

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและแนวคิดต่างๆ

2.1.1 ธาตุฟอสฟอรัส (Phosphorus)

2.1.1.1 สารประกอบฟอสฟอรัสในดิน

ธาตุฟอสฟอรัสในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ จะต้องอยู่ในรูปของอนุโมลของสารประกอบที่เรียกว่า ฟอสเฟตไอออน ($H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-}) ซึ่งจะต้องละลายอยู่ในน้ำในดิน สารประกอบของฟอสฟอรัสในดินมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่ละลายน้ำยาก ดังนั้นจึงมักพบปัญหาเสมอว่า แม้จะมีฟอสฟอรัสในดินมาก แต่พืชยังขาดฟอสฟอรัส เพราะส่วนใหญ่ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ละลายน้ำยาก นอกจากนั้นแร่ธาตุต่างๆ ในดินมักจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับอนุโมลฟอสเฟตที่ละลายน้ำ (Soluble phosphate) ได้ ดังนั้นเมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ลงไปในดินประมาณ 80 – 90% ของปริมาณฟอสเฟต จะทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุในดินกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก ซึ่งไม่อาจเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ดังนั้นการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตจึงไม่ควรคลุกเคล้าให้เข้ากับดินเพราะจะทำให้ฟอสเฟตเกิดปฏิกิริยากับธาตุต่างๆ ในดินได้เร็วยิ่งขึ้น แต่ควรจะใช้แบบเป็นจุดหรือโรยเป็นแถบให้ลึกลงไปในดินบริเวณรากของพืช ซึ่งแม้ปุ๋ยฟอสเฟตอยู่ใกล้ชิดกับรากแต่จะไม่เป็นอันตรายแก่รากอย่างใด นอกจากนี้ปุ๋ยคอกจะช่วยป้องกันไม่ให้ปุ๋ยฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุในดินและสูญเสียความเป็นประโยชน์ต่อพืชเร็วจนเกินไป พืชเมื่อขาดฟอสฟอรัสจะมีต้นแคระแกร็น ใบมีสีเขียวคล้ำ ใบล่างๆ จะมีสีม่วงตามบริเวณขอบใบ รากของพืชชะงักการเจริญเติบโต พืชไม่ออกดอกและผล พืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอจะมีระบบรากที่แข็งแรงแพร่กระจายอยู่ในดินอย่างกว้างขวาง สามารถดึงคุณ้ำและธาตุอาหารได้ดี การออกดอกออกผลจะเร็วขึ้น (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2554)

ในดินมีฟอสฟอรัสต่ำมากเมื่อเทียบกับปริมาณของไนโตรเจนและโพแทสเซียม โดยเฉลี่ยแล้วในดินมีฟอสฟอรัสทั้งหมดเพียง 0.06% ในขณะที่ค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนเป็น 0.14% และของโพแทสเซียมเป็น 0.83% ปริมาณของฟอสฟอรัสในดินในแต่ละจุดบนพื้นที่หรือตามแนวความลึก (หรือหน้าตัดดิน) แตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุต้นกำเนิดดิน ความมากน้อยของการชะล้าง และการใช้ที่ดิน ถ้าดินนั้นกำเนิดมาจากวัตถุต้นกำเนิดชนิดเดียวกันพวกดินเนื้อละเอียดมักมีฟอสฟอรัส

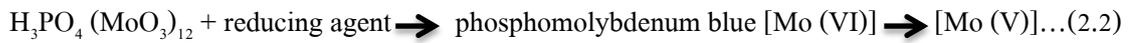
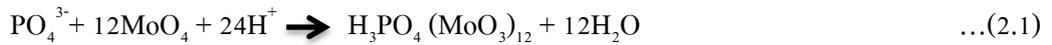
มากกว่า ดินเนื้อหยาบดินที่ถูกใช้มานานหรือถูกชะล้างมากกว่าจะเหลือฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่าดินที่เปิดป่าใหม่ปริมาณของฟอสฟอรัสในดินบนมักน้อยกว่าดินชั้นล่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นที่มีการชะล้างมากๆ ส่วนดินชั้นที่มีการสะสมของสารที่ถูกชะล้างมาก มักมีฟอสฟอรัสมากกว่า ทุกชั้นของดินในหน้าตัดดิน (ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541)

ฟอสฟอรัสในดินเกือบทั้งหมด ปรากฏอยู่ในรูปของพวกออร์โทฟอสเฟตหรือพวกที่แปลงมาจากกรดออร์โทฟอสฟอริก (H_3PO_4) เกือบทั้งสิ้น ฟอสเฟตในดินแบ่งออกได้เป็นสองพวกใหญ่ๆ คือ อินทรีย์ฟอสเฟตกับอนินทรีย์ฟอสเฟต ในดินโดยทั่วๆ ไปมีฟอสเฟตทั้งสองส่วนนี้ต่างกันพวกอินทรีย์ฟอสเฟตมีแนวโน้มที่มากหรือน้อยตามปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน ดังนั้นในดินชั้นล่างจึงมีอินทรีย์ฟอสเฟตน้อยและมีมากในดินชั้นบน จากผลการวิเคราะห์ดินทั่วๆ ไปพบว่าดินบนมีอินทรีย์ฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 0.3 – 95% ของฟอสเฟตทั้งหมดในดิน แต่ในดินที่ใช้ในการเกษตรกรรมทั่วๆ ไปมีอนินทรีย์ฟอสเฟตมากกว่า 90% ของฟอสเฟตในดิน (ดินลึก 1 เมตร) (ยงยุทธ โอสดสภาและคณะ, 2541)

ในปัจจุบันนี้ยังไม่ทราบแน่ชัดว่าพืชดูดฟอสฟอรัสในรูปใด โดยทั่วไปเข้าใจว่าพืชดูดกินฟอสฟอรัสในรูปของไอออนฟอสเฟต ซึ่งส่วนใหญ่ควรจะเป็น Monobasic ($H_2PO_4^-$) และ Dibasic orthophosphate (HPO_4^{2-}) ส่วน Tribasic orthophosphate (PO_4^{3-}) พืชอาจดูดกินได้แต่ไม่มีโอกาสเพราะมักมีอยู่น้อยมากในสารละลายเมื่อเทียบกับพวก Mono และ Dibasic orthophosphate แม้จะมีผู้ทดลองในสารละลายธาตุอาหารพบว่าพืชสามารถจะดูดกินฟอสฟอรัสในรูปของอินทรีย์ฟอสเฟตในรูปของ Phytin ได้โดยไม่ต้อง Mineralized เสียก่อนก็ตามแต่ในสภาพดินตามธรรมชาติเป็นไปได้ในปริมาณที่น้อยมาก (ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ, 2541)

2.1.1.2 ปฏิกริยาโมลิบดีนัมบลู (Molybdenum blue)

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสโดยปฏิกริยาโมลิบดีนัมบลูเป็นการเกิดปฏิกริยาของออร์โทฟอสเฟตกับโมลิบดีตไอออน ในสถานะที่เป็นกรด ได้สารประกอบเชิงซ้อนฟอสโฟโมลิบดีต จากนั้นจะรีดิวซ์สารประกอบนี้ด้วยสารตัวรีดิวซ์ เช่น กรดแอสคอร์บิก ทำให้เกิดสีน้ำเงินในชั้นสุดท้าย ซึ่งวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 630 นาโนเมตร ดังแสดงในสมการ 2.1-2.2 (เสาวภา ชุมณี, 2553)



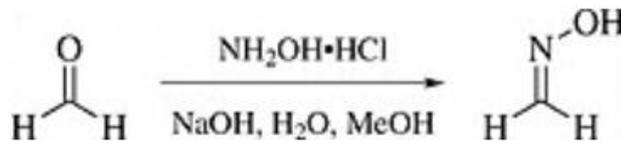
2.1.2 ธาตุแมงกานีส (Manganese)

2.1.2.1 ประโยชน์ของแมงกานีสต่อพืช

แมงกานีส มีความสำคัญต่อพืชคล้ายๆ กับธาตุเหล็ก เนื่องจากแมงกานีสช่วยในการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด เช่น ออกซิเดส เปอร์ออกซิเดส ดีไฮโดรจีเนส และดีคาร์บอกซิเดส ช่วยในขบวนการออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction) ในขบวนการสังเคราะห์แสง และช่วยสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ แมงกานีสจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรพลาสต์แร่ที่มีธาตุแมงกานีสเป็นองค์ประกอบได้แก่ ไพโรลูไซต์ (MnO_2) โรโดโครไซต์ (MnCO_3) และโรโดไนต์ (MnSiO_3) เมื่อแร่ผุพังสลายตัวก็จะปลดปล่อยแมงกานีสออกมาเป็นรูปแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะอยู่ในรูปแมงกานีส(II) ไอออน (Mn^{2+}) ในสารละลายดินจะมีแมงกานีสที่สำคัญอยู่ในรูปแมงกานีส(II)ไอออน และ แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide) ซึ่งแมงกานีส(II)ไอออน (Mn^{2+}) แมงกานีส(III)ไอออน (Mn^{3+}) และแมงกานีส(IV)ไอออน (Mn^{4+}) สามารถแลกเปลี่ยนกันได้ แมงกานีสในดินมีปริมาณเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชขึ้นอยู่กับดินอยู่ในสภาพที่มีความชื้นมากพอ หรืออยู่ในสภาพรีดักชันความเป็นกรดของดิน ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดินถ้าดินเป็นดินเหนียวเป็นกรดจัดอยู่ในสภาพน้ำขัง แมงกานีสไอออนจะละลายออกมามากทำให้เป็นพิษต่อพืช พืชจะแสดงอาการขอบใบแก่จะเริ่มมีสีเหลืองบริเวณใบ การกระจายของคลอโรฟิลล์ไม่สม่ำเสมอ แต่ถ้าดินมีค่าพีเอชสูง และมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากก็จะส่งเสริมให้พืชขาดธาตุแมงกานีส อาการที่ขาดธาตุแมงกานีสพบที่ใบอ่อนก่อน ใบจะมีสีเหลือง บนใบอาจจะมีจุดด่างสีน้ำตาล - ดำ ลำต้นแคระ ในพวงข้าวพืชจะมีใบลักษณะเป็นจุดสีเทา ในอ้อยใบขีดโปร่งแสง วิธีแก้ไขเมื่อพืชขาดธาตุแมงกานีสโดยใช้ แมงกานีสซัลเฟต (MnSO_4) หรือ แมงกานีสคีเลต (Mn - Chelates) ใส่ลงไปในดิน หรือละลายน้ำแล้วฉีดลงไปในต้นพืช (บุญแสน เตียนบุญธรรม, 2005)

2.1.2.2 ปฏิกิริยาฟอร์มัลดีออกซิม (Formaldoxime reaction)

การวิเคราะห์แมงกานีสโดยปฏิกิริยาฟอร์มัลดีออกซิมเป็นการเกิดปฏิกิริยาของแมงกานีส (II) ไอออน กับรีเอเจนต์ฟอร์มัลดีออกซิม (เตรียมได้จากผสมไฮดรอกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Hydroxylammonium Chloride ; $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) และฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde ; HCHO)) ในสถานะที่เป็นเบสได้สารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำตาลแดง ซึ่งถูกอธิบายครั้งแรกโดย Hofmann และ Ehrhardt ในปี ค.ศ.1913 ต่อมาในปี ค.ศ.1964 MARCZENKO ได้ให้สูตร $\text{Mn}(\text{CH}=\text{NOH})_6$ ดังนั้นแมงกานีส(II) ไอออนจึงได้อยู่รูป Quadri-valent hexa-coordinated ที่ล้อมรอบด้วย $\text{CH}=\text{NOH}$ 6 monodentate ดังสมการ และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max} 460 nm (E. Merck Darmstadt)



...(2.3)

2.1.3 ธาตุแคลเซียม (Calcium)

2.1.3.1 ประโยชน์ของแคลเซียมต่อพืช

เป็นธาตุที่ต้นพืชนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตในต้นพืช ช่วยส่งเสริมการนำธาตุไนโตรเจนจากดินมาใช้ให้เป็นประโยชน์มากขึ้น ในระยะออกดอกและระยะที่สร้างเมล็ดพืชจะมีความจำเป็นมาก เพราะธาตุแคลเซียมจะมีส่วนในการเคลื่อนย้ายและเก็บรักษาคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในพืช เพื่อนำไปใช้ในการสร้างผลและเมล็ดต่อไป (วาสนา ยอดปรานค์, 2553)

แคลเซียมเป็นธาตุอาหารรองธาตุหนึ่งซึ่งพืชต้องการปริมาณมาก แต่น้อยกว่าธาตุหลักปกติมีอยู่ในดินค่อนข้างมากเพียงพอกับความต้องการของพืชทั่วไป แคลเซียมมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชคือ เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ จำเป็นต่อการแบ่งเซลล์ ช่วยให้ผนังเซลล์แข็งแรง รักษาโครงสร้างของโครโมโซมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญและกระตุ้นการทำงานของเอ็นไซม์หลายชนิด ทำหน้าที่ลดพิษของกรดอินทรีย์ในพืช ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก การผสมเกสร และการงอกของเมล็ด (ชูจิตต์ สงวนทรัพย์ากร, 2552)

แคลเซียมในดินมีปริมาณแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ดินที่มีปูนอยู่มาก (calcareous soil) จะมีปริมาณแคลเซียมมากกว่าดินชนิดอื่น ส่วนใหญ่จะมีมากกว่า 2.5% แต่สำหรับดินทั่วไปแล้วจะมีประมาณ 0.5-2.0% สำหรับดินทรายจะมีปริมาณแคลเซียมน้อยมากคือ <0.1% แคลเซียมในดินมีอยู่หลายรูปด้วยกัน รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช คือ รูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Ca^{2+}) และรูปที่ละลายได้ (Soluble Ca^{2+}) ซึ่งแคลเซียมในดินรูปต่างๆ จะอยู่ในสภาพสมดุลแลกเปลี่ยนไปมาได้

ตาราง 2.1 ระดับปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน

ระดับ	ปริมาณแคลเซียมในดิน (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)
ต่ำมาก	< 400
ปานกลาง	1000-2000
สูงมาก	> 4000
ต่ำมาก	< 400
ปานกลาง	1000-2000
สูงมาก	> 4000

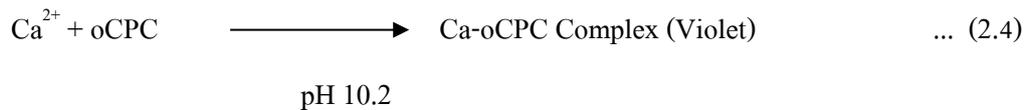
ที่มา : ชูจิตต์ สงวนทรัพย์ากร, 2552

เมื่อพืชเกิดอาการขาดแคลเซียมจะแสดงออกที่ส่วนยอดของต้นหรือกิ่ง ลักษณะอาการขาดแคลเซียมในพืชทั่วไปคือ ใบอ่อนที่แตกออกมาใหม่จะหดสั้นและเหี่ยว ใบอ่อนมีสีเขียวแต่ปลายใบเหลือง เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและตายในที่สุด ในระยะพืชออกดอก ติดผล ตาดอกและกลีบดอกจะไม่พัฒนา ดอกและผลจะร่วง พืชหลายชนิดที่ขาดธาตุแคลเซียม อาจมีลักษณะเป็นพิเศษเฉพาะพืช เช่น มะเขือเทศ แดงโม พริก แดงกวา จะเกิดการเน่าที่ส่วนล่างของผล ผักขึ้นง่ายแสดงอาการไส้ดำ พืชลงหัวต่างๆ เช่น ผักกาด หัวหอม กระเทียม แสดงอาการไม่ลงหัวหรือลงหัวแต่หัวจะไม่สมบูรณ์ (วาสนา ยอดปรานค์, 2553)

2.1.3.2 วิธีโอ-ครีซอล์ฟทาลีน คอมเพลกซัน (o-Cresolphthalein Complexone, oCPC)

การวิเคราะห์แคลเซียมโดยวิธี oCPC เป็นการเกิดปฏิกิริยาของแคลเซียมไอออนกับ oCPC ในสารละลายที่เป็นเบส จะได้สารประกอบเชิงซ้อนสีม่วง ซึ่งวัดการดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาว

คลื่น 574 นาโนเมตร ปฏิกริยาการวิเคราะห์จะถูกรบกวนได้จากแมกนีเซียมและเหล็ก สามารถลดการรบกวนได้โดยการเติม 8-Hydroxyquinoline และ Triethanolamine (TEA) ลงไป ดังแสดงในสมการ (2.4) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคลเซียมในตัวอย่าง (Brett P., *et al.*, 1997)



2.1.4 ธาตุเหล็ก (Iron)

2.1.4.1 ธาตุเหล็กในดิน

เหล็กเป็นธาตุที่มีความสำคัญในการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเหล็กมีบทบาทสำคัญในขบวนการสังเคราะห์ คลอโรฟิลล์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ เช่น คอะเตเลสเพอร์ออกซิเดส (Catalase peroxidase) และมีความสำคัญต่อขบวนการเปลี่ยนแปลง RNA ของคลอโรพลาสต์ (Chloroplasts) โดยที่เหล็กในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของแร่ชนิดต่างๆ เมื่อแร่เหล็กชนิดต่างๆ ผุพังสลายโดยขบวนการต่างๆ ธาตุเหล็กจะถูกปลดปล่อย ซึ่งจะมีปริมาณที่ต่ำกว่าเหล็กในดินที่อยู่ในรูปของอนินทรีย์ที่ละลายได้ เช่น เฟอร์ริก (Fe^{3+}) และ เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

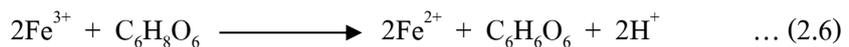
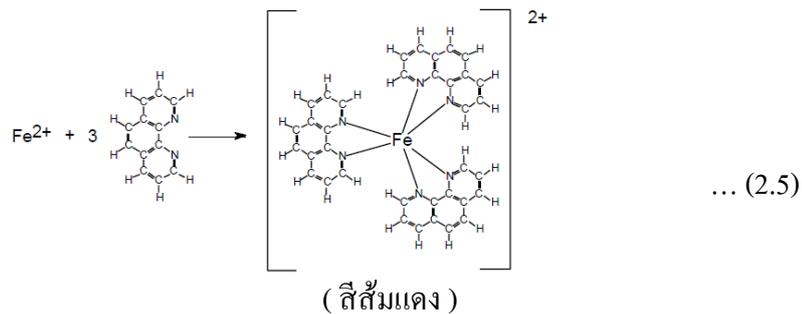
$[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ พืชสามารถนำเหล็กไปใช้ประโยชน์ได้จะอยู่ในรูปเฟอร์รัส (Fe^{2+})

ธาตุเหล็กจะพบมากในดินโดยทั่วไปแต่จะเป็นธาตุเหล็กที่ไม่ได้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ปัญหาการขาดธาตุเหล็กของพืชไม่เกี่ยวกับปริมาณของธาตุเหล็กในดินแต่เกิดจากการไม่ละลาย ดินที่มีความเป็นกรดและด่างมากจะพบธาตุเหล็กในรูปที่ไม่เกิดประโยชน์ต่อพืช ส่วนในดินที่มีน้ำขังจะพบธาตุเหล็กในรูปที่มีประโยชน์ต่อพืชมากขึ้น ธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบของโปรตีนในพืช ช่วยกระตุ้นให้การหายใจและการปรุงอาหารของพืชให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ และช่วยเสริมสร้างคลอโรฟิลล์ในใบพืช (แต่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์) โดยพืชที่ขาดธาตุเหล็ก จะแสดงอาการใบพืชมีสีซีดจาง ธาตุเหล็กที่พืชจะนำไปใช้ได้ต้องมีค่า pH ของดินหรือน้ำอยู่ระหว่าง 5.5 - 5.6 แต่ถ้าค่า pH ต่ำกว่านี้จะทำให้ปริมาณของธาตุเหล็กมีมากเกินไปจนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ธาตุเหล็กจะไปตรึงธาตุฟอสฟอรัสไว้จนพืชไม่สามารถนำไปใช้ได้การแก้ไขด้วยการฉีดพ่นธาตุอาหารเสริมทางใบ

2.1.4.2 วิธี 1,10-ฟีแนนโทรอลีน (1,10-Phenanthroline method)

การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กด้วยเทคนิค UV-VIS spectrophotometry นั้นไม่สามารถทำการตรวจวัดได้โดยตรงเนื่องจาก สารละลายเหล็กไม่ดูดกลืนแสงในช่วง UV-VIS หรือ ดูดกลืนแสงน้อยมาก แต่สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยวิธี 1,10-ฟีแนนโทรอลีน โดยให้เหล็กที่อยู่ในรูป Fe^{2+} ทำปฏิกิริยากับ 1,10-ฟีแนนโทรอลีน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรสูง สามารถคงสภาพอยู่ได้เป็นระยะเวลานาน และมีสีส้มแดง ดังสมการ (2.5) ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 510 nm ค่าคงที่ของสมมูล เท่ากับ 2.5×10^6 ที่ $25^\circ C$ ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดได้ดีในช่วง pH 3-9 แต่ควรจะใช้ค่า pH ในช่วง 3.5-4.5 เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนของเกลือของเหล็ก ส่วนใหญ่นิยมใช้บัฟเฟอร์ เป็นตัวควบคุม pH การเติมสาร Reducing agent เช่น Hydroxylamine และ Ascorbic acid จะช่วยในการทำปฏิกิริยาของเหล็กในรูป Fe^{3+} และยังช่วยให้สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้มีความเสถียรยิ่งขึ้นดังแสดงในสมการ (2.6) - (2.7)

D. C. Harris, 2003



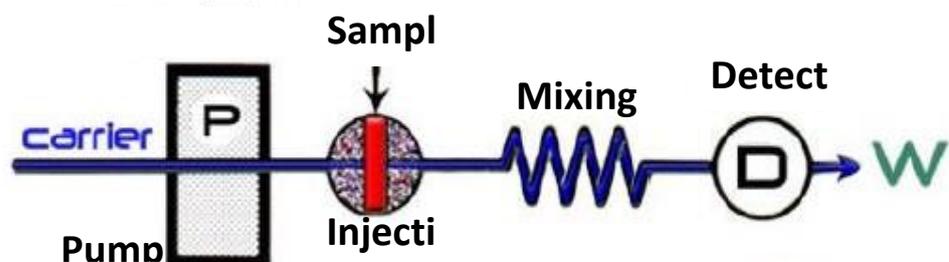
2.1.5 หลักการ ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี (UV-Vis Spectrophotometry)

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190-800 นาโนเมตร ของสารเคมีนั้น ส่วนใหญ่ได้แก่สารอินทรีย์หรือสารประกอบเชิงซ้อนหรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้วิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความเที่ยงและความแม่นยำ และมีสภาพไวสูง โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ แต่ในกรณีที่จะนำไปพิสูจน์ว่าสารตัวนั้นเป็นสารอะไร มีโครงสร้างอย่างไร อาจจะต้องใช้เทคนิคอย่างอื่นเข้าช่วยด้วย เพื่อให้เกิดความ

แนใจ เช่น ใช้เทคนิคทาง IR หรือ NMR Spectroscopy โดยทั่วไป เทคนิคการวิเคราะห์นี้บางครั้งนิยมเรียกว่า ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรีถ้าสารที่ทำการวิเคราะห์มีสีหรือทำให้เกิดสีขึ้น สารที่มีสีนั้นจะดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล อาจเรียกว่า คัลเลอร์ิเมตรี (Colorimetry) เมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกันผ่านเข้าไปในวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุออกไป ดังรูปที่ 1 ถ้าให้แสงทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่นปริซึมหรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่หายไปนี้เรียกว่า Absorption spectrum พลังที่ดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น (พรลดา ศรีประพัต, 2552)

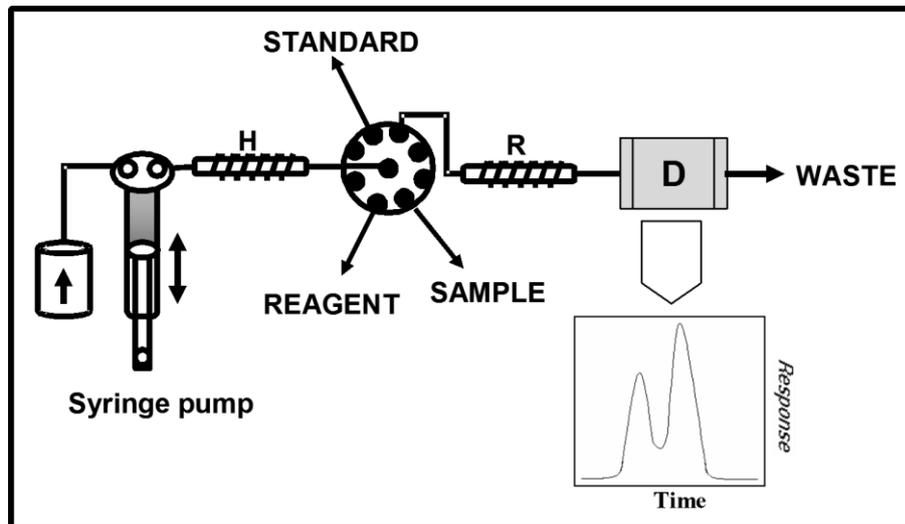
2.1.6 ระบบโพลินเจกชันอนาลิซิสและซีควเอนเชียลโพลินเจกชันอนาลิซิส (Flow Injection Analysis; FIA and Sequential Injection Analysis; SIA)

การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิคโพลินเจกชันอนาลิซิส (Flow Injection Analysis; FIA) ได้ถูกเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1975 โดย Ruzicka และ Hansen โดยอาศัยหลักการพื้นฐานคือ การฉีดสารปริมาณน้อยเข้าไปทางวาล์วฉีดสาร (Injection valve) ของระบบ เข้าสู่กระแสตัวพาที่เป็นสารเคมีซึ่งอาจเป็นรีเอเจนต์ (Reagent) หรือตัวทำละลายที่ไหลอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสมและคงที่ภายในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กโดยปราศจากอากาศคั้น การไหลของสารตัวพาถูกควบคุมโดยใช้ปั๊มเพอร์ริสตาลติก (Peristaltic pump) หรือใช้วิธีการกักน้ำที่อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก สารตัวอย่างจะผสมกับกระแสตัวพาและเกิดปฏิกิริยาที่ส่วนขดท่อ (Mixing coil) จากนั้น ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะไหลต่อไปสู่โพลทรูเซล (Flow through cell) ของเครื่องตรวจวัด (Detector) เพื่อวัดสัญญาณของผลิตภัณฑ์เช่น ค่าการดูดกลืนแสง ค่าศักย์ไฟฟ้า เป็นต้นดังแสดงตัวอย่างระบบทั่วไปของ FIA ในรูปที่ 2.1



รูป 2.1 ระบบวิเคราะห์ทั่วไปของ FIA

ต่อมาในปี ค.ศ. 1990 ได้มีการพัฒนาระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคซีเควนเชียลอินเจกชันอานาลิซิส(Sequential Injection Analysis; SIA) ขึ้น ดังรูปที่ 2.2 โดยอาศัยพื้นฐานมาจากเทคนิค FIA แต่เป็นการแก้ไขข้อด้อยบางประการของ FIA เช่น ในกรณีที่ต้องใช้สารหลายตัวในการเกิดปฏิกิริยากัน ระบบ FIA อาจต้องใช้ปั๊มที่มีช่องจำนวนหลายช่องเพื่อให้พอดีกับจำนวนสารเคมีที่ต้องใช้ ซึ่งทำให้อุปกรณ์มีราคาและความยุ่งยากเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระบบ SIA กลับใช้ปั๊มแบบช่องเดียวสำหรับการดูด-ผลักดันได้หลายตัว นอกจากนี้ ระบบนี้ยังมีความเป็นอัตโนมัติที่สูงขึ้น เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ทุกส่วนจะถูกควบคุมผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่ถึงกระนั้น การทำงานที่ช้ากว่าระบบ FIA และ ราคาที่สูงของอุปกรณ์หลายชิ้นใน SIA กลับเป็นข้อด้อยที่พบในเทคนิคนี้เช่นกัน

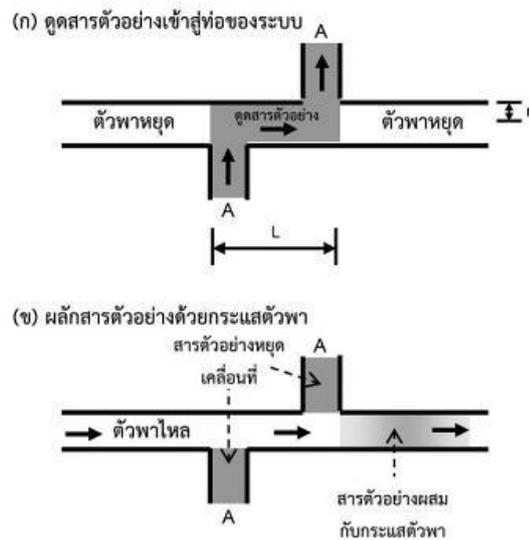


รูป 2.2 ระบบวิเคราะห์ทั่วไปของ SIA

2.1.7 การฉีดแบบไฮโดรไดนามิก (Hydrodynamic injection, HI)

การฉีดแบบไฮโดรไดนามิก มีหลักการฉีดสาร ซึ่งอธิบายดังรูป 2.3 คือ ขณะที่กระแสน้ำของตัวพลาสมาในท่อหยุดนิ่งลง จะเกิดความดันภายในท่อที่เรียกว่า ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) ขึ้นจึงทำให้สามารถฉีดสารตัวอย่างด้วยแรงดันไฮโดรไดนามิกแทรกผ่านเข้าทางท่อปลายเปิดที่แยกต่างหากอีกทาง (ตั้งตำแหน่ง A ในรูป 2.3) ซึ่งการที่ สารตัวอย่างสามารถไหลแทรกเข้าไปในท่อได้นี้ อาศัยความแตกต่างของความดันทั้งสองของ สารละลายสองชนิดภายในท่อ การฉีดสารกระทำโดยปราศจากอุปกรณ์สำหรับฉีดสาร สารตัวอย่างที่ฉีดจะถูกขังในท่อในช่วงที่

ทราบความยาวแน่นอน จึงทำให้ทราบปริมาตรที่แน่นอนของสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าไปได้ จากการคำนวณ ด้วยสูตรหาปริมาตรทรงกระบอกคือ $= \pi r^2 L$ (อรุณรัตน์ ชางเลง และคณะ, 2557)



รูป 2.3 หลักการฉีดสารแบบไฮโดรไดนามิก : (ก) สารตัวอย่างถูกฉีดผ่านเข้าสู่ท่อที่ทราบความยาว (L) และรัศมีภายในท่อ (r) ที่แน่นอนขณะที่กระแสตัวพาไหลด้วยแรงดันไฮโดรสแตติก และ (ข) สารตัวอย่างถูกผลักด้วยกระแสของตัวพาในขณะที่สารตัวอย่างที่ตำแหน่ง A จะหยุดนิ่งด้วยแรงดันไฮโดรสแตติก

ที่มา : อรุณรัตน์ ชางเลง และคณะ, 2557

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กมลทิพย์ เสรีนนท์ชัย และคณะ (2557) งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีวิเคราะห์โดยอาศัยระบบวิเคราะห์แบบไหลชนิดโฟลอินเจกชัน สำหรับการตรวจวัดความเค็มและฟอสเฟตในน้ำจืดและน้ำกร่อยอย่างรวดเร็วเพื่อควบคุมคุณภาพแหล่งน้ำ การวิเคราะห์เริ่มจากการตรวจวัด ความเค็มเป็นตัวบ่งชี้แรกโดยอาศัยปรากฏการณ์ซิลเลอเรนหรือการเกิดเลนส์จากการหักเหของแสงระหว่างรอยต่อของน้ำตัวอย่างที่มีค่าดัชนีหักเหต่างจากกระแสน้ำบริสุทธิ์ ทำให้ปรากฏสัญญาณค่าการดูดกลืนแสงจากเครื่องคลอโรมิเตอร์ที่แปรตรงกับ ปริมาณความเค็มในน้ำตัวอย่าง จากนั้นก่อนตัวอย่างเดิมจะถูกผสมกับกระแสรีเอเจนต์เกิดเป็นสารเชิงซ้อนฟอสเฟตสีน้ำเงินด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารเชิงซ้อนนี้ ณ สองความยาวคลื่น (690 และ

1000 นาโนเมตร) ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบไดโอดแอเรย์ โดยการนาสัญญาณค่าการดูดกลืนแสงที่ 1000 นาโนเมตร (เกิดจากผลของซิลเลอเรนที่มาจากความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหของความเต็มในตัวอย่างกับสารรีเอเจนท์) ไปหักลบออกจากค่าการดูดกลืนแสงที่ 690 นาโนเมตร (สารเชิงซ้อนฟอสเฟตสีน้ำเงิน) ระบบที่นำเสนอได้นำไปใช้ตรวจวัดปริมาณความเต็มและฟอสเฟตได้พร้อมกันโดยวัดจากตัวอย่างที่เก็บตามเส้นทางคลองธรรมชาติ จังหวัดสมุทรสาครและแม่น้ำเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร ในประเทศไทย จากการเทียบปริมาณวิเคราะห์กับวิธีมาตรฐานและพบว่าให้ผลสอดคล้องกันทางสถิติแบบ pair t-test ทำให้เห็นว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือ มีความไวในการวิเคราะห์สูง มีความเที่ยงดี (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์น้อยกว่า 1.3 %) และวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว (วิเคราะห์ได้ 2 ตัวอย่างต่อหนึ่งตัวอย่างภายในเวลา 4 นาที)

ศิริพงศ์ ผาแก้ว (2557) รีเอเจนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นในห้องปฏิบัติการ ได้นำมาศึกษาทำการละลายที่เหมาะสมพบว่า Sodium acetate buffer ที่ pH 4.8 มีประสิทธิภาพในการสกัดมากกว่าใช้น้ำและสารละลายกรด HCl ในการสกัด และได้ศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กกับรีเอเจนต์ที่ได้ผลดีที่สุดคือ pH 6 ความเหมาะสมดังกล่าว ได้นำรีเอเจนต์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้นำมาศึกษาความเสถียรพบว่ารีเอเจนต์ที่สกัดจากใบฝรั่งแห้งจะมีความเสถียรกว่าสารสกัดจากใบฝรั่งสดและนำมาพิจารณาความเที่ยงของการวัดจากค่าร้อยละการเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) จากการวัด 11 ครั้งโดยใช้สารละลายมาตรฐานเหล็ก 5,20 ppm ได้ค่า %RSD ของสารละลายมาตรฐานเหล็ก(Total) และ Fe(III) เท่ากับ 1.05%,0.27% และ 3.83%,1.05% ตามลำดับ โดยมีสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน Fe(Total) คือ $y = 0.0167x + 0.0145$; $R^2 = 0.9986$ สำหรับสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน Fe(III) คือ $y = 0.0064x - 0.0149$; $R^2 = 0.9990$ และนำไปวิเคราะห์ปริมาณของสปีชีส์เหล็กในตัวอย่างค่าร้อยละการกลับคืนตัวอย่างน้ำเสียพบว่าได้ร้อยละการกลับคืนในช่วง 97.3-110.4% วิตามินอาหารเสริม 99.5-151.2%

อรุณรัตน์ ขางเลง และคณะ (2557) ได้พัฒนาระบบไฮโดร ไดนามิกโฟลอินเจกชัน (HFI) แบบง่าย โดยออกแบบให้เป็นระบบที่ประหยัดสารเคมีและใช้อุปกรณ์ที่หาง่ายและราคาถูกเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ระบบ HFI ยังสามารถประกอบเข้ากับตัวกรอง (ขนาด 0.45 μm) เพื่อใช้สำหรับกรองตัวอย่างน้ำแบบออนไลน์ได้ ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ได้นำไปสาธิตการใช้งานโดยการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กรวมในดินและในไทรท่อน้ำเสียด้วยปฏิกิริยา 1,10-Phenanthroline และ

Griess ตามลำดับ โดยการวิเคราะห์ตัวอย่างดังกล่าวได้ดำเนินการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ระบบ HFI สามารถวิเคราะห์ ตัวอย่างได้ประมาณ 12-14 ตัวอย่างต่อชั่วโมง ใช้ปริมาณสารเคมีรวมไม่เกิน 8.2 mL ต่อตัวอย่าง และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) เท่ากับ 0.54 % (n =11) และ 0.64 % (n =11) สำหรับการหาปริมาณเหล็กรวม และไนไตรท์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ ตัวอย่างจริงที่ได้ พบว่าให้ผลสอดคล้องกับวิธีมาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับ t-test ระดับความเชื่อมั่น 95 %

หัตยา พันแสง (2558) นำเสนอการใช้พอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลและพัฒนาระบบวิเคราะห์โฟลอินเจกชันอะนาไลซิสสำหรับตรวจหาปริมาณฟอสเฟต เตรียมพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุลโดยใช้ไบฟีนิลฟอสเฟต เป็นโมเลกุลต้นแบบ ตัวอย่างถูกทำให้เข้มข้นและจับฟอสเฟตบนตัวดูดซับพอลิเมอร์ลอกแบบโมเลกุล เมื่อตัวอย่างที่มีฟอสเฟตผสมอยู่ถูกนำส่งเข้าสู่ระบบโฟลอินเจกชันอะนาไลซิสและถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 890 นาโนเมตร รีเอเจนต์ของวิธีกรดแอสคอร์บิก ประกอบด้วย 2.0 โมล ต่อลิตรของกรดซัลฟูริก 0.01 โมลต่อลิตรของโพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เตรต 3% แอมโมเนียมโมลิบเดต และ 0.1 โมลต่อลิตรของกรดแอสคอร์บิก ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมทำให้ได้กราฟมาตรฐานที่มีความเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1 ถึง 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดและหาปริมาณได้เท่ากับ 0.09 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.29 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

Somnam, S. et. al. (2008) ได้พัฒนาระบบ Stopped-Flow injection สำหรับตรวจสอบฟอสเฟตด้วยวิธี Molybdenum blue ระบบถูกควบคุมโดยการวิเคราะห์แบบกึ่งอัตโนมัติด้วยปุ่มควบคุมที่พัฒนาขึ้นเองและในขณะที่ถูกหยุดที่ LED-colorimeter ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์ที่ความยาวคลื่น 630 nm ซึ่งพลอตกราฟมาตรฐานจากความเข้มข้นของฟอสเฟตและความชันของ FIA-gram ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของรีเอเจนต์ ได้แก่ โซเดียมโมลิบเดต, กรดแอสคอร์บิกและกรดไนตริก ผลที่ได้ ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 0.02 M, 0.25 %w/v และ 0.15 M ตามลำดับ กราฟมาตรฐานเป็นเส้นตรงในช่วง 0.3-6.0 mg P L-1 เป็นช่วงที่นำมาใช้สำหรับตรวจสอบฟอสเฟตในตัวอย่างดินและตัวอย่างปุ๋ย ผลการวิเคราะห์ได้ผลสอดคล้องกับวิธีมาตรฐาน

Somnam, S. et. al. (2014) ได้พัฒนาระบบ Hydrodynamic sequential injection สำหรับตรวจสอบฟอสเฟตและซิลิเกตในน้ำเสียและตัวอย่างน้ำในบ่อเลี้ยงปลาด้วยวิธี Molybdenum blue และวัดการดูดกลืนแสงที่ 710 nm ขั้นตอน Stopped-flow ถูกประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยา สองกราฟมาตรฐาน หนึ่งกราฟสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของฟอสเฟตและอีกหนึ่งกราฟสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของฟอสเฟตรวมกับซิลิเกต กราฟมาตรฐานเป็นเส้นตรงในช่วง 0.1 - 4.0 mg L⁻¹ และ 1.1 - 12.0 mg L⁻¹ ตามลำดับ และขีดจำกัดการตรวจวัดเป็น 80 µg P L⁻¹ และ 90 µg Si L⁻¹ มีความถี่ในการวิเคราะห์ 20 h⁻¹ สำหรับการตรวจวัดแบบติดต่อกันของทั้งสองตัวอย่าง ปริมาณของฟอสเฟตและซิลิเกตที่พบในตัวอย่างน้ำเสียโดยระบบที่สร้างขึ้นพบว่าให้ผลสอดคล้องกับวิธีมาตรฐาน

Somnam , S. et. al. (2008) ได้พัฒนาระบบไฮโครไดนามิกซีแควนเซียลอินเจกชันสเปกโทรโฟโตเมตรีสำหรับการวิเคราะห์หาแมงกานีส โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาของแมงกานีสกับฟอร์มาลดีไฮด์ในสารละลายเบส (pH 10) ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่สามารถตรวจสอบได้โดยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ด้วยระบบ HSI ทั้งตัวอย่างและรีเอเจนต์จะถูกนำเข้าสู่ระบบผ่าน โขลูนอยด์วาล์วที่เชื่อมต่อกันด้วยท่อ 3 ทางที่มีการกำหนดปริมาตรที่แน่นอน ซึ่งสารละลายจะถูกนำเข้าสู่ระบบโดยเรียงลำดับ เป็นโซนเหมือนกับระบบซีแควนเซียลอินเจกชันทั่วไป จากผลการทดลองพบว่า กราฟมาตรฐานเส้นตรงอยู่ในช่วง 0.5-30.0 ppm ขีดจำกัดของการวิเคราะห์เท่ากับ 0.2 ppm ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ในการฉีด 11 ครั้งของแมงกานีสเข้มข้น 5 และ 20 ppm เป็น 5.6% และ 2.1% ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าระบบ HSI ที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบที่มีความเรียบง่าย และใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ มีความเป็นอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงาน และประหยัดสารเคมี (ใช้ปริมาณไฮดรอกซีลามีน์ ตัวอย่าง และสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 25 ไมโครลิตร และ 25 มิลลิลิตร บัฟเฟอร์เป็นสารละลายตัวพา ต่อ รอบการทำงาน)

Chapin , T. P. et. al. (1991) ได้พัฒนาโฟลอินเจกชันกับเคมีลูมิเนสเซนซ์ในการวิเคราะห์หาแมงกานีสในน้ำทะเล เกิดจากการออกซิเดชันของ 7,7,8,8-Tetracyanoquinodimethane ในสารละลายที่เป็นด่างสีอ่อนๆ แมงกานีสกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นสามารถกำหนดโดยการวัดอัตราการปล่อยโปรตอน ในคอลัมน์มีการบรรจุ 8-Hydroxyquinoline ที่ตรึงไว้บน

ของแข็งจะใช้ในกระบวนการผลิตระบบ FIA ไปจนถึงทำให้แมงกานีสมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ 6 นาทีต่อตัวอย่าง โดยมีขีดจำกัดของการวิเคราะห์ 0.1 nM สามารถจำกัดการวิเคราะห์สามารถลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนแมงกานีสลงในคอลัมน์ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของการวิเคราะห์น้ำทะเลที่มีแมงกานีส 1-10 nM ซึ่งโดยทั่วไปคิดเป็น 3% การวิเคราะห์น้ำทะเลจากทางตอนเหนือของแอตแลนติก และน้ำทะเลจากชายฝั่งแอตแลนติก ทั้งสองตัวอย่างมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และได้รับการยืนยันความแม่นยำของเทคนิคการวิเคราะห์ การวิเคราะห์บนเรือได้รับการเห็นด้วยและมีข้อมูลที่เชื่อถือได้ เป็นเทคนิคที่มีความหลากหลายที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางกับน้ำในธรรมชาติ และเน้นกระบวนการศึกษา

Yamane, T. et. al. (1996) ได้พัฒนาระบบโพลินเจกชันสองระบบสำหรับวิเคราะห์หาแมงกานีสในเกลือ ซึ่งใช้ปฏิกิริยาที่มีความไวสูงในการวิเคราะห์ ตามปกติแล้วการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับการออกซิเดชันของ 3,4-Dihydroxybenzoic acid โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกัน โดยที่ระบบ โพลินเจกชันแบบปกติจะต้องใช้ตัวอย่างปริมาณมากในการฉีด (ระบบ A) ระบบโพลินเจกชันแบบต่อเนื่องจะมีการเชื่อมต่อแบบออนไลน์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนโดยแยกคอลัมน์ในการวิเคราะห์ (ระบบ B) และมีผลอย่างมากในการกำจัดฟีกของแบลนค์(Blank) ดังนั้นจึงสามารถนิตสารละลายตัวอย่างที่ความเข้มข้นของเกลือสูงๆได้โดยตรง ขีดจำกัดของการวิเคราะห์เท่ากับ 0.04 ppm และ 0.01 ppm สำหรับระบบ A และ B ตามลำดับ ใช้สาร 5 กรัมในการเตรียมสารละลายตัวอย่าง 100 mL ระบบโพลินเจกชันที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แมงกานีสที่ 0.03-1.59 ppm ใน Solar salts (เกลือที่ทำโดยนำน้ำเกลือมาตากแสงอาทิตย์)

จรรยา จักรมณี (2552) ได้พัฒนาระบบการไหลแบบลดขนาดบางแบบ เช่น โพลินเจกชันซีควนเซียลอินเจกชัน และไมโครฟลูอิดิก เป็นต้น โดยสร้างอุปกรณ์ / เครื่องมือบางส่วนของระบบขึ้นเอง โดยมุ่งเน้นให้มีราคาถูกและใช้งานได้จริง เช่น ระบบนิตสาร เซนเนล หรือรีแอกเตอร์ เครื่องตรวจวัด และระบบบันทึกสัญญาณ เป็นต้น ได้ใช้เครื่องมืออุปกรณ์พื้นฐานเหล่านี้ในการพัฒนาวิธีวิเคราะห์โดยระบบการไหลบางแบบเพื่อการวิเคราะห์หาปริมาณไอออนบางชนิด เช่น ระบบไฮโดรไดนามิกซีควนเซียลอินเจกชัน สำหรับการหาปริมาณเหล็ก แมงกานีส ไนไตรต์ ไนเตรต ฟอสเฟต และซิลิเกต ระบบซีควนเซียลอินเจกชันสำหรับการหาโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี

และทองแดง โดยตรวจวัดด้วยเทคนิคแอนโอดิก-สตริปปีงโวลแทมเมตรี วิธีสตริปปีงโวลแทมเมตรี สำหรับการหาปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ถูกชะออกมาจากภาชนะเซรามิก สารหนูในตัวอย่างทางสิ่งแวดล้อม ระบบโพลีอินเจคชันสำหรับการหาปริมาณคลอไรด์ในวัสดุสำหรับคอนกรีต การหาโปรตีนในอาหาร การวิเคราะห์ฟอสเฟตในดิน เป็นต้น เครื่องมือและวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีความคุ้มค่าสามารถนำไปใช้งานได้จริงและเป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการพัฒนาทางเคมีวิเคราะห์ต่อไป รวมทั้งได้ประยุกต์ในการเรียนการสอนด้วย

Ari, I. and Johan, N. (1996) วิธีการวิเคราะห์แบบ SIA ได้พัฒนาขึ้นเพื่อหาปริมาณแคดเมียมใน White water ซึ่งมาจากกระบวนการผลิตกระดาษ โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาของแคดเมียมและ oCPC โดยสังเกตค่าสเปกโทรโฟโตเมตรี ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะถูกศึกษาเพื่อให้ได้ช่วงของกราฟมาตรฐานกว้างมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อยู่ระหว่าง $5-500 \text{ mgL}^{-1}$ ของแคดเมียม โดยใช้ปริมาณตัวอย่างในการวิเคราะห์เท่ากับ 30 ไมโครลิตร

Blasco Gomez, F. et. al. (1999) วิธีการทางสเปกโทรสโกปีด้วยระบบ FIA สำหรับการหาปริมาณแคดเมียมและแมกนีเซียมพร้อมกันในน้ำแร่ วิธีการนี้อาศัยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่วิเคราะห์กับ Arsenaza(III) ที่ pH 8.5 การคำนวณปริมาณของสารที่วิเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดในสารตัวอย่างนั้นทำโดยวิธี HPSAM สำหรับสารผสม 3 ชนิด และใช้วิธี PLS หลังจากได้คัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมผลของการหาปริมาณแคดเมียมจะถูกเปรียบเทียบกับทั้งสองวิธี จากการใช้วิธี HPSAM ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของแคดเมียมในสารตัวอย่างมีผลต่อการเกิดของปฏิกิริยาของแมกนีเซียมและ arsenaza (III) นอกจากนี้วิธี HPSAM ยังช่วยในการหาความเข้มข้นของแมกนีเซียมในสารตัวอย่างได้อีกด้วย

Staden, J.F. and Taljaard, R.E. (1996) ระบบการวิเคราะห์แบบ SIA สำหรับการหาปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างน้ำ ยูรีน และยา ซึ่งอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนอย่างรวดเร็วระหว่าง oCPC และแคดเมียมโดยใช้การตรวจวัดทางสเปกโทรโฟโตเมตรี ได้ศึกษาลำดับการฉีดที่เหมาะสมของสารตัวอย่างและรีเอเจนต์เพื่อปรับระดับ Baseline ให้เรียบ ระบบที่นำเสนอนี้ถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งระบบ โดยสามารถตรวจสอบแคดเมียมในสารตัวอย่าง ที่ความถี่ 43 ตัวอย่างต่อชั่วโมง ได้ค่าความเที่ยงตรงการทดลอง (%RSD) ที่ $<1.4\%$ กราฟมาตรฐานอยู่ระหว่าง $0 - 20 \text{ mgL}^{-1}$ ขีดจำกัดการตรวจวัดอยู่ที่ 0.05 mg L^{-1}

Grudpan, K. et al, (2011) Green analytical หรือเคมีสีเขียว เป็นการวิเคราะห์รีเอเจนต์ที่เป็นสารสกัดจากธรรมชาติโดยใช้ระบบ FI ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบในการวิเคราะห์ ประกอบด้วยระบบ FI แบบ Single line, Lab-on-chip อย่างง่าย โดยใช้กล้องเว็บแคมเป็นดีเทคเตอร์ และการพัฒนาระบบ Lab-on-chip แบบใหม่ ระบบดังกล่าวระบบดังกล่าวถูกใช้ในการวิเคราะห์กรดโดยใช้สารสกัดธรรมชาติ โดยใช้พืชท้องถิ่นที่สามารถหาได้ง่าย ได้แก่ ดอกอัญชัญ ดอกกล้วยไม้ และ บitters ซึ่งมีความสมบัติในการเป็นอินดิเคเตอร์ในตัวเอง นอกจากนี้ยังใช้ในการหาปริมาณเหล็กจากเครื่องคั้นชา ชนิดต่างๆ โดยระบบโพลีเมตริก

Settheeworarit, T. et al, (2005) ได้ใช้สารสกัดจากใบฝรั่งเป็นรีเอเจนต์จากธรรมชาติเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุเหล็ก โดยใช้ระบบโพลีอินเจกชัน ซึ่งคุณสมบัติของรีเอเจนต์ที่เราเตรียมมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับธาตุเหล็ก จึงทำให้เกิดสีขึ้น จึงสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กได้ด้วยการฉีดตัวอย่างรีเอเจนต์เข้าไปในระบบ จากนั้นระบบจะทำการผสมสารแล้วส่งเข้าเครื่องตรวจวัดสัญญาณ แล้วได้ค่าการดูดกลืนแสงออกมา และวิธีการที่เราได้นำเสนอนั้น จะช่วยในการประหยัดสารเคมีที่จะต้องใช้ในการวิเคราะห์ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วย