ธาตุอาหารพืช

อาหารของพืช

อาหารของพืช คือ อนินทรียสาร ซึ่งประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ ซึ่งได้จากอากาศ น้ำ และดิน โดยพืชที่มีใบสีเขียวได้รับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ออกซิเจน (O_2) จากอากาศ ได้น้ำ (H_2O) และแร่ธาตุอาหารต่าง ๆ ซึ่งเป็นอนินทรียสารจากดิน เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงจะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานทางเคมีกลายเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ยังสังเคราะห์อินทรียสารที่จำเป็นอื่น ๆ เช่น โปรตีน ลิปิด กรดนิวคลีอิก วิตามิน เป็นต้น โดยพืชจะนำสารที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้ไปใช้ในกิจกรรมการเจริญเติบโตและสร้างผลิตผลที่เป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีพของมนุษย์และสัตว์ จึงเรียกธาตุที่เป็นอาหารของพืชสีเขียวให้แตกต่างจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ว่า “ธาตุอาหารพืช” (mineral plant nutrition) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตพืชเพื่อเป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์

องค์ประกอบของพืช

หากนำพืชสดที่สมบูรณ์มาต้นหนึ่ง อบให้แห้งในตู้อบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลาย ๆ ชั่วโมง น้ำในเนื้อเยื่อพืชจะค่อย ๆ ระเหยไปจนแห้งสนิท สำหรับพืชล้มลุกทั่วไป น้ำหนักแห้งจะมีค่าประมาณ ร้อยละ 10-20 ของน้ำหนักสด แต่ไม้เนื้อแข็งและเมล็ดพืช มีน้ำเป็นองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย เนื้อเยื่อพืชแห้งประกอบไปด้วยผนังเซลล์ ซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตและลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก กับโปรโตพลาสซึม ซึ่งมีโปรตีน ลิปิด กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ และธาตุต่าง ๆ ที่มิได้เป็นองค์ประกอบในสารเหล่านี้ ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่ามีธาตุต่าง ๆ ในพืชไม่น้อยกว่า 60 ธาตุ โดยพบ ออกซิเจน คาร์บอน และไฮโดรเจน ในปริมาณมาก และพบธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน โมลิบดินัม คลอรีน นิกเกิล ในปริมาณที่แตกต่างกันไป และพบธาตุอื่น ๆ อีก เช่น อะลูมินัม ซิลิกอน ตะกั่ว ปรอท

อะซีนิก และยูเรเนียม เป็นต้น แต่ธาตุที่พบในพืชไม่ได้มีความจำเป็นต่อการดำรงชีพของพืชทั้งหมด มีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (essential nutrient elements) อยู่เพียง 17 ชนิด ซึ่งถ้ากล่าวถึง**ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช**จะต้องหมายถึง

1. ธาตุนั้นต้องจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและการขยายพันธุ์ของพืชถ้าขาดธาตุอาหารนั้นไป พืชจะไม่สามารถเจริญเติบโตจนครบวงจรการดำรงชีพได้

2. อาการขาดธาตุนั้นของพืช จะแสดงออกเป็นลักษณะเฉพาะ ซึ่งป้องกันหรือแก้ไขอาการขาด โดยให้ธาตุอาหารพืชที่ขาดในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้เท่านั้น ไม่มีธาตุอาหารอื่นใดมาแก้ไขทดแทนได้

3. ธาตุอาหารพืชนั้นต้องมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง มิใช่เพียงแต่ช่วยแก้ไขความไม่เหมาะสมของสภาพทางเคมี หรือด้านอื่นของดินหรือวัสดุปลูก

ธาตุอาหารพืชที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช มี 17 ธาตุ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

1. ธาตุอาหารมหัพภาคหรือมหธาตุ (macronutrients หรือ major elements) หมายถึง ธาตุที่พืชต้องการในปริมาณมากและสะสมในเนื้อเยื่อพืชในความเข้มข้นสูงกว่า 500 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (พืชแห้ง) มี 9 ธาตุ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1.1 ธาตุอาหารที่ได้จากอากาศและน้ำ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ซึ่งจะปรากฏเป็นรูปสารประกอบ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกซิเจน (O_2) จากอากาศ และน้ำ (H_2O) เมื่อรวมตัวกันจะมีในพืชไม่ต่ำกว่า ร้อยละ 96 ของน้ำหนักแห้งของพืช โดยจะถูกใบพืชที่มีสีเขียวและรากพืชดูดซึมมาใช้ในการสังเคราะห์แสงที่ใบ ผลิตเป็นอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากพืชได้รับธาตุอาหารเหล่านี้จากอากาศและน้ำ จึงไม่ค่อยพบปัญหาการขาดธาตุดังกล่าวในพืช

1.2 ธาตุอาหารหลัก หรือธาตุปุ๋ย คือ ธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก และดินที่ใช้ในการเพาะปลูกมักจะขาดธาตุเหล่านี้ มี 3 ธาตุ คือ ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ปุ๋ยเคมีที่ผลิตจำหน่ายในท้องตลาดมักมีธาตุทั้ง 3 เหล่านี้ จึงเรียกอีกชื่อว่า ธาตุปุ๋ย

1.3 ธาตุอาหารรอง เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมากเช่นกัน แต่น้อยกว่าธาตุอาหารหลัก มี 3 ธาตุ คือ ธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน ในดินเพาะปลูกพืชส่วนใหญ่มีเพียงพอ แต่ปัจจุบันมีปัญหาขาดแคลนธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียมมากขึ้นกว่าแต่ก่อน เนื่องจากมีการใช้ปุ๋ยเคมีมากขึ้น ทำให้เกิดผลตกค้างในดินเป็นกรด จึงพบว่าพืชมีอาการขาดธาตุแคลเซียม และแมกนีเซียม มากขึ้น

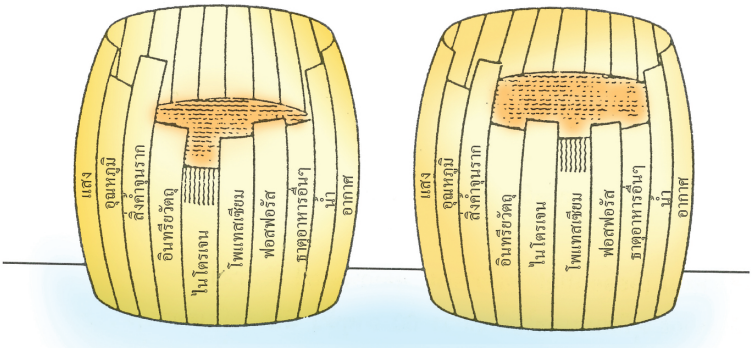
2. ธาตุอาหารเสริม หรือธาตุอาหารจุลธาตุ (micronutrient elements) เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ ถ้าขาดพืชไม่สามารถเจริญเติบโตจนครบวงจรชีวิตของพืชได้ มี 8 ธาตุ ได้แก่ ธาตุเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน โมลิบดินัม คลอรีน และ

นิกเกิล ปริมาณธาตุที่พบในดินหรือในพืชจึงแสดงความเข้มข้นในหน่วยเป็นส่วนต่อล้าน (พีพีเอ็ม : ppm) โดยนิเกิลเป็นธาตุสุดท้ายที่ผ่านการพิสูจน์ว่าเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อ พ.ศ. 2530 แต่ในพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 แก้ไขเพิ่มเติมโดย พระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 ยังไม่ระบุนิเกิลเป็นธาตุอาหารเสริม จึงจะยังไม่กล่าวถึงในรายละเอียดของธาตุดังกล่าว

นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่น ๆ ที่มีความสำคัญ ต่อพืชบางชนิดเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต แต่ไม่ใช่ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของข้าว กล่าวคือ จะไปช่วยส่งเสริมให้ต้นข้าวแข็งแรง ไม่ล้มและยากต่อการทำลายของโรคและแมลง ส่วนธาตุโคบอลต์ จะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว พืชตระกูลถั่วบางชนิดต้องการโคบอลต์เพื่อส่งเสริมให้แบคทีเรียที่อาศัยในปมของรากตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ดีขึ้น เนื่องจากโคบอลต์เป็นส่วนประกอบของวิตามินบี 12 ซึ่งแบคทีเรียต้องการ เป็นต้น

หลักของปัจจัยที่ขาดแคลน (Law of the Minimum)

พืชจะเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูงเมื่อได้รับปัจจัยที่จำเป็นต่าง ๆ อย่างเหมาะสม หากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งไม่เหมาะสมแม้เพียงปัจจัยเดียว จะทำให้พืชเจริญเติบโตช้าหรือไม่เจริญเติบโตเลย (ภาพที่ 9) ตามหลักของปัจจัยที่ขาดแคลน (principle of limiting factors) ซึ่งกล่าวว่า “แม้พืชจะได้รับปัจจัยอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตอย่างเหมาะสมแล้วก็ตาม หากมีปัจจัยหนึ่งขาดแคลนหรือไม่เหมาะสมแล้ว การเจริญเติบโตและผลผลิตพืชจะถูกจำกัดด้วยปัจจัยนี้” ดังนั้นต้องมีการจัดสถาพแวดล้อมดิน น้ำ และธาตุอาหารพืช ให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตของพืชอย่าให้มีปัจจัยที่เป็น ตัวกำจัดการเจริญเติบโตของพืชได้ หรือให้มีน้อยที่สุด



ภาพที่ 9 ระดับน้ำในถังเปรียบเหมือนระดับผลผลิตของพืช รูปซ้ายแสดงว่าไนโตรเจนเป็นธาตุที่จำกัดผลผลิตของพืชนี้ แม้ว่าธาตุอื่น และปัจจัยอื่นมีเพียงพอก็ไม่สามารถทำให้ผลผลิตสูงไปกว่านี้ได้ เพราะพืชได้รับธาตุไนโตรเจนไม่เพียงพอ แต่เมื่อเพิ่มธาตุไนโตรเจน (รูปขวามือ) ผลผลิตพืชเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่งซึ่งไม่สูงไปกว่านั้นอีก เนื่องจากธาตุโพแทสเซียมเริ่มเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตแทน

ที่มา : ยงยุทธ โอสถสภา และคณะ, 2541

หน้าที่และอาการขาดธาตุอาหารพืช

ธาตุอาหารพืชที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่ละธาตุมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป ถ้าพืชได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ ก็จะแสดงอาการขาดธาตุอาหารแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 5 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม

ธาตุอาหารพืช	หน้าที่สำคัญ	อาการขาด
ไนโตรเจน	ช่วยในกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโน โปรตีน คลอโรฟิลด์ กรดนิวคลีอิก และเอ็นไซม์ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของยอดอ่อน ใบและกิ่งก้าน	โตช้า ใบล่างมีสีเหลืองซีดทั้งแผ่นใบ ต่อมากลายเป็นสีน้ำตาลหลุดร่วง หลังจากนั้นที่ใบบน ๆ มีสีเหลือง
ฟอสฟอรัส	เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิกและนิวคลีโอโปรตีน ที่มีความสำคัญต่อยีนส์ การแบ่งเซลล์และสร้างเซลล์ของพืช และเป็นองค์ประกอบของสารที่เป็นตัวถ่ายทอดพลังงานระหว่างสารต่อสารในระบบต่าง ๆ ในพืช ได้แก่ การสังเคราะห์แสง การหายใจ การเคลื่อนย้ายสาร ช่วยการเจริญเติบโตของรากพืช เป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการออกดอก ติดเมล็ด และการพัฒนาของเมล็ดและผล	ใบล่าง ๆ เริ่มเป็นสีม่วงตามแผ่นใบ ต่อมาใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและหลุดร่วง สำต้นแคระแกร็น ไม่ผลิดอกออกผล
โพแทสเซียม	เป็นองค์ประกอบสำคัญของเอ็นไซม์ที่ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์แสง การสร้างโปรตีน และแป้ง ช่วยลำเลียงแป้งและน้ำตาลจากใบไปยังผล ช่วยควบคุมการปิดเปิดของปากใบ ช่วยให้ทุกส่วนของพืชและระบบรากแข็งแรง ทนทานต่อโรคและแมลง ช่วยเพิ่มขนาดและปรับปรุงคุณภาพของผลผลิต	ใบล่างมีอาการเหลือง แล้วกลายเป็นสีน้ำตาลตามขอบใบ แล้วลุกลามเข้ามาเป็นหย่อม ๆ ตามแผ่นใบ อาจพบแผ่นใบโค้งเล็กน้อย รากเจริญช้า ลำต้นอ่อนแอ ผลไม่โต
แคลเซียม	เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างที่สำคัญของผนังเซลล์ช่วยให้ผนังเซลล์แข็งแรง มีบทบาทสำคัญต่อการแบ่งเซลล์ การผสมเกสร การงอกของเมล็ด ช่วยให้เอ็นไซม์บางชนิดทำงานได้ดีขึ้น	ใบที่งอกใหม่ ๆ หงิก ตายอดไม่เจริญ อาจมีจุดดำที่เส้นใบ รากสั้น ผลแตก และมีคุณภาพไม่ดี
แมกนีเซียม	เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลด์ซึ่งสำคัญต่อการสังเคราะห์แสง และเป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแป้ง สร้างกรดนิวคลีอิก ช่วยเสริมสร้างการดูดใช้และการลำเลียงธาตุฟอสฟอรัส ช่วยเคลื่อนย้ายน้ำตาลในพืชและช่วยในการงอกของเมล็ด	ใบแก่จะเหลือง ยกเว้นเส้นใบยังเขียวอยู่ และใบหลุดร่วงเร็ว

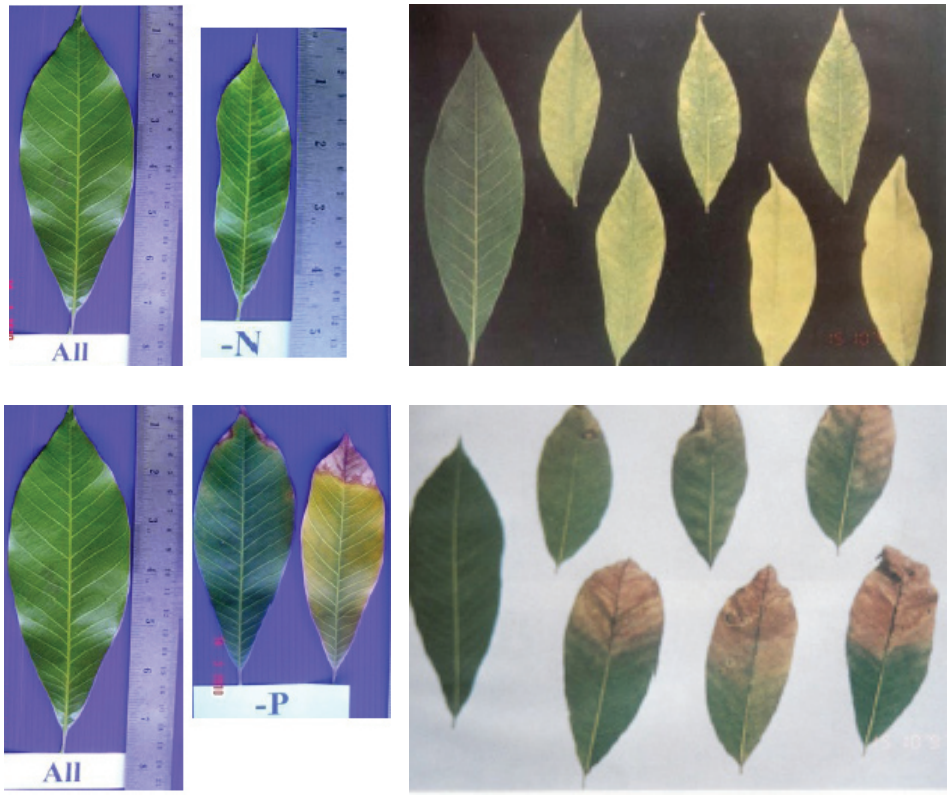
ธาตุอาหารพืช	หน้าที่สำคัญ	อาการขาด
กำมะถัน	มีหน้าที่เกี่ยวกับการถ่ายทอดพลังงานเช่นเดียวกันกับฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน และโปรตีน ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการสร้างวิตามิน โปรตีน ไธอะมีน และโคเอ็นไซม์ เอ มีผลทางอ้อมต่อการสร้างคลอโรฟิลด์และแบ่งเซลล์ในส่วนยอดของพืช ช่วยให้โครงสร้างของโปรตีนมีเสถียรภาพและช่วยสร้างน้ำมันในเมล็ด	ใบทั้งบนและล่างมีสีเหลืองซีด และต้นอ่อนแอ
โบรอน	ช่วยในการออกดอกและผสมเกสร มีบทบาทสำคัญในการติดผลและการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาลผ่านผนังเซลล์ เป็นธาตุจำเป็นสำหรับการสร้างโปรตีน ควบคุมสัดส่วนของ K : Ca เพิ่มหรือส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของธาตุอื่น ๆ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแคลเซียม ควบคุมการใช้น้ำของพืช	ตายอดตายแล้วเริ่มมีตาข้าง แต่ตาข้างจะตายอีก ลำต้นไม่ค่อยยืดตัว กิ่งและใบจึงชิดกัน ใบเล็ก หนา โค้งและเปราะ
เหล็ก	จำเป็นสำหรับการสร้างและรักษาระดับของคลอโรฟิลด์ในพืช เป็นองค์ประกอบหลักของเอ็นไซม์หลายชนิด ซึ่งเป็นตัวลำเลียงอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจของพืช เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงไนโตรเจนของพืชตระกูลถั่ว	ใบอ่อนมีสีขาวซีดในขณะที่ใบแก่ยังมีสีเขียวสด
ทองแดง	เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์หลายชนิดที่ช่วยสร้างวิตามินเอในพืช และเป็นตัวลำเลียงอิเล็กตรอนในเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชั่น-รีดักชั่น ในพืช	ตายอดชะงักการเจริญเติบโตและกลายเป็นสีดำ ใบอ่อนเหลือง พืชทั้งต้นชะงักการเจริญเติบโต
แมงกานีส	เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ ในพืช เช่น กระบวนการออกซิเดชั่น-รีดักชั่น เป็นองค์ประกอบของเอ็นไซม์บางชนิดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจของพืช กระตุ้นการทำงานของเอ็นไซม์ที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของไนโตรเจนและการสร้างคลอโรฟิลด์	ใบอ่อนมีสีเหลืองขณะที่เส้นใบยังเขียว และเหี่ยว หลุดร่วงในที่สุด

ธาตุอาหารพืช	หน้าที่สำคัญ	อาการขาด
สังกะสี	เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นในออกซินและฮอร์โมนพืชเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างกรดอินโดลอะซิติก (IAA) เป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสร้างคลอโรฟิลด์และเมล็ดพืช มีบทบาทในการสร้างโปรตีน ส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในพืช	ใบอ่อนมีสีเหลืองซีดและปรากฏสีขาวๆ ประปรายตามแผ่นใบ โดยเส้นใบยังเขียว รากสั้นไม่เจริญโตตามปกติ
โมลิบดินัม	เป็นส่วนประกอบของเอ็นไซม์ไนเตรทรีดักเตส (nitrate reductase) ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ช่วยให้พืชใช้ไนโตรเจนให้เป็นประโยชน์ และมีส่วนช่วยในการตรึงไนโตรเจนจากอากาศของพืชตระกูลถั่ว	พืชมีอาการคล้ายขาดไนโตรเจน ใบมีลักษณะโค้งคล้ายถ้วย ปรากฏจุดเหลือง ๆ ตามแผ่นใบ
คลอรีน	เป็นตัวกระตุ้นกิจกรรมของเอ็นไซม์และเร่งการสร้างแป้ง ช่วยในการเจริญเติบโตของรากและควบคุมการอุ้มน้ำของเซลล์ในพืช มีบทบาทในกระบวนการออสโมซิสของพืชที่ปลูกในดินเค็ม	พืชเหี่ยวง่าย ใบสีซีดและบางส่วนแห้งตาย
นิเกิล	มีบทบาทเกี่ยวกับเอ็นไซม์หลายชนิด เช่น เอ็นไซม์ยูริเอส ที่ช่วยในการย่อยสลายยูเรียให้เป็นแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ จำเป็นในการสร้างเมล็ด และทำให้เมล็ดแข็งแรง	จะเกิดการสะสมยูเรียเป็นพิษในใบพืชตระกูลถั่ว เมล็ดธัญพืชไม่เข็งแรงและไม่งอก

ที่มา : วิจิตร วังใน, 2552

ภาพที่ 10 อาการขาดธาตุโพแทสเซียมในปาล์มน้ำมัน

ที่มา : จาก Power point ประกอบบรรยายเรื่อง การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในปาล์มน้ำมัน ในฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบศูนย์จัดการดินปุ๋ยชุมชน จังหวัดนครศรีธรรมราช ระหว่างวันที่ 9-12 มิถุนายน 2558



ภาพที่ 11 อาการขาดธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในยางพารา
ที่มา : powerpoint ประกอบบรรยายเรื่อง การใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินในปาล์มน้ำมัน ในการฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบศูนย์จัดการดินปุ๋ยชุมชน จังหวัดนครศรีธรรมราช ระหว่างวันที่ 9-12 มิถุนายน 2558

รูปของธาตุอาหารที่พืชดูดไปใช้ประโยชน์

พืชดูดธาตุอาหารได้ 2 ทาง คือ ทางราก และทางใบ โดยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน พืชดูดไปใช้ประโยชน์ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และในรูปของน้ำได้โดยตรง ส่วนรูปของธาตุอาหารในดินที่พืชดูดไปใช้อาจเป็นรูปเกลือหรือไอออน ซึ่งต้องอยู่ในรูปของสารละลายในดิน โดยได้จาก 2 แหล่ง

1. ในสารละลายดิน จะมีแอนไอออน (ไอออนที่มีประจุลบ) และแคตไอออน (ไอออนที่มีประจุบวก) บางส่วนปะปนอยู่

2. ดูดซับอยู่ที่ผิวของคอลลอยด์ดิน (absorbed ions) หรือไอออนแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable ions) เนื่องจากคอลลอยด์ดินมีประจุส่วนมากเป็นลบ ดังนั้นไอออนที่ถูกดูดซับจึงเป็นแคตไอออน

ตารางที่ 6 รูปของธาตุอาหารที่พืชดูดไปใช้ประโยชน์และความเข้มข้นในเนื้อเยื่อพืชที่จัดว่าเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช

ธาตุอาหารพืช	สัญญลักษณ์ธาตุ	รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช	ความเข้มข้นในเนื้อเยื่อพืช (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
คาร์บอน	C	CO_2	45
ออกซิเจน	O	O_2, H_2O	45
ไฮโดรเจน	H	H^+, H_2O	6
ไนโตรเจน	N	NH_4^+ (เกลือแอมโมเนียม) , NO_3^- (เกลือไนเตรท)	1.5
โพแทสเซียม	K	K^+ (โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้และโพแทสเซียมไอออนในสารละลายดิน)	1.0
ฟอสฟอรัส	P	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} (เกลือฟอสเฟต)	0.2
แคลเซียม	Ca	Ca^{2+} (แคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ และแคลเซียมไอออนในสารละลายดิน)	0.5
แมกนีเซียม	Mg	Mg^{2+} (แมกนีเซียมแลกเปลี่ยนได้ และแมกนีเซียมไอออนในสารละลายดิน)	0.2
กำมะถัน	S	SO_4^{2-} (เกลือซัลเฟต)	0.1
เหล็ก	Fe	Fe^{2+}, Fe^{3+} (เหล็กแลกเปลี่ยนได้ และเหล็กไอออนในสารละลายดิน)	100
คลอรีน	Cl	Cl^- (เกลือคลอไรด์ต่าง ๆ)	100
แมงกานีส	Mn	Mn^{2+} (แมงกานีสแลกเปลี่ยนได้ และแมงกานีสไอออนในสารละลายดิน)	50
โบรอน	B	$H_3BO_3^-$ (กรดบอริก),	20
		$B_4O_7^{2-}$ (เกลือโบเรต)	
สังกะสี	Zn	Zn^{2+} (สังกะสีแลกเปลี่ยนได้และสังกะสีไอออนในสารละลายดิน)	20
ทองแดง	Cu	Cu^{2+} (ทองแดงแลกเปลี่ยนได้ และทองแดงไอออนในสารละลายดิน)	6
โมลิบดินัม	Mo	MoO_4^{2-} (เกลือโมลิบเดต)	0.1

ที่มา : ยงยุทธ โอสถาสภา และคณะ, 2541

การเคลื่อนที่ของธาตุอาหารในต้นพืช

การเคลื่อนที่ของธาตุอาหารจากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง เกิดขึ้นทั้งในต้นพืชและในดิน เมื่อธาตุอาหารเคลื่อนย้ายเข้าสู่รากพืชหรือส่วนอื่น ๆ ของต้นพืช จะถูกส่งไปตามท่อน้ำ (ไซเล็ม : xylem) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อพืชที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุต่าง ๆ จากรากไปสู่ลำต้น ใบ และส่วนต่าง ๆ ของพืช หรือท่ออาหาร (โฟลเอ็ม : phloem) เนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงอาหารจากใบไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของพืช ซึ่งการเคลื่อนย้ายจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดและรูปของธาตุอาหารนั้น ๆ ส่วนระยะทางที่เคลื่อนย้ายได้อาจเป็นระยะสั้น ๆ เพียงไม่กี่เซนติเมตร จนถึงเป็นหลาย ๆ เมตร แล้วแต่ชนิดของพืช ธาตุอาหารจะถูกส่งผ่านไซเล็ม และโฟลเอ็มไปที่ต้นและใบเพื่อเข้าร่วมในกระบวนการสร้างและใช้สารประกอบต่อไป และพืชจะส่งสารที่ผลิตได้ทางโฟลเอ็มส่งไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

การเคลื่อนที่ของธาตุอาหารในดิน

ปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดไปใช้จะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นกับปัจจัย 2 ประการ คือ

1. การเคลื่อนย้ายของไอออนมาสู่ผิวราก
2. อัตราการดูดไอออนนั้นของรากพืช

ธาตุอาหารเข้าสู่รากพืชได้ 3 วิธี

1. การไหลแบบกลุ่มก้อนตามกระแสน้ำ (mass flow)

ปกติรากพืชย่อมดูดน้ำจากดินมาใช้อยู่เสมอ โดยน้ำในดินถูกดูดเข้าสู่รากพืช เคลื่อนย้ายไปภายในรากและลำต้น น้ำส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโต แต่ส่วนมากจะเป็นไอน้ำออกทางปากใบ ซึ่งเรียกว่า การคายน้ำ จากปรากฏการณ์ที่พืชดูดน้ำทางรากและคายน้ำทางใบอย่างต่อเนื่อง สารละลายของดินปริมาณมากจึงเคลื่อนย้ายจากดินมาสู่ผิวราก ซึ่งธาตุอาหารต่าง ๆ ในสารละลายของดินมาพร้อมกับกระแสน้ำด้วย ต่อจากนั้นรากพืชก็สามารถดูดธาตุอาหารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ทั้งนี้ปริมาณของธาตุอาหารที่มาสู่ผิวรากโดยการไหลพร้อมกระแสน้ำนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้น้ำของพืชและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายของดินนั้น

2. การแพร่ในสารละลายดิน (diffusion)

เมื่อรากพืชได้ดูดธาตุชนิดใดชนิดหนึ่งจากสารละลายดินเข้าไปในรากแล้ว ความเข้มข้นของไอออนชนิดนั้น ๆ ในสารละลายดินบริเวณใกล้รากพืชย่อมลดลงต่ำกว่าบริเวณใกล้เคียง ไอออนประเภทเดียวกันจากบริเวณอื่น ๆ ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าก็สามารถแพร่มาสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าเพื่อรักษาสมดุลไว้

3. รากไชชอนไปสัมผัสคอลลอยด์ดินและไอออนที่อยู่ห่างจากบริเวณเดิม (root interception)

รากพืชซึ่งรวมถึงรากขนอ่อนมีการเจริญเติบโตในแง่การขยายขนาดและเพิ่มความยาว จึงไชชอนออกไปสัมผัสดินได้กว้างขวางและทั่วถึงยิ่งขึ้น การแผ่ขยายของรากไปสัมผัสคอลลอยด์ดินและไอออนต่าง ๆ จะเกิดผล 2 ประการ คือ

3.1 เมื่อรากสัมผัสแนบชิดกับผิวคอลลอยด์ จะมีการแลกเปลี่ยนระหว่าง H^+ ที่ผิวรากซึ่งมาจากเมทาบอลิซึมของรากเอง กับแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวคอลลอยด์นั้น เช่น K^+ , Ca^{2+} เป็นต้น เป็นเหตุให้แคตไอออนดังกล่าวย้ายที่ไปดูดซับที่ผนังเซลล์ของราก แล้ว H^+ ที่ผิวรากก็เปลี่ยนมาถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์แทน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อสัมผัส (contact exchange)** ซึ่งทำให้แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้มาดูดซับอยู่ที่ผนังเซลล์ราก และถูกดูดเข้าไปในเซลล์พืชด้วยเป็นอีกกลไกหนึ่งต่างหาก แต่กลไกนี้มีส่วนสนับสนุนให้รากพืชได้รับธาตุอาหารไม่มากนัก

3.2 รากพืชมีโอกาสสัมผัสไอออนต่าง ๆ ในสารละลายดินจำนวนมากและทั่วถึงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อรากชอนไชขยายอาณาบริเวณออกไป ซึ่งจะช่วยลดระยะทางและเวลาที่ไอออนในส่วนอื่น ๆ จะต้องเคลื่อนย้ายมาสู่ผิวรากได้เป็นอย่างมาก ผิวรากที่แผ่ขยายออกไปจึงสัมผัสกับไอออนได้โดยตรง ทั่วถึงและรวดเร็วกว่า

อย่างไรก็ตาม แม้การไชชอนของรากพืชจะก่อให้เกิดผลมากกว่าดังกล่าว แต่การแพร่และการที่ไอออนไหลเป็นกลุ่มก้อนตามกระแสน้ำ ก็ยังมีบทบาทในการสนองความต้องการธาตุอาหารจากบริเวณใกล้เคียงให้แก่รากพืชได้ด้วย

จากกลไกที่ธาตุอาหารในดินมาสู่รากพืชทั้ง 3 แบบข้างต้น มีอิทธิพลต่อการดูดธาตุอาหารแต่ละธาตุของรากพืชแตกต่างกันไป (ตารางที่ 7) ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าการแพร่ของฟอสเฟต โพแทสเซียม และแมงกานีสไอออนมีความสำคัญต่อการดูดธาตุอาหารทั้งสามของรากพืชเป็นอย่างมาก เนื่องจากแหล่งที่มาของธาตุอาหารทั้งสามธาตุในดิน เป็นแร่ซึ่งละลายอยู่ในสารละลายดินได้น้อย แต่ไนโตรเจน แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน โบรอน และโมลิบดินัม ส่วนมากไหลแบบกลุ่มก้อนตามสารละลายดิน ในขณะที่ ทองแดง และเหล็ก รากสามารถไชชอนไปดูดไอออนได้มาก เป็นต้น

แม้กลไกทั้ง 3 แบบ จะมีผลโดยตรงต่ออัตราการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหารมาสู่ผิวรากก็ตาม แต่ยังมีปัจจัยเสริมอีก 2 ประการที่ช่วยเร่งให้รากพืชได้รับไอออนมากขึ้น คือ

1) Root exudates 2) กิจกรรมของจุลินทรีย์ในไรโซเสฟียร์ (rhizosphere)

รากพืชคายคาร์บอนไดออกไซด์และขับอินทรียสารหลายชนิดออกมาสู่ดิน ของเหลวที่ถูกขับออกมา เรียกว่า **Root exudates** นอกจากนี้ยังมีเยื่อหมวกรากเก่าในบริเวณนั้นด้วย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารและแหล่งพลังงานที่ดีของจุลินทรีย์ดิน เป็นเหตุให้ดินที่อยู่ชิดผิวรากในอาณาบริเวณใกล้ ๆ มีกิจกรรมทางชีวเคมีสูง ซึ่งก่อประโยชน์หลายประการแก่พืช จึงเรียกบริเวณนี้ว่า **ไรโซสเฟียร์** กิจกรรมดังกล่าวนี้มีส่วนช่วยให้ไอออนของธาตุอาหารมาสู่ผิวรากได้เร็วขึ้น

ตารางที่ 7 เปอร์เซนต์การเคลื่อนย้ายของธาตุอาหารในดินชนิดต่าง ๆ มาสู่รากพืชใน 3 รูปแบบ

ธาตุอาหารพืช	การดูดธาตุอาหารของรากพืช (%)		
	mass flow	root interception	diffusion
N	98	2	-
P	6	3	91
K	20	2	78
Ca	72	28	-
Mg	87	13	-
S	95	5	-
Fe	10	50	40
Mn	5	15	80
B	65	3	32
Zn	30	30	40
Cu	20	70	10
Mo	95	5	-

ที่มา : วิจิตร วังใน, 2552

ความสามารถในการเคลื่อนที่ของธาตุอาหารในดิน แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. ธาตุที่เคลื่อนที่ได้สูง ได้แก่ N (ในรูป NO_3^-) , S, Na, Cl, B
2. ธาตุที่เคลื่อนที่ได้ปานกลาง ได้แก่ K, Ca, Mg, N (ในรูป NH_4^+)
3. ธาตุที่เคลื่อนที่ได้น้อย ได้แก่ P, Mo, Mn, Fe, Cu, Zn

การดูดธาตุอาหารของเซลล์พืช

กลไกการดูดซึมแคตไอออนและแอนไอออนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane) เข้าสู่เซลล์องพืช มี 2 วิธี ได้แก่

1. Passive absorption การดูดซึมแบบแพสซีพ

หมายถึง กลไกการดูดไอออนของเซลล์โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากเมทาบอลิซึม (metabolism) อันได้แก่ พลังงานจากการสังเคราะห์แสงและการหายใจ แต่จะใช้พลังงานทางฟิสิกส์ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าภายนอกและภายในเซลล์ ถ้าภายนอกสูงกว่าภายในเซลล์ ไอออนก็จะเคลื่อนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่เซลล์พืชได้ หากศักย์ไฟฟ้าด้านประจุลบภายในสูงกว่า ไอออนบวกในสารละลายดินภายนอกก็จะเข้าไปในเซลล์เพื่อสะเทินประจุ

2. Active absorption หรือการดูดแบบแอคทีฟ

หมายถึงกลไกการดูดไอออนของเซลล์ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานจากเมทาบอลิซึมช่วยในการเคลื่อนย้ายไอออนจากผิวเยื่อหุ้มเซลล์ด้านนอกเข้าไปภายในเซลล์ โดยมีตัวลำเลียงไอออน (carrier) อยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์เป็นตัวชักนำไอออนเฉพาะชนิดจากเยื่อหุ้มเซลล์ด้านนอกสู่ด้านใน การทำงานของกลไกนี้จะสัมฤทธิ์ผลเมื่อตัวลำเลียงได้รับพลังงานจากเมทาบอลิซึม แล้วยอมให้ไอออนที่เหมาะกับตัวลำเลียงนี้เข้าเกาะ (ตัวลำเลียงมีความจำเพาะต่อไอออน) ต่อจากนั้นก็นำพาไอออนเข้าสู่ด้านในของเยื่อหุ้มเซลล์แล้วปลดปล่อยไอออนนั้นไว้ในเซลล์ เมื่อเสร็จสิ้นภารกิจดังกล่าวแล้วตัวลำเลียงก็จะรับพลังงานใหม่อีกครั้งหนึ่งและพร้อมจะชักนำไอออนเข้ามาใหม่ ดังนั้น อัตราการดูดไอออนโดยวิธีนี้จะลดลงอย่างมากหากรากพืชขาดออกซิเจน อุณหภูมิดินต่ำหรือสูงเกินไป หรือพืชได้รับสารพิษต่อการหายใจอันเป็นผลให้อัตราการหายใจจองรากลดลง

การเคลื่อนที่ของธาตุอาหารในต้นพืช

ตามที่กล่าวมาแล้วธาตุอาหารเคลื่อนย้ายในต้นพืชผ่านทางไซเล็ม และโฟลเอ็ม หรือผ่านทางเนื้อเยื่ออื่น ๆ ซึ่งอัตราการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหารในต้นพืชแตกต่างกันออกไป แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1. ธาตุที่เคลื่อนที่ได้สูง ได้แก่ N , P, K, Na, Mg, Cl และ S
2. ธาตุที่เคลื่อนย้ายได้ปานกลาง ได้แก่ Fe, Mn, Zn, Cu และ Mo
3. ธาตุที่เคลื่อนที่ได้น้อย ได้แก่ Ca และ B

ธาตุที่เคลื่อนย้ายได้สูงถ้าขาดธาตุดังกล่าวจะแสดงอาการที่ใบแก่ก่อน แต่ธาตุที่เคลื่อนย้ายได้ปานกลางและน้อย หากขาดธาตุดังกล่าวจะแสดงอาการที่ใบอ่อนหรือตายอดก่อน และธาตุที่เคลื่อนย้ายโดยผ่านทางไซเล็มเพียงทางเดียว และเคลื่อนย้ายได้ต่ำทางโฟลเอ็ม ได้แก่ Ca และ B หากสภาพความชื้นสูง ทำให้พืชมีการคายน้ำได้น้อย อาจส่งผลให้พืชขาด Ca และ B ได้ โดยเฉพาะพืชที่ปลูกในโรงเรือน เช่น แตงกวา พริกหวาน ผักกาดหอม กะหล่ำปม กะหล่ำปลี เป็นต้น

การสูญเสียธาตุอาหารไปจากดิน

ดินแม้เดิมจะมีความอุดมสมบูรณ์ มีธาตุอาหารพืชที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ธาตุอาหารในดินอาจสูญเสียได้หลายทาง ดังนี้

1. สูญเสียโดยติดไปกับผลผลิตและส่วนต่าง ๆ ของพืชที่เก็บเกี่ยวออกไปจากเรือกสวนไร่นา
2. สูญเสียไปกับน้ำที่ไหลบ่าไปตามผิวดิน (run off) หรือน้ำที่ไหลซึมลงสู่เบื้องล่าง (percolation)

3. สูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อนของดิน (soil erosion) เมื่อเกิดการชะล้างพังทลายของหน้าดินไม่ว่าจะโดยการกระทำของน้ำ ลม หรือ ฝน ซึ่งปกติหน้าดินหรือดินชั้นบน จะเป็นชั้นที่มีความอุดมสมบูรณ์มีปริมาณธาตุอาหารสะสมอยู่มากกว่าชั้นอื่น ๆ การสูญเสียหน้าดินไป ความอุดมสมบูรณ์ของดินก็จะลดลงไปด้วย

4. สูญเสียโดยการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซสูญหายไปจากดิน ซึ่งจะเกิดกับธาตุอาหารพืชพวกไนโตรเจน โดยเฉพาะในรูปของไนเตรท (NO_3^-) จะเกิดขึ้นในสภาพที่ดินมีการถ่ายเทอากาศไม่ดี เช่น ในสภาพน้ำขัง ดังนั้นในนาข้าวต้องเลือกใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปแอมโมเนียม (NH_4^+) หรือ ยูเรีย

การเพิ่มเติมธาตุอาหารให้แก่พืช

การสูญเสียธาตุอาหารของดินด้วยสาเหตุต่าง ๆ ข้างต้น เพื่อให้สามารถผลิตพืชได้ผลผลิตดีมีคุณภาพได้อย่างยั่งยืน จำเป็นต้องเพิ่มเติมธาตุอาหารให้แก่ดิน ในรูปของปุ๋ย

คำนิยามของปุ๋ย

ปุ๋ย คือ สิ่งที่ให้ธาตุอาหารแก่พืช ได้แก่ สารอินทรีย์ อินทรีย์สังเคราะห์ อนินทรีย์ หรือจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี กายภาพ หรือชีวภาพในดินเพื่อบำรุงความเจริญเติบโตให้กับพืช

ประเภทของปุ๋ย

ปุ๋ยแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ปุ๋ยเคมี
2. ปุ๋ยอินทรีย์
3. ปุ๋ยชีวภาพ

สำหรับ ปุ๋ยอินทรีย์เคมี จัดเป็นปุ๋ยเคมี ส่วนปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ ขอให้เข้าใจตรงกันว่าไม่มีปุ๋ยชนิดนี้ในเชิงวิชาการ ซึ่งจะได้กล่าวถึงปุ๋ยแต่ละประเภทในบทต่อ ๆ ไป