลุงให้คงที่ตลอดเวลา เป็นต้น



แผนภูมิที่ 2 จุด Plot อุณหภูมิ ในพื้นที่ “Optimum 2” ของเตาถลุงเหล็กแหล่งโบราณคดีบ้านนาคุ้มในแผนผังสมดุลเฟสของโลหะผสม ทั้ง 3 โลหะ (เหล็กออกไซด์ ซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์) (Ternary Phase Diagram)

(ที่มา: Michael Charlton, “Explaining the evolution of ironmaking recipes - An example from northwest Wales.” *Journal of Anthropological Archaeology* 29 (2010): 357.)

การสร้างภาพกระบวนการถลุงเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม

จากข้อมูลทางโบราณคดี ประวัติศาสตร์ และผลการวิเคราะห์ทางโบราณโลหะวิทยาของตัวอย่างตะกรันและสินแร่เหล็กจากแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มข้างต้น ทำให้สามารถเสนอภาพเบื้องต้นของกระบวนการถลุงเหล็กที่เกิดขึ้นที่แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มได้ดังนี้

1. การทำเหมืองแร่

เหมืองสินแร่เหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มอยู่บริเวณที่เรียกว่า “ดอยเหล็ก” โดยเป็นเหล็กประเภทฮีมาไทต์ที่มีคุณภาพสูง (มีเหล็กออกไซด์เฉลี่ย 89 wt%) โดยมีลักษณะการขุดเหมืองแร่แบบเหมืองขุดเปิดหน้าดิน (Open Cast Mine) มีการเกณฑ์ไพร่เพื่อมาขุดสินแร่โดยกำหนดระยะเวลาขุดไว้ใกล้เคียงกับที่ระบุไว้ในเอกสารโบราณ โดยเฉพาะพื้นเมืองเชียงแสนที่กล่าวถึงการเปิดเหมืองสินแร่เหล็กโบราณของเมืองเชียงแสน ความว่า “...ค้นขุดบ่อ เดือน 3 เข้า เดือน 6 ถอน (ที่) ตั้งตาแหลวมีฉนวน...” (สรสวดี อ่องสกุล 2546: 196-197) กล่าวคือมีการทำการเปิดบ่อเหมืองดอยเหล็กและทำการถลุงเหล็กและเลี้ยงผีเปิดบ่อเหล็กในช่วงเดือน 3 ขึ้น 3 ค่ำ ประมาณช่วงเดือนธันวาคม ซึ่งปัจจุบันก็ยังคงสืบทอดประเพณีเลี้ยงผีเปิดบ่อเหล็กในช่วงระยะเวลาดังกล่าวเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ สะท้อนให้เห็นว่าการทำเหมืองสินแร่เหล็กของเมืองล่องนั้นเป็นการขุดเหมืองเฉพาะกิจ โดยจะทำการเปิดบ่อเหมืองเพื่อนำสินแร่เหล็กไปถลุงในช่วงระยะเวลาหนึ่งของปีเท่านั้น

2. การเตรียมสินแร่ การแต่งสินแร่ เชื้อเพลิง และเทคนิคเคิลเซรามิก (Technical Ceramic)

เป็นการทำความสะอาดสินแร่เหล็กที่จะนำมาถลุงเพื่อคัดส่วนที่ไม่ต้องการ (Gangue) ออก เช่น อินทรียัตถุ เศษก้อนกรวด หิน ฯลฯ ก่อนนำไปถลุง โดยอาจมีการย่อยสินแร่ด้วยการทุบให้เป็นก้อนเล็กละเอียด จากการขุดค้นทางโบราณคดีพบพะเนินหินและทั่งหินสำหรับย่อยแร่เหล็กให้มี

ขนาดเล็กลง โดยพื้นที่ย่อยแรมจะอยู่ทางด้านหลังเตาถลุง แรมเหล็กที่ย่อยแล้ว จะมีขนาดประมาณ 1-3 เซนติเมตร ส่วนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการถลุงสันนิษฐานว่าเป็นถ่านไม้เนื้อแข็งเนื่องจากพบร่องรอยเส้นใยของเศษถ่านไม้เนื้อแข็งบนผิวของตะแกรงบางชิ้น ส่วนเทคนิคเคลือบเซรามิก (Technical Ceramic) เช่น ปลายหุ้มท่อลมดินเผา (Tuyère) จะใช้ดินเหนียวที่มีความละเอียดสูง เนื้อดินสีขาว ปั้นด้วยมือลงบนแม่พิมพ์ที่ปลายด้านนอกมีลักษณะผายออกเพื่อรองรับกับท่อลมด้วยตัวอุดช่องระหว่างท่อลมกับปลายหุ้มท่อลมดินเผาหรือโครงสร้างเตาถลุงจะใช้ดินเหนียวที่มีส่วนผสมของกรวดทรายมาปั้นเตา เป็นต้น

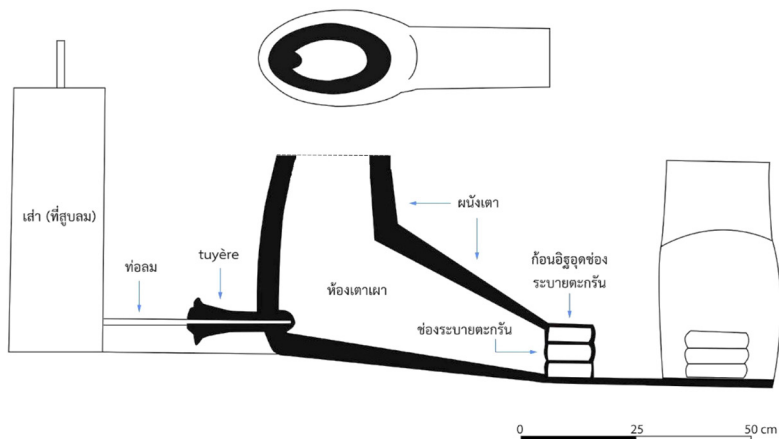
3. การถลุงเหล็ก

ลักษณะเตาถลุงเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาด้ม มีลักษณะเป็นเตาถลุงเหล็กทรงสูง (Shaft Furnace) ที่มีการสร้างช่องระบายตะแกรงยื่นออกทางด้านหน้าเตา ด้านตัดมุมบนเป็นรูปวงรี ยาว 1-1.2 เมตร กว้าง 35 เซนติเมตร ก่อผนังขึ้นสูงประมาณ 70-80 เซนติเมตร ผนังเตามีความหนาประมาณ 10-15 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังมีการเสริมความแข็งแรงของเตาด้วยการด้วยเรียงอิฐหรือหินขัดขอบเตาด้านนอกให้หนาแล้วพอกทับด้วยดินเหนียวอีกชั้น ด้านหน้าเตามีช่องระบายตะแกรงเป็นช่องขนาดเล็ก ด้านหลังมีการเจาะรูวงกลมที่กันเตาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องใส่ปลายหุ้มท่อลมดินเผาที่ต่อกับท่อลมไปยังที่สูบลมหรือเสา การสร้างเตาถลุงจะสร้างเรียงติดต่อกันเป็นลักษณะแนวยาวหลายเตาไปตามลำเหมืองโบราณ

สำหรับระบบท่อสูบลมใช้ระบบเครื่องสูบลมแบบลูกสูบคู่ “Double piston bellow” ประกอบด้วยกระบอกสูบลมที่ทำจากทองสัมฤทธิ์จำนวน 2 กระบอก มีไม้ยาวอยู่ด้านบนสำหรับชักลมเข้าออกที่ส่วนล่างของกระบอกลมทั้งสองจะมีท่อลมยื่นออกมาบรรจบกันที่ปลายท่อหุ้มท่อลมดินเผาที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดยาวประมาณ 30 เซนติเมตร โดยปลายหุ้ม

ท่อลมดินเผาจะยาวยื่นต่อเข้าไปในห้องถลุงประมาณ 5-6 เซนติเมตร โดยลักษณะระบบสุมดังกล่าวดังกล่าวปรากฏคล้ายกับระบบสุมของเตาตีเหล็กของชาติพันธุ์ละมั้งบนพื้นที่สูงของประเทศลาวซึ่งยังปรากฏให้เห็นในปัจจุบัน (Évrard et al. 2016: 119)

เมื่อดำเนินการสร้างเตาแล้วเสร็จ จะทำการอุ่นเตาให้แห้งโดยการใส่เชื้อเพลิงเข้าไปส่วนหนึ่ง เมื่อเตาแห้งแล้วจึงทำการถลุงเหล็ก ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางโบราณคดีของมหาวิทยาลัยขอนแก่น แสดงให้เห็นว่า การถลุงเหล็กในแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มใช้เทคนิคการถลุงทางตรง (Direct Process) โดยเริ่มต้นจากการนำสินแร่เหล็กที่ย่อยได้ขนาดและทำความสะอาดแล้ว คลุกเคล้าเข้ากับถ่านไม้ ในการถลุงจะกำหนดอัตราส่วน เหล็ก (1) ต่อถ่าน (2) จากนั้นจึงสุมเพื่อเร่งอุณหภูมิภายในเตาให้สูงจนถึงระดับ 1,175 – 1,200 องศาเซลเซียส โดยในระหว่างการถลุงจะต้องเติมถ่านไม้เป็นระยะๆ เพื่อให้ห้องเตาเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการเพิ่มก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในห้องเตาให้ถึงระดับที่สามารถทำปฏิกิริยากับสินแร่เหล็กโดยดึงก๊าซออกซิเจนออกจากแร่เหล็ก ทำให้สินแร่เหล็กกลายเป็นเหล็กที่มีลักษณะเป็นก้อนเหล็กแข็งหรือกึ่งของแข็งมีตะกรันปะปน (Bloom) ได้ ส่วนธาตุอื่นๆ ที่ผสมอยู่ในแร่เหล็กรวมถึงผนังเตาหรือปลายหุ้มท่อลมดินเผาก็จะถูกหลอมละลายกลายเป็นตะกรัน สะสมตัวอยู่ใต้ก้นเตา การถลุงตามกรรมวิธีทางตรงดังกล่าวข้างต้นจะได้ก้อนเหล็กแข็งหรือกึ่งของแข็งมีตะกรันปะปน (Bloom) จะยังมีตะกรันปะปนค่อนข้างมากต้องนำไปหลอมในเตาตีเหล็ก (Smithing) อีกครั้ง เพื่อตีเอาเศษตะกรันหรือมลทินออก จนเหลือแต่มวลเหล็กอ่อนบริสุทธิ์ที่เรียกว่า “Wrought Iron” (สุรพล นาถะพินธุ 2550: 172-173) แล้วจึงนำไปผลิตเครื่องมือเครื่องใช้เหล็กต่อไป



ภาพที่ 12 โครงสร้างเตาถลุงเหล็กแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มจากการวิเคราะห์หลักฐานทางโบราณคดี

บทสรุป

จากการวิเคราะห์และตีความข้อมูลโบราณโลหะวิทยา หลักฐานทางโบราณคดีและประวัติศาสตร์ นำไปสู่ข้อสันนิษฐานว่า แหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มเป็นแหล่งถลุงเหล็กของเมืองล่องโบราณในช่วงพุทธศตวรรษที่ 23-25 มีการผลิตทั้งเพื่อเป็นการส่งส่วยเหล็กและใช้ผลิตเครื่องมือเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน เทคโนโลยีการถลุงเป็นการถลุงแบบทางตรง (Direct Process) อุณหภูมิในการถลุงประมาณ 1,175 – 1,200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนสินแร่เหล็กและเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1 : 2 เบื้องต้นพบว่ามีกำลังการผลิตมวลเหล็ก (Iron Ingot) ปีละ 40 หาบ หรือ 2,400 กิโลกรัม เป็นอย่างต่ำ ต่อมาการถลุงเหล็กของเมืองล่องลดระดับการผลิตลงอย่างมากเมื่อมีเหล็กจากตะวันตกเข้ามาตามการขยายตัวของเส้นทางรถไฟสายเหนือ ประกอบกับรัฐบาลสยามปฏิรูปการเก็บภาษีในปี พ.ศ. 2442 โดยให้ยกเลิกการส่งส่วยเป็นการเสียภาษีแทน การถลุงเหล็กจึงลดสถานะลงเป็นการถลุงเพื่อให้ได้มวลเหล็กไปทำเครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือนแทน อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ยังขาดข้อมูลกระบวนการถลุงเหล็กในหลายประเด็น เช่น

ปริมาณแร่เหล็ก ปริมาณถ่านไม้และผลผลิตในการถลุง 1 ครั้ง ต่อ 1 เตา เป็นต้น ในอนาคต ควรมีการทดลองทางโบราณโลหวิทยา (Experimental Archaeometallurgy) โดยประยุกต์ใช้ข้อมูลทางโบราณโลหวิทยา โบราณคดีและประวัติศาสตร์ นำมาออกแบบการทดลองถลุงเหล็กเพื่อตอบคำถามในประเด็นดังกล่าวจะทำให้องค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีการถลุงเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้มมีความชัดเจนและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- จตุรพร เทียมทินกฤต และพลพยุหะ ไชยรส, 2562. รายงานการสำรวจและขุดค้นทางโบราณคดีภาคนามเบื้องต้นในแหล่งโบราณคดีบ้านนาตุ้ม ตำบลบ่อเหล็กทอง อำเภอลอง จังหวัดแพร่. เชียงใหม่: สำนักศิลปากรที่ 7 เชียงใหม่ กรมศิลปากร. เอกสารอัดสำเนา.
- ปรีดี พิศภูมิวิถี และคณะ, 2561. *ฝรั่งในล้านนา*. กรุงเทพฯ: กรมศิลปากร.
- พนัญช์ โปศาลตันติวงศ์, 2546. คุณภาพของแร่เหล็กจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กองวิเคราะห์และตรวจสอบทรัพยากรธรณี.
- พลพยุหะ ไชยรส, 2561. รายงานการสำรวจทางโบราณคดีแหล่งโลหะกรรมสมัยโบราณในบริเวณแอ่งที่ราบลองวังขึ้น จังหวัดแพร่ ตามหลักกระบวนการงานโบราณโลหวิทยา (Archaeometallurgy). เชียงใหม่: สำนักศิลปากรที่ 7 เชียงใหม่ กรมศิลปากร. เอกสารอัดสำเนา.
- ภูเดช แสนสา, 2554. ประวัติศาสตร์เมืองลอง หัวเมืองบริวารในล้านนาประเทศ. เชียงใหม่: นพบุรุษการพิมพ์.
- สรสวัสดิ์ อ่องสกุล, 2546. *พื้นเมืองเชียงแสน*. กรุงเทพฯ: อมรินทร์.
- สุรพล นาถะพิษณุ, 2550. รากเหง้าบรรพชนคนไทย: พัฒนาการทางวัฒนธรรมก่อนประวัติศาสตร์. กรุงเทพฯ: มติชน.
- อุดม รุ่งเรืองศรี, 2524. *กำสรวลพระยาพรหม: คร่าวสืบทและคำจ่มของพระยาพรหมโวหาร*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

จดหมายเหตุ

- “พระพรหมบริรักษ์กราบทูลสมเด็จพระเจ้า ซึ่งสำเร็จราชการกรมมหาดไทยรายงานข้อราชการที่ออกไปเมืองลอง.” กจข.ร.5ม ร5 นก/33(20). สำนักหอจดหมายเหตุแห่งชาติ.
- “รายงานเสด็จตรวจทางรถไฟสายเหนือของกรมขุนกำแพงเพชร 13 กรกฎาคม 2461.”, พ.ศ. 2461. กจข.ร6 คค.5.3/8. สำนักหอจดหมายเหตุแห่งชาติ.

ภาษาอังกฤษ

- Bock C.A., 1884. *Temples and elephants: The narrative of a journal of exporation through Upper Siam and Lao*. New York: Cornell University Library.
- Charlton M., 2010. “Explaining the evolution of ironmaking recipes – An example from northwest Wales.” *Journal of Anthropological Archaeology* 29: 357.

- Évrard O. et al., 2016. "Of myths and metallurgy: Archaeological and ethnological approaches to upland iron production in 9th century CE northwest Laos." **Journal of Southeast Asian Studies** 47(1): 119.
- Miller H. M.-L., 2009. **Archaeological approaches to technology**. California: Left Coast Press Inc.
- Tylecote R.F., 1992. **A history of metallurgy**. 2nd edition. London: The institute of material.
- United Department of State and Thai Royal Department of Mines, 1975. "Geologic reconnaissance of the mineral deposit of Thailand." **Geological Investigation Bulletin** 984: 75-76.

