โพแทสเซียมกับการเจริญของพืช
Potassium for Plant Growth

ปุญญิศา ตระกูลยิ่งเจริญ[1*]
Punyisa Trakoonyingcharoen [1*]

(Received 5 January 2022; Accepted 23 January 2022)

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ตรวจเอกสารถึงความสำคัญของธาตุโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื้อหาแสดงให้เห็นว่าแม้โพแทสเซียมมิได้เป็นองค์ประกอบหลักในเซลล์โครงสร้างพืช แต่มีความสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการหลายอย่างในด้านสรีรวิทยาและชีวเคมีของพืช ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์แสง การเปิด-ปิดปากใบ การสังเคราะห์โปรตีน และกิจกรรมของเอนไซม์ เป็นต้น งานวิจัยในสองทศวรรษที่ผ่านมา พบว่าโพแทสเซียมทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณความเครียดและบรรเทาความเครียด รวมทั้งโพแทสเซียมสามารถลดอนุมูลอิสระและเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระในผลผลิตพืชภายใต้สภาวะเครียดจากปัจจัยสภาพแวดล้อม แสดงให้เห็นว่าธาตุโพแทสเซียมมีความจำเป็นต่อคุณภาพผลผลิตด้วย โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับด้านสารโภชนาการ และได้อภิปรายปัจจัยที่มีผลต่อการจัดการโพแทสเซียมไว้ในบทความนี้ด้วย

Abstract

This article reviewed the importance of potassium on plant growth. Potassium is not a constituent of the plant structure but it has a regulatory function in several physiological and biochemical processes. They include photosynthesis, stomatal regulation, protein synthesis and enzyme activation. In recent decades, potassium was found to be related to stress signaling and stress mitigation in plants. Many reports support that potassium reduces free radical and enhances antioxidant defense in plants under various abiotic stress. Potassium thus, is an essential nutrient to quality crops specifically for

คำสำคัญ: โพแทสเซียม, การขาดโพแทสเซียม, การเจริญของพืช

[1] ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน ม.เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
[*] Corresponding author: punyisat@yahoo.com

nutrition. Factors affecting on potassium management in plant were discussed in this reviewed article.

บทนำ

ธาตุโพแทสเซียม (K) จัดเป็นธาตุอาหารหลักที่มีความจำเป็นต่อพืชและมนุษย์ ได้รับสมญานามว่าเป็น “ธาตุอาหารแห่งคุณภาพในการผลิตพืช” เนื่องจากโพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญหลายด้าน เช่น 1) กระตุ้นกิจกรรมชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ต่าง ๆ ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และในกระบวนการสะสมธาตุอาหาร และสะสมโภชนสารที่สำคัญซึ่งเกิดขึ้นในไซโทซอลและออร์กาเนลล์ต่าง ๆ 2) สร้างสมดุลของประจุในเซลล์ 3) ควบคุมการเปิดปิดปากใบในเซลล์คุม 4) ควบคุมการเคลื่อนไหวของใบแบบนาสติกในนวมโคนใบ ในเซลล์พืชพบว่าโพแทสเซียมเป็นแคตไอออนที่มีอยู่ในเซลล์พืชมากที่สุด อาจสูงถึง 10% ของน้ำหนักแห้ง แต่ทั่วไปมักพบประมาณ 2-5% ของน้ำหนักแห้ง (White and Karley, 2010) โพแทสเซียมแตกต่างจากธาตุไนโตรเจน (N) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) ฟอสฟอรัส (P) ตรงที่โพแทสเซียมไม่ได้เป็นสารประกอบของสารใด ๆ ภายในเซลล์พืช แต่อยู่ในรูปของเกลืออินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ พืชจึงสามารถดูดใช้โพแทสเซียมได้ในปริมาณที่สูงพอ ๆ กับไนโตรเจน และสูงกว่าฟอสฟอรัสประมาณ 3-4 เท่า (Ali *et al*., 2020; Singh *et al*., 2021)

Keywords : potassium, potassium deficiency, plant growth

พื้นที่ใช้ทำการเกษตรส่วนใหญ่ของโลกขาดโพแทสเซียม ในจีนพบว่าพื้นที่ประมาณ 3/4 ของดินปลูกข้าวและพื้นที่ประมาณ 2/3 ของดินที่ใช้ปลูกข้าวสาลีทางตอนใต้ของออสเตรเลียขาดโพแทสเซียม (Rengel and Damon, 2008; Ruan *et al*., 2015) สำหรับดินของประเทศไทยพื้นที่ดินมากกว่าร้อยละ 60 เป็นดินที่มีสถานะโพแทสเซียมต่ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ถ้าพืชขาดโพแทสเซียมแม้เพียงเล็กน้อย ส่งผลต่ออัตราการเติบโตและผลผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Singh *et al*., 2013) หากพืชขาดโพแทสเซียมจะมีภาวะซ่อนอาการขาด (hidden hunger) พืชจึงไม่แสดงอาการขาดให้เห็น ต่อเมื่อพืชขาดโพแทสเซียมรุนแรง จะพบอาการภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ (chlorosis) และภาวะเนื้อเยื่อตาย (necrosis) ตามลำดับ โดยสังเกตพบในใบล่างก่อน สาเหตุการขาดธาตุโพแทสเซียมมีหลายประการ เช่น ธรรมชาติของดินมีโพแทสเซียมต่ำ โดยเฉพาะในดินที่เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดที่เป็นหินทรายหรือตะกอนอายุมาก การสูญเสียหน้าดินจากการกร่อน การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในปริมาณที่ต่ำกว่าที่ติดไปกับผลผลิต ซึ่งพบว่ามีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราต่ำกว่าที่ติดไปกับผลผลิตถึง 35 % ของผลผลิตทั่วโลก (Smil, 1999; Wulff *et al*., 1998) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เช่น การขังน้ำ ความแห้งแล้ง อุณหภูมิดิน ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้พืชขาดโพแทสเซียม (Mengel and Kirby, 2001)

ปริมาณโพแทสเซียมในพืชที่ปลูกในดินต่างกัน หรือมีการจัดการดินต่างกัน ทำให้การสะสมโพแทสเซียมในผลผลิตพืชมีปริมาณแตกต่างกัน พืชที่ปลูกในดินที่ขาดโพแทสเซียม

หรือเติบโตในสภาพแวดล้อมที่พืชไม่สามารถดึงโพแทสเซียมมาใช้ได้จะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตต่ำ มีปัญหาผลผลิตไม่ได้คุณภาพ ทั้งขนาด รูปร่าง รสชาติ อายุการเก็บรักษา ตลอดจนมีผลต่อการสะสมโภชนสารต่าง ๆ (Cui *et al*., 2020; Stone and Weaver, 2021)

บทบาทของโพแทสเซียมต่อพืช

โพแทสเซียมมีส่วนสำคัญในการเป็นตัวควบคุม (regulator) ของหลายกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต และการขาดแคลนธาตุนี้เป็นตัวจำกัดระดับปริมาณและคุณภาพผลผลิต บทบาทของโพแทสเซียมในพืชที่รวบรวมมาได้มี ดังต่อไปนี้

1. การกระตุ้นเอนไซม์ (enzyme activation)

โพแทสเซียมเป็นตัวกระตุ้นเอนไซม์มากกว่า 60 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช โพแทสเซียมทำให้รูปร่างของโมเลกุลเอนไซม์ปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับบริเวณที่เอนไซม์จะจับกับสารตั้งต้นเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เหมาะสม ทำให้การทำงานของเอนไซม์เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เอนไซม์ที่มีการศึกษากันมากคือ pyruvate kinase ซึ่งเป็นเอนไซม์เกี่ยวข้องกับการสร้างเนื้อผลไม้ การสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระ และการสะสมแป้งของผลรากและหัว (RÖmheld and Kirkby, 2010) เอนไซม์อื่น ๆ ที่พบว่าโพแทสเซียมเป็นตัวกระตุ้น เช่น เอนไซม์ที่ช่วยรักษาสมดุลค่าพีเอชในเซลล์พืชให้อยู่ระหว่าง 7-8 เอนไซม์ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานโรคและแมลงและความทนแล้งของพืช (Prajapati and Modi, 2012)

2. การควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบพืช (stomatal activity)

การเปิด-ปิดของปากใบพืช เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการแลกเปลี่ยนออกซิเจน น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการเคลื่อนย้ายธาตุอาหาร-น้ำ และกระบวนการควบคุมอุณหภูมิภายในพืช กระบวนการที่กล่าวข้างต้นทำให้ศักย์ไฟฟ้าในเซลล์คุมเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น เมื่อมีการสังเคราะห์แสง เซลล์คุมจะสูบไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกจากเซลล์ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าในเซลล์ลดลงจากเดิม ช่องเปิดเฉพาะของโพแทสเซียมไอออน (K^+ inward rectifier channel) จะเปิดให้โพแทสเซียมไอออน (K^+) ที่อยู่ในเซลล์ประกอบไหลเข้าไปในเซลล์คุม ทำให้เซลล์คุมมีความเข้มข้นของ K^+ ที่สูงขึ้น ซึ่งจะดึงให้น้ำไหลเข้าไปในเซลล์คุม ทำให้ภายในเซลล์คุมมีแรงดันน้ำที่สูงกว่าเซลล์รอบข้าง เซลล์คุมจะเต่งช่องปากใบจึงเปิดกว้างขึ้น ส่วนการปิดปากใบเกิดในสภาพตรงกันข้ามกับการเปิดปากใบ

ภายใต้สภาวะเครียดจากการขาดน้ำ การมีโพแทสเซียมที่เพียงพอภายในเซลล์ช่วยทำให้พืชลดระดับความเครียด (Thomas and Thomas, 2009) ได้เร็วขึ้น ทั้งนี้เพราะโพแทสเซียมสามารถถูกเคลื่อนย้ายออกจากเซลล์คุมได้ในปริมาณที่เหมาะสม ปากใบจะปิดอย่างรวดเร็วในเวลาไม่กี่นาที เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ แต่การมีโพแทสเซียมไม่เพียงพอภายในเซลล์ ทำให้การปิดปากใบช้ามาก บางครั้งกินเวลาเป็นชั่วโมงและอาจปิดไม่สมบูรณ์ ทำให้พืชสูญเสียน้ำได้มาก พืชที่ขาดโพแทสเซียมจึงเครียดง่ายและมีความสามารถดึงน้ำไปใช้ได้น้อย ขณะที่พืชที่มีปริมาณโพแทสเซียมเหมาะสม ช่วยทำให้ประสิทธิภาพ

ในการใช้น้ำสูงขึ้น (Ghourab *et al*., 2000)

3. การสังเคราะห์แสง (photosynthesis)

คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานแสง เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง กระบวนการจะเกิดขึ้นได้อาศัยการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เช่น adenosine triphosphate (ATP) synthase, nitrate reductase, rubisco, NADP-malate dehydrogenase เป็นต้น ผลลัพธ์ของกระบวนการจะได้น้ำตาล ออกซิเจน และสารที่ให้พลังงานสูงคือ ATP และ nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH) การทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ ถูกควบคุมด้วยโพแทสเซียมที่ปริมาณมากพอ เมื่อพืชขาดโพแทสเซียมจะทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดน้อยลง และได้ ATP ลดลงด้วย ทำให้พืชมีจำนวนใบลดลง และมีขนาดใบที่เล็กลง (Hasanuzzaman *et al*., 2018) การที่พืชขาดโพแทสเซียมยังส่งผลให้การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในคลอโรพลาสต์เกิดขึ้นมากเกินไป อิเล็กตรอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบริเวณนั้น เกิดเป็นอนุมูลอิสระพวกออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive oxygen species, ROS) (ยงยุทธ, 2559) และเข้าทำลายคลอโรพลาสต์ (Cakmak, 2005) ซึ่งเป็นอวัยวะเซลล์ที่มีสารคลอโรฟิลล์บรรจุอยู่ ทำให้ใบพืชเกิดภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ และอาจเกิดภาวะเนื้อเยื่อตาย การให้โพแทสเซียมกับพืชปริมาณที่เหมาะสมและทันท่วงที จะช่วยลดการขนส่งอิเล็กตรอนเข้าไปในคลอโรพลาสต์และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ NADPH oxidase และเอนไซม์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ROS (Römheld and Kirkby, 2010; Wang *et al*., 2013)

4. การเคลื่อนย้ายน้ำตาล (sugar transport)

พืชสร้างน้ำตาลได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเคลื่อนย้ายน้ำตาลผ่านโฟลเอ็ม (phloem) ไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช เพื่อใช้ประโยชน์หรือกักเก็บ การเคลื่อนย้ายน้ำตาลต้องใช้พลังงานจากสาร ATP ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ต้องมีโพแทสเซียมอย่างพอเพียง ดังนั้นถ้าโพแทสเซียมในพืชไม่เพียงพอ พืชจะหยุดการสร้าง ATP การเคลื่อนย้ายน้ำตาลจะชะงัก ทำให้อวัยวะที่ใช้เก็บน้ำตาล เช่น เมล็ด ผล ราก จะฝ่อลีบ หรือมีข้อปล้องสั้น แต่ถ้าพืชมีโพแทสเซียมเพียงพอจะช่วยให้กระบวนการเคลื่อนย้ายเป็นไปได้อย่างปกติ (Wang *et al*., 2013)

5. การเคลื่อนย้ายน้ำและธาตุอาหาร (water and nutrient transport)

การเปิด-ปิดปากใบทำให้พืชดูดน้ำและธาตุอาหารจากดินทางราก และมีการลำเลียงไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชโดยผ่านไซเล็ม (xylem) ดังนั้นเมื่อมีโพแทสเซียมไม่เพียงพอทำให้มีผลต่อการเปิด-ปิดปากใบ ส่งผลให้การเคลื่อนย้ายของไนเตรต แคลเซียม ฟอสเฟต แมกนีเซียม กรดอะมิโน และน้ำไปสะสมที่ผลผลิตลดลง (Thomas and Thomas, 2009) คุณค่าของสารอาหาร ความฉ่ำ ความแน่นเนื้อของผลผลิตจึงต่ำ (Woldemariam *et al*., 2018)

6. การสังเคราะห์โปรตีน (protein synthesis)

โพแทสเซียมมีบทบาทในทุกขั้นตอนของการสังเคราะห์โปรตีน ขั้นตอนถอดรหัสพันธุกรรมจะใช้เอนไซม์ RNA polymerase เชื่อมต่อจุด DNA เพื่อการสังเคราะห์ RNA ซึ่งในขั้นตอนถอดรหัสนี้โพแทสเซียมกระตุ้นให้เอนไซม์ดังกล่าว

ทำงานได้ปกติ ขั้นตอนการแปลรหัสพันธุกรรมก็ต้องใช้โพแทสเซียม เพื่อทำให้ tRNA จับกับไรโบโซม (ยงยุทธ, 2559; Singh *et al*., 2021) ดังนั้นพืชที่ขาดโพแทสเซียมจึงไม่สังเคราะห์โปรตีนแม้จะมีไนโตรเจนมากเพียงใดก็ตาม นอกจากนี้การขาดโพแทสเซียมยังทำให้มีการสะสมสารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์โปรตีนแทน เช่น เอไมด์ (amides) กรดอะมิโน (amino acid) และไนเตรต (nitrate) (Patil, 2011) ซึ่งสารตั้งต้นเหล่านี้ถ้าสะสมมากเกินไป อาจเป็นพิษต่อพืชและผู้บริโภคได้ แต่เมื่อพืชได้รับโพแทสเซียมในปริมาณที่มากขึ้น จะนำสารตั้งต้นที่สะสมไว้เหล่านี้ไปใช้สร้างโปรตีนได้ในภายหลัง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

7. เป็นตัวส่งสัญญาณเพื่อบรรเทาความเครียด (signaling in stress mitigation)

เมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะเครียดจากปัจจัยภายนอก ไม่ว่าจะเป็นสภาวะแห้งแล้ง น้ำขัง ดินเค็ม โลหะหนักเป็นพิษ หรือสภาพอุณหภูมิสูง-ต่ำเกินไป สภาวะเครียดเหล่านี้เป็นเหตุให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมซิส ซึ่งมักเกิดจากความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออนที่ลดลง ทำให้เซลล์พืชรับรู้ว่ามีปริมาณโพแทสเซียมอยู่อย่างจำกัด ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในเซลล์พืชจึงจัดเป็นตัวนำรหัสสัญญาณที่หนึ่ง (first messenger) เพื่อส่งสัญญาณให้เซลล์พืชสังเคราะห์ฮอร์โมนพืชต่าง ๆ เช่น เอทีลีน กรดจาสมอนิก ออกซิน ไซโทไคนิน กรดแอบส์ซิสิก และกรดซาลิไซลิก (Shin and Schachtman, 2004) ความเข้มข้นโพแทสเซียมไอออน (K^+) และฮอร์โมนพืชยังชักนำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระชนิดออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (ROS) เพื่อส่งสัญญาณต่อไปยังตัวนำรหัสสัญญาณที่สอง (second messenger) ทำให้เกิดการขยายและถ่ายโอนสัญญาณเพื่อไปกระตุ้นให้โปรตีนขนส่งโพแทสเซียมทำงานมากขึ้น เร่งให้ปากใบเปิดเพื่อดึงสารละลายจากดินและรากเข้าไปเซลล์พืชให้มากขึ้น และตัวนำรหัสที่สองนี้ส่งสัญญาณไปที่รากพืชให้มีการหยุดการยืดตัวของรากปฐมภูมิ ส่งเสริมการแตกรากแขนง และเพิ่มความยาวของขนราก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวราก ทำให้ประสิทธิภาพการในดึงดูดโพแทสเซียมไอออนจากสารละลายดินมากขึ้น พร้อมกับหยุดการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดิน เพื่อเร่งการเข้าสู่ภาวะธำรงดุล กระบวนการเหล่านี้จึงเป็นการหยุดหรือบรรเทาความเครียดจากการขาดโพแทสเซียมและความเครียดต่าง ๆ ที่เกิดจากปัจจัยภายนอกได้โดยการส่งสัญญาณทั้งหมดเกิดขึ้นภายในพืชเอง (Figure 1) การที่มีโพแทสเซียมอย่างพอเพียงในพืชจึงเป็นผลให้พืชเพิ่มความทนต่อความเครียดได้ระดับหนึ่ง และลดปริมาณ ROS ให้อยู่ในปริมาณปกติ (Hasanuzzaman *et al*., 2018) แต่ถ้าพืชตกอยู่ในสภาวะขาดโพแทสเซียมหรือความเครียดรุนแรงหรือยาวนานเกินไป การถ่ายทอดสัญญาณจะมาก และสร้าง ROS ในปริมาณที่มาก ทำให้พืชเครียดจากสภาพออกซิเดชันได้ (oxidative stress) หากสถานการณ์ยังยืดเยื้อต่อไป เนื้อเยื่อจะถูกทำลาย สารต่าง ๆ รั่วไหล อวัยวะภายในเซลล์เป็นอันตราย กระบวนการเมแทบอลิซึมหยุดทำงาน และพืชตายในที่สุด

จากบทบาทของโพแทสเซียมดังที่กล่าวมา จึงเห็นได้ว่าธาตุนี้ทำหน้าที่หลายประการ รวมทั้งการปรับตัวทางสรีรวิทยาของพืช การจัดการปุ๋ยโพแทสเซียมในช่วงที่พืชได้รับความเครียดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อลดระดับความเครียดให้ได้เร็ว ผลของการให้ธาตุโพแทสเซียมกับพืชชนิดต่าง ๆ ที่ปลูกภายใต้ความเครียดจากสภาพแวดล้อมภายนอก แสดงใน Table 1

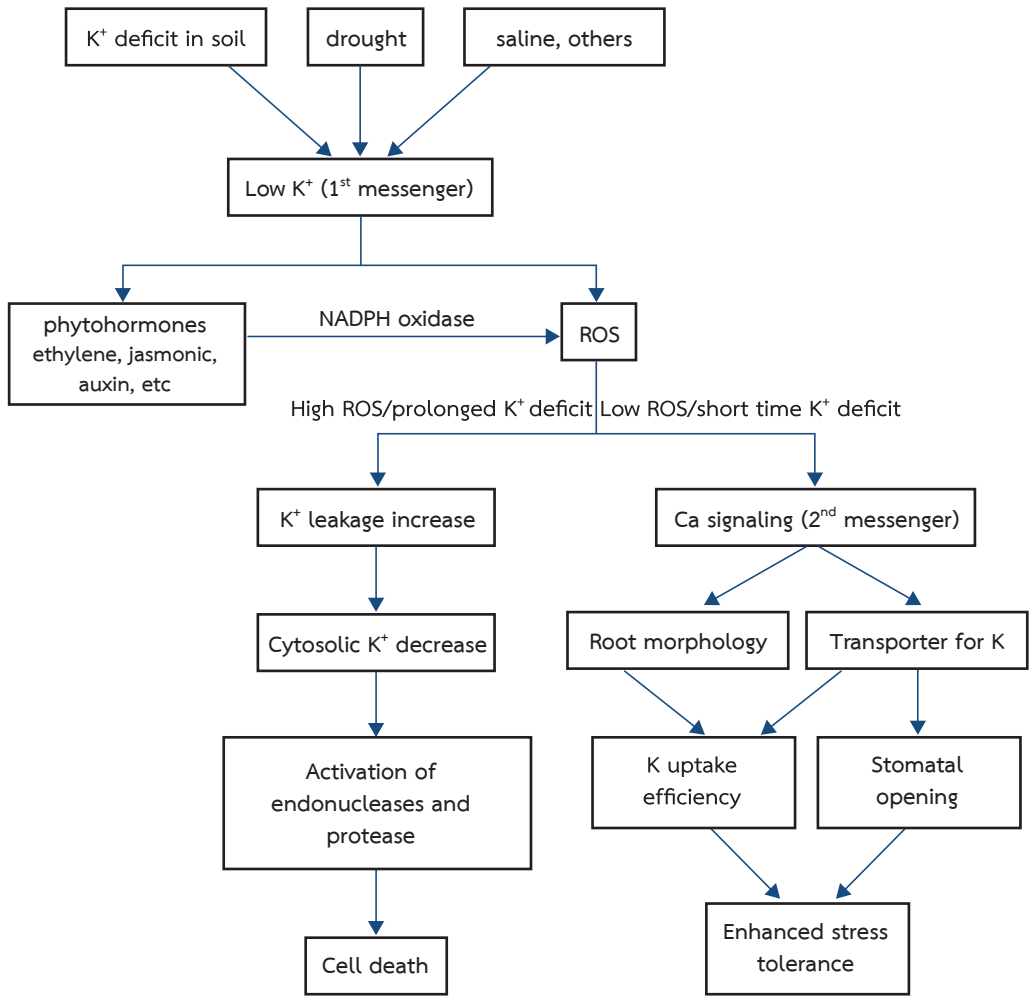

Figure 1 K-induced signaling in the plant (modified from: Hasanuzzamah *et al*., 2018; RÖmheld an Kirkby, 2010)

8. คุณภาพผลผลิต (crop quality)

การที่โพแทสเซียมมีบทบาทหน้าที่อย่างที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 1-7 ทำให้ธาตุนี้ส่งผลต่อคุณภาพผลผลิตโดยตรง พืชที่ได้รับโพแทสเซียมเพียงพอ พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณสารพฤกษเคมีที่มีผลต่อสุขภาพมนุษย์ เช่น โพแทสเซียมมีผลต่อปริมาณไลโคปีนในมะเขือเทศ (Fanaska *et al*., 2006) มีผลต่อสารประกอบฟีโนลิกและปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในแตงกวา (Díaz-Méndez *et al*., 2018) มีผลต่อสารออกฤทธิ์ทั้งกรดแคฟเฟอิก และแคมพ์เพอรอลในสมุนไพรแปะตำปึง (Bukhori *et al*., 2020) และมีผลต่อแอนโทไซยานินในกลีบดอกดาวเรือง (Pal and Ghosh, 2010) ความสัมพันธ์เชิงบวกดังกล่าวเป็นเพราะโพแทสเซียมเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ทางชีวเคมีของสารพฤกษเคมีเหล่านี้ ปริมาณโพแทสเซียมยังมีผลต่อคุณภาพด้านอื่นอีก Bahmaniar and Ranjbar (2007) พบว่าการเพิ่มธาตุนี้ส่งผลดีต่อสมบัติคุณภาพของเมล็ดข้าว

Table 1 Beneficial effect of exogenous application of potassium under various stress

Species	Dose and duration	K dose	Protective effects
Drought stress			
Z. mays (Premachandra *et al*., 1991)	Withholding water 31 days after planting	300 kg ha^{-1}	- Cell membrane stability increased - Decreased leaf water potential
Hibiscus rosa-sinensis (Egilla *et al*., 2001)	Water deficit 21 days	10 mM	- Enhanced root dry matter - Increased root:shoot ratio
Helianthus annuus (Soleimanzadeh *et al*., 2010)	Withholding irrigation at the end of growing period	100 kg ha^{-1}	- Improved shoot dry matter
O. sativa (Zain *et al*., 2014)	Withholding irrigation 30 days	120 kg ha^{-1}	- Increased shoot dry mass - Improved osmolytes synthesis
Salinity stress (NaCl)			
Z. mays (Abbasi *et al*., 2014)	70 mM NaCl	9 mM	- improved photosynthetic capacity - increased accumulation of K^+ in leaves
L. esculentum (Saida et al., 2014)	150 mM NaCl	2.39 mM	- increased root and shoot weight - improved photosynthetic pigment
A. hypogaea (Chakraborty *et al*., 2016)	20 and 40 mM NaCl	30 kg ha^{-1}	- Reduced uptake of Na^+ from soil and accumulation in leaf tissue - Increase plant biomass
S. lycopersicum (Amjad *et al*., 2016)	75 mM NaCl	9 mM	- increased photosynthesis - increased leaf K^+ levels and K^+/Na^+ ratio - improved membrane stability index
Heavy metal stress			
Vicia faba (Siddiqui *et al*., 2012)	200 µM Cd, 7 days	6 mM K, 7 days	- Increased shoot and root length - Increased chlorophyll content
Prunus persica (Song *et al*., 2015)	2 mM $ZnCl_2$, 10 days	10 mM KCl	- Improved phytosynthesis - Improved plant K nutritional status
Gladiolus grandiflora (Zaheer *et al*., 2017)	50 mg kg^{-1} $CdSO_4 \cdot 8H_2O$, 60 days	200 mg L^{-1} K +200 mg L^{-1} Si, 60 days	- Increased root and shoot length - Increased chlorophyll content

ในด้านความคงตัวของแป้งสุก อุณหภูมิแป้งสุก ปริมาณอะไมโลส และปริมาณโปรตีน การสะสมโพแทสเซียมในเนื้อเยื่อของผลมะเขือเทศมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับน้ำหนักผล ความแน่นเนื้อและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Woldemariam *et al*., 2018; Ghourab

et al., 2000; Wuzhong, 2002) การให้ปุ๋ยโพแทสเซียมในมันสำปะหลังสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิตอะไมโลส อุณหภูมิที่ทำให้แป้งคงตัว (pasting temperature) ความหนืดเมื่อแป้งเย็นตัว (viscosity) การพองตัวของแป้ง (swelling volume) การให้ปุ๋ยโพแทสเซียมยังทำให้ปริมาณสารประกอบไซยาโนเจเนติกกลูโคไซด์ (cyanogenetic glucosides) ในมันสำปะหลังลดลงด้วย (Cakmak 2010; Flibert *et al*., 2019; Wasonga *et al*., 2020)

ปัจจัยที่มีผลต่อการจัดการโพแทสเซียม

การจัดการโพแทสเซียมให้เป็นประโยชน์ต่อพืช จำเป็นต้องมีการพิจารณาปัจจัยหลายด้านทั้งสมบัติดิน พืช และสภาพภูมิอากาศ ซึ่งแต่ละปัจจัยมีผลต่อการจัดการโพแทสเซียมดังต่อไปนี้

1. สมบัติดิน

1.1 ชนิดแร่ในดิน

แร่ในดินมีหลายชนิด และปริมาณแตกต่างกันไปในดินที่แตกต่างกัน ซึ่งแร่ดินเหนียวมีบทบาทมากในระบบดิน แร่ดินเหนียวมีสมบัติเด่นในการดูดซับ หรือตรึงไอออนต่าง ๆ ทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารไม่เท่ากันในดินที่มีชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียวต่างกัน สามารถแบ่งกลุ่มดินได้พอสังเขป ดังนี้

1) ดินที่มีแร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ปริมาณมาก เช่น ดินตะกอนน้ำใหม่ การให้ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตราสูงมักไม่ส่งผลให้มีการดูดซับโพแทสเซียมของพืชที่มากขึ้น เนื่องจากดินเหล่านี้มีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในสารละลายดินมากอยู่แล้ว การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตราที่สูงเพิ่มลงไป ทำให้โพแทสเซียมที่เติมเข้าไปเหล่านั้นถูกตรึงอยู่ในผลึกแร่ดินเหนียว พืชจึงไม่ตอบสนองต่อโพแทสเซียมที่ใส่เพิ่มเติมได้ (Dobermann *et al*., 1996) แร่ดินเหนียวประเภท 2:1 ได้แก่ แร่เวอร์มิคูไลต์ มอนต์โมลิโลไนต์ เป็นต้น โดยแร่เวอร์มิคูไลต์สามารถตรึงโพแทสเซียมได้มากกว่ามอนต์โมลิโลไนต์ (อัญชลี, 2553)

2) ดินที่มีแร่ดินเหนียว 1:1 ปริมาณมาก เป็นดินที่พบได้ทั่วไปของประเทศไทย เช่น ดินเกิดจากตะกอนน้ำเก่า ดินที่เกิดจากวัสดุตกค้าง เป็นดินมีพัฒนาการสูง ระบายน้ำดี (Trakoonyingcharoen, 2005) การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมให้ผลตอบสนองได้อย่างชัดเจน (ปุญญิศา และคณะ, 2562) ดินเนื้อทรายให้ผลตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมทำนองเดียวกับดินนี้ แร่ดินเหนียวประเภท 1:1 ได้แก่ แร่เคโอลิไนต์ เป็นแร่ที่ความสามารถในการดูดซับไอออนได้ต่ำมาก (อัญชลี, 2553)

3) ดินเนื้อปูน (calcareous soil) เป็นดินที่พืชมักแสดงอาการขาดธาตุโพแทสเซียม ทั้งที่ผลการวิเคราะห์ดินพบว่ามีโพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ปริมาณเพียงพอ จึงทำให้เข้าใจว่าไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมให้กับดินกลุ่มเนื้อปูน แต่แท้จริงแล้วถึงแม้ดินมีโพแทสเซียมในสารละลายสูง แต่ดินก็ยังมีความเข้มข้นของแคลเซียมที่สูงมากด้วย แคลเซียมจึงสามารถเข้าไปแทนที่โพแทสเซียมในการเกาะยึดที่ผิวราก ทำให้รากพืชดูดซับโพแทสเซียมลดลง การให้ปุ๋ยโพแทสเซียมทางใบจึงจำเป็นสำหรับดินนี้ (Jifon and Lester, 2009)

1.2 อัตราส่วนของ N : K

พืชส่วนใหญ่เมื่อดูดไนโตรเจนและโพแทสเซียมจากดินไปแล้ว จะนำไปสะสมเป็นองค์ประกอบในเนื้อเยื่อให้ได้มากที่สุด แต่ดินส่วนใหญ่มักขาดแคลนธาตุทั้งสอง การทดลองใน

พืชพบว่าการจัดการปุ๋ยเพื่อได้ผลผลิตในปริมาณที่มากและมีคุณภาพดี แนะนำให้ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราเท่ากับไนโตรเจน ถ้าพืชหัวหรือพืชน้ำตาลแนะนำให้ใส่ธาตุโพแทสเซียมสูงกว่าธาตุไนโตรเจน (กอบเกียรติ และคณะ 2552; วัลลีย์ และคณะ 2560; Woldemariam *et al*., 2018; Ali *et al*., 2020) ในระยะการเจริญเติบโตทางด้านลำต้น (vegetative growth) พืชมีการดูดไนโตรเจนในปริมาณที่มาก เพื่อเพิ่มการแบ่งและขยายเซลล์ ทำให้ใบพืชขยายใหญ่ขึ้นและรับแสงได้มากขึ้น กระบวนการสังเคราะห์แสงจึงมีมากขึ้น ใบสร้างคลอโรฟิลล์ได้มาก (ใบเขียวมากขึ้น) พืชจำเป็นต้องดูดโพแทสเซียมให้มากพอเพื่อใช้รักษาความสมดุลของความเข้มข้นของสารละลายพร้อมกับพืชต้องมีการดูดน้ำเข้าเซลล์ให้ได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นการให้ปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณที่สูงขึ้นโดยไม่เพิ่มปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียม จะทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลของความเข้มข้นของสารละลายในเซลล์ และเป็นการจำกัดปริมาณผลผลิตไม่ว่าจะปลูกพืชในดินใดหรือสภาพแวดล้อมแบบใด (Milford and Johnston, 2007) ส่วนการใส่โพแทสเซียมที่มากเกินไป เป็นปฏิปักษ์กับการสะสมแมกนีเซียมและแคลเซียมในผลผลิตของพืช (Rather *et al*., 2019) ทำให้พืชดูดแมกนีเซียมและแคลเซียมจากดินน้อยลง

1.3 ความชื้นดิน

ระดับความชื้นดินที่เพียงพอเป็นสภาวะที่จำเป็นต่อการแพร่ (diffusion) ของโพแทสเซียมในสารละลายดินไปยังรากพืช เนื่องจากระดับความชื้นดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสัมประสิทธิ์การแพร่ของโพแทสเซียม (Sangakkara *et al*., 1996; Zeng and Brown., 2000) Gupta *et al*., 2015 พบว่าระดับความชื้นดินที่เหมาะสมจะทำให้โพแทสเซียมแพร่ไปยังรากได้มากกว่า 75% ของโพแทสเซียมทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ดินแต่ละชนิดมีระดับความชื้นที่เหมาะสมกับการแพร่ของโพแทสเซียมแตกต่างกัน เช่น ดินลมหอบ เนื้อร่วนปนทรายแป้งของประเทศเยอรมันนี ระดับความชื้นดินที่ 0.25 ทำให้การแพร่ของโพแทสเซียมไปรากพืชสูงที่สุด ระดับความชื้นดินยังมีผลต่อระดับการสะสมโพแทสเซียมในพืช ปริมาณการสะสมโพแทสเซียมสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับความชื้นดินจากระดับน้อย ๆ จนถึงระดับหนึ่ง จากนั้นการสะสมโพแทสเซียมในพืชจะลดลงเมื่อระดับความชื้นดินมากขึ้น ดัง Figure 2 อาจอธิบายได้จากระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายดินที่ลดลงเมื่อระดับความชื้นในดินสูงขึ้น (Kuchenbuch *et al*., 1986) แต่ปริมาณผลผลิตยังเพิ่มขึ้น ข้อมูลเรื่องระดับความชื้นดินที่เหมาะสมต่อการแพร่ของธาตุอาหารจากดินไปสู่รากพืช เป็นงานวิจัยที่ยังขาดข้อมูลอีกมากในดินของประเทศไทย และจำเป็นต้องทำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารให้สูงขึ้น

1.4 อุณหภูมิดิน

อุณหภูมิดินมีอิทธิพลต่อระดับโพแทสเซียมในดิน กล่าวคืออุณหภูมิดินที่ต่ำมีผลให้พืชดูดธาตุโพแทสเซียมและธาตุอาหารหลักไปใช้ได้น้อย อุณหภูมิดินยิ่งสูงระดับของโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้และการดูดของพืชจะสูงขึ้นสัมพันธ์กับอุณหภูมิดินที่สูงขึ้น (ภายในพิสัย 15-35 °C) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิดินที่เหมาะสมต่อการดูดโพแทสเซียมแตกต่างกันไปตามชนิดพืช เช่น อุณหภูมิดิน 29.4 °C เหมาะสมกับข้าวโพด (Armstrong, 1998) อุณหภูมิดินที่ 20-30 °C เป็นอุณหภูมิดินที่เหมาะสมกับข้าว (Zia *et al*., 1994)

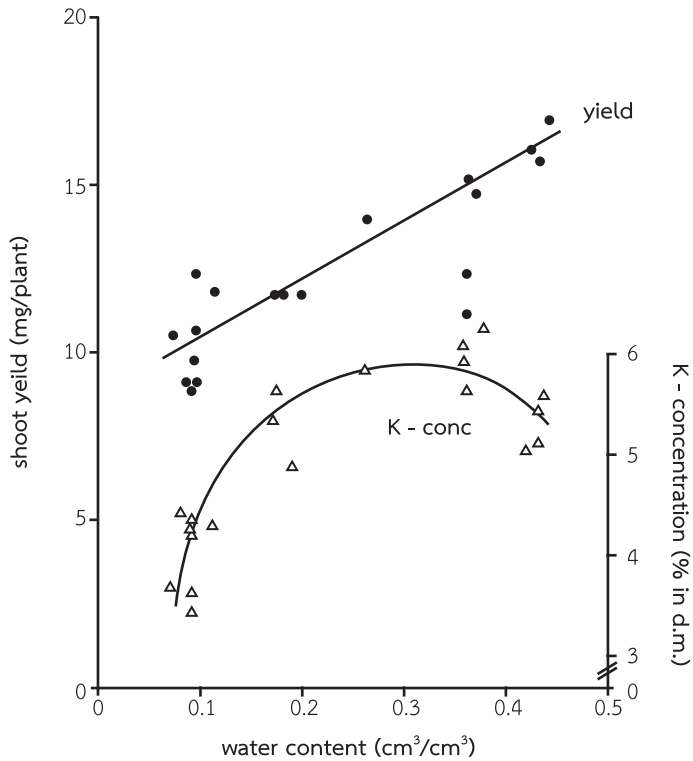

Figure 2 Influence of soil moisture on yield and K concentration of onion
Source: Kuchenbuch *et al*., 1986

อุณหภูมิดิน 15–25 °C เหมาะสมกับข้าวบาร์เลย์ (Pettersson, 1995) การที่อุณหภูมิดินสูงเกินไปเป็นระยะเวลานาน พืชอาจมีความเครียดจากความร้อนในดินได้ จำเป็นต้องมีการจัดการดินเพื่อลดความเครียดเนื่องจากความร้อนดังกล่าว Gupta *et al*. (2010) พบว่าวัสดุเศษเหลือคลุมดินเป็น soil temperature buffering อย่างดี และสามารถใช้ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินได้ ระบบการให้น้ำแบบฉีดฝอย (sprinkler) เป็นการจัดการอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิดินระหว่างวัน ไม่ให้สูงมากได้เช่นกัน (Wang *et al*., 2000; Liu and Kang, 2006)

2. พืช

ปัจจัยที่เกี่ยวกับพืชมี 2 อย่าง คือรากพืชและช่วงพัฒนาการของพืช ดังนี้

2.1 รากพืช

รากของพืชแต่ละชนิดมีอิทธิพลต่อการนำโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ได้อย่างช้า ๆ (slowly available potassium) ไปใช้ รากพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและใบเลี้ยงคู่มีความแตกต่างอย่างชัดเจนทั้งความยาว ความหนาแน่น และปริมาณของขนราก เช่น ความยาวของรากข้าวสาลี (ใบเลี้ยงเดี่ยว) จะยาวกว่ารากของมันฝรั่ง (ใบเลี้ยงคู่) หรือผักอายุสั้นทั่วไปถึง 6 เท่า จากงานวิจัยของ Fusseder and Kraus (1986)

พบว่าความหนาแน่นของรากพืชมากกว่า 2 cm cm^{-3} จะทำให้การดูด K^+ ได้ 50% ของปริมาตรชั้นดินบน แต่จะลดลงเหลือเพียง 10% เมื่อความหนาแน่นรากลดลงต่ำกว่า 1 cm cm^{-3} ปัจจัยดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของรากพืชที่สำคัญและมีผลต่อการดูดโพแทสเซียม ได้แก่ การขาดโบรอนอย่างรุนแรง ดินกรดที่มีอะลูมินัมเป็นพิษ การอัดแน่นของดิน ความเค็ม และสภาวะแห้งแล้ง (RÖmheld and Neumann, 2006) การเพิ่มช่องขนาดใหญ่และเพิ่มปริมาณเม็ดดินของระบบการปลูกพืชแบบไม่ไถพรวนดินช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของรากในดินระดับลึกมากกว่า 15 เซนติเมตร ทำให้รากพืชสามารถดูดโพแทสเซียมในชั้นดินที่ระดับลึกลงไป (Singh *et al*., 2018)

2.2 ช่วงพัฒนาการของพืช (development stage)

ระยะการเจริญพันธุ์ (reproductive stage) ของไม้ผล เป็นช่วงที่พืชเน้นการพัฒนาผลผลิต การเจริญทางลำต้นและกิจกรรมของรากจะลดลง ส่งผลให้กระบวนการดูดโพแทสเซียมจากสารละลายดินลดลงกว่าระยะการเจริญทางด้านลำต้น (vegetative stage) การเพิ่มปุ๋ยโพแทสเซียมในระยะเจริญพันธุ์นี้อาจไม่เกิดประโยชน์หรือมีประสิทธิภาพสูงพอที่จะบรรเทาปัญหาการดูดโพแทสเซียมของไม้ผล (ยงยุทธ, 2556; Fageria *et al*., 2011) เนื่องจากกิจกรรมของรากลดลง และยิ่งถ้ามีแคตไอออนชนิดอื่นในสารละลายดินปริมาณมาก เช่น แคลเซียม ยิ่งจะทำให้ความสามารถของรากในการดูดโพแทสเซียมลดลง (Marschner, 1995) การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมให้เพียงพอจึงต้องให้ก่อนไม้ผลอยู่ในระยะการเจริญพันธุ์

3. สภาพภูมิอากาศ

หากสภาพความชื้นและอุณหภูมิของอากาศสูง จะทำให้วัตถุต้นกำเนิดผุพังได้ง่ายและมาก จึงปลดปล่อยธาตุต่าง ๆ ออกมาได้มากและเร็ว แคตไอออนที่มีฤทธิ์เป็นด่างทั้งแคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม มีความสามารถในการเคลื่อนที่ในสารละลายได้เร็ว จึงทำให้มีการสูญหายโดยชะละลายไปกับน้ำได้มากกว่าแคตไอออนที่มีฤทธิ์เป็นกรดพวก เหล็ก (Fe) อะลูมินัม (Al) และซิลิกา (Si) หลายร้อยเท่า (Anderson and Hawkes, 1958) จึงทำให้ดินในเขตร้อนและดินประเทศไทยส่วนใหญ่มีธาตุอาหารรวมทั้งธาตุโพแทสเซียมต่ำถึงต่ำมาก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558; FAO, 2015) ตัวอย่างปริมาณการสูญหายโพแทสเซียมในภาคตะวันออกของบังกลาเทศซึ่งมีอากาศร้อนชื้นตลอดปี พบว่าโพแทสเซียมอาจถูกชะละลายได้ถึง 0.1-0.2 กิโลกรัมโพแทสเซียมต่อเฮกแตร์ต่อวัน (Timsina and Connor, 2001) Yadvinder-Singh *et al*. (2005) พบว่าโพแทสเซียมในดินเขตเอเชียสูญหายถึง 22% และ16% ของปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียมที่ใส่ในนาข้าวน้ำขังในดินร่วนปนทรายและดินร่วนตามลำดับ การกำหนดอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมจึงต้องคำนึงการสูญเสียจากอุณหภูมิและความชื้นของอากาศด้วย (Andres, 1988)

สรุป

โพแทสเซียมเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของพืชทั้งในสภาวะปกติและสภาวะเครียดจากปัจจัยภายนอกต่าง ๆ เนื่องจากโพแทสเซียมเป็นตัวควบคุมการทำหน้าที่ต่าง ๆ ในกระบวนการชีวเคมีและสรีรวิทยา หน้าที่

บางอย่างจำเพาะกับธาตุโพแทสเซียมเท่านั้น ธาตุอื่นไม่สามารถทำแทนได้ การมีโพแทสเซียมในปริมาณที่พอเหมาะ ส่งผลให้พืชมีพัฒนาการอย่างสมดุลทุกช่วงระยะการเจริญเติบโต สถานะธาตุโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ของดินทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย มีปริมาณต่ำถึงต่ำมาก ผลผลิตที่ได้จึงมักประสบปัญหาด้านปริมาณและคุณภาพทั้งรูปร่าง รสชาติ สารโภชนาการในผลผลิต

สภาวะจากปัจจัยภายนอกในปัจจุบันก่อให้เกิดสภาวะเครียดให้กับพืช ทั้งความแห้งแล้ง ความเค็ม ความเป็นพิษของโลหะหนัก อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป ความเข้มแสง น้ำขัง และอื่น ๆ ปัจจัยเหล่านี้ทำให้กิจกรรมด้านสรีรวิทยาของพืช โดยเฉพาะด้านการสังเคราะห์แสงถูกขัดขวาง นำไปสู่การสังเคราะห์อนุมูลอิสระจำนวนมากในเซลล์พืช หากมีการจัดการโพแทสเซียมด้วยปริมาณเหมาะสมและทันเวลา พืชจะใช้โพแทสเซียมเป็นตัวส่งสัญญาณให้เกิดการกระตุ้นกิจกรรมชีวเคมีภายในพืช เพื่อเร่งการดูดดึงโพแทสเซียมเข้ามาในเซลล์พืช ทำให้อนุมูลอิสระลดลงในระดับปกติ จนพืชสามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งการจัดการโพแทสเซียมต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ร่วมกันของดิน-พืช-สภาพภูมิอากาศ จึงจะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2558. สถานภาพทรัพยากรดินและที่ดินของประเทศไทย. กรมพัฒนาที่ดิน. 304 หน้า

กอบเกียรติ ไพศาลเจริญ, ทักษิณา ศันสยะวิชัย, ศรีสุดา ทิพยรักษ์, วีระพล พลรักดี และเกษม ชูสอน. 2552. การเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อเพิ่มผลผลิตอ้อยอย่างเหมาะสมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ : จ.ขอนแก่น. รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2551 ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น, กรมวิชาการเกษตร 5 หน้า

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 547 หน้า.

ปุญญิศา ตระกูลยิ่งเจริญ, กุมุท สังขศิลา และธวัชชัย อินทร์บุญช่วย. 2562. โปรแกรมคอมพิวเตอร์กำหนดปุ๋ยสำหรับการปลูกอ้อยที่ให้ผลผลิตสูง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ภายใต้โครงการ การประยุกต์ข้อมูลจากแผนที่ดินเพื่อเพิ่มผลผลิตอ้อยด้วยเทคโนโลยีเกษตรแม่นยำ. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2556. ธาตุอาหารและการเจริญเติบโตของอ้อย. วารสารดินและปุ๋ย. 35: 65-77

ยงยุทธ โอสถสภา. 2559. ความเครียดของพืชและการบรรเทาความเครียด. วารสารดินและปุ๋ย 38: 47-78.

วัลลีย์ อมรพล, กอบเกียรติ ไพศาลเจริญ, ศรีสุดา ทิพยรักษ์, ศุภกาญจน์ ล้วนมณี, จิณณจาร์ หาญเศรษฐสุข, ประพิศ วองเทียม และสมพงษ์ ทองช่วย. 2560. การศึกษาอัตราปุ๋ยเคมีที่เหมาะสมสำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกในกลุ่มดินร่วนปนทราย: ชุดดินห้วยโป่ง. วารสารวิชาการเกษตร 35: 151-163.

อัญชลี สุทธิประการ. 2553. แร่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินเขตร้อน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะเกษตร ภาควิชาปฐพีวิทยา. กรุงเทพฯ. 280 หน้า.

Abbasi, G.H. J. Akhtar, M. Anwar-Ul-Haq, S. Ali, Z. Chen and W. Malik. 2014. Exogenous potassium differentially mitigates salt stress in tolerant and sensitive maize hybrids. Pakistan Journal of Botany 46: 135–146.

Ali, S., A. Hafeez, X. Ma, S.A. Tung and G. Yang. 2020. Relative potassium ratio balanced the carbon-nitrogen assimilation in cotton leaf under reducing nitrogen application. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 20:761–774.

Amjad, M., J. Akhtar, B. Murtaza, G. Abbas and H. Jawad. 2016. Differential accumulation of potassium results in varied salt-tolerance response in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars. Horticulture, Environment and Biotechnology 57: 248–258.

Andres, E. 1988. KALIPROG - an information system for including site specific factors into fertilizing recommendations, pp 223–239. In: Magstl A. et al (eds) Proceedings 9. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswissenschaft (GIL), Münster 28.-29. Sept. 1988. Ulmer Verlag, Stuttgart.

Anderson, D.H. and H.E. Hawkes. 1958. Relative mobility of the common elements in weathering of some schist and granite areas. Geochimica et Cosmochimica Acta 14: 204-210.

Armstrong, D.L.1998. Betters Crops with Plant Food: Potassium for Agriculture. Potash & Phosphate Institute (PPI).

บทความปริทัศน์

Bahmaniar, M.A. and G.A. Ranjbar. 2007. Response of rice (*Oryza sativa* L.) cooking quality properties to nitrogen and potassium application. Pakistan Journal of Biological Sciences 10:1180-1884.

Bukhori, M.F.M., H. Ze Jaafara, A. Ghasemzadeha, U.R. Sinniaha, G. Karipayac and K.M. Yusufd. 2020. Assessment of growth and phytochemical quality of Gynura procumbens through nitrogen, potassium fertilization and evapotranspiration replacement interaction. Asia-Pacific Journal of Molecular Biology and Biotechnology 28: 63-91.

Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 168: 521–530.

Cakmak, I. 2010. Potassium for better crop production and quality. Plant and Soil 335: 1–2.

Chakraborty, K., D. Bhaduri and H.N. Meena. 2016. External potassium (K^+)
application improves salinity tolerance by promoting Na^+ -exclusion, K^+ -accumulation and osmotic adjustment in contrasting peanut cultivars. Plant Physiology and Biochemistry 103:143–153.

Cui, J., I. Pottosin, E. Lamade and G. Tcherkez. 2020. What is the role of putrescine accumulated under potassium deficiency? Plant, Cell & Environment 43: 1331-1347.

Díaz-Méndez, H.A., P. Preciado-Rangel. E.S. Chávez, J.R.E. Rivera, M.F. Hernández and V.de P. Álvarez-Reyna. 2018. Potassium in the nutraceutical quality of hydroponic cucumber fruits. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 20: 4245-4250.

Dobermann A, P.C. Sta Cruz and C.G. Cassman. 1996. Potassium balance and potassium supplying power in intensive irrigated rice systems, pp 199– 234. In: Potassium in Asia. Balanced fertilization to increase and sustain agricultural production. International Potash Institute, Basel Switzerland.

Egilla, J.N.; F.T. Davies and M.C. Drew. 2001. Effect of potassium on drought resistance of Hibiscus rosa-sinensis cv. Leprechaun: Plant growth, leaf macro- and micronutrient content and root longevity. Plant and Soil 229: 213–224.

Fageria, N.K., V.C. Baliga and C.A. Jones. 2011. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops (3rd Edition). Marcel Dekker, Inc. New York.

Fanaska, S., G. Colla, G. Maiani and E. Venneria. 2006. Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. Journal of agricultural and food chemistry 54: 4319-4325.

FAO. 2015. Status of the World's Soil Resources. Main report. Rome, Italy. 607 p.

Flibert, F., Savadogo Aly, Sawadogo-Lingani Hagrétou, Somé Koussao and Traoré Yves. 2019. Difference in biochemical compound and cyanogen content among six improved cassava root adopted in Burkina Faso, nutritional

and technological perspectives. Journal of Food Security 7:122-128.

Fusseder, A. and M. Kraus. 1986. Individuelle Wurzelkonkurrenz und Ausnutzung der immobilen Makronährstoffe im Wurzelraum von Mais. Flora 178:11–18.

Ghourab, M.H.H., O.M.M. Wassel and N.A.A. Raya. 2000. Response of cotton plant to foliar application of (Pottas in-P) TM under two levels of nitrogen fertilizer. Egyptian Journal of Agricultural Research 78: 781-793.

Gupta, A.J., M.A. Chattoo and L. Singh. 2015. Drip irrigation and fertigation technology for improved yield, quality, water and fertilizer use efficiency in hybrid tomato. Journal of AgriSearch 2(2): 94–99.

Gupta, R., R. Gopal, M.L. Jat, R.K. Jat, H.S. Sidhu, P.S. Minhas and R.K. Malik. 2010. Wheat productivity in Indo-Gangetic plains of India: terminal heat effects and mitigation strategies. PACA Newsletter 15: 1–3.

Hasanuzzaman, M., M.H.M. Borhannuddin Bhuyan, K. Nahar, Md.S. Hossain, J. Al. Mahmud, Md. S. Hossen, A. A.C. Masud, Moumita and M. Fujita. 2018. Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. Agronomy 8: 1-29.

Jifon, J. and G. Lester. 2009. Foliar potassium fertilization improves fruit quality of field-grown muskmelon on calcareous soils in south Texas. Journal of the Science of Food and Agriculture 89: 2452-2460.

Kuchenbuch, R., N. Claassen and A. Jungk. 1986. Potassium availability in relation to soil moisture. Plant and Soil 95: 221-231.

Liu, Hai-Jun and Yaohu Kang. 2006. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain. Agricultural Water Management 84: 3-19.

Marschner, H. 1995. Functions of mineral nutrients: macro-nutrients, pp 299–312. In: Mineral Nutrition of Higher Plants, 2nd (ed). Academic, N.Y.

Mengel, K. and E.A. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition, 5th (ed). Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht. 849 p.

Milford, G.F.J and A.E. Johnston. 2007. Potassium and nitrogen interactions in crop production.

Proceeding, no. 615. International Fertilizer Society, York UK.

Pal, P. and P. Ghosh. 2010. Effect of different sources and levels of potassium on growth, flowering and yield of African marigold (Tagetes erecta Linn.) cv. ‘Siracole’. Indian Journal of Natural Products and Resources 1: 371-375.

Patil, R.B. 2011. Role of potassium humate on growth and yield of soybean and black gram. International Journal of Pharma and Bio sciences 2: 242-246.

Pettersson, S. 1995. Low root zone temperature effects on net mineral nutrient uptake and distribution in barley (Hordeum vulgare). Journal of Plant Physiology 145: 459-464.

Prajapati, K. and H.A. Modi. 2012. The importance of potassium in plant

growth : A review. Indian Journal of Plant Sciences 1: 177-186.

Premachandra, G.S., H. Saneoka and S. Ogata. 1991. Cell membrane stability and leaf water relations as affected potassium nutrition of water-stressed maize. Journal of Experimental Botany 42: 739–745.

Rather, G.H., S.K. Bansal, O. Bashir and U. Waida. 2019. Impact of potassium nutrition on fruit yield and physicochemical characteristics of apple cultivar red delicious. Indian Journal of Fertilisers 15: 790-797.

Rengel, Z. and P.M. Damon. 2008. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. Physiologia Plantarum 133: 624–636.

Ruan, L., J. Zhang, X. Xin, C. Zhang, D. Ma, L. Chen and B. Zhao. 2015. Comparative analysis of potassium deficiency-responsive transcriptomes in low potassium susceptible and tolerant wheat (*Triticum aestivum* L.). Scientific Report 5:1-13.

Römheld, V. and G. Neumann. 2006. The rhizosphere: contribution of the soil-root interface to sustainable soil systems, pp 92–107. In: Biological Approaches to Sustainable Soil Systems. CRC Press, Taylor and Francis, Oxford.

Römheld, V. and E.A. Kirkby. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. Plant and Soil 335: 155–180.

Saida, C., B. Houria and B. Mebarek. 2014. Interactive effects of salinity and potassium on physio-morphologicaltraits of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). Agriculture and Biology Journal of North America 5: 135–143.

Sangakkara, U.R., U.A. Hartwig and J. Nösberger. 1996. Root and shoot development of Phaseolus vulgaris L. (French beans) as affected by soil moisture and fertilizer potassium. Journal of Agronomy and Crop Science 177: 145–151.

Shin, R. and D.P. Schachtman. 2004. Hydrogen peroxide mediates plant root cell response to nutrient deprivation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 101: 8827–8832

Siddiqui, M.H., M.H. Al-Whaibi, A.M. Sakran, M.O. Basalah and H.M. Ali. 2012. Effect of calcium and potassium on antioxidant system of Vicia faba L. under cadmium stress. International Journal of Molecular Sciences 13: 6604–6619.

Singh, V.K., B.S. Dwivedi, R.J. Buresh, M.L. Jat, K. Majumdar, B. Gangwar, V. Govil and S.K. Singh. 2013. Potassium fertilization in rice–wheat system across Northern India: Crop performance and soil nutrients. Agronomy Journal 105:471–481.

Singh, V.K., B.S. Dwivedi, S.S.K. Yadvinder-Singh, R.P. Mishra, A.K. Shukla, S.S. Rathore, K. Shekhawat, K. Majumdar and M.L. Jat. 2018. Effect of tillage and crop establishment, residue managementand K fertilization on yield, K use efficiency and apparent K balance under rice maize system in north-western India. Field Crops Research 224: 1–12.

Singh, V.K., B.S. Dwivedi, S.S. Rathore, R.P. Mishra, T. Satyanarayana and K. Majumdar. 2021. Timing Potassium Applications to Synchronize with Plant Demand, pp. 363-384. In: T.S. Murrell et al. (eds.), Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops. Springer.

Smil, V. 1999. Crop residues: Agriculture's largest harvest: Crop residues incorporate more than half of the world's agricultural phytomass. BioScience 49:299–308.

Soleimanzadeh, H.; D. Habibi, M.R. Ardakani, F. Paknejad and F. Rejali. 2010. Effect of potassium levels on antioxidant enzymes and malondialdehyde content under drought stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). American Journal of Agricultural and Biological Sciences 5: 56–61.

Song, Z.Z.; C.L. Duan, S.L. Guo, Y. Yang, Y.F. Feng, R.J. Ma and M.L. Yu. 2015. Potassium contributes to zinc stress tolerance in peach (Prunus persica) seedlings by enhancing photosynthesis and the antioxidant defense system. Genetics and Molecular Research 14: 8338–8351.

Stone, M. and C. Weaver. 2021. Improving Human Nutrition: A Critical Objective for Potassium Recommendations for Agricultural Crops, pp. 417-445. In: T.S. Murrell et al. (eds.) Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crop. Springer.

Thomas, T.C. and A.C. Thomas. 2009. Vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. Plant Signal Behavior 4: 240–243.

Timsina, J. and D.J. Connor. 2001. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: Issues and challenges. Field Crops Res 69: 93–132.

Trakoonyingcharoen, P. 2005. The nature of red Oxisols and Ultisols in Thailand. Ph.D. Thesis. Kasetsart University. 188 p.

Wang, D., M.C. Shannon, C.M. Grieve and S.R. Yates. 2000. Soil water and temperature regimes in drip and sprinkler irrigation, and implications to soybean emergence. Agricultural Water Management 43: 15-28.

Wang, M., Q. Zheng, Q. Shen and S. Guo. 2013. The Critical Role of Potassium in Plant Stress Response. International Journal of Molecular Sciences 14: 7370-7390.

Wasonga, D., J. Kleemola, L. Kleemola and P. Mäkelä. 2020. Potassium fertigation with deficit irrigation improves the nutritive quality of cassava. Frontiers in Sustainable Food Systems 4: 1-12.

White, P. and A. Karley. 2010. "Potassium" in Cell biology of metals and nutrients, pp. 199–224. In: Cell biology of metals and nutrients in plants. Dordrecht. Springer.

Woldemariam, S.H., S. Lal, D.Z. Zelelew and M.T. Solomon. 2018. Effect of potassium levels on productivity and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). Journal of Agricultural Studies 6: 105-117.

Wulff, F., V. Schulz, A. Jungk and N. Claassen. 1998. Potassium fertilization on sandy

soils in relation to soil test, crop yield and K-leaching. Z Pflanzenernaehr Bodenkd 161: 591–599.

Wuzhong, N. 2002. Yield and quality of fruits of Solanaceous crops as affected by potassium fertilization. Better Crops International 16(1): 6-8.

Yadvinder-Singh, Bijay-Singh and J. Timsina. 2005. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics. Advances in Agronomy 85:269–407.

Zaheer, M.M., N.A. Yasin, S.R. Ahmad, W.U. Khan, A. Ahmad, A. Ali and S.U. Rehman. 2017. Amelioration of cadmium stress in gladiolus (*Gladiolus grandiflora* L.) by application of potassium and silicon. Journal of Plant Nutrition 41: 461-476.

Zain, N.A.M.; M.R. Ismail, A. Puteh, M. Mahmood and M.R. Islam. 2014. Drought tolerance and ion accumulation of rice following application of additional potassium fertilizer. Communications in Soil Science and Plant Analysis 45: 2502–2514.

Zia, M.S., M. Salim, M. Aslam and M.A. Gill. 1994. Effect of low temperature of irrigation water on rice growth and nutrient uptake. Journal of Agronomy and Crop Science 173: 22-31.

Zeng, Q. and P.H. Brown. 2000. Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes. Plant and Soil 221: 121–134.