

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



2.1 ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าว

ธาตุอาหารที่สำคัญและจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าว ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), โพแทสเซียม (K), คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg), ซัลเฟอร์ (S), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), โมลิบดีนัม (Mo), โบรอน (B), คลอรีน (Cl) และซิลิกอน (Si) ซึ่งจัดเป็นธาตุอาหารเสริมสำหรับต้นข้าว (เวเอการา, 2526; Yoshida, 1981)

การสะสมธาตุอาหารที่บริเวณส่วนต่างๆ ของต้นข้าวแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1) โดยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมักจะสะสมอยู่ที่บริเวณรวงข้าวมากกว่าในตอซัง ขณะที่โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิกอน แมงกานีส เหล็ก และโบรอน จะพบอยู่ในตอซังมากกว่าบริเวณรวงข้าว สำหรับซัลเฟอร์ สังกะสี และทองแดง ปริมาณที่พบได้ทั้งในส่วนของตอซังและรวงข้าวใกล้เคียงกัน (Yoshida, 1981; ทัศนีย์ อัดตะนันท์, 2543)

สำหรับต้นข้าวนั้นธาตุปุ๋ยจัดเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นและขาดไม่ได้ ในเขตร้อนชื้น การผลิตข้าว 1 ตัน ต้นข้าวจะดูดดึงธาตุปุ๋ย อันได้แก่ ไนโตรเจนประมาณ 19-24 กิโลกรัม ฟอสฟอรัสประมาณ 4-6 กิโลกรัม และโพแทสเซียม 35-50 กิโลกรัม หรือโดยเฉลี่ยต้นข้าวจะดูดดึงไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ปริมาณ 20.5, 5.1 และ 44.4 กิโลกรัม ตามลำดับ (Yoshida, 1981)

2.1.1 ความสำคัญของธาตุปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตของข้าว

ธาตุปุ๋ย (Fertilizer element) ประกอบด้วย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นกลุ่มธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก และมักได้รับจากดินไม่เพียงพอ (คณาจารย์ ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) โดยไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญและมีบทบาทต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก และมักจะพบว่าในดินปลูกพืชโดยทั่วไปมักขาดธาตุไนโตรเจน เนื่องจากพืชมีความต้องการธาตุไนโตรเจนในปริมาณมาก และในดินมีปริมาณไม่เพียงพอ ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญและจำเป็นธาตุหนึ่ง โดยทำหน้าที่ถ่ายทอดพันธุกรรมของพืช แต่ในดินมีธาตุฟอสฟอรัสไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช เนื่องจากถูกตรึงหรือเปลี่ยนแปลงได้ง่ายกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง สำหรับโพแทสเซียมเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแร่และหิน ซึ่งเป็นวัตถุดิบกำเนิดดินหลายชนิด ในดินโดยทั่วไปพบว่ามี

ธาตุโพแทสเซียมกระจายทั่วไปทั้งดินชั้นบนและดินชั้นล่างซึ่งพบว่ามีปริมาณไม่แตกต่างกัน (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544) ความสำคัญของธาตุปุ๋ยมี่ดังนี้

2.1.1.1 ไนโตรเจน (N)

รูปของไนโตรเจนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์คือ ไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) แอมโมเนียมไนโตรเจน (NH_4^+ -N) และยูเรีย หรืออามีน (R-NH_2) สำหรับยูเรียนั้นแม้ว่าพืชจะดูดดึงไปใช้ได้โดยตรงแต่สารนี้มีอยู่ในธรรมชาติน้อย พืชดูดดึงมาใช้มากเฉพาะในกรณีที่ใส่ปุ๋ยยูเรียสังเคราะห์เท่านั้น (ขงยุทธ โอสดสภา, 2546) นอกจากนี้พืชจะได้รับธาตุไนโตรเจนจากแหล่งอื่นๆ เช่น จากการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ การแปรสภาพของสารประกอบอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ดิน และพืชชั้นต่ำบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้ จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ที่มีบทบาทสำคัญทางเกษตร คือ แบคทีเรียชื่อไรโซเบียม (*Rhizobium*) เนื่องจากสามารถตรึงไนโตรเจนได้เมื่ออยู่ร่วมกับรากพืชตระกูลถั่ว ทั้งนี้ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนในดินมีสัมพันธ์กับอินทรีย์วัตถุ จุลินทรีย์ดิน และสภาพแวดล้อมต่างๆ ในดิน (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544)

ทั้งนี้รูปของไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชนั้นยังขึ้นอยู่กับการระบายอากาศของดิน โดยดินที่มีการระบายอากาศดีแอมโมเนียมไนโตรเจนจะผ่านกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) กลายเป็นไนเตรทไนโตรเจน ทำให้พืชได้รับทั้งแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์ แต่สำหรับพืชที่ปลูกในดินที่มีการระบายอากาศไม่ดี เช่น ข้าวซึ่งมักปลูกในดินกรด กระบวนการไนตริฟิเคชันซึ่งเป็นการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมไนโตรเจนกลายเป็นไนเตรทไนโตรเจนถูกยับยั้ง ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์จึงเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจนมากกว่าไนเตรทไนโตรเจน (ขงยุทธ โอสดสภา, 2546; Tanaka และ Yoshida, 1970) ถึงแม้ว่าจะมีทั้งแอมโมเนียมไนโตรเจนและไนเตรทไนโตรเจนในสารละลายดินแต่ข้าวก็มักจะดูดแอมโมเนียมไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์มากกว่า (Yoshida, 1981)

ความสำคัญของไนโตรเจนต่อการเจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ ในช่วงระยะแรก ทำให้ข้าวตั้งตัวเร็ว ส่งเสริมการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ ทำให้ใบข้าวมีสีเขียว ช่วยควบคุมการออกดอก เพิ่มปริมาณโปรตีนโดยไนโตรเจนจะเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตให้เป็นโปรตีน และปริมาณผลผลิตของข้าวเพิ่มขึ้น ช่วยลดความเป็นพิษเนื่องจากอะลูมิเนียม (Al) และแมงกานีส (Mn) ที่ละลายออกมามากในดินกรด เนื่องจากแอมโมเนียมไนโตรเจนมีภาวะปฏิปักษ์ (Antagonism) ต่อการดูดดึงอะลูมิเนียม และแมงกานีสของรากพืช ทั้งนี้ในช่วงระยะแรกของการเจริญเติบโต (Early growth stage) ต้นข้าวจะดูดดึงไนโตรเจนเพื่อใช้สำหรับการเจริญเติบโตทางด้านลำต้น และช่วงระยะหลังการเจริญเติบโต (Later growth stage) ไนโตรเจนที่ถูกดูดดึงจะ

นำไปใช้สำหรับการสร้างเมล็ด (De Datta, 1981; Yoshida, 1981; อรรถวุฒิ ทัศนสองชั้น, 2527; ยงยุทธ โอสดสภา, 2546)

2.1.1.2 ฟอสฟอรัส (P)

ฟอสฟอรัสในสารละลายดินเป็นแอนไอออนของกรดอโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) รูปของไอออนจึงมี 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของสารละลายดิน เมื่อความเป็นกรดเป็นด่างของดินต่ำกว่า 6.80 รูปที่เป็นประโยชน์และมีอยู่มากคือ $H_2PO_4^-$ ซึ่งพืชดูดดึงไปใช้ได้ง่ายที่สุด ความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 6.80-7.20 จะมีอยู่ในรูป HPO_4^{2-} มาก ซึ่งพืชดูดดึงได้ช้ากว่ารูปแรก หากความเป็นกรดเป็นด่างสูงกว่า 7.20 จะมี PO_4^{3-} เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งพืชดูดดึงได้ยาก เมื่อพืชดูดดึงฟอสเฟตไอออนเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชแล้วจะไม่ผ่านกระบวนการรีดักชันเพื่อเปลี่ยนรูปเหมือนไนเตรทไนโตรเจนแต่คงอยู่ในรูปของฟอสเฟตเหมือนเดิมในสองสภาพคือ อนินทรีย์ฟอสเฟต และองค์ประกอบในสารอินทรีย์ (ยงยุทธ โอสดสภา, 2546) นอกจากนี้ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินยังเกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสอย่างยิ่ง โดยเมื่อดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 5.00 ฟอสเฟตไอออนจะถูกตรึงให้อยู่ในรูปของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งละลายน้ำได้ยากและไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544; มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544)

ต้นข้าวต้องการฟอสฟอรัสในช่วงระยะแรกของการเจริญเติบโต เนื่องจากช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของรากข้าวทั้งในส่วนของรากฝอย รากแขนงและลำต้น ซึ่งทำให้ลำต้นไม่ล้มง่าย ช่วยในการดูดดึงโพแทสเซียมและควบคุมสมดุลไนโตรเจนของราก อีกทั้งช่วยเร่งการเจริญเติบโตของต้นข้าว ทำให้ออกดอกเร็วขึ้นและทำให้เมล็ดข้าวมีคุณภาพดีขึ้น (อรรถวุฒิ ทัศนสองชั้น, 2527; Yoshida, 1981)

2.1.1.3 โพแทสเซียม (K)

โพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช คือ โพแทสเซียมไอออน (K^+) เมื่ออยู่ในพืช โพแทสเซียมเคลื่อนย้ายไปยังส่วนต่างๆ ได้อย่างสะดวกไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนย้ายภายในเซลล์ ระหว่างเซลล์ในเนื้อเยื่อ การเคลื่อนย้ายระยะทางไกลทางไซเล็มและโพลเอม ในเชิงปริมาณธาตุนี้มีในพืชมากกว่าแคดไอออนอื่นๆ จึงเป็นธาตุซึ่งทำหน้าที่ลดศักย์ออสโมซิส (Osmotic potential) ภายในเซลล์และเนื้อเยื่อของพืช (ยงยุทธ โอสดสภา, 2546)

ความสำคัญของโพแทสเซียมต่อต้นข้าว คือช่วยสร้างคาร์โบไฮเดรตทำให้เมล็ดข้าวสมบูรณ์และมีน้ำหนักดี ส่งเสริมพัฒนาการของรากข้าวช่วยให้รากดูดน้ำได้ดีขึ้น ส่งผลให้ต้นข้าวสามารถทนแล้งได้ดี (อรรถวุฒิ ทัศนสองชั้น, 2527)

2.1.2 การสูญเสียธาตุปุ๋ย

การสูญเสียธาตุปุ๋ยจากดิน สามารถเกิดขึ้นตามธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ โดยการสูญเสียธาตุปุ๋ยที่เกิดขึ้นอาจเกิดแบบชั่วคราวหรือถาวร ซึ่งการสูญเสียที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องมีการเติมธาตุปุ๋ยกลับคืนสู่ดิน เพื่อให้ดินมีธาตุปุ๋ยที่เพียงพอสำหรับการปลูกข้าวต่อไป สาเหตุการสูญเสีย ได้แก่

2.1.2.1 การเก็บเกี่ยวผลผลิตและนำฟางออกจากพื้นนา

การเก็บเกี่ยวผลผลิตและนำฟางออกจากพื้นนาเป็นการสูญเสียธาตุปุ๋ยแบบถาวร ขณะที่การคูดึงธาตุปุ๋ยของพืชและจุลินทรีย์ไปใช้ประโยชน์ในการเสริมสร้างการเจริญเติบโต จัดเป็นการสูญเสียแบบชั่วคราวเพราะธาตุปุ๋ยที่พืชและจุลินทรีย์เหล่านั้นคูดึงไปจะกลับคืนสู่ดินเมื่อพืชและจุลินทรีย์นั้นตายแล้วเกิดการเน่าเปื่อยลง ทั้งนี้การเติมปุ๋ยหรือนำวัสดุเหลือใช้ที่มีองค์ประกอบของธาตุปุ๋ย และไม่นำฟางออกจากพื้นนา โดยไถกลบฟางเพื่อให้อยู่สลายเป็นอินทรีย์วัตถุต่อไป จะช่วยลดการสูญเสียธาตุปุ๋ย (ขงยุทธ โอสดสภา, 2546)

2.1.2.2 การระเหย (Volatilization)

การระเหยเป็นการสูญเสียธาตุปุ๋ยในรูปของก๊าซ โดยจะเกิดขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาพที่มีการถ่ายเทอากาศไม่ดี เช่น ในสภาพที่มีน้ำขัง ในสภาพนี้ดินจะขาดออกซิเจนและดินก็จะเกิดกระบวนการรีดักชัน (Reduction) ซึ่งมีผลทำให้ไนโตรดไนโตรเจน (NO_2^- -N) และไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^- -N) เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซได้ (ขงยุทธ โอสดสภา, 2546) ขณะเดียวกันฟอสฟอรัสอาจจะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซฟอสฟีน (PH_3) แล้วระเหยขึ้นสู่อากาศ (มุกดา สุขสวัสดิ์, 2544)

2.1.2.3 กษัยการของดิน (Soil erosion)

การพังทลายของหน้าดิน และการชะละลายธาตุอาหารไปกับน้ำที่ไหลบ่าฝนที่ตกลงมาหรือน้ำชลประทานที่ซึมผ่านชั้นของดินจะชะเอาธาตุปุ๋ยตามลงไปด้วย โดยเฉพาะไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนโตรดไนโตรเจน หรือไนเตรทไนโตรเจน ถ้าหากธาตุอาหารที่ถูกชะลงไปยังชั้นล่างของดินไม่ลึกมาก รากของพืชก็จะดูดกลับขึ้นมาใหม่ แต่ถ้าถูกชะลงไปยังดินชั้นล่างที่ลึกจนรากหยั่งลึกไม่ถึง การสูญเสียธาตุอาหารก็จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะบริเวณที่มีดินเนื้อหยาบ (ขงยุทธ โอสดสภา, 2528; คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

2.1.3 ผลกระทบของธาตุปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว

การเติมธาตุปุ๋ยลงสู่ดินมากเกินไปหรือการสูญเสียจากสาเหตุต่างๆ ส่งผลให้ดินขาดธาตุปุ๋ย จะมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว ดังนี้

2.1.3.1 ไนโตรเจน (N)

ผลกระทบที่ปรากฏเด่นชัดเมื่อดินขาดธาตุไนโตรเจนคือ บริเวณใบของต้นข้าวจะยาวและกว้างกว่าปกติ แต่ใบบางลง ใบจึงอ่อนและโค้ง สังเกตสีเหลืองที่ปลายใบอ่อนและเส้นกลางใบ การแตกกอและการเจริญทางความสูงจะหยุดชะงักลง และถ้าขาดไนโตรเจนมากๆ ต้นข้าวทั้งต้นจะเหลืองผอม ใบเล็กแหลม ไม่มีการแตกกอ หากเกิดขึ้นในระยะตั้งท้อง จะทำให้จำนวนเมล็ดต่อรวงลดลง น้ำหนักเมล็ดจะน้อยลงส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ลดลง (อรรควุฒิ ทัศนีสองชั้น, 2527; ยงยุทธ โอสถสภา, 2546; Yoshida และ Ancajas, 1969)

หากได้รับไนโตรเจนปริมาณมากตั้งแต่ระยะแรกนั้นส่วนลำต้นจะเจริญเติบโตเร็วแต่รากเจริญช้า ลำต้นสูงชะลูด มีสีเขียวจัด แตกกอมาก ลำต้นอ่อนแอและทำให้ล้มง่าย ความต้านทานต่อโรคและแมลงลดลง ข้าวจะสุกแก่และเก็บเกี่ยวได้ช้ากว่าปกติ เพราะไนโตรเจนจะทำให้ต้นข้าวเจริญเติบโตไปเรื่อยๆ ผลผลิตของข้าวที่ได้จะน้อยกว่าปกติเนื่องจากการเจริญเติบโตต้นลำต้นมากกว่า ส่งผลให้ต้นข้าวจะไม่ออกดอก (De Datta, 1981; อรรควุฒิ ทัศนีสองชั้น, 2527)

2.1.3.2 ฟอสฟอรัส (P)

การขาดธาตุฟอสฟอรัสจะส่งผลกระทบต่อพัฒนาการของรากจะเป็นไปอย่างช้ามาก ทำให้ต้นข้าวจะล้มง่าย ใบล่างๆ ของต้นข้าวจะเริ่มมีสีม่วงแกมเขียว การแตกกอจะลดลง การสุกแก่จะช้ากว่าปกติ เพราะออกดอกช้า ส่งผลกระทบต่อการสร้างเมล็ดทำให้เมล็ดที่ได้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา (อรรควุฒิ ทัศนีสองชั้น, 2527; Barry และ Miller, 1989)

หากได้รับธาตุฟอสฟอรัสมากเกินไป จะส่งผลกระทบต่ออาการขาดธาตุสังกะสี (Zn) โดยรากข้าวลดลง การแตกกอลดลง ส่วนต่างๆ ของต้นข้าวจะมีสีเหลือง โดยเริ่มปรากฏระหว่างเส้นใบใกล้กับปลายใบ ทำให้ข้าวสุกแก่ช้าและผลผลิตต่ำ (De Datta, 1981; อรรควุฒิ ทัศนีสองชั้น, 2527)

2.1.3.3 โพแทสเซียม (K)

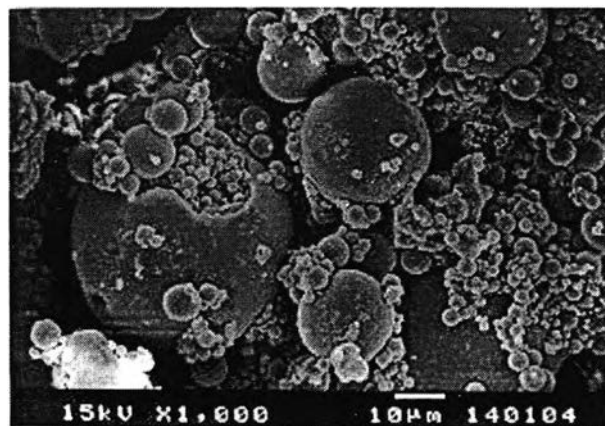
ผลกระทบที่ปรากฏเมื่อดินขาดโพแทสเซียมคือ การแตกกอลดลงส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวช้ากว่าปกติ ขอบใบจะเหลืองแล้วกลายเป็นสีน้ำตาล โดยจะเริ่มจากปลายใบเข้าสู่กลางใบ จนในที่สุดส่วนที่เป็นสีน้ำตาลจะแห้งและเหี่ยวในใบต่างๆ จะพบก่อนต้นข้าวจะมีความต้านทานต่อโรคและแมลงลดลง ต้นข้าวล้มง่าย ขนาดและเมล็ดจะลดลง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความเป็นพิษเนื่องจากเหล็กอีกด้วย

หากต้นข้าวได้รับธาตุโพแทสเซียมมากเกินไป จะทำการสุกแก่ของข้าวช้ากว่าปกติ (De Datta, 1981; อรรควุฒิ ทศน์สองชั้น, 2527)

2.2 เถ้าลอยลิกไนต์

2.2.1 แหล่งกำเนิด

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณวันละ 2,000 เมกะวัตต์ หรือคิดเป็นจำนวนไม่น้อยกว่า 25 เพอร์เซ็นต์ ของปริมาณกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ประเทศไทยต้องการ โดยใช้ถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดจากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ที่อุณหภูมิประมาณ 900-1000 องศาเซลเซียส ประมาณวันละ 40,000 ตัน ทำให้เกิดของเหลือทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ เช่น ก๊าซชนิดต่างๆ เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (Bottom ash) และเถ้าลอย (Fly ash) โดยเถ้าหนักเกิดจากอนุภาคเล็กๆ ปะทะกันเอง หรือปะทะกับผนังเตา แล้วหลอมติดกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ เรียกว่า ตะกรัน เมื่อน้ำหนักมากขึ้นตะกรันจะหล่นลงมาสู่ก้นเตา ปริมาณที่เกิดขึ้นประมาณวันละ 2,000 ตัน ส่วนเถ้าลอยลิกไนต์เป็นอนุภาคขนาดเล็กที่หลงเหลืออยู่ในเตาเผา โดยจะลอยออกมาพร้อมกับไอร้อน ไปยังบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำลง การลดอุณหภูมิอย่างกระทันหันจากร้อนเป็นเย็นทำให้อนุภาคของเถ้าที่ใกล้จุดหลอมเหลวกลับเย็นตัวลงและรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคทรงกลมในขนาดต่างๆ ซึ่งเรียกว่าเถ้าลอย (รูปที่ 2.1) ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เกิดขึ้นเฉลี่ย 10,700 ตันต่อวัน โดยปะปนไปกับก๊าซร้อนออกสู่ปล่องควัน จึงต้องมีการดักจับฝุ่นไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitator) ซึ่งจะดักจับและแยกเถ้าลอยซึ่งมีขนาดเล็กและเบาออกจากก๊าซร้อน แล้วนำไปรวบรวมเก็บไว้ในไซโล (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544) เพื่อนำไปกำจัดต่อไป



รูปที่ 2.1 ภาพขยายเถ้าลอยลิกไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (อรรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2544)

2.2.2 สมบัติทางเคมี

สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ ผันแปรไปตามชนิด/แหล่งที่มา/ปริมาณแร่ธาตุของถ่านหิน กระบวนการเผาไหม้ อุณหภูมิในการเผา ประสิทธิภาพการเผาไหม้ ประเภท/สภาพ/ลักษณะของโรงงานที่ใช้ถ่านหินเป็นแหล่งเชื้อเพลิง และระบบการดักจับเถ้าลอย (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2544)

องค์ประกอบของธาตุที่พบในเถ้าลอยลิกไนต์โดยทั่วไป อยู่ในรูปของสารเฟอโรอะลูมิเนียมซิลิเกต (Ferro-aluminosilicate) ที่ประกอบด้วย ธาตุอะลูมิเนียม (Al), ซิลิกอน (Si), เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca), โพแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) ในปริมาณมาก โดยพบไนโตรเจน (N) ในปริมาณน้อย (Adriano และคณะ, 1980) นอกจากนี้ ยังมีโบรอน (B), โมลิบดีนัม (Mo), กำมะถัน (S), ซีลีเนียม (Se) และสตรอนเตียม (Sr) ในปริมาณมาก และมีโลหะหนักที่เป็นธาตุพิษ เช่น แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), นิกเกิล (Ni) และสารหนู (As) ปนเปื้อนอยู่ด้วย (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2541; U.S.EPA, 1988) ซึ่งโลหะหนักทุกชนิดมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ในลักษณะที่ความเป็นกรดของสภาพแวดล้อมที่มีโลหะหนัก เช่น ดิน น้ำ จะส่งเสริมให้โลหะหนักมีรูปทางเคมีที่พืชดูดดึงไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น (Siriratpiriya และคณะ, 1985)

สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์ที่ดักเก็บจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เมื่อนำมาตรวจองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ โดยวิธีใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence พบว่า เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปางมีปริมาณของซิลิกา อะลูมิเนียม และเหล็ก รวมกันมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2) มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงถึง 11 และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544; วราภรณ์ คุณาวานากิจ, 2530)

2.2.3 สมบัติทางกายภาพ

สมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดอนุภาคและรูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดถ่านหิน ความสม่ำเสมอของถ่านหิน ความละเอียดของผงถ่านหินก่อนเผา สภาพการเผา (ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน) ความสม่ำเสมอของการเผา และวิธีการดักจับเถ้าลอยที่ใช้ เช่น การแยกโดยเชิงกล (Mechanical separator) ถุงเก็บ (Bag filters) หรือเครื่องดักจับแบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitators) รูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ส่วนใหญ่จะไม่เป็นผลึก มีรูปร่างกลมซึ่งอาจตันหรือกลวง ลักษณะทรงกลมที่ภายในกลวง เรียกว่า เถ้าลอยกลวง (Cenospheres) บางส่วนจะเป็นทรงกลม กลวง บรรจุด้วยอนุภาคเล็กๆ อยู่ภายใน ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีลักษณะตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบ มีรูพรุนเล็กน้อย

ถึงพูนมาก มีรูปร่างที่กลมจนถึงรูปร่างยาวแบน (Plerosheres) ถ้าวาลอยลิกไนต์ที่มีพูนมาก ๆ มักเกิดจากการเผาด่านหินด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้ถ้าวาลอยลิกไนต์หลอมเหลวได้จึงส่งผลให้ถ้าวาลอยลิกไนต์ที่ได้มักจะมีรูปทรงต่างๆ กัน

ลักษณะอนุภาคของถ้าวาลอยลิกไนต์โดยทั่วไปเมื่อขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่ามีลักษณะทรงกลม กลวง ส่วนใหญ่มีขนาด ระหว่าง 10-100 ไมครอน อนุภาคโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 30-40 ไมครอนเมตร มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.9-2.2 และผงฝุ่นจะมีความหนาแน่นในสภาพแห้งประมาณ 0.9-1.1 ดันต่อลูกบาศก์เมตร (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2544) ขณะที่ถ้าวาลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.49-878 ไมครอนเมตร อนุภาคโดยเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 155 ไมครอนเมตร จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดตามการจัดกลุ่มขนาดอนุภาคดินระบบสากล (ISSS) ค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.0 (อรรณณ ศิริรัตน์พิริยะ ฐวิโรจน์ ต้นนุกิจ และกนกพร ชัยวุฒิกุล, 2546)

นอกจากนี้ถ้าวาลอยลิกไนต์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan) เมื่ออยู่ในสภาพที่แห้ง จะเป็นผงฝุ่นสีเทาคล้ายปูนซีเมนต์ หรือสีเทาดำ หรือเทาปนน้ำตาล เมื่อสัมผัสด้วยมือจะรู้สึกว่าเนียนละเอียดและลื่นเหมือนแป้งฝุ่น ไม่มีคุณสมบัติเชื่อมเกาะระหว่างอนุภาค (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2544)

2.2.4 การใช้ประโยชน์

ถ้าวาลอยลิกไนต์ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ตามลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพ ทั้งทางการเกษตรและวิศวกรรม และทางด้านอื่นๆ ดังนี้

2.2.4.1 การใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

การเติมถ้าวาลอยลิกไนต์ลงสู่ดินจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวและดินทรายได้ โดยความหนาแน่นรวมของดินเหนียวจะเพิ่มขึ้น ในส่วนของดินทรายนั้น เพิ่มความจุในการอุ้มน้ำ และทำให้ปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการไหลซึมของน้ำ และเพิ่มอินทรีย์คาร์บอน (Chang และคณะ, 1977; Atiken, และ Bell, 1985; Cambell, และคณะ, 1983; Salter, Webb และ Williams, 1971) การเติมถ้าวาลอยลิกไนต์ 14.2 และ 16 ดันต่อไร่ ตามลำดับ สามารถช่วยยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินเหนียวและดินร่วน ซึ่งมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เท่ากับ 5.87 และ 5.00 ตามลำดับ ให้มีความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 7.00 (อรรณณ ศิริรัตน์พิริยะ และคณะ, 2546) จึงอาจกล่าวได้ว่า การใช้ประโยชน์ถ้าวาลอยลิกไนต์ในการยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เพื่อแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยวโดยตรงมีความเป็นไปได้น้อย

การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรเพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของพืชจำเป็นต้องใส่ร่วมกับแหล่งธาตุอาหารที่มีไนโตรเจนเพียงพอ โดยอรรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2544) พบว่าอัตราเติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมต่อดินและพืชที่ปลูกในดิน คือ 2 ตันต่อไร่ โดยประเมินจากความเป็นกรดเป็นด่างของดิน ความสามารถของดินที่จะรองรับ/ดูดซับความต้องการธาตุอาหารของพืช การจัดการและควบคุมธาตุพิษในเถ้าลอยลิกไนต์

ทั้งนี้ กนกพร ชัยวุฒิกุล (2544) ได้ทำการทดลองเติมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตรา 1 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าว พบว่าผลผลิตของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับดินเดิมหรือการเติมปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ปริมาณข้าวเปลือกที่ได้คือ 480.67 กิโลกรัมต่อไร่ โดยที่เมล็ดข้าวเปลือกมีธาตุพิษได้แก่ แคดเมียม นิกเกิล และอะลูมิเนียมไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้บริโภค และผลผลิตของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตรา 2 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมีตามระยะการเจริญเติบโตของข้าวทั้ง 3 ระยะคือ ระยะข้าวออกระยะข้าวแตกกอและระยะข้าวออกรวง เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับการเติมปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว โดยปริมาณข้าวเปลือกที่ได้สูงถึง 640.69 กิโลกรัมต่อไร่ และเมล็ดข้าวเปลือกมีธาตุพิษได้แก่แคดเมียม นิกเกิล และอะลูมิเนียมไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้บริโภค (อรรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ และเจนจิรา พวงทับทิม, 2547) เช่นเดียวกับ Rautaray และคณะ (2003) เติมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับปุ๋ยพืชสด หรือปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวให้ผลผลิตสูงสุด เมื่อเทียบกับดินเดิม นอกจากนี้เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตรา 0.25 ตันต่อไร่ ร่วมกับปุ๋ยเคมี ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในหญ้าขนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (สิริพร สุกใส, 2546)

2.2.4.2 การใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรม

มาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพของเถ้าลอยที่จะนำมาใช้ในการผสมคอนกรีต คือ American Society for Testing and Materials (ASTM) ซึ่งสามารถแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชั้น คือ Class C และ Class F ทั้งนี้ ASTM C 618 เป็นมาตรฐานที่บ่งชี้ถึงคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของเถ้าลอย โดยเถ้าลอย Class F มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์ หรือบิทูมินัสและมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าลอย Class C มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทซับบิทูมินัสหรือลิกไนต์ และมีผลรวมของซิลิกาออกไซด์ เฟอริกออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ อยู่ระหว่าง 50-70 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก อีกทั้งมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (15-23 เปอร์เซ็นต์) จึงมีคุณสมบัติของวัสดุประสาน (Cementitious property) เมื่อมีความชื้นจะสามารถแข็งตัวได้ รวมทั้งมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาด้านปอซโซลานอีกด้วย เถ้าลอยประเภทนี้จึงเหมาะสำหรับผสมทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต ขณะที่เถ้าลอย Class F แทบไม่มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุเชื่อมประสานเลยเมื่อผสมกับน้ำเนื่องจากมีปริมาณ

แคลเซียมออกไซด์ต่ำ (น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์) แต่ยังมีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวานากิจ, 2542; พิชัย นิมิตรยงสกุล และสรรค์ สยามภักดิ์, 2543)

ทั้งนี้ถ้าลดยลิกไนต์ จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัด ลำปาง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากขบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ มีปริมาณของซิลิกาออกไซด์ เฟอร์ริก ออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ รวมกันมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นถ่านลอม Class F ตาม ASTM C 618 และมี SO_3 น้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดใน มาตรฐาน ASTM C 618 ขณะที่ปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าที่พบในถ่านลอมที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากแหล่งอื่นในประเทศไทย (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2542) จึงสามารถนำไปใช้ผสมทดแทนปูนซีเมนต์ บางส่วนในงานคอนกรีตได้ โดยนำไปใช้ในงานต่างๆ ดังนี้

1) คอนกรีตบดอัด (Roller Compacting Concrete, RCC) เป็นคอนกรีตที่มีเนื้อค่อนข้างแข็งกระด้าง และมีคุณสมบัติยุบตัวเป็นศูนย์ (No-slump concrete) คอนกรีตชนิดนี้จะผสมน้ำในปริมาณต่ำเพียงเพื่อให้ได้เนื้อคอนกรีตสดที่อยู่ในสภาพซึ่งสามารถจะทำงานบดอัดได้ด้วยรถบดอัดที่ใช้ความสั่นสะเทือน (Vibration roller) ลักษณะที่ปรากฏของคอนกรีตบดอัดจะคล้ายคลึงกับหินคลุกผสมน้ำ ซึ่งมักใช้ในงานบดอัดชั้นพื้นทาง (Base course) งานคอนกรีตบดอัดในประเทศไทยที่ใช้ถ่านลอมลิกไนต์เป็นส่วนประกอบ เช่น โครงการก่อสร้างเขื่อนปากมูล จังหวัด อุบลราชธานี และโครงการก่อสร้างเขื่อนคลองท่าด่าน จังหวัดนครนายก (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

2) คอนกรีตความร้อนต่ำ (Low Heat Concrete, LHC) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มถ่านลอมลิกไนต์ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนของการเชื่อมประสานในคอนกรีตลดลง ปฏิกิริยาช่วงต้นของปูนซีเมนต์ที่มีอยู่น้อยจึงส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมขึ้นในคอนกรีตน้อยลงตามไปด้วย ทำให้โอกาสที่จะเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตจากความร้อนลดลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ที่ต้องการใช้คอนกรีตปริมาณมากในการเทแต่ละครั้ง โดยการเพิ่มปริมาณถ่านลอมลิกไนต์เข้าไปแทนที่ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

3) การใช้ถ่านลอมลิกไนต์ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์ ในงานคอนกรีตที่ไหลเข้าแบบได้ง่าย (Self-Compacting Concrete, SCC) คอนกรีตชนิดนี้ต้องการคุณสมบัติด้านความสามารถที่จะปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ดี (High deformability) โดยไม่เกิดการแยกตัวของหินย่อยออกจากปูนทราย (Segregation) หรือการยึดตัว

(Bleeding) ดังนั้นจึงต้องการปริมาณ Paste ซึ่งประกอบไปด้วยสารเชื่อมประสาน (Binder) และน้ำค่อนข้างมาก เพราะ Paste จะไปทำหน้าที่เติมช่องว่างระหว่างหินย่อยและทราย

4) คอนกรีตปกติและผลิตภัณฑ์คอนกรีตทั่วไป (Normal concrete and concrete products) โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ทดแทนซีเมนต์ในอัตราประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในงานคอนกรีตทั่วไป

2.2.4.3 การใช้ประโยชน์อื่นๆ

1) การผลิตอิฐบล็อกปูพื้นและอิฐบล็อกก่อผนัง โดยนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกปูพื้นและอิฐบล็อกก่อผนัง ซึ่งสามารถนำไปใช้สร้างบ้านเรือนที่อยู่อาศัย และ โรงเรือนสำหรับเลี้ยงสัตว์ จำหน่ายแก่ประชาชนทั่วไปในราคาถูก (เบญจมาศ อินทชัย, 2544)

2) วัสดุถมดิน (Fill material) เถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติที่แข็งตัวได้ด้วยตนเอง (Self hardening property) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำจนกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $[Ca(OH)_2]$ ปนอยู่บ้าง และทำให้เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic กับ Reactive silica ซึ่งเป็น Non crystalline glass จนเกิดเป็นสารเชื่อมประสาน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

3) การทำเสถียรตะกอนโลหะหนัก โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสานในการเก็บกักตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียซีโอดี โดยอนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย (2539) พบว่าสามารถทำให้โลหะหนักคงตัวและลดการชะละลายลงได้ 60-99 เปอร์เซ็นต์ และดวงสมร ผดุงเกียรติวงษ์ (2540) พบว่าสามารถทำให้กากหลอดฟลูออเรสเซนดคงตัวและลดการชะละลายปรอทลงได้กว่า 97 เปอร์เซ็นต์

4) การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Zeolites) จากเถ้าลอยลิกไนต์โดยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนดีขึ้นกว่าที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นจาก 52.20 มิลลิโมลต่อกิโกรัมซีโอไลต์ เป็น 619.44 มิลลิโมลต่อกิโกรัมซีโอไลต์ (มนตรี ทองคำ, 2542)

2.2.5 ความเสี่ยง

เถ้าลอยลิกไนต์จัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ซึ่งเข้าข่ายถูกกำหนดให้เป็นสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ภาคผนวกที่ 1 บัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว หมวด 1 ข้อ 5 ประเภทสารที่ถูกชะล้างได้

(Leachable substances) ซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 3 ของภาคผนวกที่ 2 มีปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งที่กำหนดไว้

โลหะหนักที่เป็นธาตุพิษที่สามารถพบได้ในถ้ำลอยลิกไนต์ เช่น แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), นิกเกิล (Ni) และสารหนู (As) เป็นต้น แต่จากการวิเคราะห์ถ้ำลอยลิกไนต์โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ โดยภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรพบว่าปริมาณโลหะหนักที่เป็นธาตุพิษหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนด จึงไม่เข้าข่ายเป็นสารที่ต้องกำจัดตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2542) แต่อย่างไรก็ดี การนำถ้ำลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์จำเป็นต้องควบคุมปริมาณธาตุพิษให้มีอยู่ในดิน น้ำ พืชและสัตว์ ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษเพื่อให้เกิดความมั่นใจต่อการนำไปใช้ประโยชน์และปลอดภัยจากการถ่ายทอดสารพิษตามห่วงโซ่อาหาร ในลักษณะทวีความเป็นพิษ (Biomagnifications)

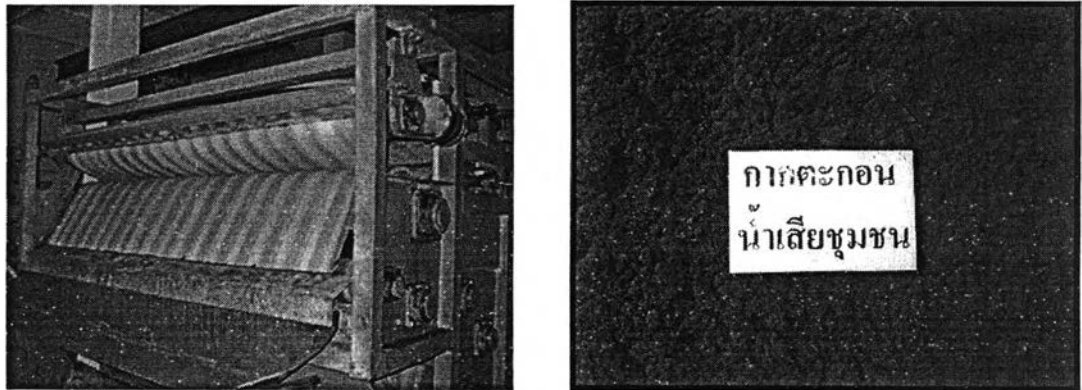
2.3 กากตะกอนน้ำเสียชุมชน

2.3.1 แหล่งกำเนิด

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเคหะชุมชนห้วยขวางก่อสร้างบนที่ดินจำนวน 3.25 ไร่ ซึ่งเป็นที่ดินทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ มีที่ตั้งอยู่ระหว่างแฟลตที่ 1 และ 2 ของการเคหะแห่งชาติ ถนนประชาสงเคราะห์ แขวงสามเสนนอก เขตห้วยขวาง กรุงเทพมหานคร เดิมอยู่ในความรับผิดชอบของการเคหะแห่งชาติ (พ.ศ. 2518-2533) ต่อมาคณะรัฐมนตรีได้มีคำสั่งให้โอนโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเคหะชุมชนห้วยขวางมาอยู่ในความรับผิดชอบของกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 4 กันยายน พ.ศ. 2533 (สำนักการระบายน้ำ, 2541)

กากตะกอนน้ำเสียชุมชนของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเคหะชุมชนห้วยขวาง จัดเป็นสารอินทรีย์ประเภทหนึ่ง เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีแหล่งกำเนิดมาจากน้ำทิ้งจากบ้านเรือน ผ่านกระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Conventional activated sludge) ด้วยวิธีทางชีววิทยาแบบใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายประเภท และใช้กระบวนการบำบัดตะกอนแบบถังหมักไร้อากาศ (Anaerobic digestion) และผ่านสายพานรีดน้ำตะกอน (Dewatered sludge) โดยคุณสมบัติและปริมาณกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำเสีย ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบ รวมทั้งระดับของการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้ Siriratpiriya (1989) ได้ประเมินว่า

โดยเฉลี่ยคนหนึ่งคนจะก่อให้เกิดกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยเฉลี่ยประมาณ 60 กรัมกากตะกอนแห้งต่อคนต่อวัน (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 กากตะกอนน้ำเสียชุมชนจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเคหะชุมชนห้วยขวาง

2.3.2 สมบัติทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนสามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มด้วยกันคือ

2.3.2.1 องค์ประกอบที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ ธาตุอาหารหลักคือ ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) จุลธาตุอาหาร เช่น ทองแดง (Cu), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn) และธาตุอื่นๆ โดยองค์ประกอบกากตะกอนน้ำเสียชุมชนของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเคหะชุมชนห้วยขวาง แสดงดังตารางที่ 2.3

2.3.2.2 องค์ประกอบที่ไม่เป็นประโยชน์และก่อให้เกิดโทษและเป็นปัญหา ได้แก่ โลหะหนักที่เป็นธาตุพิษ เช่น แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb) และนิกเกิล (Ni) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังพบพยาธิและเชื้อโรคที่ปนเปื้อนมาในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อปัญหาสุขภาพได้

2.3.3 สมบัติทางกายภาพ

กากตะกอนที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในประเทศไทยส่วนใหญ่ มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว สีน้ำตาลถึงดำ และหากอยู่ในรูปไม่เสถียรจะมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ มีก๊าซและความร้อนออกมาเนื่องจากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.3.4 การใช้ประโยชน์

ปัจจุบันมีการนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนไปใช้ประโยชน์หลายทางด้วยกัน ทั้งนี้ การนำเอากากตะกอนน้ำเสียชุมชนไปใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องทราบลักษณะเฉพาะทางด้าน กายภาพและเคมี อาทิเช่น ปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณธาตุอาหาร ชนิดและปริมาณโลหะหนัก รวมถึงสารพิษอื่นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน (มัลลิกา ปัญญาคะโป, 2545)

2.3.4.1 การใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

กากตะกอนน้ำเสียชุมชนสามารถปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของดิน ทำให้โครงสร้างดินดีขึ้น โดยลดความหนาแน่นรวมของดิน เพิ่มความพรุนและเพิ่มความเสถียรของการเกิดเม็ดดิน เพิ่มความอุ้มน้ำของดิน รักษาเนื้อดินให้คงอยู่ (ปรัชญา รัชญาดี, 2532; Guidi, 1983; Hall, 1984; Hasit, 1986; Peterson และคณะ, 1979; Sopper, 1993; Pichtel และคณะ, 1994)

กากตะกอนน้ำเสียชุมชนประกอบไปด้วยอินทรีย์วัตถุปริมาณสูง ซึ่งช่วยปรับปรุงลักษณะสมบัติทางเคมีของดิน เมื่อเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนลงสู่ดินจะช่วยเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินให้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2529; Boyd และคณะ, 1980; Gillies และคณะ, 1989) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มปริมาณอนินทรีย์ในโตรเจนให้แก่ดิน กากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ประมาณ 10-12 : 1 โดยที่อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนเกี่ยวข้องกับ Immobilization และ Mineralization ซึ่งเป็นปัจจัยที่บ่งชี้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นจะมีไนโตรเจนเพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ และทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แคบหรือต่ำกว่า 20/1 ในโตรเจนจะถูกปลดปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อมในรูปของแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) โดยกระบวนการ Mineralization (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) เมื่อเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนลงสู่ดินจะทำให้ไม่เกิดการขาดแคลนไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Follet และคณะ, 1981) การเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนลงดินด้วยอัตราเดิม 3.75-60 เมตริกตันต่อเฮกตาร์ จะช่วยเพิ่มปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจนอินทรีย์ในโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสารอินทรีย์ในโตรเจนในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจะสลายตัวเกิดกระบวนการ Mineralization โดยจุลินทรีย์อย่างรวดเร็ว โดยปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจนในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จะแปลงสภาพเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนภายใน 3 สัปดาห์ หลังจากเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนลงสู่ดิน (Kelling และคณะ, 1977)

นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงลักษณะสมบัติของดินทางชีวภาพ เมื่อใส่กากตะกอนน้ำเสียชุมชนลงสู่ดิน อินทรีย์วัตถุในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจะเป็นอาหารของ

จุลินทรีย์ดิน ทำให้การเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ดินและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินต่างๆ เช่น การแปรสภาพธาตุอาหารพืชในดิน การตรึงไนโตรเจน เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544; Banerjee และคณะ, 1997; Wong และคณะ, 1998)

อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2529) ศึกษาการใช้ประโยชน์กากตะกอนน้ำเสียชุมชนและกากตะกอนจากโรงฆ่าสัตว์ในการปลูกผักคะน้า พบว่าการเติมกากตะกอนน้ำเสียชุมชนในอัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับผลผลิตที่ได้จากการเติมปุ๋ยเคมีสูตร 20-10-10 ร่วมกับปุ๋ยยูเรีย สัดส่วน 1:1 และได้เสนอแนะอัตราเติมที่เหมาะสมเทียบเท่ากับปุ๋ยเคมีไว้คือ 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ หรือ 3,200 กิโลกรัมต่อไร่ (อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2530) อีกทั้งปลอดภัยจากโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ สังกะสี ทองแดง แมงกานีส เหล็ก แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่ว เช่นเดียวกับศิริณี ศิริสุขโขดม (2535) ศึกษาการใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนในการปลูกผักคะน้า ผักกาดหอม ผักวางตุ้ง และผักบุ้งจีน พบว่า อัตรา 20 เมตริกตันต่อเฮกแตร์ ผลผลิตของพืชทั้ง 4 ชนิดเพิ่มขึ้น เทียบเท่ากับการเติมปุ๋ยเคมี นอกจากนี้เมื่อนำมาใช้ในการปลูกข้าวในอัตราเทียบเท่ากับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมี พบว่า ช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวสูงขึ้นจาก 666.40 กิโลกรัมต่อไร่ ในปีแรก เป็น 821.92 กิโลกรัมต่อไร่ และ 911.84 กิโลกรัมต่อไร่ ในปีถัดไปตามลำดับ และคุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์เทียบเท่ากับข้าวที่มีการเติมปุ๋ยเคมี (Nakaji และคณะ, 2002) และเมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาใช้เป็นแหล่งธาตุปุ๋ย ในการปลูกหญ้าและข้าวโพด (*Zea mays* L.) พบว่าผลผลิตของพืชทั้ง 2 ชนิด เทียบเท่ากับการเติมปุ๋ยเคมี (Warman และ Termeer, 2005) เช่นเดียวกัน

2.3.4.2 การใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรมเซรามิกส์

1) วัสดุปูนปั้น โดยนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส จนมีลักษณะเป็นผงแป้งแล้วผสมกับตะกรันเหล็กกล้าเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับปูนปั้นเซรามิกส์ และอุตสาหกรรมเซรามิกส์ทางด้านอื่นๆ ต่อไป และเมื่อนำมาเปรียบเทียบความแข็งแรง พบว่าเทียบเท่าได้กับวัตถุดิบเดิมที่ใช้สำหรับปูนปั้นเซรามิกส์ และอุตสาหกรรมเซรามิกส์ทางด้านอื่นๆ (Favoni และคณะ, 2005)

2) การทำแผ่นกระเบื้องเซรามิกส์ โดยนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนเซรามิกส์ผสมกับดินเหนียวสำหรับทำเซรามิกส์ ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อผลิตเป็นกระเบื้องเซรามิกส์ (Jordán และคณะ, 2005)

2.3.4.3 การใช้ประโยชน์อื่น ๆ

1) อาหารเลี้ยงสัตว์ โดยนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการฉายรังสี มาผสมในอาหารปลามาตรฐาน 60 เปอร์เซ็นต์ แล้วให้การเจริญเติบโตเป็นปกติแก่ปลาชนิดที่เลี้ยงใน ถังไฟเบอร์กลาส รวมทั้งการนำปลานิลไปเลี้ยงในบ่อดินเพื่อขยายผลทางการค้า พบว่าผลผลิต ปลานิลที่ได้รับสูงกว่าการเลี้ยงด้วยอาหารปลามาตรฐานถึง 26.43 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เนื้อปลาที่ ได้จากการเลี้ยงด้วยอาหารผสมกากตะกอนน้ำเสียชุมชน พบว่าไม่มีกลิ่นโคลนและปริมาณโลหะหนัก ที่สะสมไม่เกินมาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขที่กำหนด อีกทั้งไม่ทำให้น้ำในบ่อเลี้ยงปลา มีคุณภาพเลวลง จึงปลอดภัยต่อการนำไปใช้ประโยชน์ (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2542)

2) สารพาเลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มา ทั้งนี้กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (2542) พบว่า กากตะกอนน้ำเสียชุมชนสามารถใช้เลี้ยงเชื้อราไตรโคเดอร์มา ให้เจริญเติบโตได้ดี นอกจากนี้ใช้ผลิตผงเชื้อราเพื่อขยายปริมาณการผลิตในระดับการค้าได้ และใช้เป็นสารเสริมให้ เชื้อราอยู่รอดในดินได้ดี เมื่อใช้ในขั้นตอนของการโรยผงเชื้อที่โคนต้นเพื่อควบคุมโรคโคนเน่า และ ประสิทธิภาพในการควบคุมโรคโคนเน่าในเรือนทดลองและแปลงปลูก เมื่อใช้ผงเชื้อผสมดังกล่าว ในอัตรา 10-40 กรัมต่อต้น สามารถป้องกันการเกิดโรคได้ โดยช่วยให้มีต้นรอดตายระหว่าง 75-100 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพดีกว่าการใช้สารเคมีคาร์โบซิน (Carboxin) อย่างเด่นชัด และสามารถลด จำนวนเมล็ดสเคลอโรเทียมลงได้ 5-45 เท่า

3) ส่วนผสมทำหัวเชื้อเพาะเห็ด โดยใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนเป็น ส่วนทดแทน ส่วนผสมโปรตีน คือ รำ ซึ่งสามารถนำไปเพาะเห็ดที่คนนิยมบริโภคได้แทบทุกชนิด เช่น เห็ดหอม เห็ดหูหนู และเห็ดเป๋าฮื้อ เป็นต้น (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2542)

2.3.5 ความเสี่ยง

การนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ไปใช้ประโยชน์มีสิ่งที่ควรคำนึง คือ สารพิษที่ปนเปื้อนในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน ได้แก่ โลหะหนักและเชื้อโรค

โลหะหนักที่ปนเปื้อนที่พบในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่เป็นธาตุพิษ ได้แก่ แคดเมียม (Cd), ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), นิกเกิล (Ni), โครเมียม (Cr), สารหนู (As) และโคบอลต์ (Co) สำหรับโลหะหนักบางธาตุ คือ ทองแดง (Cu), แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn) และเหล็ก (Fe) จัดเป็นจุลธาตุสำหรับการเจริญเติบโต ทั้งนี้โลหะหนักชนิดต่างๆ หากมีปริมาณที่พอเหมาะก็จะเป็น ประโยชน์ต่อพืช หรือไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ปริมาณโลหะหนักที่สูงเกินไปจะส่งผล กระทบต่อพืชที่ปลูกได้ อีกทั้งปริมาณโลหะหนักที่พืชดูดซับขึ้นไปสะสมนั้น อาจนำอันตรายมาสู่มนุษย์และสัตว์ตามห่วงโซ่อาหาร

ปัจจัยที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงโลหะหนักในดินนั้นได้แก่ การดูดซับบนผิวอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ โลหะหนักมีความสามารถยึดเกาะ (Fixation capacity) อยู่ใน ส่วนที่เป็น Clay fraction ได้ดี ดินที่เป็นดินเหนียว จึงมีโลหะหนักอยู่ในรูปที่ดูดซับได้ง่ายใน สารละลายดินน้อยกว่าดินที่เป็นดินทราย ซึ่งมีส่วนที่เป็น Clay fraction น้อย โลหะหนักส่วนใหญ่ จึงอยู่ในสารละลายดินมากกว่าดินเหนียว (Diaz และ Polo, 1988) การเกิดสารเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุ เช่น การเกิดคีเลต (Chelation) กับอินทรีย์วัตถุ ถูกดูดซับและตกตะกอนโดยไฮดรอกไซด์ (Hydrous oxide) ของเหล็ก (Fe), อะลูมิเนียม (Al) และแมงกานีส (Mn) เป็นต้น และการเกิดสารประกอบที่ละลายในสารละลายดิน หรืออาจตกตะกอนกับคาร์บอเนต ฟอสเฟต และไฮดรอกซิล (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) หลายประเทศในยุโรปจึงได้กำหนดปริมาณ โลหะหนักที่ยอมให้มีในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน (ตารางที่ 2.3)

การจัดการอย่างเหมาะสมเพื่อลดความเสี่ยงจากธาตุพิษดังกล่าว ทางเลือกของการจัดการที่เป็นไปได้และไม่ยุ่งยาก คือ การยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) โดย Hyde และคณะ (1979) พบว่า ความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะมีส่วนสัมพันธ์กับความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน ผลจากการเติมกากตะกอนลงในดินกรด (pH ต่ำกว่า 4.20) พบว่า ความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) ในสารละลายดินกรดมีค่ามากกว่าความเข้มข้นในสารละลายด่าง และความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่เติมลงสู่ดิน ที่ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินต่ำกว่า 5.00 อะลูมิเนียม เหล็กและแมงกานีสมักจะละลายออกมามากจนอาจเป็นพิษต่อพืช และนอกจากนี้ยังส่งผลต่อการละลายของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อดินอีกด้วย หากระดับความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 5.00 ฟอสฟอรัสจะถูกตรึงด้วยเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) การเพิ่มความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะมีผลทำให้การดูดซับโลหะหนักของพืชลดลงได้ เพราะไอออนของโลหะหนักต่างๆ ในรูปที่เปลี่ยนประจุได้และละลายน้ำได้จะมีปริมาณลดลงเมื่อความเป็นกรดเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้น (Davies, 1980; Siriratpiriya และคณะ, 1985)

การเติมกากตะกอนลงสู่ดินเพื่อปลูกพืชจึงควรควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างของดินให้สูงกว่า 6.50 (Hyde และคณะ, 1979; Kofed, 1983; Kuntz และคณะ, 1984) การเติมปูนเพื่อเพิ่มความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะลดการดึงดูดโลหะหนักของพืชได้เรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ แมงกานีส > สังกะสี > นิกเกิล > แคดเมียม > ทองแดง > โครเมียม, ตะกั่ว และเหล็ก (Siriratpiriya และคณะ, 1985) และยังช่วยทำให้ความเป็นประโยชน์ของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในดินเพิ่มขึ้นอีกด้วย (กรมพัฒนาที่ดิน, 2542) นอกจากนี้ดินนาที่มีความเป็นกรดเป็นด่างของดินเท่ากับ 3.40-4.90 การขังน้ำในแปลงก่อนการปลูกข้าว จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันในดิน ส่งผลให้

ความเป็นกรดเป็นด่างของดินค่อยๆ สูงขึ้น และมีค่าอยู่ระหว่าง 6.50-7.00 (Ponnamperuma, 1976; De Datta, 1981; ทศนีย์ อัดตะนันท์, 2543)

ในส่วนวิธีการจัดการเกี่ยวกับพยาธิและเชื้อโรคที่ปนเปื้อนในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนมีหลายวิธีการ เช่น การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) การฉายรังสี (Irradiation) การหมัก (Composting) การเติมปูน (Liming) และการใช้แสงแดด ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร มีอุณหภูมิสูง และแสงแดดจ้าเกือบตลอดปี น่าจะเป็นปัจจัยทางบวก ในลักษณะการลดปัญหาทางพยาธิวิทยา โดยแสงแดดมีอิทธิพลต่อการลดเชื้อซาลโมเนลลา ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคอุจจาระร่วง กล่าวคือ กากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ฝังแดดจัดเป็นระยะเวลา 8 วันติดต่อกัน จะสามารถลดปริมาณเชื้อซาลโมเนลลาที่ปนเปื้อนอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนได้จาก 170 MPN ต่อ 100 มิลลิลิตร ในวันแรก จนเหลือเชื้อซาลโมเนลลาปนเปื้อนในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนน้อยกว่า 2 MPN ต่อ 100 มิลลิลิตร ในวันที่ 8 ของการฝังแดด ซึ่งต่ำกว่าปริมาณที่จะก่อให้เกิดอันตราย เมื่อตรวจด้วยเทคนิค MPN (Most Probable Number) และเทคนิค MSRV (Modified Semi-solid Rappaport-Vassiliadis) และเมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ฝังแดดเป็นเวลา 8 วันไปใช้ประโยชน์ในการปลูกผักคะน้าทั้ง 2 ฤดูกาลเพาะปลูก พบว่าตรวจไม่พบเชื้อซาลโมเนลลาดังกล่าวในดินหรือพืชผักที่เพาะปลูก และการเจริญเติบโตของผักคะน้าไม่แตกต่างทางสถิติจากการเติมปุ๋ยเคมี (อรรณพ ศิริรัตน์พิริยะ, 2542; วรรณวิมล เสถาณานนท์, 2542)

2.4 ดินเปรี้ยวจัด

ดินเปรี้ยวจัด ดินกรดจัด หรือดินกรดกำมะถัน (Acid sulfate soils) คือ ดินที่มีหรือกำลังมี หรือได้เคยมีกรดกำมะถันอยู่ในชั้นหน้าตัดของดิน ซึ่งเป็นผลมาจากขบวนการสร้างดิน และปริมาณของกรดที่เกิดขึ้นนั้นมีมากพอที่จะมีผลต่อการควบคุมการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน โดยทั่วไป ดินนี้จะมีจุดประสีเหลืองฟางข้าวของสารประกอบที่เรียกว่า จาโรไซต์ (Jarosite) ในดินชั้นล่าง ดินจะมีความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 4.00 จนก่อให้เกิดปัญหาและเป็นอุปสรรคต่อการปลูกพืช (กรมพัฒนาที่ดิน, 2542; ไพบูรณ์ ประพฤติธรรม, 2528)

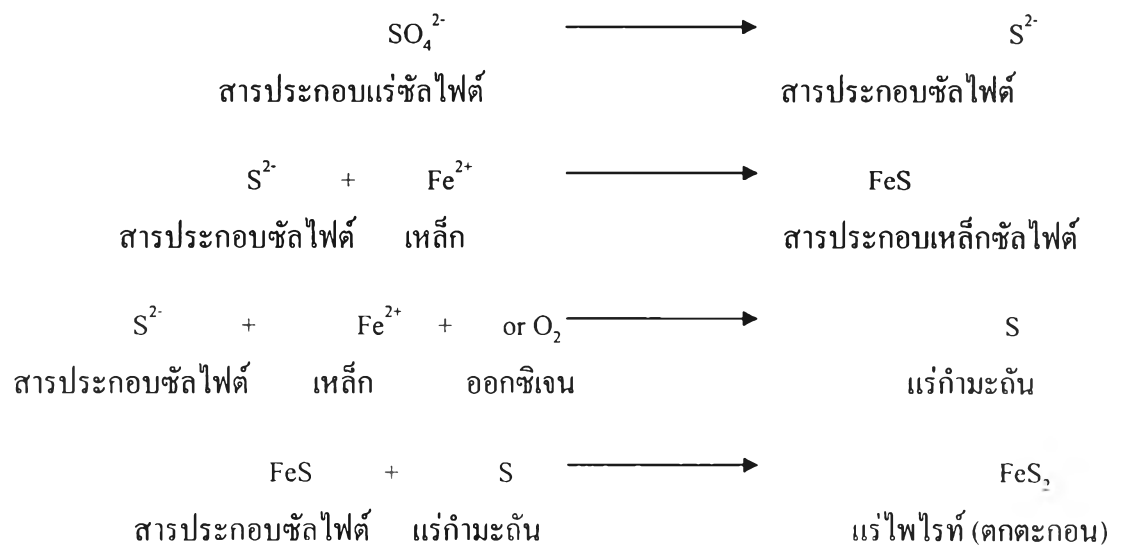
2.4.1 การเกิดดินเปรี้ยวจัด

การกำเนิดของดินเปรี้ยวจัดประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญคือ กระบวนการเกิดวัตถุดินกำเนิดดินเปรี้ยวจัด (Geogenetic process) และกระบวนการเกิดชั้นดินเปรี้ยวจัด (Pedogenetic process) กระบวนการกำเนิดดินเปรี้ยวจัดจะเกี่ยวข้องกับการเกิดไพไรต์ (Pyrite) หรือ การเกิดซัลไฟด์ ในขณะที่กระบวนการเกิดชั้นดินเปรี้ยวจัดจะเกี่ยวข้องกับการออกซิไดส์สารไพไรต์ เกิดเป็นกรดกำมะถัน

2.4.1.1 กระบวนการเกิดวัตถุต้นกำเนิดดินเปรี้ยวจัด (Geogenetic process)

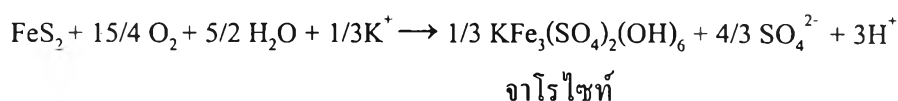
กระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยการสะสมของตะกอนที่พัดพามาโดยแม่น้ำและน้ำทะเลบริเวณปากแม่น้ำ ซึ่งเป็นอิทธิพลร่วมกันระหว่างน้ำทะเลกับน้ำจืด ก่อให้เกิดสภาพน้ำกร่อย ทำให้มีการตกตะกอนทับถมกันเกิดเป็นพื้นที่ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำ อนุภาคที่ตกตะกอนทับถมกัน ได้แก่ ตะกอนทราย ทรายแป้ง และตะกอนดินเหนียวรวมทั้งอินทรีย์วัตถุ ตะกอนที่พัดพามาทับถมกันนี้อาจจะมีตะกอนของสารประกอบซัลไฟด์โดยเฉพาะไพไรต์รวมอยู่ด้วย ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดการสะสมของไพไรต์ไว้ดังนี้คือ

- 1) สภาพที่มีน้ำขังขาดออกซิเจน (Anaerobic condition) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบซัลไฟด์ทั้งหมดเป็นไคซัลไฟด์ และ/หรือซัลไฟด์ถูกออกซิไดส์เป็นธาตุซัลเฟอร์
- 2) มีแหล่งของซัลเฟตอย่างเพียงพอและต่อเนื่องในช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเกิดไพไรต์
- 3) มีแร่เหล็กปรากฏอยู่ในตะกอนที่ทับถมเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับกำมะถันหรือซัลไฟด์เกิดเป็นไพไรต์
- 4) ปริมาณของอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายง่ายและเพียงพอ
- 5) พบแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟต (sulfate-reducing bacteria) ได้แก่พวก *Desulfovibrio* และ *Desulfotomaculum sp.* โดยจุลินทรีย์ดังกล่าวจะเปลี่ยนซัลเฟตไปเป็นซัลไฟด์ (S^{2-}) และทำปฏิกิริยากับสารประกอบของเหล็กกลายเป็นสารประกอบเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งในที่สุดจะเปลี่ยนเป็นสารประกอบซัลไฟด์ (FeS_2) หรือแร่ไพไรต์



2.4.1.2 กระบวนการสร้างดินทางปฐพีวิทยา (Pedogenetic process)

กระบวนการนี้เริ่มเกิดขึ้น เมื่อสภาพแวดล้อมของดินเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นผลจากการที่น้ำไม่ได้ขังอยู่ในดินเป็นระยะถาวรอีกต่อไป มีช่วงแห้งเกิดขึ้นเป็นบางช่วงในรอบปี การเปลี่ยนแปลงทางธรณีสันฐาน เช่น การถอยร่นของฝั่งทะเล (regression of shore line) จะทำให้พื้นที่นั้นน้ำไม่ท่วมอย่างถาวรอีกต่อไปหรือเกิดจากการระบายน้ำออกไปโดยมนุษย์เพื่อกิจการต่างๆ แร่ไฟไรท์จะถูกเติมอากาศ (Oxidized) กลายเป็นเฟอร์ริซัลเฟต $[\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3]$ และเฟอร์ริซัลเฟตจะทำปฏิกิริยาต่อไปเกิดเป็นสารประกอบเหล็ก และกรดกำมะถันเพิ่มขึ้นอีก กรดกำมะถันที่เกิดขึ้นบางส่วนจะถูกชะล้างออกไปสู่แม่น้ำ ถ้าคลอง บางส่วนเกิดปฏิกิริยากับปูนที่ละลายมากับน้ำ หรือสลายตัว และอีกส่วนหนึ่งจะยังคงอยู่ในสภาพของกรดที่แตกเปลี่ยนได้ภายในดิน กรดส่วนนี้เองคือตัวการที่ทำให้ดินเปรี้ยว โดยแร่ไฟไรท์ที่ยังคงอยู่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยตรงในสภาพที่มี Basic ions เช่น K^+ Na^+ และ H_3O^+ ทำให้เกิด Basic iron sulfate หรือ จาโรไซท์ได้ ดังสมการ



จาโรไซท์ที่เกิดขึ้นจะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นเกอร์ไฮต์ (FeOOH) เฮมาไตท์ (Fe_2O_3) และจะมีกรดเกิดขึ้นมาอีก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในชั้นดินที่พบจุดประสีเหลืองฟางของจาโรไซท์ จะมีความเป็นกรดเป็นด่างของดินจะต่ำกว่า 4.00 และในสภาพที่มีออกซิเดชันสูง ดังนั้นลักษณะของดินเปรี้ยวจัดที่พบ จะมีสารสีเหลืองฟาง (จาโรไซท์) ในชั้นหน้าตัดดินชั้นใดชั้นหนึ่ง หรือพบจุดประสีแดงของสารประกอบเฮมาไตท์

2.4.2 ผลกระทบต่อพืช

2.4.2.1 ความเป็นกรดของดิน (Soil acidity)

ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีความเข้มข้นสูงๆ อาจเป็นพิษต่อพืชได้ พบว่าเมื่อรากสัมผัสกับดินที่มี ความเป็นกรดต่ำเป็นเวลานาน การแตกแขนงของรากจะยับยั้ง และในกรณีที่รุนแรงมากขึ้น ปลายรากจะตาย ความเป็นกรดของดินจะเป็นอันตรายต่อพืชโดยตรงเมื่อดินมี ความเป็นกรดเป็นด่างต่ำกว่า 3.00

2.4.2.2 การขาดธาตุอาหารพืช

ดินเปรี้ยวจัด จะทำให้ธาตุอาหารพืชที่สำคัญถูกตรึงให้อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ ธาตุอาหารที่พบว่าขาดอยู่เสมอได้แก่ ธาตุฟอสฟอรัส เป็นธาตุอาหารที่ถูกตรึงมากที่สุด ในดินเปรี้ยวจัด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อดินเป็นกรดรุนแรง ปริมาณของเหล็กและอะลูมิเนียมจะละลาย

ออกมามากแล้วจะทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในดินเกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ไม่ละลาย พืชไม่สามารถดูดคิ๊งนำไปใช้ประโยชน์ได้ ขบวนการนี้ เรียกว่า การตรึงฟอสฟอรัสในดินและในสภาพดังกล่าวยังส่งผลกระทบต่อภารกิจกรรมของพวกจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะถูกยับยั้งไม่ให้เป็นไปตามปกติเท่าที่ควร ได้แก่กระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และในโตรเจนฟิกเซชัน (Nitrogen fixation) กระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นน้อยมากในดินเปรี้ยวจัด ส่งผลต่อปริมาณไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อดินลดลง

2.4.2.3 การละลายของโลหะหนักที่เป็นธาตุพิษ

ธาตุพิษ (Toxic element) โดยทั่วไปมักจะหมายถึง ธาตุโลหะหนักและธาตุอื่น ซึ่งเป็นสารมลพิษที่สำคัญในดิน ธาตุพิษเหล่านี้เป็นสารมลพิษได้ เนื่องจากมีการนำมาใช้ประโยชน์ในรูปสารประกอบหรือเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ แล้วมีการปนเปื้อนสู่สภาพแวดล้อมสำหรับธาตุโลหะหนัก (Heavy metals) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป ซึ่งเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) ธาตุพิษมีลักษณะนิสัยโดยทั่วไป คือ เปลี่ยนแปลงวาเลนซ์อยู่เสมอ ในรูปไฮดรอกไซด์จะมีการละลายได้ดี มีความสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสูง และชอบทำปฏิกิริยากับกลุ่มซัลไฟด์ (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2539) ทั้งนี้ความเป็นกรดของสภาพแวดล้อมที่มีโลหะหนัก เช่น ดิน น้ำ จะส่งเสริมให้โลหะหนักมีรูปทางเคมีที่พืชดูดคิ๊งไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชได้มากขึ้น (Siriratpiriya และคณะ, 1985) โดยความสนใจเกี่ยวกับโลหะหนักนั้นจะมุ่งเน้นโลหะหนักที่เป็นพิษต่อสุขภาพและอนามัยของผู้บริโภค ได้แก่ สารหนู (As) และแคดเมียม (Cd)

สารหนูสามารถปนเปื้อนลงสู่ดินได้โดยการใช้สารกำจัดศัตรูพืช ส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปอาเซเนต (AsO_4^{3-}) และสารประกอบของสารหนูส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ง่าย ทั้งนี้สารหนูในรูปแอนไอออนสามารถพบได้หลายรูปเช่น AsO^{2-} , AsO_4^{3-} , HAsO_4^{2-} และ H_2AsO_4^- สารเหล่านี้จะถูกตรึงในดินช่วงความเป็นกรดเป็นด่างเท่ากับ 7 ถึง 9 โดยที่อาเซเนตมีเคมีนิสคล้ายกับฟอสเฟต (ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2539) ในสภาพดินเป็นกรดจะพบสารหนูในรูปอาเซเนตของเหล็กและอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้หากดินข้าวดูดคิ๊งสารหนูจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อรากข้าว ส่งผลยับยั้งการดูดคิ๊งธาตุอาหารต่างๆ ของต้นข้าว (Abedin และคณะ, 2002) โดยปริมาณสารหนูที่ระดับ 15-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืช (Pendias และ Pendias, 1992)

ขณะที่แคดเมียมสามารถปนเปื้อนลงสู่ดินได้จากการใช้ปุ๋ย โดยจะพบอาการผิดปกติจากแคดเมียม คือ การเจริญของรากลดลงและเกิดการเน่าเปื่อย ส่งผลให้ต้นข้าวแคระแกร็น รวมถึงเนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบซีดเหลือง (สันติ บุญฟ้าประทาน, 2526; Hewitt, 1953) โดย

ปริมาณแคดเมียมที่ระดับ 3-5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืช (Pendias และ Pendias, 1992)

2.4.3 การแก้ไขดินเปรี้ยวจัด

การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดเพื่อการปลูกข้าวสามารถเลือกวิธีการจัดการวิธีใดวิธีหนึ่งหรือทำควบคู่กันไปตามความเหมาะสมของสภาพพื้นที่และความรุนแรงของปัญหา ดังนี้

1) การชะล้างด้วยน้ำเค็มหรือน้ำธรรมชาติช่วยลดความเป็นกรดของดินได้โดยลดความเค็มของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมที่สะสมอยู่ใกล้ๆ รากข้าวและยังป้องกันการขาดธาตุอาหารบางชนิด

2) การขังน้ำที่ผิวหน้าดินก่อนการปลูกข้าวประมาณ 4-6 สัปดาห์ จะช่วยลดความเป็นพิษของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียม

3) การเติมปูนทางการเกษตร เช่น ปูนมาร์ล ปูนขาว ปูนบด หินฝุ่น เป็นต้น เพื่อเพิ่มความเป็นกรดเป็นด่างของดิน และเพิ่มผลผลิตของข้าว (กรมพัฒนาที่ดิน, 2542)

4) การเลือกใช้พันธุ์ต้านทานดินเปรี้ยว ได้แก่ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ดอกมะลิ 3 กข 7 ตะเภาแก้ว 161 เล็บมือนาง 111 น้ำสะกุก ขาวตาแห้ง 17 (จุลฉวี ไพฑูรย์เจริญลาภ, ทรรศนะ ลาภราย และสุตสาคร หงษ์อัน, 2545)

5) การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในดินเปรี้ยวจัดบางพื้นที่ เพราะในดินเปรี้ยวจัดของประเทศไทยจะขาดแคลนฟอสฟอรัสอย่างรุนแรง และในกรณีที่มีความเป็นกรดไม่รุนแรงมากนัก การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตทำให้ผลผลิตข้าวสูงขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

2.5 ข้าว

วิวัฒนาการของข้าวที่ปลูกในปัจจุบันมาจากข้าวป่า โดยผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมในธรรมชาติและได้ผ่านการคัดเลือกโดยธรรมชาติและมนุษย์ จนกลายเป็นข้าวที่ปลูกกันทุกวันนี้ โดยข้าวที่เกิดขึ้นในท้องที่ต่างๆ ทั่วโลกเรานี้แบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ ออไรซา ซาไทวา (*Oryza sativa*) มีปลูกกันทั่วไป ออไรซา กลาบेरริมา (*Oryza glaberrima*) มีปลูกเฉพาะในแอฟริกาเท่านั้น และข้าวป่าซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยแหล่งที่ปลูกข้าวมากในโลกจะอยู่ในระหว่างเส้นรุ้งที่ 50 องศาเหนือ และ 35 องศาใต้

ทั้งนี้ ข้าวพวก *Oryza sativa* สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ จาปอนิกา (Japonica) อินดิกา (Indica) และจาวานิกา (Javanica) โดยยึดถือเอาลักษณะภายนอกของต้น เมล็ด และ

เปอร์เซ็นต์เมล็ดลึบของข้าวลูกผสมระหว่างชนิดเป็นหลัก จาปอนิกาเป็นข้าวที่ปลูกในประเทศจีนตอนเหนือ และตะวันออก ญี่ปุ่น เกาหลี รวมถึงประเทศอื่นๆ ที่อยู่ในเขตอบอุ่น อินดิกาเป็นข้าวที่ปลูกในประเทศต่างๆ ในเขตร้อน เช่น ศรีลังกา จีนตอนใต้และตอนกลาง อินเดีย อินโดนีเซีย บังกลาเทศ ไทย ฟิลิปปินส์ เป็นต้น ส่วนจาปอนิกาเป็นข้าวที่ปลูกในประเทศอินโดนีเซียเท่านั้น (อรรควุฒิ ทักษ์สองชั้น, 2527; สถาบันวิจัยข้าว, 2544)

2.5.1 การเจริญเติบโตของข้าว

การเจริญเติบโตของข้าว (ประพาส วีรแพทย์, 2517; ประสูติ สิทธิสรวง, 2524; จำรัส โปร่งศิริวัฒนา, 2534) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ ดังนี้

2.5.1.1 การเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative growth phase)

เริ่มตั้งแต่ต้นข้าวออกจากเมล็ดไปจนถึงวันที่ต้นข้าวเริ่มมีการสร้างรวงอ่อนหรือช่อดอก การเจริญเติบโตระยะนี้ต้นข้าวจะมีการสร้างใบ ลำต้น แดกกอ การขยายตัวของปล้องทำให้ต้นข้าวสูงขึ้น ขณะเดียวกันใต้ผิวดินก็มีการสร้างระบบรากให้สมบูรณ์ สะสมอาหารไว้สำหรับการเจริญเติบโตในระยะสืบพันธุ์ต่อไป

2.5.1.2 การเจริญเติบโตระยะสืบพันธุ์หรือการสร้างช่อดอกหรือรวง (Reproductive growth phase)

เริ่มตั้งแต่วันที่ต้นข้าวเริ่มสร้างดอกอ่อน จนถึงวันที่รวงเริ่มโผล่ออกจากใบธงกินเวลาประมาณ 30-40 วัน ในระยะนี้เมื่อเริ่มแรกภาษาชาวนาเรียก ข้าวแตงตัว จนกระทั่งการสร้างรวงผ่านไประยะหนึ่ง รวงอ่อนมีขนาดใหญ่พอสมควรทำให้ต้นข้าวมีลักษณะกลมและป่องออก ระยะนี้เรียกข้าวตั้งท้อง ระยะที่รวงข้าวเริ่มโผล่ออกจากลำต้นเรียกว่า ข้าวโพล่ง ภายในระยะเวลา 30-40 วัน ต้นข้าวจะมีการสร้างและพัฒนาส่วนต่างๆ ของรวงและดอก เช่น กลีบดอก ส่วนต่างๆ ของเพศผู้และเพศเมีย เพื่อเตรียมไว้สำหรับการผสมพันธุ์ต่อไป

ภายหลังการเจริญเติบโตระยะสืบพันธุ์ข้าวก็จะเริ่มผสมพันธุ์และสร้างเมล็ด ระยะนี้เรียกว่า ระยะสร้างเมล็ดและระยะข้าวสุกแก่ (Grain formation and ripening stage) โดยจะเริ่มหลังจากการผสมเกสรไปจนถึงเวลาที่เมล็ดข้าวแก่จัด หลังจากการผสมเกสรประมาณ 7-10 วัน ข้าวก็จะเริ่มมีเมล็ดลักษณะเป็นแป้งน้ำเหมือนน้ำมัน ระยะนี้จึงเรียกว่า ระยะน้ำนม ทั้งนี้ต้นข้าวใช้เวลาในการสร้างเมล็ดตั้งแต่การผสมเกสรจนถึงแก่จัดประมาณ 30 วัน

2.5.2 การจำแนกประเภทของข้าว

ข้าวที่ปลูกเพื่อบริโภคสามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับสิ่งที่ใช้เป็นมาตรการสำหรับการจำแนกประเภทของข้าว โดยสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ (ประพาส วีรแพทย์, 2517; ประสูตร สิทธิสรวง, 2524; บริบูรณ์ สมฤทธิ, 2540)

2.5.2.1 จำแนกตามสภาพพื้นที่ปลูก เป็นข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวนาเมืองหรือข้าวขึ้นน้ำ และข้าวทนน้ำลึก

1) ข้าวไร่ (Upland rice) หมายถึงข้าวที่ปลูกบนที่ดอนหรือที่สูงตามไหล่เขา โดยไม่ต้องมีน้ำขังในพื้นที่ปลูก อาศัยเพียงน้ำค้าง น้ำฝน และความชื้นในดินก็สามารถเจริญเติบโต ออกรวงให้ผลผลิตได้ ดังนั้นจึงนับได้ว่าข้าวไร่เป็นข้าวที่ทนแล้ง ได้ดีกว่าข้าวประเภทอื่น การปลูกข้าวไร่ใช้วิธีหยอดเมล็ดแห้งเพียงอย่างเดียว ข้าวไร่มีปลูกในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ แต่มีเนื้อที่ปลูกไม่มากนัก

2) ข้าวนาสวน (Lowland rice) หมายถึงข้าวนาที่ปลูกแบบปักดำและระดับน้ำในนาลึกไม่เกิน 80 เซนติเมตร ข้าวนาสวนมีเนื้อที่ปลูกมากที่สุด โดยปลูกกันทั่วประเทศ

3) ข้าวขึ้นน้ำและทนน้ำลึก (Floating rice and Deepwater rice) ข้าวที่ปลูกในประเทศไทย ชนิดข้าวไร่และข้าวนาสวน ไม่จำเป็นต้องมีความสามารถในการขึ้นน้ำหรือการทนน้ำลึก เพราะพื้นที่ปลูกนั้นไม่มีน้ำลึก แต่พันธุ์ข้าวที่ปลูกเป็นข้าวนาเมืองนั้น จำเป็นต้องมีความสามารถในการขึ้นน้ำและการทนน้ำลึกด้วย เพราะระดับน้ำในนาเมืองในระยะต้นข้าวกำลังเจริญเติบโตทางลำต้นและออกรวงมีความลึกประมาณ 80-300 เซนติเมตร โดยเฉพาะในระหว่างเดือนกันยายนและต้นเดือนธันวาคม ปกติข้าวนาที่ปลูกข้าวนาเมืองจะต้องลงมือไถนาเตรียมดินและหว่านเมล็ดพันธุ์ในเดือนเมษายนหรือพฤษภาคม เพราะในระยะนี้ดินแห้งน้ำไม่ขังในนาซึ่งเหมาะสำหรับการเตรียมดินและหว่านเมล็ดพันธุ์ เมื่อฝนตกลงมาหลังจากที่ได้หว่านเมล็ดแล้วเมล็ดข้าวที่หว่านลงไปก็จะงอกเป็นต้นกล้าและเจริญเติบโตในดินที่ไม่มีน้ำขังนั้นจนถึงเดือนกรกฎาคมหรือสิงหาคม ฉะนั้นข้าวพวกนี้จึงมีสภาพคล้ายข้าวไร่ในระยะแรกๆ ต่อมาในเดือนสิงหาคมฝนก็จะเริ่มตกหนักขึ้น และระดับในนาก็ได้สูงขึ้นๆ จนมีความลึกประมาณ 80-300 เซนติเมตร ในเดือนกันยายนจนถึงกลางเดือนธันวาคม หลังจากนั้นระดับน้ำก็จะเริ่มลดลงกระทั่งแห้งในเดือนมกราคม ด้วยเหตุนี้ต้นข้าวจะต้องเจริญเติบโตทางความสูงในระยะที่ระดับน้ำเพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้มีส่วนของลำต้นและใบจำนวนหนึ่งอยู่เหนือระดับน้ำความสามารถของต้นข้าวในการเจริญเติบโตให้มีต้นสูงเพื่อหนีระดับน้ำที่เพิ่มขึ้น เรียกว่าความสามารถในการขึ้นน้ำของต้นข้าว เนื่องจากต้นข้าวจะต้องอยู่ในน้ำที่มีความลึกมากอย่างนี้เป็นเวลา 2-3 เดือนก่อนที่ต้นข้าวจะออกรวงจนเก็บเกี่ยวได้ช่วงต้นหรือกลางเดือนมกราคม ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ระดับน้ำในนาได้ลดลงเกือบแห้ง ข้าวขึ้นน้ำมีพื้นที่ปลูกรอง

จากข้าวนาสวน โดยปลูกมาในภาคกลาง และบางพื้นที่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับต้นข้าวที่ความสามารถเจริญเติบโตอยู่ในน้ำลึกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวจึงเรียกว่าการทนน้ำลึก ดังนั้นการขึ้นน้ำและการทนน้ำลึก จึงเป็นลักษณะที่จำเป็นยิ่งของพันธุ์ข้าวนาเมืองหรือข้าวฟางลอย

2.5.2.2 ชนิดของแป้งในเมล็ดที่บริโภค สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือเป็นข้าวเจ้าและข้าวเหนียว

1) ข้าวเหนียว (Glutinous rice) ข้าวเหนียวประกอบด้วยแป้งชนิดอะมิโลเปคติน (Amylopectin) เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณอะมิโลส (Amylose) อยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวขุ่น เมื่อนึ่งสุกแล้วจะได้ข้าวที่จับตัวติดกันเหนียวแน่นและมีลักษณะใส

2) ข้าวเจ้า (Nonglutinous rice) ข้าวเจ้าประกอบด้วยปริมาณแป้งอะมิโลส ประมาณ 7-33 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือเป็นแป้งอะมิโลเปคติน เมล็ดข้าวสารจะมีสีขาวใส เมื่อนึ่งหรือหุงสุกแล้วจะได้ข้าวสุกสีขาวขุ่นและร่วนกว่าข้าวเหนียว ทั้งนี้ข้าวเจ้าแต่ละพันธุ์เมื่อนึ่งสุกแล้วมีความนุ่มเหนียวแตกต่างกัน

2.5.2.3 การทำนา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1) นาดำ (Transplanting) หมายถึงการทำนาที่ต้องมีการตกลำเตรียมไว้ก่อน เมื่อกลามีอายุพอเหมาะจึงถอนไปปักดำในนาที่เตรียมดินไว้ และมีน้ำขังอยู่ในนา

2) นาแบบปลูกเมล็ดลงไปโดยตรง (Direct seeding) การปลูกข้าวโดยไม่ต้องตกลำ อาจจะปลูกหรือหว่านเมล็ดข้าวแห้งลงไปโดยตรงหรือเพาะให้ข้าวงอกเล็กน้อยแล้วหว่านลงไปในพื้นที่เตรียมดินไว้แบ่งออกเป็น

(1) นาหว่าน (Broadcasting) มี 3 แบบ คือ หว่านสำรว หว่านคราดกลบ และหว่านน้ำตม

ก) หว่านสำรว หลังจากเตรียมดินไถและคราดแล้วหว่านเมล็ดข้าวแห้งลงไป เมล็ดข้าวจะตกลงไปอยู่ระหว่างก้อนดินหรือรอยคราด

ข) หว่านคราดกลบ ทำเหมือนการหว่านสำรว แต่หลังจากหว่านแล้วคราดกลบอีกครั้ง ถ้าดินมีความชื้นเพียงพออาจเพาะให้เมล็ดข้าวงอกเล็กน้อย

ค) หว่านน้ำตม ใช้สำหรับนาที่มีน้ำขังและชาวนามีปัญหาเรื่องแรงงานไม่สามารถปักดำได้ทัน การหว่านน้ำตมที่จะให้ผลดีนั้นระดับน้ำควรอยู่ระหว่าง 3-5 เซนติเมตร หลังจากเตรียมดินเรียบร้อยแล้ว ต้องรอให้ดินตกตะกอนจนน้ำใส เพราะจะทำให้ข้าวที่หว่านลงไปได้รับแสงแดดเต็มที่ที่จะทำให้ต้นข้าวงอกได้เร็วและพันระดับน้ำขึ้นมาได้ โดยไม่เน่าตายเสียก่อน ทั้งนี้เมล็ดข้าวที่จะใช้หว่านต้องเพาะให้รากงอกเสียก่อนเพื่อจะได้เกาะดินเร็วขึ้น ปัจจุบันมี

การปรับปรุงการหว่านน้ำตมและทำกันแพร่หลายมากขึ้น เพราะนอกจากจะประหยัดเวลาและแรงงานแล้ว หากมีการปฏิบัติดูแลรักษาดีผลผลิตที่ได้ก็ทัดเทียมหรือมากกว่านาค่า

(2) นาหยอด (Drilling) หมายถึงการหยอดเมล็ดแห้งลงไปในพื้นที่เตรียมไว้แล้วกลบ แบ่งออกเป็น

ก) หยอดเป็นหลุม คือการปลูกข้าวแบบใช้ไม้ปลายแหลมหรือเครื่องทุ่นแรงอื่นเจาะดินที่เตรียมไว้ให้เป็นหลุมเล็กๆ ลึก 4-5 เซนติเมตร แล้วหยอดเมล็ดข้าวลงไป 3-5 เมล็ด แล้วกลบ ระยะระหว่างหลุมและแถวประมาณ 20 x 25 เซนติเมตร

ข) หยอดหรือโรยเป็นแถว คือการปลูกข้าวแบบเปิดหน้าดินที่เตรียมไว้ให้เป็นร่องเล็กๆ ลึกประมาณ 4-5 เซนติเมตร แล้วโรยเมล็ดข้าวลงไปในเรื่องให้ติดกันโดยไม่ต้องเว้นระยะแล้วกลบร่อง แต่ละแถวห่างกันประมาณ 20-25 เซนติเมตร

2.5.2.4 ลักษณะความไวของช่วงแสง

ระยะความยาวของกลางวันมีอิทธิพลต่อการออกดอกของต้นข้าว ดังนั้นพันธุ์ข้าวจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยถือเอาความไวต่อช่วงแสงหรือระยะความยาวของกลางวันเป็นหลัก แบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ

1) ข้าวที่ไวต่อช่วงแสง (Photoperiod sensitive rice) ข้าวประเภทนี้ออกดอกเฉพาะในเดือนที่มีความยาวกลางวันสั้น ปกติเรารู้ว่ากลางวันความยาว 12 ชั่วโมง และกลางคืนมีความยาว 12 ชั่วโมง ฉะนั้นกลางวันที่มีความยาวน้อยกว่า 12 ชั่วโมง ก็ถือว่าเป็นวันสั้น และกลางวันที่มีความยาวมากกว่า 12 ชั่วโมง ก็ถือว่าเป็นวันยาว และพบว่าข้าวที่ไวต่อช่วงแสงในประเทศไทยมักจะเริ่มสร้างช่อดอกและออกดอกในเดือนที่มีความยาวของกลางวันประมาณ 11 ชั่วโมง 40 นาที หรือสั้นกว่านี้ ดังนั้นข้าวที่ออกดอกได้ในเดือนที่มีความยาวของกลางวัน 11 ชั่วโมง 40 นาที จึงได้ชื่อว่าเป็นข้าวที่มีความไวน้อยต่อช่วงแสง (Less sensitive to photoperiod) และพันธุ์ที่ออกดอกเฉพาะในเดือนที่มีความยาวของกลางวันประมาณ 11 ชั่วโมง 10-20 นาที ก็ได้ชื่อว่าเป็นพันธุ์ที่มีความไวมากต่อช่วงแสง (Strongly sensitive to photoperiod) ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงเรียกข้าวว่าพืชวันสั้น (Short-day plant) พันธุ์ข้าวในประเทศไทยที่เป็นพันธุ์พื้นเมืองส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่มีความไวต่อช่วงแสง โดยเฉพาะข้าวที่ปลูกเป็นข้าวนาเมืองหรือข้าวขึ้นน้ำ

การปลูกข้าวพวกที่ไวต่อช่วงแสงจะต้องปลูกในฤดูนาปี เพราะฤดูนาปรังกลางวันมีความยาวมากกว่า 12 ชั่วโมง เดือนที่มีกลางวันสั้นที่สุด คือเดือนธันวาคม และเดือนที่มีความยาวของกลางวันยาวที่สุด ได้แก่ เดือนมิถุนายน ความยาวของกลางวันจะเริ่มสั้นจนมากพอที่จะทำให้ข้าวพวกไวต่อช่วงแสงออกดอกได้นั้น คือ วันในเดือนกันยายน ตุลาคม

พฤศจิกายน และธันวาคม ด้วยเหตุนี้ข้าวพวกที่ไวต่อช่วงแสงจะออกดอกในเดือนดังกล่าวนี้เท่านั้น ไม่ว่าจะปลูกในเดือนอะไรก็ตามซึ่งมันได้มีการเจริญเติบโตมากพอสมควร ข้าวพวกนี้แบ่งออกเป็น 3 พวก ตามวันและเดือนที่ออกดอกก่อนหรือหลัง ดังนี้

(1) ข้าวเบา (Early maturing rice) ข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสงน้อยจะออกดอกในเดือนกันยายน ตุลาคม เช่น พันธุ์ข้าวหางยี 17 น้ำสะกวย 19 กข 15 และขาวดอกมะลิ 105

(2) ข้าวกลาง (Medium maturing rice) ข้าวที่ออกดอกในช่วงตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน เช่น พันธุ์ข้าวเหนียวสันป่าตอง กข 6 กข 8 เหลืองใหญ่ 34 และนางมกลเอส 4

(3) ข้าวหนัก (Late maturing rice) ข้าวที่ออกดอกในเดือนธันวาคม มกราคม เช่น ขาวปากหม้อ 148 เหลืองประทิว 123 และขาวตาแห้ง 17 เป็นต้น

2) ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง (Photoperiod insensitive rice) การออกดอกของข้าวพวกนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของกลางวัน เมื่อดันข้าวมีระยะเวลาการเจริญเติบโตครบตามกำหนด ดันข้าวก็จะออกดอกทันทีไม่ว่าเดือนนั้นจะมีกลางวันสั้นหรือยาว ฉะนั้นข้าวพันธุ์ไม่ไวต่อช่วงแสงมักจะให้ผลผลิตสูงเมื่อปลูกในฤดูนาปรัง ข้าวประเภทนี้มีอายุตั้งแต่ 90-140 วัน เช่น พันธุ์ข้าว กข 23 ชัยนาท 1 สุพรรณบุรี 1 และสุพรรณบุรี 2 เป็นต้น

2.5.3 การเลือกใช้พันธุ์ข้าว

การเลือกใช้พันธุ์ข้าว (จุลฉนิ โปษุรักษ์เจริญลาภ และคณะ, 2545) พิจารณาได้จากระดับน้ำ ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม รวมถึงความต้านทานต่อโรคและแมลง ดังนี้

2.5.3.1 ระดับน้ำ

ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง ส่วนใหญ่เป็นข้าวต้นเตี้ย ควรปลูกในพื้นที่ซึ่งควบคุมระดับน้ำในนาได้ ระดับน้ำไม่ควรสูงเกิน 25 เซนติเมตร ข้าวไวต่อช่วงแสงเป็นข้าวต้นสูง ควรปลูกในน้ำลึกไม่เกิน 50 เซนติเมตร ส่วนข้าวพันธุ์กข 17 และ กข 19 ควรปลูกในน้ำลุ่มน้ำลึกประมาณ 1 เมตร และพื้นที่ที่มีระดับน้ำลึกกว่านี้ให้พิจารณาเลือกปลูกข้าวพันธุ์ขึ้นน้ำ

2.5.3.2 ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม

1) ดินเค็ม ควรปลูกข้าวพันธุ์ทนเค็ม ได้แก่ พันธุ์น้ำสะกวย 19 ขาวดอกมะลิ 105 ดอกมะลิ 3 ข้าวเหนียวสันป่าตอง

2) ดินเปรี้ยว ควรปลูกข้าวพันธุ์ทนเปรี้ยว ได้แก่ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ดอกมะลิ 3 กข 7 ตะเภาแก้ว 161 เล็บมือนาง 111 น้ำสะกวย ขาวตาแห้ง 17

3) พื้นที่ประสบปัญหาฝนแล้งหรือฝนทิ้งช่วงในระหว่างการเจริญเติบโต ควรปลูกข้าวทนแล้ง เช่น พันธุ์กข 15 ข้าวดอกมะลิ 105

2.5.3.3 ความต่อต้านต่อโรคและแมลง

บริเวณพื้นที่ที่มีการระบาดของโรคหรือแมลง ให้พิจารณาใช้พันธุ์ข้าวที่มีความต้านทานต่อโรคหรือแมลงชนิดนั้น เช่น ท้องที่ใดมีโรคขอบใบแห้งระบาด ให้ปลูกข้าวพันธุ์ต้านทานโรคนี้ เช่น กข 7 หากท้องที่ใดมีเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลและมีโรคจู่ระบาดมากควรปลูกพันธุ์ กข 21 กข 23 และ กข 25 เป็นต้น

2.5.4 ลักษณะข้าวพันธุ์ขาวตาแห้ง 17

ข้าวพันธุ์ขาวตาแห้ง 17 เป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองที่ชนะการประกวดเมื่อ พ.ศ. 2594 ได้นำไปปลูกคัดเลือกแบบคัดเลือกบริสุทธิ์ตามสถานีทดลองข้าวต่าง ๆ ทั่วประเทศ และได้รับการพิจารณาจากคณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ข้าวให้ใช้ขยายพันธุ์ได้เมื่อ พ.ศ. 2499 และได้ยกเลิกไปเมื่อ พ.ศ. 2506 เนื่องจากไม่ต้านทานโรคไหม้ แต่เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวที่เมล็ดมีคุณภาพดี โรงสีมีความต้องการสูงและจำหน่ายได้ราคาดี จึงเป็นที่นิยมปลูกของชาวนามาโดยตลอด ในปี พ.ศ. 2508 จึงได้นำกลับมาขยายพันธุ์ใหม่ โดยให้ชื่อว่า ขาวตาแห้ง 17

ลักษณะทั่วไปของข้าวพันธุ์ขาวตาแห้ง 17 จะเป็นข้าวเจ้าไวต่อช่วงแสงปลูกได้เฉพาะนาปีโดยมีการส่งเสริมให้ปลูกแบบข้าวนาสวน สำหรับภาคกลาง ลักษณะลำต้นสีเขียวแตกกอดี ฟางแข็ง ทรงกอแผ่กระจาย เมื่อโตเต็มที่ต้นข้าวสูงประมาณ 150 เซนติเมตร กีบเกี่ยวประมาณ 20 ต้นวาคม ผลผลิตเก็บเกี่ยวจากแปลงทดสอบเฉลี่ยประมาณ 473 กิโลกรัมต่อไร่ ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ ลักษณะเมล็ดข้าวเปลือก รูปร่างเรียวยาว สีฟาง ขนาดเมล็ดข้าวกล้องยาว 7.5 มิลลิเมตร กว้าง 2.3 มิลลิเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร ปริมาณอะมิโลส 22.4 เปอร์เซ็นต์คุณภาพข้าวสุกร่วน

ลักษณะเด่นของข้าวพันธุ์นี้ คือ คุณภาพการขัดสี ได้เมล็ดข้าวสารใส แข็งแกร่ง คุณภาพการหุงต้มดี ต้านทานแมลงบั่วปานกลาง และเป็นที่ต้องการของตลาด ขายได้ราคาดี ข้อจำกัดของข้าวพันธุ์นี้คือ ต้นข้าวอ่อน ล้มง่าย ไม่ต้านทานโรคขอบใบแห้ง โรคไหม้ โรคใบสีส้ม และโรคใบหงิก เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียวและหนอนกอ (กรมวิชาการเกษตร, 2545)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุอาหารและการดูดคั่งในข้าวพันธุ์ IR 8 ที่ระยะข้าวสุกแก่ (Full maturity)
(Yoshida, 1981)

| ธาตุอาหาร | ปริมาณธาตุอาหาร | | ปริมาณธาตุอาหารที่ดูดคั่ง ไปใช้ใน 1 ฤดูปลูก (กิโลกรัมต่อเฮกเตอร์) | | ปริมาณธาตุอาหารที่ดูดคั่ง ไปใช้ ต่อผลผลิต 1 ตัน (กิโลกรัม) | |
|-----------|-----------------|----------|---|---------|--|---------|
| | ตอซัง | รวงข้าว | ต้นข้าว | รวงข้าว | ต้นข้าว | รวงข้าว |
| N | 0.60% | 1.27% | 164 | 116 | 18.9 | 13.3 |
| P | 0.09% | 0.42% | 46 | 38 | 5.17 | 4.37 |
| K | 3.07% | 0.68% | 309 | 62 | 35.5 | 7.13 |
| Ca | 0.29% | 0.04% | 27.3 | 3.74 | 3.14 | 0.43 |
| Mg | 0.27% | 0.14% | 34.8 | 13 | 3.99 | 1.49 |
| S | 0.094% | 0.078% | 14.7 | 7.12 | 1.69 | 0.82 |
| Cl | 1.06% | 0.13% | 97.8 | 12 | 11.2 | 1.38 |
| Si | 8.14% | 2.57% | 890 | 235 | 102 | 27.0 |
| Fe | 470 ppm. | 111 ppm. | 4.79 | 1.01 | 0.551 | 0.116 |
| Mn | 108 ppm. | 49 ppm. | 1.32 | 0.45 | 0.152 | 0.052 |
| B | 55 ppm. | 24 ppm. | 0.66 | 0.22 | 0.076 | 0.025 |
| Zn | 24 ppm. | 18 ppm. | 0.35 | 0.16 | 0.040 | 0.018 |
| Cu | 3 ppm. | 3 ppm. | 0.04 | 0.03 | 0.006 | 0.003 |

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของถ้ำลอยติกไนต์ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
(การไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย, 2545)

| ปี พ.ศ. | ปริมาณร้อยละเฉลี่ยโดยน้ำหนัก | | | | | | | | |
|---------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-------------------|------------------|-----------------|-----|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | SO ₃ | LOI |
| 2533 | 37.8 | 20.5 | 14.2 | 17.4 | 3.3 | 0.9 | 2.1 | 3.9 | 0.8 |
| 2534 | 42.8 | 23.3 | 14.0 | 10.5 | 2.4 | 0.8 | 2.3 | 3.9 | 0.7 |
| 2535 | 40.3 | 24.0 | 15.0 | 11.2 | 2.8 | 1.0 | 2.6 | 3.1 | 0.5 |
| 2536 | 43.1 | 20.2 | 13.2 | 13.0 | 2.7 | 1.3 | 2.4 | 2.6 | 0.6 |
| 2537 | 52.8 | 18.0 | 8.5 | 13.3 | 1.4 | 0.9 | 2.0 | 2.8 | 0.3 |
| 2538 | 40.6 | 22.8 | 12.8 | 14.4 | 2.5 | 0.7 | 2.0 | 2.8 | 0.9 |
| 2539 | 40.6 | 23.6 | 13.0 | 13.0 | 2.5 | 1.2 | 3.0 | 2.4 | 0.7 |
| 2540 | 41.5 | 28.1 | 12.3 | 10.0 | 1.2 | 0.6 | 3.3 | 2.0 | 0.8 |
| 2541 | 37.3 | 22.1 | 14.4 | 11.4 | 2.7 | 1.1 | 2.7 | 2.5 | 0.1 |
| 2542 | 47.2 | 22.1 | 9.1 | 9.4 | 3.3 | 1.7 | 1.3 | 2.5 | 0.1 |
| 2543 | 38.9 | 22.8 | 13.4 | 15.2 | 2.3 | 0.8 | 3.0 | 2.5 | 0.1 |
| 2544 | 39.9 | 18.2 | 13.6 | 17.2 | 2.4 | 1.3 | 2.7 | 1.5 | 0.1 |

หมายเหตุ: LOI หมายถึง Loss on Ignition

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจากโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเคหะชุมชนห้วยขวาง

| พารามิเตอร์ | ปริมาณที่รายงาน | | |
|---|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| | อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ (2529) | ศิราณี ศิริสุขโขดม (2535) | อรรณพ หอมจันทร์ (2535) |
| ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) | 7.00 | 7.00 | 6.62 |
| อินทรีย์คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์) | 30.40 | 12.27 | 16.07 |
| อินทรีย์วัตถุ (เปอร์เซ็นต์) | 52.29 | 21.16 | 27.64 |
| ไนโตรเจนทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์) | 2.87 | 1.92 | 1.98 |
| แอมโมเนียมไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | 800.00 | 1,158.00 | 889.13 |
| ไนเตรทไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | 636.00 | 308.00 | 47.51 |
| ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | 167.75 | 245.83 | 295.50 |
| โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | 690.00 | 440.00 | 310.00 |
| โลหะหนักที่สกัดด้วย 0.005 M DTPA (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | | | |
| 1. แคดเมียม | 0.24 (4.2) | 0.50 | 0.20 (3.50) |
| 2. ทองแดง | 55.00 (179.5) | 28.60 | 1.22 (404.17) |
| 3. เหล็ก | 357.00 (16,176.7) | 576.00 | 133.00 (14,179.17) |
| 4. แมงกานีส | 126.00 (523.1) | 246.00 | 43.00 (601.25) |
| 5. นิกเกิล | 4.40 (4.40) | 7.54 | 12.82 (19.83) |
| 6. ตะกั่ว | 3.54 (162.4) | 4.00 | 0.56 (143.25) |
| 7. สังกะสี | 500.00 (1,510.7) | 850.00 | 910.00 (3,571.83) |

หมายเหตุ: ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึงปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน

ตารางที่ 2.4. ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) สูงสุดที่ยอมรับให้มีได้ในกากตะกอนน้ำเสียชุมชน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง) ที่จะนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตร (Kofoed, 1983)

| ประเทศ | ปริมาณโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอนแห้ง) | | | | | | | | | | |
|----------------|---|----------|----------|---------|--------|---------|------|---------|----------|-----------|--------|
| | ตะกั่ว | แคดเมียม | โครเมียม | โคบอลต์ | ทองแดง | นิกเกิล | ปรอท | สังกะสี | แมงกานีส | โมลิดินัม | สารหนู |
| เดนมาร์ก | 400 | 8 | - | - | - | 30 | 6 | - | - | - | - |
| นอร์เวย์ | 300 | 15 | - | - | - | - | 7 | - | - | - | - |
| สวีเดน | 300 | 15 | 1000 | 50 | 3000 | 500 | 8 | 10000 | - | - | - |
| ฟินแลนด์ | 1200 | 30 | 1000 | 100 | 3000 | 500 | 25 | 5000 | 3000 | - | - |
| เนเธอร์แลนด์ | 500 | 10 | 500 | - | 600 | 100 | 10 | 2000 | - | - | 10 |
| สวีตเซอร์แลนด์ | 1000 | 30 | 1000 | 100 | 1000 | 200 | 10 | 3000 | - | 20 | - |
| ฝรั่งเศส | 300 | 15 | 200 | 20 | 1500 | - | 8 | 3000 | 500 | - | - |

หมายเหตุ : - หมายถึง ไม่มีการเสนอตัวเลข

