เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความสำคัญของแร่ธาตุในอาหาร

แร่ธาตุเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการสร้างเปลือก และเนื้อเยื่อที่อ่อนนุ่ม (soft tissues) เช่น sulfer ในโปรตีน Zn ใน carboxypeptidase (metalloprotien) รวมทั้งเป็นองค์ประกอบ cofactor และ activator ในเอนไซม์หลายชนิด เช่น alkaline phosphatase, แร่ธาตุที่ละลายได้ดี (Ca, P, Na, K และ Cl) จะทำหน้าที่ในระบบ Osmoregulation สมดุลเกลือแร่ระหว่างร่างกายสัตว์กับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งบำรุงรักษาความสมดุลความเป็นกรดด่าง (acid-base balance) และความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ (membrane potential) นับว่ายังคงมีงานวิจัยน้อยมากที่เกี่ยวกับความต้องการแร่ธาตุ (dietary mineral requirments) ของครัสเตเชียนที่อาศัยในทะเล (บุญรัตน์ ประทุมชาติ และคณะ; 2546, 2551)

1. แร่ธาตุหลัก (Macro Mineral)

1.1 แคลเซียม (Calcium)

ปลาและกุ้ง สามารถดูดซึมแร่ธาตุบางชนิดจากน้ำ เช่น แคลเซียม อาจจะพบการดูดซึมทั้งหมดหรือบางส่วนจากน้ำ (Desshimaru *et al.*, 1978 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997) จึงไม่จำเป็นต้องเสริมแคลเซียมในอาหารกุ้ง *L. vannamei* (Davis *et al.*, 1993 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997) แต่บางครั้งพบว่าสัตว์น้ำอาจมีการขาดแคลเซียมเมื่อนำไปเลี้ยงในน้ำที่มีแคลเซียมต่ำ (Robinson *et al*, 1984, 1986, 1987 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมในอาหารจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความปฏิสัมพันธ์ (interact) ระหว่างสารอื่นๆ มากกว่าความต้องการแคลเซียมในอาหาร

1.2 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำ การดูดซึมฟอสฟอรัสของสัตว์น้ำจากน้ำจืดหรือน้ำเค็มโดยทั่วไปยังมีไม่เพียงพอ (Cuzon *et al.*, 2004) ดังนั้นฟอสฟอรัสในอาหารสัตว์น้ำจึงมีความสำคัญ เบื้องต้นพบว่าครัสเตเชียนมีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหาร 1-2% (Kitabayashi *et al.*, 1971; Deshimaru and Yone, 1978; Kanazawa *et al.*, 1984 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997) ในกุ้ง *P. japonicus* ซึ่งต้องการฟอสฟอรัสประมาณ 0.3-0.8% (National Research Council, 1993 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997) ที่ต้องการสูงในกุ้งมีผลมาจากเนื่องจากกุ้งมีความจำเป็นต้องใช้ฟอสฟอรัสในการสร้างเปลือกตลอดวงจรการลอกคราบ Cazon (1982) รายงานว่ากุ้งที่ให้หอยแมลงภู่ซึ่งมีฟอสฟอรัสต่ำ 0.7% เป็นอาหารจะมีผลทำให้การเจริญเติบโตลดลง สอดคล้องกับการใช้อาหารกึ่งบริสุทธิ์ที่มีระดับฟอสฟอรัส 0.41% และ 0.56% เลี้ยงกุ้ง *L. vannamei* และ *P. japonicus* จะทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตลดลง นอกจากนี้ความต้องการของฟอสฟอรัสในกุ้งยังขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมในอาหารอีกด้วย ดังการทดลองได้ใช้สัดส่วนระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัส อัตราส่วน 0.56 ต่อ 1.10 จะทำให้กุ้งวัยรุ่น (*Hormarus americanus*) มีการเจริญเติบโตดีหากสัดส่วนเพิ่มเป็น 1.55 หรือมากกว่าจะมีผลทำให้การสร้างเปลือกชั้น endocuticle ผิดปรกติ โดยทั่วไปอัตราส่วน 1 ต่อ 1 ได้ถูกแนะนำให้ใช้ในอาหารกุ้ง *P.*

japonicus การเสริมแคลเซียม 0.34% ของฟอสฟอรัสจะยับยั้งการนำไปใช้ประโยชน์ของฟอสฟอรัสในกุ้ง ดังนั้น ระดับแคลเซียมที่ผสมในอาหารไม่ควรเกิน 2.3% การกำหนดการดูดซึมของฟอสฟอรัสจากแหล่งวัตถุดิบหลายชนิดในกุ้งและการสูญเสียหรือเจือจางจากอาหารควรที่จะทำให้การประเมินแหล่งอาหารในเทอมของสารอาหาร เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม Davis และ Amold ใช้ chromic oxide เป็น marker ในการพิจารณา APA ของ inorganic phosphorus และผลของการเติมแคลเซียมต่อ APA ในกุ้ง *L. vannamei* ปรากฏดังนี้

Calcium phosphate monobasic	46.3%
Calcium phosphate dibasic	19.1%
Calcium phosphate tribasic	9.9%
Potassium phosphate monobasic	68.1%
Sodium phosphate monobasic	68.2%

พบว่าค่า APA ของอาหารที่ใช้ Sodium phosphate monobasic เป็นแหล่งฟอสฟอรัสจะถูกลด activity โดย calcium lactate (50% APA) แต่ไม่มีปัญหาที่ใช้ calcium carbonate (65.5% APA) หรือ calcium chrolide (68.2% APA) การปรากฏของ phytase จะไปยับยั้งการใช้แคลเซียมและฟอสฟอรัส เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำในระบบย่อยอาหารในกุ้ง *P. japonicus* และ *L. vannamei* การใช้ประโยชน์ phytase อย่างไรก็ดีกุ้ง *P. japonicus* สามารถใช้ประโยชน์ phytase Phosphorus ได้ถึง 47.3% และ 8.4% ในกุ้ง *L. vannamei* (Civera *et al.*, 1990 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997) การเติม phytase 1.5% ในอารหารจะทำให้ลดการใช้ฟอสฟอรัสและสังกะสีในกุ้ง *L. vannamei*

1.3 โซเดียม (Sodium)

โซเดียมที่อยู่ในเลือดมีน้อยมาก ส่วนใหญ่อยู่ในกล้ามเนื้อประมาณ 90% ปริมาณของโซเดียมจะแตกต่างกันตามที่อยู่อาศัย มีหน้าที่ต่อไปนี้

ก.3.1 รักษาสมดุลของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ควบคู่ไปกับโปแตสเซียม (K+)

ก.3.2 รักษาสภาพความเป็นกรด – ด่างในร่างกายให้สมดุล

ก.3.3 ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของกล้ามเนื้อและระบบประสาท

1.4 คลอรีน (Chlorine)

คลอรีนพบในของเหลวภายในและภายนอกเซลล์ สัตว์สามารถสะสมได้มากกว่าโซเดียมและโปแตสเซียม มีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1.4.1 ถ้าอยู่ในเลือดจะรักษาความเป็นกรด – ด่างของน้ำย่อยและเป็นส่วนประกอบในน้ำย่อยด้วย

1.4.2 รักษาความดันออสโมติก ควบคุมการเข้าออกของสารและน้ำภายในเซลล์คลอรีนเกี่ยวข้องกับการเกิดสมดุลของแคทไอออน (cation) และแอนไอออน (anion) โดยอยู่รวมกับโซเดียม ถ้าอยู่ในสภาพสมดุลการแลกเปลี่ยนของแมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium sulphate) จะเกิดได้ดี ปริมาณคลอรีนจะแปรผกผันกับซัลเฟต เช่น ถ้าปริมาณซัลเฟตลดลง ปริมาณคลอรีนจะเพิ่มขึ้น

1.4.3 กระตุ้นน้ำย่อย amylase ปริมาณของคลอรีนในเลือดของครัสเตเชียนในทะเลจะเท่ากับในน้ำทะเลหรือใกล้เคียงกัน จึงไม่มีปัญหาการปรับสมดุลเหมือนสัตว์อื่นๆ และช่วยกระตุ้นน้ำย่อยให้ทำงานดีขึ้น

1.5 โปแตสเซียม (Potassium)

โปแตสเซียมพบอยู่ในเซลล์ของร่างกายและเลือด ส่วนในของเหลวภายนอกเซลล์พบโปแตสเซียมปริมาณน้อยมาก ในระยะที่มีการเจริญเติบโตหรือเริ่มสร้างเนื้อเยื่อใหม่ ความต้องการโปแตสเซียมในเซลล์จะสูงมาก ซึ่งถ้ามีโปแตสเซียมในเลือดจะเป็นของเสียที่ต้องขับออกทางแอนเทนนอลแกลนด์ (antennal gland) พร้อมๆ กับแมกนีเซียมและซัลเฟต แต่ปริมาณน้อยกว่า

1.6 แมกนีเซียม (Magnesium)

แมกนีเซียมมีความสำคัญต่อกุ้งทะเลในแง่เป็นตัวที่ช่วยปรับสมดุลเกลือแร่ภายในร่างกาย ความต่างศักย์ของเนื้อเยื่อ การสร้างเปลือก และการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เป็นแร่ธาตุที่พบปริมาณสูงในน้ำทะเล โดยทั่วไปแล้วกุ้งและปูที่ดำรงชีวิตอยู่ในทะเลจะพยายามขับแมกนีเซียมออกจากร่างกายเพื่อให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าภายนอก ดังนั้นจึงเป็นข้อเท็จจริงที่ว่ากุ้งทะเลที่เลี้ยงในน้ำความเค็มสูงอยู่แล้วจะไม่ขาดแร่ธาตุชนิดนี้ อย่างไรก็ดี พบว่ากุ้งขาวจะมีการเจริญเติบโตดีที่สุดหากมีการเสริมแมกนีเซียม 1.2 g/Kg ในอาหาร แต่จะมีการเจริญเติบโตลดน้อยลงหากมีในอาหารมากเกิน 0.4 g/Kg สรุปได้ว่าในอาหารควรมีแมกนีเซียมอยู่ในระดับ 0.25-4 g/Kg จะส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของกุ้งทะเล (Davis and Lawrence, 1997)

2. แร่ธาตุรอง (Micro Mineral)

2.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นโลหะที่จำเป็นต่อสัตว์ มันทำหน้าที่ในตับและในการสร้างเอนไซม์ lysyl oxidase, cytochrome *c* oxidase (CCO), ferroxidase, tyrosinase และ superoxide dismutase (SOD) (Dell *et al.*, 1976 อ้างโดย Lee *et al.*, 2002) ทองแดงมีมากในครัสเตเชียนซึ่งบรรจุอยู่ในฮีโมไซยานินใช้เป็นรงควัตถุหลักในการขนส่งออกซิเจนในเลือด (Lee and Shiau, 2002) เนื่องจากทองแดงมีปริมาณต่ำมากในน้ำทะเล จึงทำให้กุ้งได้รับไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการทางสรีระเคมี เพื่อก่อให้เกิดการเจริญเติบโตสูงสุด การสร้างเนื้อเยื่อจากการสะสมแร่ธาตุ (tissue mineralization) และ กิจกรรมของเอนไซม์ (enzyme activity) อีกทั้งกุ้งต้องใช้ทองแดงเพื่อเป็นองค์ประกอบของฮีโมไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุเกี่ยวกับการหายใจ (respiratory pigments) เกี่ยวข้องกับการสร้างเลือด (hematopoiesis) รวมถึงการสังเคราะห์คอลลาเจน (collagen) และอีแลสติน (elastin) (Cuzon *et al.*, 2004) หากกุ้งขาดทองแดงจะพบปริมาณทองแดงต่ำในเปลือกส่วนหัวกุ้ง เลือด ตับ และหัวใจ พบว่าการเจริญเติบโตของกุ้งขาว *L. vannamei* จะลดลงหากมีปริมาณทองแดงต่ำกว่า 34 mg/Kg ในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ (semi-purified diets) (Davis and Lawrence, 1997) และในอาหารสำหรับกุ้ง *P. orientalis* ควรมีการเสริมทองแดงในปริมาณ 53 mg/kg (Liu *et al.*, 1990 อ้างโดย Davis and Lawrence, 1997)

จากการศึกษาของ Kanazawa *et al.* (1984) อ้างโดย Lee *et al.* (2002) พบว่าในกุ้ง *P. japonicus* ที่ให้อาหารที่เสริมทองแดง 30 mg/kg เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นไม่มีความแตกต่างกับกุ้งที่ให้อาหารที่ไม่ได้เสริมทองแดง Lin *et al.* (2008) ได้ศึกษาการเสริมทองแดงในอาหารปลา *Epinephelus malabaricus* พบว่าระดับ

ทองแดงที่ทำให้ปลามีการเจริญเติบโตดีที่สุดมีค่าสูงจะอยู่ในช่วง 4-6 mg/kg ถ้าหากเสริมทองแดงในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้การเจริญเติบโตลดลง แต่การเสริมทองแดงในอาหารปลาไม่มีผลต่ออัตราการรอดตาย

อย่างไรก็ตามการเสริมทองแดงตามความต้องการและความเป็นพิษของทองแดงมีการศึกษาในสัตว์ที่มีขนาดใหญ่ แต่ยังไม่มีการศึกษาในสัตว์ทะเล โดยที่สัตว์ทะเลมีการรับทองแดงไปใช้ในปริมาณที่น้อย สำหรับพวกครัสเตเชียนจะมีข้อมูลที่เกียวข้องกับความต้องการแร่ธาตุที่หาง่ายแต่มีผลการทดลองที่ค่อนข้างแปรปรวน รายงานว่าทองแดงไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของ *P. japonicus* โดยการทดลองมีผลทำให้รู้ว่าการขาดแคลนและการมีมากเกินไปของทองแดงจะมีผลต่อการยับยั้งการตอบสนองของภูมิคุ้มกันและมีความเข้มงวดมากขึ้นที่จะป้องกันการติดเชื้อระหว่างปลากับสัตว์อื่นๆ (Lee and Shiau, 2002)

2.2 เหล็ก (Iron)

ธาตุเหล็กมีความสำคัญต่อกระบวนการเผาผลาญไขมัน (Lipid Oxidation) อาการขาดในกุ้งไม่ค่อยพบมากในกุ้ง หากมีปริมาณมากเกินไปจะมีผลเสียทำให้การเจริญเติบโตลดลง ซึ่งเคยพบในกุ้ง *P.japonicus* เนื่องจากไปเพิ่มการเผาผลาญไขมัน (Lipid Oxidation) และไปลดความเสถียรของกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid) โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องเสริม (Davis and Lawrence, 1997)

2.3 ไอโอดีน (Iodine)

โดยทั่วไปแล้วไม่ค่อยได้ทำการประเมินถึงความจำเป็นของไอโอดีนต่อสรีระวิทยากุ้ง การเสริมปริมาณไอโอดีน 1 mg/Kg ในอาหาร จึงน่าที่จะเพียงพอที่ไม่ทำให้กุ้งมีการขาด (Davis and Lawrence, 1997)

2.4 แมงกานีส (Manganese)

การเสริมแมงกานีสในอาหารสำหรับกุ้งมีความจำเป็น เนื่องจากปริมาณแมงกานีสในน้ำทะเลมีค่าต่ำมาก (0.01 mg/l) อีกทั้งขบวนการนำแมงกานีสไปใช้ประโยชน์ในร่างกายถูกยับยั้งด้วยกรดไฟติก (Phytic Acid) การเสริมในอาหารจึงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณา อาการขาดแมงกานีสจะทำให้โตช้า การพัฒนาของเปลือกผิดปรกติ ลูกวัยอ่อนตายสูง และอัตราการฟักต่ำ (Davis and Lawrence, 1997)

2.5 ซิลีเนียม (Selenium)

ซิลีเนียมเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ glutathion peroxidase ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยน hydrogen peroxide ไปเป็นน้ำ และ lipid hydroperoxides ไปเป็น lipid alcohols และช่วยป้องกันเซลล์จากการทำลายของ peroxidase ร่วมกับไวตามินอีทำหน้าที่ antioxidant เพื่อป้องกัน polyunsaturated phospholipids ใน cellular membranes จากการทำลายของ peroxidative อาการขาดซิลีเนียมคือทำให้การพัฒนาของเปลือกผิดปรกติ ทำให้กุ้ง juvenile *P.vannamei* จะโตดีที่สุดหากมีการเสริมซิลีเนียมลงไป 0.2-0.4 mg/Kg อย่างไรก็ดีในอาหารสำเร็จรูปจะพบว่ามีปริมาณเพียงพอหากใช้ปลาป่นเป็นส่วนประกอบมากกว่า 15% และควรหลีกเลี่ยงการเสริมซิลีเนียมเกิน 0.3 mg/Kg เนื่องจากมีแนวโน้มอาจเกิดความเป็นพิษได้ (Davis and Lawrence, 1997)

2.6 สังกะสี (Zinc)

เพื่อทำให้ขบวนการสร้างเนื้อเยื่อเป็นไปได้อย่างปกติในกุ้ง *L. vannamei* จึงควรมีสังกะสี 33mg/Kg ในอาหาร การนำธาตุนี้จากอาหารมาใช้ประโยชน์ได้ต่ำ การเสริมจึงมีความจำเป็น อีกทั้งการนำสังกะสีไปใช้ประโยชน์ในร่างกายยังมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับปริมาณของ tricalcium phosphate และ phytase ก็ยังไปลดการนำไปใช้ของสังกะสีอีกทางหนึ่งด้วย (Davis and Lawrence, 1997)

3. **ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน**

3.1 ความแตกต่างของชนิดสัตว์ และอายุ (Species and age) โดยทั่วไปแล้วครัสเตเชียนน้ำจืดจะมีประสิทธิภาพการย่อยอาหารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตเช่น รำสาลี หรือรำข้าวได้สูงกว่าครัสเตเชียนน้ำเค็ม แต่ครัสเตเชียนทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนจากกุ้งป่น และเคซีนได้ดีใกล้เคียงกัน ในขณะที่เครย์ฟิชจะมีประสิทธิภาพการย่อยอาหารในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่มีไฟเบอร์สูงได้ดี และจะมีประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนจากสิ่งมีชีวิตต่ำกว่าเป็นต้น สำหรับความสัมพันธ์ของอายุ และประสิทธิภาพการย่อยอาหารนั้นพบว่าเกี่ยวข้องกับความสมบูรณ์ของระบบย่อยอาหาร และกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีค่าต่ำ และมีความต้องปริมาณสารอาหารที่แตกต่าง (Lee and Lawrence, 1997)

3.2 ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม (Environmental factors) นับว่ามีความสัมพันธ์ทางอ้อมเนื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีระวิทยาของครัสเตเชียนซึ่งอาจส่งผลต่อกิจกรรมต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปเช่น การยอมรับอาหาร อัตราการกินอาหาร หรือความต้องการอาหารเป็นต้น ซึ่งปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่ได้มีการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็มน้ำ pH และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เป็นต้น (Lee and Lawrence, 1997)

3.3 องค์ประกอบทางโภชนาการ (Nutrient associations) เป็นหลักฐานที่แน่ชัดว่าองค์ประกอบทางโภชนาการของอาหารในธรรมชาติ หรืออาหารสำเร็จรูปมีอิทธิพลโดยตรงต่อระสิทธิภาพการย่อยอาหารของครัสเตเชียน เนื่องจากวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิดมีโครงสร้าง หรือองค์ประกอบแตกต่างกัน เช่นวัตถุดิบโปรตีนจากพืชบางชนิดแม้จะมีโปรตีนสูงแต่ก็มีไฟเบอร์สูงนอกเหนือจากนั้นคือสารยับยั้งการย่อยของเอนไซม์ย่อยอาหารที่มีปริมาณสูง หากผ่านกระบวนการผลิตที่ไม่มีคุณภาพโดยวัตถุดิบแต่ละชนิดก็จะมีความเหมาะสมกับสายพันธุ์ และช่วงอายุของครัสเตเชียนซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้น (Lee and Lawrence, 1997)

3.4 การยอมรับอาหาร (Feed Palatability) ในที่นี้รวมถึงความพึงพอใจหรือการยอมรับในสี รส รูปร่าง และขนาดของอาหาร ซึ่งจากการศึกษาในอดีตมีการยอมรับว่าการยอมรับอาหาร เป็นปัจจัยสำคัญอันดับต้น ๆ ที่มีผลต่ออัตราการกินอาหาร รวมถึงกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ และระบบย่อยอาหารให้ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Lee and Lawrence, 1997)