



คู่มือความเป็นพิษ

และการขาดแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์

พร้อมวิธีการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ



สนทนา มิระพันธ์
สถาบันสุขภาพสัตว์แห่งชาติ
กรมปศุสัตว์

ชื่อหนังสือ: คู่มือความเป็นพิษและการขาดแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์
พร้อมวิธีการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

จัดทำโดย: สนทนา มิมะพันธุ์
สถาบันสุขภาพสัตว์แห่งชาติ กรมปศุสัตว์
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ครั้งที่พิมพ์: ครั้งที่ 1 จำนวน 50 เล่ม

ปีที่พิมพ์: พ.ศ. 2560

พิมพ์ที่: ไชยสถาน เลเซอร์ปริ้นท์

ISBN : 978-616-429-730-2

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเลี้ยงปศุสัตว์เป็นอาชีพมากขึ้น เกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์จำเป็นต้องศึกษาเรื่องการให้อาหารสัตว์ และจัดหาอาหารมาให้สัตว์กินอย่างถูกต้องและเพียงพอกับความต้องการ ไม่มากและไม่น้อยเกินไป เพื่อให้สัตว์สามารถเจริญเติบโตได้ดี มีผลผลิตเนื้อ นม ไข่ ที่ดี มีคุณภาพ และไม่เป็นโรคเนื่องจากการขาดสารอาหารหรือได้รับสารอาหารเกินความต้องการ เพราะทุกสิ่งทุกอย่างบนโลกนี้ไม่เว้นแม้แต่อาหาร โดยเฉพาะแร่ธาตุอาหารสามารถก่อให้เกิดโทษได้หากร่างกายสัตว์ได้รับในปริมาณมากหรือน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับความต้องการของร่างกาย

แร่ธาตุ เป็นหนึ่งในกลุ่มของสารอาหารในสัตว์นอกเหนือจากคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และน้ำ โดยแร่ธาตุเป็นสารอาหารที่มีความจำเป็นสำหรับสัตว์ซึ่งแม้ร่างกายจะต้องการในปริมาณไม่มากนักแต่ก็ขาดเสียมิได้ การขาดแร่ธาตุอาหารหรือการได้รับแร่ธาตุอาหารมากเกินไปจนเกินระดับสูงสุดที่ร่างกายสัตว์จะสามารถทนทานได้นี้เอง จะก่อให้เกิดความเป็นพิษจนสัตว์แสดงอาการป่วย และอาการป่วยอาจเริ่มตั้งแต่อาการแฝงที่สังเกตไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่าจนถึงอาการทางคลินิกที่รุนแรงถึงตายได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการซักประวัติสัตว์ป่วยหรือตายและการสังเกตอาการทางคลินิกจะมีประโยชน์มาก เพราะสามารถใช้เป็นแนวทางในการวินิจฉัยโรค นอกจากนี้ความรู้ในเรื่องการเก็บและส่งตัวอย่างที่ถูกวิธีจะทำให้ผู้ให้บริการได้รับผลการตรวจวิเคราะห์ที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือส่งผลให้นำผลการตรวจไปใช้ในการแก้ปัญหาในภาคปศุสัตว์ได้อย่างเป็นรูปธรรม พร้อมกันนี้ กลุ่มมือเล่มนี้ยังได้กล่าวถึงหลักการและเครื่องมือของการตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุทาง

ห้องปฏิบัติการเพื่อให้ผู้อ่านได้มีความรู้ความเข้าใจเพื่อให้เกิดการทำงานที่สอดคล้องและประสานงานที่ดีระหว่างผู้ส่งตัวอย่างและผู้ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

คู่มือเล่มนี้ผู้เขียนได้ทำการรวบรวมเรียบเรียงองค์ความรู้ทั้งจากในและต่างประเทศรวมทั้งข้อมูลส่วนหนึ่งมาจากประสบการณ์ตรงของผู้เขียนเองเกี่ยวกับปัญหาความเป็นพิษและการขาดแร่ธาตุในปศุสัตว์เพราะนอกจากโรคติดเชื้อต่างๆจะเป็นสาเหตุของการป่วยและตายในสัตว์แล้ว โรคแร่ธาตุเป็นพิษและการขาดแร่ธาตุยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สัตว์มีผลผลิตลดลงและป่วยตายได้เช่นเดียวกัน

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือคู่มือเล่มนี้คงจะมีประโยชน์บ้างไม่มากนักน้อยขอขอบคุณคุณพนม ไสยจิตรและเจ้าหน้าที่กลุ่มพิษวิทยาและชีวเคมี สถาบันสุขภาพสัตว์แห่งชาติทุกท่านที่เอื้อเฟื้อข้อมูล ให้คำแนะนำ สนับสนุน และมีส่วนช่วยให้หนังสือเล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สนทนา มิยะพันธุ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 พืชวิทยาทางสัตวแพทย์	
ความหมายของพืชวิทยาทางสัตวแพทย์	9
คำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิชาพืชวิทยา	9
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์	
การแบ่งกลุ่มของแร่ธาตุ	13
ความเป็นพิษจากแร่ธาตุ	16
การขาดแร่ธาตุ	31
บทที่ 3 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแร่ธาตุ	
ทองแดง – โมลิบดีนัม	44
แคลเซียม – ฟอสฟอรัส	48
บทที่ 4 ความเป็นพิษจากโลหะหนัก	
ตะกั่ว	51
ผลของตะกั่วต่อร่างกาย	52
การวินิจฉัยโรค	53
ผลกระทบต่อนุญช์และสิ่งแวดล้อม	56
แคดเมียม	57
ผลของแคดเมียมต่อร่างกาย	58
การวินิจฉัยโรค	59

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม	59
บทที่ 5 การเก็บตัวอย่างส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการ	
การเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการพืชวิทยา	61
การเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจทางพยาธิวิทยา	62
การเก็บตัวอย่างเลือดเพื่อส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการ	62
การเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุ	63
บทที่ 6 การวินิจฉัยโรคที่เกิดจากความเป็นพิษหรือการขาดแร่ธาตุอาหารทางห้องปฏิบัติการ	
การตรวจทางพยาธิวิทยา	67
การตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุในห้องปฏิบัติการ	68
UV-VIS Spectrophotometer	68
- การตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในซีรัมด้วย Colorimetric method โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	69
Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)	75
- การตรวจวิเคราะห์ทองแดงในซีรัมโดยใช้เครื่อง AAS	78
Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	81
- การตรวจวิเคราะห์ซีลีเนียมในซีรัม โดยใช้เครื่อง ICP-OES	84

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บรรณานุกรม	90

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 2-1 ลูกสุกรนั่งคล้ายสุนัข ลูกไม่ขึ้น ชักและตาย เนื่องจาก ความเป็นพิษของโซเดียมคลอไรด์	20
ภาพที่ 2-2 รอยโรคการอักเสบแบบ Eosinophilic perivascular cuffing ที่ Cerebrum ของสุกรที่เกิดภาวะความเป็นพิษของ โซเดียมคลอไรด์	21
ภาพที่ 2-3 ห่านแสดงอาการป่วยแบบเด่นชัด เดินโซเซ ขาอ่อนแรง กลัมน้ำในกระตัก ชัก และตาย เนื่องจากขาดซีลีเนียม	37
ภาพที่ 2-4 เป็ดเทศแสดงอาการขาหลังอ่อนแรง เดินไม่ได้ เนื่องจาก ขาดซีลีเนียม	37
ภาพที่ 2-5 สุกรที่ขาดธาตุสังกะสีมีรอยโรค Parakeratosis โดยมีผิวหนังหยาบแห้งหนาเป็นแผ่นแข็ง ตกสะเก็ด เป็นขุยบริเวณปลายขาทั้งสี่	38
ภาพที่ 3-1 A. แกะแสดงอาการดิ้นรนเนื่องจากพิษของทองแดง	47
B. ผลการผ่าซากแกะที่ตายเนื่องจากพิษของทองแดง ตับ มีสีค่อนข้างเหลืองน้ำตาล	47
ภาพที่ 3-2 แร่ธาตุชนิดก้อนที่แขวนไว้ให้สัตว์เลียกินได้อย่างอิสระ	49
ภาพที่ 4-1 แสดงลักษณะ Intranuclear inclusion body ในเซลล์เยื่อบุท่อไต ของโคที่เกิดอาการพิษจากตะกั่ว	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 4-2 Basophilic stippling บน Cytoplasm ของเม็ดเลือดแดงของโค ที่เกิดอาการพิษจากสารตะกั่ว	55
ภาพที่ 5-1 A. ตัวอย่างซีรัมที่มีลักษณะ เหลล ใส สีเหลืองอ่อน เหมาะสมกับ การตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ	65
B. ตัวอย่างซีรัมที่มีลักษณะ ขุ่น เหนียว สีแดง ไม่เหมาะสมกับ การตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ	65
ภาพที่ 6-1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	69
ภาพที่ 6-2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่อง AAS	75
ภาพที่ 6-3 อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะ พื้นไปสู่สถานะกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 589 nm	77
ภาพที่ 6-4 คบพลาสมา (Plasma Torch)ของเทคนิค Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	82
ภาพที่ 6-5 ส่วนประกอบของเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	83

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2-1 อาการทางคลินิกแบบเด่นชัดและแบบแฝงของสัตว์ ที่เกิดจากความเป็นพิษของแร่ธาตุ	29
ตารางที่ 2-2 อาการทางคลินิกแบบเด่นชัดและแบบแฝงของ สัตว์ที่เกิดจากการขาดแร่ธาตุอาหาร	41
ตารางที่ 3-1 สัดส่วนที่เหมาะสมของแร่ธาตุที่มีปฏิสัมพันธ์กันในอาหารโคนม	44
ตารางที่ 6-1 การเตรียม Calibration curve สารละลายมาตรฐาน ซีลีเนียม	87
ตารางภาคผนวก 1 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุทางห้อง ปฏิบัติการ	97
ตารางภาคผนวก 2 ตำแหน่งและขนาดเข็มที่ใช้เจาะเลือดสัตว์	98
ตารางภาคผนวก 3 ค่า Maximum tolerable levels (MTL) ของแร่ธาตุที่สำคัญในอาหาร โค สุกรและสัตว์ปีก ที่กำหนดโดย NRC (2005)	99

บทที่ 1

พิษวิทยาทางสัตวแพทย์ (Veterinary Toxicology)

พิษวิทยาทางสัตวแพทย์ (Veterinary Toxicology) หมายถึง การศึกษาเรื่องสารพิษที่เกี่ยวข้องกับสัตว์ เช่น สัตว์เลี้ยงและสัตว์เศรษฐกิจ เป็นต้น โดยสารพิษที่เป็นปัญหาในสัตว์ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารเคมีที่ใช้ในด้านการเกษตร อาหารเสริม แร่ธาตุ รวมทั้งพืชที่เป็นพิษต่อปศุสัตว์

คำศัพท์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวิชาพิษวิทยา:

โดยที่คู่มือนี้กล่าวถึงรายละเอียดในเรื่องของความเป็นพิษและการขาดแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์ ดังนั้นจึงขออธิบายคำศัพท์หรือคำสำคัญทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเฉพาะในเรื่องของแร่ธาตุดังต่อไปนี้

Toxicosis หมายถึงภาวะผิดปกติหรืออาการป่วยหรือผลกระทบของแร่ธาตุที่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกาย

Toxicity หมายถึง ปริมาณหรือขนาดของแร่ธาตุที่สัตว์ได้รับเข้าไปแล้วทำให้สัตว์นั้นแสดงความเป็นพิษโดยมีอาการป่วยจนถึงตายได้ โดยทั่วไปแล้ว Toxicity ของสารใดก็ตามในทางพิษวิทยามักใช้หน่วย mg ของสารพิษต่อน้ำหนักตัว 1 kg หรือ part per million (ppm) ยกตัวอย่างกรณีของ Mineral toxicity เช่น ปริมาณของแร่ธาตุทองแดงที่ทำให้แะแสดงอาการป่วยจนถึงตายได้อยู่ที่ 20-100 mg ของทองแดงต่อน้ำหนักตัวแะ 1 kg หรือ 20-100 ppm นั่นเอง

Maximum tolerable levels (MTL) หมายถึงขนาดหรือระดับที่สูงสุดของแร่ธาตุในอาหารที่จะไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อสัตว์และร่างกายสัตว์สามารถทนได้โดยไม่ก่อให้เกิดพิษหรือไม่ทำให้ร่างกายแสดงความผิดปกติ คำนี้อาจใช้คำว่า Highest nontoxic dose (HNTD) ก็ได้

ค่า MTL จะถูกกำหนดโดยสถาบันวิจัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (National Research Council, NRC) ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณความต้องการสารอาหารของสัตว์ชนิดต่างๆ เช่น สุกร สัตว์ปีก โคเนื้อ โคนม และ โดยมีการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานการให้อาหารสัตว์ทุกๆ 5 ปี และมีการขยายขอบข่ายชนิดสัตว์ตลอดจนรายละเอียดของชนิดสารอาหารที่แนะนำการใช้ ซึ่ง NRC จัดว่าเป็นมาตรฐานการให้อาหารสัตว์ที่สมบูรณ์

Lethal dose (LD) หมายถึง ขนาดของแร่ธาตุที่ต่ำที่สุดที่ทำให้สัตว์ตาย ค่า LD อาจกล่าวในรูปของเปอร์เซ็นต์ เช่น ขนาดที่ทำให้สัตว์ทั้งหมดตาย 1% (LD_1) ขนาดที่ทำให้สัตว์ทั้งหมดตาย 50% (LD_{50}) หรือขนาดที่ทำให้สัตว์ตายทั้งหมด (LD_{100})

Acute toxicity หมายถึง การที่สัตว์แสดงอาการป่วยภายใน 24 ชั่วโมง หลังจากที่ได้รับแร่ธาตุในระดับก่อให้เกิดความเป็นพิษเพียงครั้งเดียว (Single dose) หรือได้รับหลายครั้ง (Multiple dose) และอาการป่วยจะรุนแรงมากขึ้นภายใน 2-3 วัน

Chronic toxicity หมายถึง การที่สัตว์ค่อยๆแสดงอาการป่วย ภายหลังจากที่ได้รับแร่ธาตุในระดับที่เกินค่า MTL และได้รับเป็นเวลานานๆจนอาจถึงหลายเดือน

Paracelsus (1493 - 1541) ผู้เป็นบิดาแห่งวิชาพิษวิทยากล่าวไว้ว่า “สารทุกชนิดเป็นพิษ ไม่มีสารใดที่ไม่เป็นพิษ ขนาดที่ให้จะเป็นตัวกำหนดว่าสารนั้นจะเป็นพิษหรือจะช่วยในการรักษา” ดังนั้นการให้แร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์ก็อาศัยหลักการนี้เช่นกัน เพราะแร่ธาตุแม้เป็นสารอาหารที่ร่างกายสัตว์ต้องการในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารอาหารชนิดอื่น แต่นับเป็นสิ่งสำคัญที่ร่างกายขาดไม่ได้ เนื่องจากแร่ธาตุมีผลต่อการเจริญเติบโต โครงสร้างร่างกาย น้ำหนักตัว การทำงานของระบบสืบพันธุ์ การให้ผลผลิต นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของฮอร์โมนในร่างกาย หรือเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยอาหาร หรือในกระบวนการเมตาโบลิซึมของร่างกาย และสิ่งสำคัญคือร่างกายต้องได้รับในขนาดที่ไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป (Not too much not too little) ดังนั้นองค์ประกอบของแร่ธาตุในอาหารที่ใช้เลี้ยง ปศุสัตว์จึงนับเป็นเรื่องท้าทายที่หลายภาคส่วนควรหันมาให้ความสำคัญเพื่อให้อยู่ในจุดที่สมดุลพอดีกับความต้องการของสัตว์ ต้องมีการกำหนดปริมาณของแร่ธาตุที่ควรเติมลงไปในการอาหารสัตว์เพื่อป้องกันการขาด และในขณะเดียวกันต้องไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษหรืออันตรายต่อสัตว์ เพื่อให้สัตว์มีสุขภาพดีไม่เกิดปัญหาความเป็นพิษหรือการขาดแร่ธาตุ และมีผลผลิตที่ดีทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ



Paracelsus (1493 - 1541)

“All substances are poison; there is none which is not a poison. The right dose differentiates a poison from a remedy.”

ที่มา: <https://global.britannica.com/biography/Paracelsus>

คู่มือความเป็นพิษและการขาดแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์
พร้อมวิธีการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์

โภชนาการที่สำคัญสำหรับสัตว์ หมายถึง การได้รับอาหารที่มีสารอาหารครบถ้วนทุกชนิดในปริมาณที่เพียงพอและในสัดส่วนที่เหมาะสม แร่ธาตุอาหาร (Minerals) คือ สารอาหารประเภทหนึ่งที่ร่างกายของปศุสัตว์ต้องการและขาดไม่ได้เพราะแร่ธาตุเป็นส่วนประกอบของอวัยวะและกล้ามเนื้อบางอย่าง เช่น กระดูก ฟัน เลือด แร่ธาตุบางชนิดเป็นส่วนของสารต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโตในร่างกาย เช่น ฮอร์โมน สเตียรอยด์ เอนไซม์ เป็นต้น นอกจากนี้แร่ธาตุยังช่วยในการควบคุมการทำงานของอวัยวะต่างๆ ของร่างกายให้เป็นปกติ เช่น ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อและระบบประสาท การแข็งตัวของเลือด และช่วยควบคุมสมดุลของน้ำในการไหลเวียนของของเหลวในร่างกาย เป็นต้น แร่ธาตุที่พบในเนื้อเยื่อทุกชนิด ไม่ใช่แร่ธาตุที่จำเป็นต่อสัตว์ มีแร่ธาตุประมาณ 16 ชนิด เท่านั้นที่พบว่ามีมีความสำคัญและสัตว์จำเป็นต้องใช้ในการดำรงชีพ ดังนั้นจึงอาจแบ่งกลุ่มของแร่ธาตุตามปริมาณความต้องการของร่างกายได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. แร่ธาตุที่สัตว์มีความต้องการมากหรือแร่ธาตุหลัก (Major minerals หรือ Macro-elements) หมายถึงกลุ่มของแร่ธาตุหลักที่ร่างกายต้องการในปริมาณคิดเป็นร้อยละของสารอาหารทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหารโดยนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น เป็นโครงสร้างของกระดูกและกล้ามเนื้อ มีอยู่ด้วยกัน 7 ชนิด ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม คลอไรด์ แมกนีเซียม โพแทสเซียม และกำมะถัน หรือเป็นแร่ธาตุที่ใช้ในการรักษาสมดุลของของเหลวในร่างกาย ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม และคลอไรด์ หรือเป็นแร่ธาตุที่ใช้ในการกระตุ้นการทำงานของระบบประสาท เอนไซม์ และ ฮอร์โมน เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม และ โพแทสเซียม เป็นต้น

2. แร่ธาตุที่สัตว์มีความต้องการน้อยหรือแร่ธาตุรอง (Minor minerals หรือ Micro-elements) หรือบางทีเรียก Trace elements หมายถึงกลุ่มของแร่ธาตุที่แม้ร่างกายมีความต้องการในปริมาณคิดเป็นสัดส่วนต่อล้านส่วนของสารอาหารทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร (mg/kg หรือ part per million หรือ ppm) ซึ่งจัดว่าน้อยมาก แต่ขาดไม่ได้เพราะทำหน้าที่สำคัญโดยเป็นส่วนหนึ่งในโครงสร้างของฮอร์โมน และ เอนไซม์ แร่ธาตุเหล่านี้มีอยู่ไม่น้อยกว่า 11 ชนิด เช่น เหล็ก ทองแดง โมลิบดีนัม แมงกานีส สังกะสี ไอโอดีน โคบอลต์ ซีลีเนียม ฟลูออรีน โครเมียม เป็นต้น

โดยเหตุที่แร่ธาตุแต่ละชนิดต่างมีบทบาทและความสำคัญต่อการเจริญเติบโต การดำรงชีวิต การทำหน้าที่ของเซลล์และอวัยวะต่างๆทั่วร่างกายแตกต่างกันออกไป จึงมีความจำเป็นที่สัตว์จะต้องได้รับแร่ธาตุชนิดต่างๆในสัดส่วนและปริมาณที่เหมาะสมจากอาหาร ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานที่สำคัญในเรื่องของอาหารและการจัดการในการเลี้ยงปศุสัตว์ แต่บ่อยครั้งที่สัตว์ได้รับแร่ธาตุในปริมาณที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพสัตว์ทำให้แสดงอาการเกิดพิษ โดยอาการเกิดพิษนี้อาจเริ่มตั้งแต่อ่อนๆ เช่น ผลผลิตลดลงเล็กน้อย จนถึงระดับรุนแรงถึงตายได้ อาการทางคลินิกของการเกิดพิษจึงมีทั้งแบบไม่เด่นชัดหรืออาการแฝง (Subclinical signs) ไปจนถึงแสดงอาการแบบเด่นชัด (Obvious clinical signs) ความต้องการแร่ธาตุในสัตว์จะอยู่ในรูปของปริมาณความต้องการต่อวัน หรือปริมาณความต้องการต่อหน่วยผลผลิต เช่น ในรูปของเปอร์เซ็นต์ในวัตถุดิบ หรือ mg/kg ของวัตถุดิบ และระดับความทนทานสูงสุด (Maximum tolerable level; MTL) ก็คือขนาดสูงสุดของแร่ธาตุที่จะไม่ก่อให้เกิดพิษหรือผลข้างเคียงต่อสัตว์ ขนาดจะเป็นตัวกำหนดว่าควรกินเท่าใดต่อน้ำหนักตัว (g ต่อวัน หรือ g ต่อน้ำหนักตัว) หรือความเข้มข้นในอาหารและน้ำดื่ม (% หรือ ppm) โดยปกติอาหารสัตว์ในกลุ่มพลังงานและโปรตีนค่อนข้างมีเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์อยู่แล้ว แต่บางครั้งพบว่าระดับของแร่ธาตุกลับ

ไม่เพียงพอต่อความต้องการของสัตว์จึงจำเป็นที่จะต้องมีการเสริมลงไปให้อาหารสัตว์เสมอ และระดับการเสริมจะมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดสัตว์ อายุ และปริมาณของผลผลิตที่ให้ ตลอดจนผันแปรไปกับอาหาร ปริมาณแร่ธาตุในดิน น้ำ และกับปริมาณของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้ด้วย

เมื่อสัตว์ได้รับแร่ธาตุอาหารในขนาดที่มากเกินไปจนเกินระดับ MTL จะเกิดภาวะความเป็นพิษจนทำให้สัตว์แสดงอาการทางคลินิก และเมื่อสัตว์ได้รับแร่ธาตุในปริมาณน้อยมากจนเกิดภาวะการขาดแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์นั้น อาการทางคลินิกที่พบจะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของแร่ธาตุ หนังสือคู่มือเล่มนี้จะกล่าวถึงอาการทางคลินิกที่แสดงออกอย่างเด่นชัด และอาการแฝงที่อาจตรวจพบหลักฐานได้ก็ต่อเมื่อมีการผ่าซากหรือมีการตรวจทางห้องปฏิบัติการพิษวิทยาและชีวเคมีเท่านั้น

ข้อมูลจากการเลี้ยงปศุสัตว์ในระดับฟาร์มทุกวันนี้ พบว่าปัญหาการขาดแร่ธาตุในปศุสัตว์มีโอกาสดังขึ้นได้น้อยกว่าปัญหาความเป็นพิษจากการได้รับแร่ธาตุในปริมาณที่สูงเกินค่า MTL เพราะการผสมหรือเตรียมสูตรอาหารมักใส่แร่ธาตุในปริมาณมากเกินความต้องการของร่างกายอยู่แล้ว ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงปัญหาความเป็นพิษจากการได้รับแร่ธาตุมากเกินไปก่อน ทั้งนี้สาเหตุหลักของการได้รับแร่ธาตุมากเกินไปอันอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกายปศุสัตว์ได้แก่

1. การให้อาหารมากเกินไป (Excessive feed intake) เช่น ในช่วงตั้งท้องหรือช่วงผสมพันธุ์
2. การเตรียมสูตรอาหารที่ผิดพลาด (Diet formulation errors)
3. การให้น้ำคุณภาพไม่ดี (Poor water quality)

4. มีการปนเปื้อนของแร่ธาตุเสริม (Contaminated mineral supplements) โดยแร่ธาตุที่เสริมนั้นมีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการขาดแร่ธาตุอาหาร แต่กลับมีส่วนประกอบของแร่ธาตุมากเกินไปจนความต้องการของร่างกายจนก่อให้เกิดอาการพิษได้

5. ความสัมพันธ์ระหว่างแร่ธาตุในดิน น้ำ พืช และสัตว์ หากมีแร่ธาตุใดสูง สัตว์อาจได้รับแร่ธาตุนั้นทั้งจากพืชหรือวัตถุดิบอาหารที่สัตว์กินและจากน้ำที่กินในระดับสูงจนอาจก่อให้เกิดพิษได้

ความเป็นพิษจากแร่ธาตุ (Mineral toxicity)

ในการผสมสูตรอาหารที่มีการเติมแร่ธาตุหลัก หรือ แร่ธาตุรองลงไปในการอาหาร ในปริมาณที่มากเกินไปค่า MTL สามารถก่อให้เกิดพิษได้ แม้ว่าการจัดการด้านอาหารและการเลี้ยงสัตว์ที่ดีจะสามารถลดความเสี่ยงต่อการเป็นพิษของแร่ธาตุได้ แต่ก็ยังพบรายงานความเป็นพิษของแร่ธาตุในปศุสัตว์อยู่เสมอ ดังนั้นการวินิจฉัยแยกโรคจึงค่อนข้างมีความสำคัญ โดยในที่นี้จะขอแยกกล่าวถึงความเป็นพิษของแร่ธาตุที่สำคัญแต่ละตัวดังนี้

แร่ธาตุหลัก

แคลเซียม

เป็นแร่ธาตุที่มีปริมาณสูงที่สุดในร่างกาย ช่วยในการสร้างและรักษาโครงสร้างของร่างกาย โดยประมาณ 99% อยู่ในรูปของกระดูกและฟัน ที่เหลืออยู่ในส่วนของเลือดและเนื้อเยื่อต่างๆ และเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นในการแข็งตัวของเลือด กระตุ้นการทำงานของน้ำย่อย ในสัตว์ปีกแคลเซียมเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นในการสร้างเปลือกไข่ แต่ถ้าได้รับแคลเซียมสูงกว่าความต้องการของร่างกายเป็นระยะเวลานานจะทำให้เกิดปัญหาไตเสื่อม และมีตะกอนยูเรตในไต (visceral gout) ในสุกรและโคพบว่าการกินอาหารลดลง น้ำหนักลด นมลด

บริเวณข้อต่อและเข่าขยายตัวขึ้น นอกจากนี้การได้รับแคลเซียมมากเกินไปทำให้สมดุลของแร่ธาตุอื่นเสียไป เลือดหยุดช้า ผิวหนังแห้ง และเกิดเป็นนูนในทางเดินปัสสาวะได้ ระดับแคลเซียมสูงมีผลยับยั้งการดูดซึมและการใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุต่างๆ เช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส ทำให้สัตว์ขาดแร่ธาตุเหล่านี้ได้

ฟอสฟอรัส

เป็นแร่ธาตุที่พบมากเป็นอันดับสองในร่างกายรองจากแคลเซียมและความสัมพันธ์กับแคลเซียมอย่างมากในการสร้างกระดูกและฟัน ช่วยในการรักษาความเป็นกรดด่างของร่างกาย เป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิกทั้ง DNA และ RNA ที่มีหน้าที่ในการสังเคราะห์โปรตีน และทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาโบลิซึมของพลังงาน เช่น Adenosine triphosphate (ATP) และยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์บางชนิด ในสัตว์ปีกการได้รับฟอสฟอรัสมากเกินระดับ MTL (ตารางภาคผนวก3) อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมของไตและการเกิดตะกอนยูเรตในไต ในสุกรทำให้เบื่ออาหารและพบนูนในทางเดินปัสสาวะ ส่วนในโคอาจพบนูนและมีภาวะกระดูกเสื่อม ไตเสื่อมและการกระจายตัวของผลึกแคลเซียมในเนื้อเยื่ออ่อน ในอาหารปศุสัตว์ส่วนใหญ่ควรมีแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสในอัตราส่วน 2:1 ถ้าอัตราส่วนไม่เหมาะสมอาจเกิดปัญหานูนในทางเดินปัสสาวะได้

แมกนีเซียม

เป็นแร่ธาตุที่มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับแคลเซียมและฟอสฟอรัส พบมากในกระดูกและฟัน เลือดและกล้ามเนื้อ ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการทำงานของระบบประสาทและกล้ามเนื้อ และเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่างๆในร่างกาย ค่า MTLของแมกนีเซียมในโคประมาณ 0.6% อาการเกิดพิษจึงไม่ชัดเจนมากนักอาจแสดงเพียง

อาการเบื่ออาหาร ในสัตว์ปีกความผิดปกติในการเตรียมสูตรอาหารที่มีแมกนีเซียมมากเกินไป อาจส่งผลให้สัตว์โตช้า ไขมีขนาดเล็กและเปลือกบาง ในแม่ไก่จะแสดงอาการท้องเสีย ค่า MTL ของแมกนีเซียมในไข่ไข่ประมาณ 0.5%

โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง)

โซเดียมและคลอไรด์เป็นแร่ธาตุที่พบเสมอในเลือดและของเหลวในร่างกาย ทำให้เกิดการควบคุมภาวะสมดุลของกรดต่าง การเสริมโซเดียมทางอาหารสัตว์ นิยมเสริมในรูปของเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือที่นิยมเรียกว่าเกลือแกง ซึ่งเกลือเป็น สารอาหารที่จำเป็น และทำให้รสชาติอาหารดีขึ้น สัตว์มีความต้องการโซเดียมคลอไรด์มากขึ้นเมื่ออยู่ในภาวะให้นมใช้พลังงานมาก และอุณหภูมิแวดล้อมสูงขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้จะทำให้สัตว์กินน้ำมากขึ้น การที่สัตว์ได้รับโซเดียมคลอไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปความต้องการ อาจทำให้เกิดภาวะเกลือเป็นพิษ (Salt poisoning) ความเป็นพิษของโซเดียมไอออน หรืออาจเรียกรวมทั้งสองอย่างว่าภาวะร่างกายขาดน้ำเนื่องจากพิษของโซเดียมไอออน โซเดียมเป็น ธาตุที่สามารถดูดซึมผ่านผนังลำไส้ได้ดี การได้รับโซเดียมในรูปของเกลือมากเกินไป ร่างกายจะขับออกในรูปของเกลือเช่นเดียวกับสภาพที่ได้รับทำให้ร่างกายสัตว์มีความ ต้องการน้ำมาก อ่อนเพลีย ชักกระตุก และตายได้ ภาวะ Salt poisoning นี้เกิดได้กับสัตว์ทุก ชนิดเช่น สุกร โค และสัตว์ปีก มีรายงานการเกิดโรคอยู่ทั่วโลกโดยพบบ่อยในสุกรซึ่งเป็น สัตว์ที่มีความไวรับต่อความเป็นพิษของเกลือมากที่สุดและมีรายงานความเป็นพิษของเกลือ มากที่สุดเมื่อเทียบกับสัตว์ชนิดอื่น ซึ่งค่าความเป็นพิษแบบเฉียบพลันของเกลือโดยการกิน (Acute oral lethal dose) ในสุกร และโค มีค่าเท่ากับ 2.2 g/kg และพบว่าแกะเป็นสัตว์ที่มีความต้านทานต่อความเป็นพิษของเกลือมากที่สุดโดยมีค่า Acute oral lethal dose เท่ากับ 6 g/kg โดยปกติอาหารสัตว์จะมีเกลือโดยประมาณ 0.5-1 ppm อยู่แล้ว อย่างไรก็ตามสัตว์

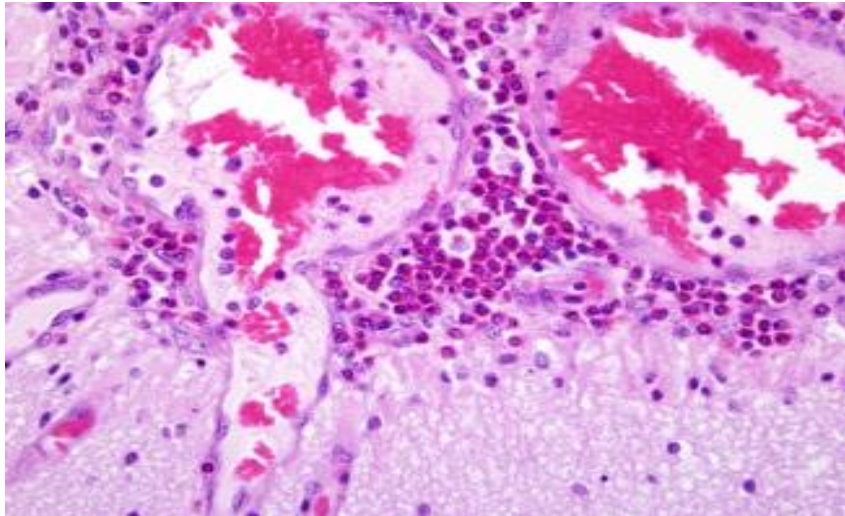
สามารถทนต่อการให้เกลือในระดับความเข้มข้นสูงกว่านี้ถ้าหากมีน้ำดื่มเพียงพอ และการได้รับเกลือมากเกินไปทำให้ร่างกายต้องเชื่อมโยงภาวะอาหารส่งผลให้เบื่ออาหาร อาเจียน และท้องเสีย และทำให้ระดับของโซเดียมในกระแสเลือดเพิ่มสูงขึ้น (Acute sodium ion toxicosis หรือ Acute hypernatremia) อาการทางคลินิกจะสังเกตเห็นได้ภายใน 1-2 วัน และจะเห็นชัดมากถ้าสัตว์กินน้ำน้อย ในสุกรจะแสดงอาการเบื่ออาหาร กระหายน้ำ กระวนกระวาย คัน และท้องผูก และอาการลุกลามมากขึ้นถึงขั้น หัวตกลิ้นเป็นวงกลม ชัก นิ่งคล้ายสุนัข มีอาการทางประสาท นอนตะแคงข้าง ลูกไม่ขึ้นและตาย (ภาพที่ 2-1) ส่วนในโคจะแสดงอาการภาวะอาหารและลำไส้อักเสบ ท้องเสีย อ่อนแอ ขาดน้ำ สันกล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ในโคอาจพบอาการตาบอด ชัก และอัมพาตบางส่วน และในที่สุดโคอาจล้มลงนอนตะแคงข้าง และตายได้ ในสัตว์ปีกเช่น ไก่ และไก่ทองอาจแสดงอาการซึม ยืนไม่ได้ กระหายน้ำ กล้ามเนื้ออ่อนแอ ชักและตาย บางครั้งพบอาการท้องมาน และหัวใจโต Lethal dose ในสัตว์ปีกประมาณ 4 g ต่อ น้ำหนักตัว 1 kg โดยสัตว์ปีกอายุน้อยจะแสดงอาการเป็นพิษของเกลือรุนแรงกว่าสัตว์ปีกที่อายุมาก ส่วนกรณี Chronic sodium ion toxicosis หรือ Chronic hypernatremia อาการทางคลินิกจะแสดงให้เห็นภายใน 4-7 วัน รอยโรคจากการผ่าซากในสัตว์ที่แสดงความเป็นพิษจากเกลือจะพบภาวะอาหารอักเสบ มีแผลและจุดเลือดออก ส่วนรอยโรคทางจุลพยาธิวิทยาอาจพบเด่นชัดจำเพาะที่สมองโดยพบการบวมน้ำที่สมองส่วน Cerebrum พบการอักเสบที่เยื่อหุ้มสมอง โดยเฉพาะในสุกรพบรอยโรคจำเพาะคือการเกิดการอักเสบแบบ Eosinophilic perivascular cuffing ที่เนื้อเยื่อสมอง (ภาพที่ 2-2) โดยเฉพาะในกรณีที่สุกรตายในระยะแรกๆภายใน 48 ชั่วโมงหลังจากเริ่มแสดงอาการป่วย ส่วนในโคไม่พบรอยโรค Eosinophilic perivascular cuffing แต่พบการบวมน้ำที่กล้ามเนื้อลายทั่วร่างกายและพบน้ำในถุงหุ้มหัวใจ ส่วนในสัตว์ปีกพบรอยโรคถุงน้ำในเยื่อหุ้มหัวใจ (Hydropericardium) เช่นเดียวกับโค นอกจากนั้นการ

ตรวจวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมจากเนื้อเยื่อสมองอาจพบได้สูงมากกว่า 2000 ppm ในสุกร และโค ส่วนระดับของโซเดียมในซีรัมรวมถึงระดับของโซเดียมที่น้ำในลูกตา (Aqueous humor และ Vitreous humor) ของสัตว์ป่วยจะพบสูงกว่าค่าปกติ นอกจากนี้ระดับโซเดียมในของเหลวใน Cerebral spinal fluid จะสูงกว่าในซีรัมของสัตว์ปกติด้วย



ภาพที่ 2-1 ลูกสุกรนั่งคล้ายสุนัข ลูกไม่ขึ้น ชักและตาย เนื่องจากความเป็นพิษของ
โซเดียมคลอไรด์

ที่มา: Radostits et al. (2007)



ภาพที่ 2-2 แสดงรอยโรคการอักเสบแบบ Eosinophilic perivascular cuffing ที่สมองส่วน Cerebrum ของสุกรที่เกิดภาวะความเป็นพิษของโซเดียมคลอไรด์

ที่มา: Radostits et al. (2007)

โปแตสเซียม

มีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อ กล้ามเนื้อหัวใจ ระบบประสาท และรักษาสสมดุลและปริมาณน้ำในเซลล์ให้คงที่ ควบคุมสมดุลความเป็นกรด-ด่างในร่างกาย เกี่ยวข้องในกระบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ถ้ามีโปแตสเซียมมากเกินไปจะทำให้การดูดซึมของแมกนีเซียมไม่ดี และในโคถั่วมีโปแตสเซียมในระดับสูงมากจะทำให้กินอาหารลดลงและเกิดนิ่วในทางเดินปัสสาวะ ส่วนในสุกรและสัตว์ปีกอาจส่งผลให้การทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจผิดปกติ การตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram) ผิดปกติ

ซัลเฟอร์

เป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโนหลายชนิด และฮอร์โมนในร่างกาย การเสริมซัลเฟอร์ในสูตรอาหารโคจะมีความจำเป็นเมื่อใช้แหล่งของโปรตีนที่มาจาก Non-protein nitrogen เช่น ยูเรีย แอมโมเนียม ในสัดส่วนที่มาก นอกจากกรณีนี้แล้วจะไม่มีมีความจำเป็นที่ต้องมีการเสริมซัลเฟอร์ MTL ของซัลเฟอร์ในอาหารโคเท่ากับ 0.3-0.4 % มีรายงานความเป็นพิษของซัลเฟอร์ในโค สุกร และแกะโดยมีอาการกล้ามเนื้อสั่น หายใจหอบ และมีอาการทางประสาท

แร่ธาตุรอง

ทองแดง

ทองแดงเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญในการสร้างฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง และมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสีในขนและผม กระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมตาโบลิซึมของธาตุเหล็ก และระบบประสาทส่วนกลาง ทองแดงเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นและปลอดภัยต่อสัตว์ แต่ถ้าสัตว์ได้รับมากเกินไป จะทำให้เกิดเป็นพิษได้ ในสุกรปริมาณของแร่ธาตุทองแดงที่ต้องการในอาหารคือขนาด 5-6 ppm และปริมาณสูงที่สุดที่ร่างกายสามารถทนได้ (MTL) อยู่ที่ 250 ppm แต่ขณะเดียวกันพบว่าถ้ามีแร่ธาตุเหล็กและสังกะสีอยู่ในอาหารจะสามารถลดความเป็นพิษของทองแดงได้ อาการของความเป็นพิษของทองแดงในสุกรได้แก่ สีขนโลหิตจาง ปัสสาวะสีแดง ไตเสื่อม ตับสีเหลือง มีเลือดออกและมีแผลหลุมที่กระเพาะอาหาร ปอดบวม น้ำ ระดับของทองแดงในตับและไตเพิ่มสูงขึ้น ส่วนในสัตว์ปีกมีรายงานว่าระดับของทองแดงในอาหารที่ 250-605 ppm จะพบความผิดปกติที่กระเพาะบด กระเพาะแท้ และตับ โดยพบว่าเป็ดมีความไวต่อพิษของทองแดงมากกว่าไก่ การวินิจฉัยโรคโดย

การชักประวัติการให้อาหาร สังเกตอาการทางคลินิก ร่วมกับการตรวจวินิจฉัยทางห้องปฏิบัติการโดยการตรวจหาระดับของทองแดงในตับและไต โดยระดับของทองแดงในตับมากกว่า 250 ppm และระดับของทองแดงในไตมากกว่า 60 ppm เป็นค่าที่กำหนดความเป็นพิษของทองแดง อาการเกิดพิษของทองแดงในสุกรและสัตว์ปีกค่อนข้างชัดเจนแม้ความรุนแรงจะไม่มากและเด่นชัดเท่ากับความเป็นพิษของทองแดงในแกะ เนื่องจากแกะเป็นสัตว์ที่พบการเกิดพิษของทองแดงมากกว่าสัตว์ชนิดอื่น ซึ่งค่า MTL ของทองแดงในอาหารแกะมีค่าเท่ากับ 25 ppm โดยรายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไป

เหล็ก

ธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อทั่วไปในร่างกายโดยเฉพาะฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงและไมโอโกลบินในกล้ามเนื้อ และยังเป็นส่วนประกอบของเฟอร์ริตินในตับม้าม และไขกระดูก ในลูกสุกรที่เกิดใหม่จะมีธาตุเหล็กอยู่ในร่างกายประมาณ 50 mg แต่พบว่าลูกสุกรต้องการธาตุเหล็กเสริมวันละ 7 mg เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย มิฉะนั้นจะแสดงอาการป่วยได้ แต่หากสัตว์ได้รับธาตุเหล็กมากเกินไป จะก่ออาการเกิดพิษได้ ซึ่งพบบ่อยมากในลูกสุกรเกิดใหม่ที่ฉีดธาตุเหล็กเสริมมากเกินไป ปริมาณของแร่ธาตุเหล็กที่ต้องการในอาหารอยู่ที่ 40-150 ppm พบว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเป็นพิษของธาตุเหล็กในสุกร ธาตุเหล็กและ Iron oxide ไม่เป็นพิษ แต่เกลือของเหล็กจะมีความเป็นพิษ แร่ธาตุบางชนิดเช่น โคบอลต์ สังกะสี ทองแดง แมงกานีส สามารถขัดขวางการดูดซึมของธาตุเหล็ก ในขณะที่ วิตามินซี ฟรุกโตส และกรดอะมิโนหลายชนิดช่วยให้การดูดซึมธาตุเหล็กดีขึ้น สุกรที่ได้รับธาตุเหล็กมากกว่า 5000 ppm อาจพบมีอาการกระดูกอ่อน (Ricket) เนื่องจากธาตุเหล็กจะรวมตัวกับฟอสเฟตที่มีอยู่ในกระดูก นอกจากนี้ถ้าได้รับเกลือของเหล็กในขนาดสูงเพียงครั้งเดียวจะมีอาการท้องเสีย กล้ามเนื้อสั่น ชัก หายใจ

หอบ กระเพาะอาหารและลำไส้อักเสบ และตายได้ภายใน 2 วัน ผ่าซากพบรอยโรค กล้ามเนื้อซีด ไตบวม กล้ามเนื้อหัวใจมีเลือดออก มีน้ำในช่องอก ตับมีจุดเนื้อตาย ในลูก โคมีความต้องการธาตุเหล็กมากกว่าในโคที่โตเต็มวัย โดยลูกโคต้องการธาตุเหล็ก 50 ppm แต่ธาตุเหล็กมักไม่เต็มในสูตรอาหารเพราะในวัตถุดิบอาหารที่นำมาประกอบสูตรอาหาร มักมีธาตุเหล็กรวมกันแล้วมากกว่า 50 ppm การเสริมธาตุเหล็กที่มากเกินไปอาจมีผลเสีย เพราะธาตุเหล็กจะไปจับกับฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่โคใช้ประโยชน์ไม่ได้ อันจะทำให้เกิด การขาดฟอสฟอรัสตามมา ความเป็นพิษของธาตุเหล็กในโคที่ได้รับมากเกินไปจะแสดง อาการซึม ท้องเสีย อาเจียน เชื้อเมือกมีสีเหลืองส้ม ส่วนในสัตว์ปีกต้องการธาตุเหล็กเพียง เล็กน้อย ถ้าได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดพิษได้ อาการเกิดพิษของธาตุเหล็กทำให้โคช้า ภูมิ ด้านทานต่ำ การวินิจฉัยโดยการชักประวัติ สังเกตอาการ และดูรอยโรคจากการผ่าซาก ตรวจวิเคราะห์ระดับธาตุเหล็กในอาหารและซีรัม ซึ่งค่าปกติของธาตุเหล็กในซีรัมอยู่ที่ 100 mg/dL และจะมีระดับสูงขึ้นเมื่อสัตว์อยู่ในภาวะเป็นพิษจากธาตุเหล็ก สำหรับอาการกระดูก อ่อนจากความเป็นพิษของธาตุเหล็กควรทำการวินิจฉัยแยกโรคจากภาวะกระดูกอ่อนจาก สาเหตุอื่นด้วย

ซีลีเนียม

ซีลีเนียมพบทั่วไปในเนื้อเยื่อ เซลล์ และของเหลวในร่างกาย เป็นแร่ธาตุที่ จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและความสมบูรณ์พันธุ์ มีผลต่อการป้องกันโรคหลายชนิดที่มี ความเกี่ยวข้องกับวิตามินอี เพราะเป็นธาตุที่มีความสัมพันธ์กับวิตามินอีโดยสามารถทำ หน้าที่แทนวิตามินอีได้ หากสัตว์ได้รับซีลีเนียมมากเกินไปจะเกิดอาการพิษได้ทั้งแบบ รุนแรงและเรื้อรังในสัตว์หลายชนิด เช่น โค กระบือ แกะ สุกร สัตว์ปีก เป็นต้น ขนาดของ ซีลีเนียมที่ทำให้สัตว์ตายอยู่ระหว่าง 3-5 mg/kg และซีลีเนียมขนาด 25 ppm ในอาหารทำ ให้สัตว์แสดงอาการป่วยได้ อาการป่วยมีทั้งแบบเฉียบพลัน คือ ไข้สูง หายใจเร็ว เป็น

อัมพาตและตาย และแบบเรื้อรัง คือ ชิม เบื่ออาหาร กระเพาะอาหารและลำไส้อักเสบ
เชื่องช้า ขนร่วง ผอมแห้ง กีบอักเสบและลอกหลุด เดินเป็นวงกลม ชนสิ่งกีดขวาง ตาบอด
และตาย ในสุกรปริมาณของซีลีเนียมที่ต้องการในอาหารอยู่ในช่วง 0.1-0.3 ppm และมัก
อยู่ในรูปของซีลีเนต หรือ ซีลีไนต์ บางครั้งการผสมอาหารที่ผิดพลาดทำให้เกิดความเป็น
พิษของซีลีเนียมได้ ขนาดของซีลีเนียม 5-8 ppm ในอาหารทำให้สุกรแสดงอาการเบื่อ
อาหาร ขนร่วง พบการเสื่อมที่ตับและไต ขนาด 10 ppm จะทำให้อัตราการผสมติดต่ำ และ
ลูกตายแรกคลอด ขนาด 10-27 ppm จะทำให้เกิดอัมพาต ในขณะที่สัตว์ยังกินได้ปกติ การ
ฉีดสารซีลีเนียมเข้าเส้นเพื่อรักษาอาการขาดซีลีเนียมเป็นเรื่องที่ต้องให้ความระมัดระวังเป็น
อย่างสูง เนื่องจากขนาดต่ำสุดที่ทำให้สัตว์ตายได้ (Minimum lethal dose) กรณีฉีดสาร
ซีลีเนียม คือ 0.9 mg/kg โดยสัตว์จะตายภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากได้รับยาเกินขนาด ใน
สัตว์ปีกพิษของซีลีเนียมทำให้สัตว์ท้องเสีย อ่อนแอ ตับและไตเสื่อม หากสงสัยว่าสัตว์ป่วย
เนื่องจากความเป็นพิษของซีลีเนียม การวินิจฉัยโรคโดยการซักประวัติการให้อาหาร สังเกต
อาการทางคลินิก และรอยโรคจากการผ่าซาก แต่สิ่งสำคัญที่สุดที่จะยืนยันการวินิจฉัยโรค
คือการตรวจวินิจฉัยทางห้องปฏิบัติการโดยตรวจหาระดับของซีลีเนียมในซีรัม ตับ ไต และ
อาหาร เพราะจากอาการป่วยอย่างเดียวเป็นการยากที่จะวินิจฉัยโรค โดยถ้าในอาหารมี
ซีลีเนียมสูงกว่า 5 ppm และระดับของซีลีเนียมในตับและไตมากกว่า 3 ppm ซีลีเนียมใน
เลือดของสัตว์ป่วยอยู่ในช่วง 1-25 ppm เป็นค่าที่กำหนดความเป็นพิษของซีลีเนียม

สังกะสี

สังกะสีมีบทบาทต่อการเจริญเติบโต การพัฒนาของระบบสืบพันธุ์ รวมทั้ง
กระบวนการเมตาโบลิซึมของกรดนิวคลีอิก โปรตีน ไขมัน แต่หากร่างกายสัตว์ได้รับมาก
เกินไปอาจก่อให้เกิดอาการพิษได้ พบว่าค่า LD_{50} ของสังกะสีมีค่าเท่ากับ 100 mg/kg

ในสุกรปริมาณของสังกะสีที่ต้องการในอาหารอยู่ในช่วง 15-50 ppm ขึ้นกับอายุ เพศ และช่วงเวลาที่ให้ผลผลิต สังกะสีในขนาด 2000 ppm ในอาหารทำให้สัตว์เติบโตช้า ขี้ อักเสบ กระเพาะอาหารอักเสบ ลำไส้อักเสบ พบการเสื่อมในตับและไต ปอดบวม น้ำ แร่ ธาตุบางชนิดเช่น เหล็ก แคลเซียม และทองแดง สามารถขัดขวางการดูดซึมของสังกะสี พบว่าสุกรที่กินอาหารที่มีสังกะสีในขนาด 268 ppm แสดงอาการข้ออักเสบ กระดูกและ กระดูกอ่อนผิดปกติรูปร่าง ในสัตว์ปีกทำให้ไข่ลด กระเพาะบวมมีแผล ในโคความเป็นพิษของ สังกะสีทำให้เบื่ออาหาร ท้องเสียและดิ้น การวินิจฉัยโรคโดยการชักประวัติการให้ อาหาร สังเกตอาการทางคลินิก และรอยโรคจากการผ่าซาก ร่วมกับการตรวจวินิจฉัยทาง ห้องปฏิบัติการโดยการตรวจหาระดับของสังกะสีในเนื้อเยื่อ และอาหาร โดยในปศุสัตว์ ส่วนใหญ่ค่าระดับปกติของสังกะสีในโคและตัวคือ 25-75 ppm และค่าอาจสูงขึ้นเมื่อเกิด ภาวะความเป็นพิษของสังกะสี แต่อย่างไรก็ตาม สังกะสีเป็นแร่ธาตุที่สามารถถูกขับออก จากร่างกายได้

ไอโอดีน

ไอโอดีนมีอยู่มากในต่อมไทรอยด์ กล้ามเนื้อ กระดูกสันหลัง และเลือด ไอโอดีนเป็นองค์ประกอบของ Thyroid hormone ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมตา โบลิซึมของพลังงานและการสังเคราะห์โปรตีนในเซลล์ มีรายงานความเป็นพิษของ ไอโอดีนในโคและแกะที่ได้รับไอโอดีนมากเกินไประดับ MTL (ตารางภาคผนวก 3) เป็น ระยะเวลาสั้น พบว่าสัตว์มีอาการซึม มีน้ำมูก จี๊ดตา ผิวหนังอักเสบ กระเพาะอาหารอักเสบ ลำไส้อักเสบ ขนร่วง ระบบการทำงานของฮอร์โมน และระบบการทำงานของเซลล์ ภูมิคุ้มกัน (cell-mediated immune system) ลดลง ซึ่งการเป็นพิษของไอโอดีนเป็นไปอย่าง รวดเร็วหลังได้รับไอโอดีนมากเกินไป ส่วนความเป็นพิษที่ พบในไก่ไข่ คือ ลดผลผลิตไข่

ขนาดไข่ลดลง และลดอัตราการฟักไข่ ในสุกรความเป็นพิษของไอโอดีนจะส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง เบื่ออาหาร จำนวนเม็ดเลือดแดงและขาวลดลง ความเข้มข้นของระดับธาตุเหล็กในตับลดลง

แมงกานีส

แมงกานีสเป็นแร่ธาตุที่มีสะสมในร่างกายน้อย แต่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต และเป็น Co-factor ของเอนไซม์หลายชนิด ในสัตว์ปีกแมงกานีสจำเป็นต่อการสร้างเปลือกไข่ การผลิตไข่ อัตราการฟัก ปกติในอาหารสัตว์มักมีแมงกานีสไม่เพียงพอต้องมีการเสริมในสูตรอาหารในรูปของเกลือ เช่น แมงกานีสซัลเฟต แมงกานีสออกไซด์ เป็นต้น แมงกานีสมีความเป็นพิษน้อยแต่ถ้าได้รับมากเกินไปก็สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ ในสุกรที่ได้รับอาหารที่มีแมงกานีสสูงเกินไปจะส่งผลให้ยับยั้งการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ มีรายงานความเป็นพิษของแมงกานีสในแกะที่ได้รับในขนาดเกิน MTL ทำให้แกะโตช้า เบื่ออาหาร น้ำหนักลด โลหิตจาง ส่วนในโคค่อนข้างทนต่อความเป็นพิษของแมงกานีส แต่อาจพบอาการขาแข็ง

โคบอลต์

โคบอลต์เป็นธาตุที่เป็นส่วนประกอบของวิตามินบี 12 และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์บางชนิด ปกติแล้วอาหารสัตว์มีโคบอลต์เพียงพอจึงไม่จำเป็นต้องเสริม อย่างไรก็ตามมีรายงานความเป็นพิษของโคบอลต์ในโคและแกะทำให้สัตว์เบื่ออาหาร ท้องเสีย ขนหยาบ ขาแข็ง หลังโก่ง กล้ามเนื้อสันทำงานไม่สัมพันธ์กัน ชัก และตายได้ ในสุกรค่อนข้างทนต่อความเป็นพิษของโคบอลต์ แต่อาจพบอาการโลหิตจางส่วนในสัตว์ปีกความเป็นพิษของโคบอลต์อาจส่งผลให้หัวใจโต และเกิดท้องมาน

โครเมียม

โครเมียมเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาของน้ำตาลกลูโคสในกระบวนการเผาผลาญน้ำตาล ปัจจุบันมีรายงานว่าโครเมียมเป็นแร่ธาตุที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างผลผลิตของโค สุกร และไก่ ถ้าสัตว์ได้รับโครเมียมมากเกินไประดับ MTL (ในตารางภาคผนวก 3) จะแสดงอาการเบื่ออาหาร ท้องเสีย ซึม ตัวสั่น หายใจหอบ

ตารางที่ 2-1 เป็นการสรุปอาการของความเป็นพิษทั้งอาการทางคลินิกที่แสดงแบบเด่นชัดและแบบแฝงที่เกิดจากความเป็นพิษของแร่ธาตุในปศุสัตว์

ตารางที่ 2-1 อาการทางคลินิกแบบเด่นชัดและแบบแฝงของสัตว์ที่เกิดจากความเป็นพิษของ
แร่ธาตุ

แร่ธาตุอาหาร	อาการทางคลินิกแบบเด่นชัด	อาการแบบแฝง
แคลเซียม	กินอาหารลดลง น้ำหนักลด นมลด ผิวหนังแห้ง	ระดับแคลเซียมในพลาสมาเพิ่มสูงขึ้น ระยะเวลาที่ทำให้เลือดหยุดนานขึ้น
ฟอสฟอรัส	กินอาหารลดลง	พบนิวในทางเดินปัสสาวะ มีภาวะกระดูกเสื่อม ไตเสื่อมและมีการกระจายตัวของผลึกแคลเซียมในเนื้อเยื่ออ่อน
แมกนีเซียม	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด โตช้า ไข่เปลือกบาง	ไม่มีรายงาน
โซเดียมคลอไรด์	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด บวม น้ำ อ่อนแอ มีอาการทางประสาท ท้องเสีย ชัก อัมพาต และ ตาย	ไม่มีรายงาน
โปแตสเซียม	กินอาหารลดลง น้ำหนักลด	พบนิวในทางเดินปัสสาวะ การตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram) ผิดปกติ
ซัลเฟอร์	กล้ามเนื้อสั่น กินอาหารลดลง ท้องเสีย หายใจหอบ	ไม่มีรายงาน
ทองแดง	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด โลหิตจาง ดีซ่าน ปัสสาวะสีแดง ไตเสื่อมและตาย	โลหิตจาง คับสีเหลือง มีเลือดออกและมีแผลหลุมที่กระเพาะอาหาร ปอดบวม น้ำ ระดับของทองแดงในตับและไตเพิ่มสูงขึ้น
เหล็ก	กินอาหารลดลง น้ำหนักลด กระดูกอ่อน ท้องเสีย กล้ามเนื้อสั่น ชัก หายใจหอบ โคม่า และตาย	ผนังกระเพาะอาหารบวม น้ำ และมีเนื้อตาย กล้ามเนื้อซีด ไตบวม กล้ามเนื้อหัวใจมีเลือดออก มีน้ำในช่องอก ตับมีจุดเนื้อตาย
ซีลีเนียม	น้ำหนักลด เบื่ออาหาร ขนร่วง กีบร้อนแตก อัตราการผสมติดลดลง จำนวนลูกต่อครอกลดลง นอนหมอบ กล้ามเนื้อบิด อ่อนแอและตายแรกคลอด หายใจหอบ อาเจียน เดินเป็นวงกลม ชนสิ่งกีดขวาง กล้ามเนื้อสั่น เป็นอัมพาต ตาบอดและตาย	กระเพาะอาหารและลำไส้อักเสบ

ตารางที่ 2-1 อาการทางคลินิกแบบเด่นชัดและแบบแฝงของสัตว์ที่เกิดจากความเป็นพิษของ
แร่ธาตุ (ต่อ)

แร่ธาตุอาหาร	อาการทางคลินิกแบบเด่นชัด	อาการแบบแฝง
สังกะสี	กินอาหารลดลง น้ำหนักลด ซ้ออักเสบ กระเพาะอาหารและลำไส้อักเสบ	พบการเสื่อมในตับและไต ปอดบวมน้ำ
ไอโอดีน	น้ำหนักลด ซึม ผิวหนังอักเสบ ขนร่วง	กระเพาะอาหารอักเสบ ลำไส้อักเสบ
แมงกานีส	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด ขาแข็ง	โลหิตจาง ค่าฮีโมโกลบินลดต่ำลง
โคบอลต์	เบื่ออาหาร ท้องเสีย น้ำหนักลด ขนหยาบ ขาแข็ง หลังโก่ง กล้ามเนื้อสั่น ทำงานไม่ สัมพันธ์กัน ชักและตาย	โลหิตจาง
โครเมียม	เบื่ออาหาร ท้องเสีย หายใจหอบ	ไม่มีรายงาน

ต่อไปจะขอกว่าถึงการขาดแร่ธาตุอาหารในปศุสัตว์ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จาก
สาเหตุดังต่อไปนี้คือ

1. สัตว์กินอาหารน้อยลง (Reduced feed intake) จะส่งผลโดยตรงทำให้สัตว์
มีการขาดแร่ธาตุอาหารที่ควรได้รับ เช่น ภาวะที่สัตว์มีความเครียด ตั้งท้อง หรือให้นม เป็น
ต้น
2. การเตรียมสูตรอาหารที่ผิดพลาด (Diet formulation errors) และการให้
สารอาหารมากเกินไป (Nutrient excess) เช่นการเติมแร่ธาตุอาหารในปริมาณที่ไม่ถูกต้อง
น้อยเกินไปหรือมากเกินไปหรือ แร่ธาตุที่เติมเข้าไปอาจส่งผลไปรบกวนแร่ธาตุเดิมที่มีอยู่
ในสูตรอาหารทำให้ไม่อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้ จึงเกิดภาวะการขาดแร่ธาตุตามมา เช่น
การให้แร่ธาตุแคลเซียมในสัดส่วนที่สูงมาก อาจส่งผลให้มีการดูดซึมของฟอสฟอรัสลดลง

3. การเลี้ยงแบบปล่อยให้สัตว์หากินเอง หรือเลี้ยงซ้ำในที่เดิมเป็นเวลานาน โดยไม่มีการปรับปรุงดิน ซึ่งทำให้ดินหรือพืชอาหารสัตว์ที่ขึ้นบริเวณนั้นมีแร่ธาตุบางอย่างน้อย

การขาดแร่ธาตุ (Mineral deficiencies)

แร่ธาตุหลัก

แคลเซียม

เป็นแร่ธาตุที่มีปริมาณสูงที่สุดในร่างกายและมีความสำคัญดังได้กล่าวแล้ว อาการของสัตว์ที่ขาดแคลเซียมโดยเฉพาะในช่วงที่ร่างกายมีความต้องการแคลเซียมสูง เช่น ในช่วงการเจริญเติบโต ตั้งท้อง และให้นม เป็นต้น ถ้าได้รับแคลเซียมจากอาหารน้อยทำให้ร่างกายต้องดึงแคลเซียมจากกระดูกมาใช้เพื่อรักษาสมดุลของแคลเซียมในเลือดทำให้กระดูกขาดความแข็งแรง และถ้าหากสัตว์ได้รับอาหารที่มีแคลเซียมต่ำเป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะในช่วงที่เป็นลูกสัตว์หรือยังอายุน้อยจะทำให้เกิดโรคกระดูกอ่อน กระดูกบาง ข้อต่อบวม ในโคนมหลังคลอดอาจมีปัญหการขาดแคลเซียมที่แสดงออกให้เห็นคือ โรคไข้น้ำนม (Milk fever) โรคนี้มักจะพบในแม่โคนมที่คลอดลูกตัวที่ 3 หรือมีลูกมาแล้ว 3 ตัวขึ้นไป โดยพบอาการป่วย 24-27 ชั่วโมงหลังคลอด คือมีระดับแคลเซียมในกระแสเลือดต่ำ เนื่องจากฮอร์โมนที่ทำหน้าที่ดึงแคลเซียมจากกระดูกอยู่ในภาวะเฉื่อย มักพบในโคนมที่อ้วนและให้นมสูง สัตว์แสดงอาการกล้ามเนื้อกระดูก แม่โคมักจะนอนคอพับหันหน้าไปทางขวา ขาหลังอ่อน ม่านตาขยาย หายใจหอบ ซัก และอาจตายได้หากไม่ได้รับการรักษาอย่างทันที่ นอกจากนี้การขาดแคลเซียมเป็นระยะเวลานานๆจะทำให้สัตว์โตช้า น้ำหนักลด กินอาหารน้อยและน้ำนมนลด ระดับแคลเซียมในพลาสมาลดลง ระดับ

ฟอสฟอรัสและแอลคาไลน์ฟอสฟาเตสในซีรัมสูงขึ้น ในสัตว์ปีกที่ขาดแคลเซียมจะพบว่าการเจริญเติบโตและผลผลิตไข่ลดลง ไข่เปลือกบาง

ฟอสฟอรัส

เป็นแร่ธาตุที่มีความสัมพันธ์กับแคลเซียมอย่างมาก การขาดฟอสฟอรัสมีผลทำให้สัตว์อายุน้อยเกิดโรคกระดูกอ่อน และในสัตว์ที่โตเต็มที่แล้วเกิดโรคกระดูกผุเช่นเดียวกับการขาดแคลเซียม ในโคกระบือการขาดฟอสฟอรัสจะทำให้สัตว์เบื่ออาหารและแสดงพฤติกรรมผิดปกติ เช่น กินหรือแทะไม้บริเวณคอก เกี้ยวพิน ซึ่งอาการนี้เรียกว่า Pica และเลี่ยน ขี้อ่อน กระดูกแตกง่าย เป็นต้น ถ้าขาดฟอสฟอรัสเป็นระยะเวลานานทำให้ระดับแคลเซียมและแอลคาไลน์ฟอสฟาเตสสูงขึ้น ร่างกายอ่อนแอ ในโคนมจะมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ มีอัตราการผสมติดต่ำ และผลผลิตน้ำนมลดลง

แมกนีเซียม

เป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของกระดูกและฟัน และเนื้อเยื่อต่างๆ ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบประสาท และระบบกล้ามเนื้อ การขาดแมกนีเซียมในลูกโคระยะก่อนหย่านม จะทำให้การสะสมแมกนีเซียมในกระดูกลดลง ลูกสัตว์จะเบื่ออาหาร ระบบประสาทไวต่อความรู้สึก สัตว์จะตกใจง่าย มีอาการคันตัวอยู่เสมอ กล้ามเนื้อบิด มีอาการชักกระตุกตามกล้ามเนื้อส่วนต่างๆของร่างกาย พบได้ในโคที่เข้าแทะเล็มหญ้าในแปลงที่ยังอ่อนอยู่ซึ่งหญ้าที่ขึ้นใหม่หรือหญ้าอ่อนอาจขาดแมกนีเซียมทำให้โคแสดงอาการที่เรียกว่า “Grass tetany” โดยโคจะมีการหดตัวของกล้ามเนื้อที่คอ เกร็งคอหรือคอแข็งและอาจถึงตายได้ ส่วนในโคที่โตเต็มที่แล้วการขาดแมกนีเซียมทำให้สัตว์เบื่ออาหาร

ความสมบูรณ์ทางเพศต่ำ กล้ามเนื้อกระดูก การเคลื่อนไหวของร่างกายผิดปกติ ขาแข็ง
กระดูกสั้น (Short bone) เดินลำบาก ซุปพอม ขนหยาบแข็ง และอาจตายได้

โซเดียมคลอไรด์ (เกลือแกง)

โซเดียมคลอไรด์ที่พบได้ในชีวิตประจำวันคือเกลือที่ใช้รับประทานอาหาร เกลือ
มักถูกใช้ผสมในอาหารสัตว์เพื่อกระตุ้นให้สัตว์อยากกินอาหารและกินได้มาก ถ้าอาหาร
โปรตีนในสูตรอาหารส่วนใหญ่มาจากพืช มักทำให้ขาดเกลือ เมื่อสัตว์ขาดเกลือการกิน
อาหารจะลดลงอย่างรวดเร็ว น้ำหนักลด เชื่องซึม นัยน์ตาดก ทะลอกหรือกัสดาง มี
ปัสสาวะน้อยลง ระดับของโซเดียมไอออนในของเหลวภายนอกเซลล์ เช่น พลาสมา ซีรัม
และน้ำลายลดลง ในวัตถุดิบอาหารตามธรรมชาติจะขาดเกลือจึงจำเป็นที่จะต้องเสริมให้
สัตว์อย่างเพียงพอ นอกจากนั้นในวันที่อากาศร้อนกว่าปกติสัตว์จะกินเกลือมากขึ้น การให้
เกลือนั้นต้องมีน้ำให้กินตลอดเวลา การดูดซึมของคลอไรด์ในรูปของคลอไรด์ไอออนจะเกิด
ที่ลำไส้เช่นเดียวกับโซเดียม คลอไรด์ส่วนที่เกินกว่าความต้องการจะถูกขับออกจากร่างกาย
ทางปัสสาวะ ในสัตว์ที่ขาดคลอไรด์มักจะขาดร่วมกับโซเดียม อาการขาดคลอไรด์และ
โซเดียมคือ เบื่ออาหาร โตช้า น้ำหนักลด ขนหยาบกร้าน รวมถึงน้ำหนักลด ระดับโซเดียม
และคลอไรด์ในพลาสมา ซีรัมและน้ำลายลดน้อยลง ระดับของโปแตสเซียมในพลาสมา
เพิ่มขึ้นระดับของโปรตีนรวมในพลาสมาเพิ่มขึ้น

โปแตสเซียม

โปแตสเซียมทำหน้าที่ในกระบวนการ Osmosis ของของเหลวในร่างกาย การยึด
หดของกล้ามเนื้อและการทำงานของระบบประสาท การขาดโปแตสเซียมในลูกโคอาจ
เนื่องจากได้รับน้ำนมที่มีโปแตสเซียมต่ำ แต่ในสัตว์ที่โตเต็มที่หรือสัตว์ที่กำลังเจริญเติบโต

การขาดโปแตสเซียมอาจเกิดจากกินอาหารชั้นในสัดส่วนที่สูงกว่าอาหารหยาบ สัตว์จะแสดงอาการเบื่ออาหาร น้ำหนักลด ขนหยาบ กล้ามเนื้ออ่อนแอ กล้ามเนื้อลีบ เดินโซเซ เคลื่อนไหวช้าและพอมแห้ง อัตราการเดินของหัวใจลดลงกล้ามเนื้อหัวใจมีจุดเนื้อตาย ในสัตว์อายุน้อยอาจเป็นอัมพาตและตายได้

ซัลเฟอร์

เป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดอมิโนหลายชนิด ถ้าสัตว์ได้รับซัลเฟอร์ในอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย อาการขาดซัลเฟอร์ของสัตว์ที่สามารถสังเกตเห็นได้แก่ ขน ผม และเล็บมีลักษณะผิดปกติ ในแกะการขาดซัลเฟอร์จะทำให้ได้ขนแกะที่มีคุณภาพต่ำ

แร่ธาตุรอง

ทองแดง

ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสัตว์ทุกชนิด เนื่องจากทำหน้าที่สังเคราะห์ฮีโมโกลบินร่วมกับเหล็ก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิด การขาดธาตุทองแดงในสัตว์ทำให้เกิดโลหิตจางแบบ Hypochromic microcytic anemia ในโคและแกะ เนื่องจากการขาดทองแดงทำให้มีการดูดซึมธาตุเหล็กได้น้อยลง และยังทำให้เม็ดเลือดแดงมีฮีโมโกลบินน้อย ส่วนในลูกโคอาจพบอัมพาตที่ขาหลัง ส่วนในแกะจะพบความผิดปกติที่ขน ทำให้ขนมีคุณภาพต่ำและสีขนเปลี่ยน เช่นจากสีดำกลายเป็นเทา เป็นต้น ในสุกรมีอาการเดินกล้ามเนื้อไม่สัมพันธ์กัน หรือเดินเอียงไปมา

เหล็ก

เหล็กมีหน้าที่ในระบบน้ำย่อย และยังเป็นส่วนหนึ่งของฮีโมโกลบินในเซลล์เม็ดเลือดแดง การขาดเหล็กในสัตว์จะทำให้กินอาหารน้อยลง น้ำหนักลด ขนหยาบ ผิวหนังเหี่ยว หายใจหอบ และตาย นอกจากนี้อาจพบโลหิตจางแบบ Hypochromic microcytic anemia เลือดจางเหมือนน้ำ ภูมิคุ้มกันต่ำลง หัวใจและม้ามโต มีไขมันแทรกในตับ ท้องมาน ระดับเหล็กในซีรัมลดลง ในลูกสุกรมีอัตราการเติบโตที่รวดเร็วมากทำให้มีความต้องการใช้ธาตุเหล็กสูงเมื่อเทียบกับสัตว์ชนิดอื่น ส่วนในโค ถ้าไม่เสริมธาตุเหล็กให้เพียงพออาจแสดงอาการโลหิตจาง อ่อนแอ ส่วนในโคธาตุเหล็กต้องการมากในลูกโคและโครุ่นมากกว่าในโคที่เต็มวัย แต่ธาตุเหล็กมักไม่เต็มในสูตรอาหารเพราะวัตถุดิบที่นำมาประกอบสูตรอาหารมักจะมีธาตุเหล็กรวมกันแล้วเพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย การเสริมธาตุเหล็กที่มากเกินไปอาจมีผลเสียเพราะเหล็กจะไปจับกับฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปที่สัตว์ใช้ประโยชน์ไม่ได้ อันจะทำให้เกิดการขาดฟอสฟอรัสตามมา ส่วนสัตว์ปีกแม้ต้องการธาตุเหล็กเพียงเล็กน้อย ถ้าขาดก็จะแสดงอาการโลหิตจางแต่ถ้าได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดพิษ (Toxicity) ได้

ซีลีเนียม

ซีลีเนียมเป็นแร่ธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อย แต่มีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของร่างกายเป็นอย่างมาก โดยเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ที่สำคัญซึ่งช่วยในการปกป้องเซลล์จากอนุมูลอิสระ แต่ถ้าสัตว์ได้รับไม่เพียงพอก็จะทำให้เกิดโรค ซึ่งการเกิดโรคมักสัมพันธ์กับการขาดวิตามินอีด้วย เพราะซีลีเนียมช่วยในการดูดซึมและใช้ประโยชน์ของวิตามินอีและช่วยลดอาการขาดวิตามินอี ก็จะต้องการวิตามินอีมากขึ้นถ้าได้รับอาหารที่ขาดซีลีเนียม ในไก่การขาดซีลีเนียมทำให้ ไก่ไข่ลด การฟักตัว นอกจากนั้นการขาดซีลีเนียมจะทำให้เกิดอาการ Nutritional muscular dystrophy หรือโรคที่ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจและกล้ามเนื้อลายมีสีซีดและแห้งเหี่ยว ข้อยาเจ็บเดินไม่สะดวก โรคนี้เกิดได้ในลูกโค

อายุ 4-6 สัปดาห์ ลูกแกะอายุ 3-4 สัปดาห์ มีรายงานการขาดซีลีเนียมในสุกรและสัตว์ปีกมานานแล้ว ซีลีเนียมเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการทำหน้าที่ต่างๆของกล้ามเนื้อ หัวใจ ตับ ตับอ่อน จึงมักพบรอยโรคการเสื่อมของกล้ามเนื้อ (Muscular degeneration) หรือ White muscle disease (WMD) โดยที่กล้ามเนื้อต่างๆโดยเฉพาะกล้ามเนื้อลายจะผิดปกติทำให้สัตว์ไม่สามารถยืนหรือเดินได้อย่างปกติ ตับอ่อนเสื่อม พบเนื้อตายที่ตับ มีน้ำในถุงหุ้มหัวใจ มีแผลในกระเพาะอาหาร ระดับซีลีเนียมในซีรัมและกล้ามเนื้อลายลดลง ในประเทศไทย สันทนาและคณะ (2558) รายงานการขาดซีลีเนียมร่วมกับการขาดวิตามินอีในห่านและเป็ดเทศซึ่งส่งผลให้เกิดอาการผิดปกติโดยห่านแสดงอาการเดินโซเซ กล้ามเนื้อกระตุก (ภาพที่ 2-3) ชักและตาย ส่วนในเป็ดเทศแสดงอาการเบื่ออาหาร ขาอ่อนแรงเดินไม่ได้ (ภาพที่ 2-4) เมื่อทำการผ่าซากและตรวจรอยโรคทางจุลพยาธิวิทยาพบรอยโรคกล้ามเนื้อเสื่อม และพบการเสื่อมของตับอ่อน ซึ่งเมื่อส่งตัวอย่างซีรัมสัตว์ป่วยตรวจทางห้องปฏิบัติการพบว่าระดับของซีลีเนียมและวิตามินอีต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าดังกล่าวในสัตว์ปกติและในกรณีนี้พบว่าเป็ดเทศเป็นสัตว์ปีกที่ทนต่อภาวะการขาดวิตามินอีและซีลีเนียมมากกว่าในห่าน



ภาพที่ 2-3 ห่านแสดงอาการป่วยแบบเด่นชัด เดินโซเซ ขาอ่อนแรง กล้ามเนื้อกระตุก ชัก และตายเนื่องจากขาดซีลีเนียม



ภาพที่ 2-4 เป็ดเทศแสดงอาการขาหลังอ่อนแรง เดินไม่ได้เนื่องจากขาดซีลีเนียม

สังกะสี

สังกะสีเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อยหลายชนิดในร่างกาย โคที่ขาดธาตุสังกะสี จะทำให้เบื่ออาหาร โตช้า ขนยุ่ง มีความผิดปกติที่ขนและผิวหนังตามส่วนต่างๆ ของร่างกาย เช่น โคนหาง หู เข้า จมูก คอ และขาหลัง ขนร่วง ผิวหนังหนาตัวแบบที่เรียกว่า Parakeratosis คือลักษณะที่เซลล์บนผิวหนังชั้น Stratum corneum ที่มีหน้าที่ในการสร้างสารเคราตินที่เป็นองค์ประกอบของผิวหนังยังคงมีนิวเคลียสค้างไว้อยู่บนชั้นหนังกำพร้า ซึ่งปกติจะไม่ปรากฏให้เห็นแล้วทำให้มีแผ่นแห้งๆที่เป็นสารเคราตินสะสมอยู่มาก ในสุกรอาการขาดสังกะสีเกิดได้ทุกช่วงอายุ สุกรมีอาการผิวหนังหยาบแห้งหนาเป็นแผ่นแข็งแห้งตกสะเก็ดเป็นขุยบางๆ มีร่องหยาบๆ และไม่มีอาการคัน (ภาพที่2-5) ในรายที่เป็นรุนแรงจะโตช้า แคระแกร็น กระดูกผิดปกติ ต่อมน้ำนมเล็ก อั้นทะฝ่อ ระบบสืบพันธุ์ทำงานไม่ปกติ และแม้สุกรอาจแท้งลูกได้ การวินิจฉัยโรคต้องทำการตรวจวิเคราะห์ระดับสังกะสีในซีรัม เนื้อเยื่อและน้ำนมซึ่งจะมีค่าลดลง ระดับอัลบูมินและอัลคาไลน์ฟอสฟาเตสลดลง ร่วมกับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุสังกะสีในอาหาร



ภาพที่ 2-5 สุกรที่ขาดธาตุสังกะสีมีรอยโรค Parakeratosis โดยมีผิวหนังหยาบแห้งหนาเป็นแผ่นแข็ง ตกสะเก็ดเป็นขุยบริเวณปลายขาทั้งสี่

ที่มา : The Merck Veterinary Manual (2014)

ไอโอดีน

ไอโอดีนเป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบของ Thyroid hormone ซึ่งผลิตจากต่อมไทรอยด์ โดยมีบทบาทต่อการเจริญเติบโต และควบคุมการเผาผลาญสารอาหารของร่างกายโดยเฉพาะเมตาโบลิซึมของคาร์โบไฮเดรต อาการของสัตว์ที่ขาดธาตุไอโอดีนจะทำให้ปริมาณ Thyroid hormone ลดลงและขนาดของต่อมไทรอยด์จะเพิ่มขึ้นและมีจุดเลือดออก เกิดอาการคอหอยพอก (Goiter) และทำให้อัตราการเผาผลาญต่ำ (Low metabolic rate) วงรอบการเป็นสัดผิดปกติ ในแม่ที่ดื่มน้ำจะทำให้ลูกสัตว์อ่อนแอ ผิวหนังหนา ไม่มีขน ตายแรกคลอด พบว่าดินบางพื้นที่ในประเทศไทยขาดธาตุไอโอดีนโดยเฉพาะในภาคเหนือเช่น ที่สถานีบำรุงพันธุ์สัตว์ห้วยแก้ว จังหวัดเชียงใหม่ ทำให้ลูกสุกรที่คลอดออกมาบางตัวแสดงอาการคอหอยพอก และบางตัวผิวหนังเปลี่ยนไม่มีขน หนังรอบคอและไหล่หนา อ่อนแอ และบางตัวตาย

แมงกานีส

มีความสัมพันธ์ต่อการสืบพันธุ์ แมงกานีสมักจะไม่ค่อยขาดหรือมีปัญหาในโคมากนักเพราะในอาหารหยาบจะมีระดับของแมงกานีสสูง โดยทั่วไปสัตว์ต้องการแมงกานีสเพื่อใช้ในกระบวนการสืบพันธุ์มากกว่าใช้เพื่อการเจริญเติบโต อาการขาดแมงกานีสที่เห็นได้ชัดเจนในสัตว์ คือจะทำให้การเจริญเติบโตของกระดูกผิดปกติ สัตว์เติบโตช้า ระบบสืบพันธุ์ไม่สมบูรณ์ อัตราการผสมติดต่ำ วงรอบการเป็นสัดคลาดเคลื่อน การพัฒนาของเซลล์สืบพันธุ์ไม่สมบูรณ์และอาจเป็นหมันได้ ในสุกรที่ขาดแมงกานีสจะแสดงอาการขาเจ็บเพราะกระดูกและเอ็นจะอ่อนแอ กระดูกโค้งงอ

โคบอลต์

โคบอลต์เป็นองค์ประกอบของวิตามินบี12 พบว่าจุลินทรีย์จะสังเคราะห์วิตามินบี 12 ได้เมื่อมีระดับของธาตุโคบอลต์เพียงพอ ถ้าขาดโคบอลต์ร่างกายสัตว์ก็จะขาดวิตามิน บี 12 ด้วย สัตว์ที่ขาดโคบอลต์จะทำให้กินอาหารลดลง น้ำหนักลด อ่อนแอ ผอมแห้ง โลหิต จาง ขนจะหยิกและแข็งมาก

โครเมียม

โครเมียมเป็นแร่ธาตุในยุคใหม่ที่เคยคิดว่าไม่มีความจำเป็นในการเสริมไปในสูตรอาหาร แต่งานวิจัยใหม่ๆพบว่าโครเมียมมีความจำเป็นที่ต้องเสริมในอาหารสุกร โค และ สัตว์ปีก เพราะมีความสำคัญต่อปฏิกิริยาการสร้างโปรตีน และ กรดนิวคลีอิก รวมทั้ง เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาโบลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน การขาด โครเมียมจะทำให้สัตว์เบื่ออาหาร เกิดความผิดปกติของระดับกลูโคสในร่างกาย มีระดับ อินซูลินมากเกินไปในกระแสเลือด ภูมิคุ้มกันอ่อนแอ ลดประสิทธิภาพในการเสริมสร้าง กล้ามเนื้อ การเสริมโครเมียมในแม่สุกร สัตว์ปีก และ โค พบว่าทำให้ผลผลิตดีขึ้น

อาการทางคลินิกที่เกิดจากการขาดแร่ธาตุอาหารชนิดต่างๆ ในปศุสัตว์มี ทั้งอาการที่แสดงแบบเด่นชัดและอาการแบบแฝงดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 อาการทางคลินิกแบบเด่นชัดและแบบแฝงของสัตว์ที่เกิดจากการขาดแร่ธาตุอาหาร

แร่ธาตุอาหาร	อาการทางคลินิก	อาการแบบแฝง
แคลเซียม	กระดูกอ่อน กระดูกบาง ขาเจ็บ ข้อต่อ บวม ไขนํ้านม กล้ามเนื้อหดเกร็ง ขา หลังเป็นอัมพาตและตายได้	กระดูกหักง่าย โตช้า น้ำหนักลด ระดับ แคลเซียมในพลาสมาลดลง ระดับ ฟอสฟอรัสและแอลคาไลน์ฟอสฟาเตสใน ซีรัมสูงขึ้น ผลผลิตลดลง
ฟอสฟอรัส	น้ำหนักลด กระดูกอ่อน กระดูกผุ กระดูกโค้งงอ อัมพาตขาหลัง เลี้ยวพิน Pica	กระดูกหักง่าย ระดับแคลเซียมและ อัลคาไลน์ฟอสฟาเตสสูงขึ้น อ่อนแอ อัตรา การผสมติดต่ำ
แมกนีเซียม	เบื่ออาหาร ชูบพอม ขนหยาบแข็ง กระวนกระวาย กล้ามเนื้อบิด ชักกระดูก ขาแข็ง กระดูกสัน เค้นลำบาก ไม่อยาก ลุก ร่างกายเสียสมดุล กล้ามเนื้อเกร็งและ ตาย Grass tetany	ระดับแมกนีเซียมและแคลเซียมในกระแส เลือดลดลง ระดับแมกนีเซียมในกระดูก ลดลง ความสมบูรณ์ทางเพศต่ำ
โซเดียมคลอไรด์	กินอาหารลดลง น้ำหนักลด กินน้ำน้อย บางทีอาจพบก้นทาง	ระดับโซเดียมและคลอไรด์ในพลาสมา ซีรัมและน้ำลายลดน้อยลง ระดับของ โปแตสเซียมในพลาสมาเพิ่มขึ้นระดับของ โปรตีนรวมในพลาสมาเพิ่มขึ้น
โปแตสเซียม	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด ขนหยาบ กล้ามเนื้ออ่อนแอ เคลื่อนไหวช้า ในสัตว์ อายุน้อยอาจเป็นอัมพาตและตายได้	อัตราการเต้นของหัวใจลดลง กล้ามเนื้อ หัวใจมีจุดเนื้อตาย
ซิลเวอร์	สีขนเปลี่ยน ขนหยาบ เล็บผิดปกติ	ไม่มีรายงาน
ทองแดง	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด ขาโก่ง กระดูกหักง่าย กล้ามเนื้อเสียการทรงตัว ขนหยาบ สีขนเปลี่ยน	โลหิตจางแบบ Hypochromic microcytic anemia

ตารางที่ 2-2 อาการทางคลินิกแบบเด่นชัดและแบบแฝงของสัตว์ที่เกิดจากการขาดแร่ธาตุอาหาร (ต่อ)

แร่ธาตุอาหาร	อาการทางคลินิก	อาการแบบแฝง
เหล็ก	กินอาหารน้อยลง น้ำหนักลด ขนหยาบ ผิวหนังเหี่ยว หายใจหอบ และตาย	โลหิตจางแบบ Hypochromic microcytic anemia หัวใจและม้ามโต มีไขมันแทรกในตับ ท้องมาน ระดับเหล็กในซีรัมลดลง เลือดจางเหมือนน้ำ ภูมิคุ้มกันลดลง
ซีลีเนียม	น้ำหนักลด กล้ามเนื้อขาอ่อนแรงเดิน ไม่ได้ ไช่ลด ตายกระทันหัน	กล้ามเนื้อลายและกล้ามเนื้อหัวใจเสื่อม ตับอ่อนเสื่อม พบเนื้อตายที่ตับ มีน้ำในถุงหุ้มหัวใจ มีแผลในกระเพาะอาหาร ระดับซีลีเนียมในซีรัมและกล้ามเนื้อลายลดลง
สังกะสี	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด โตช้า ผิวหนัง หยาบ Parakeratosis	ระดับของสังกะสีในซีรัม เนื้อเยื่อ และน้ำนมลดลง ระดับอัลบูมินและอัลคาไลน์-ฟอสฟาเตสลดลง อัมพาตเล็กน้อย ต่อมน้ำนมเล็ก
ไอโอดีน	คอหอยพอก (Goiter) ต่อมน้ำไทรอยด์โต ขนร่วงแบบ Hairless	ต่อมน้ำไทรอยด์ขยายใหญ่และมีจุดเลือดออก ระดับไอโอดีนในพลาสมาต่ำ Thyroid hormone ลดลง อัตราการเผาผลาญต่ำ วงรอบการเป็นสัดผิดปกติ
แมงกานีส	โตช้า ขาเจ็บ กระดูกโค้งงอ ขอบวมโต ขาสั้น น้ำนมลด ลูกอ่อนแอแรกคลอด	ระบบสืบพันธุ์ไม่สมบูรณ์ อัตราการผสมติดต่ำ วงรอบการเป็นสัดคลาดเคลื่อน
โคบอลต์	เบื่ออาหาร น้ำหนักลด โลหิตจาง ขน หยาบและแข็ง	ไม่มีรายงาน
โครเมียม	เบื่ออาหาร อ่อนแอ	ภูมิคุ้มกันอ่อนแอ ลดประสิทธิภาพในการเสริมสร้างกล้ามเนื้อ ระดับกลูโคสในร่างกายผิดปกติ ระดับอินซูลินในกระแสเลือดสูง

บทที่ 3

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแร่ธาตุ

โดยทั่วไปแล้วสัตว์มีความต้องการแร่ธาตุหลายชนิดมากกว่าที่คำนวณในสูตรอาหารซึ่งมักประกอบด้วย แคลเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียมและคลอไรด์เป็นส่วนในใหญ่อาหารสัตว์บางอย่างเช่นอาหารสัตว์ที่ได้จากพืชตระกูลถั่วอาจไม่จำเป็นต้องเสริมแคลเซียมในสูตรอาหารเลยเพราะได้รับแคลเซียมอย่างเพียงพอแล้ว หรือในโคถ้าให้อาหารหยาบจากแหล่งที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ ต้องมีการเสริมแร่ธาตุในส่วนที่ขาดเข้าไปในอาหาร เพราะพืชจากแหล่งนั้นย่อมมีระดับแร่ธาตุบางชนิดต่ำตามสภาพของดินที่พืชชนิดนั้นขึ้นอยู่ อย่างไรก็ตามการเสริมแร่ธาตุชนิดใด ต้องคำนึงถึงแร่ธาตุที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน โดยต้องไม่มีการเสริมแร่ธาตุชนิดหนึ่งมากเกินไปยับยั้งการทำงานของแร่ธาตุอีกชนิดหนึ่ง เพราะการได้รับแร่ธาตุบางอย่างมากเกินไปหรือแร่ธาตุบางอย่างมีปฏิกิริยาต่อกัน ตลอดจนความไม่สมดุลของแร่ธาตุล้วนมีส่วนทำให้สัตว์ได้รับแร่ธาตุบางอย่างน้อยลง ทั้งที่ปริมาณที่กินเพียงพอแต่ก็อาจส่งผลให้สัตว์แสดงอาการป่วยได้ เช่น ในโคนมมีสัดส่วนที่เหมาะสมของแร่ธาตุที่มีปฏิสัมพันธ์กันตามอัตราส่วนแนะนำตามตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สัดส่วนที่เหมาะสมของแร่ธาตุที่มีปฏิสัมพันธ์กันในอาหารโคนม

รายการแร่ธาตุ	สัดส่วนที่เหมาะสม
ทองแดง: โมลิบดีนัม	6:1
สังกะสี : แมงกานีส	1:1
สังกะสี : ทองแดง	4:1
เหล็ก : ทองแดง	20:1
โปแตสเซียม : โซเดียม	5:1
แคลเซียม: ฟอสฟอรัส	2:1

ที่มา: Hutjens (1999)

ในคู่มือนี้ขอยกตัวอย่างคู่ปฏิสัมพันธ์ของแร่ธาตุที่สำคัญดังนี้

ทองแดง-โมลิบดีนัม

ทองแดงเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสัตว์ทุกชนิด เนื่องจากทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินร่วมกับเหล็ก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิด รวมทั้งช่วยให้ระบบสืบพันธุ์ปกติ แร่ธาตุทองแดงและโมลิบดีนัมมีความสัมพันธ์กัน โดยปริมาณแร่ธาตุทั้งสองต้องมีความสมดุลกันเพื่อไม่ให้เกิดภาวะความเป็นพิษหรือการขาดแร่

ธาตุชนิดใดชนิดหนึ่งได้ เนื่องจากแร่ธาตุทั้ง 2 ตัวนี้จะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน โดยเฉพาะเมื่อมีซัลเฟต ร่วมอยู่ด้วย เมื่อกล่าวถึงความเป็นพิษของแร่ธาตุตัวหนึ่งจะต้องกล่าวควบคู่ไปกับการขาดแร่ธาตุอีกตัวหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ภาวะการขาดทองแดงจะมีอาการทางคลินิกเหมือนภาวะความเป็นพิษเนื่องจากโมลิบดีนัม และในทำนองเดียวกันภาวะการขาดโมลิบดีนัมจะมีอาการทางคลินิกเหมือนภาวะความเป็นพิษเนื่องจากทองแดง โดยเกาะเป็นสัตว์ที่มีความไวต่อความเป็นพิษของทองแดงหรือการขาดโมลิบดีนัมที่ผสมอยู่ในอาหารมากกว่าโค-กระบือ ส่วนโค-กระบือจะมีความไวต่อความเป็นพิษของโมลิบดีนัมหรือการขาดทองแดงในอาหารมากกว่าแกะ ดังนั้นจึงอาจแบ่งความเป็นพิษเป็น 2 รูปแบบ คือ

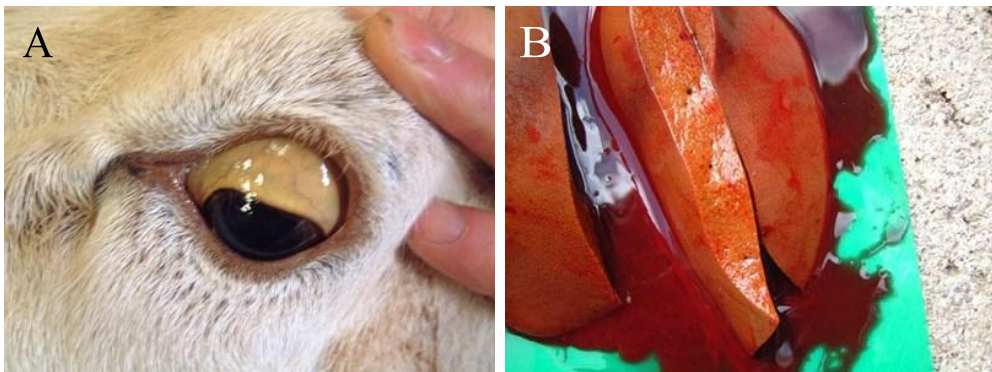
1. ความเป็นพิษจากทองแดงและภาวะขาดโมลิบดีนัม

ในแกะพบความเป็นพิษของทองแดงมากกว่าสัตว์ชนิดอื่น สาเหตุเนื่องจากมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ความไม่สมดุลของแร่ธาตุในอาหาร การใช้คอปเปอร์ซัลเฟตในการควบคุมพยาธิบางชนิดในแกะ การปนเปื้อนของทองแดงในดินและพืชบริเวณเหมือง และการควบคุมแกะไม่ให้ได้รับหญ้าสดที่มีโมลิบดีนัมเพียงพอที่จะป้องกันการสะสมของทองแดงจำนวนมากได้ เป็นต้น ในต่างประเทศมีรายงานการเกิดพิษของทองแดงอยู่เสมอ โดยพบมากที่สุดทวีปอเมริกาเหนือ เนื่องจากผู้เลี้ยงแกะให้อาหารที่มีส่วนผสมของทองแดงอยู่แต่ขาดโมลิบดีนัม พบว่าสัดส่วนของทองแดงต่อโมลิบดีนัมขนาด 4: 3 จะทำให้เกิดการขัดขวางการสะสมของทองแดงที่ตับ แต่หากเมื่อใดที่สัดส่วนผิดปกตินี้ไปมาก เช่น การเลี้ยงแกะในทุ่งหญ้าที่ใช้ปุ๋ยคอกของสุกรและไก่ซึ่งมีทองแดงเป็น Growth promotant ผสมอยู่ การให้อาหารสำเร็จรูปที่มีทองแดงเป็นส่วนประกอบอยู่ในสูตรและเป็นสูตรสำหรับเลี้ยงสุกร ไก่ และโค การเลี้ยงแกะด้วยพืชอาหารสัตว์ที่มีทองแดงและโมลิบดีนัมไม่สมดุลกัน และปัจจัยใดๆก็ตามที่ทำให้ปริมาณของทองแดงในตับของ

แกละสูงเกิน 150 ppm แกละจะแสดงอาการเป็นพิษทันที โดยทองแดงในระดับจะถูกขับออกมาทางกระแสเลือด และแกละจะแสดงอาการโลหิตจางอย่างรุนแรง ดีซ่าน โดยทั่วไปถ้าสัตว์ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนของทองแดงต่อโมลิบดีนัมขนาด 10:1 เป็นเวลานาน จะมีการสะสมของทองแดงที่ตับจนถึงจุดหนึ่ง สัตว์จะแสดงอาการป่วย โดยมี เบื่ออาหาร ชีด ซึม ปัสสาวะสีแสด ดีซ่าน ซึ่งแม้อัตราการป่วยจะต่ำ แต่อัตราการตายจะสูงมาก ในรายที่ป่วยอย่างเฉียบพลันที่เกิดจากการได้รับทองแดงในขนาดสูงมาก (Acute toxicity) สัตว์จะแสดงอาการน้ำลายไหล ท้องเสีย ไม่รู้สึกตัว และตายภายใน 24-48 ชั่วโมง กรณีความเป็นพิษแบบเรื้อรัง (Chronic toxicity) ของทองแดงในโค กระบือและแกละ ทองแดงจะมีการสะสมที่ตับ โดยระดับของทองแดงในเลือดจะมีค่าปกติ แต่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 24-48 ชั่วโมงก่อนที่สัตว์จะแสดงอาการป่วย รอยโรคที่พบจากการผ่าซาก พบตับเหลือง ถุงน้ำดีขยายใหญ่ และไตซีด การวินิจฉัยโรคต้องอาศัยการซักประวัติ สังเกตอาการทางคลินิกและตรวจดูรอยโรคจากการผ่าซากสัตว์ที่ตาย ควบคู่กับการวิเคราะห์ผลการตรวจทางห้องปฏิบัติการโดยการวิเคราะห์หาระดับของทองแดงในเลือดและในเนื้อเยื่อ รวมทั้งตรวจวิเคราะห์ทองแดงในอาหารสัตว์ด้วย ระดับปกติของทองแดงในเลือดจะมีค่า 0.75-1.35 ppm หากสูงกว่านี้แสดงว่าสัตว์เกิดความเป็นพิษ ระดับของทองแดงในตับของสัตว์ป่วยพบสูงกว่า 150 ppm ระดับของทองแดงในไตของสัตว์ป่วยพบสูงกว่า 15 ppm ระดับของทองแดงในอาหาร 25 ppm โดยมีโมลิบดีนัมอยู่น้อยกว่า 2 ppm ทำให้แกละเกิดอาการเป็นพิษจากทองแดงได้

สำหรับในประเทศไทยรัมภาและคณะ (2537) ได้รายงานความเป็นพิษของธาตุทองแดงในแกละซึ่งเลี้ยงด้วยอาหารโคชนิคัดเม็ดติดต่อกันเป็นเวลานานโดยไม่มีอาหารชนิดอื่นเสริมเลย อาหารโคชนีมีส่วนผสมของธาตุทองแดงสูงถึง 43.40 ppm และไม่มีโมลิบดีนัมผสมอยู่ด้วย ซึ่งสูงกว่าค่า MTL ในอาหารของแกละ (25 ppm) ดังนั้นทองแดงที่

กินเข้าไปจึงถูกเก็บสะสมอยู่ในตับจนกระทั่งแสดงอาการเกิดพิษ มีอาการโลหิตจาง อ่อนเพลีย
ดิ้นรนทั่วตัว ตับและไขมันมีสีเหลืองเข้ม และตายถึง 6 ตัวจากจำนวนแกะทั้งหมด 11 ตัว
และผลการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการพิษวิทยาและชีวเคมี จากตัวอย่างซีรัม
ตับ และไต ของแกะที่ป่วยตายพบปริมาณที่สูงกว่าปกติมาก



ภาพที่ 3-1 A. แกะแสดงอาการดีซ่าน เยื่อตาขาวมีสีเหลือง เนื่องจากพิษของทองแดง

B. ผ่าซากพบตับมีสีค่อนข้างเหลืองน้ำตาล

ที่มา: <http://www.nadis.org.uk/bulletins/copper-poisoning-in-sheep.aspx>

2. ความเป็นพิษจากโมลิบดีนัม-ภาวะขาดทองแดง

โดยทั่วไปโคกระบือจะมีความไวต่อสภาวะนี้มากกว่าแกะ หากอัตราส่วนของ
ทองแดงต่อโมลิบดีนัมในอาหารลดลงถึง 2:1 จะพบอาการเกิดพิษเนื่องจากโมลิบดีนัมได้
ในโคกระบือ โดยจะแสดงอาการท้องเสีย ถ่ายเป็นน้ำ เบื่ออาหาร ขนหยาบ ปวดข้อ น้ำนม
ลด กรณีความเป็นพิษแบบเรื้อรังจะพบกระดูกเสื่อม และกระดูกซี่โครงเปราะ ในแกะที่ขาด
ทองแดง ขนจะมีสีเข้ม โลหิตจาง ลูกแกะจะแสดงอาการทางประสาท เดินโซเซ ร่างกาย
ส่วนต่างๆ ทำงานไม่สัมพันธ์กัน

การวินิจฉัยโรคต้องอาศัยการซักประวัติ สังเกตอาการทางคลินิกและตรวจดูรอยโรคจากการผ่าซากสัตว์ที่ตาย ควบคู่กับการวิเคราะห์ผลการตรวจทางห้องปฏิบัติการโดยการวิเคราะห์หาระดับของทองแดงและโมลิบดีนัมในเลือดและในเนื้อเยื่อ รวมทั้งตรวจวิเคราะห์โมลิบดีนัมในอาหารสัตว์ด้วย

ระดับปกติของทองแดงในเลือดปศุสัตว์ส่วนใหญ่จะมีค่า 0.75-1.35 ppm และระดับปกติของโมลิบดีนัมในเลือดจะมีค่า 0.05 ppm ระดับของทองแดงในตับจะอยู่ระหว่าง 30-140 ppm ระดับของโมลิบดีนัมในตับของสัตว์จะน้อยกว่า 3-4 ppm

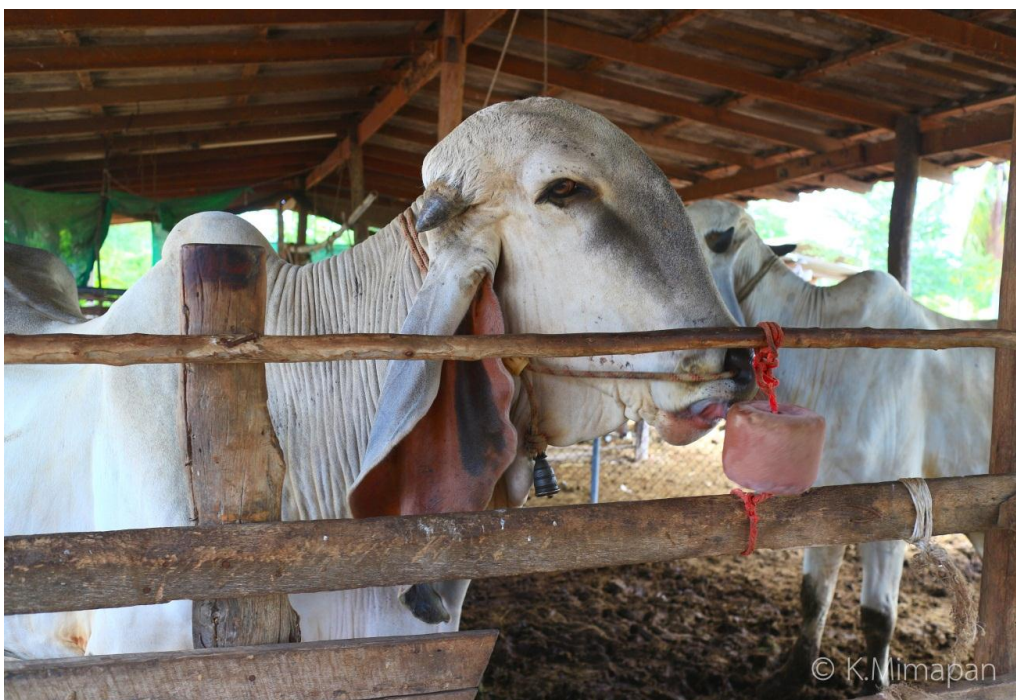
ระดับของทองแดงและโมลิบดีนัมในอาหารเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดพิษ โดยทั่วไปอัตราส่วนของทองแดงต่อโมลิบดีนัมในอาหารที่ปลอดภัยต่อโคกระบือ คือ 6:1 (ตารางที่ 3-1)

แคลเซียม-ฟอสฟอรัส

แคลเซียมและฟอสฟอรัสต้องมีความสมดุลในสัดส่วนที่พอเหมาะ โดยควรผสมแคลเซียมในอาหารในความเข้มข้นที่สูงกว่าฟอสฟอรัส เช่น 2:1 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ใช้กันทั่วไป และทำให้การใช้ประโยชน์ของฟอสฟอรัสมีประสิทธิภาพสูง แต่ถ้าสัดส่วนต่ำกว่า 1:1 จะมีผลกระทบต่อผลผลิตของสัตว์ อย่างไรก็ตามควรระมัดระวังว่าถ้ากินแร่ธาตุทั้งสองชนิดมากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษได้

อย่างไรก็ตามการคำนวณสูตรแร่ธาตุอาหารมักจะอ้างอิงความต้องการแร่ธาตุตามมาตรฐานการให้อาหารสัตว์ เช่น มาตรฐานการให้อาหารสัตว์ของสหรัฐอเมริกา (NCR) เป็นต้น และการเสริมแร่ธาตุในสัตว์สามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ การผสมลงในสูตรอาหาร หรือการตั้งให้เล็กลินอิสระ โดยการผสมลงในสูตรอาหารนั้นต้องแน่ใจว่าเมื่อสัตว์มีการขาดแร่ธาตุนั้นจริงหรือจำเป็นที่จะต้องใส่ หรือใส่เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มอัตราการ

ผสมติดหรือตั้งท้อง ทั้งนี้ ควรคำนึงด้วยว่าหากเป็นแร้ธาตุที่มีความเป็นพิษน้อยและไม่สะสมมากสามารถใส่ในปริมาณมากได้ แต่หากมีความเป็นพิษมากต้องผสมอย่างระมัดระวัง และอีกวิธีหนึ่งคือ การตั้งให้เลี่ยนอิสระเหมาะสำหรับการซื้อแร้ธาตุชนิดผงหรือชนิดก้อนมาวางตั้งให้กิน (ภาพที่ 3-2) สำหรับการตั้งให้เลี่ยนอิสระนี้ไม่มีงานวิจัยยืนยันว่าสัตว์สามารถเลี่ยนได้ชัดเจนตามปริมาณที่สัตว์ขาดได้จริงหรือไม่ ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดคือการผสมแร่ธาตุลงไปในสูตรอาหาร



ภาพที่ 3-2 แสดงแร้ธาตุชนิดก้อนที่แขวนไว้ให้สัตว์สามารถเลี่ยนได้อย่างอิสระ

บทที่ 4

ความเป็นพิษจากโลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป ซึ่งโดยทั่วไปเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) อยู่ในช่วง 23 ถึง 92 อยู่ในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักที่รู้จักกันโดยทั่วไปได้แก่ เหล็ก โปรทแมงกานีส ทองแดง โครเมียม แคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว เงิน นิกเกิล ดีบุก โทเทเนียม และวานาเดียม -ธาตุเหล่านี้บางชนิดเป็นธาตุที่ไม่มีความจำเป็นต่อร่างกายปศุสัตว์ แต่สัตว์อาจได้รับเข้าสู่ร่างกายเนื่องจากการปนเปื้อนในขั้นตอนการผสมอาหาร หรือการปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานอุตสาหกรรม แหล่งเกษตรกรรมที่มีการใช้ปุ๋ยหรือยาปราบศัตรูพืช และแหล่งชุมชนที่อยู่ระหว่างการใช้สีทาบ้าน แหล่งผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ เป็นต้น โดยระดับความเป็นพิษของโลหะหนักอาจมีการแสดงอาการตั้งแต่ไม่รุนแรงจนถึงขั้นที่ทำให้เสียชีวิตได้ และอาจสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อ โดยเริ่มสะสมตั้งแต่ปริมาณน้อยๆและเพิ่มมากขึ้น ในคู่มือนี้จะกล่าวถึงโลหะหนักที่มีความสำคัญและยังไม่ได้กล่าวถึงอันอาจก่ออันตรายต่อภาคปศุสัตว์รวมถึงเกิดการปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์จากสัตว์ได้ดังต่อไปนี้

ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นแร่ธาตุที่มีพิษหรือโลหะหนักที่มีการใช้ในกระบวนการผลิตอย่างหลากหลายในอุตสาหกรรมของประเทศมาเป็นระยะเวลานานแล้ว เนื่องจากตะกั่วมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ขึ้นรูปได้ง่าย สีสวย มีรสชาติหวาน ราคาถูก ละลายที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ปัจจุบันจึงพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกั่วในสิ่งแวดล้อม ส่วนใหญ่พบตะกั่ว

ปนเปื้อนอยู่ได้ทั้งในอาหารและน้ำ สัตว์อาจได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายโดยการกิน หายใจ และทางผิวหนัง อาการเกิดพิษ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มอาการระบบประสาท และกลุ่มระบบทางเดินอาหาร ความเป็นพิษของตะกั่วในสัตว์มีหลายรูปแบบได้แก่แบบเฉียบพลัน อาการที่พบได้แก่ เดินโซเซ กล้ามเนื้อกระตุก เดินเป็นวงกลม ตาบอดและชัก แบบกึ่งเฉียบพลันได้แก่ น้ำหนักลด ท้องเสีย กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ขบเคี้ยวฟัน แบบเรื้อรังจะพบสัตว์แสดงอาการโลหิตจาง และสร้างฮีโมโกลบินน้อยลง พบว่าสัตว์เคี้ยวเอื้องจะมีความไวต่อพิษของตะกั่วมากที่สุด รองลงมาคือ ม้า สัตว์ปีก และสุกรตามลำดับ

ตะกั่วเป็นสารที่สะสมอยู่ในร่างกายได้ เมื่อกินแล้วจะถูกดูดซึมเข้าในกระแสเลือดและไปสะสมที่กระดูกเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นตะกั่วยังสะสมได้ที่ตับ และไต หากสัตว์ได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในขนาดต่ำเป็นระยะเวลานานอาจถึงจุดที่แสดงอาการเกิดพิษได้ ทั้งนี้เคยมีรายงานว่าหญ้าที่ขึ้นบนดินที่มีตะกั่วตกค้างอยู่โดยตรวจพบตะกั่วตกค้างในปริมาณ 260 ถึง 914 ppm สะสมอยู่บนต้นหญ้าทำให้ลูกโคที่กินหญ้าตายได้ โดยปกติแล้วในอาหารไม่ควรมีตะกั่วปนอยู่เกิน 3-7 ppm

ผลของตะกั่วต่อร่างกาย

-ระบบหมุนเวียนโลหิต ตะกั่วจะรวมตัวกับเม็ดเลือดแดง ทำให้เม็ดเลือดแดงแตกตัวได้ง่าย เกิดโลหิตจางและไปยับยั้งกระบวนการสร้างเม็ดเลือดแดงในไขกระดูกได้

-ระบบประสาท ตะกั่วจะทำลายหลอดโลหิตฝอยในสมอง ทำให้เลือดไปเลี้ยงสมองไม่พอ และยังไปรบกวนการทำงานของเส้นประสาทในระบบประสาทส่วนปลาย

-ระบบปัสสาวะ ตะกั่วจะมีผลโดยตรงต่อไต ทำให้เซลล์ของไตเสื่อมและมีเนื้อตาย

- ระบบทางเดินอาหาร ตะกั่วทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อเมือก ผนังกระเพาะอาหารและลำไส้เกิดเนื้องอก ทำให้น้ำลายไหล เบื่ออาหาร ปวดท้องหลังโกง ท้องเสีย

- ผลต่ออวัยวะอื่นๆ เช่น ดับเกิดการเสื่อมและมีเนื้องอกซึ่งพบได้ทั้งแบบรุนแรงและเรื้อรัง ผนังกระเพาะอาหารและลำไส้เกิดเนื้องอก และยังพบว่าตะกั่วสามารถส่งผ่านจากแม่ไปยังลูกผ่านรกแล้วไปสะสมที่ตับของลูกอ่อนในท้อง มีรายงานว่าตะกั่วเป็นสาเหตุทำให้เกิดแท้งและผสมไม่ติด

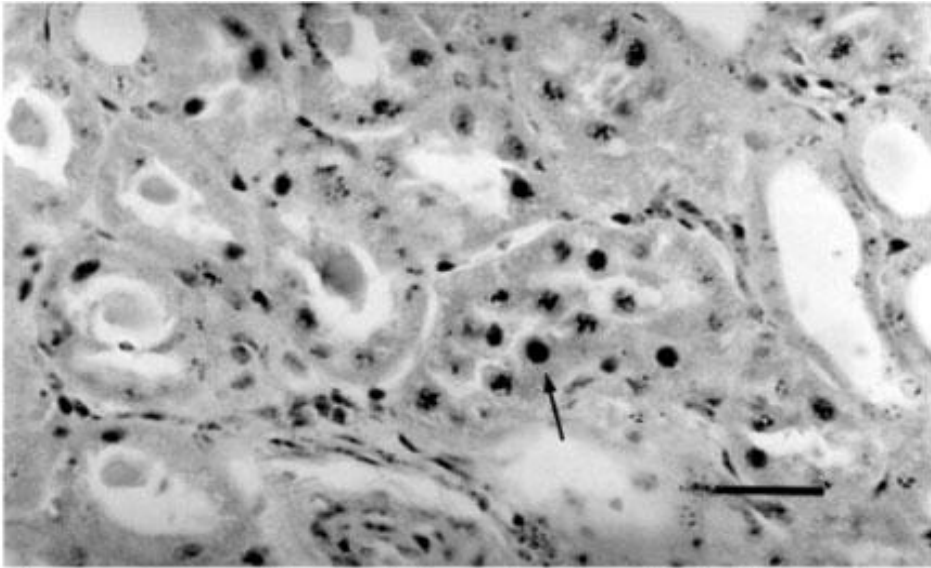
ตะกั่วขับถ่ายออกจากร่างกายช้าๆทางไต และสามารถขับถ่ายตะกั่วออกมาทางปัสสาวะในขนาด 0.8 มิลลิกรัมต่อวัน ในรายที่ได้รับตะกั่วขนาดสูงแต่ไม่ตายต้องใช้เวลา 4 ถึง 6 เดือน ในการขับออกจากร่างกาย

การวินิจฉัยโรค

1. ต้องซักประวัติ อาการป่วย

2. ตรวจรอยโรคทางพยาธิวิทยา โดยอาจตรวจพบรอยโรคจำเพาะ คือ

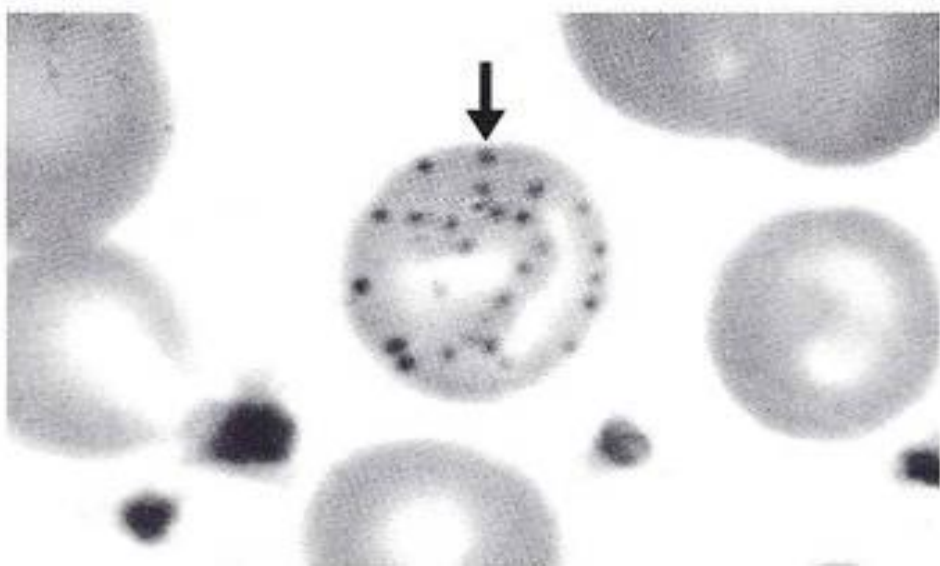
Intranuclear inclusion bodies ในเนื้อเยื่อตับ สมอง และไต (ภาพที่ 4-1)



ภาพที่ 4-1 แสดง Intranuclear inclusion body ในเซลล์เยื่อบุท่อไตของโคที่เกิดอาการพิษ
จากตะกั่ว

ที่มา: Traverso et al. (2004) (ลูกศรชี้)

3. การตรวจทางโลหิตวิทยา (Complete blood count) โดยการตรวจหาค่า
เม็ดเลือดแดงอัดแน่น ค่าระดับฮีโมโกลบิน และทำเลือดป้ายสไลด์เพื่อตรวจหาเม็ดเลือด
แดงที่มีนิวเคลียส (Nucleated red blood cells) ซึ่งจะพบเป็นปริมาณมากกว่าร่วมกับจุดหรือ
แถบเล็กๆบนเม็ดเลือดแดง (Basophilic stippling) (ภาพที่ 4-2)



ภาพที่ 4-2 ลักษณะ Basophilic stippling บน Cytoplasm ของเม็ดเลือดแดงในโคที่เกิด
อาการพิษจากสารตะกั่ว

ที่มา: Traverso et al. (2004) (ลูกศรชี้)

4. การตรวจวิเคราะห์หาระดับของตะกั่วจากเลือดและอวัยวะ เช่น ตับ ไต
ทางห้องปฏิบัติการ โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น Atomic absorption spectroscopy
(AAS) และ Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) เป็นต้น

ในการตรวจวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของตะกั่วในเลือด ตับ และไต ต้องมีค่า
ปกติของสัตว์แต่ละชนิด เพราะตามปกติแล้วจะมีตะกั่วอยู่ในร่างกายในระดับที่ไม่เกิด
อันตราย การวินิจฉัยภาวะตะกั่วเป็นพิษในสัตว์ใช้เกณฑ์ปริมาณตะกั่วในเลือด 0.35 ppm

ในตับและไต 10 ppm ค่าปกติของตะกั่วในเลือดสัตว์ควรต่ำกว่า 0.1 ppm ทั้งนี้วีณาและคณะ (2554) รายงานการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในเลือดโคเนื้อและโคนมในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกั่วในเลือดอยู่ในระดับ 0.037 ± 0.024 ppm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติ สำหรับประเทศไทยรัมภาและคณะ (2540) รายงานการเกิดพิษของตะกั่วแบบเฉียบพลันในโคนมที่เลี้ยงด้วยต้นข้าวโพดอ่อนที่ปลูกอยู่ในบริเวณใกล้กับโรงงานหลอมตะกั่ว โดยโคนมจำนวน 85 ตัวจากทั้งหมด 120 ตัว แสดงอาการป่วยได้แก่ ซึม เบื่ออาหาร น้ำลายไหล กล้ามเนื้อกระตุก ท้องเสีย ชัก และตายในที่สุด ผลการตรวจวิเคราะห์ตะกั่วจากตัวอย่างเลือด ตับ ไต และอาหารในกระเพาะ รวมถึงต้นข้าวโพดอ่อนซึ่งปลูกอยู่ในบริเวณนั้นที่โคนมกินเป็นอาหารพบว่ามีปริมาณของสารตะกั่วในเลือด ตับ และไตสูงเกินค่าปกติมาก

ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ก่อให้เกิดปัญหาในสิ่งแวดล้อมที่สำคัญชนิดหนึ่ง เพราะสามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้เนื่องจากการใช้ตะกั่วมากในอุตสาหกรรมหลายชนิด รวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ สีทาบ้าน สีย้อมผ้า ที่ใช้แล้วถูกทิ้งตามกองขยะ ซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยตะกั่วและสารประกอบของตะกั่วออกสู่สภาวะแวดล้อม ทำให้มีการปนเปื้อนของตะกั่วในดิน แหล่งน้ำและอากาศ โดยมีสัตว์กินพืชและสัตว์กินสัตว์ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมต่อไปจากการกินตามห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเหล่านี้สามารถแพร่กระจายเข้าสู่สมในสัตว์และในที่สุดก็เข้าสู่มนุษย์ เมื่อได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปจนไม่สามารถทนได้จะเกิดอาการป่วยและตายได้ ในคนอาการเกิดพิษจากสารตะกั่วมีทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง คือปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน

ชัก เป็นอัมพาตและอาจตายได้ ปัจจุบันมีการกำหนดระดับการปนเปื้อนของตะกั่วในอาหาร
ไว้ไม่เกิน 1 mg/kg

แคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะหนักที่มักพบร่วมกับสายแร่ตะกั่วและสังกะสี ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น เป็นสารให้สีของเซรามิก และเป็นส่วนประกอบในแบตเตอรี่ จึงอาจพบแคดเมียมปนเปื้อนทั่วไปในสิ่งแวดล้อม โดยระดับการปนเปื้อนที่พบนี้อาจเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรืออาจเป็นผลจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งการปนเปื้อนอาจอยู่ในดินที่ใช้ปลูกพืชผลการเกษตร แหล่งน้ำและในห่วงโซ่ที่ใช้เลี้ยงสัตว์ และเนื่องจากพืชอาหารสัตว์บางชนิดสามารถสะสมแคดเมียมไว้ในลำต้น ดังนั้นสัตว์จึงได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายผ่านการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ดิน อาหารและน้ำ หรือวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีการปนเปื้อนในระดับสูง โดยทั่วไปในเนื้อสัตว์จะมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างต่ำ แต่ในตับและไตของปศุสัตว์ที่มนุษย์นำมาบริโภคอาจพบการตกค้างของแคดเมียมในปริมาณที่สูง จึงสามารถส่งผ่านมาตามห่วงโซ่อาหารสู่มนุษย์ได้ ในประเทศไทยมีรายงานการปนเปื้อนของแคดเมียมในตะกอนดินที่ ตำบลแม่ดาว อำเภอแม่สลด จังหวัดตาก ส่งผลให้ข้าวและผลิตผลทางการเกษตรที่ปลูกบนพื้นดินแห่งนั้นมีการปนเปื้อนแคดเมียมสูงเกินค่ามาตรฐาน ทั้งนี้ปารณีย์และคณะ (2553) ได้ศึกษาระดับของแคดเมียมในไตของโคและสุกรจากอำเภอแม่สลด จังหวัดตากซึ่งเป็นการเลี้ยงปศุสัตว์บนพื้นที่ที่พบปัญหาการปนเปื้อน โดยเปรียบเทียบกับระดับของแคดเมียมในไตของโคและสุกรที่มีการเลี้ยงจากปริมณฑลกรุงเทพฯ พบว่ามีการปนเปื้อนของแคดเมียมในระดับที่ไม่ปลอดภัยจากตัวอย่างทั้งในและนอกพื้นที่ปนเปื้อน คือเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้จากเกณฑ์

ความปลอดภัยด้านอาหารซึ่งกำหนดให้มีการตกค้างของแคดเมียมในไต ปศุสัตว์ได้ไม่เกิน 1 mg/kg นอกจากนี้วิภาดาและคณะ (2551) ได้สำรวจการปนเปื้อนของแคดเมียมในตัวอย่างตับของไก่ เป็ดและสุกร จากภูมิภาคต่างๆของประเทศไทยระหว่างปี 2548-2550 พบตัวอย่างตับไก่และสุกรมีแคดเมียมตกค้างสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 2-10% ของจำนวนตัวอย่างที่ตรวจ โดยตับไก่พบการตกค้างสูงสุด 4.6 mg/kg และตับสุกรพบการตกค้างสูงสุด 17.50 mg/kg โดยสาเหตุของการปนเปื้อนนี้นั้นยังสรุปไม่ได้แน่ชัด แต่การใช้ Premix ที่มีส่วนผสมของ Cd-contaminated zinc salts เติมลงในอาหารสัตว์อาจเป็นหนึ่งในสาเหตุของการปนเปื้อน โดยมีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียมในอาหารสัตว์กับปริมาณแคดเมียมที่ตกค้างในเนื้อเยื่อสัตว์พบว่าปริมาณแร่ธาตุในสูตรอาหารสัตว์แปรผันโดยตรงต่อปริมาณแคดเมียมในเนื้อเยื่อสัตว์ นอกจากนี้อาจมีสาเหตุอื่น เช่น การใช้มูลสัตว์หรือปุ๋ยที่มีแคดเมียมปนเปื้อนระดับสูงในการปลูกพืชอาหารสัตว์ก็อาจส่งผลต่อการสะสมของแคดเมียมในร่างกายเช่นกัน

ผลของแคดเมียมต่อร่างกาย

โดยปกติแคดเมียมจะถูกขับออกจากร่างกายช้าๆผ่านทางอุจจาระและปัสสาวะ แคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกายมักไม่ถูกเก็บสะสมไว้ที่กล้ามเนื้อเนื่องจากเซลล์ของกล้ามเนื้อไม่สามารถสังเคราะห์โปรตีนที่ทำหน้าที่จับกับโลหะหนักเช่นแคดเมียมได้ซึ่งแตกต่างจากเซลล์ของตับและไต ดังนั้นแคดเมียมที่เข้าสู่ร่างกายจึงถูกเก็บสะสมไว้ที่ตับและไตแทน โดยที่อัตราการสะสมของแคดเมียมที่ไตจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการสะสมในตับ อาการเกิดพิษแบบเฉียบพลันพบไม่บ่อยนัก สัตว์จะมีอาการอาเจียนและท้องเสียเนื่องจากการระคายเคืองของระบบทางเดินอาหาร และอาจพบไตวาย แต่ส่วนใหญ่อาการเกิดพิษมักเป็น

แบบเรื้อรัง โดยพบอาการโลหิตจาง โตช้า กระดูกบาง ไตเสื่อม ในโคนมที่ได้รับอาหารที่มีแคดเมียมปนเปื้อนมากกว่า 300 ppm ส่งผลให้ผลิตนมลดลงได้

การวินิจฉัยโรค

1. ต้องซักประวัติและอาการสัตว์ป่วย
2. ตรวจรอยโรคทางพยาธิวิทยา โดยอาจตรวจพบรอยโรค ได้แก่ การเสื่อมและตายของเซลล์ตับ และเซลล์ท่อไต
3. ตรวจค่าเคมีคลินิกเพื่อประเมิน Renal และ Hepatic function จะพบว่าค่า Parameters ต่างๆจะช่วยบ่งชี้ถึงความเสียหายต่างๆที่เกิดขึ้นได้โดยเฉพาะในกรณีที่ได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานาน
4. การตรวจวิเคราะห์หาระดับของแคดเมียมจากตัวอย่างอวัยวะ เช่น ตับ และ ไต ทางห้องปฏิบัติการ จากเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น AAS และ ICP-OES เป็นต้น

ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

แคดเมียมสามารถตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้เป็นระยะเวลานาน โดยมีค่าครึ่งชีวิตยาวนานถึง 30-40 ปี พบการปนเปื้อนของแคดเมียมในแหล่งน้ำและแหล่งอาหารของสัตว์น้ำ ส่วนในพืชจะทำหน้าที่ดูดซับและเป็นแหล่งสะสมที่สำคัญของแคดเมียมที่ปนเปื้อนในแหล่งดิน โดยมีสิ่งมีชีวิตที่บริโภคพืชและสิ่งมีชีวิตที่บริโภคสัตว์ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมต่อไปตามลำดับของห่วงโซ่อาหาร โดยสัตว์ที่อายุมากย่อมมีการสะสมแคดเมียมได้มากกว่าสัตว์ที่อายุน้อย ซึ่งการส่งผ่านแคดเมียมที่สะสมในสิ่งแวดล้อมมายังห่วงโซ่อาหารนับเป็นเส้นทางสำคัญของการได้รับแคดเมียมเข้าสู่ร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มประชากรที่

นิยมนิรโรคเครื่องในสัตว์อาจเป็นปัจจัยเสริมให้เกิดความเสี่ยงต่อการได้รับแคดเมียมและมีการสะสมมากขึ้น ซึ่งปัญหาการปนเปื้อนและสะสมของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมสามารถส่งผลกระทบต่อเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารผ่านทางผลผลิตทางการเกษตรและภาคปศุสัตว์ มีผลต่อสุขภาพสัตว์และต่อเนื่องมายังมนุษย์ซึ่งเป็นผู้บริโภคอันดับสุดท้าย การส่งผ่านแคดเมียมอาจวนเวียนเป็นวัฏจักรไม่สิ้นสุด หากต้นเหตุไม่ได้รับการแก้ไข ปัจจุบันมีการกำหนดระดับการปนเปื้อนของแคดเมียมในอาหารสัตว์ไว้ไม่เกิน 1 mg/kg และ กำหนดปริมาณสูงสุดของการปนเปื้อนแคดเมียมในเนื้อ ตับ และไตของสัตว์ปีกและสุกรไม่เกิน 0.05, 0.5 และ 1.0 mg/kg ตามลำดับ

บทที่ 5

การเก็บตัวอย่างส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการ

การเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการพิษวิทยา

หลายครั้งที่สัตวแพทย์ เกษตรกร และผู้เลี้ยงสัตว์ประสบปัญหาปศุสัตว์ตายอย่างกะทันหัน โดยเฉพาะในกรณีที่หาสาเหตุของการป่วยตายไม่ได้ เจ้าของมักสงสัยว่าสัตว์ของตนมีอาการเกิดพิษจากการได้รับสารชนิดใดชนิดหนึ่งเข้าไป

ในการวินิจฉัยโรคที่เกิดจากความเป็นพิษหรือการขาดแร่ธาตุจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากหลายๆส่วนประกอบการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ประวัติของสัตว์ป่วยและสิ่งที่อยู่โดยรอบตัวในบริเวณเกิดสัตว์ป่วยขึ้น (Circumstantial evidences) โดยสอบถามจากเจ้าของ ผู้เลี้ยงสัตว์ ให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการตรวจขั้นต่อไป เช่น สอบถามว่ากินอาหารชนิดไหน กินน้ำจากแหล่งไหน เก็บอาหารอย่างไร มีการใช้สารเคมีจำพวกปราบศัตรูพืชหรือสารกำจัดแมลงในบริเวณนั้นบ้างหรือไม่ เป็นต้น ตลอดจนสอบถามถึงระยะเวลาการใช้สารเหล่านี้

2. สังเกตอาการสัตว์ป่วย (Symptomatic evidences) สัตว์แสดงอาการป่วยแบบใด เช่น แสดงอาการทางประสาท เดินขาสั่น กล้ามเนื้อบิด ชัก เป็นต้น หรือแสดงอาการทางระบบทางเดินอาหารเช่น ท้องเสีย อาเจียน ข้อมูลจากอาการทางคลินิกจะช่วยในการวินิจฉัยโรคเบื้องต้นได้ แต่ต้องไม่ด่วนสรุปเพราะสารพิษมีมากมายหลายชนิดและ

อาการบางครั้งยังเหมือนกับโรคติดเชื้ออีกด้วย ดังนั้นขั้นแรกต้องทำการวินิจฉัยแยกโรคต่างๆที่มีความน่าจะเป็นไว้ให้มากที่สุดก่อน

3. ผลการตรวจทางพยาธิวิทยาและเคมีคลินิก นอกจากประวัติและอาการป่วยแล้ว หากสัตว์ป่วยยังมีชีวิต ควรเจาะเลือดเพื่อตรวจค่าทางโลหิตวิทยาและเคมีคลินิกเพื่อประกอบการวินิจฉัยโรค และหลังจากนั้นจึงทำการผ่าซากเพื่อตรวจหารอยโรค อย่างไรก็ตามการตรวจรอยโรคด้วยตาเปล่าบางครั้งอาจไม่พบรอยโรคที่ชัดเจน ต้องมีการตรวจทางจุลพยาธิวิทยาร่วมด้วย และเพื่อให้ผลสรุปมีความครอบคลุมและชัดเจนว่าสัตว์ป่วยหรือตายเนื่องจากความเป็นพิษหรือการขาดแร่ธาตุอาหารหรือไม่ ควรส่งตัวอย่างที่เหมาะสมไปตรวจวิเคราะห์ที่ห้องปฏิบัติการพยาธิวิทยาและชีวเคมี

4. ผลการตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการพยาธิวิทยาและชีวเคมี (Chemical evidences) เป็นการตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุจากตัวอย่างอาหาร เลือด และอวัยวะเป้าหมายของสัตว์ที่ตาย เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้จากการป่วยและผลที่ได้จากการตรวจทางพยาธิวิทยา โลหิตวิทยา และเคมีคลินิก

การเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจทางพยาธิวิทยา

ผ่าซากและเก็บอวัยวะภายในต่างๆ ได้แก่ ตับ ไต หัวใจ ปอด ม้าม และสมอง แช่ใน 10% buffered formalin นาน 24-48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

การเก็บตัวอย่างเลือดเพื่อส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการ

เลือดสามารถนำมาใช้ในการตรวจทั้งด้านโลหิตวิทยา เคมีคลินิกและตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุ โดยจะต้องเก็บเลือดจากสัตว์ที่ยังมีชีวิตอยู่เท่านั้น โดยตำแหน่งและขนาด

เก็บที่เจาะเลือดสัตว์แสดงไว้ในตารางภาคผนวก 2 สำหรับการตรวจด้านโลหิตวิทยาเมื่อเจาะเลือดแล้วควรถ่ายเลือดลงในหลอดเก็บเลือดที่มีสารป้องกันการแข็งตัวของเลือด เช่น Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) อย่างช้าๆ พลิกหลอดกลับไปมาเบาๆ เพื่อให้เลือดผสมกับ EDTA ส่วนตัวอย่างเลือดที่จะส่งตรวจค่าเคมีคลินิกและตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุ ควรถ่ายเลือดลงในหลอดพลาสติกปิดฝาสนิท ถ้าส่งตัวอย่างไม่ได้ในทันทีควรปั่นแยกซีรัมแล้วเก็บแช่เย็นก่อนนำส่งห้องปฏิบัติการต่อไป

การเก็บตัวอย่างเพื่อส่งตรวจวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุ

เพื่อให้ผู้ให้บริการสามารถเก็บตัวอย่างได้ถูกต้องและห้องปฏิบัติการสามารถดำเนินการตรวจวินิจฉัยได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว แม่นยำ และมีประสิทธิภาพ สัตวแพทย์ เกษตรกรและผู้เลี้ยงสัตว์ควรมีความรู้ความเข้าใจเรื่องการเก็บตัวอย่างให้ถูกต้อง เพราะหากเก็บตัวอย่างไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสม การตรวจวิเคราะห์จะไม่สามารถดำเนินการได้หรือดำเนินการได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้การแก้ไขปัญหาในปศุสัตว์มีความบกพร่องและไม่ประสบความสำเร็จ ดังนั้นการเก็บตัวอย่างส่งตรวจวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการจึงมีข้อควรพิจารณาตามที่แสดงไว้ในตารางภาคผนวก 1

สำหรับภาชนะบรรจุหรืออุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่าง กรณีตัวอย่างที่เป็นซีรัมหรือเลือดแข็งตัวควรเก็บในหลอดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีนปิดฝาสนิท ส่วนตัวอย่างน้ำเก็บในขวดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีนปิดฝาสนิทเช่นกัน กรณีตัวอย่างคับ ไต และอาหารสำเร็จรูปให้เก็บในถุงพลาสติกแบบมีซิปล็อกปิดสนิท 2 ชั้น ทั้งนี้ระยะเวลาในการนำส่งตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการควรส่งภายใน 1 วัน หากไม่สามารถส่งได้ภายใน

กำหนด กรณีเป็นตัวอย่างซีรัมและเนื้อเยื่อควรแช่แข็ง ถ้าเป็นตัวอย่างเลือดและน้ำควรแช่เย็นที่ 2 – 4 องศาเซลเซียส

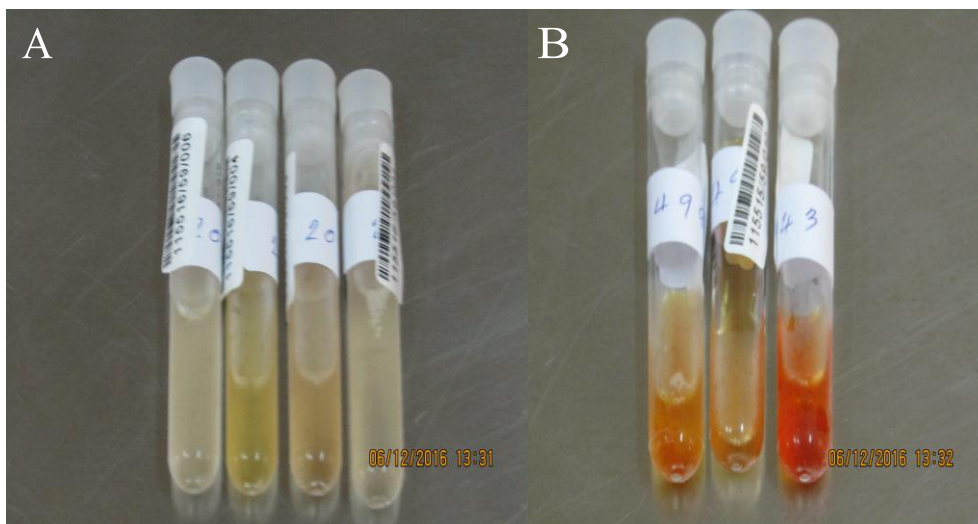
วิธีการนำส่ง

ปิดฝาหลอดพลาสติกหรือขวดให้สนิท (ถ้าตัวอย่างใส่ในถุงพลาสติกแบบมีซิปล็อคให้ปิดถุงหรือล็อคให้แน่น) แล้วบรรจุลงถุงพลาสติกอีกชั้น รัดยาง และต้องมีฉลากเขียนรายละเอียดของตัวอย่างให้ชัดเจนระบุชื่อ ที่อยู่เจ้าของสัตว์ ผู้ส่งตัวอย่าง ชนิดของตัวอย่าง วันที่เก็บตัวอย่าง และรายละเอียดที่สามารถติดต่อกลับได้ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การติดต่อประสานงานระหว่างเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ หรือผู้ส่งตัวอย่างและเจ้าหน้าที่ผู้ทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าเป็นไปได้ควรมีการติดต่อกันก่อนเก็บตัวอย่าง เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาดในการปฏิบัติงานและได้ตัวอย่างที่มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการตรวจทางห้องปฏิบัติการ

ชนิดของตัวอย่างที่ไม่เหมาะสม

1. ตัวอย่างซีรัมที่มีลักษณะขุ่น เหนียวหนืด สีแดงหรือสีแดงเข้ม
2. ตัวอย่างอวัยวะที่มีลักษณะ เน่า หรือ Autolysis
3. ตัวอย่างที่ไม่ติดฉลากหรือไม่มียาละเอียดบ่งชี้ข้อมูลของตัวอย่าง



ภาพที่ 5-1 A. ตัวอย่างซีรัมที่มีลักษณะ เหลือง สีสเหลืองอ่อน เหมาะสมกับการตรวจ
วิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ
B. ตัวอย่างซีรัมที่มีลักษณะ ขุ่น เหนียว สีแดง ไม่เหมาะสมต่อการตรวจ
วิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการ

บทที่ 6

การวินิจฉัยโรคที่เกิดจากความเป็นพิษ หรือ การขาดแร่ธาตุอาหารทางห้องปฏิบัติการ

1. การตรวจทางพยาธิวิทยา

ตัวอย่างอวัยวะภายในต่างๆ ที่แช่ใน 10% Buffered formalin นาน 24-48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำมาผ่านกระบวนการทางพยาธิวิทยาเพื่อทำสไลด์เนื้อเยื่อตามลำดับดังนี้คือ คัดน้ำออกจากเนื้อเยื่อ (Dehydration) ด้วย Ethanol กำจัด Ethanol (Clearing) ด้วย Xylene ทำให้เนื้อเยื่ออิ่มตัว (Impregnation) ด้วยพาราฟินเหลว ผึ่งเนื้อเยื่อ (Embedding) ในพาราฟินบล็อก ตัดเนื้อเยื่อ (Sectioning) หนาประมาณ 5 μm และย้อมสี (Staining) ด้วย Hematoxylin-eosin

ขั้นตอนการย้อมสี Hematoxylin-eosin

1. ละลายพาราฟินในสไลด์เนื้อเยื่อ โดยอบสไลด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 30 นาที หลังจากนั้นนำไปแช่ใน Xylene 3 ครั้ง เป็นเวลา 5, 2 และ 2 นาที ตามลำดับ
2. เติมน้ำเข้าไปในเนื้อเยื่อโดยแช่ใน Ethanol ตั้งแต่ความเข้มข้นสูงลงมตามลำดับ
 - 2.1 แช่ใน 100% Ethanol 3 ครั้ง นาน 5, 2 และ 2 นาทีตามลำดับ
 - 2.2 แช่ใน 95% Ethanol 3 ครั้ง นาน 5, 2 และ 2 นาทีตามลำดับ
3. ล้างสไลด์เนื้อเยื่อในน้ำไหลผ่านนาน 5 นาที
4. แช่สไลด์เนื้อเยื่อลงในสี Mayer's hematoxylin นาน 5-7 นาที

5. ล้างสไลด์เนื้อเยื่อในน้ำไหลผ่านเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที
6. แช่สไลด์เนื้อเยื่อลงในสี Eosin นาน 1 นาที
7. ดึงน้ำออกจากเนื้อเยื่อโดยแช่สไลด์ใน Ethanol ดังนี้
 - 7.1 95% Ethanol 3 ครั้ง นาน 5, 2 และ 2 นาทีตามลำดับ
 - 7.2 100% Ethanol 3 ครั้ง นาน 5, 2 และ 2 นาทีตามลำดับ
8. กำจัด Ethanol โดยแช่สไลด์เนื้อเยื่อใน Xylene 3 ครั้ง นาน 5, 2 และ 2 นาทีตามลำดับ
9. ปิดสไลด์เนื้อเยื่อด้วยกระจกปิดสไลด์ (Coverslip) โดยหยดน้ำยาสำหรับยึดสไลด์ (Mounting medium) กับกระจกปิดสไลด์ประมาณ 1-2 หยด

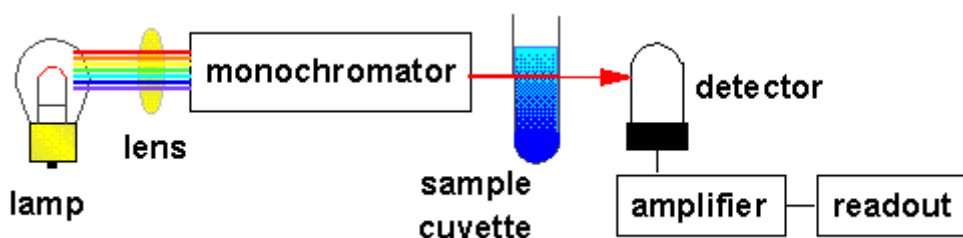
ผล: นิวเคลียส (Nucleus) ของเซลล์เนื้อเยื่อติดสีน้ำเงิน และไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ติดสีชมพูอ่อนจนถึงเข้ม สามารถอ่านรอยโรคทางจุลพยาธิวิทยาได้

2. การตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุในห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ หาปริมาณแร่ธาตุในห้องปฏิบัติการมีการใช้เครื่องมือหลายชนิดมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่

a) UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า Intensity ในช่วงรังสี UV และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง คุณสมบัติในการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารเมื่อ

โมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตาม Lambert - Beer's Law ค่า Absorbance ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดแสง ดังนั้น จึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของแร่ธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



ภาพที่ 6-1 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

ที่มา: Siwatt Pongpiachan (2010)

ตัวอย่างเช่น

การตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสด้วย Colorimetric method โดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

1. หลักการวิเคราะห์

ฟอสฟอรัสในซีรัมจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมโมลิบเดตในสภาวะกรด เกิดเป็นฟอสโฟโมลิบเกต สารนี้จะถูกรีดิวซ์ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

คือ โมลิบดีนัมบลู ซึ่งให้สารสีน้ำเงิน ปริมาณการเกิดโมลิบดีนัมบลูจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของฟอสฟอรัสในซีรัม นำสารประกอบที่ได้ไปวัดค่าAbsorbance ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 nm หาปริมาณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสโดยเทียบค่า Absorbance จากกราฟมาตรฐาน

2. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

2.1 เครื่องมือ

2.1.1 UV-VIS Spectrophotometer ช่วงความยาวคลื่น 200 – 900 nm

2.1.2 เครื่องชั่ง (Electronic balance) ความละเอียดในการอ่าน 0.001 g

2.1.3 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

2.1.4 เครื่องผสมสาร (Vortex mixer)

2.2 วัสดุอุปกรณ์

2.2.1 ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 10, 50 และ 100 ml

2.2.2 หลอดแก้วใส่ตัวอย่างขนาด 10 ml

2.2.3 แร็ค (Rack) สำหรับใส่หลอดตัวอย่าง

2.2.4 ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100 และ 250 ml

2.2.5 กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 25, 50 และ 100 ml

2.2.6 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 และ 250 ml

2.2.7 ไมโครปิเปตขนาด 1000 μ l, 5 ml และ 10 ml

2.2.8 คิวเวทท์ (Cuvette) ชนิด Quartz ขนาด 1x1 cm

2.2.9 นาฬิกาจับเวลา

3. สารเคมีและการเตรียม

3.1 สารเคมี

3.1.2 Trichloroacetic acid (TCA) AR grade

3.1.3 น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water) เป็นน้ำผ่านขบวนการนำเอา
แร่ธาตุออก มีค่า Conductivity 18.2 Ω

3.1.4 เฟอรัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) AR grade

3.1.5 กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) AR grade

3.1.6 แอมโมเนียมโมลิบเดต ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) AR grade

3.1.7 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสชนิด Spectro grade หรือ ICP grade
ความเข้มข้น $1000 \pm 5 \text{ mg/L}$ ละลายอยู่ในน้ำ

3.2 การเตรียมสาร

3.2.1 17% TCA

ชั่ง TCA $17.00 \pm 0.01 \text{ g}$ เติ้ลงด้วยน้ำปราศจากไอออนประมาณ 50 ml
ใช้แท่งแก้วคนสารให้ละลายจนหมด แล้วถ่ายใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml แล้ว
ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2 กรดซัลฟูริก 10 N

ใช้กระบอกตวงขนาด 50 ml ตวงกรดซัลฟูริก 27.8 ml เทใส่ลงในขวด
วัดปริมาตรขนาด 100 ml ที่มีน้ำปราศจากไอออนอยู่ประมาณ 30 ml เขย่าให้ผสมกันตั้งไว้
ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร

3.2.3 10% แอมโมเนียมโมลิบเดต

ชั่งแอมโมเนียมโมลิบเดต 10.00 ± 0.01 g ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 125 ml แล้วเติม 10 N ของกรดซัลฟูริกประมาณ 50 ml ใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วถ่ายใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วย 10 N ของกรดซัลฟูริก จนถึงขีดปริมาตรปิดฝาให้สนิท ถ่ายสารละลายที่เตรียมได้ลงในขวดแก้วมีฝาปิด เก็บไว้ในตู้เย็น

3.2.4 สารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต – แอมโมเนียมโมลิบเดต

ชั่งเฟอร์รัสซัลเฟต 5.00 ± 0.01 g ในบีกเกอร์ขนาด 50 ml เติม 10% แอมโมเนียมโมลิบเดต 10 ml ใช้แท่งแก้วคนจนสารละลายหมดแล้วถ่ายใส่ลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร ปิดฝาแล้วเขย่าให้เข้ากันอีกครั้ง สารนี้ต้องเตรียมใหม่ทุกครั้ง

3.2.5 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสชนิด Working

เตรียม สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสชนิด Working จากสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 1000 mg/L โดยการเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้มีความเข้มข้น 1, 5, 10, 15 และ 20 mg/dL เตรียมความเข้มข้นละ 10 ml เก็บสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสชนิด Working ไว้ในหลอดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน เก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 2 – 8 องศาเซลเซียส

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์

4.1 เตรียมหลอดสำหรับ Blank (น้ำปราศจากไอออน) สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสชนิด Working ตัวอย่างควบคุม และตัวอย่างซีรัม

- 4.2 คูณ Blank สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส ความเข้มข้น 1, 5, 10, 15 และ 20 mg/dL ตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างซีรัม 0.2 ml ใส่ในหลอดแก้วขนาด 10 ml
- 4.3 เติมน้ำกลั่น 1 ml ลงในทุกหลอด เขย่าให้เข้ากัน
- 4.4 เติม 17% TCA 2.5 ml เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที
- 4.5 สำหรับ Blank และสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส คูณใส่หลอดแก้วชุดใหม่ที่เตรียมไว้ หลอดละ 3 ml
- 4.6 สำหรับตัวอย่างซีรัมนำไปปั่นเพื่อแยกตะกอนโปรตีนออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 – 15 นาที
- 4.7 คูณเอาเฉพาะส่วนใสของตัวอย่าง ใส่ในหลอดแก้วชุดใหม่ที่เตรียมไว้ หลอดละ 3 ml
- 4.8 เติมเฟอร์ริซัลเฟต – แอมโมเนียมโมลิบเดต ลงในหลอด Blank เขย่าให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ 1 นาที ใช้ Blank ปรับศูนย์เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 nm
- 4.9 หลังการปรับศูนย์เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer แล้วให้วัดสารละลายมาตรฐานทั้ง 5 ความเข้มข้น และตัวอย่างส่งตรวจตามลำดับ โดยให้เติมเฟอร์ริซัลเฟต – แอมโมเนียมโมลิบเดต ตั้งทิ้งไว้ 1 นาที แล้ววัดค่า Absorbance ทันที ทำที่ละตัวอย่างจนครบทุกตัวอย่าง

5. การคำนวณผลการวิเคราะห์

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสเทียบกับ Calibration curve จากค่า Absorbance ของสารละลายมาตรฐานที่วัดได้ นำมา plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสกับค่า Absorbance เพื่อสร้าง Calibration curve และหาสมการเส้นตรง $y = ax + b$ โดยค่า Correlation of coefficient (r) ที่ได้ต้อง ≥ 0.995

$$\text{สูตรคำนวณ ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (Pi)} = \frac{A_0 - B_0}{B_1} \quad \text{mg/ dL}$$

แทนค่าลงในสมการที่

A_0 คือ Absorbance ของตัวอย่าง

B_0 คือ Intercept ของ Calibration curve

B_1 คือ Slope ของ Calibration curve

6. การรายงานผล

รายงานปริมาณฟอสฟอรัสมีหน่วยเป็น mg/dL

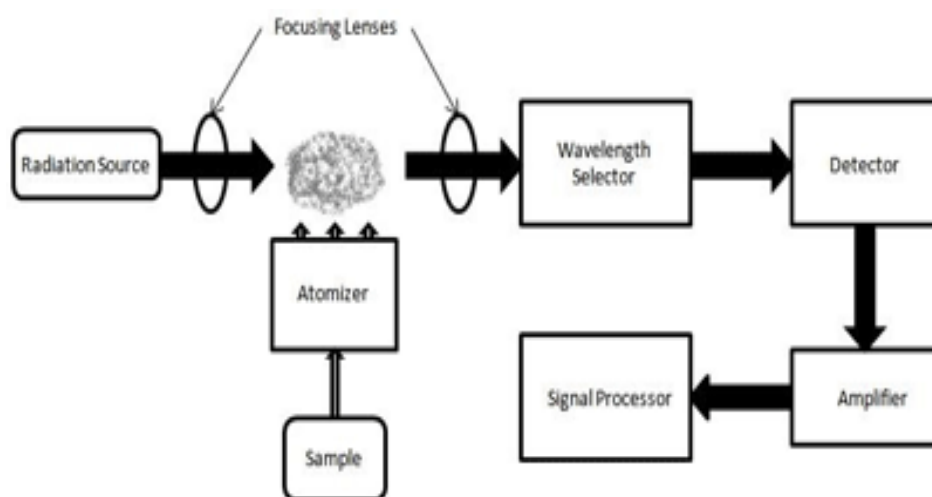
7. การควบคุมคุณภาพ

7.1 วิเคราะห์ Blank ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น Sample blank

7.2 วิเคราะห์ตัวอย่างควบคุมหรือสารละลายมาตรฐานทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์ โดยค่าที่วิเคราะห์ได้ต้องมีค่า %Recovery อยู่ในช่วง 80 - 120

7.3 ทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างเดิมทุกๆ ตัวอย่างที่ 10 หรือทุกชุดการวิเคราะห์ โดยค่าการทำซ้ำจะต้องมีค่า %RPD (Relative percent duplicate) ไม่เกิน 10

b) Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แร่ธาตุ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ AAS เป็นเทคนิคที่สะดวก และรวดเร็ว สามารถวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุจำนวนน้อยๆของตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ละเอียดถึงระดับ ppm และไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่าง ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โดยทั่วไปมักนิยมใช้เทคนิคนี้กันมาก

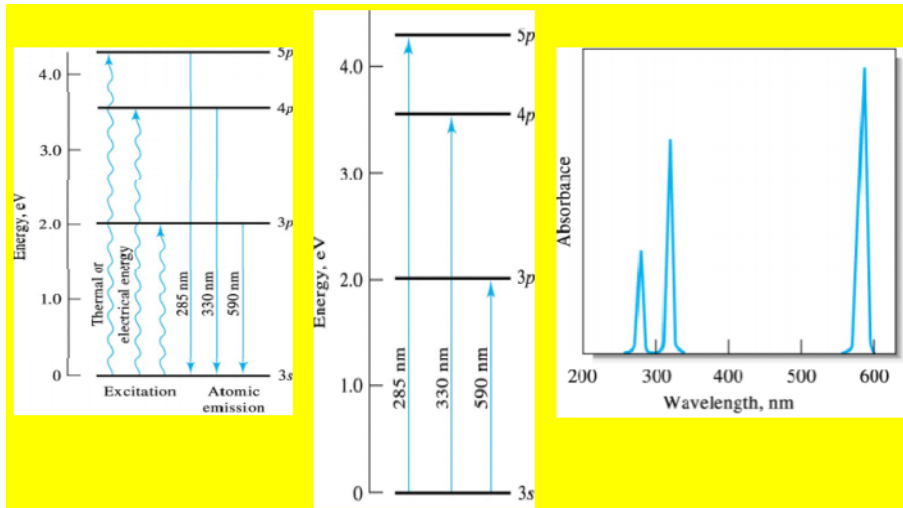


ภาพที่ 6-2 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่อง AAS

ที่มา: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/p_pookmanee/BT502-AAS.pdf

หลักการ

นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมและย่อยแล้วมาดูดผ่าน Nebulizer เข้าไปในเปลวไฟของแก๊ส Acetylene กับ Oxygen ของเครื่อง AAS พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อยู่ที่สถานะพื้น (Ground state) จากนั้นอะตอมที่สถานะพื้นจะเปลี่ยนไปสู่สถานะกระตุ้น (Excited stage) โดยอาศัยการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ลำแสงจะผ่านเข้าไปในกลุ่มอะตอมอิสระเท่านั้น ส่วนที่เหลือผ่านออกมาเข้าเครื่อง Detector ดังภาพที่ 6-2 ปริมาณที่อ่านได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับพลังงานแสงตอนเริ่มต้น ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอะตอมอิสระของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น อะตอมของโซเดียมจะดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 589 nm เพราะแสงที่มีความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของโซเดียมอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นดังแสดงในภาพที่ 6-3



ภาพที่ 6-3 อิเล็กตรอนของซีเดียมอะตอมมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่น 589 nm

ที่มา: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/p_pookmanee/BT502-AAS.pdf

จะเห็นว่าที่ความยาวคลื่นเหล่านี้จัดเป็น Spectroscopic line ของ AAS ที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด สำหรับการวัดตัวอย่างการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ซึ่งความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่าง จะหาได้โดยการวัดเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน โดยการหาปริมาณของแร่ธาตุคำนวณได้จาก Lambert-Beer's Law

ด้วยวิธี AAS เมื่อได้กราฟความสัมพันธ์ในช่วงที่เป็นเส้นตรง (Calibration curve) ระหว่างค่า Absorbance กับความเข้มข้นของแร่ธาตุในสารละลายมาตรฐาน สามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาความเข้มข้นของแร่ธาตุที่ต้องการได้ ตัวอย่างเช่น

การตรวจวิเคราะห์ ทองแดงในซีรัมโดยใช้เครื่อง AAS

1. หลักการวิเคราะห์

นำตัวอย่างซีรัมตกตะกอนโปรตีนด้วย Trichloroacetic acid (TCA) นำสารละลายส่วนใสที่ได้จากการปั่นแยกตะกอนออกแล้วไปวัดค่าการ Absorbance ด้วยเครื่อง AAS โดยอาศัยหลักการดูดกลืนคลื่นแสงของอะตอม เนื่องจากธาตุแต่ละธาตุมีคุณสมบัติการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัว โดยทองแดงสามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 324.8 nm เมื่อผ่านแสงเข้าไปยังอะตอมของทองแดงแล้ว อะตอมจะดูดกลืนแสงไว้ในปริมาณที่เหมาะสม พลังงานความร้อนที่ได้รับจะทำให้อิเล็กตรอนของทองแดงเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นแล้วปล่อยพลังงานออกมา เมื่อกลับสู่สถานะพื้นอีกครั้งระดับความแตกต่างของพลังงานจะถูกวัดออกมาเป็นค่า Absorbance ปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนจะแปรตามความเข้มข้นของอะตอมที่มีอยู่ในสารนั้น เทียบกับค่า Absorbance ที่ทราบความเข้มข้น นำมาสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ทำให้ทราบความเข้มข้นของแร่ธาตุในสารตัวอย่างได้

2. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

2.1. เครื่องมือ

- 2.1.1 เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)
- 2.1.2 เครื่องชั่ง (Electronic balance) ความละเอียดในการอ่าน 0.001 g
- 2.1.3 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
- 2.1.4 เครื่องผสมสาร (Vortex mixer)

2.2 วัสดุอุปกรณ์

- 2.2.1 ไมโครปิเปต ขนาด 1 และ 5 ml
- 2.2.2 หลอดพลาสติกชนิดโพลิโพรไพลีนพร้อมฝาปิด ขนาด 10-15 ml
- 2.2.3 ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 50, 100 ml

3. สารเคมีและการเตรียม

3.1 สารเคมี

3.1.1 Trichloroacetic acid (TCA) AR grade

3.1.2 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.1.3 กรดไนตริก (HNO_3) ชนิดเข้มข้น, AR grade

3.1.4 สารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 1000 mg/l ยี่ห้อ
PerkinElmer

3.2 การเตรียมสาร

3.2.1 4% TCA

ชั่ง TCA 4 ± 0.01 g เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน 100 ml หรือเตรียมตามปริมาณที่เหมาะสมต่อการที่ต้องการใช้ในแต่ละครั้ง

3.2.2 2% กรดไนตริก

เติมน้ำปราศจากไอออน 50 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 ml จากนั้นเติมกรดไนตริกชนิดเข้มข้น 5 ml เขย่าให้เข้ากัน เติมน้ำปราศจากไอออน ให้ครบ 250 ml เก็บในขวดแก้วสีชา

3.2.3 สารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/ml}$

ดูดสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 1,000 mg/ml จำนวน 0.5 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 ml เติม 2% กรดไนตริก ให้ถึงขีดบอกระดับ ถ้ายใส่ขวดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน เก็บรักษาในตู้เย็น

4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

4.1 การเตรียม Calibration curve

4.1.1 เตรียมจากสารละลายมาตรฐานทองแดง ความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/ml}$ โดยเจือจางด้วย 4% TCA ให้มีความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 $\mu\text{g/ml}$

- 4.1.2 นำสารละลายมาตรฐานทองแดงที่เตรียมไว้ในข้อ 4.1.1 มาวัดค่า Absorbance ที่ 324.8 nm
- 4.1.3 Plot กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทองแดงกับค่า Absorbance
- 4.2 การเตรียมตัวอย่างซีรัม
 - 4.2.1 ใช้ไมโครปิเปตดูดตัวอย่างซีรัม 1 ml ใส่ในหลอดพลาสติกขนาด 10 ml
 - 4.2.2 เติม 4% TCA ลงในหลอดตัวอย่าง 3 ml ปิดฝา จะเกิดตะกอนโปรตีน เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมสารประมาณ 30 วินาที
 - 4.2.3 นำหลอดตัวอย่างไปปั่นแยกตะกอนโปรตีนออก ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
 - 4.2.4 ใช้ไมโครปิเปตดูดส่วนใสทั้งหมดออกใส่หลอดพลาสติกอันใหม่ เพื่อรอวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS
 - 4.2.5 นำสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ที่ปรับสภาพความพร้อมใช้งานและสร้าง Calibration curve แล้ว ใช้ 4% TCA เป็น Blank สำหรับตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน

5. การคำนวณผลการวิเคราะห์

นำค่า Absorbance ของตัวอย่าง เทียบกับ Calibration curve เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของทองแดงในตัวอย่าง โดยมีสูตรคำนวณ ดังนี้

$$\text{Cu in serum } (\mu\text{g/ml}) = (\mu\text{g/ml Cu from std. curve} / 1 \text{ ml serum used})$$

(4 ml final volume)

6. การรายงานผล

รายงานเป็นตัวเลข หน่วยเป็น $\mu\text{g/dL}$

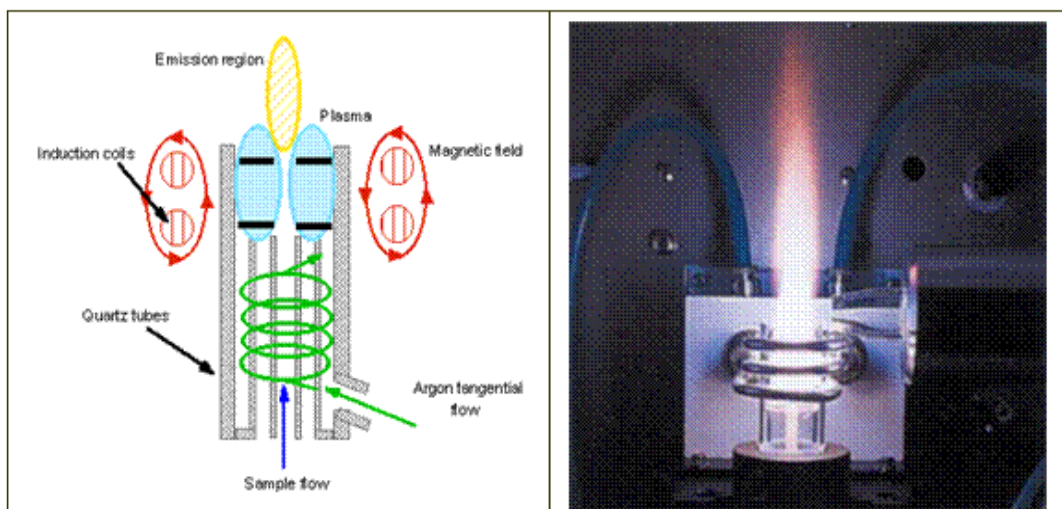
$$\text{Cu in serum } (\mu\text{g/dL}) = (\mu\text{g/ml Cu}) (100)$$

7. การควบคุมคุณภาพ

- 7.1 วิเคราะห์ Blank ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์ โดยใช้ 4% TCA เป็น Sample blank และ Reagent blank
- 7.2 วิเคราะห์ตัวอย่างควบคุม หรือ reference material (RM) ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์ โดยค่าที่วิเคราะห์ได้ต้องมีค่า % Recovery อยู่ในช่วง 80-120
- 7.3 ทำซ้ำตัวอย่างเดิมทุกๆ ตัวอย่างที่ 10 หรือทุกชุดการวิเคราะห์ โดยค่าการทำซ้ำจะต้องมีค่า % RPD (Relative percent duplicate) ไม่เกิน 10

c) Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy

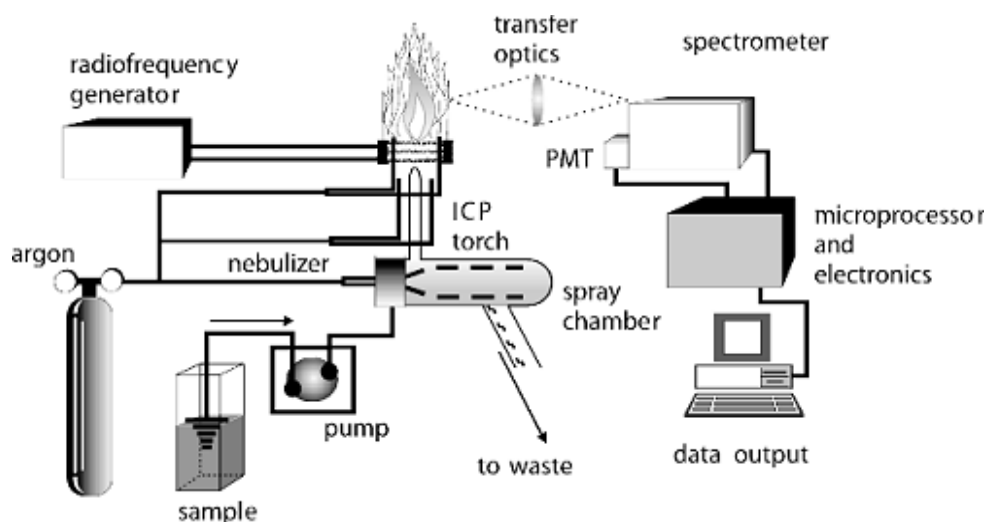
(ICP-OES) เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ ทดสอบเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของธาตุต่างๆจากตัวอย่าง ชีวม อาหารสัตว์ ดิน และน้ำ ซึ่งใช้งานได้หลากหลาย และสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ครั้งละหลายธาตุ เทคนิคนี้แยกเป็น 2 ส่วน ส่วนประกอบที่ 1 คือ Inductively Couple Plasma (ICP) ซึ่งเป็นเปลวความร้อนสูงที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สหรือเป็นเทคนิคที่ใช้ผลิตพลาสมาที่ให้อุณหภูมิสูงด้วยการปล่อยแก๊สอาร์กอนผ่านเข้าไปในคอบ (Torch) โดยที่ปลายคอบจะมีท่อกลวงทำด้วยทองแดงล้อมรอบคอบซึ่งต่อกับเครื่องส่งความถี่วิทยุ เมื่อให้คลื่นความถี่วิทยุ (RF generator) ปล่อยเข้าไปจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ปลายคอบแล้วชักนำให้มีกระแสไฟฟ้า จากนั้นทำให้เกิดการสปาร์คด้วย Tesla เพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนจากอาร์กอนที่มีพลังงานสูง และอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงนี้จะชนกับอิเล็กตรอนอื่นต่อไปอีกกลายเป็นปฏิกิริยาถูกไอ้เกิดเป็นพลาสมาดังภาพที่ 6-4



ภาพที่ 6-4 คบพลาสมา (Plasma Torch) ของเทคนิค Inductively Coupled Plasma
Optical Emission (ICP-OES)

ที่มา: Siwatt Pongpiachan (2010)

ส่วนประกอบที่ 2 ของเครื่องคือ Optical Emission Spectroscopy (OES) เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยอาศัยหลักการทำให้สารเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นเพื่อให้สารที่จะวิเคราะห์นั้นเปล่งแสงหรือสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะอยู่ในช่วงของ UV-Visible และมีลักษณะเฉพาะตัวที่มีความจำเพาะของแต่ละธาตุและวัดความเข้มของแสงนั้นดังภาพที่ 6-5



ภาพที่ 6-5 ส่วนประกอบของเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

ที่มา: Siwatt Pongpiachan (2010)

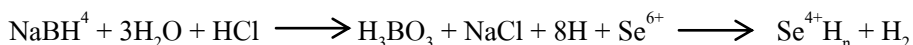
ดังนั้น ICP-OES จึงเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆพร้อมกันหลายชนิดอาศัยพลังงานจากพลาสมาเหนี่ยวนำควบคู่ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 10,000 องศาเซลเซียส

ทำให้อะตอมของธาตุต่างๆเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นมาอยู่ในสถานะกระตุ้น หรือเป็นไอออน ทั้งนี้เมื่ออะตอมของธาตุมีการลดระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นกลับมายังสถานะพื้น อะตอมของธาตุจะมีการปล่อยพลังงานออกมาซึ่งเรียกว่า “Emission” ซึ่งในแต่ละธาตุมีความยาวคลื่นของพลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว และมีความเข้ม (Intensity) ที่เป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับความเข้มข้นของธาตุนั้นในสารละลายของสารตัวอย่าง ทั้งนี้การวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับธาตุต่างๆ ทำได้โดยการเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานของธาตุต่างๆ (Standard solution) ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ตัวอย่างเช่น

การตรวจวิเคราะห์ซีลีเนียมในซีรัมโดยใช้เครื่อง ICP-OES

1. หลักการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ซีลีเนียมในที่นี้ใช้ Hydride Vapour Generation Technique โดยการทำให้ธาตุนี้กลายเป็นไอที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์ แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟดังกล่าวจะทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมอิสระ โดยสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการย่อยจะถูกทำให้อยู่ในรูปของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วทำปฏิกิริยากับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นรีดิวซิงเอเจนท์ จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นของซีลีเนียมเทียบกับ Calibration standard curve ด้วยเครื่อง ICP-OES ดังสมการแสดงปฏิกิริยารีดักชัน



2. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

2.1 เครื่องมือ

2.1.1 เครื่อง ICP-OES

2.1.2 Hydride Vapour Generator kit

2.1.3 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

2.1.4 เตาย่อยตัวอย่าง (Micro Kjeldahl digester)

2.1.5 เครื่องชั่ง (Electronic balance) ความละเอียดในการอ่าน 0.001 g

2.1.6 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

2.1.7 เครื่องผสมสาร (Vortex mixer)

2.2 วัสดุอุปกรณ์

2.2.1 ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 50 ml

2.2.2 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask ขนาด 500 ml)

2.2.3 Kjeldahl tube ขนาด 15 – 30 ml

2.2.4 แร็ค (Rack) สำหรับใส่ Kjeldahl tube

2.2.5 หลอดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีนพร้อมฝาปิด ขนาด 50 ml

2.2.6 ไมโครปิเปต ขนาด 1000 μ l ปิเปตขนาด 5 และ 10 ml

2.2.7 นาฬิกาจับเวลา

3. สารเคมีและการเตรียม

3.1 สารเคมี

3.1.1 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เป็นน้ำผ่านกระบวนการนำเอา
แร่ธาตุออก มีค่าความต้านทานไฟฟ้า (Conductivity) 18.2 M Ω

3.1.2 65% กรดไนตริก (HNO₃) AR grade

3.1.3 70% กรดเปอร์คลอริก (HClO₄) AR grade

3.1.4 37% กรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR grade

3.1.5 สารละลายมาตรฐานซีลีเนียม 1000 $\mu\text{g/ml}$ ICP grade

3.1.6 โซเดียมโบโรไฮไดรด์; (NaBH_4) AR grade ความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99%

3.1.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์; (NaOH) AR grade ความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99%

3.2 การเตรียมสารเคมี

3.2.1 2% กรดไนตริก

ใช้ปิเปตแก้วดูด 65% Nitric acid จำนวน 10 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 ml ที่มีน้ำปราศจากไอออน 200 ml จากนั้นปรับปริมาตรโดยเติมน้ำปราศจากไอออนให้ครบ 500 ml ปิดฝาและเขย่าให้ผสมกัน เก็บในขวดแก้วมีฝาปิด

3.2.2 Nitric – perchloric acid digestion (3:1) (v/v)

ตวง 65% กรดไนตริก 150 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 ml เติม 70% กรดเปอร์คลอริก 50 ml เขย่าเบาๆ ให้ผสมกัน เก็บในขวดแก้วสีชาที่มีฝาปิด

3.2.3 สารละลายมาตรฐานซีลีเนียม 100 $\mu\text{g/ml}$

ใช้ตัวดูดจ่ายสารละลายดูดสารละลายมาตรฐานซีลีเนียม 1000 $\mu\text{g/ml}$ ปริมาณ 1 ml ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 ml เติมน้ำ ปราศจากไอออนให้ครบ 100 ml ปิดฝาเขย่าให้เข้ากัน

3.2.4 สารละลายมาตรฐานซีลีเนียม 100 ng/ml

ใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายมาตรฐานซีลีเนียม 100 $\mu\text{g/ml}$ ปริมาณ 100 μl ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml เติมน้ำปราศจากไอออนให้ครบ 50 ml ปิดฝาเขย่าให้ผสมกัน

3.2.5 0.5% โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ใน 0.05% โซเดียมไฮดรอกไซด์

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 g ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ml เติมน้ำปราศจากไอออน 100 ml เขย่าให้ละลายจนหมด ชั่งโซเดียมโบโรไฮไดรด์ 2.5 g ใส่ใน

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เขย่าให้ละลาย ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้
ครบ 500 ml เขย่าให้ผสมกัน เตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้งาน

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์

4.1 การเตรียม Calibration curve

4.1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานซีลีเนียมความเข้มข้น 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ
10.0 ng/ml (ppb) ตามลำดับ โดยการเจือจางสารละลายมาตรฐานซีลีเนียม
ความเข้มข้น 100 ng/ml ดังแสดงในตารางที่ 6-1 จากนั้นปรับปริมาตรให้
ครบ 50 ml ด้วยน้ำปราศจากไอออน

ตารางที่ 6-1 การเตรียม Calibration curve ของสารละลายมาตรฐานซีลีเนียม

Reagent	blank	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ซีลีเนียม (ppb)				
		2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
Stock std. Se 100 ppb	-	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
2% Nitric acid (ml)	20	19	18	17	16	15
Hydrochloric acid (ml)	20	20	20	20	20	20

4.1.2 นำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้ในข้อ 4.1.1 มาวัดค่า Absorbance ด้วย
เครื่อง ICP-OES

4.1.3 Plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน
ซีลีเนียมกับค่า Absorbance

4.2 การเตรียมตัวอย่างซีรัม

- 4.2.1 ใช้ไมโครปิเปต ดูดตัวอย่างซีรัม 1000 μ l ใส่ในหลอด Kjeldahl ขนาด 30 ml
- 4.2.2 เติม 65% กรดไนตริก 3 ml และ 70% กรดเปอร์คลอริก 1 ml ลงในหลอดตัวอย่าง เขย่าเบาๆ ตั้งทิ้งค้างคืนไว้ในตู้ดูดควัน
- 4.2.3 นำหลอดตัวอย่างตั้งบนเตาย่อยตัวอย่าง ปรับระดับความร้อนที่ระดับกลางทิ้งไว้ 30 – 45 นาที ตัวอย่างจะเกิดการออกซิไดซ์และมีควันสีน้ำตาลเกิดขึ้น
- 4.2.4 เมื่อควันสีน้ำตาลจางลง ปรับระดับไฟให้สูงสุด ย่อยต่อจนสารละลายตัวอย่างมีปริมาตรเหลือประมาณ 3 ml
- 4.2.5 ยกหลอดตัวอย่างลงตั้งทิ้งให้เย็น จากนั้นเทสารละลายตัวอย่างลงในหลอดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีน
- 4.2.6 กลั้วหลอดตัวอย่างด้วยน้ำปราศจากไอออน 2-3 ครั้งๆ ละประมาณ 2 ml จากนั้นเทลงในหลอดพลาสติกชนิดโพลีโพรไพลีนแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ถึงขีด 10 ml
- 4.2.7 เติม 37% กรดไฮโดรคลอริก 10 ml ลงในหลอดพลาสติก เขย่าผสมกัน ปิดฝาแล้วนำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที
- 4.2.8 จากนั้นนำตัวอย่างออกตั้งทิ้งไว้ให้เย็น เทสารละลายลงใน ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 ml ปรับปริมาตรโดยเติมน้ำปราศจากไอออนให้ครบ 25 ml ผสมให้เข้ากัน

4.2.9 นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ ทำปฏิกิริยากับ 0.5% โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ใน 0.05% โซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยเครื่อง Hydride vapour generation วัดค่า Absorbance ด้วยเครื่อง ICP-OES โดยเทียบกับกราฟสารละลายมาตรฐาน

5. การคำนวณผล

คำนวณความเข้มข้นของซีลีเนียมในตัวอย่างซีรัมดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของซีลีเนียมในซีรัม} = 25X \text{ ng/ml}$$

โดยที่ x คือ ความเข้มข้นของซีลีเนียม (ng/ml) ที่ได้จาก Calibration curve

25 คือ Factor ที่ได้จากการเตรียมตัวอย่าง

6. การรายงานผล

รายงานผลเป็นตัวเลขที่วิเคราะห์ได้ หน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร

7. การควบคุมคุณภาพ

7.1 วิเคราะห์ Blank ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น Sample blank

7.2 วิเคราะห์ตัวอย่างควบคุม หรือ Standard control solution ทุกครั้งที่ทำการวิเคราะห์ โดยค่าวิเคราะห์ที่ได้ต้องมี % Recovery อยู่ในช่วง 80 – 120

7.3 ทำซ้ำตัวอย่างเดิมทุกๆ ตัวอย่างที่ 10 หรือทุกชุดการวิเคราะห์ โดยค่าการทำซ้ำต้องมีค่า %RPD (Relative percent duplicate) ไม่เกิน 10

บรรณานุกรม

- ปารณีย์ ญาติมาก เขาวลิต นาคทอง และนพมาศ ตระการรังสี. 2553. การศึกษาเปรียบเทียบระดับของแคดเมียมในไตของปศุสัตว์จากอำเภอแม่สอด จังหวัดตากกับตัวอย่างจากปริมณฑลของกรุงเทพ. วารสารพิษวิทยาไทย. 25(2): 81-89.
- มาลินี ลิ้มโกคา. 2523. พิษวิทยาและการวินิจฉัยโรคทางสัตวแพทย์. พิมพ์ครั้งที่1. โรงพิมพ์เจริญสนทวงศ์. กรุงเทพ. 276 หน้า.
- รัมภา อินทรรักษา ทาริกา ประมูลสินทรัพย์ จิรา คงครอง และสุชิน อรรถศาสตร์. 2537. ธาตุทองแดงเป็นพิษในแกะ. สัตวแพทยสาร. 45(2): 27-34.
- รัมภา อินทรรักษา ละณี สุขถิ่นไทย และชัยศิริ มหันตชัยสกุล. 2540. สารตะกั่วเป็นพิษในโคนม. สัตวแพทยสาร. 48(3): 25-30.
- วิภาดา ขจรเนกกุล สราวุธ ชูกระชั้น และวงศ์ขวัญ จิตนุพงศ์. 2551. การตรวจวัดปริมาณแคดเมียมในตับไก่ เป็ด และสุกร. กรมปศุสัตว์. เลขทะเบียนผลงานวิชาการ 51(2)-0304-141.
- วีณา เชื้อเงิน ศรุดา หวังอนุรักษกุล และพรพรรณ เล่าลือ. 2554. การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในเลือดโคโดยวิธี Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry. วารสารกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. 53(1): 60 – 69.
- ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2553. Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). [Online]. Available: http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/p_pookmanee/BT502-AAS.pdf. สืบค้นเมื่อ 22 ธันวาคม 2560.

- สถาบันสุขภาพสัตว์แห่งชาติ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2556. คู่มือการเก็บตัวอย่าง. โครงการโรคติดเชื้ออุบัติใหม่ ศูนย์ความร่วมมือไทย-สหรัฐ ด้านสาธารณสุข กระทรวงสาธารณสุข. หน้า 30 – 33.
- สนทนา มิมะพันธุ์ รัชณี ทิพย์กล่อม ดวงทอง ปัจฉิมะศิริ เจษฎา รัตโนภาส พนม ไสยจิตร และทนงศักดิ์ มะम्म. 2558. ผลของการให้อาหารที่มีวิตามินอีและซีลีเนียมต่ำต่อพยาธิสภาพของห่านและเป็ดเทศ. สัตวแพทยมหานครสาร. 10(2): 137-146.
- อาจารย์ ทองใบ จิระสุดา ห้าวหาญ และนพมาศ ตระการรังสี . 2553. Cadmium in Foods of Animal Origin: Should We Worry?. วารสารพิษวิทยาไทย. 25(2): 36-46.
- Abdel-Mageed,, A.B. and Oehme, F.W. 1990. A review of the biochemical roles, toxicity and interactions of zinc, copper and iron: 1. Zinc. *Vet Hum Toxicol.* 32(1): 34-39.
- Arnold, B.S. 2012. Sample submission for toxicological analysis. In: Veterinary Toxicology: basic and clinical principles. 2nd ed., edited by Gupta, R. C. Elsevier Inc, USA. 1335-1340.
- Binta, M. G., Baipoledi, E. K., Nyange, J. C. and Mushi, E. Z. 2012. Elemental sulphur toxicosis in cattle and sheep in Botswana. *J. Pet. Environ. Biotechnol.* 3(6): 1-5.
- Bressler, J.P. and Goldstein, G.W. 1991. Mechanism of lead neurotoxicity. *Biochem Pharmacol.* 41(4): 479-484.

- Casteel, S.W., Osweiler, G.D., Cook, W.O., Daniels, G. and Kadlec, R. 1985. Selenium toxicosis in swine. *J. Am. Vet. Med.* 186: 1084-1085.
- Chemistry LibreTexts. 2008. Atomic Absorption Spectroscopy. [Online]. Available: http://Chemlibretexts.org/Textbook_Maps/Analytical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Analytical_Chemistry_2.0. Accessed November 12, 2016.
- Crawford, G. 2012. Beef animal health: avoiding mineral toxicity in cattle. University of Minnesota. Minnesota, USA. 1-3.
- Cynthia, P.B. and Leon, D. 2004. Continuous flow hydride generation using the optima ICP. Perkin Elmer Life and Analytical Sciences. Bridgeport Avenue Shelton, USA. 1-4.
- Flanagan, R.J., Taylor, A., Watson, I.D. and Whelpton, R. 2007. Fundamentals of analytical toxicology. John Wiley & Sons Ltd, New Jersey, USA. 495P.
- Fulton, R.M. 2008. Other toxins and poisons. In: Disease of Poultry. 12nd ed., edited by Saif, Y.M., Fadly, A.M., Glisson, J.R., McDougald, L.R., Nolan, L.K. and Swayne, D. E. Blackwell publishing. Victoria, Australia. 1231 – 1260.
- Graham, T.W. 1991. Trace element deficiencies in cattle. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* 7(1): 153-215.

- Goyer, R.A. and Clarkson, T.W. 2001. Toxic effects of metals. In: Toxicology, the basic science of poisons, edited by Klaassen, C.D. McGraw-Hill Co., New York, USA. 811-867.
- Hargrave, J.G. 2009. Paracelsus. [Online]. Available: [https:// global.britannica.com/biography/ Paracelsus](https://global.britannica.com/biography/Paracelsus). Accessed November 20, 2016.
- Hooser, S.B. 2012. Cadmium. In: Veterinary Toxicology: basic and clinical principles. edited by Gupta, R.C. Elsevier Inc. USA. 503-507.
- Hutjens, M.F. 1999. Importance of trace minerals in dairy heifer, dry cow, and lactating cow rations. [Online]. Available: [http://livestocktrail.illinois.edu/dairynet/paperDisplay. cfm? ContentID=551](http://livestocktrail.illinois.edu/dairynet/paperDisplay.cfm?ContentID=551). Accessed November 12, 2016.
- Klasing, K.C. 2008. Nutritional diseases. In: Disease of Poultry. 12nd ed., edited by Saif, Y.M., Fadly, A. M., Glisson, J.R., McDougald, L.R., Nolan, L.K. and Swayne, D.E. Blackwell publishing. Victoria, Australia. 1136-1145.
- Koller, L.D. and Exon, J.H. 1986. The two faces of selenium-deficiency and toxicity-are similar in animals and man. *Can J Vet Res.* 50(3): 297-306.
- Luna, L.G. 1968. Manual of hisotologic staining method of the Armed Forces Institute of Pathology. Mc-Graw-Hill Book Company. New York, USA. 258P.
- Murray, G. 2010. Cobolt sulfate poisoning in ruminants. *Irish Vet J.* 63: 176-182.

- National Animal Disease Information Service. 2000. Copper Poisoning in Sheep.
[Online]. Available: <http://www.nadis.org.uk/bulletins/copper-poisoning-in-sheep.aspx>. Accessed November 20, 2016.
- National Research Council (NRC). 1998. Nutrient requirements of swine. 10th revised ed., National Academic Press, Washington, D.C., USA. 47-57.
- National Research Council (NRC). 2005. Mineral tolerance of animals. 2nd revised ed., National Academies Press, Washington, D.C., USA. 495P.
- Osweiler, G.D. 1996. Toxicology: the national veterinary medical series for independent study. William and Wilkins, USA. 179 – 205.
- Paulikova, I., Kovac, G., Bires, J., Paulik, S., Seidel, H. and Nagy, O. 2002. Iodine toxicity in ruminants. *Vet. Med. Czech.* 47(12): 343-350.
- Penrith, M.L. and Robinson, J.T.R. 1995. Acute selenium toxicosis as a cause of paralysis in pigs. *J. S. Afr. Vet. Assoc.* 66: 47-48.
- Plumlee, K.H. 2004. Clinical Veterinary Toxicology. Mosby, Inc. USA. 193-221.
- Radostits, O.M., Gay, C.C., Hinchcliff, K.W. and Constable, P.D. 2007. Veterinary Medicine: a textbook of the diseases of cattle, horses, sheep, pigs and goats. 10th ed., Saunders Ltd. USA. 1824 – 1826.

- Reese, D.E. and Miler, P.S. 2012. Nutrient deficiencies and excesses. In: Disease of Swine. 10th ed., edited by Zimmerman, J. J., Karriker, L. A., Ramirez, A., Schwartz, K. J. and Stevenson, G. W. John Wiley & Sons, Inc. UK. 923-935.
- Reis, L.S.L.S., Pardo, P.E., Camargos, A.S. and Oba, E. 2010. Mineral elements and heavy metal poisoning in animals. *J. Med. Med. Sci.* 1(12): 560-579.
- Siwatt, P. 2010. Analytical instruments for environmental sciences. NIDA: Center for research and development of disaster prevention and management, Bangkok, Thailand. 424P.
- Suttle, N. 2010. Mineral nutrition in livestock. 4th ed., MPG Books group. UK. 565P.
- Stahr, H.M. 1991. Analytical methods in toxicology. Iowa state University, New York, USA. 328P.
- Stowe, H.D., Eavey, A.J., Granger, L., Halstead, S. and Yamini, B. 1992. Selenium toxicosis in feeder pigs. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 201: 292-295.
- Taussky, H.H. and Shorr, E. 1952. A microcolorimetric method for the determination of inorganic phosphorus. *J. Biol. Chem.* 202(2): 675 – 685.
- Traverso, S.D., Loretto, A.P., Donini, M.A. and Driemeier, D. 2004. Lead poisoning in cattle in southern Brazil. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 56(3):418-421.

The Merck Veterinary Manual. 2014. Nutrition and Disease in Dairy Cattle. [Online].

Available: www.merckvetmanual.com/mvm/management_and_nutrition/nutrition_dairy_cattle/nutrition_and_disease_in_dairy_cattle.html.

Accessed November 20, 2016.

Thompson, L.J., Hall, J.O. and Meerdink, G.L. 1991. Toxic effects of trace element excess. *Vet Clin North Am Food Anim Pract.* 7(1): 277-306.

Thompson, L.J. 2012. Sodium chloride (salt). In: *Veterinary Toxicology: basic and clinical principles*. 2nd ed., edited by Gupta, R. C. Elsevier Inc, USA. 558-566.

ตารางภาคผนวก 1 รายละเอียดการเก็บตัวอย่างเพื่อตรวจวิเคราะห์แร่ธาตุทาง ห้องปฏิบัติการ

รายการวิเคราะห์	ชนิดตัวอย่าง	ปริมาณตัวอย่าง	การเก็บรักษาตัวอย่างขณะขนส่ง
แคลเซียม	ซีรัม	3 ml	เก็บที่อุณหภูมิ 2 – 4 °C
ทองแดง			
เหล็ก	เลือดแข็งตัว	5-10 ml	อุณหภูมิห้อง
แมกนีเซียม			
แมงกานีส	น้ำริโกล น้ำจากฟาร์ม	500 ml	เก็บที่อุณหภูมิ 2 – 4 °C
โซเดียม	เลี้ยงสัตว์		
โปแตสเซียม			
สังกะสี	คับ ไต	100 g	เก็บที่อุณหภูมิ 2 – 4 °C
โมลิบดีนัม	อาหารสำเร็จรูป	200 g	อุณหภูมิห้อง
ซัลเฟอร์			
ไอโอดีน			
โคบอลต์			
อาร์เซนิก			
ฟอสฟอรัส			
ซีลีเนียม			
ตะกั่ว	เลือดเต็มส่วน (Whole blood)	10 ml	เก็บที่อุณหภูมิ 2 – 4 °C
ตะกั่ว	น้ำริโกล น้ำจากฟาร์ม	500 ml	เก็บที่อุณหภูมิ 2 – 4 °C
แคดเมียม	เลี้ยงสัตว์		
โครเมียม	คับ ไต อาหารใน กระเพาะ	100 g	เก็บที่อุณหภูมิ 2 – 4 °C
	อาหารสำเร็จรูป	100 g	อุณหภูมิห้อง
	พืชอาหารสัตว์	200 g	อุณหภูมิห้อง

ตารางภาคผนวก 2 ตำแหน่งและขนาดเข็มที่ใช้เจาะเลือดสัตว์

ชนิดสัตว์	ตำแหน่งที่จะเจาะเลือด	เบอร์เข็ม	ความยาวเข็ม (นิ้ว)
ม้า	เส้นเลือดดำที่คอ (Jugular vein)	16 – 19	1.5 – 2
โค	เส้นเลือดดำที่คอ (Jugular vein) เส้นเลือดดำที่โคนหาง (Coccygeal vein) เส้นเลือดดำที่หู (Ear vein)	16 – 19	1.5 – 2
แกะ แพะ	เส้นเลือดดำที่คอ (Jugular vein)	18 - 20	1.5 – 2
สุกร	เส้นเลือดดำบริเวณระหว่างคอและ หน้าอกตอนบน (Anterior vena cava)	20	1.5 – 4
	เส้นเลือดดำที่หู (Ear vein)	20	1
ไก่	เส้นเลือดดำบริเวณใต้ปีก (Wing vein) หรือคอ (Jugular vein)	22 – 26	1

ตารางภาคผนวก 3 ค่า Maximum tolerable levels (MTL)ของแร่ธาตุที่สำคัญในอาหาร
โค สุกร และสัตว์ปีกที่กำหนดโดย NRC (2005)

แร่ธาตุ	ผลกระทบต่อ สุขภาพ	โค	สุกร	สัตว์ปีก
แคลเซียม	ปานกลาง	1.5 %	1 %	1.5 %
ฟอสฟอรัส	ปานกลาง	0.7 %	1 %	1 %
แมกนีเซียม	น้อย	0.6 %	0.24 %	0.5 %
โซเดียมคลอไรด์	มาก	3 %	3 %	1.7 %
โพแทสเซียม	ปานกลาง	2 %	1 %	1 %
ซัลเฟอร์	มาก	0.4 %	0.4 %	0.4 %
ทองแดง	มาก	40 ppm	250 ppm	250 ppm
เหล็ก	ปานกลาง	500 ppm	3000 ppm	500 ppm
ซีลีเนียม	มาก	5 ppm	4 ppm	3 ppm
สังกะสี	ปานกลาง	500 ppm	1000 ppm	500 ppm
ไอโอดีน	น้อย	50 ppm	400 ppm	300 ppm
แมงกานีส	น้อย	2000 ppm	1000 ppm	2000 ppm
โคบอลต์	น้อย	25 ppm	100 ppm	25 ppm
โมลิบดีนัม	มาก	5 ppm	150 ppm	100 ppm
โครเมียม	น้อย	100 ppm	100 ppm	500 ppm
ตะกั่ว	มาก	100 ppm	10 ppm	10 ppm
แคดเมียม	มาก	10 ppm	10 ppm	10 ppm

