บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษากระแสไฟฟ้าไอออนในขนรากทานตะวัน (แปซิฟิก – 33) ด้วยระบบไวเบรติงโพรบ ใช้ขนรากที่มีอายุ 15 – 17 ชั่วโมง ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วง 500 – 800 ไมโครเมตร โดยวัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนราก รอบโซนของขนราก รอบบริเวณเซลล์เจริญเติบโตก่อนอาณาเขตขนราก โดยในงานวิจัยนี้วัดกระแสไฟฟ้าในสารละลาย APW pH 6.00 ซึ่งเป็นสภาวะปกติ หลังจากนั้นศึกษาผลของ pH ต่อกระแสไฟฟ้าในขนรากโดยการเปลี่ยน pH ของสารละลาย APW เป็น 4.00 และ 8.00 ตามลำดับ และสุดท้ายศึกษาผลของไอออนบางชนิดต่อกระแสไฟฟ้าในขนรากทานตะวัน โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ Ca^{2+} และ K^{+} ในขณะที่ความเข้มข้นของไอออนชนิดอื่นๆ คงที่ รวมทั้งศึกษาผลของสารละลายที่ไม่มี Cl^{-} โดยใช้วิธีการแทนที่ไอออน

จากการศึกษาใน APW pH 6.00 วัดกระแสไฟฟ้าไอออนที่ปลายขนรากได้ 70 ขนราก จาก 8 ราก มี 59 ขนรากที่กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนราก ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบๆ ราก มีเพียงรูปแบบเดียว คือ กระแสไฟฟ้าบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ในบางตำแหน่งมีทิศเข้าและบางตำแหน่งมีทิศออก ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบโซนขนรากมีทิศออกจากโซนของขนราก ซึ่งสอดคล้องกับในรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) ที่พบว่ากระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่ปลายขนรากและมีทิศออกจากโซนของขนราก

ในกรณีที่ pH ลดลงเป็น 4.00 วัดกระแสไฟฟ้ารอบๆ รากได้ 12 ราก สามารถแบ่งรูปแบบกระแสไฟฟ้าได้สองรูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่รากบริเวณเซลลเจริญเติบโตเต็มที่และอาณาเขตขนราก ตั้งแต่ระยะ 10.00 – 17.00 มิลลิเมตรจากโคนราก หลังจากระยะนี้กระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากโซนของขนราก ในรูปแบบนี้วัดกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากได้ 20 ขนราก กระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่มีทิศออกจากปลายขนราก (12 ขนราก) และรูปแบบที่ 2 กระแสไฟฟ้าบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ในบางตำแหน่งมีทิศเข้าบางตำแหน่งมีทิศออกจากราก และกระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าบริเวณรอยต่ออาณาเขตขนรากกับอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ ในตำแหน่งที่เหลือของโซนของขนรากบางตำแหน่งมีทิศเข้าบางตำแหน่งมีทิศออกจากโซนขนราก ในรูปแบบนี้กระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากส่วนใหญ่มีทิศเข้า (23 จาก 30 ขนราก)

ในกรณีที่ pH ของ APW เพิ่มเป็น 8.00 วัดกระแสไฟฟ้าได้ 30 ขนราก จาก 9 ราก โดยกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากมีทิศออกจากปลายขนรากเป็นส่วนใหญ่ (21 ขนราก) ส่วนกระแสไฟฟ้ารอบๆ รากมีสองรูปแบบ ด้วยกัน คือรูปแบบที่ 1 (4 ราก จาก 9 ราก) กระแสไฟฟ้าบางตำแหน่งมีทิศเข้าบางตำแหน่งมีทิศออกและกระแสไฟฟ้ามีทิศออกจากโซนของขนราก ส่วนรูปแบบที่ 2 กระแสไฟฟ้าบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่เหมือนกับรูปแบบที่ 1 แต่กระแสไฟฟ้าส่วนต้นโซนของขนรากมีทิศออกจากราก (12.50 – 14.00 มิลลิเมตรจากโคนราก) ตำแหน่งถัดจากนี้กระแสไฟฟ้ามีทิศเข้าสู่โซนของขนราก

เมื่อนำขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันของแต่ละรากใน APW ที่ pH 4.00 6.00 และ 8.00 มาเปรียบเทียบกัน พบว่าระหว่าง pH 4.00 กับ 8.00 กระแสไฟฟ้ารอบๆ รากมีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.10$) ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลง สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากให้ผลเช่นเดียวกับในราก คือ เมื่อ pH เพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลงเช่นกัน ดังนั้น H^+ น่าจะเป็นไอออนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดกระแสไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อ pH เพิ่มขึ้น ปริมาณ H^+ ลดลงทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าลดลง ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับ Weisenseel และคณะ (1979) ที่พบว่า H^+ มีส่วนสำคัญในการเกิดกระแสไฟฟ้าในรากข้าวบาร์เลย์

ในการศึกษาผลของ pH ต่อการเจริญเติบโตของขนราก โดยการวัดอัตรายืดพบว่า ที่ pH 6.00 มีอัตรายืดสูงสุด ในขณะที่เมื่อ pH ลดลงเป็น 4.00 อัตรายืดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Bibikova และคณะ (1998) พบว่าที่ pH 4.00 มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของขนราก *Arabidropsis thailiana* และเมื่อ pH เพิ่มขึ้นอัตรายืดลดลงเช่นกันอาจเป็นผลที่ pH 8.00 เป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของรากทานตะวัน

สำหรับผลของไอออนชนิดต่างๆ ต่อกระแสไฟฟ้าไอออนพบว่า กระแสไฟฟ้ารอบๆ รากกระไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งในบริเวณเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่และอาณาเขตขนราก สำหรับกระแสไฟฟ้าที่มีทิศเข้าสู่ปลายของขนราก พบว่า ขนาดเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้าในสารละลายที่มี Ca^{2+} เพิ่มขึ้น เพิ่มเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ APW ซึ่งให้ผลคล้ายกับในขนรากข้าวบาร์เลย์ (Weisenseel *et al.*, 1979) และคาดว่า Ca^{2+} น่าจะมีการเคลื่อนที่เข้าสู่ปลายของขนราก ซึ่งตรงกับการศึกษาของ Wymer และคณะ (1997) ที่พบว่า Ca^{2+} เคลื่อนที่เข้าสู่ปลายขนราก *Arabidropsis* ส่วนในกรณีที่ความเข้มข้นของ K^+ เพิ่มมากขึ้นขนาดของกระแสไฟฟ้ามีขนาดน้อยกว่า APW จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าในสารละลายที่มี Ca^{2+} และ K^+ สูงขึ้น กระแสไฟฟ้าควรมีขนาดมากกว่า APW ปกติ แต่กลับพบว่ากระแส

ไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างหรือลดลง ทั้งนี้เป็นข้อจำกัดของระบบไวเบรติง โพรบที่วัดกระแสไฟฟ้าสุทธิจากไอออนหลายชนิดผลที่ได้จึงไม่เด่นชัดเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น เช่น เทคนิคการเรืองแสงฟลูโอเรสเซนต์ (Wymer *et al.*, 1997) หรือ ไอออนซีเล็กทีฟอิเล็กโทรด (ion selective electrode) (Jone *et al.*, 1995) ในกรณีที่ในสารละลายที่ไม่มี Cl^- กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีขนาดน้อยกว่า APW เป็นผลมาจาก Cl^- มีผลอาจทำให้การเคลื่อนที่เข้าของ H^+ ลดลง เนื่องจาก H^+ ต้องอาศัย Cl^- ในการเคลื่อนที่เข้าสู่เซลล์ โดยผ่าน $2H^+/Cl^-$ ซิมพอร์ตเตอร์ (Buschmann *et al.*, 1996) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของกระแสไฟฟ้าในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงไอออนต่างๆ เหล่านี้ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตรายืด

นอกจากนี้ยังศึกษาผลของสารพิษ คืออลูมิเนียม (Al^{3+}) ที่มีต่อกระแสไฟฟ้าในขนราก ทานตะวัน โดยเติมอลูมิเนียมความเข้มข้น 0.10 มิลลิโมลาร์ ใน APW pH 4.00 พบว่า เมื่อมีอลูมิเนียม ขนาดของกระแสไฟฟ้ามีขนาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.10$) ทั้งในอาณาเขตเซลล์เจริญเติบโตเต็มที่ และอาณาเขตขนราก ส่วนขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ปลายขนรากและอัตรายืดของขนรากมีขนาดลดลงเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจาก Al^{3+} มีผลยับยั้งการเคลื่อนที่ของไอออนบวกเข้าสู่เซลล์ เช่น Ca^{2+} K^+ เป็นต้น (Gassmann and Schroeder, 1994; Liu and Luan, 2001; Rout *et al.*, 2001) นอกจากนี้ pH ที่ใช้ (4.00) มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของขนรากเช่นกัน (Bibikova *et al.*, 1998) จึงทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าและอัตรายืดลดลง

การศึกษาในงานวิจัยที่ได้กล่าวมานี้เป็นการวัดกระแสไฟฟ้าสุทธิที่ได้จากผลรวมของไอออนชนิดต่างๆ หากมีการศึกษาต่อไปน่าจะใช้ระบบไอออนซีเล็กทีฟอิเล็กโทรด (Meyer and Weisenseel, 1997) ที่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าไอออนแต่ละชนิด และเมื่อนำผลดังกล่าวร่วมกับวิธีที่เพิ่มความเข้มข้นและการแทนที่ของไอออน จะทำให้ทราบข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าไอออนในรากพืชดีขึ้น