บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. โลหะหนัก

โลหะหนักหมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 - 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุมีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอท เป็นของของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีคุณสมบัติทางกายภาพคือนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีเป็นมันวาวสะท้อนแสง นำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ มีค่าออกซิเดชั่น ได้หลายค่า โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่า โลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometalliccompound) ซึ่งเป็นพิษและสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์อาจมีผลทำให้พิการหรือเสียชีวิตได้ โลหะหนักที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เช่น Cd^{+2}, Hg^{+} (ชุติมา, 2540)

1.1 แคดเมียม

เป็นโลหะอ่อนมีสีเงินอยู่ในหมู่ IIB ของตารางธาตุ น้ำหนักอะตอม 112.4 มีวาเลนซี 2 จุดหลอมเหลว 320.7 องศาเซลเซียส จุดเดือด 767 องศาเซลเซียส ที่ 20 องศาเซลเซียสมีความหนาแน่น 8.6 กรัม ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร (พิมล และชัยวัฒน์ , 2539 หน้า 130-131) สามารถระเหิดเป็น ไอด้วยความร้อนได้ง่าย และพบว่า แคดเมียมเป็นธาตุที่หายากและมีอยู่ตามธรรมชาติที่พบเป็นปริมาณมากมักเกิดปนอยู่กับแร่ สังกะสี ตะกั่ว ทองแดงและดีบุก มีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์คล้ายกับสังกะสี คือทนทานต่อการผุกร่อน แต่มีความเป็นพิษสูง แคดเมียมสามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอ็นไซม์เนื่องจากมีโครงสร้างอะตอมคล้ายกัน ตัวอย่างเช่น แคดเมียมสามารถแทนที่สังกะสีในระบบเอ็นไซม์ Carboxypeptidase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของเพปไทด์ (Peptide) (ศุภมาศ. 2540 หน้า 259) ในธรรมชาติมักรวมตัวกับกำมะถันเป็นแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งมีสีเหลืองอยู่ในแร่ grunockite และมักปนอยู่กับแร่สังกะสีซัลไฟด์ และในอุตสาหกรรมถลุงแร่สังกะสีพบว่าแคดเมียมเป็นผลพลอยได้เนื่องจากมีแคดเมียมปะปนอยู่

แคดเมียมเป็นโลหะที่ใช้ทำหลอดไฟ หัวเจาะ หัวโม่ อุตสาหกรรมผลิตแก้ว สี ปุ๋ย แบตเตอรี่ เชื่อมโลหะ ใช้ผสมกับซีลีเนียมในการผลิตสี ผสมในน้ำมันเครื่องยางและพลาสติก การที่แคดเมียมจะเข้าไปอยู่ในสภาวะแวดล้อมได้นั้น มีแหล่งกำเนิดมาจากโรงงานถลุงสังกะสี ตะกั่วและทองแดง จากการเผาไหม้ของพลาสติก สีชนิดต่างๆ และในปัจจุบันมีการใช้โลหะแคดเมียมมาแทน อลูมิเนียม เหล็กสแตนเลส และสังกะสีในการฉาบอุปกรณ์ที่เป็นโลหะ

แคดเมียมที่ละลายได้ง่ายโดยจะอยู่ในรูป Cd^{2+} เป็นส่วนใหญ่ โดยอาจอยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อน ดังนี้ต่อไปนี้

แคดไอออน $CdCl^{+}$ $CdOH^{+}$ $CdHCO^{+}_{3}$

แอนไอออน $CdCl^{-}_{3}$ $CdCl^{2}_{4}$ $Cd(OH)^{-}_{3}$ $Cd(OH)^{2-}_{4}$

สารประกอบ CdO $CdCO_3$

Bowen (1979) ได้มีการสำรวจปริมาณโลหะหนักในบรรยากาศและพื้นน้ำบริเวณผิวโลก พบว่าปริมาณโลหะหนักในบรรยากาศบริเวณขั้วโลกใต้น้อยกว่าปริมาณโลหะหนักบริเวณแถบทวีปยุโรป และที่มากสุดคือบริเวณภูเขาไฟ ส่วนในภาคพื้นน้ำจะพบปริมาณโลหะหนักช่วงกว้างกว่าในบรรยากาศแต่ความเข้มข้นน้อยกว่า ซึ่งปริมาณแคดเมียมในบรรยากาศที่พบในบรรยากาศที่ขั้วโลกใต้น้อยกว่า 0.015 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในทวีปยุโรปประมาณ 0.50 - 620 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และบริเวณใกล้ภูเขาไฟประมาณ 8 – 9 นาโนกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนแคดเมียมในสภาพพื้นน้ำ ในน้ำจืด 0.01 – 3 ไมโครกรัมต่อลิตร ในน้ำเค็มน้อยกว่า 0.01 – 4 ไมโครกรัมต่อลิตร ช่วงการละลายของแคดเมียมในน้ำทะเลที่ระดับความเค็ม 35 กรัมต่อหนึ่งลิตร เท่ากับ 0.001 – 1.1 นาโนโมลต่อกิโลกรัม (Rainbow , 1993)

แคดเมียมในพืชทั่วไปมีค่าต่ำ แคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่แลกเปลี่ยนได้ ศักยภาพในการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในพืชสูงมากเมื่อเทียบกับธาตุอื่น เรียงจากมากไปน้อยดังนี้ Cd>Zn>Cu>Ni (Hickey & Kittrick, 1984)

ตาราง 1 แสดงการเคลื่อนที่ของโลหะหนักใน ดิน – พืช (Kloke et al. 1984)

Element	transfer coefficient
As	0.01 – 0.
Be	0.01 – 0.1
Cd	1 -10
Co	0.01 – 0.1
Cr	0.01 – 0.1
Cu	0.01 – 0.1
Ni	0.1 – 1
Pb	0.01 – 0.1
Se	0.1 – 10
Sn	0.01 – 0.1
Tl	1 – 10
Zn	1 - 10

ที่มา : B.J. Alloway & D.C. Ayres. :155)

แคดเมียมมีลักษณะคล้ายสังกะสีอยู่หลายประการ เช่น ถูกพืชดูดกินได้ง่าย มีคุณสมบัติทางเคมีและโคลงสร้างแบบอิเลคทรอนิก (Electronic configuration) ที่คล้ายคลึงกัน และพบแคดเมียมในสินแร่สังกะสีเสมอ ที่แตกต่างจากสังกะสีคือแคดเมียมเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตสูงโดยเข้าไปแย่งบทบาทหน้าที่ของสังกะสี ที่เป็นกระบวนการทางชีวเคมีในร่างกายของสิ่งมีชีวิต

ถึงแม้ว่าปริมาณแคดเมียมจะมีปริมาณที่น้อยหรือมาก พืชก็สามารถดูดกินและสะสมได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์พืช พืชบางชนิดจะไม่แสดงอาการเป็นพิษจากแคดเมียม นับว่าเป็นอันตรายอย่างมาก เพราะพืชเป็นอาหารด่านแรกในห่วงโซ่อาหารของคนและสัตว์ ซึ่งจาก**การศึกษาปริมาณแคดเมียมในผักบุ้งจีนพบว่าแคดเมียมสะสมในรากเป็นส่วนใหญ่ ส่งผลให้การเจริญเติบโตของใบและลำต้นถูกยับยั้งเนื่องจากพิษของแคดเมียม (วิไลภรณ์, 2535) โดยทั่วไปพืชจะไม่แสดงความเป็นพิษที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 0.1 – 2.4 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่จะแสดงอาการเป็นพิษที่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียม 5 – 30 มิลลิกรัมต่อลิตร (Alloway,1990) นั่นหมายถึงพืชอาจไม่ตายแต่การเจริญเติบโตอาจเปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ**

อย่างไรก็ตามมีพืชบางชนิดที่รับแคดเมียมแล้วแสดงอาการเป็นพิษที่ความเข้มข้น 20 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และบางชนิดทนพิษแคดเมียมได้ถึง 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พืชแต่ละชนิดสะสมแคดเมียมได้ต่างกัน (ศุภมาศ, 2540 หน้า 263)

1.2 ลักษณะการแพร่กระจายและการปนเปื้อน

แคดเมียมที่สะสมในดินและแพร่กระจายสู่แหล่งน้ำได้มาจากแหล่งปนเปื้อนที่สำคัญ 3 แหล่ง คือ

1.2.1 เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี

1.2.2 กากตะกอนน้ำโสโครก

1.3.3 ปุ๋ย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยฟอสเฟต และปุ๋ยคอก

1.3 วิธีการบำบัดแคดเมียม

ปัจจุบันมีหลายวิธีซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้บำบัดค่อนข้างมีต้นทุนสูงมากได้แก่

1.3.1 Ion exchange เทคนิคนี้อาศัยเรซินเป็นตัวแยกโลหะหนักออกจากสารละลายโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนพวกสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำในสารละลายกับไอออนบนผิวเรซิน เรซินที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายกับไอออนบนผิวเรซิน เป็นพวกสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ อาจจะเป็นกรดซัลโฟนิก หรือกรดคาร์บอกไซลิกวิธีนี้เหมาะกับการกำจัดโลหะหนักปริมาณน้อยๆ นิยมใช้กำจัดน้ำเสียจากโรงงานไฟฟ้า

1.3.2 การระเหย (Evaporation) เป็นเทคนิคที่นำน้ำออกจากของเสีย ได้ผลดีเมื่อมีปริมาณโลหะหนักปริมาณมากเท่านั้น และลงทุนสูง

1.3.3 รีเวิร์สออสโมซีส (Reveres osmosis) ใช้กำจัดโลหะที่มีความดันสูงผ่านเซมิ-เพอมิเอเบิลเมมเบรน ซึ่งยอมให้โลหะบางชนิดผ่านเท่านั้นแต่ต้องใช้ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศและต้องเสียค่าใช้จ่ายในเรื่องของเมมเบรนที่ทนความดัน ทนกรดทนด่าง ตัวอย่างเมมเบรนเช่น เซลลูโลส อะซิเตท โพลีเอมีน โพลีฟูแรน วิธีนี้นิยมใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า น้ำเสียจากกระบวนการล้างภาพ เป็นต้น

1.3.4 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Sovent extraction) เป็นวิธีแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยการเติมตัวทำที่สามารถละลายโลหะหนักได้ดี แต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

1.3.5 อิเลคโตรไดอะไลซิส (Eliectrodialysis) วิธีนี้จะแยกโลหะหนักโดยจะให้ผ่านเพอมิเอเบิลเมมเบรน (Permeable membrane) โดยใช้กระแสไฟฟ้า ข้อเสียของวิธีนี้คือราคาแพงดังนั้นจึงไม่เป็นที่นิยม

1.3.6 การตกตะกอน (Precipitation) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว โดยเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้งเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่ให้ตกตะกอนแยกออกได้ พบว่าแคดเมียม สามารถตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีที่ความเป็นกรด – ด่าง ระหว่าง 9.5 – 12.5

1.3.7 ออกซิเดชั่น – รีดักชั่น (Oxidation- Reduction) ใช้มากในโรงงานชุบโลหะ โดยการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยา ทำให้โลหะเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่น หรือตกตะกอน

1.4 พิษวิทยาของแคดเมียม

แคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ อาหาร และในยาสูบ เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปที่ไต ตับ ม้ามและลำไส้ แม้ได้รับปริมาณน้อยแต่ต่อเนื่อง แคดเมียมจะถูกสะสมไว้ที่ไต (Peter o' well) ผู้หญิงวัยหมดประจำเดือนจะได้พิษของแคดเมียมมาก ทำให้ร่างกายรับวิตามินดีและแคลเซียมน้อยลง การสูดหายใจเอาไอหรือฝุ่นละอองแคดเมียมที่พบตามโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานทำหม้อแบตเตอรีอัลคาไลน์ โลหะผสมสีและพลาสติก ยาฆ่าแมลง การหลอมโลหะ จะมีฝุ่นของแคดเมียม ในรูปของควัน กรณีของผู้ที่บริโภคอาหารที่เปื้อนฝุ่นแคดเมียมปริมาณสูงจะทำให้หายใจติดขัด เยื่อบุปอดถูกทำลาย ถุงลมโป่งพอง คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลีย เจ็บหน้าอก โลหิตจางเรื้อรัง ไตพิการ ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา อาจเสียชีวิตได้ (พรรณทิพย์, 2538)

มาตรฐานของสารประกอบแคดเมียมในประเทศไทย

1. ค่ามาตรฐานแคดเมียมในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมกำหนดไว้ไม่ควรเกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332, 2521)

2. ค่ามาตรฐานแคดเมียมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 , 2539)

3. ค่ามาตรฐานแคดเมียมในน้ำทิ้งลงบ่อบาดาลกำหนดไว้ไม่เกิน 0. 01 มิลลิกรัมต่อลิตร (มติการประชุมคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 4 /2543)

2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้พืชบำบัดโลหะหนัก

Phytoremediation มากจากคำสองคำ คือมาจากภาษา Greek : phyton = Plant และจากภาษา Latin : Remediatial = Remedy ดังนั้น Phytoremediation จึงเป็นกระบวนการที่ใช้บำบัดสิ่งปนเปื้อนในดิน กากตะกอนของเสีย น้ำหรือน้ำใต้ดินโดยกระบวนการเคลื่อนย้ายสิ่งที่ปนเปื้อน การสลายตัว และในบางกรณี วิธีการเก็บเกี่ยวพืชในพื้นที่ปนเปื้อนก็เป็นวิธีการบำบัดวิธีหนึ่ง กระบวนการ Phytoremediation สามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนัก สารกำจัดศัตรูพืช สารละลาย สารระเบิด น้ำมันดิบ สาร Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) และน้ำชะขยะได้ กระบวนการนี้ยังแบ่งออกเป็นวิธีต่าง ๆ ดังนี้ (EPA , 1999)

1. Phytoextraction หรือเรียกว่า Phytoaccumulation หมายถึงกระบวนการดึงดูดและเคลื่อนย้ายโลหะที่ปนเปื้อนในดินและน้ำโดยรากพืชไปยังส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินของพืช

2. Rhizofiltration เป็นวิธีดูดซับ (Absorption) หรือการทำให้ตกตะกอนในรากพืช (Precipitation) หรือดูดซับภายในรากพืชหากสารปนเปื้อนเป็นสารละลายที่อยู่รอบ ๆ รากพืช

3. Phytostabilization เป็นกระบวนการ ในการดูดยึด (Immobilize) สารปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินโดยการดูดซับหรือสะสมโดยราก

4. Phytodegradation หรือเรียกว่า Phytotransformation เป็นวิธีสลายสารปนเปื้อนโดยใช้พืชผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในพืช หรือ การสลายตัวของสารปนเปื้อนภายนอกพืชโดยผลของสารประกอบต่าง ๆ (เช่น เอมไซม์) ที่ถูกสร้างในพืชนั้น

5. Rhizodegradation หรือเรียกอีกอย่างว่า Enhanced Rhizosphere Biodegradation เป็นการสลายตัวของสารปนเปื้อนในดินผ่านทางการทำงานของ จุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบรากพืช ซึ่งการทำหน้าที่ใช้หรือย่อยสารอินทรีย์เพื่อ เป็นสารอาหารและพลังงาน

6. Phytovolatilization เป็นกระบวนการดึงดูดและการทำให้กลายเป็นไอของสารปนเปื้อนโดยการคายน้ำของพืช ซึ่งจะปลดปล่อยสารปนเปื้อน

2.1 การกำจัดแคดเมียมของพืช

1. จากการทดลองอิทธิพลของค่าความเป็นกรด - ด่าง ต่อความสามารถในการละลายของแคดเมียม โดยใช้สารรังสีของแคดเมียมพบว่าแคดเมียมละลายได้ดีในสภาพที่เป็นกรด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเป็นเบสเพื่อลดระดับความเป็นกรด จากความเป็นกรด - ด่าง 4.5 เป็น 6.5 อาจไม่ลดการดูดซึมแคดเมียมของพืช ทั้งที่พืชจะดูดซึมสังกะสีได้น้อยลงก็ตามวิธีการที่จะทำให้พืชดูดซึมแคดเมียมได้น้อยลงก็คือต้องใส่เหล็กในรูปคีเลต Fe-DTPA ลงไปด้วย อีกทั้ง

การใส่อินทรีย์วัตถุ ดินเหนียวซิลิเกต หรือไฮดรัสออกไซด์ของ Fe , Al จะสามารถลดการละลายของแคดเมียมได้

2. การให้ปุ๋ยไนโตรเจนแก่พืชอาจช่วยลดปริมาณแคดเมียมในพืชได้ แคดเมียมในใบอ่อนมีมากกว่าในใบแก่ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า การเคลื่อนย้ายแคดเมียมในใบจะเกิดขึ้นในช่วงแรก ๆ(vegetative growth) ของการเกิดใบอ่อน และอาจมีลักษณะการเคลื่อนย้ายในพืชคล้ายกับแคลเซียมเพราะมีขนาดไล่เลี่ยกัน โดยรัศมีไอออนของแคลเซียมและแคดเมียมเท่ากับ 0.97 และ 0.99 อังสตรอม ตามลำดับ

3. นิตย์ (2541) กล่าวไว้ว่า พืชบางชนิดมีกลไกที่สามารถที่จำกัดการดูดแร่ธาตุให้อยู่ในระดับต่ำ หรือทำให้แร่ธาตุที่ดูดเข้าไปไม่มีการเคลื่อนย้ายไปที่อื่น แต่ยังคงสะสมอยู่ที่รากนั่นเอง จัดว่าเป็นพืชที่มีความสามารถในการหลบหลีกพิษจากแร่ธาตุ (avoidance) เมื่อประมาณปี 1989 – 1990 มีการค้นพบว่าพืชที่สามารถทนต่อโลหะหนักที่เป็นพิษนั้นสามารถทำลายความเป็นพิษของโลหะหนัก (detoxified) ได้ด้วยสารประกอบประเภทไฟโทคิเลทิน (phytochelatins) ซึ่งเป็นเปปไทด์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน ซีสเตอีน 2-8 โมลกุลมีกรดกลูตามิคอยู่ที่ปลายหนึ่งและไกลซีนอยู่ที่อีกปลายหนึ่งอาจเขียนง่ายๆ ได้ดังนี้ glutamic acid – $(cysteine)_{2-8}$ – glycine ไฟโทคิเลทิน (phytochelatins) จะเข้าทำปฏิกิริยารวมตัวกับโลหะหนัก

ในการทดลองมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ทำการศึกษาที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้คือ สรีระวิทยาของพืชทั่วไป และของหญ้าข้าวนก (*Echinnochloa crus-galli (L.)Beauv)*, หญ้าหนวดแมว (*Bulbostylis barbata (Rottb) C.B.Clarke*) และหญ้าแดง (*Ischaemum barbatum* Retz , *I ,rugosum Salisb.*)สารละลายธาตุอาหารพืช และสารละลายแคดเมียม

หากนำพืชสดที่สมบูรณ์ นำมาอบให้แห้งในตู้อบซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหลายชั่วโมง น้ำในเนื้อเยื่อพืชจะค่อยๆ ระเหยไปจนแห้งสนิท สำหรับพืชล้มลุกทั่วไป น้ำหนักแห้งจะมีค่าราวร้อยละ 10-20 ของน้ำหนักสด เนื้อเยื่อพืชแห้งประกอบด้วยผนังเซลล์ซึ่งมีคาร์โบไฮเดรตและลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก กับไซโทพลาสซึมที่มีโปรตีน ลิปิด กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ และธาตุต่างๆ ที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบนอกเหนือจากนี้

ผลการวิเคราะห์พืชทางเคมีแสดงว่ามีธาตุต่างๆ ไม่น้อยกว่า 60 ธาตุ สำหรับธาตุที่มีอยู่ในปริมาณมากได้แก่ ออกซิเจน คาร์บอนและไฮโดรเจน ฟอสฟอรัสและโปแทสเซียมนั้นมีอยู่ในเนื้อเยื่อพืชไม่มากนัก ธาตุอะลูมินัม ซิลิกอน ทองแดง ตะกั่ว ปรอท อะเซนิกส์และยูเรเนียม

ก็ได้ในพืชซึ่ง 5 ธาตุหลังมีปริมาณไม่มาก ธาตุเหล่านี้ดูดซึมได้ยากแต่พืชก็มีรากที่สามารถดูดเอาธาตุเหล่านี้มาใช้ได้ในอัตราที่ต่างกัน

2.2 พืชที่ใช้ในการทดลอง

2.2.1 หญ้าข้าวนก

ชื่อไทย : หญ้าข้าวนก, หญ้าปล้องละมาน, หญ้าไข่แมงดา, หญ้าปล้อง

ชื่อสามัญ : barnyard millet , chicken panic grass, cock's foot baronet, barn yard, water grass

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Echinnochloa crus-galli (L.) Beauv.*

ชื่อวงศ์ : POACEAE (GRAMINEAE)

ลักษณะทั่วไป

หญ้าข้าวนก *(Echinnochloa crus-galli (L.)Beauv.)* มีชื่อเรียกอย่างอื่นว่า หญ้าหวังหญ้าพุ่มพวง หญ้าหางวัว และหญ้าคอมมิวนิสต์ มีชื่อเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า barnyardgrass หรือ water grass, millet, bluestem หรือ baronet grass คำว่า Echinochloa มาจากภาษากรีก ซึ่ง Echinos หมายถึง hedgehog หรือแหลม ส่วน chloa หมายถึง grass หรือวัชพืชชนิดอื่นที่อยู่ใน genus เดียวกันคือ หญ้านกสีชมพู *(Echinochloa colona (L) Link)* หญ้าปล้อง *(Echinochloa stagnima (Retz.) Beauv.)* ประเทศไทยพบมากในภาคกลางที่มีการปลูกข้าวนาหว่าน

ลักษณะทาง พฤกษศาสตร์

หญ้าข้าวนกเป็นวัชพืชวงศ์ Poaceae อายุฤดูเดียวมีเกือบ 5 ชนิด แต่ที่พบมากคือ หญ้าข้าวนกและ ข้าวนกสีชมพู *(Echinochloa colona (L) Link)* (Yabuno,1980) หญ้าข้าวนกมีลักษณะ hydrophilous (Brod,1986) เป็นพืช C_4 โครโมโซม 2n = 6x = 547 (Yabuno, 1981) ลำต้นสูงประมาณ 120 เซนติเมตร ใบอ่อนจะเป็นคลื่น ยาวประมาณ 35 เซนติเมตร. และกว้าง 0.5 – 1.5 เซนติเมตร. มีสีระหว่างสีเขียวกับสีเขียวขาว เส้นกลางใบสีเขียวจาง ถึงสีขาว กาบใบมีลักษณะแบนราบระหว่างใบและก้านใบไม่มีเยื่อกั้นน้ำฝนดอกเป็นดอกช่อ ดอกเป็นช่อแบบช่อแยกแขนง (panicle) ตั้งตรงขึ้นไปหรือโน้มยอดลงมา ยาว 10 - 20 เซนติเมตร. ออกที่ส่วนยอดของลำต้น ประกอบด้วยช่อดอกแบบกระจะ (raceme)

10 - 20 เซนติเมตร. ออกที่ส่วนยอดของลำต้น ประกอบด้วยช่อดอกแบบกระจะ (raceme) 12-30 ช่อ แต่ละช่อยาว 2-4 เซนติเมตร แกนกลางของช่อดอกเป็นเหลี่ยมที่สันจะมีโคนสั้นๆ แต่ละช่อประกอบด้วยช่อดอกย่อย ยาว 3-4 เซนติเมตร จำนวนมากอัดแน่นอยู่ ช่อดอกย่อยมีกาบ 2 อัน กาบล่างยาวไม่ถึงครึ่งหนึ่ง ของความยาวช่อดอกย่อย กาบบนยาวกว่า มีขนปกคลุมอยู่ตามขอบและลายเส้นบนกาบ ช่อดอกย่อยแต่ละช่อมีดอกย่อยอยู่ 2 ดอก ดอกแรกเป็นหมัน มีกาบนอกยาว 3-3.5 มิลลิเมตร. ที่ปกคลุมด้วยขน ตามแบบฉบับแล้วจะมีปลายยื่นยาวออกไปเป็นหนวด ทั่วไปพบว่าหนวดนี้จะยาว 5-10 มิลลิเมตร กาบในยาว 2.5-3 มิลลิเมตร บางใสไม่มีขน ดอกที่สองเป็นดอกสมบูรณ์เพศ มีกาบนอกยาว 0.5 มิลลิเมตรค่อนข้างแข็งผิวเรียบเป็นมัน กาบในยาว 2.5 มิลลิเมตรบางกว่ากาบนอก ส่วนของกลีบดอกที่ลดรูปไป มี 2 อัน ขนาดเล็ก เกสรตัวผู้ 3 อัน อับละอองเรณูสีส้ม เกสรตัวเมียมีรังไข่ขนาดเล็ก ท่อรังไข่ 2 อัน ที่ปลายมีขนสีม่วงปกคลุม

สภาพที่อยู่

หญ้าข้าวนกเป็นวัชพืชประเภท hydrophilous จึงชอบขึ้นในสภาพที่ชื้นในที่โล่งน้ำขัง พื้นที่การเพาะปลูก และพื้นที่ว่างเปล่า พบมากในนาข้าว ในทุกสภาพของดินไม่ว่าจะเป็นดินกรดหรือดินเค็ม

การแพร่กระจาย

หญ้าข้าวนกไม่มีแหล่งกำเนิดที่แน่นอน (Holm & Herberger, 1970) สัญนิฐานว่าเป็นเอเชียตอนกลางหรือทางตะวันออกของเอเชีย แต่ Salisbury (1961) ระบุแหล่งกำเนิดทางยุโรปตะวันออก และมีการแพร่กระจายทั้งเขตร้อนและเขตหนาว โดยเฉพาะในพื้นที่ๆที่ทำการปลูกข้าว หญ้าข้าวนกสามารถแพร่กระจายโดยเมล็ดไปกับน้ำ เครื่องมืออุปกรณ์ในการเกษตร และสัตว์

การงอก

สามารถงอกได้ดีในสภาพที่มีความชื้นเหมาะสม ประมาณ 75 – 95 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เมล็ดงอก 80% (Arai & Miyahara, 1963) และจะงอก 75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีความชื้นในดิน 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ประเทศญี่ปุ่นพบว่าอุณหภูมิในการงอกอยู่ระหว่าง 30 – 35 องศาเซลเซียส ที่เยอรมันอยู่ระหว่าง 20 – 30 องศาเซลเซียส เหมือนกับในสหรัฐอเมริกา ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมของการงอกคือ 6.8 – 7.0 (Brod , 1985) หรือ 4.6 – 8.4

(Roche' & Miyahara , 1963) และค่าของ Eh ก็มีส่วนในการงอกของหญ้าข้าวนกเช่นเมื่อมีปุ๋ย ammonium nitrate ในพื้นที่นั้นจะมีเปอร์เซ็นต์การหงอกถึง 52 เปอร์เซนต์ (Kawahara & Wakamasu,1964)

แสงสว่างเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะการงอกของหญ้าข้าวนก ซึ่งออกซิเจน 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้งอกได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ หากออกซิเจนต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะไม่งอก

ในด้านความลึกของเมล็ดในดิน ถ้าอยู่ลึกมากใต้ดินจะงอกน้อยลงเมื่ออยู่ลึกตั้งแต่ 2 ถึง 8 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์ความงอกสูงสุดที่เมล็ดอยู่ลึก 3.75 เซนติเมตร

2.2.2 หญ้าหนวดแมว

ชื่อไทย : หญ้าหนวดแมว
ชื่อสามัญ : hoorah grass
ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Bulbostylis barbata (Rottb) C.B.Clarke*
ชื่อวงศ์ : CYPERARACEAE

ลักษณะทั่วไป

เป็นวัชพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ประเภทกก จัดอยู่ในวงศ์ Cyperaceae อายุปีเดียว ออกดอกตลอดปี ลำต้นสูงประมาณ 30 – 50 เซนติเมตร ใบเรียบและเรียวยาว ปลายใบแหลม ลำต้นจะแตกเป็นกอใหญ่ และเจริญเติบโตเร็ว ส่งก้านช่อสูง ก้านช่อดอกสี่เหลี่ยมแข็งสามารถเห็นด้วยตาเปล่าชัด ช่อดอกย่อยกลมๆ คล้าย เมล็ดพืช สีน้ำตาล ใบประดับเห็นไม่ชัดเป็นเส้นเล็กสั้น

สภาพที่อยู่

พบในพื้นที่ชื้น หรือมีน้ำขัง และพบมากในบริเวณที่มีฟอสฟอรัสสูง

การงอก

งอกได้ดีในสภาพดินชื้น น้ำไม่ขัง แต่เมื่องอกแล้ว สามารถเจริญเติบโตในสภาพน้ำขังได้

ลักษณะต้นอ่อน

ต้นอ่อนของหญ้าหนวดแมวจะมีใบแรกและใบที่ 2 ที่ 3 ตาม และมีลักษณะคล้ายง่าม หนังสติ๊กเมื่อมีจำนวนใบมากขึ้นจะแตกกอในแนวเส้นตรง เป็นรูปคล้ายพัด ใบมีลักษณะกลม เป็นร่อง และที่เป็น F. dichotoma ต้นอ่อนจะมีลักษณะใบแบน คล้ายต้นกุ่ยช่าย

ลำต้น

ลำต้นจะเจริญตั้งตรงเป็นกอแน่น มีระบบรากฝอยสีน้ำตาล ทรงต้นสูงประมาณ 25 – 50 เซนติเมตร ลำต้นเป็นรูปสามเหลี่ยมค่อนข้างแบน

ใบ

เป็นใบเดี่ยว เรียบ เรียว ยาวประมาณ 10 – 20 เซนติเมตร ขอบใบเรียบปลายใบแหลม ใบออกจากส่วนโคนต้น โคนของใบจะเป็นกาบหุ้มลำต้น

ดอก

ออกเป็นช่อแบบช่อร่มประกอบ (compound umble) ยาวประมาณ 10 - 30 เซนติเมตร ก้านช่อดอกเป็นสี่เหลี่ยมค่อนข้างแบน บริเวณฐานช่อดอกมีใบประดับสีเขียวเป็นเส้นเล็กๆ ในช่อดอกหนึ่งประกอบด้วยช่อดอกย่อยเป็นจำนวนมาก ดอกค่อนข้างกลม สีน้ำตาลปนแดง ดอกย่อยแต่ละดอกมีกลีบประดับรูปไข่สีน้ำตาลปนแดง และมีลายเส้น 3 เส้น เส้นที่อยู่ตรงกลางจะมีสีเขียว มีเกสรตัวผู้ 2 อัน อับละอองเกสรมีสีเหลือง ยอดเกสรตัวเมียแยกเป็น 3 แฉก มีขนขึ้นปกคลุมหุ้มช่อดอกสีนวลห่อหุ้มช่อดอก ตอนล่างของดอกตัวเมียไม่มีกลีบดอก

ผล

แบบผลแห้งเมล็ดล่อน (achene) สีเหลืองหรือสีขาว รูปไข่กลับผิวขรุขระ มีร่องตามยาว และตามขวาง

ประโยชน์

ใช้เป็นตัวเพิ่มอินทรียวัตถุในดินโดยการไถกลบก่อนการปลูกข้าวเป็นสมุนไพรแก้ไข้ ไข้ผอมเหลืองแก้ไอหืดแก้โรคผิวหนังและโลหิตเป็นพิษ (วัชพืชในประเทศไทย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

2.2.3 หญ้าแดง

ชื่อไทย : หญ้าแดง

ชื่อสามัญ : Wrinkle duck - beak

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Ischaemum barbatum* Retz.,*I,rugosum Salisb.*

ชื่อวงศ์ : Poaceae

ลักษณะทั่วไป

หญ้าแดงเป็นวัชพืชที่เป็นปัญหานาข้าว มีชื่อเรียกอย่างอื่นว่า หญ้ากระดูกไก่ หญ้าก้านธูป หญ้าดอกต่อ และหญ้าสร้าง ฯลฯ พบในที่ชื้นและน้ำลึก พบมากในนาข้าวของจังหวัดพระนครศรีอยุธยา พิษณุโลก พิจิตร ปราจีนบุรี ราชบุรี ชัยนาท สิงห์บุรี และนครสวรรค์ มีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Wrinkle duck – beak

ลักษณะทาง พฤกษศาสตร์

เป็นพืชในวงศ์ Poaceae ลำต้นเรียวยาว ข้อล่างๆ จะแนบติดไปกับพื้นดินและชูยอดขึ้นผิวลำต้นเรียบเห็นข้อได้ชัดเจน ใบกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ดอกออกตามยอด ช่อดอกมักจะแตกเป็น 2 แฉก บางช่อดอกแตกมากกว่า 2 แฉก ในช่วงที่ยังไม่แก่เต็มที่ ช่อดอกจะอยู่ติดกันแน่นเหมือนเป็นช่อเดี่ยว คล้ายกับหญ้าโขย่ง (*Rottboellia chochinensis Lour*) กลีบดอกสีเขียว เกสรสีเหลือง หญ้าแดงมี 2 ชนิด อีกชนิดเป็น *I.rugosum Salisb* . ชนิดนี้ลำต้นตั้งใบเรียวเล็กและสั้นกว่า ออกดอกเป็นสีแดง ช่อดอกสีม่วงมักแตกเป็น 2 ช่อ ช่อสั้นกว่าชนิดดอกเขียว และกลีบชั้นในมีหางยาว 0.5 เซนติเมตร ดอกมีสันขวางตามดอกเห็นได้ชัดเจน หญ้าแดงขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด (พรชัย , 2540)

สภาพที่อยู่

หญ้าแดงพบมากบริเวณที่ดินชื้น ในนาข้าวทั้งแห้งและน้ำ และน้ำลึก

การงอก

เมล็ดหญ้าแดงงอกได้ดีที่สภาพดินชื้น เมล็ดของหญ้าแดงงอกใหม่จะมีลักษณะต้นอ่อนเหมือนกับพืชในวงศ์ Poaceae อื่นๆ มีใบเดียวในระยะแรก แต่กาบใบจะมีสีแดง มีขน และค่อนข้างแข็ง ในระยะต่อมาใบอ่อนจะเกิดอีกประมาณ 4 – 5 ใบ

ประโยชน์

ใช้เป็นอาหารสัตว์ นำไปทำปุ๋ยหมัก

2.3 พืชน้ำ (Aquatic Plant)

พืชน้ำคือพืชที่ขึ้นในสภาพที่มีน้ำ ซึ่งอาจเป็นพื้นที่ที่มีน้ำขังหรือน้ำท่วม ซึ่งการเจริญเติบโตต้องอาศัยน้ำที่มีปริมาณมาก ๆ หรือระดับสูง โดยส่วนใหญ่จะจัดเป็นวัชพืช จำแนกเป็นกลุ่ม ต่าง ๆ ได้ตามสภาพการขึ้นแข่งขันดังต่อไปนี้

1. พืชลอยน้ำ (Surface-floating Plant) เป็นพืชที่ขึ้น และเจริญเติบโต โดยลอยอยู่บนผิวน้ำ รากไม่ได้หยั่งลึกลงดิน ดังนั้นพืชพวกนี้จะลอยตามผิวน้ำ องค์ประกอบที่ทำให้พืชพวกนี้เจริญเติบโตได้ก็คือ ต้องมีน้ำ – อากาศ ซึ่งรากและต้นอาจอยู่ใต้น้ำ แต่ใบ และดอกอยู่เหนือน้ำ เช่น ผักตบชวา และจอก

2. พืชใต้ผิวน้ำ (Submerged Plant) เป็นพืชที่ลอยอยู่ใต้ผิวน้ำ ไม่มีส่วนโผล่เหนือน้ำ การเจริญเติบโตของพืชประเภทนี้จะอยู่ในน้ำเท่านั้น ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดโผล่พ้นน้ำมาเลย ได้แก่ สาหร่ายต่าง ๆ นอกจากนี้ยังเป็นพืชที่อาจมีรากหยั่งดินลำต้นและใบไม่ได้โผล่พ้นน้ำด้วย

3. พืชริมตลิ่ง (Marginal Plant) เป็นพืชที่ขึ้นในบริเวณที่น้ำไม่ลึก เช่น ในบริเวณริมตลิ่ง แม่น้ำ ลำคลอง การเจริญเติบโตอาศัย น้ำ – ดิน – อากาศ ได้แก่ หญ้าขน และผักปราบ

4. พืชจมน้ำรากหยั่งดินยอดโผล่พ้นน้ำ (Emerged Plant) เป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตอาศัยส่วนของ ดิน – น้ำ – อากาศ โดยรากอยู่ในดินใต้น้ำ ส่วนของลำต้นต้องอยู่ในน้ำ และส่วนของใบและลำต้นบางส่วนอยู่เหนือน้ำพืชประเภทนี้อาจอยู่ในน้ำลึกๆ หรือตื้นๆ ได้แก่ ไมยราบยักษ์ และโสนเป็นต้น

2.3.1 สรีรวิทยาของพืชน้ำ

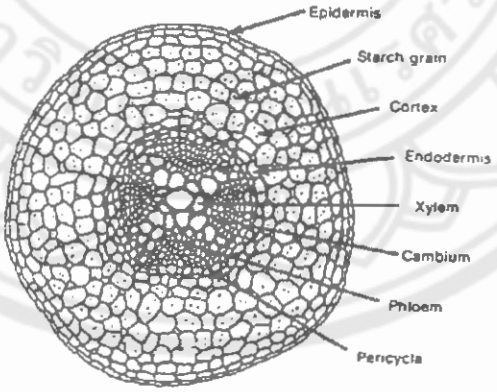
เนื่องจากพืชที่นำมาศึกษาวิจัยจัดอยู่ในประเภทวัชพืชล้มลุกหรือวัชพืชปีเดียวคือหญ้าข้าวนก(*Echinnochloa crus-galli (L.)Beauv.*) หญ้าหนวดแมว (*Bulbostylis barbata (Rottb) C.B.Clarke*.) **และหญ้าแดง** (*Ischaemum barbatum* Retz.,*I,rugosum Salisb.*) **จึงกล่าวถึง สรีรวิทยาของวัชพืชล้มลุกหรือวัชพืชปีเดียว เป็นหลัก**

2.3.2 ชีพจักรของวัชพืชล้มลุกหรือวัชพืชปีเดียว (Annual weed)

แม้ว่าวัชพืชส่วนใหญ่เป็นวัชพืชที่อยู่บนดินหรือเรียกว่า วัชพืชบก (terrestrial weed) แต่ก็ยังมี วัชพืชหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในน้ำ เรียกว่าวัชพืชน้ำ (aquatic weed) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ 1) วัชพืชลอยบนผิวน้ำ (floating Weed) เป็นวัชพืชที่รากไม่หยั่งลงพื้นดิน ซึ่งอาจมีรากและลำต้นอยู่ใต้น้ำแต่ส่วนใบและดอกลอยอยู่เหนือน้ำ ได้แก่ ผักตบชวา และจอก 2) วัชพืชจมน้ำรากหยั่งดินยอดโผล่พ้นน้ำวัชพืชประเภทนี้อยู่ได้ทั้งในน้ำลึกและน้ำตื้น ได้แก่ไมยราบยักษ์ โสน ผักตบไทย และซาเซียดเป็นต้น 3) วัชพืชใต้ผิวน้ำ (submerged Weed) วัชพืชพวกนี้ทุกส่วน อยู่ใต้ผิวน้ำ รากหยั่งลึกใต้ผิวดินหรือลอยอยู่ใต้น้ำ ได้แก่สาหร่ายไฟ และแหนเป็ด เป็นต้น (ดวงพร, 2543)

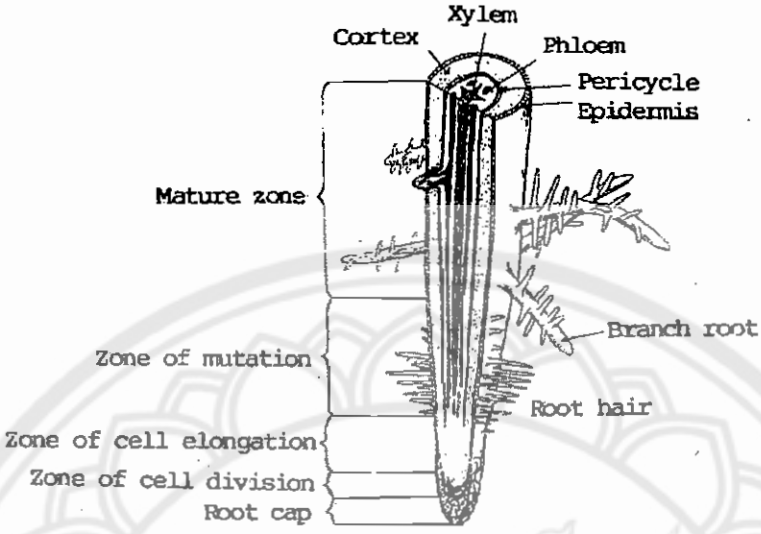
2.3.3 ราก และระบบราก

รากวัชพืชมีหน้าที่หลัก 4 อย่าง คือ ทำหน้าที่ในการดูดซึม (Absorption) ธาตุอาหาร และน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวนำพา (Conduction) ธาตุอาหาร และน้ำไปหล่อเลี้ยงลำต้นและในส่วนบนโดยผ่านทางท่อน้ำ (Xylem) ทำหน้าที่เป็นที่เก็บ (Storage) แป้ง และน้ำตาล ทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายอาหารที่ได้จากการสังเคราะห์แสง นอกจากนี้รากยังทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวดินให้ลำต้นและใบตั้งอยู่ได้



ภาพ 1 แสดงส่วนประกอบของรากวัชพืชผ่าตามขวาง (cross section)

ที่มา : พรชัย , 2540. หน้า 53



ภาพ 2 แสดงลักษณะของรากวัชพืชผ่าตามยาว (long section)

ที่มา : พรชัย , 2540 หน้า 52

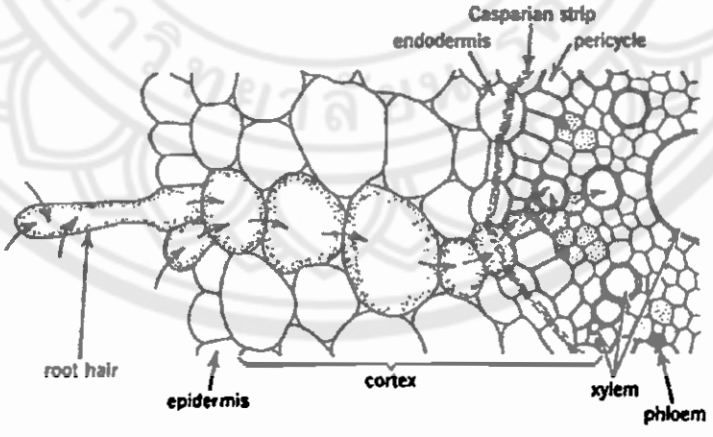
ระบบรากจำแนกออกเป็น 2 แบบได้แก่

1. ระบบรากฝอย (Fibrous root system) วัชพืชที่มีระบบรากฝอย ส่วนใหญ่จะเป็นวัชพืชตระกูลหญ้าใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocotyledonous grass weed) รากจะแตกเป็นรากฝอยมากมาย จากส่วนของลำต้นที่อยู่ใต้ดิน ดังนั้นจะพบว่าวัชพืชที่มีระบบรากแบบนี้จะมีรากแผ่กระจายอยู่ทั่วไปในดิน

2. ระบบรากแก้ว (Tab root system) ได้แก่ วัชพืชใบเลี้ยงคู่ (Dicotyledonous weed) รากที่เกิดในระบบรากแก้วนี้ จะแตกออกจากรากอันแรก (Primary root) ที่เกิดจากต้นกล้า โดยมีการแตกรากแขนง (Branch root) การดูดซึมน้ำ และธาตุอาหารผ่านทางรากสารละลายที่อยู่ในดินซึ่งประกอบด้วย น้ำ และแร่ธาตุอาหาร จะสามารถเข้าสู่วัชพืชได้โดยการดูดซึมผ่านทางรากเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นรากของวัชพืชจะทำหน้าที่หลัก คือ นอกจากจะเป็นตัวดูดซึมแร่ธาตุอาหารจากสารละลายในดินแล้ว ยังเป็นทางผ่านส่งต่อไปยังลำต้นและใบ กระบวนการดูดซึมทางรากนั้นอาจเป็นกระบวนการ Positive absorption หรือ Active absorption ดูดซึมธาตุอาหารโดยกระบวนการ Passive absorption เกิดจากการที่วัชพืชมีการคายน้ำ (Transpiration) ทางใบ ดังนั้นเมื่อมีการคายน้ำก็จะมีการดูดแร่ธาตุขึ้นมา โดยกระบวนการนี้ผ่านทางท่อน้ำ (Xylem) ซึ่งการคายน้ำเป็นการทำให้เกิด Water potential ในเซลล์ลดลง ดังนั้นจึง

ดึงน้ำจากรากขึ้นมา ซึ่งตามธรรมชาติ น้ำในท่อจะต่อเนื่องเป็นท่อยาว ดังนั้นการดูดน้ำ และธาตุอาหารของวัชพืชจะมากน้อยเพียงใด จึงขึ้นอยู่กับแรงของการคายน้ำ การดูดซึมโดยกระบวนการ Active absorption เกิดขึ้นได้โดยอาศัยความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารละลายใน และนอกราก

การดูดซึมธาตุอาหารในรูปของประจุ (ion) เกิดขึ้นได้ระหว่างสารละลายดิน (Soil Solution) และราก ซึ่งโดยทั่วไปอนุภาคของดินจะมีการดูดซึมประจุของธาตุอาหารไว้ และต่อจากนั้นจะมีการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) ระหว่างสารละลายกับดินรากขนอ่อนจะสามารถดูดธาตุอาหารได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุกับสารละลายดินอีกทีหนึ่ง ซึ่งก็เป็นสมดุลกันระหว่างรากขนอ่อน – สารละลายดิน – อนุภาคดิน น้ำและสารละลายธาตุอาหารเมื่อเข้าไปอยู่ในรากโดยผ่านทางรากขนอ่อนแล้วจะผ่านไปยังชั้นต่อไปของรากโดยอาจเข้าไปอยู่ใน Protoplast หรือซึมผ่าน ไปยังชั้นต่อไปของราก โดยอาจเข้าไปอยู่ใน Protoplast หรือซึมผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ (Intervellular space) หรือทางผนังเซลล์ (Cell wall) ซึ่งการซึมผ่านเข้าไปในเซลล์ จะต่อระหว่างเซลล์ หรือที่เรียกว่า Plasmodesmata ดังนั้น การดูดซึมแบบนี้จะส่งไปถึงท่อน้ำได้โดยไม่ต้องผ่านผนังเซลล์ของชั้น Endodermis ที่มี Casparian strip การดูดซึมผ่านผนังเซลล์นั้นจะซึมผ่านจากเซลล์ในชั้น Epidermis เรื่อยไปจนถึงชั้น Cortex ต่อจากนั้นจะซึมผ่านชั้นผนังเซลล์ของ Endodermis ไม่ได้เพราะติดชั้นแถบ Casparian strip ซึ่งจัดว่าเป็นตัวขัดขวาง (barrier) ของการดูดซึม และเคลื่อนย้ายเข้าไปในท่อน้ำ (Xylem)



ภาพ 3 แสดงการดูดซึมน้ำ และธาตุอาหารทางรากของวัชพืช

ที่มา : พรชัย , 2540 หน้า 57

2.4 การดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารของพืช

พืชดูดน้ำและธาตุอาหารเข้าทางราก แร่ธาตุต่างๆจะอยู่ในรูปที่เป็นไอออนอิสระในสารละลายดิน กระบวนการที่จะนำน้ำและสารละลายอาหารไปใช้เกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ

2.4.1 **พาสซีฟแทรนสปอร์ต** เป็นกระบวนการดูดน้ำและแร่ธาตุ ที่ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์พลังงานที่เกี่ยวข้องเป็นพลังงานจลน์ได้แก่

1. การแพร่ (diffusion) โดยในสารละลายธาตุอาหารจะมีความเข้มข้นสูงกว่าในรากพืชจึงสามารถดูดไอออนทั้งประจุบวกและประจุลบที่ละลายอยู่อย่างอิสระได้โดยตรงจากสารละลายธาตุอาหารโดยการแพร่ ไอออนเหล่านี้จะผ่านทางระบบอะโพพลาสต์โดยเข้าสู่ผนังเซลล์ และช่องว่างระหว่างเซลล์ที่มีน้ำแทรกอยู่ จากการทดลองนำรากพืชแช่ในสารละลายที่มีเกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) พบว่า การดูดไอออนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและค่อยๆลดลง ถ้านำรากไปแช่ในน้ำกลั่น ไอออนที่ดูดเข้าไปในรากช่วงแรกส่วนมากจะแพร่กลับออกมาได้อย่างอิสระ บริเวณของรากที่ยอมให้ไอออนผ่านเข้าออกอย่างอิสระเรียกว่า บริเวณอิสระ (Free space หรือ outer free space) การให้สารยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมไม่มีผลต่อการแพร่ของไอออนเข้าสู่ราก (สมบุญ , 2544)

2. สมดุลของดอลแนน(Donnan equilibrium) จากการศึกษาของ F.G.Donnan พบว่าบริเวณผนังเซลล์ประกอบด้วยเพคติน ทำให้ประจุลบของหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ซึ่งเป็นประจุที่อยู่กับที่ (fied charge) และก่อให้เกิดแรงดึงดูดไอออนที่มีประจุตรงข้ามคือประจุบวกเข้ามาได้ บริเวณนี้เรียกว่า ดอนแนนเฟส (Donnan phase) และเพื่อให้เกิดสมดุลกับประจุลบที่ผิวราก ไอออนบวกจะถูกดูดเข้าสู่รากมากกว่าไอออนลบ กระบวนการนี้ไม่ต้องอาศัยพลังงานจากกระบวนการเมทาบอลิซึม ดังนั้น ถ้ามีไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ ไอออนที่ถูกดูดเข้าไปก็สามารถแพร่ออกมาจากรากได้เหมือนกัน (Bidwell,1979) สามารถคำนวณได้จากสมการสมดุล**ของดอนแนน**

$$\frac{[\text{ไอออนบวกภายใน}]}{[\text{ไอออนบวกภายนอก}]} = \frac{[\text{ไอออนลบภายนอก}]}{[\text{ไอออนลบภายใน}]}$$

3. แมสโฟล (mass flow) เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำเป็นกลุ่มเป็นก้อนในทิศทางเดียวกัน สามารถพาแร่ธาตุจากสารละลายเข้าสู่รากพืชโดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึม การคายน้ำของพืชมีผลทำให้กระบวนการดูดธาตุอาหารโดยวิธีนี้เพิ่มขึ้น

4. การแลกเปลี่ยนไอออน (ionic exchange) วิธีนี้เป็นการดูดเกลือแร่โดยการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้โดยตรงระหว่างไอออนที่ผิวราก เนื่องจากการหายใจของรากพืชจะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์รวมตัวกับสารละลายธาตุอาหารพืช

2.4.2 แอคทีฟทราสปอร์ต (Active Transport)

เป็นกระบวนการดูดธาตุอาหารของเซลล์พืช (สมบุญ , 2544) ที่อาศัยพลังงานจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์

ลักษณะที่สำคัญของแอคทีฟทรานสปอร์ต

1. การสะสม (Accumulation) เมื่อปี ค.ศ.1929 Hoagland และ Devis ได้ทดลองเลี้ยงสาหร่าย *Nitella clavita* ในสระน้ำ เนื่องจากสาหร่ายชนิดนี้มีเซลล์ขนาดใหญ่ สามารถแยกเอาสารละลายภายในแวคคิวโอล ออกมาวิเคราะห์ ผลคือไอออนที่พบในสระน้ำมีในเซลล์ด้วย สาหร่ายมีการสะสมไอออนภายในเซลล์สูงกว่าในสระน้ำมาก โดยไอออนที่อยู่ในรูปของสารละลายยังไม่ได้รวมกับสารอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ แสดงว่าไอออนหรือเกลือดูดจากภายนอกหรือจากสระน้ำเข้าไปสะสมในเซลล์ของสาหร่าย และการที่จะดูดเอาไอออนเข้าไปไม่ใช่เป็นการแพร่ธรรมดา แต่ต้องอาศัยพลังงานจากกระบวนการเมทาบอลิซึม เรียกว่า แอคทีฟทรานสปอร์ต สัดส่วนของความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า อัตราส่วนของการสะสม (accumulation ratio)

2. การเลือกดูดไอออน (Selectivity) รากพืชเลือกดูดตัวละลายหรือไอออนที่มีความจำเพาะ โดยจะมีผลกระทบต่อการดูดไอออนอีกตัวหนึ่ง เช่น การศึกษาการดูดไอออนของรากข้าวบาร์เลย์ โดยปล่อยให้รากพืชดูดโพแทสเซียมไอออน (K^+) ในสารละลายเจือจางของโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl 0.2 mM) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl 0.2 mM) ซึ่งมีแคลเซียมไอออน 0.2 mM เพื่อช่วยให้เมมเบรนทำงานปกติ พบว่ารากพืชเลือกดูดโพแทสเซียมไอออนโดยไม่ได้รับความกระทบกระเทือนจากเกลือโซเดียมที่มีความเข้มข้นใกล้เคียงกัน ในทำนองเดียวกันการดูดคลอไรด์ไอออนไม่ถูกรบกวนหรือกระทบต่อการดูดเฮไลด์ (halide) เช่น ไอโอไดด์หรือฟลูออไรด์ สำหรับการดูดเฮไลด์ไม่กระทบต่อการดูดซัลเฟตไอออนหรือฟอสเฟตไอออน

3. การไม่ผันกลับของสารในเซลล์ (Irreversible) ในเซลล์ที่มีชีวิตโดยปกติไอออนเมื่อถูกดูดเข้าไปในเซลล์แล้วจะไม่ไหลย้อนกลับ คือ ไม่รั่วออกนอกเซลล์ เนื่องจากมีเมมเบรนทำหน้าที่ควบคุมการเข้าออกของสารและป้องกันไม่ให้ไอออนรั่วออกจากเซลล์ ยกว้นในเซลล์ที่ตายหรือเมเบรนถูกทำลายและสารละลายหรือไอออนจะรั่วออกนอกเซลล์ ฉะนั้นในเซลล์ที่มีชีวิตการดูดสารละลายเกลือแร่หรือไอออนจะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

4. พลังงานจากกระบวนการเมทาบอลิซึมจำเป็นในการดูดไอออนในการดูดไอออนหรือเกลือแร่แบบแอคทีฟทรานสปอร์จำเป็นต้องอาศัยพลังงาน ATP ที่ได้จากกระบวนการหายใจ การใส่สารที่ยับยั้งกระบวนการหายใจ เช่น โพแทสเซียมไซยาไนด์ (KCN) มีผลทำให้ยับยั้งการดูดและการสะสมไอออน และในทางตรงกันข้ามการเพิ่มอัตราการหายใจให้สูงขึ้น ทำให้การดูดไอออนมีมากขึ้น เมมเบรนของเซลล์มีตัวพาเป็นสารพวกโปรตีนและมีแหล่งให้ไอออนเกาะที่ผิวของตัวพา ตัวพาจะรวมตัวกับไอออนที่ผิวนอกของเมมเบรนเป็นสารประกอบตัวพา-ไอออน (carrier complex) หลังจากนั้นจะเคลื่อนที่ไปอีกด้านของเมเบรนโดยพลังงาน ATP จากนั้นตัวพาจะแตกตัวปล่อยไอออนให้หลุดเข้าไปในเซลล์ ตัวพาก็จะแยกออกกลับมาไปที่ผิวของเมมเบรนที่เดิม และจากการศึกษาการดูดโพแทสเซียมไอออนของรากข้าวบาร์เลย์ในสารละลายพบว่า การสะสมไอออนภายในเซลล์จะเกิดเร็วหรือช้าขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนภายในเซลล์ ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเซลล์มีค่าต่ำ การเพิ่มความเข้มข้นของตัวละลายจะทำให้เพิ่มการดูดและสะสมไอออนของเซลล์อย่างรวดเร็ว จนถึงจุดๆ หนึ่งจึงหยุดสะสม เรียกว่า จุดอิ่มตัวหรือ saturation kinetics ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของตัวละลายให้สูงกว่าเดิม อัตราการการดูดไอออนก็ไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการดูดไอออนจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายภายนอก ลักษณะดังกล่าวนี้คล้ายกับหลักการทำงานของเอนไซม์ การดูดไอออนโดยมีตัวพาที่ผิวของเมมเบรนนี้ ตัวพาจะมีความจำเพาะเจาะจงหรือเลือกดูดไอออนจากสารละลายเข้าสู่เซลล์ และที่สำคัญกรณีที่ไอออนที่มีลักษณะ ขนาดไอออนและคุณสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกันจะมีผลกระทบต่อการดูดไอออนโดยเกิดการแข่งขันในกระบวนการดูดโดยตัวพาชนิดเดียวกันได้ เช่น ไอออนของ Ca^{+2} และ Cd^{+2} จะแก่งแย่งกันดูดกับ Sr^{+2} คลอไรด์ (Cl^-) จะแก่งแย่งกับโบรไมด์ (Br^-) หรือซัลเฟต (SO^{-2}_4) แก่งแย่งกับ (SeO_4)

2.4.3 กลไกลการดูดแร่ธาตุที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน

(สมบุญ, 2544) จากการศึกษาการดูดธาตุอาหารของรากพืช พบว่าการดูดไอออนของรากพืชประกอบด้วยกลไกมากว่า 1 กลไก กลไกแรก (Mechanism I) ดูดซึมไอออนในสารละลายที่มีความเข้มข้นระดับที่ค่อนข้างต่ำ (low salt) อัตราการดูดซึมไอออนเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายภายนอกจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่ง ในปี ค.ศ.1966 Epstein ได้ศึกษาการดูดโพแทสเซียมของรากข้าวบาร์เลย์พบว่าเมื่อความเข้มข้นของตัวละลายต่ำ (0.2 mM, KCl) อัตราการดูดสารละลายโดยตัวพานี้จะถึงจุดอิ่มตัวเป็นไปตามกลไกแรก การสะสมโพแทสเซียมเป็นการเลือกที่ไม่ได้รับผลกระทบจากเกลือโซเดียม สำหรับเกลือแคลเซียมมีความจำเป็นต่อการเลือกดูดโพแทสเซียมของราก นอกจากนี้พบว่าประจุลบ เช่น ซัลเฟตไอออน (SO^{-2}_4) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ไม่มีผลต่อการดูดโพแทสเซียม

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวละลายให้สูงขึ้นมากๆ (0.5-50 mM , KCl) Epstein พบว่าอัตราเร็วของการดูดโพแทสเซียมจะเพิ่มขึ้นอีก อย่างรวดเร็ว แสดงว่ามีกลไกอีกชนิดหนึ่งเกิดขึ้น และกลไกนี้ทำงานที่สารละลายเกลือซึ่งมีความเข้มข้นสูง (height salt) เรียกกลไกที่ 2 (Mechanism II) มีอัตราการดูดไอออนเร็วกว่าการแพร่ธรรมดา และถูกยับยั้งได้ด้วยสาร ยับยั้งการหายใจ Epstein ได้สรุปผล จากการศึกษาการดูดไอออนของพืช 17 ชนิด พบว่าการดูดไอออนของรากพืชมีกลไกทั้ง 2 ชนิด (dual mechanism) ทั้งกลไกที่ 1 และ 2 เกิดขึ้นที่พลาสมาเลมมา (plasmalemma) หรือเซลล์เมมเบรน (Cell membrane)

พลาสซีฟแทรนสปอร์ตและแอคทีฟแทรนสปอร์ต

Fisher & Hudges (1969) ได้ศึกษาพบความสัมพันธ์ของ ATPase กับการเคลื่อนย้ายของไอออนผ่านเมมเบรน การเคลื่อนย้ายของตัวละลายผ่านเมมเบรนโดยอาศัยตัวพา ATPase ต้องอาศัยพลังงานจาก ATP ที่ได้จากการหายใจของเซลล์เป็นส่วนใหญ่ จากการไฮโดรไลซ์ ATP โดยอาศัยเอนไซม์ ATPase

$$ATP + H_2O \xrightarrow{ATPase} ADP + Pi \ (\Delta G = -7.6 \text{ กิโลแคลอรีต่อโมล})$$

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแอคทีฟทรานสปอร์ต

1. **อุณหภูมิ อัตราการดูดธาตุอาหารจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นผลจากการเพิ่ม อัตราการหายใจของพืช แต่เมื่ออุณหภูมิสูง 40 องศาเซลเซียส อัตราการดูดแร่ธาตุจะ** ลดลง เพราะอุณหภูมิจะลดประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจของพืช การเพิ่มอุณหภูมิเพียง 10 องศาเซลเซียสในช่วงอุณหภูมิ 10 – 30 องศาเซลเซียส เช่นเพิ่มจาก 15 เป็น 25 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราเร็วของเมทาบอลิซึมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า มีผลทำให้การดูดแร่ธาตุเพิ่มขึ้น

2. สมบุญ (2544) กล่าวว่า Hoagland และคณะ (1992) พบว่า ในสภาพที่มีออกซิเจนน้อยหรือขาด ออกซิเจนอัตราการดูดแร่ธาตุจะลดลงหรือชะงัก โดยปกติออกซิเจนที่เหมาะสมทำให้อัตราการดูดแร่ธาตุได้สูงสุดคือประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ถ้าปริมาณออกซิเจนลดลงกว่านี้อัตราการดูดแร่ธาตุจะลดลง

3. แสง มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง คาร์โบไฮเดรท หรือน้ำตาลในพืช อาหารเหล่านี้ถูกส่งไปยังส่วนต่างๆ รวมทั้งรากด้วย การดูดธาตุอาหารต้องการพลังงานจากกระบวนการเมทาบอลิซึม โดยการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรท ซึ่งพืชส่งมายังรากและปล่อยพลังงาน ATP เพื่อใช้ในกระบวนการแอคทีฟทรานสปอร์ต

4. Hoagland & Broyer (1992) พบว่าปริมาณของคาร์โบไฮเดรทในรากลดลงเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มความเข้มข้นของแร่ธาตุในเซลล์ Hoagland ได้ทดลองใช้รากข้าวบาร์เลย์ที่มีปริมาณน้ำตาลในรากน้อย ในการดูดโพแทสเซียมไอออนในสารละลาย ถ้าเพิ่มน้ำตาลลงในสารละลาย จะพบว่าการดูดโพแทสเซียมในรากเพิ่มขึ้น

5. สารพิษ บางอย่างมีผลทำให้กระบวนการเมทาบอลิซึมของเซลล์ผิดปกติทำให้การดูดไอออนหรือธาตุอาหารของรากพืชชะงักด้วย เช่นการเติมไซยาไนด์ลงไปในการทดลอง พบว่าจะลดอัตราการดูดธาตุอาหารของรากพืช

6. ความเป็นกรด-เบสในสารละลาย มีผลต่อรูปของธาตุอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ **และมีผลต่อการดูดไอออนหรือธาตุอาหารของพืช ในสารละลาย**

7. **ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนต่างชนิดกัน มีผลต่ออัตราการดูดไอออนหรือแร่ธาตุของรากพืช การเติมแอมโมเนียมไอออนลงในสารละลายจะช่วยทำให้อัตราการดูดฟอสเฟตไอออนได้ดี การดูดไนเตรทไอออนจะถูกกระตุ้นด้วยซัลเฟตไอออนหรือฟอสเฟตไอออน ในขณะที่การดูดโพแทสเซียมไอออนจะลดลงถ้ามีแอมโมเนียมไอออนอยู่ในสารละลาย เช่นเดียวกับการดูดโซเดียมไอออนจะลดลง ถ้ามีโพแทสเซียมในสารละลาย**

4840164
20 ก.ค. 2548
สำนักหอสมุด

8. ระยะการเจริญเติบโตของพืช ในเซลล์พืชที่มีอายุน้อยการดูดไอออนหรือแร่ธาตุจะเกิดมากกว่าเซลล์ที่มีอายุมาก

9. จุลินทรีย์บางชนิด เช่น ไมคอไรซ่า มีผลช่วยให้การดูดแร่ธาตุพวกฟอตเฟตไอออนในรากพืชเพิ่มขึ้นการมีเชื้อราไมคอไรซ่าอยู่ร่วมกับรากพืช จะช่วยเพิ่มพื้นผิวรากในการดูดและเคลื่อนย้ายธาตุอาหารต่าง ๆ เป็นต้น

2.4.4 ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช

ธาตุอาหารที่พบในพืชไม่น้อยกว่า 60 ธาตุ นั้นไม่ได้จำเป็นต่อพืชทั้งหมด ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มได้แก่

1. มหธาตุ หรือแมคโครนิวเทรียนต์ (macronutrients) คือธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก ประมาณ 1,000 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืช 1 กรัม ซึ่งมี 9 ธาตุคือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) กำมะถัน (S) และธาตุ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) เป็นธาตุที่มีอยู่มากในธรรมชาติ ซึ่งพืชจะได้รับจากน้ำและธรรมชาติ ส่วนธาตุที่เหลือสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1.1 ธาตุอาหารหลัก มีดังนี้ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K)

1.2 ธาตุอาหารรอง มีดังนี้ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และกำมะถัน (S)

2. จุลธาตุหรือไมโครนิวเทรียนต์ (Micronutrients) หรือเรียกว่าธาตุอาหารเสริม คือธาตุอาหารที่พืชต้องการจำนวนน้อยกว่าธาตุอาหารหลัก มี 7 ธาตุ คือ โบรอน (B) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) โมลิบดินัม (Mo) และคลอรีน (Cl) ส่วนใหญ่พืชต้องการน้อยกว่า100 ไมโครกรัมต่อน้ำหนักแห้งของพืช หนึ่งกรัม

นอกจากธาตุอาหารดังกล่าวทั้ง 2 กลุ่มแล้วยังมีพืชบางชนิดต้องการแร่ธาตุที่แตกต่างออกไปเช่น โคบอลท์ (Co) โซเดียม (Na) อะลูมิเนียม (Al) แวนาเดียม (Va) ซิลิเนียม (Se) และ ซิลิกอน (Si) เรียกธาตุกลุ่มหลังว่า beneficial elements

ตาราง 2 แสดงธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช และปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่พบในพืช

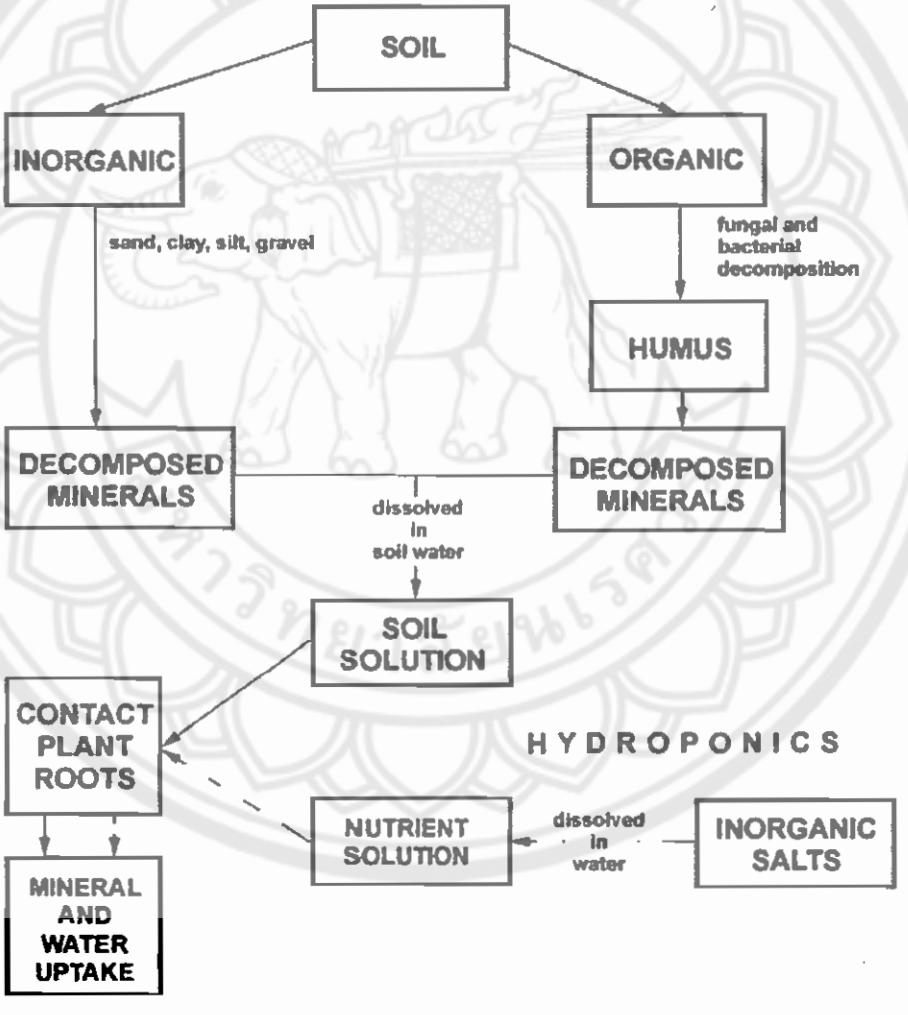
ธาตุ	สัญลักษณ์ทางเคมี	รูปที่พืชดูดไปใช้ประโยชน์ได้	น้ำหนักอะตอม	ปริมาณธาตุอาหารต่อปริมาณน้ำหนักแห้งของพืช	
				(ppm)	(%)
Molybdenum	Mo	MoO_4^{2-}	95.95	0.01	0.00001
Copper	Cu	Cu^{+}, Cu^{2+}	63.54	6	0.0006
Zinc	Zn	Zn^{2+}	65.38	20	0.0020
Manganese	Mn	Mn^{2+}	54.94	50	0.0050
Boron	B	H_3BO_3	10.82	20	0.002
Iron	Fe	Fe^{2+}, Fe^{3+}	55.85	100	0.010
Chlorine	Cl	Cl^{-}	35.46	100	0.010
Sulfur	S	SO_4^{2-}	32.07	1,000	0.1
Phosphorus	P	H_2PO , HPO_4^{2-}	30.98	2,000	0.2
Magnesium	Mg	Mg^{2+}	24.32	2,000	0.2
Calcium	Ca	Ca^{2+}	40.08	5,000	0.5
Potassium	K	K^{+}	39.10	10,000	1.0
Nitrogen	N	NO_3 , NH_4^{+}	14.01	15,000	1.5
Oxygen	O	O_2 , H_2O	16.00	450,000	45
Carbon	C	CO_2	12.01	450,000	45
Hydrogen	H	H_2O	1.01	60,000	6

ที่มา : สมบุญ , 2544

2.5 การปลูกพืชในสารละลายหรือน้ำยาไฮโดรโปรนิกส์

การปลูกพืชในสารละลายหรือน้ำยาไฮโดรโปรนิกส์ (Hydroponic culture) ได้เริ่มขึ้นเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1860 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันคือ Julius von Sachs และ W. Knop จุดประสงค์เพื่อศึกษาว่าธาตุใดที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยอาศัยหลักเกณฑ์ที่ว่า "ถ้าพืชขาดธาตุนั้นทำให้พืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ "

เมื่อวิทยาศาสตร์เจริญก้าวหน้าขึ้นนักวิทยาศาสตร์จึงคิดพัฒนาน้ำยาไฮโดรพอนิกส์โดยลดสิ่งปนเปื้อนให้น้อยลงและปรับปรุง ภาชนะที่ใช้ในการปลูก



ภาพ 4 แสดงแหล่งที่มาของการปลูกพืชบนดินและปลูกแบบไฮโดรโปรนิกส์

ที่มา : http://www.treemediation.com/technical/phytoremediation_1998.pdf

สืบค้นวันที่ 9 กันยายน 2546

สูตรของน้ำยาไฮโดรโปรนิกส์มีหลายสูตร ในปัจจุบันนิยมใช้น้ำยาของ Hoagland หรือน้ำยาของ Evan สารละลายจะมีปริมาณธาตุอาหารที่เข้มข้นกว่าปริมาณแร่ธาตุที่ละลายอยู่ในดิน (Soil solution) เพื่อลดปัญหาการเปลี่ยนน้ำยาบ่อยครั้งนอกจากน้ำยาไฮโดรโปรนิกส์จะมีประโยชน์ในการศึกษาแต่ก็มีข้อจำกัดคือ สารละลายจะต้องได้รับอากาศ ส่วนมากใช้การเป่าลงไป (Aeration) ต้องคอยเปลี่ยนสารละลายทุก 1 - 2 วันเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนไป เพราะรากพืชมีความจำเพาะในการดูดธาตุอาหารและอัตราการดูดไอออนต่างกัน ค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายก็มีผลต่อการดูดไอออนของรากพืชทำให้ธาตุอาหารในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (available form of nutrient) เปลี่ยนไปด้วย

นอกจากนี้ต้องสนใจเรื่องความเป็นกรดของสารละลายเพราะหมายถึงการละลายได้ของแร่ธาตุต่างๆ ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ ความเป็นกรดหมายถึงความสามารถของน้ำที่ทำปฏิกิริยาม่าฤทธิ์ของด่างได้ ซึ่งต่างกับค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่เป็นการวัดค่าความเข้มข้นของกรดหรือด่างในน้ำ ความเป็นกรดของน้ำมีสาเหตุมาจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอนินทรีย์ และกรดเกลือของกรดแก่ที่มีอยู่ในน้ำ ปกติแล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นต้นเหตุของความเป็นกรดในน้ำ เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำ จะได้กรดคาร์บอนิกซึ่งเป็นกรดอ่อน

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 \longrightarrow H^+ + HCO^-_3$$

น้ำที่มีความเป็นกรดที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำ จะมีค่าความเป็นกรด - ด่างมากกว่า 4.5 ส่วนน้ำที่มีความเป็นกรดที่เกิดจากกรดอนินทรีย์ จะมีค่าความเป็นกรดด่าง น้อยกว่า 4.5 ฉะนั้นจึงแบ่งความเป็นกรดออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ความเป็นกรดเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide Acidity)
2. ความเป็นกรดเพิ่มเนื่องจากกรดอนินทรีย์ (Mineral Acidity) อาจเกิดจากกรดเกลือที่ใส่ลงในสารละลายซึ่งก็คือแร่ธาตุต่างๆ นั่นเอง

ตาราง 3 แสดงสูตรน้ำยาเคมี Hoagland's Solution (Salisbury and Ross, 1992)

Salt	Molarity	Mg/g (ppm)
KNO_3	0.006	
$Ca(NO_3)_2$	0.004	
$NH_4H_2PO_4$	0.001	
$MgSO_4.7H_2O$	0.002	
Mixture of 0.5 % $FeSO_4$ and 0.4 % tartaric acid : 0.6 ml/l added 3 times/week		
$MnCl_2.7H_2O$		0.5 Mn ;6.5 Cl
H_3BO_3		0.5 B
$ZnSO_4.7H_2O$		0.5 Zn
$CuSO_4.5H_2O$		0.02 Cu
$H_2MoO_4.H_2O$		0.02 Mo

ที่มา : สมบุญ , 2544

ธาตุอาหารส่วนใหญ่จะถูกดูดซึมทางรากในรูปเกลือที่ละลายน้ำ ยกเว้นธาตุคาร์บอน ออกซิเจน และไฮโดรเจนที่พืชได้จากอากาศและน้ำ ส่วนไนโตรเจนพืชได้จากดินหรือตรึงจากอากาศโดยอาศัยจุลินทรีย์บางชนิดในรากหรือใบ

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

O. Keskinkan และคณะ (2004) ได้ทดลองใช้ *Ceratophyllum demersum* (สาหร่ายพุงชะโด) ในการดูดซับ ตะกั่ว, สังกะสี และทองแดง จากสารละลาย โดยในเวลา 20 นาที สามารถดูดซับทองแดงได้ 6.17 มิลลิกรัมต่อกรัม, สังกะสี 13.98 มิลลิกรัมต่อกรัม และตะกั่ว 44.8 มิลลิกรัมต่อกรัม

Eva Stoltz & Maria. (2002) ได้ทดลองการดูดซับ อาร์เซนิกส์ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และ สังกะสี จากสารละลายธาตุอาหารพืช โดยได้ศึกษาพืชจำนวน 4 ชนิด คือ หญ้าหางแมว (*Typha domingensis*), duckweed *(Lemna obscurea)*,สาหร่ายหางกระรอก (*Hydrilla verticillata Royle)*, และบัว (*Crinum americanum*)ในการดูดซับซีลีเนียม ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ซึ่ง สาหร่ายหางกระรอก (*Hydrilla verticillata*

Royle) มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักมากที่สุดโดยระดับความเข้มข้นไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับซีลีเนียมได้ถึง ร้อยละ 100 และเมื่อความเข้มข้นของซีลีเนียม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีอัตราการดูดซับลดลง แต่ยังมีความในการดูดซับถึงร้อยละ 92 ขึ้นไป

Edward G. Gatliff, M.Cristina Nagri & Ray R. Hincmand (1998) ได้ทำการศึกษา โดยใช้พืชที่อยู่บริเวณที่มีการปนเปื้อนของสังกะสีบริเวณหนึ่งชื่อว่าGamagrass *(Tripsacumdactyoides)* ดูดซับโลหะหนักสังกะสีที่ทำการในโรงเรือนทดลองพบว่าในเวลา 4 ชั่วโมงต้นไม้ที่เขาทำการทดลองสามารถดูดซับ สังกะสีขึ้นไปที่ส่วนของรากได้มากกว่า 38,000 ไมโครกรัมต่อกรัม ของรากแห้ง และก็ได้นำไปใช้ในพื้นที่จริงต่อมา

Eva Stoltz และ Maria Greger (2001) ได้ทำการศึกษา ประสิทธิภาพการดูดซับ โลหะหนัก 5 ชนิดคือ As, Cd, Cu, Pb และ โดยใช้พืช 4 ชนิดที่เติบโตในพื้นที่น้ำขังบริเวณเหมืองแร่เก่าที่มีโลหะดังกล่าว ในการศึกษาของเขาเพื่อดูการสะสม การดูดซับของส่วนต้นส่วนราก และการเจริญเติบโตของพืช ในการทดลองนำพืชทั้งหมดมาปลูกในสภาพไฮโดรโปรนิกส์พืชที่ใช้คือ *Salix* (เป็นพันธุ์ผสมระหว่าง *S.phylicifolia และ S. borealis)* *Carex rostrata*, *Eriophorum angustifolium* และ *Phramites australis* และเปรียบเทียบกับพืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่จริง การปลูกในสภาพไฮโดรโปรนิกส์นั้นนำพืชทดลองมาจากที่อื่นที่ไม่มีการปนเปื้อน พบว่า *Carex rostrata* สะสมแคดเมียมและสังกะสีไว้ที่ส่วนลำต้นมากกว่าส่วนราก ส่วน *Salix*, *Eriophorum angustifolium* และ *Phramites australis* สะสมส่วนรากมากกว่าส่วนต้น

Elankumaran R., Raj Mohan B. and M.N. Madhyastha (2004) ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงของ *Hydrilla verticillata Casp* และ *Salvinia sp* จากน้ำที่มีการปนเปื้อน ทดลองในความเข้มข้นของทองแดง 5 ระดับ ตรวจความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายที่ปลูกทุก 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 10 วันพบว่า *Salvinia sp* มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

Xiaomei Lu, Maleeya Kruatrachue, Prayad Pokethiiyook & Kunapom Homyok (2004)ได้ศึกษาการดูดซับแคดเมียมและสังกะสี โดยใช้ผักตบชวาปลูกลงในน้ำที่ผสมแคดเมียมและสังกะสีโดยใส่แคดเมียมความเข้มข้น 0.5, 1, 2และ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และใส่สังกะสีเข้มข้น 5, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการตรวจวัดแคดเมียมในพืชหลังจากปลูก 0, 4, 8 และ 12 วัน พบว่าทั้งแคดเมียม และสังกะสีมีผลต่อการเจริญเติบโตของผักตบชวา การสะสมแคดเมียมและสังกะสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาปลูกพืชเพิ่มขึ้น การสะสมของแคดเมียมจะมากเมื่อปลูกผักตบชวาในความเข้มข้นของแคดเมียม 4 มิลลิกรัมต่อลิตรหลังจากปลูก 8 วัน ในขณะที่สังกะสีจะสะสมในผักตบชวาสูงสุดเมื่อปลูกในความเข้มข้นของสังกะสี 40 มิลลิกรัมต่อลิตรหลังจากปลูก 4 วัน

Ekkasit Aksonand และ Pornsawan Visoottiviseth (2004) ทำการทดลองปลูกพืช 5 ชนิดคือต้นบอน, พุทธรักษาและ ธูปฤาษี ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ใส่อาร์เซนิกส์เข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปลูกเป็นระยะเวลา 28 วัน โดยเก็บตัวอย่างพืชเพื่อตรวจวิเคราะห์อาร์เซนิกส์หลังจากปลูก 14 และ 28 วัน ตรวจความเข้มข้นของอาร์เซนิกส์ของสารละลายหลังจากปลูก 7, 14, 21 และ 28 วันพบว่า อาร์เซนิกส์ถูกสะสมมากในรากของต้นบอนหลังจากปลูก 28 วัน ส่วนสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปลูกต้นบอนมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น