



การศึกษาการกระจายตัวของแร่ธาตุในกระดูกเนื้อแน่นด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
เพื่อประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์

โดย

นางสาวธนิศา พิทักษ์อรณพ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์และงานยุติธรรม แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาการกระจายตัวของแร่ธาตุในกระดุกเนื้อแน่นด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
เพื่อประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์และงานยุติธรรม แบบ 1.1 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ELEMENTAL DISTRIBUTION IN COMPACT BONE USING X-RAY FLUORESCENCE
FOR FORENSIC SCIENCE APPLICATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Doctor of Philosophy FORENSIC SCIENCE AND CRIMINAL JUSTICE

Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาการกระจายตัวของแร่ธาตุในกระดูกเนื้อแน่น ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เพื่อประยุกต์ใช้ ในงานนิติวิทยาศาสตร์
โดย	นางสาวธนิตา พิทักษ์อรณพ
สาขาวิชา	นิติวิทยาศาสตร์และงานยุติธรรม แบบ 1.1 ปรัชญาคุณฐิบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. น.สพ. กรกฎ งานวงศ์พานิชย์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปรัชญาคุณฐิบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ นิมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. น.สพ. กรกฎ งานวงศ์พานิชย์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(อาจารย์ ดร. อรทัย เขียวพุ่ม)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ พุทธชาติ)

58312909 : นิติวิทยาศาสตร์และงานยุติธรรม แบบ 1.1 ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต

คำสำคัญ : กระดูกเนื้อแน่น, แร่ธาตุ, เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์, นิติวิทยาศาสตร์

นางสาว ธนิตา พิทักษ์อรุณพ: การศึกษาการกระจายตัวของแร่ธาตุในกระดูกเนื้อแน่นด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร. ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี

ชิ้นส่วนกระดูกที่พบในสถานที่เกิดเหตุ เป็นสิ่งที่น่าสนใจข้อสงสัย ว่าชิ้นส่วนกระดูกที่พบนั้นเป็นของมนุษย์หรือสัตว์ หากเป็นของมนุษย์จะมีคำถามที่นำไปสู่ขั้นตอนการสืบสวนตามมาเสมอ การจัดจำแนกกระดูกของมนุษย์ออกจากสัตว์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ โดยการนำเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์มาใช้ร่วมกับการใช้ธาตุในการจัดจำแนกยังคงมีไม่แพร่หลาย วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยถูกแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกเพื่อศึกษาความแตกต่างสัดส่วนธาตุที่วัดได้ในกระดูกข้อมือ ข้อมือของมนุษย์และสัตว์ 16 และ 11 ชนิด ตามลำดับ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบตั้งโต๊ะ ที่ค่าพลังงาน 15 และ 50 kV วิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี stepwise discriminant เพื่อจัดจำแนก พบว่า การจัดจำแนกโดยใช้สัดส่วนธาตุในกระดูกข้อมือ มีค่าความแม่นยำ อยู่ที่ร้อยละ 94.1 และ 63.7 ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV ตามลำดับ ในกระดูกข้อมือ มีค่าความแม่นยำ อยู่ที่ร้อยละ 69.4 และ 77.3 ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV ตามลำดับ เมื่อใช้ชุดข้อมูลของสองค่าพลังงานวิเคราะห์ร่วมกัน พบว่า มีค่าความแม่นยำ อยู่ที่ร้อยละ 89.7 และ 90.7 ของกระดูกข้อมือ และกระดูกข้อมือตามลำดับ การศึกษาส่วนที่สองเพื่อศึกษาความแตกต่างสัดส่วนธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งของกระดูกยาวสุกร แบ่งพื้นที่การวัดเปรียบเทียบเป็น 3 การศึกษา คือ 6 ตำแหน่ง 3 ส่วน และ 4 ทิศทาง ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบมือถือ ที่ค่าพลังงาน 15 และ 40 kV ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี one-way ANOVA พบว่า ธาตุที่พบบริเวณ 6 ตำแหน่ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการศึกษาทั้งสองส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า ในกระดูกสัตว์แต่ละชนิด มีจำนวน และสัดส่วนของธาตุที่พบ แตกต่างกัน และการกระจายตัวของธาตุนกระดูกยาวในแต่ละพื้นที่ มีความแตกต่างกัน

58312909 : Major FORENSIC SCIENCE AND CRIMINAL JUSTICE

Keyword : COMPACT BONE, ELEMENT, XRF, FORENSIC SCIENCE

MISS Tanita PITAKARNNOP : ELEMENTAL DISTRIBUTION IN COMPACT BONE USING X-RAY FLUORESCENCE FOR FORENSIC SCIENCE APPLICATION Thesis advisor : Lecturer Supachai Supalakhnari, Ph.D.

Basically, it is uncertain if bone fragments found in crime scene belong to humans. In this research, X-ray fluorescence (XRF) technique in forensic science is used to identify the bone by investigating proportions of the elemental distribution and difference of the result. Accordingly, the study was divided into two parts. First, study the differences in the proportions of the elemental distribution by using different energy of XRF at 15 and 50 kV using portable XRF machine. Carpal bones from 16 species and tarsal bones from 11 species were used in this study. The data of elemental profiles were analyzed by stepwise discriminant for species discrimination. Results of the classification, carpal bones show accuracy rate 94.1% and 63.7% at energy values of 15 kV and 50 kV, respectively. Tarsal bones have accuracy rate 69.4% and 77.3% at energy values of 15 kV and 50 kV, respectively. When using two datasets to analyse the accuracy rate of carpal bone was 89.7% and tarsal bone was 90.7%. Secondly, differences of elemental proportions to determine the elemental distribution in each location of long bones are studied. Dry femur bones from domestic pigs (*Sus scrofa domesticus*) were employed as the sample. The comparative measurement area was divided into 3 studies: 6 positions, 3 sections, and 4 directions were scanned by hand-held X-ray fluorescence apparatus. At power values of 15 and 40 kV, the data were analyzed by one-way ANOVA method. The results suggest that the elements found at 6 positions were significantly different ($p < 0.05$). In each type of animal bone, there are different amounts and proportions of trace elements found, and the distribution of trace elements on long bones in each area are also diverse.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี และ ศาสตราจารย์ ดร.น.สพ. กรกฎ งานวงศ์พาณิชย์ ที่ให้โอกาสในการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาการ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ให้ความรู้ เพิ่มทักษะในการทำงาน และการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อรทัย เขียวพุ่ม ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ พุทธชาติ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่กรุณาเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำในการจัดการข้อมูลทางสถิติ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ และเป็นกำลังใจในการทำการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พ.ต.อ. พงษ์พิชฌ ภัคดิสมรงค์ ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ในช่วงต้นของการศึกษาวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รศ. ไทพี ศรีนิวัฒน์ ภัคติกุล พ.ต.อ. สุภานันดร วิทยาภูมิกุล ตลอดจนคณาจารย์จากสาขาวิชาสัตววิทยา คณะสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และมหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกท่าน ที่ช่วยให้กำลังใจ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในแขนงวิชาสัตวศาสตร์ จนทำให้มีความรู้ ความสามารถในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณปิยมาศ คงถึง และหน่วยบริการซากสัตว์เพื่อการศึกษา การวิจัย และการฝึกทักษะผ่าตัด ทางสัตวแพทย์ ภาควิชาชีวศาสตร์ทางสัตวแพทย์และสัตวแพทย์สาธารณสุข ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการนำกระดูกมาใช้ในการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร. ปันจิตา เสียงดี สพ.ญ.ดร. วรณพิมล เกรียงวานิช ดร. อโนชา ภูมิม่วง อาจารย์ น.สพ.ดร. พร้อมพร พิบูลย์ และอาจารย์ น.สพ.ดร. ปุรินทร์ บุญศรี ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการทำวิจัย และการจัดทำเล่ม ตลอดจนเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณจักรกฤษณ์ วรวิริ์ คุณธัญญา คุณย์คุ้ม คุณธรรมบุญ คงรัตน์ คุณศรีญา เพ็งสูง ดร. เพ็ญพิชชา อมรภัทกรกิจ สพ.ญ. ณัฐนิชา คำมงคล สพ.ญ. ชนิษฐา ไชยปิ่นชนะ น.สพ. ศิริพิมพ์ คำมีศรี คุณวรรณลักษณ์ ดีอ่ำ และคุณวรรณศิลป์ โพธิ์วัน ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการจัดทำเล่ม ตลอดจนเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณปิยภา จันทรมล ที่ให้การช่วยเหลือเรื่องการจัดประสานงาน และดำเนินการด้านเอกสารต่าง ๆ กับทางสาขาวิชา นิติวิทยาศาสตร์กับงานยุติธรรม ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณ เพื่อน ๆ นิติวิทยาศาสตร์ รุ่นที่ 3 ทุกคน รวมทั้งพี่ ๆ นิติวิทยาศาสตร์ รุ่นที่ 1 และ 2 ที่ให้การช่วยเหลือต่าง ๆ ทั้งในด้านการเรียน คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนเป็นกำลังใจในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณเพ็ญวิสา ประกอบการ อาจารย์ ดร. อมร ทองพยงค์ ร้านกาแฟบัวหลวง และครอบครัว คุณเอกพล เหล่าฤพพงศ์ คุณมนตรี ธนสมบัติ ร้านกาแฟบ้านอามา และครอบครัว ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในวันที่ยากที่สุดของชีวิต จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิด ให้ความรักความอบอุ่น ให้การสนับสนุนในด้านการศึกษาจนทำให้ผู้เขียนได้เดินทางมาไกลจนถึงวันนี้ ขอขอบพระคุณ บ้านพิทักษ์ธรรมพ และบ้านมะลิวัลย์ทุกคน ที่คอยเป็นแรงผลักดัน และเป็นกำลังใจ จนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขออุทิศให้แก่ คุณแม่सानตินุช พัทธ์ธรรมพ คุณแม่ผู้ซึ่งเป็นเสมือนเสาหลักค้ำยัน คอยโอบกอด และปลอบประโลมจิตใจในวันที่เหนื่อยล้า คุณแม่ผู้คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่องตลอดมา และตลอดไป คุณอัฐพงศ์ ก้อนลม ผู้ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นพี่ชายที่รักยิ่ง ผู้ที่เป็นแบบอย่างในการทำงาน อุทิศชีวิตเพื่อประเทศชาติบ้านเมือง และผู้เป็นแรงบันดาลใจให้กับจุดเริ่มต้นในการศึกษาในสาขานิติวิทยาศาสตร์

สุดท้ายนี้หากมีสิ่งใดที่ขาดตกบกพร่องแต่ประการใด ผู้เขียนต้องขอภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจในการศึกษาด้านนี้ต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ขอบเขตการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การวิเคราะห์ด้วยการวางรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence Analysis)	5
2.2 การจัดจำแนกด้วยลักษณะทางมหกายวิภาค (Gross Morphology Identification).....	11
2.3 การแยกด้วยลักษณะทางจุลกายวิภาค (Histology Identification)	15
2.3.1 ลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูก (Histology of Bone)	15
2.3.2 ความแตกต่างระหว่างชนิดสัตว์ (Differences between Species)	17
2.4 วิธีทางอนุพันธุศาสตร์.....	21
2.5 การแยกด้วยปริมาณแร่ธาตุที่สะสมในกระดูก (Identification Using The Elements).....	22
2.5.1 แร่ธาตุที่สะสมในร่างกายสัตว์ (Element Accumulate in Animals)	22
2.5.2 ความแตกต่างระหว่างชนิดสัตว์ (Differences between Species)	23
2.6 หลักกฎหมายที่เกี่ยวข้อง	25

2.6.1 ประมวลกฎหมายวิธีพิจารณาความอาญา	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 ศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้ในกระดุกเนื้อแน่นของมนุษย์และสัตว์ ...	31
3.1.1 ตัวอย่างกระดุกที่ใช้ในการศึกษา.....	31
3.1.2 การศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบตั้งโต๊ะ	33
3.1.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	33
3.2 การศึกษาความแตกต่างของปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งในกระดุกยาว	34
3.2.1 ตัวอย่างกระดุกที่ใช้ในการศึกษา.....	34
3.2.2 เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์	34
3.2.3 การเปรียบเทียบ	35
3.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	38
4.1 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาณธาตุที่วัดได้ในกระดุกเนื้อแน่นของมนุษย์และสัตว์	38
4.1.1 ความแตกต่างของธาตุที่พบในสัตว์แต่ละชนิด	38
4.1.2 เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในกระดุก ระหว่างกระดุก 2 ตำแหน่ง ที่ค่าพลังงานเดียวกัน.....	38
4.1.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในกระดุกตำแหน่งเดียวกัน ที่ค่าพลังงานต่างกัน	39
4.1.4 จัดจำแนกชนิดของสัตว์จากตัวอย่างกระดุกโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise Discrimination	39
4.2 ผลการศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณ และการกระจายตัวของธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งบนกระดุกยาว.....	55
4.2.1 เปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบในแต่ละตำแหน่งบนกระดุกต้นขาหลัง	55
4.2.2 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี Stepwise Discriminant	56

บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการทดลอง 70

 5.1 อภิปรายผลการศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้ในกระดุกเนื้อแน่นของ
 มนุษย์และสัตว์ 70

 5.2 อภิปรายผลการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในกระดุกยาวในสุกร 73

รายการอ้างอิง 78

ประวัติผู้เขียน 85



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบตำแหน่งเฉพาะกระดูกในมนุษย์และสัตว์.....	14
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของออสติออยด์ เส้นผ่านศูนย์กลางช่องฮาเวอร์เซียน และความหนาแน่นของจำนวนท่อฮาเวอร์เซียน จากกระดูกหน้าแข้งในมนุษย์และสัตว์	19
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาหน้าในสัตว์ และกระดูกข้อเท้าในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาหลังในสัตว์ของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ใช้ในการศึกษา.....	32
ตารางที่ 4.1 ชนิดของธาตุที่พบในกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาหน้าในสัตว์ และกระดูกข้อเท้าในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาหลังในสัตว์ ของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV	43
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาหน้าในสัตว์ ของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยแสดงผลในรูปแบบของร้อยละ.....	45
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในกระดูกข้อเท้าในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาหลังในสัตว์ ของสัตว์ทั้ง 11 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยแสดงผลในรูปแบบของร้อยละ.....	47
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจำแนกในสมการจำแนกกลุ่ม(Canonical discriminant function coefficients)	49
ตารางที่ 4.5 ค่ากลางของกลุ่ม (Group Centroids) ของสัตว์แต่ละชนิดที่จัดจำแนกด้วยวิธีทางสถิติ	51
ตารางที่ 4.6 การจัดจำแนกข้อมูลทีวเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda (F-level 2.71 และ 3.84) โดยวิธีการตรวจสอบไขว้ (cross-validation)	53
ตารางที่ 4.7 การจัดจำแนกข้อมูลโดยอาศัย 2 ค่าพลังงานประกอบกัน เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda (F-level 2.71 และ 3.84) โดยวิธีการตรวจสอบไขว้ (cross-validation).....	54

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่พบใน 6 ตำแหน่ง บนกระดูกต้นขาหลัง..... 58

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่พบบน กระดูกเนื้อแน่นที่ 3 ส่วน ของกระดูกต้นขาหลัง..... 60

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่พบบน กระดูกเนื้อแน่นที่ 4 ทิศทาง ของกระดูกต้นขาหลัง..... 64

ตารางที่ 4.11 การจำแนกพื้นที่แต่ละแห่งโดยใช้การวิเคราะห์ผลการศึกษาดังวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda (F-level 2.71 และ 3.84) ซึ่งแบ่งตามพื้นที่ต่าง ๆ บนกระดูกต้นขา หลัง..... 66

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจำแนกในสมการจำแนกกลุ่ม (Canonical discriminant function coefficients)..... 68

ตารางที่ 4.13 ค่ากลางกลุ่ม (Functions at group centroids)..... 69



สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาวิจัย	3
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (WDXRF).....	6
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF).....	8
รูปที่ 2.3 ลักษณะที่แตกต่างกันของกระดูก มนุษย์ ลิง สุนัข กวาง วัว และม้า	13
รูปที่ 2.4 ลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูก.....	16
รูปที่ 2.5 สมการในการแยกชนิดกระดูกหน้าแข้งของมนุษย์และสัตว์.....	20
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบตั้งโต๊ะ. 33	
รูปที่ 3.2 กระบวนการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ชนิดพกพา (Handheld X-ray Fluorescence; HHXRF).....	35
รูปที่ 3.3 การแบ่งตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูก.....	36
รูปที่ 4.1 การจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์โดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบร้อยละของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda	41
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda เพื่อใช้หาค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์.....	42
รูปที่ 4.3 แผนภาพ Cluster heat map จากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบบนกระดูก	62
รูปที่ 4.4 การจัดจำแนกตำแหน่งแต่ละตำแหน่งบนกระดูก โดยใช้ร้อยละของสัดส่วนปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ Stepwise discriminant - Wilks' Lamda.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ความสำคัญของการจัดจำแนกชนิดสิ่งมีชีวิตในงานทางนิติวิทยาศาสตร์นั้น เป็นการจัดจำแนกสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ ออกจากกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาพยานหลักฐาน และเป็นการตัดเอาสิ่งที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับพยานหลักฐาน หรือสถานที่เกิดเหตุออกไป

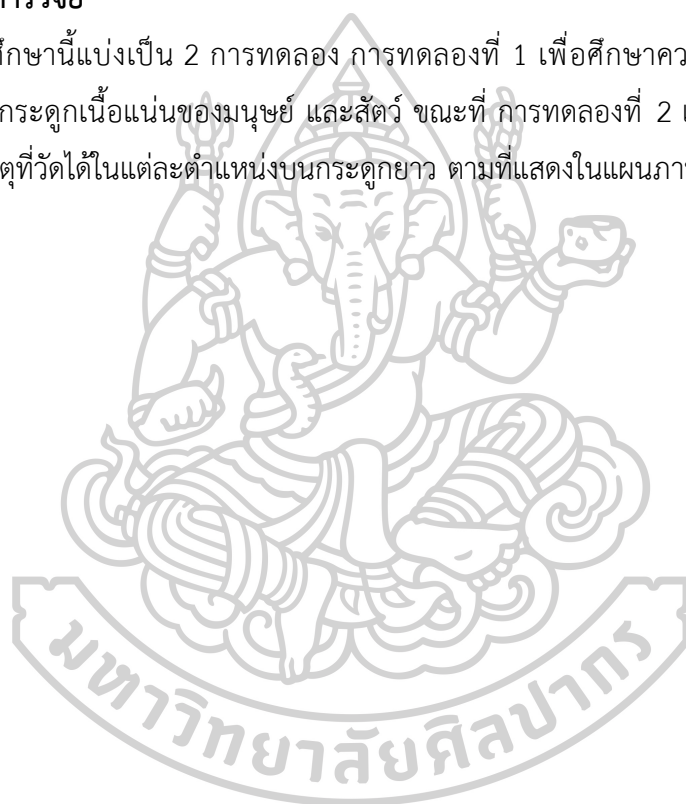
เช่นในกรณีคดีตัวอย่าง ที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม 2560 สถานที่เกิดเหตุคือ อาคารพาณิชย์สูง 4 ชั้น ตั้งอยู่บริเวณรามคำแหง ซอย 8 มีการค้นพบชิ้นส่วนกระดุกจำนวน 6 ชิ้น ภายใต้บริเวณอาคาร และพบชิ้นส่วนของเสื้อผ้าในบริเวณใกล้เคียงกัน เนื่องจากชิ้นส่วนของกระดุกที่พบในสถานที่เกิดเหตุ นั้น ไม่มีชิ้นส่วนใดที่สามารถระบุได้อย่างแน่ชัดว่าเป็นของมนุษย์ (1) ในกรณีของคดีนี้ หากมีเครื่องมือหรือเทคนิคที่สามารถช่วยในการคัดกรอง หรือจัดจำแนกชิ้นส่วนของกระดุกว่าเป็นของมนุษย์หรือไม่ โดยไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน หรือนำไปตรวจสอบด้วยวิธีการขั้นสูง จะสามารถทำให้การดำเนินการสืบสวนของคดีเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น

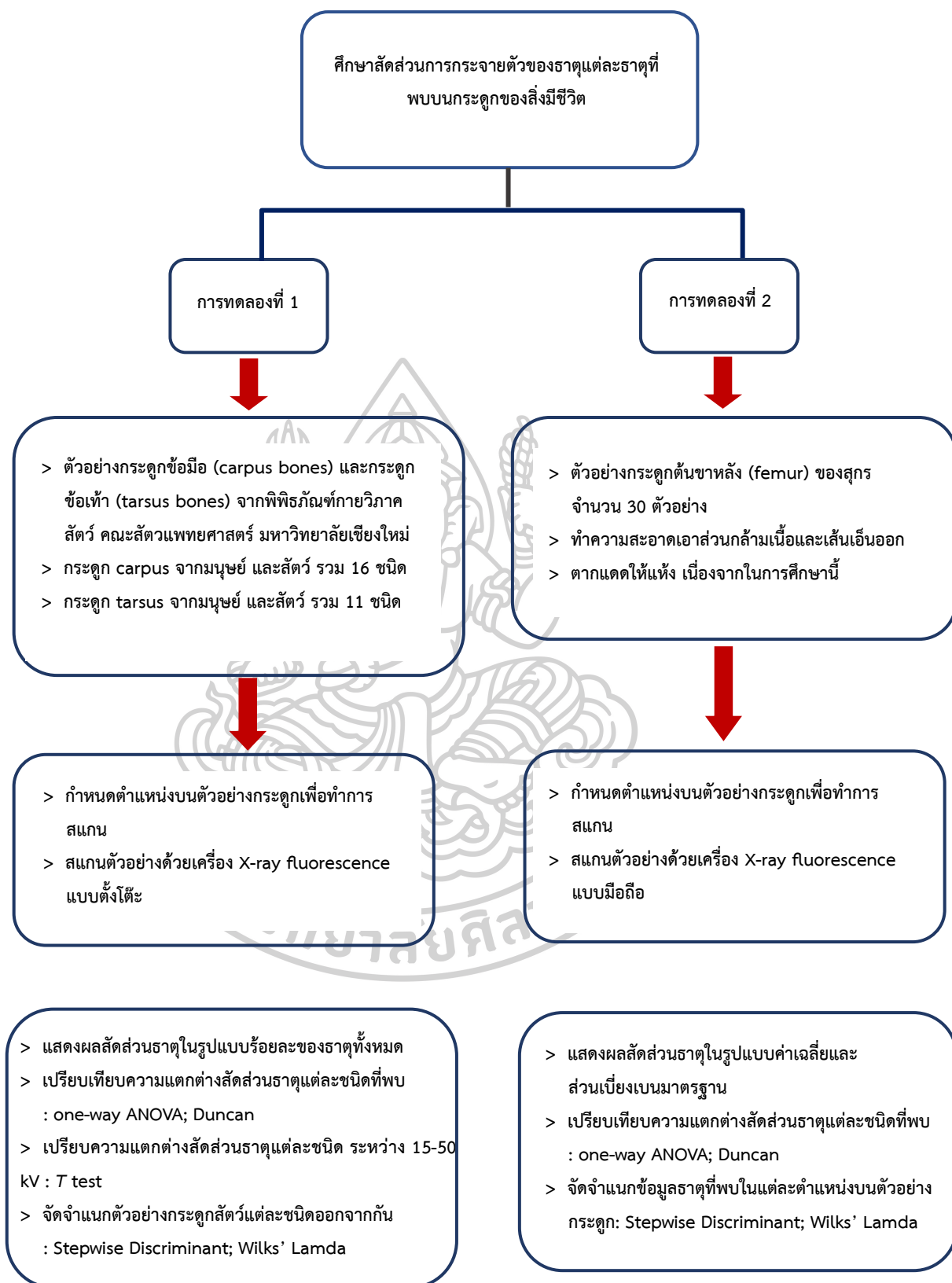
เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณการเรืองรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง สามารถทำการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ชิ้นงานด้วย XRF สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือลักษณะเป็นผง ปัจจุบันมีการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารตัวอย่าง ทางด้านโลหกรรม (metallurgy) ทางด้านเคมี ธรรณี (geochemistry) สารตัวอย่างจากการศึกษา ทางด้านสิ่งแวดล้อม และการตรวจพิสูจน์วัตถุพยาน (2) เนื่องจาก การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงานที่ต้องการศึกษา การนำเทคนิค XRF มาประยุกต์ใช้กับงานทางนิติวิทยาศาสตร์ โดยมากจะเป็นการวิเคราะห์วัตถุพยาน เช่น การตรวจพิสูจน์เศษสีที่เกิดการแลกเปลี่ยนกันของวัตถุพยานขณะเกิดการเฉี่ยวชนตามหลักของโลคาร์ด (Locard's Exchange Principle) (3) การตรวจหาชนิดของหมึกบนเอกสารของกลาง การตรวจเขม่าดินปืน เพื่อหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก หรือเพื่อ หาความสัมพันธ์ที่เป็นสิ่งบ่งชี้ว่าวัตถุพยาน นั้น มีความเกี่ยวข้องกับการยิงปืนหรือไม่ โดยการวิเคราะห์หาธาตุสำคัญที่มาจาก การยิงปืนซึ่งโดยหลักการตรวจพิสูจน์ในปัจจุบัน จะประกอบไปด้วย ตะกั่ว (Pb) พลวง (Sb) แบเรียม (Ba) และ ทองแดง (Cu) (4)

การศึกษาวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนธาตุที่วัดได้ในกระดูกเนื้อแน่นของมนุษย์ และสัตว์ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบและจัดจำแนกชิ้นส่วนระหว่างกระดูกของมนุษย์กับสัตว์ออกจากกันได้ รวมถึงศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งบนกระดูกยาวในสุกร โดยมุ่งหวังว่า ทุกตำแหน่งที่ได้มีการจัดแบ่งเพื่อการศึกษาวิจัย จะให้ผลของลักษณะการกระจายตัวของสัดส่วนธาตุแต่ละชนิดที่พบบนกระดูกยาวที่มีรูปแบบใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่งที่ได้ทำการศึกษาวิจัย

1.2 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้แบ่งเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนธาตุที่วัดได้ในกระดูกเนื้อแน่นของมนุษย์ และสัตว์ ขณะที่ การทดลองที่ 2 เพื่อศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งบนกระดูกยาว ตามที่แสดงในแผนภาพด้านล่าง





รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาวิจัย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 เพื่อนำข้อมูลของสัตว์ส่วนและชนิดของธาตุที่พบในกระดูกเนื้อแน่นของมนุษย์และสัตว์ไปใช้เพื่อทำการจัดจำแนกกระดูกของมนุษย์และสัตว์ออกจากกันได้

1.3.2 สามารถกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม และให้ผลถูกต้องแม่นยำในการวัด เพื่อหาสัดส่วนของธาตุในกระดูกยาว



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์ด้วยการวาวรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence Analysis)

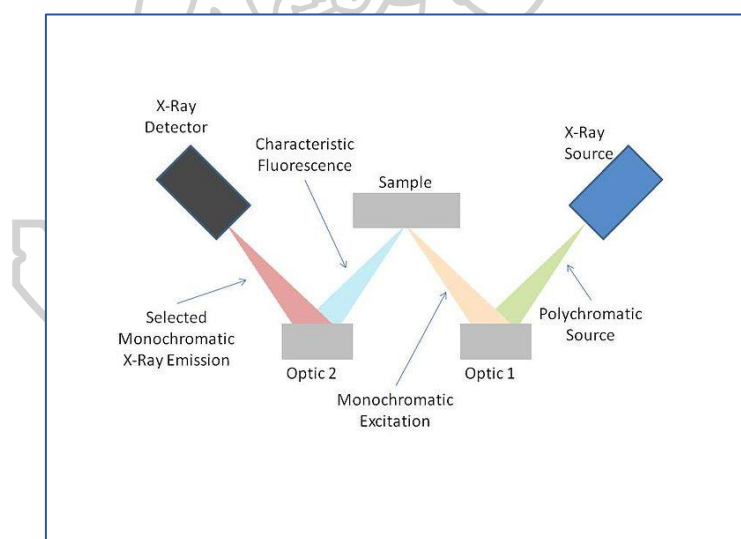
รังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุในสสาร จะทำการพุ่งชนและเข้าทำอันตรกริยากับธาตุแต่ละชนิด หลังจากนั้นจะเกิดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ และอะตอมเกิดการ Excite หรือได้รับการกระตุ้น จะเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากชั้น Ground state (สภาวะปกติ) และเข้าสู่สภาวะ Excite state (ถูกกระตุ้น) ที่มีความไม่เสถียร เมื่ออะตอมกลับสู่สภาวะปกติโดยเปลี่ยนระดับพลังงาน (transition) อิเล็กตรอนจะคายคลื่นแสงออกมาในรูปฟลูออเรสเซนซ์ จึงทำให้วิธีการนี้ถูกเรียกว่า X-Ray Fluorescence หรือ XRF (5)

การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRF มีการพัฒนาขึ้นจนเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย นำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างประเภทต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบตัวอย่างตลอดจนงานศึกษาค้นคว้าวิจัย เนื่องจากเทคนิค XRF นี้ จัดเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive) และยังวิเคราะห์ได้ ทั้งแบบธาตุเดี่ยวทีละธาตุ (Sequential) หรือวิเคราะห์แบบหลายธาตุพร้อมกัน (Simultaneous) และเมื่อนำเอาเทคนิคการวิเคราะห์นี้มาใช้งานร่วมกับโปรแกรมการจัดการระบบข้อมูล และคอมพิวเตอร์ที่มีความทันสมัยอีกทั้งมีประสิทธิภาพสูง ส่งผลให้เทคนิค XRF ได้รับความสนใจ และเป็นที่ยอมรับเพิ่มมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ไม่เว้นแม้แต่การนำไปประยุกต์ใช้ในทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ อย่างการตรวจสอบองค์ประกอบของสีรถที่เกิดการหลุดร่อนจากการเฉี่ยวชน นอกจากนี้ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีของสารตัวอย่างที่มีระดับความเข้มข้นต่ำ ไปจนถึงระดับความเข้มข้นสูง อีกทั้งในบางกรณียังสามารถทำการวิเคราะห์ได้ถึงระดับ Trace Analysis (ppm) ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์

การกระตุ้นโดยอาศัยพลังงานภายนอกอะตอมของรังสีเอ็กซ์ อาจอยู่ในรูปแบบโฟตอนที่ผ่านเข้ามาในอะตอม หรือในรูปของอนุภาคที่มีค่าพลังงานสูง ทำให้มีโอกาที่จะเกิดการชนกัน จากนั้นมีการถ่ายทอดพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอาจทำให้เกิดกระบวนการโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) และเส้นรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Line) ซึ่งแต่ละเส้นที่ถูกปล่อยออก จะมีความยาวคลื่นที่แน่นอน การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF นั้น มีด้วยกัน 2 ระบบ คือ 1. ระบบที่วัดเป็นความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive System) 2. ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (Energy Dispersive System)

2.1.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์แบบระบบความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; WDXRF)

หลักการทำงานของเครื่อง WDXRF คือ รังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ถูกส่งไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง จากนั้นเกิดเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ขึ้น ให้เอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ผ่านคอลลิเมเตอร์ให้ลำรังสีเอกซ์เกิดเป็นลำขนาน ไปในทิศทางที่ต้องการ โดยทิศทางที่ต้องการในที่นี้คือ ให้ไปกระทบกับผลึกวิเคราะห์ซึ่งวางอยู่ในสเปกโตรมิเตอร์ที่ถูกทำให้เป็นสูญญากาศ เพื่อทำหน้าที่ในการกระจาย หรือแยกรังสีเอกซ์ออกไป ให้มีความยาวคลื่นอยู่ในระยะต่าง ๆ โดยรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันนี้ จะถูกวัดความเข้มด้วยการสแกนของตัวรับ จากนั้นสัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูล ถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่องพิมพ์หรือเครื่องบันทึกจากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งนี้จากของสารมาตรฐาน และสารตัวอย่าง สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ และคุณภาพได้



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (WDXRF)

ที่มา: Wikipedia, “Monochromatic wavelength dispersive x-ray fluorescence”, การเข้าถึงแหล่งสื่อสิ่งพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์: https://en.wikipedia.org/wiki/Monochromatic_wavelength_dispersive_x-ray_fluorescence. (6)

2.1.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์แบบระบบพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer; EDXRF)

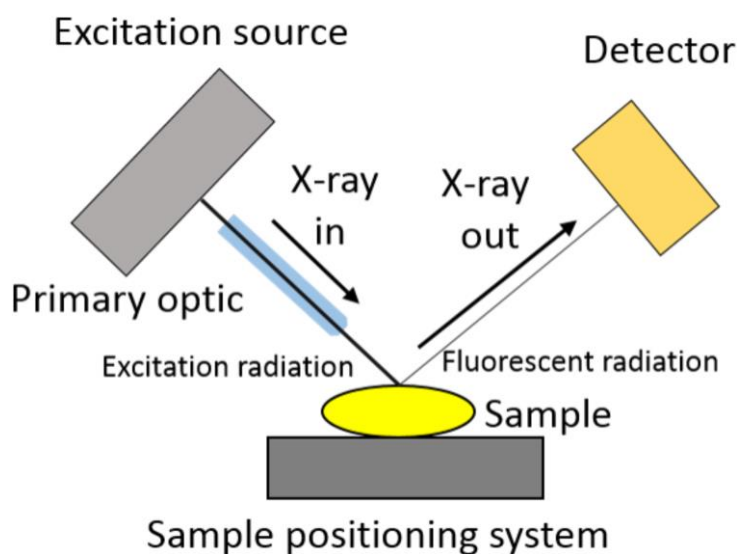
ในระบบประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ (รูปที่ 2.5) ดังนี้

- 2.1.2.1 แหล่งผลิตรังสีเอกซ์ อาจใช้หลอดรังสีเอกซ์ (radioactive) สามารถเลือกได้
- 2.1.2.2 หัววัดที่เป็น Si (Li) หรือ Ge (Li)
- 2.1.2.3 Detector power supply
- 2.1.2.4 ระบบ cooling ใช้ไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ตัวดีเทคเตอร์เย็น
- 2.1.2.5 Preamplifier และ amplifier ทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่พอเพื่อให้วัดได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2.1.2.6 Multichannel analyzer (MCA) ทำหน้าที่เก็บรวบรวมสัญญาณที่ได้จากตัวรับ ทำการแยกขนาดของพลังงาน โดยให้พลังงานต่ำอยู่ในช่อง (channel) ต้น ๆ ขณะที่พลังงานสูงจะถูกแยกไปเก็บในช่องพลังงานที่สูงขึ้น และสัญญาณที่ทำการรวบรวมมาได้สามารถนำไปเขียนเป็นกราฟระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้ กับจำนวนช่องของเครื่อง

2.1.2.7 Data System (ระบบข้อมูล) ประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ และ ซอฟต์แวร์ เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเก็บข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงผลการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีระบบวิเคราะห์ข้อมูล (data analysis system) ซึ่งช่วยทำให้การวิเคราะห์ผลทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ สำเร็จได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

หลักการทำงานของเครื่อง EDXRF คือ รังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสี ถูกส่งไปยังสารตัวอย่าง เพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ของสารตัวอย่าง จากนั้นเกิดกระบวนการเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยที่เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ผ่านคอลลิเมเตอร์เพื่อให้ลำของรังสีเอกซ์ขนานไปในทิศทางที่ต้องการ จากนั้นรังสีเอกซ์เคลื่อนผ่านเข้าไปในตัวรับ ทำให้เกิดสัญญาณ ขนาดของสัญญาณนี้เองที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ และสัญญาณที่ได้ ถูกขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถวัดปริมาณได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยการใช้ Preamplifier และ Amplifier จากนั้นจึงถูกส่งต่อไปยังส่วนวิเคราะห์สัญญาณ คือ Multichannel Analyzer เพื่อนำส่งต่อไปยังระบบจัดเก็บข้อมูล และทำการประมวลผลต่อไป



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF)

ที่มา: Eduardo S. R., Marcos H. F. G., Nádia M. D., João G. B. C., Tatiana N. M. da Cruz¹, Analdier Sant'A. N., Susilaine M. S., Eduardo de A., and Hudson W. P. C., Laboratory Microprobe X-Ray Fluorescence in Plant Science: Emerging Applications and Case Studies., 2018., *Frontiers in Plant Science.*, Vol. 9; 1588. (7)

การวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพของสารตัวอย่าง โดยปกติวิธีที่นิยมใช้เป็นส่วนใหญ่ คือ เทคนิค EDXRF ซึ่งเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากวิธีนี้ทำได้ง่าย มีความรวดเร็ว ขณะที่ WDXRF นั้น ก็สามารถทำการวิเคราะห์ได้เช่นกัน เพียงแต่ด้วยปัจจัยบางประการ ทำให้เทคนิค WDXRF มีความยุ่งยากในการปฏิบัติ และยังมีการประมวลผลที่ช้ากว่า เนื่องจาก WDXRF จำเป็นต้องมีตัว Parameter ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อให้มีความเหมาะสม เช่น คอลลิเมเตอร์ ดีเทคเตอร์ และผลึกวิเคราะห์ เป็นต้น นอกจากนี้ ความสามารถในการจัดจำแนก (Resolution) ธาตุที่มีค่าของเลขอะตอมต่ำไปจนถึงกลาง (Low to Medium Atomic Number) นั้น การใช้ WDXRF เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้ EDXRF เนื่องจาก ผลึกวิเคราะห์ของ WDXRF มีความสามารถในการจัดจำแนกที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ดังนั้น การเลือกเทคนิคที่จะนำมาใช้ เพื่อให้การวิเคราะห์ตัวอย่างให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำที่สุด จึงขึ้นอยู่กับผู้ศึกษาว่า ต้องการศึกษาดูอย่างในเรื่องใดบ้าง

Imaizumi และคณะ (2002) กล่าวถึงคดีในช่วงประมาณเดือนพฤษภาคมของปีค.ศ.1987 มีการรับแจ้งบุคคลสูญหาย และได้ตัวผู้ต้องสงสัยในเวลาถัดมา และรับสารภาพว่าฆาตกรรมเหยื่อ ก่อนนำร่างไปฝังที่สวน จนกระทั่งเวลาผ่านไปเกือบปีครึ่ง หลังชุดศพขึ้นมาใหม่ ก็นำไปเผาทำลายหลักฐาน ชิ้นส่วนที่เหลือจากการเผาทำลายถูกนำไปทิ้งเพื่อทำลายหลักฐาน เจ้าหน้าที่ทำการตรวจค้นสถานที่ดังกล่าวตามคำบอกเล่าของผู้ต้องสงสัย พบชิ้นส่วนกระดูกที่เหลืออยู่จำนวน 54 ชิ้น หลังจากนั้นนักมานุษยวิทยาตรวจสอบแล้ว จำแนกได้ ดังนี้ ชิ้นส่วนกระดูกข้อมือ (Carpus) ฝ่ามือ (Metacarpus) นิ้ว (Phalangeal Bone) รวมทั้งสิ้น 39 ชิ้น ที่มีความใกล้เคียงกับกระดูกมนุษย์ และเศษชิ้นส่วนกระดูกอีก 2 ชิ้น จากกระดูกสะบัก (Scapula) สุกร ใช้หลักสัณฐานวิทยาเพื่อเปรียบเทียบชิ้นส่วนกระดูกจากที่เกิดเหตุ กับชิ้นส่วนกระดูกที่ทราบตำแหน่ง และชนิดของสัตว์แน่ชัด ตามด้วยการเปรียบเทียบจุลกายวิภาคกระดูก (Histology of Compact Bone) เพื่อหาความเหมือนหรือแตกต่างระหว่างกระดูกส่วนแขน (Radius) กับกระดูกสะบักสุกร โดยโครงสร้างมีความแตกต่างกัน ขึ้นตอนสุดท้าย ตรวจพิสูจน์ยืนยัน ชิ้นส่วนกระดูกมนุษย์ที่พบทั้งหมดให้สถานที่ที่ถูกตรวจค้น สกัดสารพันธุกรรม (DNA) จากชิ้นส่วนเปรียบเทียบกับตัวอย่าง DNA น้องสาวผู้เสียชีวิต ผลตรวจพิสูจน์พบว่ามีความเข้ากันได้ (8) Owsley และคณะ (1985) กล่าวถึงคดีที่เกิดในหลุยส์เซียน่า แผนกนิติมานุษยวิทยา (Forensic Anthropology) เป็นผู้รับผิดชอบคดีดังกล่าว ดำรวจพบชิ้นส่วนขนาดเล็กที่คาดว่าเป็นกระดูก 6 ชิ้น ในรถจี๊ปคันหนึ่งที่จอดอยู่ในปั้มน้ำมัน หลังรถถูกทำความสะอาด สันนิษฐานว่า ชิ้นส่วนที่พบมาจากกระดูกที่ตำแหน่งต้นแขน (Humerus) มนุษย์ และไม่มีสัปดาห์ก่อนหน้านี้ มีการพบร่างถูกทิ้งที่ริมแม่น้ำมิสซิสซิปปี (Mississippi River) บาดแผลจากศพที่ถูกพบมีความเข้ากันได้กับชิ้นส่วนกระดูกจากในรถ ตำรวจนายหนึ่งเป็นเจ้าของรถคันดังกล่าวและตกเป็นผู้ต้องสงสัยทันที เขาให้การกับตำรวจว่า ชิ้นส่วนที่พบภายในรถ คือเศษกระดูกกวางที่เขาล่ามาไม่นาน เจ้าหน้าที่ตำรวจที่ทำการตรวจค้นนำวัตถุต้องสงสัยส่งตรวจพิสูจน์หาความเข้ากันได้กับโครงสร้างกระดูกมนุษย์ ด้วยวิธีเปรียบเทียบทางสัณฐานวิทยา และตรวจเปรียบเทียบภายใต้กล้องจุลทรรศน์หาความเหมือนหรือแตกต่างของโครงสร้างภายใน ผลที่ได้ คือ ไม่พบรูปแบบ Plexiform ในการเปรียบเทียบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ซึ่งรูปแบบดังกล่าวพบได้ทั่วไปในโครงสร้างกระดูกกวาง อีกทั้ง Secondary Osteon มีความหนาแน่น ขนาด รูปร่าง ของออสติออยด์ กับท่อฮาเวอร์เซียน ที่เปรียบเทียบโครงสร้างภายในกับกระดูกจากรถจี๊ป มีลักษณะจุลกายวิภาคกระดูกเนื้อแน่น ตรงกับลักษณะทางจุลกายวิภาคกระดูกแน่นในมนุษย์ (9) William และคณะ (1990) เขียนบทความทางวิชาการเกี่ยวกับการสืบสวนคดี The Green River ที่เกิดขึ้นที่เมือง King County, Washington โดยคดีนี้เกิดในช่วงปี ค.ศ. 1980 เป็นคดีฆาตกรรมต่อเนื่อง เหยื่อที่พบทั้งหมดเป็นเพศหญิง มีลักษณะทางกายภาพภายนอกคล้ายคลึงกัน โดยศพแรกถูกพบเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม 1982 หลังจากนั้นประมาณหนึ่งเดือน ในวันที่ 12 สิงหาคม และ 15 สิงหาคม 1982 มีการพบศพที่สองและสาม ตามลำดับ ศพที่พบมีลักษณะใกล้เคียงกับศพก่อน

หน้า ขณะที่กำลังเริ่มเขียนบทความนี้ ได้มีการค้นพบศพเหยื่อจำนวนทั้งสิ้น 40 ราย สามารถระบุตัวตนได้จำนวน 36 ราย ชิ้นตอนในการค้นหาศพ และชิ้นส่วนศพ ถูกทำโดยอาสาสมัคร เมื่อมีการพบชิ้นส่วนศพ จะถูกเก็บชิ้นส่วนโดยผู้เชี่ยวชาญ ทำการส่งต่อไปยังฝ่ายนิติเวช เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการตรวจพิสูจน์ต่อไป ว่าชิ้นส่วนที่พบดังกล่าว เป็นชิ้นส่วนที่มาจากร่างกายของมนุษย์หรือไม่ (10) Roger และ Mike (2018) เขียนบทความทางวิชาการเกี่ยวกับคดีที่เป็นกรณีศึกษาเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1902 ตำรวจท้องถิ่นนายหนึ่ง และผู้จัดการของ Carnarvon Station หายสาบสูญไป โดยเกิดขึ้นหลังจากที่ทั้งสองได้พบกับสองพี่น้องตระกูล Kinniff ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการขโมยม้า หลังจากการหายสาบสูญของทั้งสองคนไม่นาน ตำรวจพบเพียงม้าตำรวจที่มีคราบเลือดติดอยู่ และกระเป๋าที่ติดกับอานม้า (Saddle Bag) ที่มีน้ำหนักประมาณ 90 กิโลกรัม พบว่าภายในกระเป๋านั้นมีเพียงเศษซี่เถ้านายแพทย์ Francis Vos ทำการตรวจสอบเศษชิ้นส่วนที่พบภายในกระเป๋า พบว่าเศษซี่เถ้าดังกล่าวเป็นเศษชิ้นส่วนของกะโหลกศีรษะมนุษย์ (Skull), กระดูกสันหลัง (Vertebrae), กระดูกซี่โครง (Ribs) และกระดูกแขนงครึ่งล่าง (Limb Bones) นอกจากนี้ยังพบชิ้นส่วนของเสื้อผ้า, แหวน และหลักฐานอื่น ๆ อีก หลังจากผู้กระทำผิดถูกจับกุม และมีการไต่สวนในชั้นศาล เนื่องจากมีประจักษ์พยานเพียงคนเดียว และบุคคลดังกล่าว ก็ไม่ได้เห็นเหตุการณ์ขณะมีการยิงกันเกิดขึ้น ทำให้ทนายจากฝั่งผู้ต้องสงสัยทำการซักค้านพยาน ด้วยเหตุนี้ หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์จึงถูกนำมาใช้ในชั้นศาล เพื่อทำการเอาผิดผู้ต้องสงสัย แพทย์ผู้ชันสูตรและตรวจสอบชิ้นส่วนกระดูกที่พบ ให้การยืนยันว่า ชิ้นส่วนกระดูกที่พบนั้นเป็นชิ้นส่วนกระดูกมนุษย์เพศชายที่โตเต็มวัย เพียงแต่ไม่สามารถยืนยันได้ว่า เป็นชิ้นส่วนกระดูกจากหนึ่ง หรือสองศพ เมื่อพิจารณาร่วมกับชิ้นส่วนเสื้อผ้า และเครื่องประดับ ที่พบพร้อมความเห็นจากแพทย์ชันสูตรว่าชิ้นส่วนกระดูกที่พบดังกล่าว ได้ถูกฆ่าแผลและเผา ทำให้ศพของผู้สูญหายทั้งสองเหลือเพียงชิ้นส่วนของกระดูกที่พบในที่เกิดเหตุเท่านั้น จากพยานหลักฐานดังกล่าวทำให้ศาลตัดสินประหารชีวิตผู้กระทำความผิดทั้งสองคน (11)

นิติวิทยากระดูก (Forensic Osteology) ถือเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการคลี่คลายคดีสำคัญ เมื่อไม่พบหลักฐาน หรือเอกสารอื่นใดที่สามารถใช้ในการระบุตัวตน พบเพียงกระดูกในสถานที่เกิดเหตุ เมื่อเกิดเหตุการณ์ลักษณะนี้ ต้องสามารถตอบให้ได้ว่า เป็นกระดูกมนุษย์หรือสัตว์ กรณีเป็นของมนุษย์ จะต้องตอบคำถามต่าง ๆ ที่ตามมาเหล่านี้ให้ได้ ไม่ว่าจะเป็น ของมนุษย์เพศใด เชื้อชาติอะไร อายุประมาณเท่าใด อะไรเป็นสาเหตุทำให้ตาย และมีใครทำให้ตายหรือไม่ การจะตอบคำถามทั้งหมดเหล่านี้ได้ ต้องอาศัยองค์ความรู้ทางด้านนิติวิทยากระดูกมีส่วนช่วยในกระบวนการ ความสมบูรณ์ของคำตอบที่ได้ ขึ้นกับชิ้นส่วนกระดูกที่พบในสถานที่เกิดเหตุเป็นหลัก ยิ่งกระดูกที่พบมีความสมบูรณ์มากเท่าไร การหาคำตอบที่ครบถ้วนก็จะมีมากขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้วิธีการทางนิติวิทยากระดูกที่นำมาใช้ตรวจพิสูจน์มีได้หลายวิธี เป็นการรวมองค์ความรู้เข้าด้วยกัน ไม่

ว่าจะเป็น กายวิภาคศาสตร์ (Anatomy) นิติวิทยาศาสตร์ (Forensic Science) อณูพันธุศาสตร์ สถิติ (Statistics) ตลอดจนการนำเอาคอมพิวเตอร์กราฟิกที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองใบหน้าจากกะโหลก (Facial Recognition and Reconstruction) เข้ามามีส่วนช่วยในการทำงานมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

2.2 การจัดจำแนกด้วยลักษณะทางมหากายวิภาค (Gross Morphology Identification)

กระดูกที่ถูกรับในสถานที่เกิดเหตุหากมีความสมบูรณ์ค่อนข้างมาก หรือเป็นกระดูกชิ้นใหญ่ เช่น ส่วนของกะโหลกศีรษะ กระดูกสันหลัง กระดูกสะบัก กระดูกเชิงกราน (Pelvic) กระดูกต้นแขน หรือกระดูกแขนท่อนบน กระดูกแขนท่อนล่างด้านใน (Ulna) ด้านนอก กระดูกต้นขาหรือกระดูกขาท่อนบน (Femur) กระดูกหน้าแข้งหรือกระดูกขาท่อนล่างด้านใน (Tibia) ด้านนอก (Fibula) และกระดูกซี่โครง กระดูกในกลุ่มนี้ของมนุษย์จัดจำแนกจากสัตว์ได้ง่าย เนื่องจากสัณฐานวิทยากระดูกมีความแตกต่างกัน ดังในรูปที่ 2.6 ขณะที่กระดูกขนาดเล็กอย่าง กระดูกข้อมือ กระดูกฝ่ามือ กระดูกข้อเท้า (Tarsus) กระดูกฝ่าเท้า (Metatarsus) กระดูกนิ้ว และฟัน การจัดจำแนกจึงเป็นไปได้ค่อนข้างยาก จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญที่มีความชำนาญเฉพาะด้านในการตรวจสอบ ปัจจัยหลักที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดูกมนุษย์กับสัตว์มีความแตกต่างกัน ส่วนหนึ่งมาจากลักษณะทางชีวกลศาสตร์ (Biomechanics) มนุษย์มีการเดินด้วยสองเท้า (Biped) ขณะที่สัตว์ส่วนใหญ่จะเดินด้วยสี่เท้า (Quadruped) จึงทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดูกมีความแตกต่างกัน (12, 13, 14)

Naresh และคณะ (2000) เปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดูกสันหลังส่วนอก (Thoracic) และกระดูกสันหลังส่วนเอว (Lumbar) ระหว่างกวางแดง (*Cervus elaphus*) กับมนุษย์ พบว่า กระดูกสันหลังของกวางแดง และมนุษย์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน ในการศึกษาที่มีการแบ่งลักษณะการเปรียบเทียบในส่วนต่าง ๆ ไว้ดังต่อไปนี้ ลักษณะการแอ่นของกระดูกสันหลัง (Spinal Curvature) กระดูกสันหลังของกวางมีลักษณะค่อนข้างแอ่น (Slight Lordosis) พบว่าลักษณะดังกล่าวเริ่มตั้งแต่ช่วงส่วนบนของกระดูกสันหลังส่วนอก และพบลักษณะการคดของกระดูกสันหลัง (Kyphosis) ในช่วงกระดูกสันหลังส่วนเอว มักพบลักษณะของกระดูกสันหลังรูปแบบดังกล่าวในสัตว์สี่เท้า นอกจากนี้ยังพบว่าในกวางมีลักษณะของกระดูกสันหลังส่วนคอที่ค่อนข้างสูง โดยลักษณะดังกล่าว ช่วยอธิบายถึงรูปลักษณ์ภายนอกของกวางที่มีลำคอยาวได้นั่นเอง ในการเปรียบเทียบรูปร่างของกระดูกสันหลัง (Vertebral Bodies) รูปร่างของกระดูกสันหลังในกวาง มีลักษณะที่เหมือนกันแทบทุกชิ้น แตกต่างจากในมนุษย์ ลักษณะนี้สามารถพบได้มากโดยเฉพาะในกระดูกสันหลังส่วนคอ และกระดูกสันหลังส่วนต้นของกวาง ขณะที่กระดูกสันหลังของมนุษย์ จะมีความกว้างมากกว่าความสูง กระดูกสันหลังส่วนอก มีความกว้างมากกว่าความสูง 1.6 เท่า ขณะที่กระดูกสันหลังส่วนเอวจะมากกว่าประมาณ 2 เท่า เปรียบเทียบรูปร่าง Pedicles พบว่า ลักษณะของ

Pedicle ที่ตำแหน่งของกระดูกสันหลังส่วนคอ และออกตอนต้นในกวางมีขนาดกว้างกว่าของมนุษย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของกระดูกสันหลังส่วนอกช่วงปลาย และกระดูกสันหลังส่วนเอวช่วงต้น โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง L4 และ L5 พบว่าในมนุษย์มีความกว้างของ Pedicle ที่มากกว่า การเปรียบเทียบ Spinous Processes และ Transverse Processes ในกวางกับมนุษย์ พบว่า ลักษณะ Spinous Processes ของกวางมีขนาดเล็กกว่าของมนุษย์ โดยพบที่ช่วงกระดูกสันหลังส่วนคอ และมีขนาดใหญ่ขึ้นในกระดูกสันหลังส่วนอกที่ตำแหน่ง T10 เมื่อเปรียบเทียบกับกระดูกสันหลังส่วนเอว กลับพบว่าในกวางมี Spinous Processes ขนาดใหญ่กว่าของมนุษย์ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระดูก (Bone Mineral Density) ในการศึกษาที่มีการทดสอบการเหยียดงอ (Flexion-Extension) การงอทางด้านข้าง (Lateral Flexion) รวมทั้งการหมุน (Axial Rotation) พบว่า เมื่อทำการทดสอบท่าทางดังกล่าว ในมนุษย์กระดูกสันหลังส่วนเอว และคอ มีการเคลื่อนที่ได้ง่าย ขณะที่กระดูกสันหลังส่วนอกนั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อทำการทดสอบกับกระดูกสันหลังของกวาง พบว่า ที่ตำแหน่งของกระดูกสันหลังส่วนคอ และส่วนอกตอนต้น สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ขณะที่กระดูกสันหลังส่วนเอวนั้นกลับไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เลย (15) Phatsara และคณะ (2016) ศึกษาสัณฐานวิทยาของกระดูกในคนไทยเพื่อใช้ในการจัดจำแนกความแตกต่างระหว่างกระดูกต้นแขน/ขาหน้า กระดูกต้นขา/ขาหลัง และกระดูกหน้าแข้ง ของมนุษย์ เปรียบเทียบกับสัตว์ 5 ชนิด ได้แก่ วัว สุนัข ม้า ลิง และสุกร แบ่งเป็นการวัดแบบ ดัชนีเมตริก 16 ตำแหน่ง และเชิงมุม 17 ตำแหน่ง รวมทั้งสิ้น 33 ตำแหน่ง พบ 18 ตำแหน่ง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างมนุษย์กับสัตว์ (16)

ชิ้นส่วนกระดูก (Fragmented Bone) หรือกระดูกที่อยู่ในรูปไม่สมบูรณ์ (Incomplete Bone) การจัดจำแนกในแต่ละตำแหน่งจะมีความซับซ้อนต่างกัน ซึ่งขึ้นกับตำแหน่งของชิ้นกระดูกที่พบเป็นปัจจัยหลัก หากมีโครงสร้างสำคัญปรากฏอยู่ ดังภาพที่ 2.6 ประกอบตารางที่ 2.1 จะทำให้จัดจำแนกได้โดยง่าย



รูปที่ 2.3 ลักษณะที่แตกต่างกันของกระดูก มนุษย์ ลิง สุนัข กวาง วัว และม้า
 กระดูก มนุษย์ (1) ลิง (2) สุนัข (3) สุนัข (4) กวาง (5) วัว (6) และม้า (7) กระดูกสะบัก (a) กระดูกต้น
 แขน/ขาหน้า (b) กระดูกแขน (ปลายขาหน้า) ท่อนล่างด้านใน-ด้านนอก (c) กระดูกต้นขา/ขาหลัง (d)
 กระดูกขาท่อนล่างด้านใน-ด้านนอก (e) และกระดูกซี่โครง (f) จุดสังเกตความแตกต่างระหว่างมนุษย์
 กับสัตว์; Acromion (รูป a วงกลม) มนุษย์ยาวกว่าสัตว์ชนิดชนิดอื่น ด้าน proximal ของกระดูกต้น
 แขนมนุษย์/ขาหน้าสัตว์ (รูป b วงกลมสีแดง) และกระดูกต้นขามนุษย์/ขาหลังสัตว์ (รูป d วงกลมสี
 แดง) จะเป็นส่วนหัว ปุ่มกระดูกไม่ยาวเหมือนสัตว์ชนิดอื่น ด้าน proximal ของกระดูกต้นแขนมนุษย์/
 ขาหน้ามีลักษณะกว้าง และแบนมากกว่าสัตว์ชนิดอื่น (รูป b วงกลมสีเหลือง) กระดูกต้นขาหลังของ
 ม้าพบปุ่มกระดูก Greater Trochanter (รูป d ลูกศรสีขาว) ในม้ามีการเชื่อมกันระหว่างกระดูกปลาย
 ขาหน้าท่อนล่างด้านในกับด้านนอก กระดูกขาท่อนล่างด้านในยาวเป็นครึ่งหนึ่งของท่อนล่างด้านนอก

(รูป c ลูกศรสีแดง) ปุ่มกระดูก Olecranon Process ของกระดูกแขนท่อนล่างด้านในมนุษย์มีขนาดเล็ก ขณะที่สัตว์อื่นยื่นออกมาชัดเจน (รูป c วงกลมสีแดง) ด้าน proximal ของกระดูกขาท่อนล่างด้านในมนุษย์มีลักษณะตรง สัตว์อื่นโค้งเข้าด้านในเล็กน้อย (รูป e วงกลมสีแดง) กระดูกขาท่อนล่างด้านนอกของสัตว์บางชนิดลดรูปให้มีขนาดเล็กลง เช่น กวาง (รูป e ลูกศรสีเหลือง) วัว (รูป e ลูกศรสีขาว) และม้า (รูป e ลูกศรสีแดง) ด้าน proximal ของกระดูกซี่โครงในมนุษย์ไม่พบปุ่มกระดูกยื่นออกมาชัดเจนเหมือนใน/สัตว์ (รูป f วงกลมสีแดง) (Ca.=Caudal, Cr.=Cranial, In.=Inferior, Med.=Medial, Lat.=Lateral, Su.=Superior)

ที่มา: จากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร เชียงใหม่เวชสาร, ธนิตา พิทักษ์ อรรถนพ, พงษ์พิเชษฐ ภัคตีณรงค์, กรกฎ งานวงศ์พานิชย์, การแยกกระดูกมนุษย์และสัตว์ เพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยากระดูก, 2563, ฉบับที่ 59(4), หน้า 241-52. (17)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบตำแหน่งเฉพาะกระดูกในมนุษย์และสัตว์

กระดูก	ลักษณะสังเกต
ต้นแขน/ขาหน้า	ในมนุษย์มีลักษณะตรง ขณะที่สัตว์ชนิดอื่นมีลักษณะโค้งเป็นรูปตัวเอฟ (f) (รูปที่ 2.6b)
	ในสัตว์ ปุ่มกระดูก Greater Tubercle มีขนาดใหญ่ ขณะที่มนุษย์มีขนาดเล็กมาก พื้นที่บริเวณ Proximal เป็นส่วนหัวกระดูกต้นแขน (Head of Humerus) (รูปที่ 2.6b)
	ด้าน Distal ของกระดูกมนุษย์แบนจากหน้าไปหลัง (Anteroposterior) ในสัตว์จะมีความหนาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม (รูปที่ 2.6b)
แขนท่อนล่างด้านในและด้านนอก	ในม้ามมีการเชื่อมกันของกระดูกทั้งสองชิ้นไม่สามารถแยกออกจากกันได้ กระดูกขาท่อนล่างด้านในยาวครึ่งหนึ่งของกระดูกขาท่อนล่างด้านนอก (รูปที่ 2.6c)
	ส่วนหัวของกระดูกแขนท่อนล่างด้านนอก (Head of Radius) ในมนุษย์เป็นทรงกลม ในสัตว์ส่วนใหญ่เป็นทรงวงรี
	ปุ่มกระดูก Olecranon Process ของมนุษย์มีขนาดเล็ก ในสัตว์จะยื่นออกมาชัดเจน (รูปที่ 2.6c)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างเปรียบเทียบตำแหน่งเฉพาะกระดูกในมนุษย์และสัตว์ (ต่อ)

กระดูก	ลักษณะสังเกต
กระดูกต้นขา/ขาหลัง	มีาพบปุ่มกระดูกเรียกว่า Third Trochanter ที่ปลายด้าน Proximal ด้านนอก (รูปที่ 2.6d)
	ปุ่มกระดูก Greater Trochanter ในกระดูกสัตว์ส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่ เกือบเท่าหรือใหญ่กว่าส่วนหัวกระดูกต้นขาหลัง (Head of Femur) (รูปที่ 2.6d)
กระดูกซี่โครง	มนุษย์พบว่ามีความโค้งมากกว่าสัตว์ชนิดอื่น (รูปที่ 2.6f)
กระดูกสันหลัง	ส่วนลำตัว (Centrum) กระดูกสันหลังมนุษย์มีลักษณะแบน สัตว์อื่นส่วนใหญ่จะมีความหนาที่มากกว่า

ที่มา: Bass, 1989 (12), Mahakkanukrauh, 2012 (18), Nganvongpanit, 2016 (19) และ จากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Chiang Mai Medical Journal, Pitakarnnop T, Pakdeenarong P and Nganvongpanit K, The classification of human and animal bones for forensic osteology aspect, 2020, Vol. 59(4), p. 241-52. (17)

2.3 การแยกด้วยลักษณะทางจุลกายวิภาค (Histology Identification)

การศึกษาคความแตกต่างลักษณะจุลกายวิภาคกระดูกระหว่างมนุษย์กับสัตว์ เพื่อใช้ในการประเมินเบื้องต้นก่อนการส่งตรวจด้วยเทคนิคทางอณูพันธุศาสตร์ ประทับใช้ในกรณีตัวอย่างหรือชิ้นส่วนกระดูกต้องสงสัยมีจำนวนมาก จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูล การเปรียบเทียบความแตกต่างโครงสร้างจุลกายวิภาคกระดูกระหว่างมนุษย์กับสัตว์ มีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ยังไม่มีการนำมาปรับใช้จริงกับงานภาคสนาม หรือประยุกต์ใช้กับงานตรวจสถานที่เกิดเหตุ ตรวจเปรียบเทียบพยานวัตถุที่อยู่ในกลุ่มของชิ้นส่วนกระดูก เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการ

2.3.1 ลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูก (Histology of Bone)

กระดูกเนื้อแน่น (Compact Bone) และกระดูกพรุน (Spongy Bone) เป็นองค์ประกอบหลักของกระดูก (รูปที่ 2a) มีโครงสร้างขนาดใหญ่ตรงกลาง คือ ออสติออยด์ (Osteon) เมื่อออสติออยด์โตเต็มที่ (Mature Osteon) หรือเปลี่ยนเป็นออสติออยด์ทุติยภูมิ (Secondary Osteon) จะพบเส้นซีเมนต์ (Cement Line)

ออสติออยด์มีด้วยกันทั้งหมดสองชนิด ได้แก่ ออสติออยด์ปฐมภูมิ (Primary Osteon) เป็นออสติออยด์ที่กำลังสร้างตัว มีลักษณะเด่น คือ ไม่พบเส้นซีเมนต์ที่ขอบออสติออยด์ อาจพบการเรียงตัวที่มีลักษณะเฉพาะได้เป็นบางครั้ง เช่น เรียงตัวเป็นแถว (Osteon Banding) เรียงสลับเหมือนเรียง

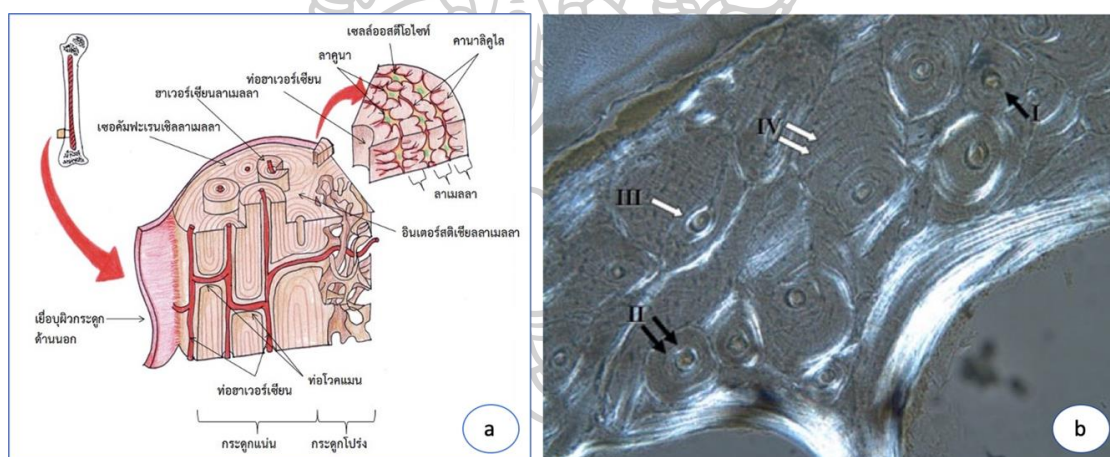
อิฐ (Plexiform Bone) (20, 21) รูปแบบการเรียงตัวแบบเรียงอิฐ โดยมากมักพบได้ในลูกสัตว์ ออสติออยด์ชนิดที่สอง คือ ออสติออยด์ทุติยภูมิ โดยออสติออยด์ชนิดที่สองนี้แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดย่อย (20, 22) ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2.7b)

ชนิดที่ 1 (Type I) Common Osteon ออสติออยด์ชนิดนี้สามารถพบได้ทั่วไป เป็นทรงกลมหรือรี ท่อฮาเวอร์เซียนอยู่ตรงกลาง ลามেলাเรียงตัวเป็นชั้นซ้อนกัน พบลากูนาด้านใน มีเส้นซีเมนต์อยู่ด้านนอกสุด

ชนิดที่ 2 (Type II) เรียกว่า Embedded Osteons พบ Common Osteon ที่มีขนาดเล็กอยู่ภายในด้านในของออสติออยด์ขนาดใหญ่

ชนิดที่ 3 (Type III) เรียกว่า Double Zonal Osteons มีลักษณะเป็นออสติออยด์ขนาดใหญ่ จุดสังเกตสำคัญ คือ เป็นออสติออยด์ที่มีลักษณะของเส้นซีเมนต์ 2 เส้นใน 1 ออสติออยด์

ชนิดที่ 4 (Type IV) เรียกว่า Drifting Osteons การเจริญของออสติออยด์ที่เกิดไม่พร้อมกัน ทำให้มีชั้นลามেলাเรียงตัวซ้อนกันหลายชั้นที่ขอบด้านใดด้านหนึ่ง จากการเจริญที่มีมากกว่าอีกด้าน



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูก
a ลักษณะจุลกายวิภาคของกระดูกเนื้อแน่น และกระดูกพรุน แสดงการเชื่อมกันของระบบท่อที่อยู่ภายใน b แสดงโครงสร้างออสติออยด์ทุติยภูมิ 4 ชนิด ได้แก่ Common Osteon (I), Embedded Osteon (II), Double Zonal Osteon (III) และ Drifting Osteon (IV)

ที่มา: รูปที่ 2.7a วาดโดย พัสันนพันธ์ มากมี จากกรกฎ งานวงศ์พาณิชย์, “ตำราวิทยากระดูกทางสัตวแพทย์”, 2557, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ สยามพิมพ์นานาชาติ, หน้า 252. (19) รูปที่ 2.7b Crescimanno A, Stout SD., Differentiating fragmented human and nonhuman long bone using osteon circularity, 2012, J Forensic Sci., Vol. 57, p. 287-94. (20)

2.3.2 ความแตกต่างระหว่างชนิดสัตว์ (Differences between Species)

ลักษณะจุลกายวิภาคของกระดูกเนื้อแน่นนั้น จะมีความแตกต่างกันระหว่างลูกสัตว์กับสัตว์ที่โตเต็มวัยแล้ว ซึ่งความแตกต่างนี้สามารถพบได้ไม่ว่าจะใน มนุษย์ (23) ลิง (24) วัว (25) สุนัข (26) หรือแม้แต่สัตว์ที่มีขนาดเล็กอย่างเช่นกระต่าย (27) นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบในสัตว์อีกหลายชนิด เช่น ในมนุษย์ (28, 29) สุนัข (26) ลิงวอกภูเขา (29) ช้าง (30) แมว (28) แกะ (28) กวาง (28) หมาป่า (28) และตัวนึ่ง (28) โดยผลการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของออสติออยต์ในกระดูกแต่ละชิ้นของร่างกายมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ขณะที่การศึกษาเปรียบเทียบจำนวนเซลล์กระดูกออสติออยต์ โดยเก็บตัวอย่างจากกระดูกยาวที่ตำแหน่งเดียวกันของ มนุษย์ แมว แกะ กวาง หมาป่า และตัวนึ่ง หลังจากทำการศึกษาเปรียบเทียบแล้ว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า กระดูกจากสัตว์ชนิดเดียวกัน มีจำนวนเซลล์กระดูกในออสติออยต์ใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า แม้กระดูกแต่ละตำแหน่งในสัตว์แต่ละชนิด จะมีรูปร่าง และขนาดที่ไม่เหมือนกัน แต่ในสัตว์ชนิดเดียวกันจำนวนเซลล์กระดูกในออสติออยต์จากกระดูกแต่ละตำแหน่ง อาจไม่มีความแตกต่างกันเลยก็เป็นได้ (28)

การนำเอาองค์ความรู้เรื่องโครงสร้างภายในของกระดูกเนื้อแน่นมาเป็นเครื่องมือในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกในสิ่งมีชีวิต เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ในการพิสูจน์หลักฐาน หรืองานนิติวิทยาศาสตร์ ด้วยค่าใช้จ่ายที่ต้องจัดการต่อหนึ่งตัวอย่าง มีราคาไม่สูง และยังคงแสดงให้เห็นผลการเปรียบเทียบที่ชัดเจน เช่น การเปรียบเทียบลักษณะของออสติออยต์ (21, 23, 28, 29, 31, 32, 33, 34) เมื่อปี พ.ศ. 2490 มีการนำลักษณะจุลกายวิภาคกระดูก มาใช้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสัตว์แต่ละชนิดเป็นครั้งแรก และเริ่มมีการพัฒนาต่อยอด ในปี พ.ศ. 2509 มีการเปรียบเทียบโครงสร้างออสติออยต์ในกระดูกต้นขาหลังสัตว์ 6 ชนิด ได้แก่ วัว สุนัข ลิง แมว กระต่าย หนู เปรียบเทียบกับมนุษย์ ได้รับการเผยแพร่ในวารสารกายวิภาคศาสตร์ (Journal of Anatomy) ลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูกวัว ทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางออสติออยต์ และเส้นรอบวงของท่อฮาเวอร์เซียน มีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูกของสัตว์ที่ใช้ในการศึกษา ขณะที่ในหนูนั้นมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางออสติออยต์กับเส้นรอบวงของท่อฮาเวอร์เซียนเล็กที่สุด (23)

มีการศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างออสติออยต์ของกระดูกหน้าแข้งโดยเปรียบเทียบกันระหว่างมนุษย์ กับสัตว์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ลิง ช้างเอเชีย วัว สุกร ไก่ แมว และสุนัข ซึ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของจำนวนท่อฮาเวอร์เซียน เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อฮาเวอร์เซียน และเส้นผ่านศูนย์กลางของออสติออยต์ มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 2.2 รวมถึงมีการสร้างสมการทำนายชนิดของสัตว์โดยอาศัยผลที่ได้จากการศึกษาของโครงสร้างออสติออยต์ ซึ่งสมการที่ได้นี้มีความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์มากถึงร้อยละ 88.5 (33) (รูปที่ 2.8) และยังมีการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ลักษณะของออสติออยต์บางชนิดสามารถช่วย

บ่งบอกชนิดของสัตว์ได้ เช่น ลักษณะ Osteon Banding หรือ Plexiform Bone ที่จะพบได้ในลูกสัตว์
บางชนิดเช่น ลูกกวาง ลูกสุกร และลูกสุนัข (26, 32, 34)



ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางของออสติออยด์ เส้นผ่านศูนย์กลางของฮาเวอร์เซียน และความหนาแน่นของจำนวนท่อฮาเวอร์เซียน จากกระดูกหน้าแข้งในมนุษย์และสัตว์

สัตว์	เส้นผ่านศูนย์กลางของออสติออยด์ (ไมโครเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อฮาเวอร์เซียน (ไมโครเมตร)	ความหนาแน่นของท่อฮาเวอร์เซียน (ตารางมิลลิเมตร)	อ้างอิง
มนุษย์	111.07±2.25	35.92±2.12	6.23±0.30	Morales et al., 2012
	184.66±28.63	39.71±7.95	-	Nganvongpanit et al., 2015
ลิง	143.46±26.80	33.74±6.53	-	Nganvongpanit et al., 2015
ช้าง	234.50±58.94	73.58±21.48	-	Nganvongpanit et al., 2017
สุนัข	59.39±3.63	12.37±1.91	8.75±0.47	Morales et al., 2012
	157.01 ± 32.87	34.93 ± 9.06	-	Nganvongpanit et al., 2015
แมว	49.93±3.29	10.60±1.01	8.28±1.63	Morales et al., 2012
หมู	114.76±8.19	40.09±14.82	1.97±0.39	Morales et al., 2012
วัว	118.34±16.40	26.24±3.75	3.65±0.65	Morales et al., 2012
ไก่	45.73±4.66	29.49±2.18	19.36±1.25	Morales et al., 2012

ที่มา: จากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Chiang Mai Medical Journal, Pitakarnnop T, Pakdeenarong P and Nganvongpanit K, The classification of human and animal bones for forensic osteology aspect, 2020, Vol. 59(4), p. 241-52.



รูปที่ 2.5 สมการในการแยกชนิดกระดูกหน้าแข้งของมนุษย์และสัตว์

สมการในการแยกชนิดกระดูกหน้าแข้งของมนุษย์และสัตว์โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของออสติออยด์ เส้นผ่านศูนย์กลางช่องฮาเวอร์เซียน และความหนาแน่นของจำนวนท่อฮาเวอร์เซียน; DC = Diameter of Haversian Canals, DO = Osteon Diameter, Dmm^2 = Density of Haversian Canal per mm^2

ที่มา Morales JP, Ignacio RH, Daniela Z, Ivan SH. Determination of The Species From Skeletal Remains Through Histomorphometric Evaluation and Discriminant Analysis. *Int J Morphol.* 2012;30:1035-41. (33)

จากงานศึกษาวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้น ยังมีนักวิจัยบางกลุ่มที่สนใจศึกษาลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูกที่กระดูกอยู่ในลักษณะสภาพทางกายไม่เป็นไปตามปกติ หรือกระดูกที่ผ่านกระบวนการอื่นมาแล้ว เช่น การเผา หรือการอยู่ในสภาพถูกแช่แข็ง โดยที่การศึกษาลักษณะทางจุลกายวิภาคของกระดูกมนุษย์ที่ถูกเผาในอุณหภูมิต่างกัน จาก 100 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 1,100 องศาเซลเซียส ในเวลา 20 นาที Rafael และคณะ (2013) พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส ลักษณะโครงสร้างทางจุลกายวิภาคเริ่มผิดรูป แต่ยังสามารถระบุได้ว่าเป็นลักษณะของโครงสร้างใด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ช่วง 300 ไปจนถึง 1,100 องศาเซลเซียส จะเริ่มมีการแตกของกระดูกในลักษณะตามแนวยาว (Longitudinal Fracture) และโครงสร้างภายในของกระดูกเริ่มเสียหายจนไม่สามารถบอกรายละเอียดที่เป็นลักษณะสำคัญได้อีก (35) ขณะที่กรณีการศึกษาในกระดูกที่ถูกแช่แข็ง หรือได้รับความเย็นมากกว่าปกติ กลับพบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางจุลกายวิภาคของกระดูก (36)

2.4 วิธีทางอนุพันธุศาสตร์

กรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (Deoxyribonucleic Acid; DNA) หรือดีเอ็นเอ เป็นสารพันธุกรรมที่พบในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ดีเอ็นเอสามารถทำการถ่ายถอดคุณสมบัติต่าง ๆ จากรุ่นพ่อแม่ไปสู่รุ่นลูกได้ เนื่องจากลูกจะได้รับดีเอ็นเอจากทางพ่อและแม่อย่างละครึ่ง ทำให้ในแต่ละบุคคลมีรูปแบบของดีเอ็นเอที่แตกต่างกันไป ยกเว้นในกรณีของฝาแฝดที่เกิดจากไข่ใบเดียว (twin) กันเท่านั้น ในปัจจุบันการตรวจสอบลายพิมพ์ดีเอ็นเอ (DNA Fingerprint) หรือ การตรวจรูปแบบสารพันธุกรรม (DNA Profiling) เป็นวิธีการมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบสารพันธุกรรมเพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลสำหรับงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ ทั้งในการพิสูจน์หลักฐานทางคดี การพิสูจน์บุคคลในการติดตามบุคคลสูญหาย และการพิสูจน์ศพนิรนาม

การตรวจรูปแบบสารพันธุกรรม เป็นการตรวจสอบสารพันธุกรรมบริเวณที่ไม่ใช่ยีน มีลำดับเบสซ้ำ ๆ กัน โดยนำเอาเทคนิคโพลีเมอเรสเชนรีเอคชัน (Polymerase Chain Reaction; PCR) มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ ซึ่งข้อดีของเทคนิค PCR คือ การทำลายพิมพ์ดีเอ็นเอสามารถใช้ปริมาณดีเอ็นเอน้อยกว่า 1 นาโนกรัม การใช้เทคนิค PCR ในการตรวจสอบนี้ ทำได้โดยการออกแบบ DNA Primer ให้จำเพาะกับของส่วนดีเอ็นเอบริเวณที่มีลำดับเบสซ้ำ เรียกว่า ไมโครแซทเทลไลท์ (Microsatellite) หรือ Short Tandem Repeat (STR) ในปี ค.ศ. 1997 Federal Bureau of Investigation (FBI) มีประกาศใช้งานชุด STRs ในการตรวจลายพิมพ์ดีเอ็นเอ (37, 38) ประกอบไปด้วย STRs 13 ตำแหน่ง ได้แก่ CSF1PO, FGA, TH01, TPOX, VWA, D3S1358, D5S818, D7S820, D8S1179, D13S317, D16S539, D18S51 และ D21S11 เพื่อใช้ประโยชน์ในการพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคล นอกจากนี้ FBI ยังได้พัฒนาฐานข้อมูลลายพิมพ์ดีเอ็นเอที่เรียกว่า Combined DNA Index System (CODIS) เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลลายพิมพ์ดีเอ็นเอจากผู้กระทำผิดในคดีต่าง ๆ ไว้เป็นฐานข้อมูล และสามารถช่วยในการสืบสวนสอบสวนหาตัวคนร้ายได้รวดเร็วขึ้น และนอกจากการตรวจลายพิมพ์ดีเอ็นเอโดย PCR-Based Technique ในโครโมโซมร่างกายแล้ว ปัจจุบันยังมีการหาลายพิมพ์ดีเอ็นเอโดยการตรวจ STR ในโครโมโซม X และ โครโมโซม Y

การศึกษาดีเอ็นเอจากโครโมโซมเพศถือเป็นความก้าวหน้าล่าสุดในการพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลในงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ เนื่องจากคุณสมบัติที่จำเพาะของกระดูก เช่น ความทนทานทางกายภาพที่อาจเกิดการเสื่อมสภาพจากสภาวะแวดล้อมโดยรอบ และการถูกทำลายทางชีวภาพ แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตาม ยังคงพบว่าเทคนิค STR ที่นิยมนำมาใช้ตรวจพิสูจน์ยังคงมีข้อจำกัดในการศึกษาอยู่เช่นกัน เนื่องจากหากไม่มีตัวอย่างอ้างอิงเปรียบเทียบ ไม่ว่าจะเป็นตัวอย่างจากบุคคลก่อนสูญหายหรือตัวอย่างจากญาติสายตรงก็ตาม ก็จะไม่สามารถดำเนินการเปรียบเทียบได้ คงทำได้แค่การเก็บข้อมูลการตรวจสอบไว้ในระบบเท่านั้น

Thorsten และคณะ (2011) ศึกษาทางอณูชีววิทยาด้วยการสกัดดีเอ็นเอจากกระดูกที่ผ่านการให้ความร้อน โดยในกรณีศึกษานี้คือ กระดูกจะได้รับความร้อนจากการถูกเผา โดยศึกษาถึงระดับของการได้รับความร้อนที่มากที่สุด หรืออุณหภูมิที่สูงที่สุด ที่เมื่อนำเอาตัวอย่างนั้นมาสกัดดีเอ็นเอแล้ว โครงสร้างดีเอ็นเอไม่มีการเสียหายจากการได้รับความร้อน การศึกษานี้ นำเอาตัวอย่างกระดูกที่ได้จากคดีเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นจริงมาใช้ในการศึกษา รายละเอียดต่าง ๆ ของคดีมีการบันทึกไว้ รวมถึงสถานที่เกิดเหตุที่แตกต่างกัน ทั้งคดีเพลิงไหม้ในบ้าน ในรถ รวมถึงคดีที่มีการเกิดการระเบิดในสถานที่เกิดเหตุหรือไม่ ตัวอย่างของกระดูกที่นำมาใช้สกัดดีเอ็นเอนั้น จะถูกแบ่งตามระดับของการได้รับความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งการได้รับความร้อนในระดับที่แตกต่างกันนั้น ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของชิ้นส่วนตัวอย่างกระดูกที่ศึกษามีความแตกต่างกัน ระดับของการไหม้ไฟถูกแบ่งออกเป็น 6 ระดับ ได้แก่ Well Preserved, Semi-Burnt, Black Burnt, Blue-Grey Burnt และ Blue-Grey-White Burnt โดยมีตัวอย่างกระดูกทั้งสิ้น 71 ตัวอย่าง (n=71) จากร่างผู้เสียชีวิต 31 ร่าง ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำไปทำการสกัดดีเอ็นเอ และทำการตรวจสอบเบื้องต้น ทั้งด้านเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพของดีเอ็นเอ ด้วยวิธี PCR และ Real Time PCR พบว่า ตัวอย่างดีเอ็นเอที่ได้จากกระดูกที่ถูกเผาในระดับ Well Preserved และ Semi-Burnt สามารถตรวจพบ Amelogenin, vWA, TH01, DYS390, DYS391, mt280 และ mt439 ขณะที่ระดับความเข้มข้นของปริมาณดีเอ็นเอที่ตรวจสอบด้วย Real Time PCR พบว่า Well Preserved (n=9) มีปริมาณดีเอ็นเอเฉลี่ยอยู่ที่ 71.5 ng/ μ l (10-114 ng/ μ l) Semi-Burnt (n=18) พบปริมาณเฉลี่ย 4.9 ng/ μ l (1.6-21.7 ng/ μ l) Black-Burnt (n=26) พบปริมาณความเข้มข้นดีเอ็นเอที่สามารถสกัดได้อยู่ที่ 0.01-0.84 ng/ μ l ในส่วนของตัวอย่างที่ถูกไฟไหม้ในระดับ Blue-Grey (n=10) และ Blue-Grey-White (n=8) นั้น แทบจะไม่พบปริมาณที่สามารถใช้เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำได้เลย ซึ่งพบเพียงร้อยละ 38.9 ขณะที่ในปริมาณดีเอ็นเอนั้น มีเพียงร้อยละ 25 ของปริมาณดีเอ็นเอทั้งหมด ที่พบว่ามี Amelogenin ที่ใช้ในการระบุเพศได้ (39)

2.5 การแยกด้วยปริมาณแร่ธาตุที่สะสมในกระดูก (Identification Using The Elements)

2.5.1 แร่ธาตุที่สะสมในร่างกายสัตว์ (Element Accumulate in Animals)

ร่างกายของสิ่งมีชีวิตมีการสะสมแร่ธาตุในเนื้อเยื่อโดยเฉพาะเนื้อเยื่อกลุ่มที่ถูกเรียกว่า Mineralized Tissue เช่น ในกลุ่มของกระดูก ฟัน เขาสัตว์ (Horn/Antler) ปริมาณที่ค่อนข้างมาก อวัยวะส่วนต่าง ๆ ดังที่กล่าวมานี้ จัดเป็นอวัยวะที่เป็นแหล่งสะสมของแร่ธาตุที่สำคัญต่าง ๆ ของร่างกาย ไม่ว่าจะเป็น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส (P) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) การศึกษาวิเคราะห์แร่ธาตุจากเขาสัตว์สามชนิด คือ วัว ควาย และแกะ มีการพบแร่ธาตุหลายชนิดเป็นองค์ประกอบ โดยเฉพาะกำมะถัน (S) ที่พบในปริมาณที่มากกว่าธาตุชนิดอื่น เนื่องจากกำมะถันจัดเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีนเคอราติน (Keratin) (40) และยังพบธาตุชนิดอื่นที่เป็น

องค์ประกอบอีกหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น แคลเซียม ฟอสฟอรัส ทองแดง เหล็ก แมกนีเซียม และสังกะสี (Zn) ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในเขาของวัวมีแคลเซียมในปริมาณมากที่สุด รองลงมา คือ แกะ และควาย ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเขากวาง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างส่วนของ Antler กับ Pedicle Bone ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า ทั้ง Antler และ Pedicle Bone พบว่ามีแคลเซียม ฟอสฟอรัส กำมะถัน แมกนีเซียม และ โพแทสเซียม (K) เป็นองค์ประกอบ และมีสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบในอวัยวะทั้งสองส่วนนั้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบในรูปแบบอัตราส่วน พบว่าอัตราส่วนระหว่าง สตรอนเซียม กับ แคลเซียม (Sr/Ca) และ อัตราส่วนระหว่าง แบเรียม กับ แคลเซียม (Ba/Ca) มีปริมาณที่แตกต่างกันทั้งในส่วนของ Pedicle และ Antler และด้วยความแตกต่างนี้เอง ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการได้รับธาตุ หรือแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ผ่านทางการรับอาหาร ซึ่งเมื่อมีการได้รับอาหารชนิดใด หรือมีการเปลี่ยนแปลงไปของชนิดอาหารที่ได้รับ ก็จะส่งผลต่อเนื่องไปยังอัตราส่วนของ สตรอนเซียม/แคลเซียม และ แบเรียม/แคลเซียม ที่พบใน Pedicle และ Antler ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนของ สตรอนเซียม/แคลเซียม และ แบเรียม/แคลเซียม ในเขากวาง สามารถบ่งชี้ถึงชนิดอาหารได้ที่กวางได้รับได้ (41)

กระดูก และฟัน เป็นอวัยวะหลักในการสะสมแร่ธาตุของร่างกาย องค์ประกอบของแร่ธาตุที่สำคัญ ได้แก่ ไฮดรอกซีแอพาไทต์ (Hydroxyapatite) โครงสร้างของไฮดรอกซีแอพาไทต์ ประกอบด้วย แคลเซียม และฟอสฟอรัส เป็นหลัก มีอัตราส่วนประมาณ 2.3 เท่า ทั้งในกระดูกและฟัน ในการศึกษากระดูกสุนัขจำนวน 48 ชิ้นทั่วร่างกาย อัตราส่วนของ แคลเซียม และฟอสฟอรัสที่พบ มีความแตกต่างกันในกระดูกแต่ละตำแหน่งบนร่างกายของสุนัข อีกทั้งยังพบแร่ธาตุชนิดอื่นที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย (Essential Trace Elements) และที่ไม่มีความจำเป็นต่อร่างกาย (Non-Essential Trace Elements) เช่น เหล็ก กำมะถัน สังกะสี ทองแดง ซิลิคอน (Si) โครเมียม (Cr) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) โบรมีน (Br) สตรอนเซียม โมลิบดีนัม (Mo) แคดเมียม (Cd) ตะกั่ว (Pb) และปรอท (Hg) เป็นต้น (42)

2.5.2 ความแตกต่างระหว่างชนิดสัตว์ (Differences between Species)

การศึกษาเรื่องการสะสม และการกระจายตัวของธาตุในกระดูก ฟัน และเนื้อเยื่อ (Soft Tissue) ในปัจจุบัน ด้วยแร่ธาตุหลายชนิดมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการทำงานในร่างกายของสิ่งมีชีวิต และยังมีการศึกษาในเรื่องของการสะสมของธาตุในกลุ่มของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิต เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดถึงมลภาวะของสิ่งแวดล้อม (43, 44) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในปัจจุบันตลอดจนมีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอีกในอนาคตข้างหน้า ตลอดจนมีการศึกษาเพื่อใช้ในการจำแนกชนิดของสัตว์ (45, 46, 47, 48, 49, 50)

การศึกษาของ de Dios Teruel และคณะ (2015) ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในส่วนของชั้นเคลือบฟัน (Enamel) เนื้อฟัน (Dentine) ของมนุษย์ วัว สุกร และแกะ ด้วยเทคนิค WDXRF และผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบของธาตุในฟันของวัวกับมนุษย์ มีความคล้ายคลึงค่อนข้างมาก ทั้งใน Enamel และ Dentine นอกจากนี้ยังตรวจพบอีกว่า มีปริมาณของ ฟอสฟอรัส แคลเซียม ทองแดง โพแทสเซียม คลอรีน (Cl) รวมถึงอัตราส่วนระหว่าง แคลเซียม/ฟอสฟอรัส ในเคลือบฟันมีปริมาณมากกว่าเนื้อฟัน และพบปริมาณของแมกนีเซียม กำมะถัน สตรอนเชียม และสังกะสี ในเนื้อฟันมีมากกว่าเคลือบฟัน (45) Buddhachat และคณะ (2016) ศึกษาสัดส่วนปริมาณธาตุที่สะสมในงาช้าง เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการจัดจำแนกงาช้างเอเชียกับงาช้างแอฟริกาออกจากกัน อาศัยเครื่องมือที่ทำการวิเคราะห์ได้โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ไม่ว่าจะด้วยวิธีการใด การจัดจำแนกชนิดของงาช้างยังคงต้องอาศัยการตรวจสอบพันธุกรรม จึงต้องมีการตัดหรือทำลายตัวอย่างบางส่วน การจะหาเทคนิคหรือวิธีการใหม่ในการจัดจำแนกชนิดของงาช้างโดยไม่ตัดหรือทำลายตัวอย่าง อีกทั้งสามารถทำการตรวจสอบได้ในทุกพื้นที่ และมีความซับซ้อนน้อยในการปฏิบัติ แต่ยังคงให้ค่าความถูกต้องแม่นยำในการจัดจำแนกที่มากกว่าร้อยละ 90 (46) นอกจากนี้ Nganvongpanit และคณะ (2017) ได้มีการศึกษาปริมาณแร่ธาตุที่สะสมในเขี้ยวและฟันพะยูน สืบเนื่องจากเขี้ยวพะยูนเป็นที่ต้องการอย่างมาก ทั้งที่มีการออกกฎหมายและพระราชบัญญัติต่าง ๆ ออกมาเพื่อทำการคุ้มครอง อีกทั้งห้ามซื้อขายแล้วก็ตาม แต่ยังคงมีผู้ที่ทำการลักลอบซื้อขายด้วยราคาที่สูง การศึกษานี้จึงได้มีการใช้สัดส่วนปริมาณธาตุที่สะสมในเขี้ยวและฟันพะยูน เพื่อจัดจำแนกฟัน และเขี้ยวของพะยูน ออกจากสัตว์ชนิดอื่น ซึ่งพบว่ามีค่าความถูกต้องแม่นยำที่ร้อยละ 79.3 และยังสามารถใช้ประโยชน์ของธาตุที่สะสมในฟันพะยูน เพื่อระบุว่าพะยูนตัวดังกล่าวเคยอาศัยในทะเลฝั่งอ่าวไทยหรือทะเลอันดามันได้อีกด้วย โดยพบว่ามีค่าความถูกต้องแม่นยำถึงร้อยละ 88.1 (47) การใช้สัดส่วนปริมาณธาตุในกระดูก มนุษย์ ช้าง สุนัข และโลมา เพื่อการจัดจำแนกชนิดของกระดูกและฟันสัตว์ออกจากกัน พบว่า สัดส่วนปริมาณธาตุสามารถจัดจำแนกชนิดกระดูกของสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นออกจากชิ้นส่วนของกระดูกและฟันของมนุษย์ได้ โดยค่าความถูกต้องแม่นยำในการจัดจำแนกมากถึงร้อยละ 71-100 และสามารถระบุความเป็นมนุษย์ได้สูงถึงร้อยละ 80 ซึ่งในส่วนที่มีความเกี่ยวข้องกันกับมนุษย์นั้น ถือว่าเป็นส่วนสำคัญและมีประโยชน์มากในงานด้านนิติวิทยาศาสตร์ (48)

นอกจากการใช้สัดส่วนปริมาณธาตุในการจัดจำแนกชนิดสัตว์ออกจากกันได้แล้ว ยังมีการสร้างสมการแยกเพศในมนุษย์เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเพศหญิงกับเพศชาย โดยใช้สัดส่วนปริมาณธาตุในกระดูก และเพื่อลดความแปรผันของข้อมูลในส่วนของความแตกต่างทางด้านอายุ จึงมีการเลือกเอาเฉพาะธาตุที่มีความสำคัญสำหรับใช้เป็นตัวส่วนเพื่อแปลงข้อมูลที่ได้ให้อยู่ในรูปอัตราส่วน เกณฑ์การคัดเลือกธาตุที่จะนำมาใช้ในสมการ คือ มีสัดส่วนปริมาณ

ธาตุที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างเพศ และค่าสัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (Coefficient of Variation) ที่น้อยกว่า จากนั้นนำชุดข้อมูลอัตราส่วนนี้มาวิเคราะห์สถิติ Stepwise Discriminant Analysis และคำนวณความถูกต้องของการทำนายหาจากวิธี Leave One Out Classification และหาค่า Cut-Off สำหรับใช้เพื่อตัดสินว่าเป็นกระดูกมนุษย์เพศชายหรือมนุษย์เพศหญิง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้สัดส่วนปริมาณธาตุในกระดูกและฟัน ไม่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้แยกเพศในมนุษย์ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาในสัตว์ โดยที่สัดส่วนปริมาณธาตุในกระดูกและฟันของสัตว์ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้แยกเพศใน สุนัข (48) พะยูน (53) และช้าง (52) โดยค่าความถูกต้องแม่นยำในการแยกเพศอยู่ที่ร้อยละ 60-70 เท่านั้น (49)

การใช้สัดส่วนปริมาณธาตุที่สะสมในกระดูกหรือฟันมาทำการจัดจำแนกชนิดสัตว์ออกจากกัน จะให้ค่าความถูกต้องแม่นยำที่ค่อนข้างสูง แต่เทคนิคและวิธีการยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องคำนึงถึง ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของฟันผิวตัวอย่างที่นำมาศึกษาต้องไม่ปนเปื้อนหรือถูกเคลือบด้วยสารเคมี เนื่องจากจะทำให้การวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณธาตุเกิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีการศึกษารองรับว่า หากนำตัวอย่างกระดูกที่ฟันผิวถูกเคลือบด้วยแลคเกอร์มาศึกษาเปรียบเทียบกับกระดูกที่ฟันผิวไม่ผ่านการเคลือบ จะส่งผลต่อสัดส่วนปริมาณธาตุที่ตรวจพบอย่างชัดเจน ซึ่งผลความคลาดเคลื่อนดังกล่าว จะไปกระทบต่อการทำนายชนิดของสัตว์ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน หรือผิดพลาดไป (50) และเนื่องจากมีการศึกษาเพิ่มเติมทำให้ทราบว่าธาตุที่สะสมอยู่ในกระดูกและฟันมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ในการวิเคราะห์สัดส่วนปริมาณธาตุ จึงต้องคำนึงถึงวิธีที่นำมาใช้วิเคราะห์เป็นอย่างมาก หากการวิเคราะห์หาสัดส่วนปริมาณธาตุโดยการใช้ XRF ก็มีความจำเป็นที่จะต้องทำการกำหนดจุดเพื่อทำการวิเคราะห์หลายตำแหน่ง ทั้งนี้เพื่อให้มีผลต่อความแม่นยำที่จะเพิ่มมากขึ้นตามมา

2.6 หลักกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 ประมวลกฎหมายวิธีพิจารณาความอาญา

2.6.1.1 ส่วนการสอบสวน

มาตรา 131 ได้วางหลักไว้ว่า พนักงานสอบสวนสามารถรวบรวมหลักฐานทุกชนิดเท่าที่ทำได้ เพื่อให้สืบทราบข้อเท็จจริง พฤติการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความผิด เพื่อให้รู้ตัวผู้กระทำผิด และเพื่อพิสูจน์ความผิด หรือคืบความบริสุทธิ์ให้ผู้ต้องหา

มาตรา 131/1 ได้วางหลักไว้ว่า เมื่อมีความจำเป็นต้องใช้พยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ในการพิสูจน์ข้อเท็จจริงตามมาตรา 131 พนักงานสอบสวนมีอำนาจให้ทำการตรวจพิสูจน์พยานบุคคล พยานวัตถุ หรือพยานเอกสาร ด้วยวิธีการทางวิทยาศาสตร์ได้

ความผิดอาญาที่มีอัตราโทษจำคุกมากกว่าสามปีขึ้นไป การตรวจพิสูจน์ตามวรรคหนึ่ง จะต้องมีการตรวจเก็บตัวอย่างเลือด เนื้อเยื่อ ผิวหนัง เส้นผม เส้นขน น้ำลาย ปัสสาวะ อุจจาระ สารคัดหลั่งชนิดอื่น สารพันธุกรรม ทั้งจากผู้ต้องหา ผู้เสียหาย ตลอดจนบุคคลอื่นที่เกี่ยวข้อง ให้พนักงานสอบสวนผู้รับผิดชอบ ร้องขอให้แพทย์หรือผู้เชี่ยวชาญตรวจเก็บได้ แต่ต้องทำเท่าที่จำเป็น และใช้วิธีที่ทำให้เจ็บปวดน้อยที่สุด และต้องไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายของบุคคลนั้น และผู้ที่ถูกเก็บตัวอย่างต้องให้ความยินยอม หากไม่ยินยอมโดยไม่มีเหตุอันควร ชัดขวางไม่ให้บุคคลที่ต้องถูกเก็บตัวอย่างให้ความยินยอมโดยไม่มีเหตุอันควร ให้สันนิษฐานเบื้องต้นว่าข้อเท็จจริงเป็นไปตามผลการตรวจพิสูจน์ ว่าเมื่อได้ทำการตรวจพิสูจน์แล้ว จะมีผลเสียต่อผู้ต้องหา หรือผู้เสียหายที่ทำการชัดเจนนั้น

มาตรา 132 ได้วางหลักไว้ว่า เพื่อประโยชน์แห่งการรวบรวมพยานหลักฐาน ให้พนักงานสอบสวนมีอำนาจ ดังต่อไปนี้

(1) ตรวจตัวผู้เสียหายหรือตัวผู้ต้องหา เมื่อผู้นั้นยินยอม ตรวจสิ่งของหรือสถานที่ ที่สามารถจะนำมาใช้เป็นหลักฐาน ในที่นี้รวมถึงภาพถ่าย แผนที่ ภาพวาด หรือการพิมพ์ลายพิมพ์นิ้วมือ ลายมือ ลายเท้า และบันทึกรายละเอียดทุกอย่างที่จะเป็นประโยชน์ต่อรูปคดี

กรณีที่ผู้เสียหายหรือผู้ต้องหาตามวรรคหนึ่งเป็นผู้หญิง และมีความจำเป็นจะต้องตรวจค้นตัว ต้องมีการจัดให้มีเจ้าพนักงานที่เป็นผู้หญิง หรือให้ผู้หญิงอื่นเป็นผู้ทำการตรวจค้น ในกรณีที่มีเหตุอันสมควร ผู้เสียหายหรือผู้ต้องหาจะให้นำบุคคลใดมาอยู่ร่วมในการตรวจค้นด้วยก็ได้

(2) ค้นเพื่อพบสิ่งของ ที่มีไว้เป็นความผิด ได้มาโดยการกระทำความผิด ได้นำไปใช้หรือสงสัยว่าได้นำไปใช้ในการกระทำความผิด หรืออาจใช้เป็นพยานหลักฐานได้ ในการตรวจค้น ผู้ปฏิบัติต้องปฏิบัติตามบทบัญญัติแห่งประมวลกฎหมายวิธีพิจารณาความอาญา

(3) หมายเรียกบุคคลที่ครอบครองสิ่งของ ที่อาจใช้เป็นพยานหลักฐานได้ บุคคลที่ถูกหมายเรียกไม่จำเป็นต้องมาเอง สามารถส่งสิ่งของมาตามหมาย ก็ได้เหมือนว่าปฏิบัติตามหมาย

(4) ยึดไว้ซึ่งสิ่งของที่ค้นพบหรือส่งมาดังกล่าวไว้ในอนุมาตรา (2) และ (3)

2.6.1.2 ส่วนผู้เชี่ยวชาญ

มาตรา 243 ได้วางหลักไว้ว่า ผู้ใดโดยอาชีพหรือไม่ใช่อาชีพก็ตาม มีความเชี่ยวชาญในศาสตร์ใด ๆ เช่น วิทยาศาสตร์ ศิลปะ งานฝีมือ งานพาณิชยกรรม งานทางการแพทย์ กฎหมาย ต่างประเทศ และหากความเห็นของผู้นั้นมีประโยชน์ในการวินิจฉัยคดี ในขั้นตอนการสอบสวน การไต่สวนมูลฟ้องหรือพิจารณาคดี อาจเป็นพยานในเรื่องต่าง ๆ เช่น การตรวจร่างกาย หรือสภาพจิตใจของผู้เสียหาย ผู้ต้องหา จำเลย การตรวจลายพิมพ์นิ้วมือ การทำการทดลองหรือกิจการอื่นใด

ผู้เชี่ยวชาญอาจทำความเห็นเป็นหนังสือก็ได้แต่จะต้องส่งสำเนาหนังสือดังกล่าวให้ศาล และคู่ความอีกฝ่ายหนึ่งทราบ และต้องมาเบิกความประกอบหนังสือนั้น เว้นแต่มีเหตุจำเป็น หรือ

คู่ความไม่ติดใจซักถามผู้เชี่ยวชาญนั้น ศาลจะให้รับฟังความเห็นเป็นหนังสือดังกล่าวโดยผู้เชี่ยวชาญไม่ต้องมาเบิกความประกอบก็ได้

กรณีที่ผู้เชี่ยวชาญต้องมาเบิกความประกอบ ให้ส่งสำเนาหนังสือดังกล่าวต่อศาลในจำนวนที่เพียงพอล่วงหน้าไม่น้อยกว่าเจ็ดวันก่อนวันเบิกความเพื่อให้คู่ความอีกฝ่ายหนึ่งมารับไป

ในการเบิกความประกอบ ผู้เชี่ยวชาญจะอ่านข้อความที่เขียนมาก็ได้

มาตรา 244 ได้วางหลักไว้ว่า ถ้าศาลหรือพนักงานฝ่ายปกครองหรือตำรวจชั้นผู้ใหญ่เห็นจำเป็นเนื่องในการไต่สวนมูลฟ้อง พิจารณา หรือสอบสวน ที่จะต้องตรวจศพ แม้ว่าจะได้บรรจุหรือฝังแล้วก็ตาม ให้มีอำนาจสั่งให้เอาศพนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญตรวจได้ แต่การกระทำตามคำสั่งดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงหลักทางศาสนาและไม่ก่อให้เกิดอันตรายร้ายแรงอย่างอื่น

มาตรา 244/1 ได้วางหลักไว้ว่า กรณีความผิดอาญาที่มีอัตราโทษจำคุก หากจำเป็นต้องใช้พยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์เพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริงที่เป็นประเด็นสำคัญแห่งคดี ศาลมีอำนาจสั่งให้ทำการตรวจพิสูจน์พยานบุคคล พยานวัตถุ หรือพยานเอกสาร ด้วยวิธีการทางวิทยาศาสตร์ได้

ในการตรวจพิสูจน์ตามวรรคหนึ่ง หากมีความจำเป็นต้องตรวจเก็บตัวอย่างเลือด เนื้อเยื่อ ผิวหนัง เส้นผม เส้นขน น้ำลาย ปัสสาวะ อุจจาระ สารคัดหลั่ง สารพันธุกรรม จากคู่ความ หรือบุคคลใด ศาลมีอำนาจสั่งให้แพทย์หรือผู้เชี่ยวชาญดำเนินการตรวจได้ แต่ต้องทำเท่าที่จำเป็น และให้ใช้วิธีการที่ทำให้เกิดความเจ็บปวดน้อยที่สุด ต้องไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายของบุคคลนั้น คู่ความ หรือบุคคลที่เกี่ยวข้องต้องให้ความยินยอม หากคู่ความฝ่ายใดไม่ยินยอม หรือขัดขวางไม่ให้บุคคลที่ต้องถูกเก็บตัวอย่างให้ความยินยอมโดยไม่มีเหตุอันควร ให้สันนิษฐานไว้เบื้องต้นว่าข้อเท็จจริงเป็นไปตามที่คู่ความฝ่ายตรงข้ามกล่าวอ้าง

ในกรณีที่พยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์สามารถพิสูจน์ให้เห็นถึงข้อเท็จจริงที่อาจทำให้ศาลวินิจฉัยชี้ขาดคดีได้โดยไม่ต้องสืบพยานหลักฐานอื่นอีก หรือมีเหตุอันควรเชื่อว่าหากมีการดำเนินการซ้ำเกินไป การจะนำพยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญมาสืบในภายหน้าจะทำให้พยานหลักฐานนั้นเกิดความเสียหายหรือยากแก่การตรวจพิสูจน์ เมื่อคู่ความฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งร้องขอหรือเมื่อศาลเห็นสมควร ศาลอาจสั่งให้ทำการตรวจพิสูจน์ทางวิทยาศาสตร์ตามความในวรรคหนึ่งและวรรคสองได้ทันทีโดยไม่ต้องรอให้ถึงกำหนดวันสืบพยาน ทั้งนี้ ให้นำบทบัญญัติในมาตรา 237 ทวิ มาใช้บังคับโดยอนุโลม (51)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ด้วยเหตุนี้ จึงมีการนำเอาเทคนิควิธีการ และเครื่องมือเครื่องใช้ในทางวิทยาศาสตร์ให้เข้ามามีบทบาทในการทำงานของเจ้าหน้าที่ เพื่อเป็นตัวช่วยในการจะจัดจำแนก หรือการตัดเอาสิ่งที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับคดี หรือสถานที่เกิดเหตุออก Zimmerman และคณะ (2015) ได้ศึกษาโดยการใช้

เครื่องมือที่มีชื่อว่า เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบพกพา (Handheld X-ray Fluorescence, HHXRF) เพื่อช่วยในการแยกแยะระหว่างกระดูกหรือฟัน ออกจากสิ่งของที่ไม่ใช่กระดูกหรือฟัน เนื่องจากในงานของนักนิติมานุษยวิทยานั้น การจะแยกเศษชิ้นส่วนของกระดูกออกจากวัตถุอื่นที่มีความคล้ายคลึงกันนั้นเป็นไปได้ยาก การศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ HHXRF เพื่อช่วยในการจัดจำแนก และพบว่า HHXRF สามารถทำการจัดจำแนกกระดูกและฟัน ออกจากวัตถุอื่น ๆ ที่มีสารประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันออกจากกันได้ โดยมีค่าความแม่นยำของการศึกษานี้ที่ร้อยละ 94 และประสบความสำเร็จการจัดจำแนกขาข้างออกจากปะการังได้ (52) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยอื่นที่ใช้ HHXRF เป็นเครื่องมือช่วยในการจัดจำแนก Nganvongpanit และคณะ (2015) ศึกษาเปรียบเทียบธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูกสะโพกสุนัข ที่ตำแหน่ง ilium และ acetabulum ระหว่างสุนัขปกติ กับสุนัขที่เป็นโรค โดยการใช้ HHXRF พบว่า ในสุนัขปกติพบธาตุทั้งหมด 7 ชนิด (P, Ca, Mn, Ag, Cd, Sn, and Sb) พบความแตกต่างที่ ($p < 0.005$) ระหว่างกระดูกทั้งสองตำแหน่ง เมื่อเปรียบเทียบกับในกลุ่มปกติและที่เป็นโรค พบว่ามีปริมาณของธาตุ Mn และ Fe สูง ($p < 0.05$) ในทั้งสองตำแหน่ง นอกจากนี้ยังพบธาตุในกลุ่มของโลหะหนัก (Ag, Sn และ Sb) ที่ตำแหน่ง acetabulum ในสุนัขที่เป็นโรคปริมาณสูงเช่นกัน ($p < 0.05$) ขณะที่ตำแหน่ง ilium พบว่ามีเพียง Sn เท่านั้นที่มีปริมาณสูงกว่าในสุนัขปกติ ($p < 0.05$) (53) Buddhachat และคณะ (2016) ศึกษาเปรียบเทียบเพื่อหาความแตกต่างของงาช้าง ระหว่างซังแอฟริกากับซังเอเชีย โดยใช้ HHXRF พบว่ามีการกระจายตัวของธาตุในตัวงาช้างที่ทำการศึกษา ตำแหน่งที่ต่างกัน ปริมาณและธาตุที่ก็จะต่างกัน เช่น การวัดในแนว longitudinal พบ 5 ธาตุ (Al, Si, Co, As, Zr, Pb) ฐานงาช้าง 3 ธาตุ (S, Cl, Zn) และส่วนปลายของงาช้าง 3 ธาตุ (Mg, P, Ti) เป็นต้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบงาช้างระหว่างเพศผู้และเพศเมียพบว่า มี 5 ธาตุที่มีปริมาณแตกต่างกัน โดยเพศเมียจะมีปริมาณของ Al, Ca, Ti สูงกว่าเพศผู้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่เพศผู้พบว่ามีปริมาณธาตุ Mg และ Pb สูง และในการเปรียบเทียบซังสองสายพันธุ์ ระหว่างซังเอเชียกับซังแอฟริกา จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณธาตุจำนวนทั้งหมด 24 ธาตุ มีเพียง 3 ธาตุ (Cu, Cl, Pb) เท่านั้น ที่แสดงออกอย่างชัดเจนว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างซังสองสายพันธุ์ ในซังแอฟริกาพบว่ามีปริมาณ Ca สูง ขณะที่ในซังเอเชียพบว่ามีปริมาณ P สูง (46) Nganvongpanit และคณะ (2016) ศึกษาความแตกต่างของธาตุที่พบในกระดูก ระหว่างเพศชายกับเพศหญิง โดยการใช้เทคนิค X-ray fluorescence (XRF) เพื่อนำรูปแบบของธาตุที่พบไปใช้ในการจำแนกเพศ โดยทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างกระดูก cranium, humerus และ os coxae จำนวน 60 โครง (ชาย 30 ,หญิง 30) วิเคราะห์ด้วยวิธี XRF และหาความแตกต่างจากการใช้สถิติด้วยวิธี discriminant พบว่ากระดูก cranium มี 3 ธาตุ (S, Ca, Pb) ที่มีปริมาณธาตุสูงมากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในเพศชาย และพบ 5 ธาตุ (Si, Mn, Fe, Zn, Ag) รวมทั้งธาตุที่มีจำนวนอะตอมต่ำกว่า 12 มีปริมาณสูงในเพศหญิง ขณะที่ humerus และ os coxae มี 9 ธาตุที่มีความจำเพาะในเพศชาย และพบ 1 ธาตุ ที่

มีความจำเพาะในเพศหญิง โดยมีอัตราความถูกต้องแม่นยำในการประมาณเพศอยู่ที่ร้อยละ 60, 63 และ 61 ในกระดูก cranium humerus และ os coxae ตามลำดับ เมื่อนำกระดูกทั้ง 3 ตำแหน่งมาใช้ในเป็นเครื่องมือในการจัดจำแนกเพศร่วมกัน จะพบว่าอัตราความถูกต้องแม่นยำที่ร้อยละ 67 สามารถสรุปได้ว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูก มีความแตกต่างกันระหว่างเพศชายกับเพศหญิง (54) Nganvongpanit และคณะ (2016) ศึกษารูปแบบของธาตุที่พบในกระดูกสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 4 ชนิด เพื่อหาความแตกต่างของรูปแบบธาตุที่สามารถนำไปใช้ในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ได้ ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างกระดูก มนุษย์ ช้าง สุนัข และโลมา ทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูกโดยการใช้เทคนิค XRF จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแตกต่างโดยการใช้สถิติด้วยวิธี discriminant พบว่ากระดูกสุนัขพบธาตุสำคัญที่เป็นองค์ประกอบจำนวน 23 ธาตุ มนุษย์ 22 ธาตุ ช้าง 20 ธาตุ และโลมา 16 ธาตุ อัตราความแม่นยำในการระบุชนิดของกระดูกสามารถบอกได้ดังนี้ มนุษย์ ช้าง สุนัข โลมา โดยอัตราความแม่นยำอยู่ที่ร้อยละ 98.7, 100, 94.9 และ 92.3 ตามลำดับ (48) Nganvongpanit และคณะ (2017) ทำการศึกษาค่าความแตกต่างของธาตุที่พบในฟันของมนุษย์เพื่อใช้ในการจำแนกเพศ โดยใช้ตัวอย่างฟันจำนวน 444 ซี่ จากกะโหลกมนุษย์จำนวน 111 กะโหลก (เพศชาย 62 เพศหญิง 49) ช่วงอายุของกะโหลกที่ใช้ศึกษาอยู่ระหว่าง 30-67 ปี โดยการใช้ HHXRF เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในฟัน ในตำแหน่งที่ต่างกันของฟัน ครอบฟัน (crown) และรากฟัน (root) มืองค์ประกอบของธาตุที่แตกต่างกัน รวมถึงความแตกต่างขององค์ประกอบของธาตุที่พบมีความแตกต่างกันในเพศชายและเพศหญิง และได้ศึกษาเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในฟันว่ามีความแตกต่างกันระหว่างฟันมนุษย์กับฟันของสัตว์หรือไม่ โดยศึกษาในตัวอย่างฟันสัตว์ 20 ชนิด ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของธาตุที่พบในฟันของมนุษย์และสัตว์มีองค์ประกอบของธาตุแตกต่างกัน (55) Buddhachat และคณะ (2017) ศึกษาผลความแตกต่างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย HHXRF เพื่อเปรียบเทียบระหว่างกระดูกสุกร 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เคลือบแลคเกอร์ และกลุ่มที่ไม่มีการเคลือบแลคเกอร์ ผลการศึกษาพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบจำนวน 8 ธาตุ (Si, P, S, Ca, Ti, Zn, Cd, Sn และ light element) มีปริมาณแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ระหว่างค่าที่วัดได้จากตัวอย่างที่เคลือบแลคเกอร์ กับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเคลือบ ขณะที่อัตราส่วนของ Ca ต่อ P (Ca/P) แสดงผลอย่างเห็นได้ชัดว่า กระดูกในกลุ่มที่มีการเคลือบแลคเกอร์นั้น มีการปนเปื้อนที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสของกระดูก (50)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำการศึกษาวิจัยในเรื่องของลักษณะการกระจายตัวของธาตุชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของกระดูก เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่อาจมีผลต่อการใช้เครื่อง HHXRF ในการวิเคราะห์ เนื่องจากตำแหน่งที่สามารถตรวจวัดมีขนาดเล็กมาก พร้อมทั้งโครงสร้างของกระดูกในตำแหน่งที่แตกต่างกัน อาจส่งผลให้ปริมาณของธาตุที่วัดได้มีความ

คลาดเคลื่อนไป และเพื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของธาตุในกระดุกมนุษย์กับสัตว์
ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดจำแนกกระดุกที่พบในสถานที่เกิดเหตุได้



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้ทำการแบ่งวิธีการวิจัยออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเพื่อทำการศึกษาความแตกต่างสัดส่วนของปริมาณธาตุที่วัดได้จากกระดูกเนื้อแน่นของตัวอย่างกระดูกมนุษย์ สัตว์แต่ละชนิด เพื่อหาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุที่จะนำมาใช้ในการจัดจำแนกกระดูกมนุษย์ และสัตว์แต่ละชนิดออกจากกัน ขณะที่ในการศึกษาส่วนที่สอง ทำการศึกษาในกระดูกสุกรที่ได้จากโรงฆ่าสัตว์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่สามารถพบได้บนกระดูก เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบตำแหน่งต่าง ๆ บนกระดูก โดยศึกษาว่าในแต่ละตำแหน่งบนกระดูกตัวอย่างนั้น มีสัดส่วนของปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบ เหมือน หรือแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร และการเลือกใช้กระดูกสุกรในการศึกษาวิจัยนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทดแทนกระดูกมนุษย์ ที่อาจพบได้ในสถานที่เกิดเหตุ ด้วยเหตุที่ว่า กระดูกสุกรนั้นสามารถจัดหาเพื่อนำมาเป็นตัวอย่างในการศึกษาวิจัยได้ค่อนข้างง่าย

นอกจากนี้ ในการศึกษาวิจัยทั้งสองส่วน มีการใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ที่แตกต่างกัน เนื่องจากในการศึกษาวิจัยส่วนแรก ทำการศึกษาในตัวอย่างกระดูกขนาดเล็ก ที่สามารถใช้กับเครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) รุ่น ME SA-50, Horiba ได้โดยไม่ต้องทำการทำลาย หรือเปลี่ยนแปลงสภาพตัวอย่าง ขณะที่ในการทดลองส่วนที่สอง ทำการศึกษาวิจัยในกระดูกต้นขาหลังสุกร โดยใช้เครื่อง เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ชนิดพกพา (Handheld X-ray Fluorescence; HHXRF) รุ่น DELTA โดยที่เครื่องมือพกพานี้ สามารถทำการวิเคราะห์พื้นผิวตัวอย่างได้โดยไม่ต้องทำลาย หรือเปลี่ยนแปลงสภาพตัวอย่างให้มีขนาดเล็ก เนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้ มีความมุ่งหวังที่จะทำลายตัวอย่างกระดูกให้น้อยที่สุด และให้สามารถนำเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ ไปประยุกต์ใช้ในงานนอกสถานที่ได้

3.1 ศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้ในกระดูกเนื้อแน่นของมนุษย์และสัตว์

3.1.1 ตัวอย่างกระดูกที่ใช้ในการศึกษา

ศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุและการกระจายตัวที่พบในกระดูกสัน โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดูกมนุษย์ กับสัตว์ รวมทั้งสิ้น 16 ชนิด ได้แก่ มนุษย์ (*Homo sapiens*), สุกร (*Sus scrofa domestica*), โค (*Bos Taurus*), สุนัข (*Canis lupus familiaris*), ไฮยีนา (*Hyaena hyaena*), ม้า (*Equus ferus caballus*), กวาง (*Odocoileus virginianus*), แพะ (*Capra aegagrus hircus*), แกะ (*Ovis aries*), แมว (*Felis catus*), เสือ (*Panthera tigris*), สมเสร็จ (*Tapirus indicus*), ช้างเอเชีย (*Elephas maximus*), ลิง (*Macaca assamensis*), โลมา (*Stenella*

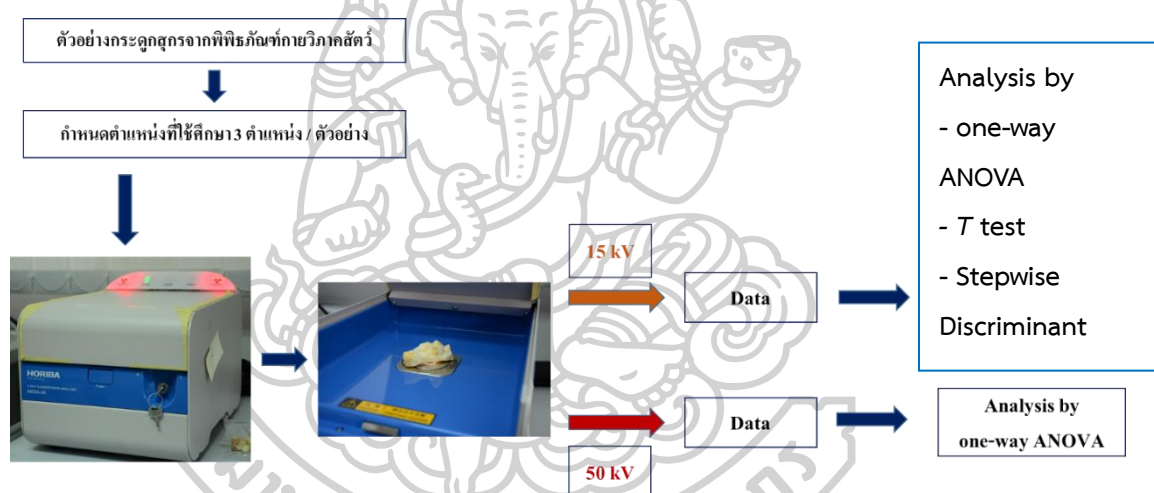
longirostris) และนกกระจอกเทศ (*Struthio camelus*) ตำแหน่งกระดูกที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ กระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าหน้าในสัตว์ (carpus) จำนวน 3 ชิ้น (n=3) ต่อสัตว์แต่ละชนิด กระดูกข้อเท้าในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าหลังในสัตว์ (tarsus) จำนวน 3 ชิ้น (n=3) ต่อสัตว์แต่ละชนิด โดยตัวอย่างกระดูกได้รับความอนุเคราะห์จากพิพิธภัณฑ์กายวิภาคศาสตร์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าหน้าในสัตว์ และกระดูกข้อเท้าในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าหลังในสัตว์ของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ใช้ในการศึกษา

	Name (Scientific name)	กระดูก carpus	กระดูก tarsus
1	กวาง, Deer (<i>Odocoileus virginianus</i>)	3	3
2	สุนัข, Domestic dog (<i>Canis lupus familiaris</i>)	3	3
3	แมว, Domestic cat (<i>Felis catus</i>)	3	3
4	สุกร, Domestic pig (<i>Sus scrofa domestica</i>)	3	3
5	แพะ, Domestic goat (<i>Capra aegagrus hircus</i>)	3	3
6	แกะ, Domestic sheep (<i>Ovis aries</i>)	3	3
7	มนุษย์, Human (<i>Homo sapiens</i>)	3	3
8	ลิง, Monkey (<i>Macaca assamensis</i>)	3	3
9	ไฮยีน่า, Spotted hyena (<i>Crocuta crocuta</i>)	2	2
10	สมเสร็จ, Tapir (<i>Tapirus indicus</i>)	1	1
11	เสือ, Tiger (<i>Panthera tigris</i>)	3	
12	ช้างเอเชีย, Asian elephant (<i>Elephas maximus</i>)	3	
13	วัว, Cattle (<i>Bos Taurus</i>)	3	
14	ม้า, Horses (<i>Equus ferus caballus</i>)	3	
15	นกกระจอกเทศ, Ostrich (<i>Struthio camelus</i>)	2	
16	โลมา, Spinner dolphin (<i>Stenella longirostris</i>)	2	

3.1.2 การศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบตั้งโต๊ะ

เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบ Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) รุ่น ME SA-50, Horiba โดยใช้ silicon เป็นตัวรับ มีความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งหมด 80 ธาตุ จาก 103 ธาตุ โดยเริ่มตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอม 13 (Al) ขึ้นไป จนถึง 92 (U) มีเส้นผ่านศูนย์กลางตำแหน่งวัด 0.3 มิลลิเมตร ใช้พลังงาน 15 และ 50 kV ทำการศึกษาชนิดของธาตุที่พบ สัดส่วนธาตุแต่ละชนิด และการกระจายตัวในกระดูก carpus และ tarsus ของมนุษย์และสัตว์ ด้วยวิธี EDXRF โดยกำหนดตำแหน่งที่ใช้ในการวัด 3 ตำแหน่ง ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น ทำการวัดโดยใช้ค่าระดับพลังงานสองกลุ่ม คือ ที่ระดับพลังงาน 15 kV และ 50 kV ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 1 นาที ต่อ 1 ตำแหน่ง โดยกระบวนการทำงานทั้งหมดของเครื่องเป็นระบบอัตโนมัติ ชนิด และสัดส่วนของธาตุที่พบ จะแสดงออกมาในรูปแบบร้อยละ (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบตั้งโต๊ะ

3.1.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สัดส่วนของปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบจากการเก็บข้อมูลในแต่ละครั้ง (1 ตัวอย่าง ยิง 3 ซ้ำ) ทุกค่าจะถูกนำเสนอในรูปแบบร้อยละ จากนั้นในแต่ละตัวอย่างจะถูกนำมาจัดการข้อมูล และนำเสนอในรูปแบบของค่าเฉลี่ย ($\text{mean} \pm \text{SD}$) และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในตัวอย่างกระดูกมนุษย์ และสัตว์แต่ละชนิด โดย one-way ANOVA เลือกใช้วิธี Duncan ที่ $p \text{ value} < 0.05$ จากนั้นทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิด ระหว่างสองกลุ่มค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยวิธี T test ที่ $P \text{ value} < 0.05$ และในขั้นตอนสุดท้าย ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ โดยอาศัยข้อมูลที่

ได้จากการศึกษาเพื่อนำมาทำการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันโดยใช้วิธี Stepwise Discriminant โดยการเลือกใช้วิธี Wilks' Lamda (F-level ระหว่าง 2.71 และ 3.84) เพื่อสร้างสมการหาความแตกต่างเพื่อการจัดจำแนก และหาค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกมนุษย์ และสัตว์แต่ละชนิดออกจากกัน โดยการใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบตั้งโต๊ะ

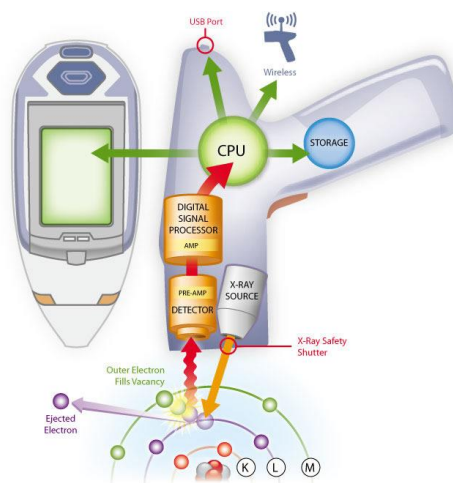
3.2 การศึกษาความแตกต่างของปริมาณธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งในกระดูกยาว

3.2.1 ตัวอย่างกระดูกที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างกระดูกต้นขาหลัง (femur) ของสุกร จำนวน 30 ตัวอย่าง จากโรงฆ่าสุกร สาเหตุที่ต้องใช้กระดูกสุกรเป็นตัวอย่างในการศึกษา เนื่องจากจำเป็นต้องมีการตัดทำลายตัวอย่าง ทำให้ไม่สามารถใช้กระดูกมนุษย์ในการศึกษานี้ได้ ในผลการศึกษาศาสามารถเทียบเคียงกับกระดูกมนุษย์ได้ เนื่องจากต้องการศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุภายในชั้นกระดูก นำกระดูกสุกรที่ได้มาทำความสะอาด และเอาส่วนกล้ามเนื้อและเส้นเอ็นออก จากนั้นตากแดดให้แห้ง

3.2.2 เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ชนิดพกพา (Handheld X-ray Fluorescence; HHXRF) รุ่น DELTA Premium, Olympus, USA จะใช้ silicon เป็นตัวรับ (detector) มีความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุได้ตั้งแต่ ธาตุที่มีเลขอะตอม 12 แมกนีเซียม (Magnesium; Mg) ขึ้นไป จนถึง 83 บิสมัท (Bismuth; Bi) มีเส้นผ่านศูนย์กลางตำแหน่งวัด 0.3 มิลลิเมตร มีค่าพลังงาน 2 ระดับได้แก่ 15 และ 40 kV ใช้เวลาในการวิเคราะห์ในแต่ละตำแหน่ง 2 นาที ต่อ 1 ตำแหน่ง ขณะที่แร่ธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number less) น้อยกว่า 12 จะไม่สามารถวิเคราะห์ได้แต่จะแสดงรวมเป็นค่าของธาตุเบา (light elements; LE) เมื่อเครื่องมือทำงาน รังสีจากแหล่งกำเนิดภายในตัวเครื่องมือ (Primary X-ray source) จะปล่อยรังสีออกมา และพุ่งเข้าชนวัตถุตัวอย่าง จนส่งผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในวัตถุนั้นหลุดออกจากอะตอมในรูปของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น และเกิดสภาวะอะตอมไม่เสถียร เมื่ออะตอมในชั้นดังกล่าวกลับสู่สภาวะที่เสถียร จะต้องทำการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกให้เข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว โดยในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานนั้นจะสะท้อนกลับมายังชุด detector ที่อยู่ภายในตัวเครื่องมือ และสามารถตรวจวัดพลังงานที่สะท้อนกลับมาได้ จากนั้นถูกส่งต่อไปยังชุด Digital Signal Processor ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้กับ CPU ทำการประมวลผลออกมา และแสดงผ่านทางหน้าจอแสดงผล จากนั้นเก็บข้อมูลดังกล่าวไว้ในหน่วยความจำภายในเครื่องมือ (56) (รูปที่ 3.2)



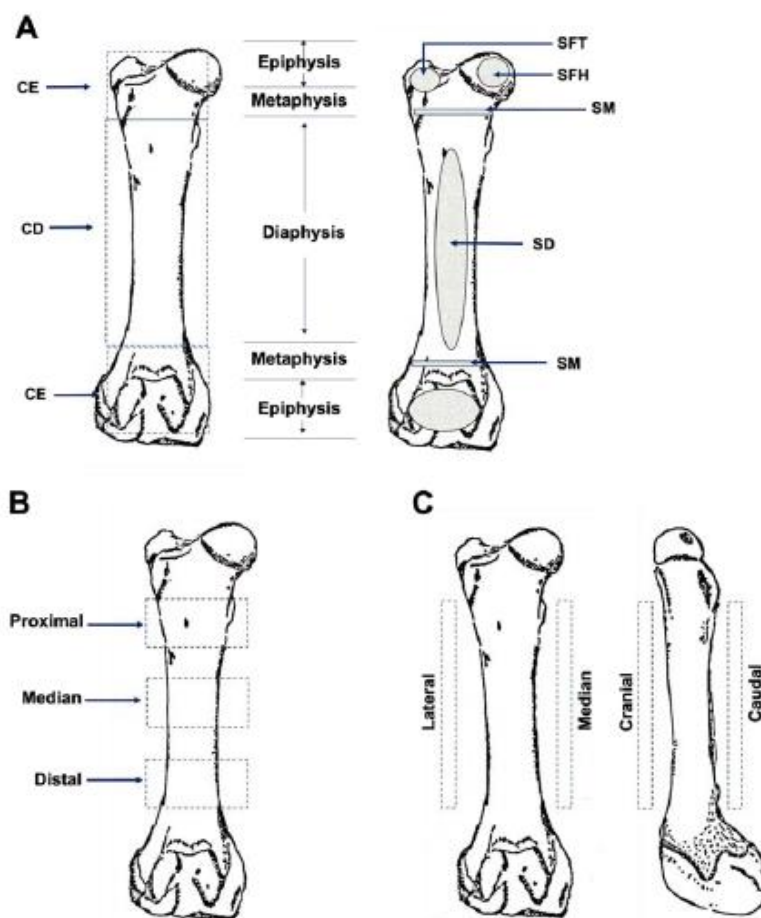
รูปที่ 3.2 กระบวนการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ชนิดพกพา (Handheld X-ray Fluorescence; HHXRF)

ที่มา: CLEVERICH COMPANY LIMITED, “หลักการการทำงานของเครื่องมือ”, การเข้าถึงแหล่งสื่อสิ่งพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์: https://www.cleverich.com/xrf_work.html (56)

3.2.3 การเปรียบเทียบ

3.2.3.1 ศึกษาการกระจายตัวของธาตุในกระดูกสุกรแบบแบ่งตามพื้นที่

ทำการศึกษาการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณธาตุในกระดูกต้นขาหลังของสุกร ด้วย HHXRF โดยในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของธาตุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในส่วนที่ 1 ทำการแบ่งชั้นกระดูกตามพื้นที่ มีทั้งหมด 6 พื้นที่ ดังต่อไปนี้ กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง diaphysis (Compact bone at diaphysis; CD), กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง epiphysis (Compact bone at epiphysis; CE), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง metaphysis (Spongy bone at metaphysis; SM), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง diaphysis (Spongy bone at diaphysis; SD), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง femoral trochlea (Spongy bone at femoral trochlea; FT), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง metaphysis (spongy bone at metaphysis; SFH) ทำการสแกนตำแหน่งละ 3 ครั้ง ต่อ 1 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.3A) นอกจากนี้กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง diaphysis จะทำการแบ่งตำแหน่งที่จะสแกนออกไปอีก 12 ตำแหน่ง ด้วยกัน ดังนี้ 1-proximal cranial, 2-proximal caudal, 3-proximal median, 4-proximal lateral, 5-middle cranial, 6- middle caudal, 7- middle median, 8- middle lateral, 9-distal cranial, 10- distal caudal, 11- distal median, 12- distal lateral (รูปที่ 3.3 B และ C) โดยที่ทุกตำแหน่ง ทำการสแกน 3 ครั้ง ต่อ 1 ตำแหน่ง/ตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 การแบ่งตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูก

การแบ่งตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูก โดยแบ่งเป็น พื้นที่ 6 ตำแหน่ง (A), 3 ส่วน (B) และ 4 ทิศทาง (C). CD = Compact bone at diaphysis, CE = Compact bone at epiphysis, SM = Spongy bone at metaphysis, SD = Spongy bone at diaphysis, SFT = Spongy bone at femoral trochlea, SFH = spongy bone at metaphysis 1-proximal cranial, 2-proximal caudal, 3-proximal median, 4-proximal lateral, 5-middle cranial, 6- middle caudal, 7- middle median, 8- middle lateral, 9-distal cranial, 10- distal caudal, 11- distal median, 12- distal lateral

หมายเหตุ : รูปนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)

3.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สัดส่วนของปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบจากการเก็บข้อมูล จะถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าเฉลี่ย (mean \pm SD) รวมถึงสัดส่วนของธาตุแคลเซียม (Ca) และฟอสฟอรัส (P) จะถูกนำมาจับคู่และนำเสนอในรูปแบบอัตราส่วน (Ca/P) ในอีกค่าหนึ่ง เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ สัดส่วนของปริมาณธาตุที่พบทุกค่าจะถูกทำให้อยู่ในรูปแบบของร้อยละ เพื่อให้มองเห็นภาพความแตกต่างของการกระจายตัวได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติของสัดส่วนธาตุแต่ละชนิดที่พบในตัวอย่างกระดูกต้นขาหลังของสุกรที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามวิธีการจัดกลุ่มการศึกษา โดย one-way ANOVA เลือกใช้วิธี Duncan ที่ p value < 0.05 จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยวิธี Stepwise Discriminant เลือกใช้ Wilks' Lamda (F-level ระหว่าง 2.71 และ 3.84) เพื่อจัดทำสัมมนาหาความแตกต่างในการจัดจำแนก และหาค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกแต่ละตำแหน่งของกระดูกต้นขาหลังของสุกรออกจากกัน



บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาความแตกต่างของปริมาณธาตุที่วัดได้ในกระดูกเนื้อแน่นของมนุษย์และสัตว์

4.1.1 ความแตกต่างของธาตุที่พบในสัตว์แต่ละชนิด

จำนวนของธาตุที่ถูกตรวจพบโดยค่าพลังงานที่ 15 kV และ 50 kV ทั้งในกระดูก carpus และกระดูก tarsus จะพบว่าปริมาณของธาตุที่พบ แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 ในขณะที่องค์ประกอบของธาตุที่พบในกระดูก carpus ตามตารางที่ 4.2 และในกระดูก tarsus ตามตารางที่ 4.3 ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแต่ละชนิดของตัวอย่างกระดูกที่นำมาทำการศึกษา

ในกลุ่มตัวอย่างกระดูก carpus พบว่า ตัวอย่างของกระดูกสัตว์ที่พบชนิดของธาตุมากที่สุด ได้แก่ ตัวอย่างกระดูกสุนัข โดยพบได้ทั้งที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV มีชนิดของธาตุที่พบ คือ 13 และ 14 ชนิด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวอย่างกระดูกของสุนัข เป็นกระดูกของสัตว์ชนิดเดียวที่มีการพบธาตุโพแทสเซียม (K) เป็นองค์ประกอบ

ขณะที่กลุ่มกระดูก tarsus นั้น ชนิดของธาตุที่พบในตัวอย่างกระดูกมนุษย์ และสัตว์แต่ละชนิด ค่อนข้างมีความใกล้เคียงกัน มีเพียงตัวอย่างกระดูก tarsus ของแพะ และแกะ เท่านั้น ที่มีการพบธาตุบางชนิดในกระดูกตัวอย่างของสัตว์ทั้งสองชนิดนี้ โดยที่ตัวอย่างกระดูก tarsus ของแพะ จับธาตุ โพแทสเซียม (K) ไทเทเนียม (Ti) และทอลเลียม (Tl) ขณะที่ในแกะพบธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) บนตัวอย่างกระดูก

4.1.2 เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในกระดูก ระหว่างกระดูก 2 ตำแหน่งที่ค่าพลังงานเดียวกัน

ค่าพลังงาน 15 kV พบว่ากระดูกที่ตำแหน่ง tarsus ของ แมว, สุนัข, กวาง, แพะ, แกะ, ไสยีน่า, เสือ และลิง โดยจำนวนของธาตุที่พบในกระดูก tarsus มีจำนวนมากกว่าธาตุที่พบในกระดูก carpus ขณะที่กระดูกที่ตำแหน่ง carpus นั้น มีเพียงของสุนัข และสมเสร็จ เท่านั้น ที่พบว่าปริมาณของธาตุที่พบในกระดูกที่มากกว่าในกระดูกที่ตำแหน่ง tarsus และมีเพียงตัวอย่างกระดูกมนุษย์เท่านั้น ที่มีจำนวนของธาตุที่พบในกระดูกตำแหน่ง carpus และ tarsus เท่านั้น ที่มีจำนวนธาตุที่พบในจำนวนใกล้เคียงกัน

ค่าพลังงาน 50 kV พบว่า จำนวนของธาตุที่พบในตัวอย่างกระดูกมนุษย์และสัตว์ส่วนใหญ่ (แกะ, ไสยีน่า, เสือ, ลิง และมนุษย์) มีจำนวนของธาตุที่พบ ในจำนวนที่ใกล้เคียงกัน ทั้งในกระดูกที่ตำแหน่ง carpus และ กระดูกตำแหน่ง tarsus มีเพียงตัวอย่างของกระดูกสัตว์ 4 ชนิด ได้แก่ สุนัข, แกะ, แพะ และสมเสร็จ ที่มีจำนวนของธาตุที่พบในตัวอย่างกระดูกที่ตำแหน่ง carpus มากกว่าที่

ตำแหน่ง tarsus และนอกจากนี้ยังพบว่าตัวอย่างของกระดูกที่ตำแหน่ง tarsus ในแมว และสุนัข มีจำนวนของธาตุที่พบในกระดูกมากกว่าที่ตำแหน่ง carpus

4.1.3 เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในกระดูกตำแหน่งเดียวกัน ที่ค่าพลังงานต่างกัน

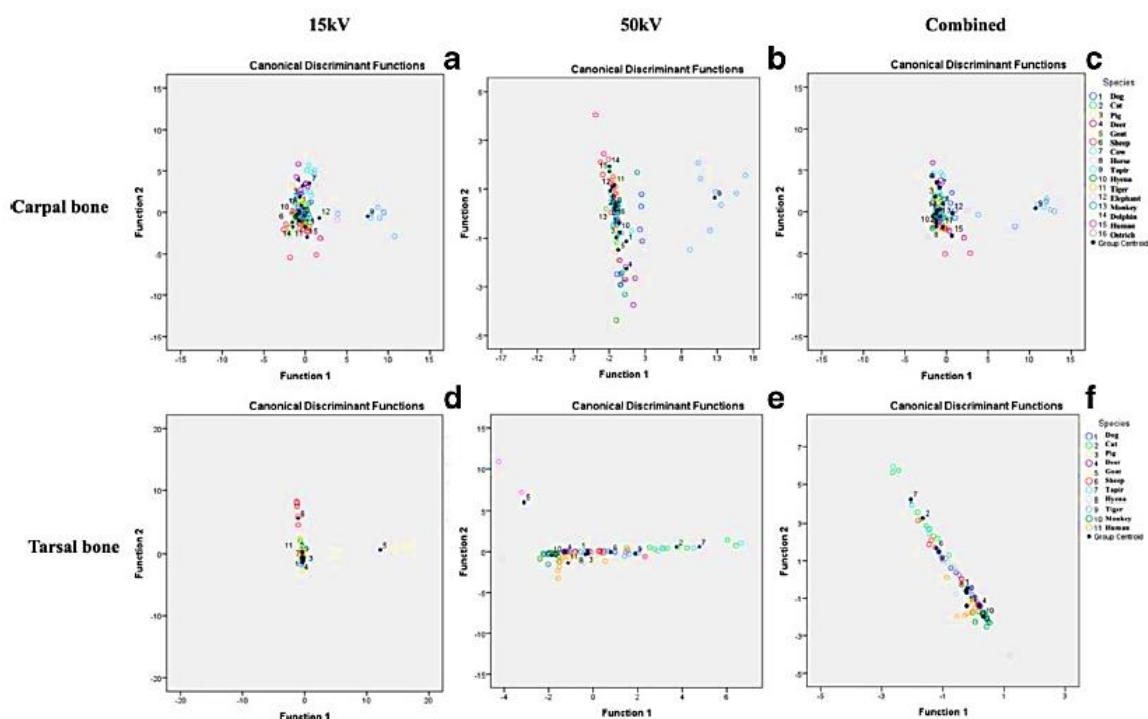
จากการศึกษาตัวอย่างกระดูกที่ตำแหน่ง carpus พบว่า ตัวอย่างกระดูกมนุษย์ และสัตว์ ได้แก่ แมว, สุนัข, แพะ, วัว, ลิง และโลมา ในขั้นตอนการวัดที่ค่าพลังงานต่างกัน จำนวนของธาตุที่พบ มีจำนวนใกล้เคียงกัน ขณะที่ตัวอย่างกระดูกสัตว์ 6 ชนิด ได้แก่ สุนัข, กวาง, สมเสร็จ, ไฮยีนา, เสือ และช้าง ที่การวัดที่ระดับค่าพลังงาน 50 kV พบจำนวนของธาตุในตัวอย่างกระดูกมีจำนวนมากกว่า การวัดที่ค่าพลังงาน 15 kV และนอกจากนี้ในการวัดที่ตัวอย่างกระดูกที่ตำแหน่งเดียวกัน ในแกะ และม้า มีเพียงตัวอย่างกระดูกของสัตว์ 2 ชนิดนี้เท่านั้น ที่ค่าพลังงาน 15 kV มีจำนวนของธาตุที่พบ มากกว่าในการวัดที่ค่าพลังงาน 50 kV

4.1.4 จัดจำแนกชนิดของสัตว์จากตัวอย่างกระดูกโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise Discrimination

ข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาทดลอง จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise Discriminant เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์ออกจากกัน โดยที่จำนวนธาตุที่ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์การจัดจำแนกในกลุ่มกระดูกข้อมือจะมีจำนวนทั้งสิ้น 11 ธาตุ ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) แคลเซียม (Ca) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) คอปเปอร์ (Cu) ซิงค์ (Zn) โบรมีน (Br) แคดเมียม (Cd) และในกลุ่มกระดูกข้อเท้าจำนวน 12 ธาตุ ได้แก่ ซิลิกอน (Si) ฟอสฟอรัส (P) คลอรีน (Cl) โพแทสเซียม (K) ไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) ซิงค์ (Zn) สตรอนเชียม (Sr) เซอร์โคเนียม (Zr) โรเดียม (Rh) ทาลเลียม (Tl) (ตารางที่ 4.4) ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise Discrimination นั้น มีการนำเสนอผลการวิเคราะห์ทางสถิติในรูปแบบของกรุปเซนทรอยด์ (group centroids) โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มฟังก์ชัน ในแต่ละชนิดของสัตว์ และแยกเป็นแต่ละกลุ่มค่าพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 จากนั้นทำการประมวลผลแบบใช้ข้อมูลร่วมกันเพื่อนำไปวิเคราะห์การจัดจำแนก ดังแสดงผลในภาพที่ 4.1 โดยจะเห็นถึงการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกัน และอาศัยการวิเคราะห์ธาตุที่พบตามที่ได้แสดงไว้ในตารางก่อนหน้า ขณะที่ผลการวิเคราะห์การจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดโดยอาศัยวิธีการตรวจสอบไขว้ (cross-validation) พบว่า ตัวอย่างกระดูกจากกลุ่มกระดูกข้อมือที่ทำการตรวจสอบด้วยค่าพลังงาน 15 kV มีความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันที่ร้อยละ 94.1 ขณะที่ในกลุ่มค่าพลังงาน 50 kV มีความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันที่ร้อยละ 63.7 ในการจัดจำแนกกลุ่มกระดูกข้อเท้า เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการตรวจสอบไขว้ พบว่า ที่ค่าพลังงาน 15 kV มีความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันที่ร้อยละ

69.4 ขณะที่ค่าพลังงาน 50 kV มีความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันที่ร้อยละ 77.3 (ตารางที่ 4.6) เมื่อแบ่งพิจารณากลุ่มของผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามค่าพลังงาน จะพบว่า 3 ใน 4 กลุ่มค่าพลังงาน ได้แก่ กลุ่มกระดุกข้อมือที่ค่าพลังงาน 50 kV กลุ่มกระดุกข้อเท้าที่ค่าพลังงาน 15 และ 50 kV มีสัตว์เพียง 3 ชนิดเท่านั้น ที่เมื่อใช้วิธีการตรวจสอบไขว้แล้วพบว่ามีความแม่นยำในการจัดจำแนกที่ร้อยละ 100 ขณะที่ในกลุ่มตัวอย่างกระดุกข้อมือของค่าพลังงานที่ 15 kV มีความแม่นยำในการจัดจำแนกอยู่ที่ร้อยละ 100 ในสัตว์ทั้งหมด 11 ชนิด

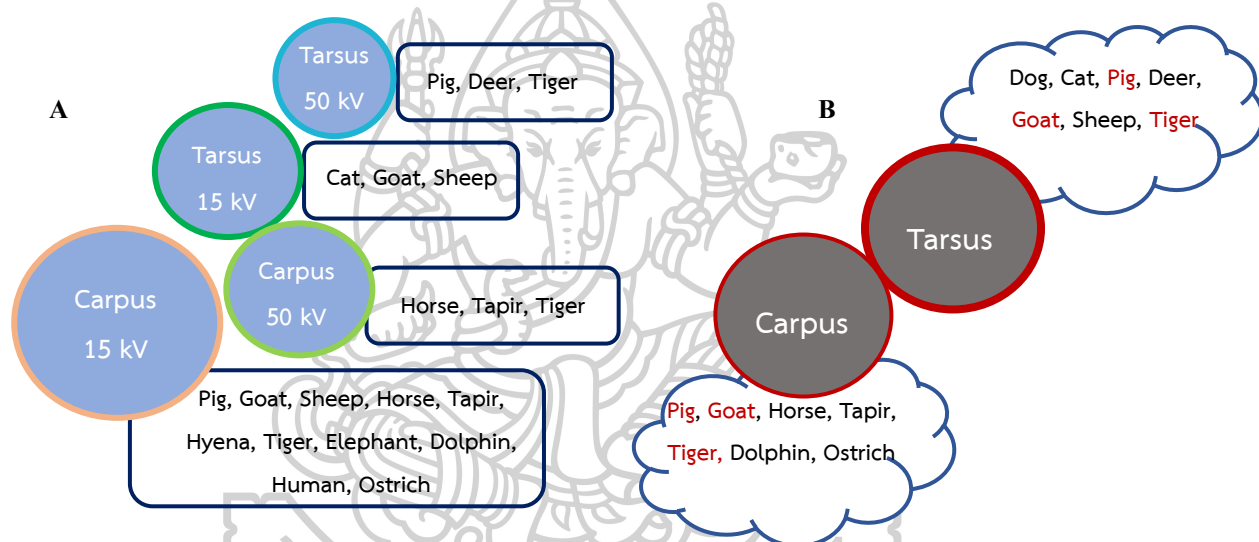




รูปที่ 4.1 การจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์โดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบร้อยละของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda การจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์โดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบร้อยละของธาตุแต่ละชนิดที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda กลุ่มเซนทรอยด์ที่แสดงในแผนภาพเป็นสัญลักษณ์แทนการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกสัตว์แต่ละชนิด แบ่งเป็นกลุ่มของ กระดูกข้อมือที่ค่าพลังงาน 15 kV (a) กระดูกข้อมือที่ค่าพลังงาน 50 kV (b) กระดูกข้อมือที่วิเคราะห์โดยใช้ 2 ค่าพลังงานร่วมกัน (c) กระดูกข้อเท้าที่ค่าพลังงาน 15 kV (d) กระดูกข้อเท้าที่ค่าพลังงาน 50 kV (e) กระดูกข้อเท้าที่วิเคราะห์โดยใช้ 2 ค่าพลังงานร่วมกัน (f) ข้อมูลที่นำมาใช้ในการแสดงแผนภาพได้แก่ข้อมูลจากในตารางที่ 4.5

หมายเหตุ รูปนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร Biological Trace Element Research, Pitakarnop T, Buddhachat K, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy, 2021, Vol. 199, p. 874-887. (58)

เมื่อนำเอากลุ่มค่าพลังงานทั้งสองกลุ่ม (15 และ 50) มาทำการจับคู่และวิเคราะห์ผลร่วมกัน โดยใช้วิธีการตรวจสอบไขว้ พบว่า การวิเคราะห์ที่ให้ผลความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันที่ร้อยละ 89.7 ในกลุ่มของกระดูกข้อมือ ขณะที่ในกลุ่มกระดูกข้อเท้า นั้นความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันอยู่ที่ร้อยละ 90.7 (ตารางที่ 4.7) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในกลุ่มพลังงาน 15 kV และ 50 kV มาทำการวิเคราะห์ร่วมกัน จะให้ผลการวิเคราะห์ และความแม่นยำในการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิด ที่มากกว่าการวิเคราะห์ข้อมูลของแต่ละกลุ่มค่าพลังงานแยกจากกัน โดยที่ในการวิเคราะห์ร่วมกันนี้พบว่า สามารถจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดได้อย่างแม่นยำถึงร้อยละ 100 ในสัตว์ 7 ชนิดด้วยกัน ทั้งในกลุ่มของกระดูกข้อมือ และกระดูกข้อเท้า



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda เพื่อใช้หาค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda เพื่อใช้หาค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์ โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงผลการวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ใช้ค่าพลังงานเดียวในการวิเคราะห์ และให้ค่าความแม่นยำที่ร้อยละ 100 โดยแบ่งตามกลุ่มตัวอย่างกระดูก Carpus และ Tarsus ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV (A) กลุ่มที่ใช้ข้อมูลจากชุดข้อมูลของ 2 ค่าพลังงานวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกัน โดยแบ่งตามกลุ่มตัวอย่างกระดูก Carpus และ Tarsus (B) ข้อมูลที่นำมาใช้ในการแสดงแผนภาพได้แก่ข้อมูลจากในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ชนิดของธาตุที่พบในกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาคอนกรีตในสัตว์ และกระดูกข้อเท้าขาคอนกรีตในสัตว์ ของ สัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV

ตัวอย่าง กระดูก	กระดูก Carpus						กระดูก Tarsus					
	15kV			50kV			15kV			50kV		
	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด		
สุนัข	13	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Rh, Cd, Hg, Pb	14	P, S, K, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Cl, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb		
แมว	11	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	14	P, S, Cl, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Cd, Hg, Pb	14	P, S, Cl, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	14	P, S, Cl, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb		
สุกร	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	13	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	15	P, S, Cl, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb		
กวาง	11	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	13	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Cl, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd		
แพะ	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	13	P, S, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Zn, Br, Hg, Tl, Pb	10	P, S, K, Ca, Ti, Fe, Zn, Cd, Pb		
แกะ	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	14	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd, Pb	14	P, S, Cl, Ca, Cr, Fe, Cu, Zn, Br, Zr, Rh, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Cl, Ca, Fe, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd, Pb		
วัว	12	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb	-	N.D.	-	N.D.		
ม้า	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd	11	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd	-	N.D.	-	N.D.		

ตารางที่ 4.1 ชนิดของธาตุที่พบในกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าขาน้ำในสัตว์ และกระดูกข้อเท้าในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าหลังในสัตว์ ของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV (ต่อ)

ตัวอย่าง กระดูก	กระดูก Carpus						กระดูก Tarsus					
	15kV			50kV			15kV			50kV		
	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด	จำนวน	ชนิด
สมเสร็จ	12	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Hg, Pb	10	P, S, Ca, Fe, Ni, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Zn, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb		
ไต่ยี่นา	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Hg, Pb	13	P, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb		
เสือ	10	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Zn, Br, Sr, Rh, Cd	11	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Rh, Cd, Pb		
ช้างเอเชีย	9	P, S, Ca, Cr, Fe, Zn, Br, Hg, Pb	10	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd	-	N.D.	-	N.D.	-	N.D.		
ลิง	11	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Zn, Sr, Rh, Cd	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd		
โลมา	10	P, S, Ca, Fe, Ni, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	10	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd	-	N.D.	-	N.D.	-	N.D.		
มนุษย์	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd, Pb	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	12	P, S, Ca, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd, Pb		
นกกระจอกเทศ	12	P, S, Ca, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Hg, Pb	11	P, S, Ca, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Rh, Cd, Pb	-	N.D.	-	N.D.	-	N.D.		

* Br Bromine, Ca Calcium, Cd Cadmium, Cl Chlorine, Cr Chromium, Cu Copper, Fe Iron, Hg Mercury, K Potassium, Mn Manganese, Ni Nickel, P Phosphorus, Pb Lead, Rh Rhodium, S Sulfur, Si Silicon, Sr Strontium, Ti Titanium, Tl Thallium, Zn Zinc, Zr Zirconium // **N.D. ไม่สามารถระบุได้ (not determined)

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในกระดูกข้อมือในมนุษย์หรือกระดูกข้อเท้าของสัตว์ในสัตว์ ของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยแสดงผลในรูปแบบของร้อยละ

Ele.	Vol. (kV)	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Cow	Horse	Tapir	Hyena	Tiger	Elephant	Monkey	Dolphin	Human	Ostrich	P
P	15	22.103 ^{cd}	24.410 ^{de}	14.862 ^{ab}	13.136 ^a	18.867 ^{bc}	22.174 ^d	21.314 ^d	26.240 ^e	22.175 ^d	25.046 ^{de}	31.914 ^f	27.730 ^{ef}	25.124 ^{de}	28.017 ^{ef}	28.901 ^{ef}	24.803 ^{de}	0.000*
	50	13.150 ^{ab}	22.443 ^{cde}	14.726 ^b	12.008 ^a	17.472 ^{bc}	21.052 ^{bcd}	15.997 ^b	26.142 ^{ef}	15.170 ^{abcd}	17.885 ^{abc}	31.307 ^f	27.400 ^{def}	24.617 ^{cde}	28.637 ^{ef}	28.877 ^{ef}	23.497 ^{de}	0.000*
S	15	0.595 ^{ab}	0.540 ^{ab}	1.976 ^d	0.542 ^b	0.749 ^{abc}	1.099 ^{abc}	0.749 ^{ab}	0.563 ^{ab}	2.128 ^e	0.737 ^{ab}	0.537 ^{ab}	0.335 ^a	1.457 ^{abcd}	0.101 ^a	0.360 ^a	0.317 ^a	0.000*
	50	0.250 ^{ab}	0.974 ^{ab}	2.008 ^{ab}	0.548 ^a	1.668 ^{ab}	1.010 ^{ab}	0.660 ^a	0.635 ^a	2.985 ^{ab}	3.537 ^b	0.613 ^a	0.365 ^a	1.473 ^{ab}	0.167 ^a	0.403 ^a	0.417 ^a	0.020*
K	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	0.140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	15	75.268 ^f	73.051 ^{cddefg}	81.079 ^e	84.263 ^e	74.924 ^{efg}	74.001 ^{defg}	76.312 ^{fg}	67.168 ^h	67.692 ^{ghdef}	72.285 ^{ghdef}	66.024 ^h	70.440 ^{ghdef}	70.639 ^{ghdef}	69.648 ^{hbc}	66.083 ^a	73.383 ^{defg}	0.000*
	50	85.127 ^{abcd}	75.504 ^{abcd}	81.128 ^d	85.123 ^d	78.976 ^{ab}	76.555 ^{ghdef}	78.410 ^{ghdef}	69.713 ^{bc}	61.970 ^h	76.315 ^{gh}	67.048 ^{hbc}	71.435 ^{ghdef}	72.332 ^{ghdef}	70.380 ^{hbc}	68.501 ^{abcd}	74.923 ^{abcd}	0.014*
Cr	15	0.017 ^{ab}	-	-	-	-	0.086 ^c	-	-	0.020 ^b	-	-	0.018 ^b	-	-	-	0.010 ^{bb}	0.000*
	50	0.010 ^a	-	-	-	-	-	-	-	0.040 ^b	-	-	-	-	-	-	-	0.002*
Mn	15	-	-	0.021 ^a	-	-	0.026 ^a	0.043 ^c	-	0.040 ^b	0.119 ^{ab}	0.021 ^a	-	0.256 ^b	-	0.106 ^{ab}	-	0.000*
	50	-	-	-	-	-	-	0.563 ^c	-	-	0.092 ^{ab}	0.015 ^a	-	0.269 ^b	-	0.058 ^{ab}	-	0.024*
Fe	15	0.208 ^{ab}	0.097 ^a	0.246 ^{ab}	0.159 ^{ab}	0.762 ^{bc}	0.394 ^{ab}	0.885 ^{ab}	0.843 ^{ab}	2.316 ^e	0.262 ^{ab}	0.160 ^{ab}	0.240 ^{ab}	1.113 ^b	0.059 ^a	2.731 ^c	0.367 ^{ab}	0.000*
	50	0.113 ^a	-	0.184 ^a	0.153 ^a	0.434 ^{abc}	0.278 ^{ab}	1.895 ^{cd}	2.200 ^d	3.285 ^{cd}	0.442 ^{abc}	0.465 ^{abc}	0.175 ^a	0.647 ^{abc}	0.045 ^a	1.447 ^{abcd}	0.287 ^a	0.007*
Ni	15	0.047 ^{ab}	0.032 ^{ab}	0.046 ^{ab}	0.065 ^{abc}	0.032 ^{ab}	0.037 ^{ab}	0.063 ^{ab}	0.020 ^{ab}	0.089 ^c	0.087 ^{bc}	0.023 ^{ab}	-	0.026 ^{ab}	0.025 ^{ab}	0.028 ^{ab}	0.030 ^{ab}	0.010*
	50	0.030 ^{ab}	0.021 ^a	0.034 ^{ab}	0.058 ^{ab}	0.038 ^{ab}	0.028 ^{ab}	0.098 ^b	0.012 ^a	0.310 ^d	0.050 ^{ab}	0.013 ^a	0.015 ^a	0.015 ^a	0.020 ^a	0.013 ^a	0.023 ^a	0.000*
Cu	15	0.028 ^a	0.010 ^a	0.017 ^a	0.019 ^a	0.016 ^a	0.026 ^a	0.331 ^b	0.015 ^a	0.115 ^c	0.030 ^a	-	-	-	-	0.010 ^a	0.017 ^a	0.000*
	50	0.037 ^a	0.014 ^a	0.028 ^a	0.037 ^a	0.044 ^a	0.027 ^a	0.313 ^b	0.017 ^a	0.635 ^d	0.032 ^a	0.010 ^a	0.010 ^a	0.011 ^a	0.013 ^a	0.016 ^a	0.023 ^a	0.000*
Zn	15	0.189 ^{abc}	0.247 ^{abcd}	0.261 ^{abcd}	0.097 ^a	0.196 ^{abc}	0.512 ^c	0.106 ^a	0.115 ^{ab}	0.133 ^{ab}	0.153 ^{ab}	0.163 ^{ab}	0.285 ^{cd}	0.137 ^{ab}	0.376 ^{de}	0.347 ^{cde}	0.290 ^{abcd}	0.000*
	50	0.140 ^{ab}	0.177 ^{abc}	0.177 ^{abc}	0.072 ^a	0.120 ^{ab}	0.302 ^c	0.143 ^{abc}	0.075 ^a	0.233 ^{abc}	0.192 ^{abc}	0.105 ^a	0.180 ^{abc}	0.093 ^a	0.275 ^{bc}	0.231 ^{abc}	0.137 ^a	0.008*
Br	15	0.068 ^b	0.039 ^a	0.033 ^a	0.099 ^a	0.064 ^{ab}	0.024 ^a	0.074 ^{ab}	0.018 ^a	0.800 ^e	0.043 ^a	0.052 ^a	0.330 ^b	0.031 ^a	0.032 ^a	0.039 ^a	0.030 ^a	0.000*
	50	0.010 ^a	0.010 ^a	0.013 ^a	0.015 ^a	0.013 ^a	0.010 ^a	0.065 ^b	-	0.065 ^b	0.008 ^a	-	-	-	-	-	-	0.000*
Sr	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	0.100 ^a	0.144 ^a	0.108 ^a	0.082 ^a	0.072 ^a	0.084 ^a	0.373 ^b	0.098 ^a	0.545 ^b	0.087 ^a	0.055 ^a	0.080 ^a	0.026 ^a	0.045 ^a	0.047 ^a	0.060 ^a	0.000*
Rh	15	0.142	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	0.807 ^c	0.513 ^a	0.954 ^d	1.707 ^e	0.916 ^a	0.433 ^a	1.938 ^b	0.453 ^a	14.345 ^b	1.223 ^a	0.295 ^a	0.285 ^a	0.452 ^a	0.357 ^a	0.324 ^a	0.610 ^a	0.000*

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในการดูดกลืนของเนื้อเยื่อของสัตว์ทั้ง 16 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยแสดงผลในรูปแบบของร้อยละ (ต่อ)

Ele.	Vol. (kV)	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Cow	Horse	Tapir	Hyena	Tiger	Elephant	Monkey	Dolphin	Human	Ostrich	P value
Cd	15	1.74 ^{cd}	1.750 ^{cd}	1.313 ^{abcd}	1.559 ^{abcd}	2.304 ^e	1.653 ^{de}	0.289 ^{ab}	1.974 ^{de}	0.338 ^{abc}	1.925 ^{cd}	-	-	1.625 ^{abcd}	1.612 ^{de}	1.535 ^{cd}	0.997 ^{abc}	0.000*
	50	0.223 ^{abcd}	0.122 ^{abcd}	0.130 ^{abcd}	0.238 ^{cd}	0.225 ^d	0.225 ^d	0.124 ^{abcd}	0.085 ^{abc}	-	0.155 ^{cd}	0.068 ^{abc}	0.045 ^{ab}	0.076 ^{abc}	0.053 ^{ab}	0.069 ^{abc}	0.060 ^{abc}	0.020*
Hg	15	0.102 ^a	0.065 ^a	0.238 ^a	0.191 ^a	0.229 ^{ab}	0.051 ^a	0.515 ^{ab}	0.064 ^a	1.683 ^b	0.098 ^a	0.040 ^a	0.035 ^a	0.045 ^a	0.014 ^a	0.047 ^a	0.190 ^a	0.068
	50	-	-	-	-	-	-	-	-	0.050	0.023	-	-	-	-	-	-	0.366
Pb	15	0.327 ^a	0.309 ^a	0.351 ^a	0.439 ^a	0.280 ^a	0.276 ^a	0.318 ^a	0.270 ^a	2.668 ^b	0.294 ^a	0.231 ^a	0.075 ^a	0.121 ^a	0.147 ^a	0.190 ^a	0.145 ^a	0.007*
	50	0.010 ^a	0.010 ^a	0.011 ^a	0.018 ^a	0.013 ^a	0.010 ^a	0.028 ^a	-	0.138 ^b	0.023 ^b	-	-	-	-	0.011 ^a	0.010 ^a	0.000*

เปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในตัวอย่างกระดูกของมนุษย์ และสัตว์ด้วย one-way ANOVA - Duncan ที่ p value < 0.05 ตัวเอียงในตาราง แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในกระดูกของมนุษย์หรือกระดูกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ค่าพลังงานต่างกัน (15kV และ 50kV) ด้วยวิธี T test ที่ P value < 0.05 ในสัตว์ชนิดเดียวกัน ที่กระดูกตำแหน่งเดียวกัน ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็ก (a, b, c, d, e, f, g) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัตว์แต่ละชนิดที่ค่าพลังงานเดียวกัน (15kV และ 50kV) Ele. ธาตุที่พบ (elements), Vol. ค่าพลังงาน (voltage)

Br Bromine, Ca Calcium, Cd Cadmium, Cr Chromium, Cu Copper, Fe Iron, Hg Mercury, K Potassium, Mn Manganese, Ni Nickel, P Phosphorus, Pb Lead, Rh Rhodium, S Sulfur, Sr Strontium, Zn Zinc

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งของบทความวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร Biological Trace Element Research, Pitakamnop T, Buddhachat K, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy, 2021, Vol. 199, p. 874-887.) (58)

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในการดูดกลืนของเนื้อเยื่อไขมันหรือกระดูกข้อเท้าขาหลังในสัตว์ ของสัตว์ทั้ง 11 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยแสดงผลในรูปแบบของร้อยละ

kV	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Tapir	Hyena	Tiger	Monkey	Human	P value
Si	0.483 ^a	1.082 ^d	8.554 ^b	-	1.463 ^a	-	-	-	-	-	-	0.045*
50	-	0.583	6.224	-	0.653	-	-	-	-	-	-	0.224
P	21.420 ^{bc}	24.063 ^{bc}	13.476 ^a	18.195 ^{ab}	23.163 ^{bc}	21.432 ^{bc}	13.950 ^a	18.638 ^{bc}	24.439 ^{bc}	25.711 ^c	27.564 ^c	0.000*
50	20.857 ^{bc,d}	23.608 ^{cd}	12.837 ^{a,b}	18.082 ^{abc}	21.737 ^d	21.020 ^{bc,d}	11.420 ^a	24.958 ^{ab,cd}	26.189 ^{cd}	24.447 ^{cd}	27.199 ^d	0.000*
S	0.300 ^a	0.667 ^a	11.946 ^b	0.268 ^a	0.173 ^a	0.783 ^a	0.520 ^a	3.153 ^a	0.323 ^a	1.648 ^a	0.669 ^a	0.000*
50	0.266 ^a	0.661 ^a	11.761 ^b	0.252 ^a	0.817 ^a	0.810 ^a	0.480 ^a	3.247 ^a	0.347 ^a	2.603 ^a	0.721 ^a	0.000*
Cl	-	0.538	-	-	-	0.215	-	-	-	-	-	0.251
50	0.038	0.509	0.198	0.030	-	0.198	-	-	-	-	-	0.262
K	-	-	-	-	0.100	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	0.293	-	-	-	-	-	-	-
Ca	76.778 ^{cd}	71.879 ^{bc,d}	61.023 ^a	79.825 ^d	73.440 ^{bc,d}	74.677 ^{bc,d}	78.920 ^{cd}	75.330 ^{bc,d}	71.046 ^{bc}	70.533 ^{bc}	67.638 ^{ab}	0.000*
50	77.884 ^{bc}	65.973 ^a	65.277 ^a	80.525 ^{bc}	75.790 ^{bc}	76.553 ^{ab,cd}	83.483 ^c	76.319 ^{ab,cd}	71.101 ^{ab,cd}	71.900 ^{ab,cd}	69.567 ^{ab}	0.017*
Ti	-	-	-	-	0.090	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	0.120	-	-	-	-	-	-	-
Cr	-	-	-	0.010	0.015	0.010	-	0.018	-	-	-	0.420
50	-	-	-	-	-	-	0.017	0.010	-	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	0.129	-	0.422	0.088	0.111
50	-	-	-	-	-	-	-	0.080	-	0.073	0.064	0.118
Fe	0.165 ^a	0.098 ^a	0.644 ^a	0.115 ^a	0.350 ^a	0.567 ^a	0.350 ^a	0.839 ^a	0.893 ^a	0.777 ^a	2.478 ^b	0.000*
50	0.123 ^a	0.088 ^a	0.543 ^a	0.100 ^a	0.247 ^a	0.375 ^a	0.420 ^a	0.569 ^a	0.618 ^a	0.310 ^a	1.650 ^b	0.000*
Ni	0.031	0.033	0.058	0.030	-	-	0.070	0.075	0.050	0.025	0.242	0.778
50	0.018 ^{ab}	0.022 ^{ab}	0.070 ^{cd}	0.023 ^{ab}	-	-	0.063 ^d	-	0.035 ^{bc}	0.020 ^{ab}	0.018 ^{ab}	0.000*
Cu	0.015	0.015	0.080	-	-	0.028	-	0.025	0.014	0.010	0.010	0.059
50	0.016	0.024	0.065	0.028	-	0.032	-	0.058	0.032	0.013	0.010	0.056
Zn	0.173 ^{abc}	0.404 ^{cd}	0.261 ^{abc}	0.043 ^a	0.097 ^{ab}	0.582 ^d	0.180 ^{b,cd}	0.214 ^{abc}	0.308 ^{ab,cd}	0.113 ^{abc}	0.354 ^{bc,d}	0.002*
50	0.117 ^{abc}	0.253 ^{cd}	0.173 ^{abc}	0.040 ^a	0.080 ^{abc}	0.348 ^d	0.123 ^{a,cd}	0.135 ^{abc}	0.230 ^{bc,d}	0.100 ^{ab}	0.209 ^{ab,cd}	0.001*
Br	0.052 ^d	0.033 ^d	0.028 ^a	0.027 ^a	0.030 ^a	0.055 ^a	0.380 ^b	0.046 ^d	0.056 ^d	0.038 ^a	0.029 ^a	0.000*
50	0.001	0.010	0.023	-	-	-	-	0.018	0.010	-	-	0.424
Sr	-	0.760	-	0.740	-	-	-	-	-	-	-	0.954
50	0.068 ^{abc}	0.136 ^{bc}	0.169 ^c	0.052 ^{ab}	-	0.062 ^{abc}	0.450 ^d	0.089 ^{ab,cd}	0.133 ^{bc}	0.020 ^{ab}	0.047 ^{ab}	0.000*

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในการดูดกลืนโพแทสเซียมหรือการดูดกลืนเหล็กของสัตว์ทั้ง 11 ชนิด ที่ค่าพลังงาน 15 kV และ 50 kV โดยแสดงผลในรูปแบบของร้อยละ (ต่อ)

kV	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Tapir	Hyena	Tiger	Monkey	Human	P value
Zr	-	-	-	-	-	0.228	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rh	-	-	0.617 ^b	0.090 ^a	-	0.017 ^a	-	-	-	-	-	0.004*
50	0.592 ^b	0.653 ^a	2.477 ^b	0.763 ^a	-	0.537 ^a	3.430 ^b	1.197 ^a	0.778 ^a	0.443 ^b	0.464 ^a	0.001*
Cd	1.274 ^d	1.190 ^c	2.907 ^b	1.223 ^c	-	1.255 ^c	1.190 ^a	1.679 ^d	3.094 ^b	1.103 ^c	0.948 ^d	0.000*
50	0.081 ^{a,b}	0.111 ^{a,b}	0.243 ^b	0.115 ^{a,b}	0.075 ^a	0.068 ^{a,b}	0.080 ^{a,b}	0.159 ^{a,b}	0.182 ^{a,b}	0.073 ^{a,b}	0.045 ^d	0.283
Hg	0.070 ^a	0.059 ^a	0.415 ^b	0.097 ^a	0.050 ^a	0.077 ^a	0.300 ^b	0.103 ^a	0.060 ^a	0.051 ^a	0.069 ^a	0.000*
50	-	-	0.020	-	0.107	-	0.030	-	-	-	-	0.478
Tl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	0.195 ^{a,b}	0.137 ^d	0.383 ^b	0.293 ^{a,b}	0.283 ^{a,b}	0.238 ^{a,b}	0.630 ^c	0.276 ^{a,b}	0.258 ^{a,b}	0.133 ^a	0.140 ^d	0.003*
50	0.010	0.010	0.032	-	0.010	0.010	0.013	0.015	0.010	-	0.012	0.016*

เปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในตัวอย่างกระดูกของมนุษย์ และสัตว์ด้วย One-way ANOVA - Duncan ที่ p value < 0.05 ตัวเขียนในตาราง แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบในการดูดกลืนโพแทสเซียมหรือการดูดกลืนเหล็กเมื่อทำการตรวจวัดที่ค่าพลังงานต่างกัน (15kV และ 50kV) ด้วยวิธี T test ที่ P value < 0.05 ในสัตว์ชนิดเดียวกัน ที่กระดูกตำแหน่งเดียวกัน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็ก (a, b, c, d, e, f, g) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสัตว์แต่ละชนิดที่ค่าพลังงานเดียวกัน (15kV และ 50kV) Ele. ธาตุที่พบ (elements), Vol. ค่าพลังงาน (voltage)
 Br Bromine, Ca Calcium, Cd Cadmium, Cl Chlorine, Cr Chromium, Cu Copper, Fe Iron, Hg Mercury, K Potassium, Mn Manganese, Ni Nickel, P Phosphorus, Pb Lead, Rh Rhodium, S Sulfur, Si Silicon, Sr Strontium, Ti Titanium, Tl Thallium, Zn Zinc, Zr Zirconium
 หมายเหตุ ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร Biological Trace Element Research, Pitakarnop T, Buddhachat K, Pakdeearong P, and Nganvongpanit K, Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy, 2021, Vol. 199, p. 874-887. (58)

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจำแนกในสมการจำแนกกลุ่ม(Canonical discriminant function coefficients)

Energy	15 kV		50 kV		Combined	
	1	2	1	2	1	2
Carpal						
Bone						
P	-	-	-0.003	0.155	-	-
S	0.271	0.129	-	-	-	-
Ca	-0.016	0.255	-	-	-0.025	0.259
Cr	5.710	36.297	323.002	11.689	-2.132 and 184.143	32.990 and 0.581
Mn	-0.901	-0.111	0.114	0.327	-1.148	-0.271
Fe	0.555	-0.145	-	-	0.701	-0.171
Ni	-	-	35.740	-6.577	-	-
Cu	-	-	-7.320	3.608	-	-
Zn	-2.579	-4.427	-5.263	7.097	-0.498	-3.857
Br	7.735	-0.404	-	-	5.810	1.035
Cd	-0.241	0.028	-	-	-0.073	0.032
(Constant)	0.657	-17.943	-1.046	-4.367	0.572	-18.230
Tarsal						
bone						
Si	0.013	-0.103	-0.097	-0.034	0.037	-0.096
P	0.014	0.049	-	-	-	-
Cl	-	-	2.877	0.665	-1.043	2.850
K	-	-	-3.925	21.284	-	-
Ti	52.467	7.895	-	-	49.617	20.619
Cr	-	-	-280.336	-16.248	115.775	-258.894
Fe	-0.050	-0.017	-0.139	-0.876	-0.122	-0.141
Zn	-0.296	3.626	-	-	-	-
Sr	-	-	40.393	3.370	-15.347	37.348
Zr	-3.626	31.884	-	-	-3.772	7.721
Rh	-	-	-1.985	-0.057	0.734	-1.837
Tl	72.976	7.613	-	-	77.423	29.610
(Constant)	-0.590	-2.227	-1.864	-0.056	0.455	-1.950

Br Bromine, Ca Calcium, Cd Cadmium, Cl Chlorine, Cr Chromium, Cu Copper, Fe Iron, Hg Mercury, K Potassium, Mn Manganese, Ni Nickel, P Phosphorus, Pb Lead, Rh Rhodium, S Sulfur, Si Silicon, Sr Strontium, Ti Titanium, Tl Thallium, Zn Zinc, Zr Zirconium

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร Biological Trace Element Research, Pitakarnnop T, Buddhachat K, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy, 2021, Vol. 199, p. 874-887. (58)



ตารางที่ 4.5 ค่ากลางของกลุ่ม (Group Centroids) ของสัตว์แต่ละชนิดที่จัดจำแนกด้วยวิธีทางสถิติ

Energy Function	15 kV		50 kV		Combined	
	1	2	1	2	1	2
Carpal						
Bone						
Dog	-0.479	0.866	0.366	-1.132	-0.397	0.953
Cat	-1.025	-0.291	-1.359	0.230	-1.244	-0.184
Pig	-0.648	1.851	-0.988	-0.964	-1.3351	0.804
Deer	-0.345	3.202	0.360	-2.254	-1.1893	0.565
Goat	-0.197	0.509	-0.749	-1.483	-0.745	0.312
Sheep	-1.554	-1.192	-1.874	0.937	-1.214	-1.047
Cow	0.511	3.527	-0.623	-0.394	-0.8322	0.917
Horse	-0.761	-1.001	-1.153	0.373	-1.204	-1.381
Tapir	7.504	-0.477	12.647	0.650	10.709	0.422
Hyena	-0.743	-0.092	-0.584	-0.763	-1.197	-0.068
Tiger	-0.017	-1.746	-1.280	1.169	-0.432	-1.855
Elephant	1.689	-0.698	-1.605	1.083	0.709	-0.188
Monkey	-0.119	-0.431	-1.126	0.119	-0.763	-0.582
Dolphin	-1.491	-1.776	-1.954	1.928	-1.234	-1.794
Human	0.219	-2.93	-1.972	1.724	0.645	-2.855
Ostrich	-0.744	0.174	-1.075	0.296	-1.089	0.187
Tarsal						
Bone						
Dog	-0.355	-0.577	-0.250	0.042	-0.192	-0.474
Cat	-0.376	0.331	3.749	0.618	-1.662	3.281
Pig	-0.408	-1.513	-0.244	-0.226	-0.221	-0.711
Deer	-0.360	-1.189	-1.263	-0.004	192	-1.396
Goat	12.205	0.614	-3.112	5.948	12.695	2.669
Sheep	-1.047	5.748	0.792	-0.031	-1.218	1.676
Tapir	-0.469	-0.915	4.774	0.624	-2.048	4.191
Hyena	-0.440	-0.560	-0.356	-0.319	-0.261	-0.602
Tiger	-0.392	0.061	1.891	-0.193	-1.129	1.474
Monkey	-0.311	-0.582	-1.873	-0.445	0.328	-2.004
Human	-0.442	0.353	-1.130	-1.370	-0.222	-1.409

ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจำแนกในสมการจำแนกกลุ่ม เป็นสมการในรูปแบบข้อมูลดิบ ค่าน้ำหนักที่ได้จึงไม่อยู่ในรูปมาตรฐาน (Unstandardized canonical discriminant functions evaluated at group mean values)

(หมายเหตุ ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร Biological Trace Element Research, Pitakarnnop T, Buddhachat K, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy, 2021, Vol. 199, p. 874-887.) (58)



ตารางที่ 4.6 การจัดจำแนกข้อมูลทีวีเคาระหัดด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda (F-level 2.71 และ 3.84) โดยวิธีการตรวจสอบไขว้ (cross-validation)

Predicted group membership																
Carpus 15/50 kv																
Species	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Cow	Horse	Tapir	Hyena	Tiger	Elephant	Monkey	Dolphin	Human	Ostrich
Dog	66.7/91.1	0.0/8.3	16.7/0.0	8.3/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	8.3/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Cat	0.0/22.2	66.7/33.3	11.1/0.0	11.1/0.0	0.0/11.1	11.1/41.1	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/22.2
Pig	0.0/77.8	0.0/0.0	100.0/22.2	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Deer	0.0/0.0	11.1/0.0	0.0/0.0	88.9/83.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/16.7
Goat	0.0/33.3	0.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/33.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/16.7
Sheep	0.0/0.0	0.0/33.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/66.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Cow	0.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/16.7	88.9/33.3	0.0/0.0	0.0/0.0	11.1/0.0	0.0/0.0	0.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Horse	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/100.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Tapir	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/100.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Hyena	0.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/25.0	0.0/0.0	100.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/25.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Tiger	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/100.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
Elephant	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/50.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/50.0	0.0/0.0
Monkey	0.0/0.0	0.0/0.0	6.7/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/13.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	93.3/80.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/6.7
Dolphin	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/83.3	0.0/0.0	0.0/0.0
Human	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/11.1	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/88.9	0.0/0.0
Ostrich	0.0/12.5	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/87.5
Tarsus 15/50 kv																
Species	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Tapir	Hyena	Tiger	Monkey	Human					
Dog	33.3/91.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	66.7/83.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Cat	11.1/0.0	100.0/55.6	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	22.2/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	11.1/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Pig	0.0/0.0	0.0/0.0	71.4/100.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	14.3/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	14.3/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Deer	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	50.0/100.0	0.0/0.0	50.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Goat	0.0/33.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/66.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Sheep	0.0/16.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	100.0/83.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Tapir	0.0/0.0	66.7/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	33.3/0.0	66.7/33.3	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Hyena	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	50.0/25.0	8.3/0.0	33.3/66.7	0.0/0.0	8.3/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Tiger	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	33.3/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	66.7/100.0	0.0/0.0	0.0/0.0	-	-	-	-	-
Monkey	0.0/6.7	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	40.0/0.0	6.7/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	53.3/86.7	0.0/6.7	-	-	-	-	-
Human	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/33.3	11.1/0.0	0.0/0.0	88.9/66.7	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4.7 การจัดจำแนกข้อมูลโดยอาศัย 2 ค่าพลังงานประกอบกัน เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda (F-level 2.71 และ

3.84) โดยวิธีการตรวจสอบไขว้ (cross-validation)

Predicted group membership																
Carpus																
Species %	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Cow	Horse	Tapir	Hyena	Tiger	Elephant	Monkey	Dolphin	Human	Ostrich
Dog	91.7	0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cat	0.0	88.9	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pig	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Deer	0.0	0.0	0.0	83.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Goat	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sheep	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cow	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	83.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	0.0
Horse	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tapir	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hyena	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tiger	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Elephant	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Monkey	0.0	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	73.3	0.0	0.0	0.0
Dolphin	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0
Human	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	88.9	0.0
Ostrich	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
Tarsus																
Species	Dog	Cat	Pig	Deer	Goat	Sheep	Tapir	Hyena	Tiger	Monkey	Human					
Dog	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Cat	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Pig	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Deer	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Goat	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Sheep	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Tapir	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Hyena	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.7	0.0	8.3	0.0	-	-	-	-	-
Tiger	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-
Monkey	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86.7	6.7	-	-	-	-	-
Human	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	77.8	-	-	-	-	-

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร Biological Trace Element Research, Pitakarnop T, Buddhachat K, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy, 2021, Vol. 199, p. 874-887. [64]

4.2 ผลการศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณ และการกระจายตัวของธาตุที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งบนกระดูกยาว

4.2.1 เปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบในแต่ละตำแหน่งบนกระดูกต้นขาหลัง

จากผลการศึกษาทดลองแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนปริมาณธาตุที่ตรวจพบส่วนใหญ่ จากจำนวน 19 ใน 25 ธาตุ ซึ่งรวมถึงอัตราส่วนระหว่าง แคลเซียม ต่อ ฟอสฟอรัส (Ca/P) ด้วยนั้น พบว่าสัดส่วนปริมาณ และชนิดของธาตุที่พบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อทำการเปรียบเทียบกันภายใน 6 ตำแหน่งที่ได้มีการกำหนดไว้ โดยตำแหน่งที่พบว่ามีสัดส่วนปริมาณ และชนิดของธาตุที่มีการกระจายตัวมากที่สุดคือที่ตำแหน่ง CD (กลางกระดูกของกระดูกเนื้อแน่น) และรวมไปถึง พบสัดส่วนปริมาณธาตุอีก 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) โมลิบดีนัม (Mo) และทังสแตน (W) โดยธาตุทั้งสามชนิดที่พบในการศึกษานี้ พบแค่ในตำแหน่งเฉพาะอย่าง CE (epiphysis ของกระดูกเนื้อแน่น) CD (กลางกระดูกของกระดูกเนื้อแน่น) และ SM (กระดูกพรุนที่บริเวณ metaphysis) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.8) นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนของ Ca/P ที่พบที่บริเวณตำแหน่ง CE นั้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบที่บริเวณตำแหน่งอื่น เมื่อทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบแต่ละธาตุที่ตำแหน่ง diaphysis ที่บริเวณ proximal middle และ distal นั้น พบว่ามีเพียง 6 ธาตุ จากจำนวน 23 ธาตุ เท่านั้น ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.9) และพบโมลิบดีนัม (Mo) ที่ตำแหน่ง middle เพียงตำแหน่งเดียว ขณะที่แมกนีเซียม (Mg) นิกเกิล (Ni) และเซอร์โคเนียม (Zr) ถูกพบใน 2 จาก 3 ส่วน ของตัวอย่างกระดูก และที่ตำแหน่ง middle นั้น พบว่าสัดส่วนปริมาณของ Ca/P มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ต่ำกว่าตำแหน่ง proximal และ distal (ตารางที่ 4.8) จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่บริเวณตำแหน่ง diaphysis ด้วยวิธีการทางสถิติ พบว่า มีธาตุจำนวน 5 ธาตุ จาก 23 ธาตุ ที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่กลับพบว่า ในส่วนของอัตราส่วนระหว่าง Ca/P กลับมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันใน 4 ตำแหน่ง ดังที่แสดงในภาพที่ 4.4 ข้อมูลค่าเฉลี่ย และร้อยละของธาตุทุกธาตุที่พบได้ถูกนำเสนอผ่านแผนภาพแบบ cluster heat map โดยอาศัยข้อมูลจากรายละเอียดของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่ตรวจพบจากทั้ง 6 ตำแหน่ง โดยที่ผลการศึกษาที่ได้นั้น ควรจะมีข้อมูลจาก 2 ตำแหน่งที่มีความเกี่ยวข้องกันมาใช้ในการประมวลผลข้อมูล เช่น กลุ่มของ SM ที่วิเคราะห์ร่วมกับตำแหน่งอื่น เช่น CD SFH CE SD และ SFT ซึ่ง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาพบว่า ตำแหน่ง CD ได้แสดงลักษณะของตำแหน่งที่มีสัดส่วนปริมาณของธาตุที่พบส่วนใหญ่ และถูกนำมาคิดเป็นปริมาณร้อยละของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่มีค่ามากที่สุด เมื่อนำมาแบ่งกลุ่มเพื่อทำการเปรียบเทียบใน

รูปแบบของ cluster โดยการใช้ข้อมูลจาก 3 ส่วน มาเป็นตัววิเคราะห์ ใน cluster จะประกอบไปด้วย 2 กลุ่ม เช่น ตำแหน่ง middle กับอีก 1 ตำแหน่ง อาจเป็น proximal หรือ distal ก็ได้

4.2.2 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี Stepwise Discriminant

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Stepwise Discriminant เพื่อหาความแตกต่างของสัดส่วน ปริมาณธาตุที่พบทั้ง 6 ตำแหน่ง บนตัวอย่างกระดูกสุกร พบว่ากระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง CD และ CE เมื่อใช้ข้อมูลของธาตุที่พบ มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลทำให้มีความสามารถในการจัดจำแนกแต่ละ ตำแหน่งออกจากกันได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยที่สองตำแหน่งดังกล่าว มีค่าความแม่นยำในการจัด จำแนกที่สูงถึงร้อยละ 94.4 (ตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.3) แต่เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ ตำแหน่งของกระดูกพรุนนั้น ผลที่ได้คือ มีค่าความแม่นยำอยู่ที่ร้อยละ 0 ขณะเดียวกัน หากนำเอา ข้อมูลจากตำแหน่ง SM และ SD ที่อยู่บนกระดูกพรุนมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลของธาตุที่พบที่ ตำแหน่ง CD บนกระดูกเนื้อแน่น จะทำให้ผลการวิเคราะห์ในเรื่องความแม่นยำในการจัดจำแนกนั้นมี ค่าความแม่นยำที่ค่อนข้างต่ำ โดยที่ความแม่นยำจะลดลงเหลืออยู่ที่ร้อยละ 5.0 และ 1.8 ตามลำดับ นอกจากนี้ ในส่วนของผลการศึกษาทดลองในอีก 2 กลุ่ม (ตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.3) เมื่อทำการ เปรียบเทียบจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ามีความแตกต่างกันใน 3 ส่วน และ 4 ตำแหน่ง ของข้อมูล ที่ได้จากการศึกษาบนกระดูกต้นขาหลังที่ตำแหน่ง diaphysis โดยที่มีค่าความแม่นยำในการจัด จำแนกแต่ละส่วน และตำแหน่งออกจากกันที่ร้อยละ 63.6 และ 37.0 ตามลำดับ

จำนวนธาตุที่นำเอามาใช้เป็นตัวร่วมในการวิเคราะห์เพื่อหาความแม่นยำในการจัดจำแนก มี ดังนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลแบบพื้นที่ 6 ส่วน ใช้ธาตุจำนวน 7 ธาตุ เป็นตัวช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่ง ได้แก่ ซิลิกอน ซัลเฟอร์ โพแทสเซียม ไทเทเนียม เซอร์โคเนียม ซิลเวอร์ และไลต์เอเลเมนต์ โดยที่ธาตุ ทั้ง 7 ชนิดนั้น จัดเป็นธาตุที่มีความสัมพันธ์กับสมการจำแนกกลุ่ม ด้วยค่าสหสัมพันธ์ 2.981, 3.947, - 0.654, 16.419, -625.855, 238.069, และ -0.007 ตามลำดับขณะที่การวิเคราะห์พื้นที่แบบ 3 ส่วน ใช้ธาตุจำนวน 4 ธาตุ ได้แก่ ซิลิกอน แคลเซียม แคดเมียม และสแตนนัม มีความสัมพันธ์กับสมการ จำแนกกลุ่ม ด้วยค่าสหสัมพันธ์ 4.985, 0.422, -429.459, และ 481.322 ตามลำดับ และในการ วิเคราะห์พื้นที่แบบ 4 ตำแหน่ง ใช้ธาตุจำนวน 1 ธาตุ ได้แก่ ซัลเฟอร์ มีความสัมพันธ์กับสมการจำแนก กลุ่ม ด้วยค่าสหสัมพันธ์ 4.685 (ตารางที่ 4.12)

จากข้อมูลในตารางที่ 4.13 ประกอบภาพที่ 4.4 ซึ่งเป็นการนำเสนอข้อมูลที่ทำารวิเคราะห์ได้ ในรูปแบบเซนทรอยด์ของแต่ละกลุ่ม พบว่า ในการเปรียบเทียบข้อมูลของการวิเคราะห์ในรูปแบบพื้นที่ 6 ตำแหน่ง นั้น ในฟังก์ชันที่ 1 และ 2 มีลักษณะของการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณธาตุในแต่ละตำแหน่งสอดคล้องกัน เช่น ในตำแหน่งของ CD และ SFH ในฟังก์ชันที่ 1 มีค่าเฉลี่ยที่ 2.603 และ 2.603 ตามลำดับ ขณะที่ในฟังก์ชันที่ 2 CD และ SFH มีค่าเฉลี่ยที่ -0.188 และ -0.188 ตามลำดับ โดยที่ในการวิเคราะห์รูปแบบ 6 ตำแหน่งนั้น มีเพียงค่าของ CE ที่มีการกระจายตัวจากข้อมูลของตำแหน่งอื่นอย่างชัดเจน ในการเปรียบเทียบพื้นที่แบบ 3 ส่วน พบว่า ทั้งในฟังก์ชันที่ 1 และ 2 ค่าของพื้นที่ในส่วน Middle มีการกระจายตัวจากอีก 2 กลุ่ม อย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ในการวิเคราะห์พื้นที่แบบ 4 ทิศทาง มีเพียง Caudal เท่านั้น ที่มีลักษณะการกระจายตัวต่างจากทิศทางอื่นอย่างชัดเจน



ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่พบใน 6 ตำแหน่ง บนกระดูกต้นขาหลัง (ต่อ)

Element	Compact bone at diaphysis (CD)		Compact bone at epiphysis (CE)		Spongy bone at metaphysis (SM)		Spongy bone at diaphysis (SD)		Spongy bone at femoral trochlea (SFT)		Spongy bone at metaphysis (SFH)		P value
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
Ag	0.0148 ^d	0.0018	0.0105 ^b	0.0018	0.0125 ^c	0.0018	0.0108 ^{a,b}	0.0014	-	0.0107 ^{a,b}	0.0107	0.0107	0.000 *
Cd	0.0191 ^d	0.0027	0.0096 ^b	0.0031	0.0158 ^c	0.0026	0.0084 ^a	0.0032	0.0070 ^a	0.0081 ^b	0.0026	0.0026	0.000 *
Sn	0.0221 ^e	0.0030	0.0114 ^c	0.0034	0.0170 ^d	0.0032	0.0096 ^{a,b}	0.0033	0.0076 ^{b,b}	0.0097 ^{b,c}	0.0028	0.0028	0.000 *
Sb	0.0296 ^e	0.0044	0.0150 ^c	0.0044	0.0226 ^d	0.0042	0.0126 ^{a,b}	0.0048	0.0099 ^{a,b}	0.0120 ^{b,c}	0.0043	0.0043	0.000 *
W	-	-	-	-	0.0035	0.0035	-	-	-	-	-	-	-
Pb	0.0012 ^a	0.0007	-	-	0.0012 ^b	0.0008	-	-	-	-	-	-	1.000
LE	77.8656 ^b	4.7694	85.3450 ^d	2.3406	71.0303 ^a	6.6555	84.7701 ^d	2.7744	84.4469 ^d	2.7633	81.4967 ^c	1.6742	0.000 *
Ca/P	3.9586 ^b	1.0008	4.7116 ^c	1.5987	3.6295 ^{a,b}	1.1445	3.7809 ^{a,b}	0.7439	3.7110 ^{a,b}	0.5409	3.2358 ^a	0.3367	0.000 *

เปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบใน 6 ตำแหน่ง บนกระดูกต้นขาหลัง ด้วย one-way ANOVA - Duncan ที่ p value < 0.05 a, b, c และ d ใช้เพื่อระบุค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดูกแต่ละตำแหน่งในธาตุชนิดเดียวกัน

Mg Magnesium, Al Aluminium, Si Silicon, P Phosphorus, S Sulphur, Cl Chlorine, K Potassium, Ca Calcium, Ti Titanium, V Vanadium, Cr Chromium, Mn Manganese, Fe Iron, Ni Nickel, Cu Copper, Zn Zinc, Zr Zirconium, Mo Molybdenum Ag Silver, Cd Cadmium, Sn Stannum, Sb Antimony, W Tungsten, Pb Lead, LE; Light Element.

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งของบทความวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeeanarong P, and Nganvongpanit K, Elements May Not Be Homogeneously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่พบบนกระดูกเนื้อแน่นที่ 3 ส่วน ของกระดูกต้นขาหลัง

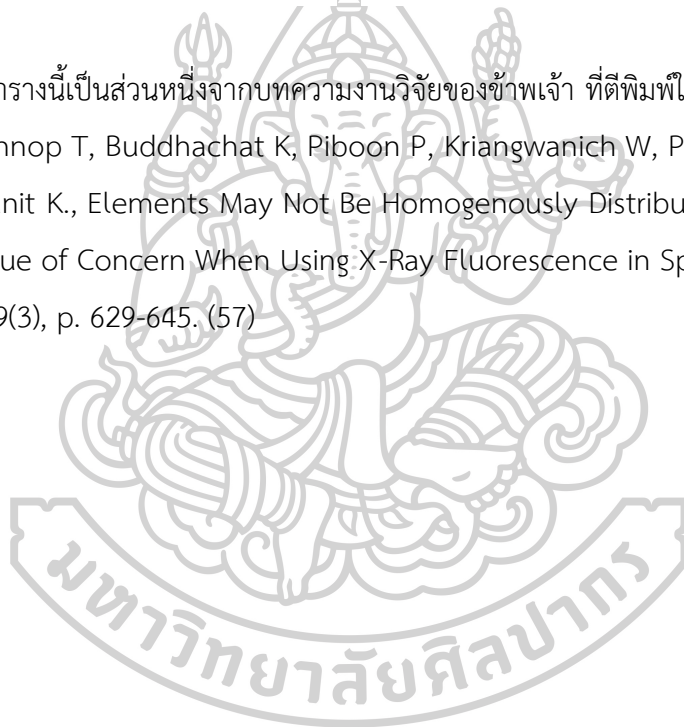
Element	Proximal		Middle		Distal		P value
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
Mg	2.0050	0.4455	-	-	2.7600	2.7600	0.263
Si	0.1983	0.1139	0.1665	0.0681	0.1888	0.1146	0.560
P	3.9423 ^a	1.5518	5.3020 ^b	1.1990	3.5990 ^a	1.2933	0.000*
S	0.4857 ^b	0.2585	0.3334 ^a	0.1785	0.4916 ^b	0.2097	0.004*
Cl	8.3260	7.1186	7.8400	0.0794	6.5925	10.3136	0.786
K	0.5582 ^b	0.3948	0.1828 ^a	0.0429	0.3483 ^b	0.2223	0.003*
Ca	15.0983 ^a	3.4131	17.8639 ^b	2.0187	14.1391 ^a	2.9189	0.000*
Ti	0.0430	0.0405	0.0326	0.0095	0.0302	0.0124	0.199
V	0.0144	0.0040	0.0141	0.0026	0.0134	0.0027	0.592
Cr	0.0068	0.0009	0.0075	0.0017	0.0074	0.0017	0.416
Mn	0.0069	0.0014	0.0077	0.0017	0.0071	0.0015	0.241
Fe	0.0429 ^a	0.0181	0.0919 ^b	0.1608	0.0424 ^a	0.0261	0.042*
Ni	0.0028	0.0014	-	-	0.0019	0.0019	0.067
Cu	0.0021	0.0005	0.0016	0.0002	0.0019	0.0006	0.897
Zn	0.0146	0.0067	0.0196	0.0225	0.0135	0.0033	0.136
Zr	0.0010	0.0005	0.0007	0.0001	-	-	0.372
Mo	-	-	0.0013	0.0013	-	-	-
Ag	0.0148	0.0020	0.0142	0.0016	0.0153	0.0017	0.694
Cd	0.0194	0.0027	0.0185	0.0021	0.0194	0.0031	0.257
Sn	0.0224	0.0030	0.0217	0.0025	0.0221	0.0035	0.572
Sb	0.0301	0.0040	0.0290	0.0035	0.0296	0.0055	0.567
Pb	0.0015	0.0008	0.0008	0.0003	0.0017	0.0017	0.356
LE	78.3674 ^b	4.8804	75.2156 ^a	3.0976	80.1086 ^b	4.8906	0.000*
Ca/P	4.2028 ^b	1.1331	3.4897 ^a	0.6114	4.2197 ^b	1.0261	0.002*

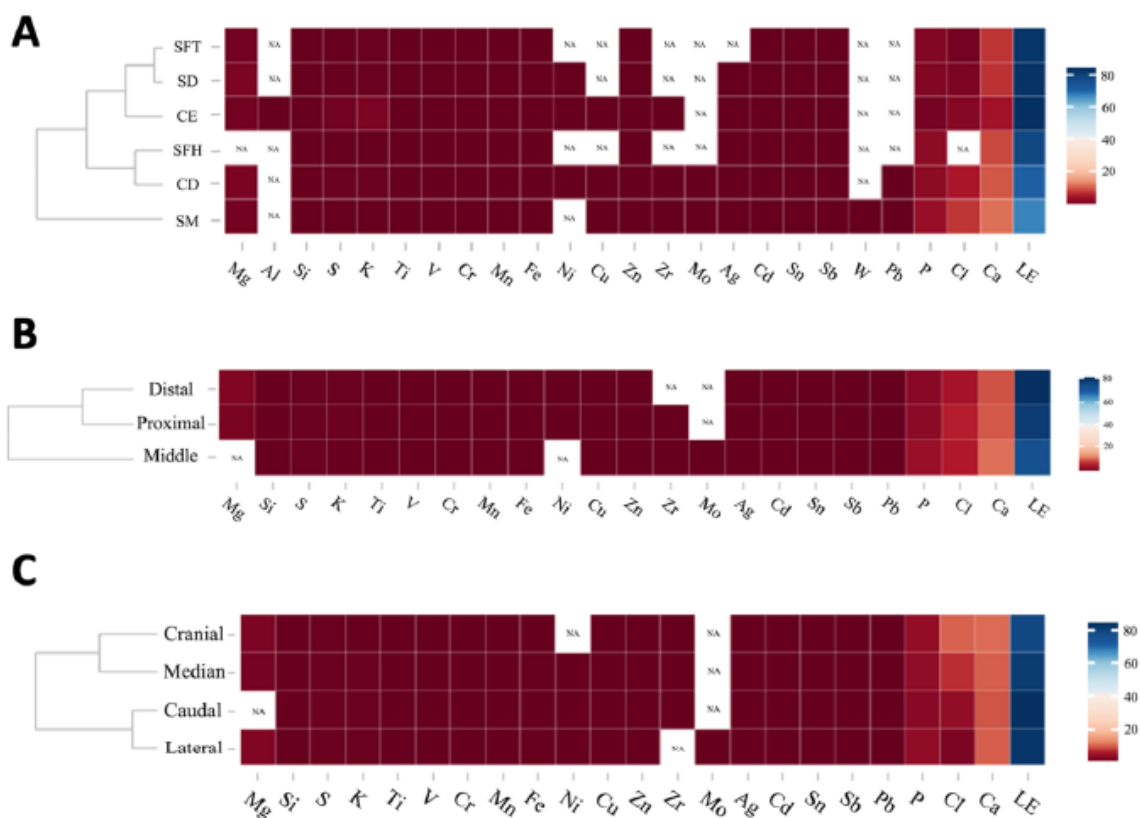
เปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบใน 3 ส่วน บนกระดูกต้นขาหลัง ด้วย one-way ANOVA - Duncan ที่ p value < 0.05

a, b, c และ d ใช้เพื่อระบุค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดูกแต่ละตำแหน่งในธาตุชนิดเดียวกัน

Mg Magnesium, Al Aluminium, Si Silicon, P Phosphorus, S Sulphur, Cl Chlorine, K Potassium, Ca Calcium, Ti Titanium, V Vanadium, Cr Chromium, Mn Manganese, Fe Iron, Ni Nickel, Cu Copper, Zn Zinc, Zr Zirconium, Mo Molybdenum Ag Silver, Cd Cadmium, Sn Stannum, Sb Antimony, W Tungsten, Pb Lead, LE; Light Element.

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)



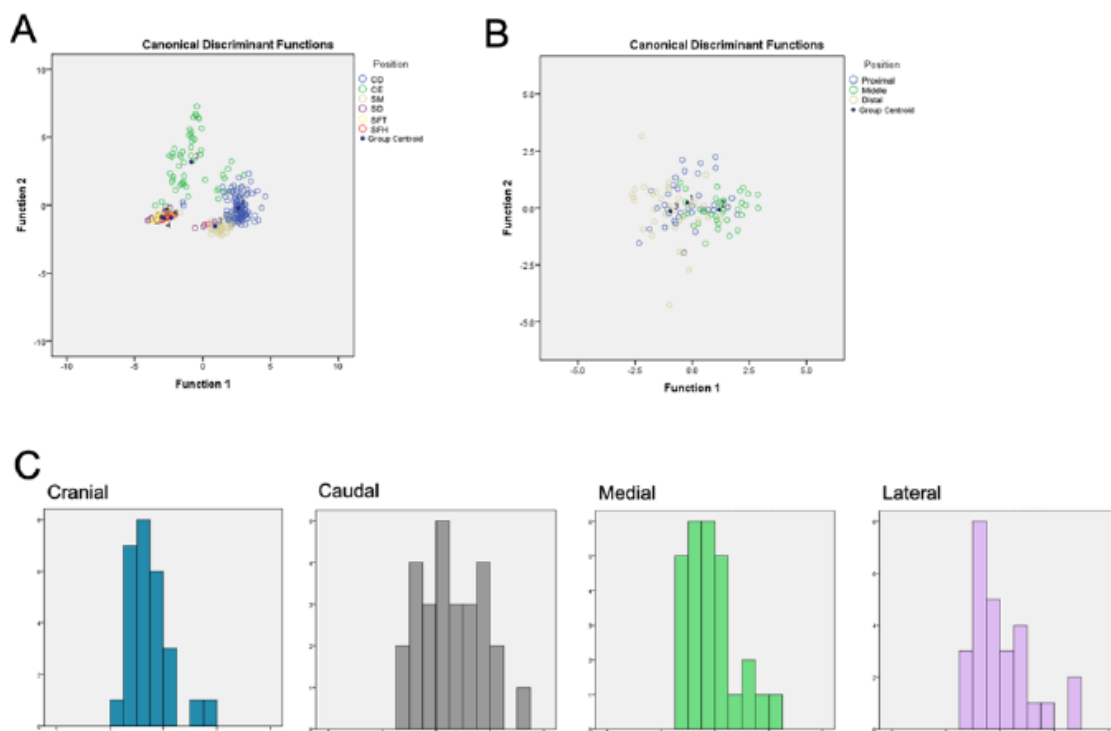


รูปที่ 4.3 แผนภาพ Cluster heat map จากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบบนกระดูก
 แผนภาพ Cluster heat map จากค่าเฉลี่ยของสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบบนกระดูก ที่ 6 ตำแหน่ง
 ต่างกัน (A) พื้นที่ 3 ส่วนที่แตกต่างกัน (B) และพื้นที่ 4 ทิศทางที่แตกต่างกัน (C) ช่องสีแต่ละสีแสดงถึง
 ร้อยละของสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบ โดยที่ธาตุที่พบในสัดส่วนปริมาณมาก จะถูกแทนที่ด้วยสีน้ำเงิน
 เข้ม ขณะที่ธาตุที่พบในสัดส่วนปริมาณน้อยจะถูกแทนที่ด้วยสีแดง CD = Compact bone at
 diaphysis, CE = Compact bone at epiphysis, SM = Spongy bone at metaphysis, SD =
 Spongy bone at diaphysis, SFT = Spongy bone at femoral trochlea, SFH = spongy bone
 at metaphysis.

Mg Magnesium, Al Aluminium, Si Silicon, P Phosphorus, S Sulphur, Cl Chlorine, K
 Potassium, Ca Calcium, Ti Titanium, V Vanadium, Cr Chromium, Mn Manganese, Fe
 Iron, Ni Nickel, Cu Copper, Zn Zinc, Zr Zirconium, Mo Molybdenum Ag Silver, Cd
 Cadmium, Sn Stannum, Sb Antimony, W Tungsten, Pb Lead, LE; Light Element.

หมายเหตุ : รูปภาพนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J.
 Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P,
 and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout

The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645.) (57)



รูปที่ 4.4 การจัดจำแนกตำแหน่งแต่ละตำแหน่งบนกระดูก โดยใช้ร้อยละของสัดส่วนปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ Stepwise discriminant - Wilks' Lamda

การจัดจำแนกตำแหน่งแต่ละตำแหน่งบนกระดูก โดยใช้ร้อยละของสัดส่วนปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ Stepwise discriminant - Wilks' Lamda แผนภาพแบ่งตามการศึกษาแต่ละพื้นที่บนกระดูก ที่ 6 ตำแหน่งต่างกัน (A) พื้นที่ 3 ส่วนที่แตกต่างกัน (B) และบริเวณ 4 ด้านที่แตกต่างกัน (C) CD = Compact bone at diaphysis, CE = Compact bone at epiphysis, SM = Spongy bone at metaphysis, SD = Spongy bone at diaphysis, SFT = Spongy bone at femoral trochlea, SFH = spongy bone at metaphysis.

หมายเหตุ : รูปภาพนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละธาตุที่พบบนกระดูกเนื้อแน่นที่ 4 ทิศทาง ของกระดูกต้นขาหลัง

Element	Cranial		Caudal		Median		Lateral		P value
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	
Mg	2.3200	2.3200	-	-	1.6900	1.6900	2.7600	2.7600	0.596
Si	0.1877	0.0994	0.1849	0.1131	0.1987	0.1201	0.1617	0.0650	0.596
P	4.7711 ^b	1.4162	3.5981 ^a	1.5043	4.4364 ^{a,b}	1.6213	4.4058 ^{a,b}	1.4355	0.034*
S	0.3288 ^a	0.1604	0.5656 ^b	0.2522	0.4061 ^a	0.1934	0.4399 ^a	0.2356	0.001*
Cl	16.2150	8.2519	4.6133	3.5766	9.7033	8.7554	2.3000	2.3000	0.581
K	0.2407 ^a	0.1295	0.4830 ^b	0.3828	0.4339 ^a	0.2770	0.3469 ^a	0.2442	0.014*
Ca	17.1469 ^b	2.5378	14.3631 ^a	3.4254	15.7156 ^{a,b}	3.4206	15.6913 ^{a,b}	2.9784	0.016*
Ti	0.0320	0.0100	0.0294	0.0110	0.0453	0.0350	0.0338	0.0302	0.189
V	0.0153	0.0040	0.0137	0.0024	0.0133	0.0028	0.0132	0.0022	0.304
Cr	0.0077	0.0019	0.0066	0.0011	0.0075	0.0013	0.0073	0.0016	0.202
Mn	0.0075	0.0016	0.0066	0.0017	0.0077	0.0011	0.0070	0.0017	0.448
Fe	0.0490	0.0338	0.0513	0.0505	0.0621	0.0715	0.0733	0.1709	0.785
Ni	-	-	0.0018	0.0018	0.0021	0.0003	0.0049	0.0049	0.480
Cu	0.0029	0.0002	0.0018	0.0004	0.0016	0.0001	0.0019	0.0003	0.797
Zn	0.0141	0.0036	0.0152	0.0078	0.0161	0.0060	0.0183	0.0258	0.726
Zr	0.0010	0.0005	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	-	-	0.448
Mo	-	-	-	-	-	-	0.0013	0.0013	-
Ag	0.0156	0.0020	0.0144	0.0015	0.0145	0.0020	0.0146	0.0014	0.433
Cd	0.0199	0.0028	0.0182	0.0029	0.0188	0.0027	0.0194	0.0018	0.105
Sn	0.0224	0.0039	0.0219	0.0026	0.0217	0.0034	0.0222	0.0018	0.530
Sb	0.0305	0.0050	0.0284	0.0045	0.0292	0.0048	0.0302	0.0028	0.278
Pb	0.0014	0.0003	0.0010	0.0002	0.0017	0.0015	0.0006	0.0006	0.593
LE	75.8011 ^a	5.1106	79.4263 ^b	4.5648	77.6448 ^{a,b}	5.0267	78.5904 ^b	3.7201	0.032*
Ca/P	3.8482	1.0372	4.3407	1.0141	3.8556	1.0669	3.7900	0.8215	0.150

เปรียบเทียบความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบใน 4 ทิศทาง บนกระดูกต้นขาหลัง ด้วย one-way ANOVA - Duncan ที่ p value < 0.05

a และ b ใช้เพื่อระบุค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดูกแต่ละตำแหน่งในธาตุชนิดเดียวกัน

Mg Magnesium, Al Aluminium, Si Silicon, P Phosphorus, S Sulphur, Cl Chlorine, K Potassium, Ca Calcium, Ti Titanium, V Vanadium, Cr Chromium, Mn Manganese, Fe Iron, Ni Nickel, Cu Copper, Zn Zinc, Zr Zirconium, Mo Molybdenum Ag Silver, Cd Cadmium, Sn Stannum, Sb Antimony, W Tungsten, Pb Lead, LE; Light Element.

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)

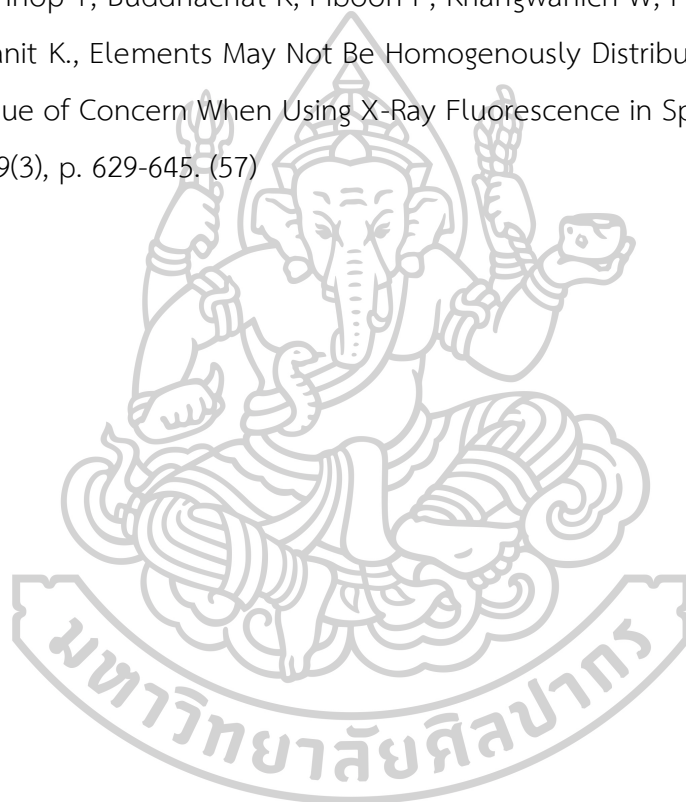


ตารางที่ 4.11 การจำแนกพื้นที่แต่ละแห่งโดยใช้การวิเคราะห์ผลการศึกษาด้วยวิธี Stepwise discriminant - Wilks' Lamda (F-level 2.71 และ 3.84) ซึ่งแบ่งตามพื้นที่ต่าง ๆ บนกระดูกต้นขาหลัง

Comparisons between six locations in femur						
Position	Predicted group membership					
	CD	CE	SM	SD	SFT	SFH
CD	94.4	2.8	2.8	0.0	0.0	0.0
CE	5.6	94.4	0.0	0.0	0.0	0.0
SM	5.0	0.0	85.0	0.0	10.0	0.0
SD	1.8	0.0	3.6	14.5	76.4	3.6
SFT	0.0	0.0	0.0	3.3	93.3	3.3
SFH	0.0	0.0	0.0	0.0	16.7	83.3
77.9% of original grouped cases correctly classified						
Comparisons between three parts of femoral diaphysis						
%	Proximal	Middle	Distal			
Proximal	42.9	20.0	37.1			
Middle	16.7	80.6	2.8			
Distal	19.4	13.9	66.7			
63.6% of original grouped cases correctly classified						
Comparisons between four directions of femoral diaphysis						
%	Cranial	Caudal	Median	Lateral		
Cranial	81.5	7.4	11.1	0.0		
Caudal	33.3	48.1	18.5	0.0		
Median	63.0	18.5	18.5	0.0		
Lateral	59.3	29.6	11.1	0.0		
37.0% of original grouped cases correctly classified						

กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง diaphysis (Compact bone at diaphysis; CD), กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง epiphysis (Compact bone at epiphysis; CE), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง metaphysis (Spongy bone at metaphysis; SM), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง diaphysis (Spongy bone at diaphysis; SD), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง femoral trochlea (Spongy bone at femoral trochlea; FT), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง metaphysis (spongy bone at metaphysis; SFH)

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)



ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรจำแนกในสมการจำแนกกลุ่ม (Canonical discriminant function coefficients)

6 locations in femur			3 parts of femoral diaphysis			4 directions of femoral diaphysis		
	Function			Function			Function	
	1	2		1	2		1	2
Si	2.981	1.718	Si	4.985	4.333	S	4.685	-
S	2.540	3.947	Ca	0.422	-0.078	(Constant)	-2.038	-
K	-0.654	-0.181	Cd	-	-			
				658.255	429.459			
Ti	16.419	8.129	Sn	326.654	481.322			
Zr	-	-	(Constant)	-2.092	-1.873			
	734.923	625.855						
Ag	238.069	-65.875						
LE	-0.76	-0.007						
(Constant)	3.021	-0.972						

Si Silicon, S Sulphur, K Potassium, Ca Calcium, Ti Titanium, Zr Zirconium, Ag Silver, Cd Cadmium, Sn Stannum, LE; Light Element.

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)

ตารางที่ 4.13 ค่ากลางกลุ่ม (Functions at group centroids)

6 locations in femur			3 parts of femoral diaphysis			4 directions of femoral diaphysis		
	Function			Function			Function	
	1	2		1	2		1	2
CD	2.603	-0.188	Proximal	-0.230	0.218	Cranial	-0.498	-
CE	-0.823	3.189	Middle	1.166	-0.072	Caudal	0.611	-
SM	0.903	-1.563	Distal	-0.943	-0.141	Median	-0.136	-
SD	-2.812	-0.947				Lateral	0.023	-
SFT	-3.005	-0.873						
SFH	2.603	-0.188						

กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง diaphysis (Compact bone at diaphysis; CD), กระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่ง epiphysis (Compact bone at epiphysis; CE), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง metaphysis (Spongy bone at metaphysis; SM), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง diaphysis (Spongy bone at diaphysis; SD), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง femoral trochlea (Spongy bone at femoral trochlea; FT), กระดูกโปร่งที่ตำแหน่ง metaphysis (spongy bone at metaphysis; SFH)

หมายเหตุ : ตารางนี้เป็นส่วนหนึ่งจากบทความงานวิจัยของข้าพเจ้า ที่ตีพิมพ์ในวารสาร CMU J. Nat. Sci., Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, and Nganvongpanit K., Elements May Not Be Homogeneously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification., 2020, Vol. 19(3), p. 629-645. (57)

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มีขึ้นเพื่อทำการศึกษาวิจัยถึงประสิทธิภาพของเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ อย่างเช่นเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ทั้งแบบประเภทตั้งโต๊ะ และแบบพกพา ว่าเครื่องมือทั้งสองประเภทนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่ออำนวยความสะดวกในงานตรวจสถานที่เกิดเหตุ เพื่อการตรวจคัดกรองวัตถุพยานในเบื้องต้น และนอกจากนี้ ยังมีขึ้นเพื่อหาความแตกต่างของสัดส่วนธาตุชนิดต่าง ๆ ที่อาจพบบนตัวอย่างกระดูกมนุษย์ และสัตว์ชนิดอื่น ๆ เพื่อการจัดจำแนก รวมถึงการศึกษาเปรียบเทียบการกระจายตัวของธาตุชนิดต่าง ๆ บนกระดูกชนิดขึ้นเดียวกัน ว่ามีลักษณะ หรือรูปแบบการกระจายตัวที่เหมือน หรือแตกต่างกันหรือไม่ โดยที่มีความมุ่งหวังเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์

5.1 อภิปรายผลการศึกษาความแตกต่างของสัดส่วนปริมาณธาตุที่วัดได้ในกระดูกเนื้อแน่นของมนุษย์และสัตว์

จากผลการศึกษาวิจัยก่อนหน้า มีการแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา พบว่ามีบางหัวข้อที่ถูกกล่าวถึง และกล่าวถึงความจำเป็นที่จะต้องใช้ความระมัดระวัง ในการคัดเลือกวิธีการที่จะนำมาใช้ในการระบุอัตลักษณ์ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดในการศึกษาวิจัยงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์ สิ่งแรกที่เป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมาก คือ จำนวนของตำแหน่งที่นำมาใช้ในการระบุเพื่อทำการตรวจวัด โดยจำเป็นที่จะต้องให้ทุกตำแหน่งที่ระบุ สามารถครอบคลุมตัวอย่างกระดูกทั้งชิ้นได้ในแต่ละชิ้นที่ใช้ในการศึกษาทดลองได้ และนอกจากนี้ยังเพื่อนำไปใช้ในการสร้างรูปแบบสมการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำกลับมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากผลการศึกษาทดลอง และนำไปใช้ในการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันได้อย่างถูกต้องแม่นยำ (46, 47, 55) ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับสอง ได้แก่ รูปแบบการกระจายตัวของธาตุแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่พบในกระดูก ซึ่งลักษณะ และรูปแบบของการกระจายตัวของธาตุแต่ละธาตุที่พบบนตัวอย่างกระดูกนี้เอง ที่สามารถนำมาเป็นส่วนหนึ่งของการจัดจำแนกตัวอย่างของกระดูกสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันได้ ด้วยการประมาณค่า และเปรียบเทียบค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในสัดส่วนที่แตกต่างกันของธาตุที่พบบนกระดูกของสัตว์แต่ละชนิด (42) ในส่วนการศึกษานี้มีการศึกษาถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าพลังงานในธาตุแต่ละธาตุที่พบในตัวอย่างกระดูก พบว่าความแตกต่างของค่าพลังงานที่แตกต่างกันในทั้งสองกลุ่ม ไม่ว่าจะอยู่ในกลุ่มที่มีค่าพลังงาน 15 kV หรือ 50 kV เมื่อทำการตรวจวัดโดยผ่านเครื่อง EDXRF ล้วนส่งผลต่อ

ค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์ออกจากกัน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในการศึกษาที่กลุ่มตัวอย่างกระดูกที่มาจากคนละตำแหน่ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการทดลองต่างกัน สามารถส่งผลถึงค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันได้อย่างชัดเจน โดยในกลุ่มตัวอย่างของกระดูกข้อมือ (carpus bones) ที่ค่าพลังงาน 15 kV สามารถแสดงค่าความแม่นยำสูงสุดในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์ออกจากกันได้อยู่ที่ร้อยละ 94.1 ขณะที่ในกลุ่มของกระดูกข้อเท้า (tarsus bones) ที่ค่าพลังงาน 50 kV ค่าความแม่นยำสูงสุดในการจัดจำแนกชนิดของกระดูกสัตว์ออกจากกันได้อยู่ที่ร้อยละ 63.7 จากผลการศึกษาดังกล่าว จัดได้ว่าเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญในการนำเอาวิธี XRF มาประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ เพื่อการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกัน การนำเอาชุดข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองของทั้งสองกลุ่มค่าพลังงาน (15 kV และ 50 kV) ทั้งจากกลุ่มตัวอย่างกระดูกข้อมือ และกลุ่มกระดูกข้อเท้า มาประมวลผลร่วมกันโดยวิธีการทางสถิติ พบว่ามีความสามารถในการจัดจำแนกชนิดของตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยที่ค่าความถูกต้องแม่นยำอยู่ที่ ร้อยละ 89.7 ในกลุ่มตัวอย่างกระดูกข้อมือ และร้อยละ 90.7 ในกลุ่มตัวอย่างกระดูกข้อเท้า แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างสองกลุ่มค่าพลังงานของตัวอย่างกระดูกในกลุ่มกระดูกข้อมือ มาทำการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำจะพบว่า การใช้ชุดข้อมูลของค่าพลังงานทั้งสองกลุ่มมาวิเคราะห์ผลร่วมกัน ส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกของกลุ่มตัวอย่างกระดูกข้อมือมีประสิทธิภาพที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากค่าพลังงาน 15 kV อย่างเดียว แต่หากเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกลุ่มค่าพลังงาน 50 kV (ร้อยละ 63.7) นั้น จะพบว่ามีค่าความแม่นยำที่มากกว่า ขณะที่ในกลุ่มของกระดูกข้อเท้านั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติแล้วนั้นจะพบว่า ค่าความแม่นยำที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ชุดข้อมูลร่วมระหว่างสองกลุ่มค่าพลังงาน (ร้อยละ 90.7) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ค่าพลังงาน 15 kV โดยมีค่าความแม่นยำเพียงร้อยละ 69.4 และที่กลุ่มค่าพลังงาน 50 kV ที่มีค่าความแม่นยำร้อยละ 77.3 เมื่อเปรียบเทียบอัตราความถูกต้องแม่นยำระหว่างตัวอย่างกระดูกในกลุ่มกระดูกข้อมือ และกลุ่มกระดูกข้อเท้าจะพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติไม่ว่าจะเป็นในกลุ่มของชุดการทดลองที่ค่าพลังงาน 15 kV หรือที่ค่าพลังงาน 50 kV ก็ตามโดยที่ความแตกต่างนี้อาจเป็นผลพวงมาจากลักษณะการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ที่พบในเนื้อเยื่อกระดูก ซึ่งแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของกระดูกในร่างกาย ซึ่งสอดคล้องกันกับงานศึกษาวิจัยของ Nganvonpanit และคณะ (2016) ศึกษาพบว่ากระดูกจำนวน 48 ชิ้น ในร่างกายของสุนัขนั้น กระดูกแต่ละชิ้นแสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน อีกทั้งในกระดูกแต่ละชิ้นยังมีธาตุ และปริมาณธาตุที่พบแต่ละชนิดที่แตกต่างกันอีกด้วย (42) แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในกระดูกทุกชิ้นในร่างกายของสุนัข ซึ่งได้แก่ แคลเซียม (Ca) ฟอสฟอรัส

(P) เหล็ก (Fe) และ ซัลเฟอร์ (S) และนอกเหนือจากนี้ยังพบ ตะกั่ว (Pb) ซึ่งเป็นธาตุที่จัดอยู่ในกลุ่มของ โลหะหนัก ทั้งยังเป็นหนึ่งในธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่ตรวจพบได้ในตัวอย่างกระดูกของสัตว์ทุกชนิด โดยที่เชื่อว่า ตะกั่ว นั้นเป็นธาตุในกลุ่มโลหะหนัก ที่มีการสะสมภายในร่างกายของสัตว์ส่วนใหญ่เป็นหลัก (41) รวมทั้งสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมที่อาศัยอยู่ในทะเล (47) สาเหตุอาจเกิดจากการที่ตะกั่ว ได้มีการปนเปื้อนลงไปในระบบนิเวศ และสภาพแวดล้อมโดยรอบที่สัตว์ต่าง ๆ รวมถึงมนุษย์อาศัยอยู่ (59) และยังรวมไปถึงการปล่อย และกำจัดของเสีย จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่ได้ประสิทธิภาพ (60) ที่เกิดขึ้นจากทั่วโลก

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การนำเอาชุดข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้ มาทำการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกันพบว่า การใช้ข้อมูลจากกลุ่มค่าพลังงานเพียงกลุ่มเดียว อาจ ส่งผลทำให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเกิดความผิดพลาดในแง่ของการทำนายอัตราความแม่นยำของการ จัดจำแนกชนิดตัวอย่างของกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกัน หรืออาจทำให้ได้ผลการศึกษาที่ไม่ ดีเท่าที่ควร ในการศึกษาทดลอง จึงควรใช้ค่าพลังงานในการศึกษาที่ระดับค่าพลังงานที่แตกต่างกัน อย่างน้อยจำนวนสองกลุ่มค่าพลังงาน ซึ่งหากแบ่งเป็นสองกลุ่มค่าพลังงาน เช่น ในกลุ่มค่าพลังงานสูง กับค่าพลังงานต่ำ ย่อมให้ผลการศึกษามีคุณภาพ และให้ค่าความแม่นยำที่ดีกว่า ในการศึกษาก่อน หน้านี้ (46, 47) ได้ทำการศึกษารูปแบบการจัดจำแนกตัวอย่างของกระดูกในสัตว์แต่ละชนิดออกจากกัน ด้วย การใช้วิธี XRF และใช้เครื่อง XRF แบบมือถือ (HHXRF) โดยในการศึกษาได้มีการแบ่งการเก็บข้อมูล เป็นสองชุดข้อมูลที่ต่างกัน โดยใช้ค่าพลังงานที่ต่างกัน คือ 15 และ 40 kV เป็นตัวแบ่งกลุ่ม โดยที่สอง กลุ่มค่าพลังงาน จะใช้เวลาในการศึกษาตัวอย่างแต่ละชิ้นที่เวลาต่างกันสองช่วงเวลา คือ กลุ่ม 1 นาที และกลุ่ม 2 นาที ซึ่งการศึกษาดังกล่าวนั้นสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยนี้ โดยพบว่า หากมีการใช้ค่า พลังงานที่ต่างกันในกลุ่มของค่าพลังงานสูง และค่าพลังงานต่ำ จะทำให้ประสิทธิภาพในการจัดจำแนก ตัวอย่างกระดูกของสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันได้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เนื่องจาก ธาตุที่เป็น องค์ประกอบบางตัวไม่สามารถตรวจจับได้ที่ค่าพลังงานสูง หรือต่ำ ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ค่า พลังงานเดียวในการศึกษา นอกจากนี้ในการศึกษายังพบว่า การวิเคราะห์ผลการศึกษาจากการใช้ชุด ข้อมูลที่มาจากค่าพลังงานสองกลุ่ม จะทำให้การวิเคราะห์หาอัตราความแม่นยำในการจัดจำแนกมี ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยอาจมีค่าความแม่นยำที่สูงถึงร้อยละ 100 ทั้งในกลุ่มของตัวอย่างกระดูก ข้อมือ และกระดูกข้อเท้า โดยพบว่ามีสัตว์จำนวนทั้งสิ้น 7 ชนิด ที่มีค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกที่ ร้อยละ 100 จากทั้งหมด 16 ชนิด และ 11 ชนิด ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงพบว่าในบางกลุ่ม ตัวอย่างกระดูก การใช้ผลการทดลองจากกลุ่มค่าพลังงานเดียว อาจให้ผลการทำนายค่าความแม่นยำที่ มากกว่าการใช้ชุดข้อมูลสองกลุ่มมาทำการวิเคราะห์ เช่นในกลุ่มตัวอย่างกระดูกข้อมือ ที่ค่าพลังงาน 15 kV พบว่า มีค่าความแม่นยำในการจัดจำแนกตัวอย่างกระดูกสัตว์แต่ละชนิดออกจากกันได้มากถึง

11 จาก 16 ชนิด ขณะที่ในกลุ่มของกระดูกข้อมือที่ค่าพลังงาน 50 kV และกลุ่มกระดูกข้อเท้าที่ค่าพลังงาน 15 และ 50 kV มีอัตราการทำนายความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของสัตว์ออกจากกันค่อนข้างต่ำ

ในด้านข้อจำกัดของการศึกษาวิจัยนี้จะขึ้นกับความสามารถในการตรวจจับธาตุชนิดต่าง ๆ ของ เครื่อง XRF โดยที่เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถตรวจวัดธาตุได้ตั้งแต่ธาตุที่มีเลขอะตอมระหว่าง 13 (Al) ไปจนถึง 92 (U) และสามารถตรวจวัดได้แค่เพียงบริเวณพื้นผิวของกระดูกเท่านั้น ไม่สามารถทะลุผ่านไปถึงโครงสร้างด้านในได้ ในการที่จะปรับปรุง หรือแก้ไขข้อจำกัดนี้อาจจำเป็นต้องมองไปถึงการจัดหาเครื่องมือที่มีความสามารถในการตรวจวัดช่วงของธาตุที่มีเลขอะตอมที่กว้างขึ้น คือตั้งแต่ 9 (F) ไปจนถึง 92 (U) และนอกจากนี้ยังต้องมีความสามารถในการประมวล และแสดงผลการตรวจวัดธาตุแต่ละชนิด รวมไปถึงปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่ตรวจพบได้นอกจากนี้ ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการพัฒนาเครื่องมือควรจะเป็นไปในทางการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูลของ XRF ในปัจจุบันไม่ได้วิเคราะห์โดยคำนึงถึงปัจจัยหลักของน้ำหนัก หรือปริมาณของธาตุ จึงทำให้เกิดปัญหาความคลาดเคลื่อนในการเปรียบเทียบข้อมูลกับการศึกษาวิจัยอื่น ๆ และสามารถทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาได้เพียงในรูปแบบของร้อยละของธาตุแต่ละชนิดเท่านั้น ขณะที่การเปรียบเทียบที่ควรจะนำมาใช้เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่าง หรือความสอดคล้องกันของผลการศึกษาวิจัยอย่างในรูปแบบการเปรียบเทียบเชิงปริมาณของธาตุที่พบในตัวอย่างกระดูก หรือฟัน ของสัตว์แต่ละชนิด จึงไม่สามารถทำได้ แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตามวิธีการ XRF นั้น ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ควรนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์เป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเมื่อมีความจำเป็นต้องใช้เพื่อการตรวจสอบในเบื้องต้น เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่าง หรือชิ้นส่วนหลักฐาน และนอกจากนี้ยังช่วยให้ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบหลักฐาน หรือวัตถุพยานในเบื้องต้นได้อีกด้วย

5.2 อภิปรายผลการศึกษาการกระจายตัวของธาตุในกระดูกยาวในสุกร

จากการศึกษาก่อนหน้าได้มีการนำเสนอรูปแบบของสัดส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่พบในกระดูก โดยได้จากการศึกษาโดยใช้เครื่อง HHXRF ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจัดจำแนกกระดูกของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (41, 46, 47, 48, 49, 54, 55) ขณะที่อัตราความแม่นยำ และประสิทธิภาพในการทำนายที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูง ได้รับการยอมรับด้วยวิธีการศึกษาที่ใช้อยู่ในขณะนี้ แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตาม ยังคงมีการพบปัญหา และรวมไปถึงข้อจำกัดอีกหลายอย่างที่ตามมา เมื่อมีการเลือกใช้วิธีดังกล่าวในการศึกษา มีการตั้งสมมติฐาน

ไว้เบื้องต้นว่า ลักษณะของการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่พบในตัวอย่างกระดูกนั้นอาจมีความแตกต่างกัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการการศึกษาเพื่อพิสูจน์สมมติฐานนั้น และจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ลักษณะการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่พบในกระดูกนั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน โดยพบได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกระดูกเนื้อแน่น และกระดูกพรุน อย่างไรก็ตาม ลักษณะ และรูปแบบการกระจายตัวของสัดส่วนปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในกระดูกเนื้อแน่น และกระดูกพรุนจะมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในกระดูกชิ้นเดียวกัน

การพบธาตุอีกสามชนิดนอกเหนือจากธาตุชนิดอื่นที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ Mg, Ni และ Mo ในกระดูกเนื้อแน่น โดยเฉพาะแมกนีเซียม (Mg) ที่จัดได้ว่าเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของร่างกาย ถูกพบมากถึงร้อยละ 60 ในกระดูก ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาผลาญแร่ธาตุในร่างกายโดยอาศัยการดูดซึมผ่านกระบวนการเผาผลาญ ATP และยังทำหน้าที่เป็นตัวจับของเอนไซม์อีกหลายชนิด (61) ขณะที่นิเกิล (Ni) เอง จัดเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบสำคัญชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของ ultra-trace nutrient ที่มีความสำคัญในการทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเผาผลาญไขมัน และการเพิ่มขึ้นของกระบวนการหลังฮอร์โมน (62) ในส่วนของโมลิบดีนัม (Mo) เป็นธาตุที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม essential trace element ซึ่งเป็นธาตุที่มีความสำคัญ และจำเป็นสำหรับเอนไซม์อีกหลายชนิด (62) แม้ว่าธาตุทั้งสามที่ถูกพบนั้น จะมีความสำคัญ และความจำเป็นที่โดดเด่นมากแค่ไหน แต่กลับถูกพบในปริมาณที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักตัวอื่น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะพบการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของธาตุเหล่านี้ในกระดูก ธาตุที่องค์ประกอบสำคัญที่ถูกพบในกระดูกแทบทุกชนิดนั้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และนอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนของแคลเซียม (Ca) ต่อฟอสฟอรัส (P) ที่ส่วน middle ของตำแหน่ง diaphysis มีอัตราส่วนที่ค่อนข้างต่ำกว่าส่วน proximal และ distal อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเพิ่มปริมาณแคลเซียม (Ca) ในเนื้อเยื่อกระดูกส่งผลให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความเครียดมีการลดลง (63) และมีความเป็นไปได้ว่าเนื่องจากค่าความเค้นของกระดูกที่ส่วน middle ของตำแหน่งไดอะไฟซิสอาจมีค่าต่ำกว่าที่ส่วน proximal และ distal แต่ไม่ว่าอย่างไรก็ตามเพื่อตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าว จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความแข็งแรงของกระดูกที่ตำแหน่ง diaphysis ในการศึกษาก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ทำโดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของกระดูก ระหว่างส่วน distal ของกระดูกยาว (diaphysis และ epiphysis) หรือระหว่างกระดูกเนื้อแน่นกับกระดูกพรุน (64, 65) ผลการศึกษาวิจัยที่ได้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นไปตามการศึกษาก่อนหน้า โดยพบว่าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียม กับฟอสฟอรัส ของกระดูกพรุน มีต่ำกว่ากระดูกเนื้อแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นตัวบ่งชี้ว่า กระดูกพรุนนั้นมีความแข็งแรงน้อยกว่ากระดูกเนื้อแน่นอย่างเห็นได้ชัด

การใช้ cluster heat map เป็นตัวช่วยในการแสดงผลการศึกษาทดลองนั้น ช่วยทำให้มองเห็นภาพความเหมือน หรือความคล้ายคลึงกันของลักษณะการกระจายตัวของธาตุที่พบในแต่ละส่วน หรือตำแหน่ง บนตัวอย่างกระดูกในรูปแบบที่แตกต่างกัน และในการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่าสามส่วนที่ทำการศึกษาทดลอง ซึ่งได้แก่ ส่วน proximal, middle และ distal นั้น พบว่าที่ส่วน proximal และ distal ของตำแหน่ง diaphysis แสดงสัดส่วนปริมาณธาตุที่พบในระดับใกล้เคียงกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณวิทยาของกระดูกนั้น อาจมีผลต่อการสะสมธาตุ ขณะที่ส่วน middle ของกระดูกโคนขา หรือที่ mid sharp นั้น ได้รับการยืนยันจากผลการศึกษาทดลองว่า ทั้งสองส่วนนั้นเป็นส่วนที่เล็ก และแคบที่สุด ขณะที่ส่วน proximal และ distal ของกระดูกที่ตำแหน่ง diaphysis นั้น มีขนาดใกล้เคียงกัน อีกทั้งรวมไปถึง เมื่อเปรียบเทียบกับส่วน middle แล้ว ทั้งสองส่วนยังมีขนาดที่ใหญ่กว่าอีกด้วย การค้นพบนี้เป็นไปตามผลการศึกษาทดลอง โดยการจัดแบ่งกลุ่มเป็นไปตามการพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญแต่ละชนิดที่มีความคล้ายคลึงกันในแต่ละตำแหน่ง เช่น ที่ตำแหน่ง cranial กับ median และที่ ตำแหน่ง caudal กับ lateral ซึ่งผลการศึกษาทดลองนี้อาจมีผลสอดคล้องกับลักษณะทางกายวิภาคในท่ายืน และเดินของสัตว์สี่เท้า เช่น สุนัข เป็นต้น โดยที่น้ำหนักของร่างกายของสัตว์ในกลุ่มนี้ จะตกลงสู่ด้านล่างตามกฎของแรงโน้มถ่วง โดยน้ำหนักจะถูกทิ้งลงไปตามส่วนของขาคู่หลังก่อน จากนั้นจึงถูกถ่ายโอนมาที่บริเวณขาคู่หน้า (66, 67) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าปริมาณธาตุที่มีการสะสม และกระจายตัวอยู่ในตำแหน่ง cranial กับ median ของกระดูกโคนขาจึงมีปริมาณ และการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน ขณะที่ในอีก 6 ตำแหน่งของผลการศึกษาทดลองของกระดูกพรุนนั้น แสดงให้เห็นว่าในแต่ละส่วนนั้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยอาจเป็นผลมาจากลักษณะทางกายวิภาคของกระดูกก็เป็นได้ เนื่องจากเพราะชิ้นส่วนตัวอย่างกระดูกเหล่านี้ล้วนมีกระดูกอ่อนเป็นส่วนประกอบ (68) โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่พบ จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในกระดูกประเภทต่าง ๆ ได้แก่ กระดูก กระดูกอ่อน และกระดูกเซซามอยด์ (sesamoid bone) (42) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาทดลองในส่วนของการจัดจำแนกตำแหน่งของกระดูกแต่ละตำแหน่งผ่านวิธีการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติแบบ PCA โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนในส่วนของรายละเอียดของปริมาณธาตุที่พบในกระดูกเนื้อแน่น กับกระดูกพรุน และเมื่อทำการจัดจำแนกลักษณะปริมาณการพบธาตุแต่ละชนิดในกระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่งต่างกัน พบว่าในกระดูกเนื้อแน่นที่ตำแหน่งต่างกัน การพบธาตุแต่ละชนิดนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ยังพบอีกว่า ในตัวอย่างกระดุกสุนัขทั้ง 48 ชิ้น นั้น แสดงความแตกต่างของธาตุที่มี และปริมาณธาตุที่ตรวจพบ (42)



5.3 สรุปผลการศึกษาทดลอง

การศึกษานี้ได้กล่าวถึงช่องว่างความรู้ความสำคัญ ตลอดจนความเข้าใจในการนำเอาเทคนิคและอุปกรณ์ทางฟิสิกส์ อย่างเครื่องมือและวิธีการ XRF มาประยุกต์ใช้ในงานทางนิติวิทยาศาสตร์ สำหรับการจัดจำแนกชนิดของตัวอย่างกระดูกสัตว์ออกจากกัน และจากผลการศึกษาทดลองนี้ ทำให้ทราบว่าในตัวอย่างกระดูกแต่ละชิ้นที่มาจากสัตว์ชนิดเดียวกัน จะมีองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง ดังนั้นผลลัพธ์นี้จึงส่งผลให้มีอัตราการจัดจำแนกประเภทที่ค่อนข้างต่ำหรือเป็นไปได้ในทางลบ จึงทำให้สรุปได้ว่าการกระจายตัวของธาตุแต่ละชนิดที่พบในตัวอย่างกระดูกแต่ละชิ้นอาจไม่มีผลต่อการจัดจำแนกเมื่อพิจารณาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่พบด้วยเทคนิค XRF และนอกจากนี้ยังพบอีกว่าอัตราความแม่นยำในการจัดจำแนกชนิดของตัวอย่างกระดูกสัตว์ในแต่ละกลุ่มออกจากกันนั้น มีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสำคัญคือการเลือกใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อการตรวจวัด และการพบธาตุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบของกระดูก เนื่องจากธาตุบางชนิดสามารถตรวจพบได้เมื่อใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่ำ แต่ขณะที่อีกหลายชนิดมักถูกตรวจพบโดยการใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าสูง เพื่อให้ได้ความแม่นยำในการจัดจำแนกที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงควรเลือกใช้ค่าพลังงานในการศึกษาทดลอง 2 กลุ่ม เป็นอย่างน้อย

ในส่วนของการจะนำผลจากการศึกษาวิจัยไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านกระบวนการยุติธรรม เช่นการนำไปใช้ในงานตรวจสถานที่เกิดเหตุ หรือเพื่อการตรวจคัดกรองเบื้องต้นนั้น ยังคงต้องอาศัยการศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติม เนื่องจากงานในด้านกระบวนการยุติธรรมนั้น จำเป็นต้องอาศัยความถูกต้องแม่นยำเป็นอย่างมาก เพราะในการตรวจพิสูจน์หลักฐาน และวัตถุพยานทุกชิ้นส่งผลต่อตัวผู้เสียหาย ผู้กระทำผิด และคำตัดสินในชั้นศาลเสมอ ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านกระบวนการยุติธรรม โดยเฉพาะงานตรวจสถานที่เกิดเหตุได้ในอนาคต จึงควรต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้ได้วิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดต่อไป

รายการอ้างอิง

1. sanook.com. คนงานก่อสร้างพบชิ้นส่วนกระดูกโอบกปูนในตึกย่านรามคำแหง 2560 [Available from: <http://www.sanook.com/news/3795458/>].
2. สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (Nuclear Society of Thailand). การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X Ray Fluorescence Spectroscopy) ” บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (Nuclear Society of Thailand Articles) [Available from: <https://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm>].
3. Langford A., Dean J., Reed R., Holmes D., Weyers J. and Jones A. Practical Skills in Forensic Science: First published, Ashford Colour Press Ltd, Gosport; 2005. 133 p.
4. ร้อยตำรวจโทมนตรี ดอนฟุ้งไพร และคณะสถาบันนิติวิทยาศาสตร์. การพัฒนามาตรฐานวิธีการตรวจพิสูจน์หาระยะยิง และรอยกระสุนปืนแบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) และ FT-IR Spectroscopy [Available from: <http://www.ncjad.go.th/index.php/files/download/0a70fcd5ac17d56>].
5. สัมพันธ์ วงศ์นาวา. เอกซเรย์ฟลูออ เรสเซนซ์ สเปกโตรเมตรีแบบกระจายพลังงาน. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
6. Wikipedia. Monochromatic wavelength dispersive x-ray fluorescence [Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Monochromatic_wavelength_dispersive_x-ray_fluorescence].
7. Eduardo S. R., Marcos H. F. G., Nádia M. D., João G. B. C., Tatiana N. M. da Cruz¹, Analder Sant’A. N., Susilaine M. S., Eduardo de A., and Hudson W. P. C. Laboratory Microprobe X-Ray Fluorescence in Plant Science: Emerging Applications and Case Studies. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1588.
8. Imaizumi K., Saitoh K., Sekiguchi K., and Yoshino M. Identification of fragmented bones based on anthropological and DNA analyses: case report. *Legal Med*. 2002;4:251-6.
9. Owsley D.W., Mires A.M., and Keith M.S. Case involving differentiation of deer and human bone fragments. *J Forensic Sci*. 1985;30:572-8.

10. William D. H., David G. R., and Donald T. R. Recovery of Decomposed and Skeleton Human Remains in the “Green River Murder” Investigation. *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*. 1990;11(1):35-43.
11. Roger W. B. and Mike M. The remain at Lethbridge’s Pocket – The case against the Kennift brothers. *Forensic Science, Medicine and Pathology*. 2018;14:568-73.
12. Bass WM. *Human osteology; A laboratory and field manual*. 3rd ed ed. Columbia: Missouri Archa-eological Society; 1983.
13. McLain R. F., Yerby S. A., and Moseley T. A. Comparative morphometry of L4 vertebrae: Comparison of large animal models for the human lumbar spine. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002(27):E200-6.
14. Almécija S. TM, Alba, D. M., Pina M., Moyà-Solà S., Jungers W. L. The femur of *Orrorin tugenensis* exhibits morphometric affinities with both Miocene apes and later hominins. *Nature Communications*. 2013;4(1):2888.
15. Saulsman B., Oxnard CE., and Franklin D. Long bone morphometrics for human from non-human discrimination. *Forensic Sci Int*. 2010;202:e1–e5.
16. Phatsara M., Nganvongpanit K., and Mahakkanukrauh P. Comparative morphometric study for dis-tinguishing between human and non-human mammalian (cow, dog, horse, monkey and pig) long bones. *Chiang Mai Vet J*. 2016;14:23-38.
17. Pitakarnnop T. PP, Nganvongpanit K. The classification of human and animal bones for forensic osteology aspect. *Chiang Mai Medical Journal*. 2020;59(4):241-52.
18. ผาสุก มหรรฆานุเคราะห์ บ. กายวิภาคศาสตร์และนิติมานุษยวิทยาของกระดูกมนุษย์ = Anatomy and forensic anthropology of the human bone. เชียงใหม่: ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2556.
19. กรรกฎ งานวงศ์พานิชย์. ตำราวิทยากระดูกทางสัตวแพทย์. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed: สำนักพิมพ์ สยามพิมพ์นานาชาติ; 2557. 252 p.
20. Crescimanno A, Stout SD. Differentiating fragmented human and nonhuman long bone using osteon circularity. *J Forensic Sci*. 2012;57(2):287-94.
21. Hillier, ML. and Bell LS. Differentiating human bone from animal bone: a review of histological methods. *J Forensic Sci*. 2007;2:49-63.
22. Robling A.G and D. S.S. Morphology of the drifting osteon. *Cells Tissues Organs*. 1999;164:192-204.

23. Jowsey J. Studies of Haversian systems in man and some animals. *J Anat.* 1966;100(Pt 4):857-64.
24. Havill LM. Osteon remodeling dynamics in *Macaca mulatta*: normal variation with regard to age, sex, and skeletal maturity. *Calcif Tissue Int.* 2004;74:95-102.
25. Manilay Z., Novitskaya E., Sadovnikov E., and Mc Kittrick J. A comparative study of young and mature bovine cortical bone. *Acta Biomater.* 2013;9:5280-8.
26. Nganvongpanit K., Pradit W., Pitakarnnop T., Phatsara M., and Chomdej S. Differences in osteon structure histomorphometry between puppy-hood and adult stages in the Golden Retriever. *Anat Sci Int.* 2017;92:483-92.
27. Martiniakova M., Omelka R., Chrenek P., Vondráková M., and Bauerová M. Age-related changes in histological structure of the femur in juvenile and adult rabbits: a pilot study. *Bull Vet Inst Pulawy.* 2005;227-30.
28. Horni H. The forensic application of comparative mammalian bone histology. Texas: Tech University; 2002.
29. Nganvongpanit K., Phatsara M., Settakorn J., and Mahakkanukrauh P. Differences in compact bone tissue microscopic structure between adult humans (*Homo sapiens*) and Assam macaques (*Macaca assamensis*). *Forensic Science International.* 2015;254(243.e1-243.e5).
30. Nganvongpanit K., Siengdee P., Buddhachat K., Brown JL., Klinhom S., Pitakarnnop T., Angkawanish T., and Thitaram C. Anatomy, histology and elemental profile of long bones and ribs of the Asian elephant (*Elephas maximus*). *Anat Sci Int.* 2017;92(4):554-68.
31. Cummaudo M. CA, Giacomini F., Raffone C., Márquez-Grant N., Cattaneo C. Histomorphometric analysis of osteocyte lacunae in human and pig: exploring its potential for species discrimination. *Int J Legal Med.* 2019;133(3):711-8.
32. Dominguez VM, Crowder CM. The utility of osteon shape and circularity for differentiating human and non-human Haversian bone. *Am J Phys Anthropol.* 2012;149(1):84-91.
33. Morales J.P., Ignacio R.H., Daniela Z., and Ivan S.H. Determination of the species from skeletal remains through histomorphometric evaluation and discriminant analysis. *Int J Morphol.* 2012;30:1035-41.

34. Mulhern D.M. and Ubelaker D.H. Differences in osteon banding between human and nonhuman bone. *J Forensic Sci.* 2001;46:220-2.
35. Rafael F.C., Douglas H.U., José A.L.A., Rafael JEdR., and Inmaculada G.G. Effect of temperature on bone tissue: histological changes. *Forensic Sci Int.* 2013;58:578-82.
36. Mariaeeresa AT. Frozen human bone: a micro→scopic investigation. *J Forensic Sci.* 2007;2:6-20.
37. Moretti TR, Budowle B, Buckleton JS. Erratum. *Journal of Forensic Sciences.* 2015;60(4):1114-6.
38. Hares DR. Selection and implementation of expanded CODIS core loci in the United States. *Forensic Science International: Genetics.* 2015;17:33-4.
39. Thorsten S., Anke H., Andrea P-P., and Nicole von W-S. Reliable genetic identification of burnt human remains. *Forensic Science International: Genetics.* 2011;5:393-9.
40. Tomlinson D.J., Mülling C.H., and Fakler T.M. Invited review: formation of keratins in the bovine claw: roles of hormones, minerals, and vitamins in functional claw integrity. *J Dairy Sci.* 2004;87:797-809.
41. Buddhachat K. KS, Siengdee P., Brown J. L., Nomsiri R., Kaewmong P., Thitar am C., Mahakkanukrauh P., Nganvongpanit K. Elemental Analysis of Bone, Teeth, Horn and Antler in Different Animal Species Using Non-Invasive Handheld X-Ray Fluorescence. *PLoS One.* 2016;11(5):e0155458.
42. Nganvongpanit K., Buddhachat K., Piboon P., and Klinhom S. The distribution of elements in 48 canine compact bone types using handheld X-ray fluorescence. *Biological Trace Element Research.* 2016;174:93-104.
43. Naderi H., Matin M.M., and Bahrami A.R. Critical issues in tissue engineering: biomaterials, cell sources, angiogenesis, and drug delivery systems. *J Biomater Appl.* 2011;26:383–417.
44. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy metals toxicity and the environment. *EXS.* 2012;101:133–64.
45. de Dios Teruel J. AA, Hernández A., Ruiz AJO. Comparison of chemical composition of enamel and dentine in human, bovine, porcine and ovine teeth. *Arch Oral Biol.* 2015;60(5):768-75.

46. Buddhachat K. TC, Brown J. L., Klinhom S., Bansiddhi P., Penchart K., Ouitavon K., Sriaksorn K. Pa-in C., Kanchanasaka B., Somgird C., Nganvongpanit K. Use of handheld X-ray fluorescence as a non-invasive method to distinguish between Asian and African elephant tusks. *Scientific Reports*. 2016;6(1):24845.
47. Nganvongpanit K., Buddhachat K., Piboon P., Euppayo T., Kaewmong P., Cherdsukjai P., Kittiwatanawong K., and Thitaram C. Elemental classification of the tusks of dugong (*Dugong dugong*) by HH-XRF analysis and comparison with other species. *Scientific Reports*. 2017;7:461-67.
48. Nganvongpanit K., Buddhachat K., Klinhom S., Kaewmong P., Thitaram C., and Mahakkanukrauh P. Determining comparative elemental profile using handheld X-ray fluorescence in humans, elephants, dogs, and dolphins: preliminary study for species identification. *Forensic Science International*. 2016;263:101-6.
49. Nganvongpanit K., Brown J.L., Buddhachat K., Somgird C., and Thitaram C. Elemental analysis of Asian elephant (*Elephas maximus*) teeth using X-ray fluorescence and a comparison to other species. *Biological Trace Element Research*. 2016;170(1):94-105.
50. Buddhachat K, Piboon P, Nganvongpanit K. Effect of lacquer on altered elemental proportions in the superficial layer of bone, using handheld X-ray fluorescence. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2019;41:700-7.
51. บุญร่วม เทียมจันทร์ และศรีัญญา วิชาธรรม. ป. วิ อาญา และ วิแพ่ง พร้อมหัวข้อเรื่องทุกมาตรา ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2 ed: สำนักพิมพ์ THE LAW GROUP; 2564. 112-5, 34-40, 91-92, 211-5 p.
52. Zimmerman H.A., Schultz J.J., and Sigman M.E. Preliminary Validation of Handheld X-Ray Fluorescence Spectrometry: Distinguishing Osseous and Dental Tissue from Nonbone Material of Similar Chemical Composition. *J Forensic Sci*. 2015;60(2):382-90.
53. Nganvongpanit K., Buddhachat K., and Brown JL. Comparison of bone tissue elements between normal and osteoarthritic pelvic bones in dogs. *Biol Trace Elem Res*. 2016;171(2):344-53.
54. Nganvongpanit K., Buddhachat K., Brown J.L., Klinhom S., Pitakarnnop T., and Mahakkanukrauh P. Preliminary study to test the feasibility of sex identification of

human (*Homo sapiens*) bones based on differences in elemental profiles determined by handheld X-ray fluorescence. *Biological Trace Element Research*. 2016;173(1):21-9.

55. Nganvongpanit K., Buddhachat K., Piboon P., Euppayo T., and Mahakkanukrauh P. Variation in elemental composition of human teeth and its application for feasible species identification. *Forensic Science International*. 2017;271:33-42.

56. CLEVERICH COMPANY LIMITED. หลักการทำงานของเครื่องมือ.

57. Pitakarnnop T, Buddhachat K, Piboon P, Kriangwanich W, Pakdeenarong P, Nganvongpanit K. Elements May Not Be Homogenously Distributed throughout The Bone, an Issue of Concern When Using X-Ray Fluorescence in Species Classification. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*. 2020;19.

58. Pitakarnnop T, Buddhachat K, Pakdeenarong P, Nganvongpanit K. Elemental Distribution in Animal Carpal and Tarsal Bones Using Differences in X-ray Fluorescence Energy. *Biological Trace Element Research*. 2021;199:1-14.

59. Akram R, Natasha FS, Hashmi M, Wahid A, Adnan M, Mubeen M, et al. Trends of electronic waste pollution and its impact on the global environment and ecosystem. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2019;26(17):16923–38.

60. Mingkhwan R. and Worakhunpiset S. Heavy metal contamination near industrial estate areas in Phra Nakhon Si Ayutthaya Province, Thailand and human health risk assessment. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(9):E1890.

61. Palacios C. The role of nutrients in bone health, from A to Z. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2006;46(8):621-8.

62. Zdrojewicz Z., Popowicz E., and Winiarski J. Nickel - role in human organism and toxic effects. *Polskiego Towarzystwa Lekarskiego*. 2016;41:115-8.

63. Ascenzi MG, Zonca A, Keyak JH. Effect of cortical bone micro-structure in fragility fracture patients on lamellar stress. *J Biomech*. 2020;100:109596.

64. Gdoutos E.E., Raftopoulos D.D., and Baril J.D. A critical review of the biomechanical stress analysis of the human femur. *Biomaterials*. 1982;3(1):2-8.

65. Raftopoulos, D.D., and Qassem, W. Three-dimensional curved beam stress analysis of the human femur. *Journal of Biomedical Engineering*. 1987;9(4):356-66.

66. Thorup V.M., Tøgersen F.A., Jørgensen B., and Jensen B.R. Biomechanical gait analysis of pigs walking on solid concrete floor. *Animals*. 2007;1:708-15.

67. Von W.H., Pinzke S., Nilsson C., Olsson O., and Ehlorsson C.J. Force analysis of unprovoked pig gait on clean and fouled concrete surfaces. *Biosystems Engineering*. 2009;104(2):250-7.
68. K.M. D, Sack W.O., C.J.G. W. *Textbook of veterinary anatomy*. 4th ed ed. Philadelphia: Saunders; 2009.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ธนิตา พิทักษ์อรณพ

วุฒิการศึกษา

ปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปริญญาโท

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต นิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

