

บทบาทของโพรลีนและบีเทนต่อแบบจำลองเซลล์พืช

ภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติก

Role of Proline and Betaine on Plant Cell Model

Under Salt and Osmotic Stresses

สุรศักดิ์ ละลอกน้ำ¹ ทรงกลด ไบยา² อาภรณ์ บัวหลวง³ และ บงกช บุญบุรพงศ์^{1*}

Surasak Laloknam¹ Songklod Baiya² Aporn Bualuang³ and Bongkoj Boonburapong^{1*}

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110

²ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ 10110

³วิทยาลัยแพทยศาสตร์นานาชาติจุฬาภรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

¹Department of General Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, 10110

²Department of Biology, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, 10110

³Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University, Pathumthani, 12120

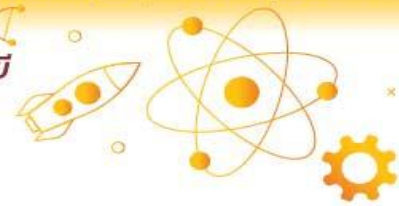
*Corresponding author E-mail: bongkoj@g.swu.ac.th

Received 30 March 2023, Accepted 21 June 2023, Published 26 June 2023

บทคัดย่อ

ความเครียดจากเกลือและออสโมติกในสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและสรีรวิทยาของพืช ทำให้พืชมีระบบป้องกันสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อมด้วยการนำสารเข้าและออกจากเซลล์ หรือ ผลิตภัณฑ์ประเภทออสโมโพรเทคแทนต์เพื่อรักษาสสมดุลภายในเซลล์ให้เป็นปกติ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาผลของความเครียดจากเกลือและออสโมติกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพรลีนและบีเทนของแบบจำลองเซลล์พืช และ 2) ศึกษาผลของโพรลีนและบีเทนต่อแบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติก โดยศึกษาแบบจำลองเซลล์พืชจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง มีขนาด กว้าง×ยาว×สูง 1x1x1 เซนติเมตร นำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และ ซูโครส ความเข้มข้นร้อยละ 0 – 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ ติดตามปริมาณโพรลีนและบีเทนของแบบจำลองเซลล์เป็นระยะเวลา 180 นาที พบว่าแบบจำลองเซลล์พืชที่มีปริมาณโพรลีนและบีเทนมากที่สุด คือ ไซเท้า รองลงมา คือ มันฝรั่ง และ น้อยที่สุด คือ แครอท จากนั้นนำแบบจำลองเซลล์พืชแช่ในสารละลายที่มีความเครียดจากเกลือและออสโมติกเสริมโพรลีนและบีเทน ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ติดตามการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นฐานของแบบจำลองเซลล์พืช ได้แก่ น้ำหนักสด และ ปริมาตรของแบบจำลองเซลล์พืชเป็นระยะเวลา 180 นาที พบว่า โพรลีนช่วยรักษาลักษณะพื้นฐานของแบบจำลองเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ภายใต้สภาวะเครียดจากออสโมติก และบีเทนช่วยรักษาลักษณะพื้นฐานของแบบจำลองเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือ จากการศึกษาข้อนี้บ่งชี้ได้ว่าโพรลีนและบีเทนเป็นสารออสโมโพรเทคแทนต์ที่แบบจำลองเซลล์ของพืชผลิตขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติก และการเพิ่มโพรลีนและบีเทนทำให้แบบจำลองเซลล์พืชคงสภาพได้ภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติก

คำสำคัญ: ความเครียดจากเกลือ ความเครียดจากออสโมติก แบบจำลองเซลล์พืช โพรลีน บีเทน



ABSTRACT

Salinity and osmotic stresses in the environment affect plant morphology and physiology. Plants uptake and produce osmoprotectants to maintain osmotic homeostasis as a protective mechanism during stressful conditions. The objectives of this research were to 1) investigate the effect of salt and osmotic stresses on proline and betaine content of plant cell models, and 2) investigate the effect of proline and betaine on plant cell models under salt and osmotic stresses. The plant cell models sized 1x1x1 centimeters (radish, potato, and carrot) were soaked in various concentrations of NaCl and sucrose ranging from 0-30% (w/v) and subjected to determine proline and betaine contents every 30 minutes for 180 minutes. The result showed that the highest proline and betaine contents were observed in radish and followed by potato and carrot. All plant cell models were soaked in salt and osmotic stresses with 10 mM proline and 10 mM betaine and subjected to determine fresh weight and volume of the plant cell model every 30 min for 180 min. The results showed that proline could prolong the morphological alteration of all tested plant cell models under osmotic stress. Under salt stress, betaine could prolong the morphological alteration of all tested plant cell models. This finding suggested that proline and betaine are osmoregulators produced by plant cell models under salt and osmotic stresses, and exogenous application of proline and betaine maintains morphological changes of the plant cell model under salt and osmotic stresses.

Keywords: Salt stress, Osmotic stress, Plant cell model, Proline, Betaine

บทนำ

ความเค็มเป็นปัจจัยสำคัญในสิ่งแวดล้อมทั้งทางดินและทางน้ำเนื่องจากส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ทำให้สามารถแบ่งสิ่งมีชีวิตที่มีความไวต่อความเค็มและสิ่งมีชีวิตทนเค็ม ซึ่งสิ่งมีชีวิตที่มีความไวต่อความเค็มจะสามารถเจริญได้ภายใต้สภาวะที่มีความเค็มระดับหนึ่งเท่านั้น (วิจิตพล และคณะ, 2553; สุรศักดิ์, 2554; Smolen et al., 2020; Gibberd et al., 2002; Roy et al., 2014; Flowers et al., 2015) สิ่งมีชีวิตทนเค็มสามารถเจริญเติบโตภายใต้สภาวะที่มีความเค็มระดับสูง เนื่องจากการปรับตัวทนความเป็นพิษของไอออนโซเดียม และ ทนแรงดันออสโมติกที่กระทำต่อเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ กลไกที่ใช้ในการทนเค็มมีหลายรูปแบบ เช่น การผลิตสารที่มีความสามารถในการรักษาสมดุลของไอออนโซเดียมและลดแรงดันออสโมติก เรียกว่า สารออสโมโพรเทคแทนต์ (Osmoprotectant) ส่วนมากสารชนิดนี้จะอยู่ในรูปของกรดอะมิโน และ อนุพันธ์ของกรดอะมิโน ได้แก่ โพรลีน และ บีเทน สิ่งมีชีวิตบางชนิดปรับตัวโดยการเพิ่มการนำเข้าของสารออสโมโพรเทคแทนต์โดยเพิ่มปริมาณโปรตีนขนส่งส่งที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น โปรตีนขนส่งส่งโพรลีน (Proline transporter) และ โปรตีนขนส่งส่งบีเทน (Betaine transporter) เพื่อนำเข้าสารโพรลีนและบีเทนมารักษาสภาพภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติก (Laloknam et al., 2006; Laloknam et al., 2014) สำหรับไซยาโนแบคทีเรียและพืชบางชนิดถ้าอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเค็มและออสโมติกเพิ่มการผลิตเอนไซม์บางชนิดเพื่อเข้ามารักษาสภาพจากการเพิ่มอนุมูลอิสระภายในเซลล์ร่วมกับโปรตีนขนส่งบางชนิดเพื่อกำจัดเกลือและรักษาสภาพของเซลล์ เช่น การขับ Na^+ ออกนอกเซลล์ และ รักษาสมดุลโปรตอน (H^+) ระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยเอนไซม์โซเดียมเอทีพีเอส ($\text{Na}^+ - \text{ATPase}$)



โซเดียม/โปรตอนแอนติพอร์เตอร์ (Na^+/H^+ antiporter) และ โปรตีนปั๊มโซเดียมโพแทสเซียม (Na^+/K^+ pump) (Padan and Schuldiner, 1996; Kapper et al., 1996; Waditee et al., 2001; Waditee et al., 2002; Waditee et al., 2005)

หัวไชเท้า (Chinese radish ชื่อวิทยาศาสตร์ *Raphanus sativus* L.) เป็นพืชที่นิยมนำมาประกอบอาหารไทย ในรูปแบบแกงจืด เนื่องจากมีสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต และ มีกากใยอาหาร แครอท (Carrot ชื่อวิทยาศาสตร์ *Daucus carota* S.) เป็นพืชที่นิยมนำมาประกอบอาหารสากลโดยเฉพาะในสลัดเป็นพืชที่มีกากใยอาหาร และมีสารเบต้าแคโรทีน และ มันฝรั่ง (Potato ชื่อวิทยาศาสตร์ *Solanum tuberosum*) เป็นพืชที่นิยมนำมาประกอบอาหารประเภทสากล ในรูปแบบแกงจืด เนื่องจากมีสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตสูงจึงอยู่ในกลุ่มที่ให้พลังงาน มีงานวิจัยศึกษาการนำพืชทั้งสามชนิดไปเพาะปลูกภายใต้สภาวะที่มีความเค็มในรูปแบบของการเพาะเมล็ดและติดตามการเจริญเติบโตของต้นกล้าของพืช ศึกษาอัตราการรอด และการเจริญเติบโตของพืชทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ยังมีการติดตามสารออสโมโพรเทคแทนต์บางชนิด เช่น กรดอะมิโนโพรลีน และ อนุพันธ์ของกรดอะมิโนไกลซีน-ปีเทน โดยต้องใช้ต้นอ่อนทั้งหมดในการศึกษา พบว่า พืชทั้งสามชนิดมีอัตราการงอกลดลงภายใต้ภาวะที่มีความเค็ม และ ผลิตสารโพรลีนและปีเทนสูงขึ้นในระดับหนึ่งของแต่ละสภาวะความเค็มที่ทำการศึกษา ซึ่งสอดคล้องกับสิ่งมีชีวิตอีกหลายชนิด ได้แก่ แพลงก์ตอนสัตว์ สาหร่ายสีเขียว ไสยาโนแบคทีเรียบางชนิด ข้าว และ ผักขม (เจนนี้และคณะ, 2553; โพธิ์ธรรม และคณะ, 2555; Kumar et al., 2004; Eraslan et al., 2007; Nagaz et al., 2012; Raigond et al., 2020; Ali et al., 2020; Jaarsma et al., 2013; Li et al., 2016; VishnuPriya et al., 2020)

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองเซลล์พืช 3 ชนิด แครอท ไช้เท้า และ มันฝรั่งภายใต้ภาวะที่มีความเค็มจากเกลือ โดยนำรากพิเศษของแครอท ไช้เท้า และมันฝรั่ง มาหั่นให้เป็นชิ้นทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดด้านกว้าง ด้านยาว และด้านสูง 1 เซนติเมตร ไปทำการทดสอบภายใต้ภาวะที่มีความเค็มจากเกลือและออสโมติก พบว่าแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและน้ำหนักลดลง (สุรศักดิ์ และคณะ, 2565) ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองต่อยอดงานวิจัยดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะเค็มจากเกลือและออสโมติกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพรลีนและปีเทนของแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไช้เท้า และ มันฝรั่ง และ ผลของการเสริมโพรลีนและปีเทนภายใต้สภาวะเค็มจากเกลือและออสโมติกต่อลักษณะของแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไช้เท้า และ มันฝรั่ง ประโยชน์ของการศึกษานี้เป็นแนวทางในการออกแบบการปลูกพืชภายใต้สภาวะที่มีความเค็มจากเกลือและออสโมติกของพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นๆ ต่อไป

วิธีการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างแบบจำลองเซลล์ของพืช

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาสร้างแบบจำลองเซลล์พืชดำเนินการตามวิธีของ สุรศักดิ์ และคณะ (2565) นำหัวแครอท ไช้เท้า และ มันฝรั่ง ซื้อมาจากร้านค้าในตลาดนัดนานาชาติมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ล่างทำความสะอาดพืชตัวอย่างด้วยน้ำประปา แล้วเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด นำมาปอกเปลือกและหั่นด้วยมีดให้มีขนาด กว้างxยาวxสูง ด้านละ 1 เซนติเมตร

การเตรียมตัวอย่างสารละลายที่ใช้ในการศึกษา

กรณีศึกษาภายใต้สภาวะเค็มจากเกลือ : เตรียมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยชั่งโซเดียมคลอไรด์ 30 กรัม นำไปละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียม



สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ด้วยการเจือจางสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับน้ำกลั่น

กรณีศึกษาภายใต้สภาวะเครียดจากออสโมติก : เตรียมสารละลายซูโครสเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยซังซูโครส 30 กรัม นำไปละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรสุดท้ายให้เป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเตรียมสารละลายซูโครสเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ด้วยการเจือจางสารละลายซูโครสเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับน้ำกลั่น

กรณีศึกษาภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติกที่มีโพรีนและบีเทน : ใช้ความเข้มข้นโพรีนและบีเทนสุดท้ายความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์

การศึกษาผลของสภาวะเครียดจากเกลือต่อปริมาณโพรีนและบีเทนของแบบจำลองเซลล์พืช

นำแบบจำลองเซลล์แครอท ไซเท้า และมันฝรั่ง ชนิดละ 3 เซลล์ ใส่ลงในแก้วพลาสติกใสที่มีสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ละความเข้มข้นมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ติดตามวัดปริมาณโพรีนและบีเทน ทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที

การศึกษาผลของสภาวะเครียดจากออสโมติกต่อปริมาณโพรีนและบีเทนของแบบจำลองเซลล์พืช

นำแบบจำลองเซลล์แครอท ไซเท้า และมันฝรั่ง ชนิดละ 3 เซลล์ ใส่ลงในแก้วพลาสติกใสที่มีสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ละความเข้มข้นมีปริมาตร 20 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ติดตามวัดปริมาณโพรีนและบีเทน ทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที

การวัดปริมาณโพรีน

การวัดปริมาณโพรีนดัดแปลงจากวิธีของ เจนนี และคณะ (2553) ทำการชั่งแบบจำลองเซลล์พืชที่ต้องการศึกษาปริมาณ 0.5 กรัม เติมน้ำสารละลายกรดซัลฟิวริก 10% ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร บดให้ละเอียด แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 2 นำสารละลายที่กรองได้เติมกรดไนโตรเจน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และ กรดแอสติก ปริมาตร 2 มิลลิลิตร นำไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาด้วยการนำไปแช่ในน้ำแข็งทันทีระยะเวลา 10 นาที เติมหิวทูลีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วปล่อยให้แยกชั้นระยะเวลา 1 – 2 นาที ดูดสารละลายส่วนที่เป็นหิวทูลีนสามารถสังเกตได้จากสารละลายมีสีชมพูอยู่ด้านบน นำสารละลายสีชมพูไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานโพรีน

การวัดปริมาณบีเทน

การวัดปริมาณบีเทนดัดแปลงจาก โพธิธรรณ และคณะ (2555) ทำการชั่งแบบจำลองเซลล์พืชที่ต้องการศึกษาปริมาณ 0.1 กรัม เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 250 ไมโครลิตร เติมน้ำกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 นอร์มัล ปริมาตร 250 ไมโครลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 35 นาที นำไปบ่มในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที เติมน้ำสารละลายโพแทสเซียมไฮโอไดเต้ ปริมาตร 5 ไมโครลิตร นำไปบ่มในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง นำไปเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที ระยะเวลา 10 นาที ดูดสารละลายส่วนใสด้านบนออก และ เติมน้ำไดคลอโรมีเทน ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมกับ



ตะกอนด้านล่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานบีเทน

การศึกษาผลของโพรินและบีเทนต่อแบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือและออสโมติก

นำแบบจำลองเซลล์แครอท ไซเท้า และมันฝรั่งชนิดละ 3 เซลล์ ใส่ลงในแก้วพลาสติกใสที่มีสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เติมน้ำโพรินและบีเทน ให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 10 มิลลิโมลาร์ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ติดตามการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองเซลล์ ทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากสารละลายไซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

การติดตามการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองเซลล์พืช

น้ำหนักสด (กรัม) : ทำการชั่งตัวอย่างแบบจำลองเซลล์พืชก่อนทำการศึกษากับเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง และเมื่อถึงเวลาที่ศึกษา เทสารละลายผ่านตะแกรงกรอง ใช้ปากคีบหยิบตัวอย่างแบบจำลองเซลล์ซึ่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง เทสารละลายที่กรองและหยิบตัวอย่างแบบจำลองเซลล์ใส่แก้วพลาสติกใสแก้วเดิม ทำการวัดแบบนี้จนครบระยะเวลาที่ศึกษา

ปริมาตรของตัวอย่างแบบจำลองเซลล์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร) : ทำการวัดความยาวด้านกว้าง ด้านยาว และ ด้านสูงของแบบจำลองเซลล์ก่อนทำการศึกษากับไม้บรรทัด คำนวณหาปริมาตรของแบบจำลองเซลล์ และเมื่อถึงเวลาที่ศึกษาเทสารละลายผ่านตะแกรงกรอง ใช้ปากคีบหยิบตัวอย่างแบบจำลองเซลล์ ทำการวัดความยาวด้านกว้าง ด้านยาว และ ด้านสูงของแบบจำลองเซลล์ด้วยไม้บรรทัดอีกครั้ง คำนวณหาปริมาตรของแบบจำลองเซลล์ เทสารละลายที่กรองและหยิบตัวอย่างแบบจำลองเซลล์ใส่แก้วพลาสติกใสแก้วเดิม ทำการวัดแบบนี้จนครบระยะเวลาที่ศึกษา

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดลองจากการวิจัยจัดทำทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ Completely Randomized Design (CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ($p < 0.05$)

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

ผลของสภาวะเครียดจากเกลือต่อปริมาณโพรินในแบบจำลองเซลล์พืช

นำแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ใส่ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0 – 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นวัดปริมาณโพรินจากแบบจำลองเซลล์พืชทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที แสดงผลดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่า แบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สภาวะปกติไม่มีเกลือไซเดียมคลอไรด์ ไซเท้ามีปริมาณโพรินสูงที่สุด รองลงมาเป็นมันฝรั่ง และ แครอทมีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 180 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพรินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เมื่อแบบจำลองเซลล์พืชทั้งสามชนิดภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของเกลือไซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นแนวโน้มของปริมาณโพรินในแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองเซลล์มีแนวโน้มปริมาณโพรินคงที่ระยะเวลา 60 นาที ภายใต้สารละลายไซเดียมคลอไรด์ทุกความเข้มข้น และผลผลิตสูงสุดที่ความเข้มข้น

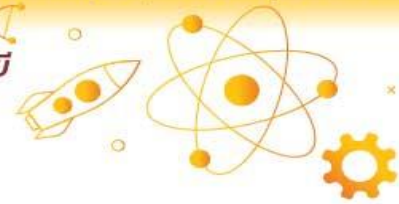


โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นโซเดียมคลอไรด์สูงขึ้นไปมีแนวโน้มปริมาณโพสลินลดลง ผลของความเครียดจากเกลือต่อแบบจำลองเซลล์ของพืชทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มทำให้โพสลินสูงขึ้น และคงที่ระดับความเข้มข้นหนึ่งนั้นอาจเป็นเพราะความสามารถในการทนต่อพิษของไอออนโซเดียมลดลง ทำให้ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลง และไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิดที่ช่วยลดอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นในเซลล์ทำให้เอนไซม์ที่สังเคราะห์กรดอะมิโนโพสลินลดลงในต้นมะเขือเทศ ข้าว และ ถั่วเหลือง (Umar et al., 2018; Liu et al., 2014; Heuer, 2003; Sabagh et al., 2017; Sobahan et al., 2012)

ตารางที่ 1 ปริมาณโพสลินในแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ภายใต้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลา 0 – 180 นาที (n = 3)

ชนิด แบบ จำลอง เซลล์	ความเข้มข้นของ สารละลาย โซเดียม คลอไรด์	ปริมาณโพสลินที่เวลาต่างๆ (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมโปรตีน)					
		0	30	60	120	150	180
แครอท	0%(w/v)	3.12±0.05 ^a	3.14±0.05 ^a	3.09±0.05 ^a	3.12±0.05 ^a	3.08±0.05 ^a	3.08±0.05 ^a
	5%(w/v)	3.74±0.10 ^b	3.84±0.05 ^b	5.84±0.15 ^a	5.98±0.25 ^a	6.05±0.25 ^a	6.15±0.25 ^a
	10%(w/v)	4.08±0.05 ^c	4.29±0.10 ^c	5.95±0.24 ^b	6.25±0.37 ^a	6.32±0.15 ^a	6.42±0.15 ^a
	20%(w/v)	3.94±0.05 ^b	3.82±0.15 ^b	5.39±0.27 ^a	5.42±0.32 ^a	5.49±0.25 ^a	5.59±0.25 ^a
	30%(w/v)	4.03±0.05 ^b	3.92±0.10 ^b	5.32±0.34 ^a	4.99±0.12 ^a	5.04±0.14 ^a	5.14±0.14 ^a
ไชเท้า	0%(w/v)	5.85±0.22 ^a	5.92±0.22 ^a	5.85±0.22 ^a	5.85±0.22 ^a	5.85±0.22 ^a	6.12±0.22 ^a
	5%(w/v)	5.75±0.24 ^b	6.04±0.20 ^b	7.54±0.25 ^a	7.68±0.27 ^a	7.84±0.27 ^a	7.94±0.27 ^a
	10%(w/v)	5.32±0.22 ^c	6.32±0.22 ^b	8.35±0.25 ^a	8.45±0.41 ^a	8.47±0.30 ^a	8.51±0.30 ^a
	20%(w/v)	5.59±0.24 ^c	6.30±0.20 ^b	8.22±0.29 ^a	8.34±0.32 ^a	8.41±0.32 ^a	8.43±0.32 ^a
	30%(w/v)	5.01±0.22 ^c	6.08±0.22 ^b	7.53±0.23 ^a	7.64±0.25 ^a	7.73±0.25 ^a	7.70±0.25 ^a
มันฝรั่ง	0%(w/v)	4.15±0.25 ^a	4.24±0.20 ^a	4.10±0.20 ^a	3.95±0.25 ^a	4.05±0.20 ^a	4.15±0.20 ^a
	5%(w/v)	4.08±0.15 ^b	4.52±0.15 ^{ab}	5.60±0.22 ^a	5.35±0.16 ^a	5.40±0.26 ^a	5.45±0.26 ^a
	10%(w/v)	3.98±0.20 ^c	4.88±0.18 ^b	6.31±0.35 ^a	6.21±0.21 ^a	6.32±0.21 ^a	6.42±0.21 ^a
	20%(w/v)	3.95±0.20 ^b	4.04±0.21 ^b	4.52±0.13 ^{ab}	4.94±0.25 ^a	4.54±0.25 ^a	4.55±0.25 ^a
	30%(w/v)	4.12±0.25 ^b	4.17±0.23 ^b	4.28±0.23 ^b	4.65±0.24 ^{ab}	5.16±0.25 ^a	5.23±0.25 ^a

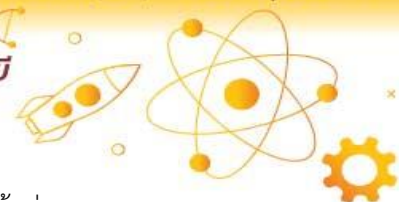
หมายเหตุ: a, b, ... ตัวอักษรต่างกันของข้อมูลในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ผลของสถานะเครียดจากเกลือต่อปริมาณบิเทนในแบบจำลองเซลล์พืช

นำแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ใส่ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 0 – 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นวัดปริมาณบิเทนจากแบบจำลองเซลล์พืชทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที แสดงผลดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่า แบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สภาวะปกติไม่มีเกลือไฮเดียมคลอไรด์ ไซเท้ามีปริมาณบิเทนสูงที่สุด รองลงมาเป็นมันฝรั่ง และ แครอทมีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 180 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณบิเทนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เมื่อแบบจำลองเซลล์พืชทั้งสามชนิดภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของเกลือไฮเดียมคลอไรด์สูงขึ้นแนวโน้มของปริมาณบิเทนในแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้น โดยแบบจำลองเซลล์มีแนวโน้มปริมาณบิเทนคงที่ระยะเวลา 60 นาที ภายใต้สารละลายไฮเดียมคลอไรด์ทุกความเข้มข้น และผลิตสูงสุดที่ความเข้มข้นไฮเดียมคลอไรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นไฮเดียมคลอไรด์สูงขึ้นมีแนวโน้มปริมาณบิเทนลดลง ผลของความเครียดจากเกลือต่อแบบจำลองเซลล์ของพืชทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มทำให้บิเทนสูงขึ้น และคงที่ระดับความเข้มข้นหนึ่งนั้นอาจเป็นเพราะความสามารถในการทนต่อพิษของไอออนไฮเดียมลดลง ทำให้ผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลง และไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น ไฮเดียมโปรตอนแอนติพอร์เตอร์ และ บิเทนทรานสพอร์เตอร์ ทำให้มีการขนส่งสารที่ไม่ดี รวมถึงไม่สามารถลดอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น และ การทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์บิเทนลดลงเหมือนที่มีในรายงานในแครอท มันฝรั่ง และ สิ่งมีชีวิตกลุ่มสาหร่ายสีเขียวและไซยาโนแบคทีเรีย (Smolen et al., 2020; Gibberd et al., 2002; Roy et al., 2014; Laloknam et al., 2014; Padan and Schuldiner, 1996; Waditee et al., 2002; Waditee et al., 2005; Raigond et al., 2020)



ตารางที่ 2 ปริมาณบีเทนในแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ภายใต้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ
ที่ระยะเวลา 0 – 180 นาที ($n = 3$)

ชนิด แบบจำลอง เซลล์	ความเข้มข้น ของสารละลาย โซเดียม คลอไรด์	ปริมาณบีเทนที่เวลาต่างๆ (ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัมโปรตีน)					
		0	30	60	120	150	180
แครอท	0%(w/v)	4.22±0.05 ^a	4.14±0.05 ^a	4.19±0.05 ^a	4.15±0.05 ^a	4.18±0.05 ^a	4.16±0.05 ^a
	5%(w/v)	4.24±0.10 ^b	4.82±0.05 ^b	6.74±0.15 ^a	6.95±0.25 ^a	7.00±0.25 ^a	7.05±0.25 ^a
	10%(w/v)	4.18±0.05 ^c	6.29±0.10 ^b	7.25±0.24 ^a	7.35±0.37 ^a	7.22±0.15 ^a	7.23±0.15 ^a
	20%(w/v)	3.94±0.05 ^c	4.82±0.15 ^b	5.19±0.27 ^a	5.22±0.32 ^a	5.39±0.25 ^a	5.49±0.25 ^a
	30%(w/v)	4.13±0.05 ^b	4.72±0.10 ^a	4.72±0.34 ^a	4.89±0.12 ^a	4.94±0.14 ^a	5.05±0.14 ^a
ไชเท้า	0%(w/v)	7.84±0.22 ^a	7.95±0.22 ^a	7.93±0.22 ^a	7.92±0.22 ^a	7.84±0.22 ^a	7.62±0.22 ^a
	5%(w/v)	7.65±0.24 ^b	7.94±0.20 ^{ab}	8.24±0.25 ^a	8.68±0.27 ^a	8.86±0.27 ^a	8.94±0.27 ^a
	10%(w/v)	7.72±0.22 ^c	8.26±0.22 ^b	9.45±0.25 ^a	9.55±0.41 ^a	9.60±0.30 ^a	9.65±0.30 ^a
	20%(w/v)	7.69±0.24 ^b	7.80±0.20 ^b	8.42±0.29 ^a	8.54±0.32 ^a	8.61±0.32 ^a	8.65±0.32 ^a
	30%(w/v)	7.51±0.22 ^a	7.38±0.22 ^a	7.43±0.23 ^a	7.56±0.25 ^a	7.62±0.25 ^a	7.65±0.25 ^a
มันฝรั่ง	0%(w/v)	5.15±0.25 ^a	5.24±0.20 ^a	5.10±0.20 ^a	5.15±0.25 ^a	5.15±0.20 ^a	5.20±0.20 ^a
	5%(w/v)	5.08±0.15 ^b	5.42±0.15 ^{ab}	6.30±0.22 ^a	6.45±0.16 ^a	6.52±0.26 ^a	6.55±0.26 ^a
	10%(w/v)	4.98±0.20 ^c	5.88±0.18 ^b	7.31±0.35 ^a	7.41±0.21 ^a	7.45±0.21 ^a	7.52±0.21 ^a
	20%(w/v)	4.99±0.20 ^d	5.54±0.21 ^{cd}	5.95±0.13 ^c	6.14±0.25 ^b	6.54±0.25 ^a	6.55±0.25 ^a
	30%(w/v)	5.11±0.25 ^b	5.17±0.23 ^b	5.28±0.23 ^b	5.65±0.24 ^{ab}	5.86±0.25 ^a	5.93±0.25 ^a

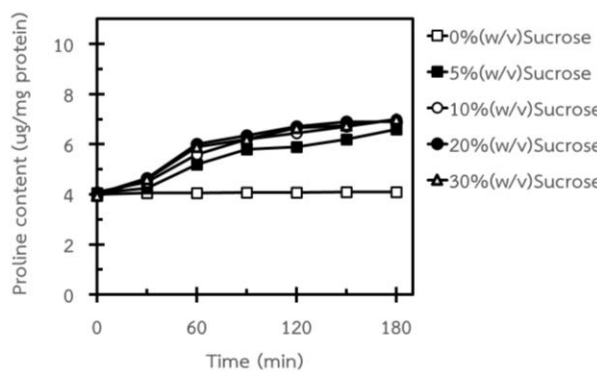
หมายเหตุ: a, b, ... ตัวอักษรต่างกันของข้อมูลในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของสภาวะเครียดจากออสโมติกต่อปริมาณโปรตีนในแบบจำลองเซลล์พืช

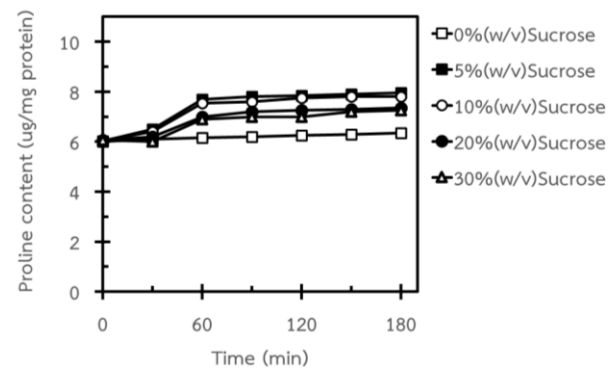
นำแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไชเท้า และ มันฝรั่ง ใส่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 0 – 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นวัดปริมาณโปรตีนจากแบบจำลองเซลล์พืชทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที แสดงผลดังภาพที่ 1

จากภาพที่ 1 พบว่า แบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สภาวะปกติไม่มีซูโครส ไชเท้ามีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด รองลงมาเป็นมันฝรั่ง และ แครอทมีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 180 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เมื่อแบบจำลองเซลล์พืชทั้งสามชนิดภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของซูโครสสูงขึ้นแนวโน้มของปริมาณโปรตีนในแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มปริมาณโปรตีนคงที่ระยะเวลา 60 นาที ภายใต้สารละลายซูโครสทุกความเข้มข้น และผลิตสูงสุดที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นซูโครสสูงขึ้นมีแนวโน้มปริมาณโปรตีนลดลง แบบจำลองเซลล์สามารถผลิตโปรตีนได้สูงขึ้นภายใต้ภาวะเครียดจากออสโมติกอาจเป็น

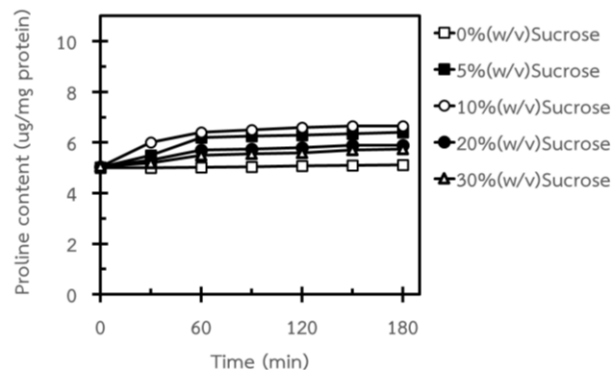
เพราะโพรลีนช่วยรักษาสมดุลของปริมาณน้ำตาลที่มีอยู่ภายนอกเซลล์ที่มากกว่าและช่วยทำให้อัตราในการนำเข้าน้ำและออกจากเซลล์เป็นปกติเมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้เซลล์อยู่ในสภาวะปกติแต่เมื่อมีความเข้มข้นมากเกินไปจะยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ได้เพราะมีภาวะทำให้เซลล์เหี่ยวได้เร็วเมื่อมีความเข้มข้นสูงเซลล์ผลิตโพรลีนไม่ทัน (วิจิตพล และคณะ, 2553; สุรศักดิ์, 2554; Flowers et al., 2015; VishnuPriya et al., 2020)



(ก)



(ข)



(ค)

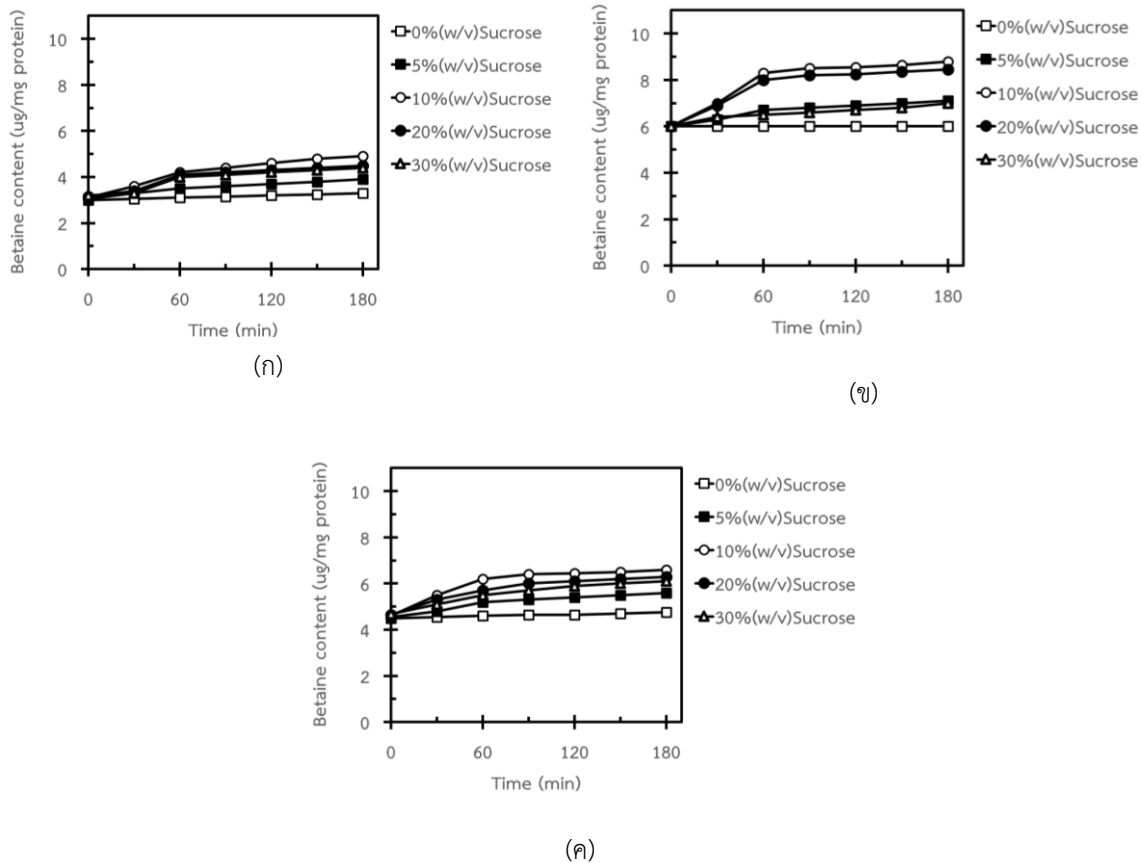
ภาพที่ 1 ปริมาณโพรลีนในแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ก) แครอท ข) ไซเท้า และ ค) มันฝรั่ง
ภายใต้สารละลายซูโครสความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลา 0 – 180 นาที (n = 3)

ผลของสภาวะเครียดจากออสโมติกต่อปริมาณบีเทนในแบบจำลองเซลล์พืช

นำแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ใส่ในสารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 0 – 30 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นวัดปริมาณบีเทนจากแบบจำลองเซลล์พืชทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลา 180 นาที แสดงผลดังภาพที่ 2

จากภาพที่ 2 พบว่า แบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สภาวะปกติไม่มีซูโครส ไซเท้ามีปริมาณบีเทนสูงที่สุด รองลงมาเป็นมันฝรั่ง และ แครอทมีปริมาณน้อยที่สุด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจนถึงระยะเวลา 180 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณบีเทนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เมื่อแบบจำลองเซลล์พืชทั้งสามชนิดภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของซูโครส

สูงขึ้นแนวโน้มของปริมาณบีเทนในแบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มปริมาณบีเทนคงที่ระยะเวลา 60 นาที ภายใต้สารละลายซูโครสทุกความเข้มข้น และผลิตสูงสุดที่ความเข้มข้นซูโครสร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นซูโครสสูงขึ้นมีแนวโน้มปริมาณบีเทนลดลง สิ่งมีชีวิตที่อยู่ภายใต้ภาวะเครียดจากออสโมติกมีการปรับตัวเพื่อลดแรงดันออสโมติก ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ให้สมดุลด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสมในการปรับเปลี่ยนปริมาณที่เกิดจากแรงดันน้ำที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ของพืชให้ความทนต่อแรงดันออสโมติก เมื่อความเข้มข้นของภายนอกเซลล์สูงเกินไปอัตราเร็วในการนำเข้าสู่สารและการปรับเมแทบอลิซึมในเซลล์เพื่อปรับตัวไม่ทันกันทำให้การผลิตบีเทนลดลงไปด้วย (Flowers et al., 2015; Eraslan et al., 2020; Nagaz et al., 2020; สุรศักดิ์ และคณะ, 2565)

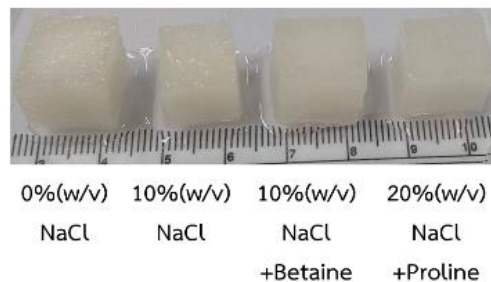


ภาพที่ 2 ปริมาณบีเทนในแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ก) แครอท ข) ไซเท้า และ ค) มันฝรั่ง
ภายใต้สารละลายซูโครสความเข้มข้นต่างๆ ที่ระยะเวลา 0 – 180 นาที (n = 3)

ผลของโพรีนและบีเทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองเซลล์พืชภายใต้ภาวะเครียดจากเกลือ

นำแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ใส่ในสารละลายไฮโปโทนิก 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ กำหนดให้เป็นสภาวะเครียดจากเกลือ จากนั้นเสริมสภาวะเครียดจากเกลือด้วยโพรีนและบีเทนให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 10 มิลลิโมลาร์ จากการศึกษาเบื้องต้นแบบจำลองเซลล์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อระยะเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลา 60 นาที ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองเซลล์ด้านน้ำหนักสดและปริมาตรแบบจำลองเซลล์ ตัวอย่างของแบบจำลองเซลล์ไซเท้า ดังภาพที่ 3 และ แสดงผลของแบบจำลองพืชทุกชนิดดังตารางที่ 3

จากภาพที่ 3 และตารางที่ 3 พบว่า แบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือมีน้ำหนักสดและปริมาตรลดลงจากสภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เมื่อมีการเสริมโพรลีนและบีเทนทำให้น้ำหนักและปริมาตรของแบบจำลองเซลล์มีแนวโน้มเท่ากับสภาวะปกติ นอกจากนี้การเสริมบีเทนในสภาวะเครียดจากเกลือมีแนวโน้มรักษาลักษณะของแบบจำลองเซลล์ได้ดีกว่าการเสริมด้วยโพรลีน



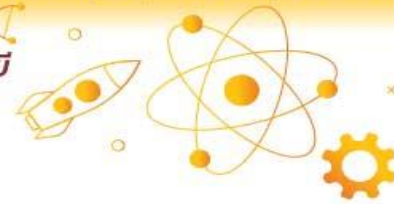
ภาพที่ 3 ลักษณะแบบจำลองเซลล์ไซเท้าภายใต้ภาวะเครียดจากเกลือที่มีการเสริมบีเทนและโพรลีน

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 10

โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เสริมโพรลีน และ บีเทน ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 60 นาที (n = 3)

ชนิดแบบจำลองเซลล์	สภาวะ	น้ำหนักสด (กรัม)	ปริมาตรเซลล์ (cm ³)	สภาวะ	น้ำหนักสด (กรัม)	ปริมาตรเซลล์ (cm ³)
แครอท	ปกติ	2.05±0.17 ^a	1.15±0.34 ^a	ปกติ	2.02±0.25 ^a	1.25±0.22 ^a
	สภาวะเครียด	1.41±0.11 ^b	0.69±0.23 ^b	สภาวะเครียด	1.52±0.21 ^b	0.72±0.23 ^b
	สภาวะเครียดเสริมโพรลีน	1.85±0.21 ^a	1.15±0.23 ^a	สภาวะเครียดเสริมบีเทน	2.12±0.21 ^a	1.21±0.33 ^a
ไซเท้า	ปกติ	2.05±0.20 ^a	1.14±0.17 ^a	ปกติ	1.92±0.25 ^a	1.26±0.15 ^a
	สภาวะเครียด	1.75±0.17 ^b	0.75±0.15 ^b	สภาวะเครียด	1.69±0.20 ^b	0.80±0.20 ^b
	สภาวะเครียดเสริมโพรลีน	1.95±0.20 ^a	1.10±0.20 ^a	สภาวะเครียดเสริมบีเทน	1.91±0.20 ^a	1.25±0.25 ^a
มันฝรั่ง	ปกติ	2.13±0.24 ^a	1.12±0.23 ^a	ปกติ	2.10±0.22 ^a	1.15±0.20 ^a
	สภาวะเครียด	1.86±0.25 ^b	0.91±0.20 ^a	สภาวะเครียด	1.80±0.20 ^b	0.88±0.22 ^b
	สภาวะเครียดเสริมโพรลีน	1.94±0.15 ^{ab}	1.08±0.16 ^a	สภาวะเครียดเสริมบีเทน	2.05±0.15 ^a	1.14±0.22 ^a

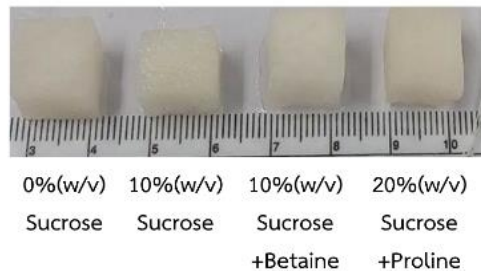
หมายเหตุ: a, b, ... ตัวอักษรต่างกันของข้อมูลในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



ผลของโพสลินและบีเทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองเซลล์พืชภายใต้ภาวะเครียดจากออสโมติก

นำแบบจำลองเซลล์พืช จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ใส่ในสารละลายซูโครสร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ กำหนดให้เป็นสภาวะเครียดจากออสโมติก จากนั้นเสริมภาวะเครียดจากออสโมติกด้วยโพสลินและบีเทนให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 10 มิลลิโมลาร์ จากการศึกษาเบื้องต้นแบบจำลองเซลล์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อระยะเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลา 60 นาที ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองเซลล์ด้านน้ำหนักสดและปริมาตรแบบจำลองเซลล์ ตัวอย่างของแบบจำลองเซลล์ไซเท้า ดังภาพที่ 4 และ แสดงผลของแบบจำลองพืชทุกชนิดดังตารางที่ 4

จากภาพที่ 4 และ ตารางที่ 4 พบว่า แบบจำลองเซลล์พืชทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แครอท ไซเท้า และ มันฝรั่ง ภายใต้สภาวะเครียดจากออสโมติกมีน้ำหนักสดและปริมาตรลดลงจากสภาวะปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 เมื่อมีการเสริมโพสลินและบีเทนทำให้น้ำหนักและปริมาตรของแบบจำลองเซลล์มีแนวโน้มเท่ากับสภาวะปกติ นอกจากนี้การเสริมโพสลินในสภาวะเครียดจากออสโมติกมีแนวโน้มรักษาลักษณะของแบบจำลองเซลล์ได้ดีกว่าการเสริมด้วยบีเทน



ภาพที่ 4 ลักษณะแบบจำลองเซลล์ไซเท้าภายใต้ภาวะเครียดจากออสโมติกที่มีการเสริมบีเทนและโพสลิน

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองเซลล์พืชภายใต้สารละลายซูโครสความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เสริมโพสลิน และ บีเทน ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ที่เวลา 60 นาที (n = 3)

ชนิดแบบจำลองเซลล์	สภาวะ	น้ำหนักสด (กรัม)	ปริมาตรเซลล์ (cm ³)	สภาวะ	น้ำหนักสด (กรัม)	ปริมาตรเซลล์ (cm ³)
แครอท	ปกติ	2.04±0.17 ^a	1.20±0.34 ^a	ปกติ	2.06±0.15 ^a	1.22±0.32 ^a
	สภาวะเครียด	1.51±0.11 ^b	0.86±0.23 ^b	สภาวะเครียด	1.62±0.21 ^b	1.02±0.23 ^b
	สภาวะเครียด เสริมโพสลิน	1.85±0.21 ^a	1.15±0.23 ^a	สภาวะเครียด เสริมบีเทน	2.12±0.21 ^a	1.21±0.33 ^a
ไซเท้า	ปกติ	1.99±0.20 ^a	1.15±0.17 ^a	ปกติ	1.88±0.21 ^a	1.16±0.25 ^a
	สภาวะเครียด	1.65±0.17 ^a	0.84±0.15 ^b	สภาวะเครียด	1.64±0.25 ^b	0.82±0.18 ^b
	สภาวะเครียด เสริมโพสลิน	1.95±0.22 ^a	1.12±0.18 ^a	สภาวะเครียด เสริมบีเทน	1.88±0.20 ^a	1.15±0.20 ^a
มันฝรั่ง	ปกติ	2.11±0.25 ^a	1.15±0.23 ^a	ปกติ	2.16±0.25 ^a	1.17±0.24 ^a
	สภาวะเครียด	1.82±0.15 ^b	0.88±0.22 ^b	สภาวะเครียด	1.84±0.15 ^b	0.98±0.16 ^b
	สภาวะเครียด เสริมโพสลิน	2.09±0.10 ^{ab}	1.12±0.16 ^a	สภาวะเครียด เสริมบีเทน	2.01±0.15 ^a	1.16±0.21 ^a

หมายเหตุ: a, b, ... ตัวอักษรต่างกันของข้อมูลในตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่า โพรลีนและบีเทนสามารถรักษาสภาพของรูปร่างของแบบจำลองเซลล์ได้โดยพิจารณาจากน้ำหนักและปริมาตรของแบบจำลองเซลล์เหมือนสภาวะปกติในพืชทุกชนิดที่ศึกษา ทั้งนี้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงลักษณะสัญญาณของแบบจำลองเซลล์มากกว่าสารละลายซูโครส ทั้งในด้านน้ำหนักและปริมาตรของแบบจำลอง เซลล์ โดยผลกระทบทั้งความเข้มข้นของเกลือและซูโครสเปรียบได้กับความเค็มและแรงดันออสโมติกที่ส่งผลกระทบต่อเซลล์ เห็นได้ ว่าชนิดของเซลล์พืชก็มีผลต่อความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ (สุรศักดิ์ และคณะ, 2565) สภาวะเครียดจากเกลือ และออสโมติกของแบบจำลองเซลล์ทั้งสามชนิดมีแนวโน้มในการทนเค็มและแรงดันออสโมติกได้เมื่อมีการเสริมด้วยโพรลีนและ บีเทน หมายความว่าแบบจำลองเซลล์ทั้งสามชนิดสามารถนำเข้าโพรลีนและบีเทนได้ สอดคล้องกับรายงานที่พืชทั้งสามชนิดได้มีการ ศึกษาความสามารถในการทนเค็มและออสโมติกเนื่องจากมีโปรตีนที่สามารถนำเข้าโพรลีนและบีเทนได้และทำให้เจริญเติบโตได้ ในสภาวะที่มีความเค็มและออสโมติก เมื่อมีความเค็มและออสโมติกที่สูงกระตุ้นให้มีการสร้างยีนส์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีน ขนส่งและเอนไซม์ที่ผลิตโพรลีนและบีเทน เช่น โซเดียมโปรตอนแอนติพอร์เตอร์ (Na^+ antiporter) ร่วมกับการสะสมกรดอะมิโนชนิด โพรลีนซึ่งเป็นสารออสโมโพรเทคแทนต์ชนิดหนึ่งช่วยลดแรงดันออสโมติกและลดความเครียดจากเกลือได้ (Han et al., 2003; Hmida-Sayari et al., 2005; Kilani, et al., 2014; Wu et al., 2013; Jungklang, 2018)

สรุปผลการวิจัย

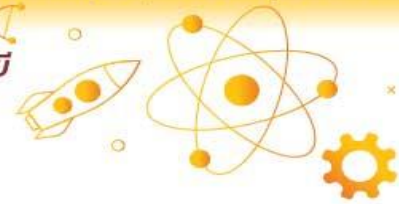
1. สภาวะที่มีความเครียดจากเกลือโซเดียมคลอไรด์และออสโมติกทำให้แบบจำลองเซลล์แคโรท โซเท้า และ มันฝรั่งผลิต ปริมาณโพรลีน และ บีเทน สูงขึ้น ผลิตสูงสุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
2. โพรลีนและบีเทนช่วยทำให้แบบจำลองเซลล์แคโรท โซเท้า และ มันฝรั่ง เกิดสมดุภายในเซลล์ทำให้ลักษณะสัญญาณ ของแบบจำลองเซลล์ภายใต้ภาวะที่มีความเครียดจากเกลือและออสโมติกเป็นปกติ
3. แบบจำลองเซลล์โซเท้าผลิตโพรลีนและบีเทนได้สูงที่สุดภายใต้ภาวะที่มีความเครียดจากเกลือและออสโมติกรองลงมา คือมันฝรั่งและแคโรทน้อยที่สุด

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของความเข้มข้นของสารออสโมโพรเทคแทนต์ต่อการรักษาสมดุลของ รูปร่างของเซลล์ หรือ ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการรักษาแรงดันออสโมติก เช่น เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) แคทาเลส (catalase) และ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมูเทส (super oxide dismutase)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ รวมถึงสถานที่ที่ใช้ในการวิจัย



เอกสารอ้างอิง

- เจนนี่ เจา, สายสุณีย์ ลิ้มชวงศ, สมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ, และสุรศักดิ์ละลอกน้ำ. (2553). ผลของความเครียดจากเกลือต่อปริมาณโพรงในแคลลัสสละ. **วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้**, 1(2), 103 – 107.
- โพธิธรณ์ ครรชิตานุรักษ์, กนกกานต์ นาคทอง, ชัยศาสตร์ คเชนทรสุวรรณ, และสุรศักดิ์ละลอกน้ำ. (2555). ผลของความเค็มต่อการเจริญและปริมาณบีโตนของไซยาโนแบคทีเรียชนิดเส้นสาย *Anabaena* sp. *Nostoc* sp. และ *Spirulina* sp. **วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้**, 3(2), 110 – 115.
- วิจิตพล มีแก้ว, ณัฐพล ชันธปราบ, และสุรศักดิ์ ละลอกน้ำ. (2553). การปรับตัวของพืชภายใต้ภาวะที่มีความเค็ม. **กาวทันโลกวิทยาศาสตร์**, 10(2), 28 – 37.
- สุรศักดิ์ ละลอกน้ำ. (2554). การปรับตัวของไซยาโนแบคทีเรียภายใต้ภาวะเครียดจากเกลือ. **วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้**, 2(1), 82–88.
- สุรศักดิ์ ละลอกน้ำ, วรัญญา แก้วคำ, สาลินี เต็งน้อย, ทรงกลด ไบยา, อาภรณ์ บัวหลวง, และบงกช บุญบุรพงศ์. (2565). ผลของความเครียดจากเกลือและออสโมติกต่อลักษณะสัณฐานของแบบจำลองเซลล์ของพืช. ใน **รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 4 ประจำปี 2565 “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสร้างสรรค์นวัตกรรมเพื่อชุมชน”** (หน้า 118 – 127). เลย: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.
- Ali, A., Ali, Q., Iqbal, M. S., Nasir, I. A., and Wang, X. (2020). Salt Tolerance of Potato Genetically Engineered with the *Atriplex canescens* BADH Gene. **Biologia Plantarum**, 64, 271–279.
- Eraslan, F., Inal, A., Gunes, A., and Alpaslan, M. (2007). Impact of exogenous salicylic acid on the growth, antioxidant activity and physiology of carrot plants subjected to combined salinity and boron toxicity. **Scientia Horticulturae**, 113, 120–128.
- Flowers, T. J., Munns, R., and Colmer, T. D. (2015). Sodium Chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. **Annals of Botany**, 115, 419–431.
- Gibberd, M. R., Turner, N. C., and Storey, R. (2002). Influence of saline irrigation on growth, ion accumulation and partitioning, and leaf gas exchange of carrot (*Daucus carota* L.). **Annals of Botany**, 90, 715–724.
- Han, K. H., and Hwang, C. H. (2003). Salt tolerance enhanced by transformation of a P5CS gene in carrot. **Journal of Plant Biotechnology**, 5 (3), 157–161.
- Heuer, B. (2003). Influence of exogenous application of proline and glycinebetaine on growth of salt-stressed tomato plants. **Plant Science**, 165, 693–699.
- Hmida-Sayari, A., Gargouri-Bouzid, R., Bidani, A., Jaoua, L., Savoure, and A., Jaoua, S. (2005). Overexpression of Δ^1 -pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers salt tolerance in transgenic potato plants. **Plant Science**, 169 (4), 746–752.
- Jaarsma, R., de Vries, R. S. M., and de Boer, A. H. (2013). Effect of Salt Stress on Growth, Na^+ Accumulation and Proline Metabolism in Potato (*Solanum tuberosum*) Cultivars. **PLoS ONE**, 8, e60183.

- Jungklang, J. (2018). Effects of sodium chloride on germination, growth, relative water content, and chlorophyll, proline, malondialdehyde and vitamin C contents in Chinese white radish seedlings (*Raphanus sativus* L. var. longipinnatus Bailey). **Maejo International Journal of Science and Technology**, 12(02), 89-100.
- Kapper, R. M., Kempf, B., and Bremer, F. (1996). Three transport systems for the osmoprotectant glycine betaine operate in *Bacillus subtilis*: characterization of OpuD. **Journal of Bacteriology**, 178, 5071- 5079.
- Kilani, B. R., Abdelly, C., and Saviouré, A. (2014). How reactive oxygen species and proline face stress together. **Plant Physiology and Biochemistry**, 80, 278-284.
- Kumar, S., Dhingra, A., and Daniell, H. (2004). Plastid-expressed betaine aldehyde dehydrogenase gene in carrot cultured cells, roots, and leaves confers enhanced salt tolerance. **Journal of Plant Physiology**, 36, 2843–2854.
- Laloknam, S., Tanaka, K., Buaboocha, T., Waditee, R., Incharoensakdi, A., Hibino, T., ... Takabe, T. (2006). Halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica* contains a betaine transporter active at alkaline pH and high salinity. **Applied and Environmental Microbiology Journal**, 72(9), 6018- 6026.
- Laloknam, S., Kanchitanurak, P., Boonburapong, B., Rai, V., and Kongvitthaya, S. (2014). Inorganic and Organic Compounds of Freshwater Filamentous Cyanobacteria under Normal and Salt Stress Conditions. **Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, 8, 1059-1067.
- Li, Y. Z., Zhao, J. Y., Wu, S. M., Fan, X. W., Luo, X. L., and Chen, B. S. (2016). Characters related to higher starch accumulation in cassava storage roots. **Scientific Reports**, 6, 19823.
- Liu, D., He, S., Zhai, H., Wang, L., Zhao, Y., Wang, B. ... Liu, Q. (2014). Overexpression of IbP5CR enhances salt tolerance in transgenic sweet potato. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, 117(1), 1–16.
- Nagaz, K. Masmoudi, M. M., and Ben, M.N. (2012). Impacts of irrigation regimes with saline water on carrot productivity and soil salinity. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 11, 19–27.
- Padan, E., and Schuldiner, S. (1996). Bacterial Na⁺ /H⁺ antiporters: molecular biology, biochemistry, and physiology. In W. N. Konings, H. R. Kaback, and J. S. Lolkema (Eds.), **Handbook of Biological Physics** (pp. 501-531). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science,.
- Raigond, P., Atkinson, F. S., Lal, M. K., Thakur, N., Singh, B., and Mishra, T. (2020). Potato Carbohydrates. In Raigond, P., Singh, B., Dutt, S., and Chakrabarti, S. (Eds.), **Potato** (pp. 13–36). Singapore: Springer.
- Roy, S. J., Negrao, S., and Teste, R M. (2014). Salt resistant crop plants. **Current Opinion in Biotechnology**, 26, 115–124.
- Sabagh, E. L., Sorour, S., Ragab, A., Saneoka, H., and Islam, M. (2017). The effect of exogenous application of proline and glycine betaine on the nodule activity of soybean under saline condition. **Journal of Agricultural Biotechnology**, 2, 1–5.
- Smolen, S., Lukasiewicz, A., Chodacka, M. K., and Baranski, R. (2020). Effect of Soil Salinity and Foliar Application of Jasmonic Acid on Mineral Balance of Carrot Plants Tolerant and Sensitive to Salt Stress. **Agronomy**, 10(5), 659.

- Sobahan, M. A., Akter, N., Ohno, M., Okuma, E., Hirai, Y., Mori, I. C. ... Murata, Y. (2012). Effects of exogenous proline and glycinebetaine on the salt tolerance of rice cultivars. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, 76, 1568–1570.
- Umar, J., Aliyu, A., Shehu, K., and Abubakar, L. (2018). Influence of Salt Stress on Proline and Glycine Betaine Accumulation in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Journal of Horticulture and Plant Research**, 1, 19-25.
- VishnuPriya, S., Elavarasan, R., and SelvanKumar, T. (2020). Studies on Radish salinity tolerance and their growth response analysis. **International Journal of Advanced Research in Biological Sciences**, 7(5), 30-39.
- Waditee, R., Hibino, T., Tanaka, Y., Nakamura, T., Incharoensakdi, A., and Takabe, T. (2001). Halotolerant cyanobacterium *Aphanothece halophytica* contains an Na⁺/H⁺ antiporter, homologous to eukaryotic ones, with novel ion specificity affected by c-terminal tail. **Journal of Biological Chemistry**, 276, 36931-36938.
- Waditee, R., Hibino, T., Nakamura, T., Incharoensakdi, A., and Takabe, T. (2002). Overexpression of a Na⁺/H⁺ antiporter confers salt tolerance on a freshwater cyanobacterium, making it capable of growth in sea water. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 99, 4109-4114.
- Waditee, R., Bhuiyan, M. N. H., Rai, V., Aoki, K., Tanaka, Y., Hibino, T. ... Takabe, T. (2005). Genes for direct methylation of glycine provide high levels of glycinebetaine and abiotic-stress tolerance in *Synechococcus* and *Arabidopsis*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 102, 1318-1323.
- Wu, G. Q., Liang, N., Feng, R. J., and Zhang, J. J. (2013). Evaluation of salinity tolerance in seedlings of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars using proline, soluble sugars and cation accumulation criteria. **Acta Physiologiae Plantarum**, 35, 2665-2674.