บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พันธุ์ข้าวปทุมธานี 1

ข้าวเป็นพืชล้มลุก (Annual) ใบเลี้ยงเดี่ยวที่สำคัญมากทางเศรษฐกิจ อยู่ในสกุล (Genus) Oryza ข้าวที่ปลูกทั่วไปในโลกมี 2 ชนิด (Species) คือ Species *glaberrima* นิยมปลูกเฉพาะแถบแอฟริกาตะวันตก ส่วน Species *sativa* ปลูกในพื้นที่ปลูกข้าวโดยทั่วไป ซึ่งแบ่งเป็น 3 Sub-species ได้แก่ อินดิคา (Indica) จาปอนิคา (Japonica) และจาวานิคา (Javanica)

ข้าวที่ปลูกกันในปัจจุบัน ได้แก่ จาปอนิคา (Japonica) เป็นข้าวที่ปลูกและใช้บริโภคอย่างแพร่หลายในประเทศญี่ปุ่น เกาหลี และไต้หวัน ส่วนอินดิคา (Indica) นิยมปลูกและใช้บริโภคอย่างแพร่หลายในประเทศไทย พม่า มาเลเซีย อินโดนีเซีย อินเดีย และฟิลิปปินส์ (ประพาส วีระแพทย์, 2517)

ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 หรือสายพันธุ์ PTT90071-93-8-1-1 ได้รับการผสมพันธุ์ที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานีในฤดูนาปรัง ปี พ.ศ. 2533 โดยเป็นการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างสายพันธุ์ข้าวหอม BKNA6-18-3-2 ซึ่งเป็นสายพันธุ์แม่ได้จากพันธุ์ข้าว กข 15 หรือขาวดอกมะลิ 105 และ PTT85061-86-3-2-1 เป็นสายพันธุ์พ่อได้จากพันธุ์ข้าวหอมจังหวัดร้อยเอ็ดที่ชนะการประกวด จากกระทรวงพาณิชย์ในปี พ.ศ. 2525 ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 คัดเลือกพันธุ์แบบสืบตระกูล (Pedigree method) จนถึงชั่วรุ่น (Generation) ที่ 6 แล้วนำไปปลูกศึกษาพันธุ์ ได้ผ่านการประเมินผลผลิต คุณภาพเมล็ด ความต้านทานโรคและแมลงศัตรูข้าว ในปี พ.ศ. 2537-2539 โดยทดลองเปรียบเทียบผลผลิตข้าวไม่ไวต่อช่วงแสงภายในสถานีทดลองข้าวปทุมธานีกับสถานีทดลองข้าวอีก 4 แห่ง นอกจากนี้ในระหว่างปี พ.ศ. 2540-2542 ได้รับการคัดเลือกให้เป็นข้าวสายพันธุ์ดี นำไปทดสอบผลผลิตในนาราษฎร์ภาคกลาง และในปีพ.ศ. 2543 คณะกรรมการขึ้นทะเบียนและรับรองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตรได้พิจารณาให้เป็นพันธุ์พืชรับรองของกรมวิชาการเกษตร ในชื่อ "ปทุมธานี 1" (ธีรพร บุศยอังกูล, 2543)

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโดยทั่วไปเป็นพืชล้มลุก อยู่ในตระกูลหญ้า ประกอบไปด้วยราก (Root) ลำต้น (Stem) ใบ (Leaf) ดอกข้าว (Spikelet) และเมล็ดข้าว (Rice grain) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 คือ

ประเภท	: พืชล้มลุก ตระกูลหญ้า ข้าวเจ้านาสวน
ทรงกอ	: กอตั้ง
สีของปล้อง	: สีเขียว
สีของกาบใบ	: สีเขียว
สีของใบ	: สีเขียว
การมีขนบนแผ่นใบ	: มีขน
สีของลิ้นใบ	: สีขาว
รูปร่างของลิ้นใบ	: แหลม
สีของหูใบ	: ไม่มีสี
สีของยอดเกสรตัวเมีย	: สีขาว
สีของยอดดอก	: สีฟาง
สีกลีบรองดอก	: สีฟาง
หางข้าว	: มี ส่วนมากสั้น บางเมล็ดหางยาว
ความยาวรวง	: 29-34 เซนติเมตร
สีของเปลือกเมล็ด	: สีฟาง
ขนบนเปลือกเมล็ด	: มีขน
ขนาดเมล็ดข้าวเปลือก	: เฉลี่ยยาว 10.52 มิลลิเมตร กว้าง 2.47 มิลลิเมตร หนา 1.95 มิลลิเมตร
สีของข้าวกล้อง	: สีขาว
ขนาดของเมล็ดข้าวกล้อง	: เฉลี่ยยาว 7.60 มิลลิเมตร กว้าง 2.17 มิลลิเมตร หนา 1.72 มิลลิเมตร

2.2.2 ลักษณะทางการเกษตรของพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1

ลักษณะทางการเกษตรของข้าว เป็นลักษณะที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต การให้ผลผลิตสูงของต้นข้าวในพื้นที่ที่ปลูก การทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเสมอๆ ตลอดถึงคุณภาพเมล็ดข้าว โดยลักษณะทางการเกษตรของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 มีดังนี้

ลักษณะใบธง	: ใบธงยาว ตั้งตรงปานกลาง
ลักษณะรวง	: รวงยาวเฉลี่ย 31.5 เซนติเมตร รวงแน่นปานกลาง
การยืดของคอรวง	: คอรวงสั้น รวงอยู่ใต้ใบธง
ความแข็งของลำต้น	: ค่อนข้างแข็ง
การแก่ของใบ	: ใบแก่ช้า

ความสูง : สูงปานกลาง (104-133 เซนติเมตร)
ความไวต่อช่วงแสง : ไม่ไวต่อช่วงแสง
อายุการเก็บเกี่ยว : นาปักดำ 113-126 วัน
นาหว่านน้ำตม 104-114 วัน
องค์ประกอบผลผลิต : จำนวนรวง/ตารางเมตร
นาปักดำ 240-272 รวง/ตารางเมตร
นาหว่านน้ำตม 291-369 รวง/ตารางเมตร
จำนวนเมล็ดดี/รวง 124 เมล็ด
น้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด เฉลี่ย 27 กรัม
น้ำหนักข้าวเปลือก/ถัง 10.52 กิโลกรัม
ดัชนีการเก็บเกี่ยว : นาปักดำ 0.46
นาหว่านน้ำตม 0.46
ระยะพักตัวของเมล็ด : 3-4 สัปดาห์

2.2.3 คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ของพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1

คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ของข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 ทางกายภาพ คือ เมล็ดมีลักษณะยาวเรียว ความยาวเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ด ไม่ต่ำกว่า 7.0 มิลลิเมตร และอัตราส่วนความยาวเฉลี่ยต่อความกว้างเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ด ไม่ต่ำกว่า 3.0 ส่วนคุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางเคมีนั้น เมล็ดมีปริมาณอมิโลส (Apparent amylose) 12-19 เปอร์เซ็นต์ ค่าความคงตัวแป้งสุก (Gel consistency) 61-100 มิลลิเมตร และค่าการสลายตัวในด่าง (Alkali test) 6.0-7.0 จัดเป็นข้าวหุงสุกง่าย เมื่อหุงสุกมีกลิ่นหอมอ่อนๆ ข้าวสุกมีสีขาวนวล ผิวค่อนข้างมัน มีลักษณะนุ่มเหนียว (ธีรพร บุศยอังกุล, 2543)

2.2 คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์

ประเทศไทยสามารถครองตำแหน่งผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับที่ 1 ของโลกติดต่อกันมากว่าสิบปี เฉพาะปี พ.ศ. 2544 ประเทศไทยมีการส่งออกข้าวในปริมาณ 7,685,000 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2545) โดยในการส่งออกข้าวจะต้องคำนึงถึงคุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางกายภาพ และคุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางเคมี

2.2.1 คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางกายภาพ

คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางกายภาพ เป็นการแบ่งเกรดข้าวโดยพิจารณาจากขนาดของเมล็ดข้าว (ตารางที่ 2.1) อัตราส่วนระหว่างข้าวเต็มกับข้าวหัก (ตารางที่ 2.2) และสิ่งที่ปะปนมากับเมล็ดข้าว ซึ่งประกอบด้วย เมล็ดแดง (Red kernel) คือเมล็ดข้าวที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดหุ้มอยู่ เมล็ดเหลือง (Yellow kernel) คือเมล็ดข้าวที่มีบางส่วนของเมล็ดกลายเป็นสีเหลือง อาจเกิดจากการเก็บข้าวไว้นาน เมล็ดเสีย (Damaged kernel) คือเมล็ดข้าวเสียที่เกิดจากความชื้น ความร้อน เชื้อรา และแมลงต่างๆ ข้าวเมล็ดดำ (Black kernel) คือเมล็ดข้าวที่เป็นสีดำ หรือสีน้ำตาลแก่ และท้องไข่ (Chalky kernel) คือเมล็ดข้าวเจ้าที่มีสีขุ่นขาวเหมือนชอล์ค นอกจากนี้ยังกำหนดระดับการสีข้าว และความชื้นไม่เกิน 14% โดยการแบ่งเกรดเป็นไปตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงพาณิชย์ ซึ่งมีการปรับปรุงตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าวใหม่ ในปี พ.ศ. 2540 (ตารางที่ 2.3) (งามชื่น คงเสรี, 2542)

ตารางที่ 2.1 การแบ่งเกรดข้าวตามความยาวของเมล็ดข้าว (ประกาศกระทรวงพาณิชย์, 2540)

เกรดข้าว	ความยาว (มิลลิเมตร)
เมล็ดยาว ชั้น 1	ยาวกว่า 7.0
เมล็ดยาว ชั้น 2	6.6-7.0
เมล็ดยาว ชั้น 3	6.2-7.0
เมล็ดสั้น	สั้นกว่า 6.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดของต้นข้าวและข้าวหัก (ประกาศกระทรวงพาณิชย์, 2540)

เกรดข้าว	ต้นข้าว (ส่วน)	ข้าวหัก (ส่วน)
ข้าว 100% ชั้น 1, 2 และ 3	≥ 8	5-8
ข้าว 5%	≥7.5	3.5-7.5
ข้าว 10%	≥ 7	3.5-7
ข้าว 15%	≥6.5	3-6
ข้าว 25-45%	≥ 5	<5

2.2.2 คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางเคมี

นอกจากคุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางกายภาพแล้ว คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางเคมีก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการส่งออก โดยจะบ่งบอกถึงลักษณะเฉพาะพันธุ์ การประเมินคุณภาพการหุงต้ม

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพข้าวทางกายภาพตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ ปี พ.ศ. 2540 (ประกาศกระทรวงพาณิชย์, 2540)

ชนิดข้าวขาว	พื้นข้าว (หน่วย/ร้อยละ)				ส่วนของต้นข้าว	ส่วนของข้าวหัก	ส่วนผสม (หน่วย/ร้อยละ)					ข้าวและสิ่งที่อาจปนได้ไม่เกิน (หน่วย/ร้อยละ)							ระดับการสี
	เมล็ดยาว			เมล็ดสั้น			ข้าวเต็มเมล็ด	ต้นข้าว	ข้าวหักและปลายข้าวขาว			เมล็ดแดง/หรือข้าวสีต่ำกว่ามาตรฐาน	เมล็ดเหลือง	ท้องไข่	เมล็ดเสีย	ข้าวเหนียวขาว	เมล็ดลีบ เมล็ดอ่อน เมล็ดพืชอื่นและวัตถุอื่นๆ	ข้าวเปลือก (เมล็ด/กก.)	
	ชั้น 1 (> 7.0 มม.)	ชั้น 2 (6.6-7.0 มม.)	ชั้น 3 (6.2-6.6 มม.)	(< 6.2 มม.)					ข้าวหักไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 และปลายข้าวขาว	ไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7	ปลายข้าวขาว								
100% ชั้น1	≥70	-	≤5	0	≥8	≥5-<8	≥60	-	≤4	0	0	0	0	3.0	0	1.5	0	5	ดีพิเศษ
100% ชั้น2	≥40	-		≤5	≥8	≥5-<8	≥60	-	≤4.5	≤0.5	≤0.1	0	0.2	6.0	0.25	1.5	0.2	7	ดีพิเศษ
100% ชั้น3	≥30	-		≤5	≥8	≥5-<8	≥60	-	≤5	≤0.5	≤0.1	0	0.2	6.0	0.25	1.5	0.2	7	ดีพิเศษ
5%	≥20	-		≤10	≥7.5	≥3.5-<7.5	≥60	-	≤7	≤0.5	≤0.1	2.0	0.5	6.0	0.25	1.5	0.3	10	สีดี
10%	≥10	-		≤15	≥7	≥3.5-<7	≥55	-	≤12	≤0.7	≤0.3	2.0	1.0	7.0	0.5	1.5	0.4	15	สีดี
15%	≥5	-		≤30	≥6.5	≥3-<6.5	≥55	-	≤17	≤2.0	≤0.5	5.0	1.0	7.0	1.0	2.0	0.4	15	สีดีปานกลาง
25% (เลิศ)	≥50			≤50	≥5	<5	≥40	-	≤28	-	≤1.0	5.0	1.0	7.0	1.0	2.0	1.0	15	สีดีปานกลาง
25%	≥50			≤50	≥5	<5	≥40	-	≤28	-	≤2.0	7.0	1.0	8.0	2.0	2.0	2.0	20	สีธรรมดา
35%	≥50			≤50	≥5	<5	≥32	-	≤40	-	≤2.0	7.0	1.0	10.0	2.0	2.0	2.0	20	สีธรรมดา
45%	≥50			≤50	≥5	<5	≥8	-	≤50	-	≤3.0	7.0	1.0	10.0	2.0	2.0	2.0	20	สีธรรมดา

หมายเหตุ : ≤ น้อยกว่าหรือเท่ากับ

≥ มากกว่าหรือเท่ากับ

- ไม่มีกำหนด

และบริโภค (Cooking and eating quality) คุณภาพข้าวเชิงพาณิชย์ทางเคมีสามารถวัดได้จาก ปริมาณอมิโลส (Apparent amylose) ค่าความคงตัวแป้งสุก (Gel consistency) และการสลายตัวในด่าง (Alkali test)

1) ปริมาณอมิโลส (Apparent amylose)

ข้าวมีอมิโลเปคติน (Amylopectin) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณอมิโลสเป็นองค์ประกอบรอง อัตราส่วนของอมิโลสต่ออมิโลเปคตินเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณภาพต่างกัน กล่าวคือ อมิโลเปคตินทำให้ข้าวสุกเหนียว ในขณะที่อมิโลสทำให้ความเหนียวของข้าวสุกลดลง การแบ่งข้าวตามปริมาณอมิโลส สามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ดังตารางที่ 2.4 (ละม้ายมาศ ยังสุข, 2541) โดยข้าวหอมต้องมีปริมาณอมิโลสระหว่าง 12.0-19.0%

ตารางที่ 2.4 การจำแนกประเภทข้าวตามปริมาณอมิโลส (International Rice Research Institue, 1972)

ประเภทข้าวตามปริมาณอมิโลส	ปริมาณอมิโลสใน ข้าวสาร (%)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	0-2	เหนียวมาก
ข้าวอมิโลสต่ำ	10-19	เหนียวนุ่ม
ข้าวอมิโลสปานกลาง	20-25	นุ่ม ค่อนข้างเหนียว
ข้าวอมิโลสสูง	26-34	แข็ง ร่วน

ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสสูงจะดูดน้ำ และจะขยายปริมาตรระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำ ทำให้ข้าวสุกแข็งและร่วน โดยปริมาณอมิโลสมีความสัมพันธ์ทางบวกกับการขยายปริมาตรและการดูดน้ำระหว่างการหุงต้ม และมีความสัมพันธ์ทางลบกับความนุ่มเหนียวของข้าวสุก อย่างไรก็ตาม ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันก็ยังมีความแตกต่างกันอยู่ในความนุ่มของข้าวสุก ซึ่งอาจเกี่ยวเกี่ยวข้องกับค่าการสลายตัวในด่าง (Alkali spreading value) หรือค่าความคงตัวของแป้งสุก (Gel consistency) หรือทั้งสองค่า (Juliano, 1979; Perez, 1979) นอกจากนี้ Juliano and Pascual (1980) พบว่า ปริมาณอมิโลสมีความสัมพันธ์ทางลบกับค่าการสลายตัวในด่าง ค่าความคงตัวของแป้งสุก และความเหนียวของข้าวสุก และมีความสัมพันธ์ทางบวกกับความแข็งของข้าวสุก

2) ค่าความคงตัวแป้งสุก (Gel consistency)

แม้ว่าปริมาณอมิโลสจะเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพข้าวสุก แต่ในระหว่างข้าวที่มีปริมาณอมิโลสเท่ากันอาจมีความแข็งของข้าวสุกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งสุกมีอัตราการคืนตัวไม่เท่ากัน ทำให้แป้งสุกมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน การทดสอบความแข็งของแป้งสุกสามารถทดสอบโดยการหาค่าคงตัวแป้งสุกซึ่งอาศัยหลักการทำให้แป้งใสโดยการต้มในสารละลายด่าง แล้วทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและวัดระยะทางที่แป้งสุกไหลไปเมื่อวางบนพื้นราบ โดยจัดแบ่งประเภทของข้าวตามความคงตัวของแป้งสุก ดังตารางที่ 2.5 (ละม้ายมาศ ยังสุข, 2541) ซึ่งค่าคงตัวแป้งสุกในข้าวหอมจะต้องไม่ต่ำกว่า 61 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2.5 การแบ่งประเภทข้าวตามความคงตัวของแป้งสุก (International Rice Research Institue, 1972)

ความคงตัวของแป้งสุก	ระยะทางที่แป้งไหล (มิลลิเมตร)
แป้งสุกแข็ง	ต่ำกว่า 40
แป้งสุกอ่อนปานกลาง	41-60
แป้งสุกอ่อน	61-100

3) ค่าการสลายตัวในด่าง (Alkali test)

การสลายตัวในด่างเป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณระดับของอุณหภูมิแป้งสุก (Galatinization temperature) ซึ่งเป็นการต้มเมล็ดข้าวให้สุกโดยใช้เวลา 14-24 นาที เมล็ดข้าวที่สุกนั้นจะต้องไม่มีไตของแป้งดิบภายในเมล็ด และการใช้ค่าการสลายตัวในด่างนั้นสามารถประมาณระดับอุณหภูมิแป้งสุกได้ดังตารางที่ 2.6 โดยค่าการสลายตัวในข้าวหอมจะอยู่ในช่วง 6-7

ตารางที่ 2.6 การประมาณระดับอุณหภูมิแป้งสุกโดยใช้ค่าการสลายตัวในด่าง (International Rice Research Institue, 1972)

อุณหภูมิแป้งสุก	ระดับ	ค่าการสลายเมล็ดในด่าง	ระยะเวลาการหุงต้ม (นาที)
ต่ำกว่า 65	ต่ำ	6-7	12-16
70-74	ปานกลาง	4-5	16-24
มากกว่า 75	สูง	1-3	>24

2.3 เถ้าลอยลิกไนต์

2.3.1 กระบวนการเกิดเถ้าลอยลิกไนต์

ถ่านหินเป็นแหล่งเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ผลพลอยได้ที่ตามมา คือ เถ้า (Ash) ซึ่งสามารถจำแนกตามสภาพได้ 3 ส่วน คือ เถ้าหนัก (Bottom ash) เถ้าตะกรัน (Slag ash) และเถ้าลอย (Fly ash) (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539) โดยเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ เรียกว่า เถ้าลอยลิกไนต์ (Lignite fly ash) มีลักษณะเบา ลอยตัว สามารถฟุ้งกระจายไปในบรรยากาศระหว่างการเผาไหม้ โดยจะปะปนไปกับก๊าซร้อนออกสู่ปล่องควัน อาจก่อให้เกิดมลภาวะต่อสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงต้องมีการติดตั้งเครื่องดักจับเถ้าลอยลิกไนต์ด้วยระบบไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitatic system) เพื่อแยกเถ้าลอยลิกไนต์ออกจากก๊าซร้อนก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2540)

โดยทั่วไปในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถแยกเถ้าลอยลิกไนต์ ซึ่งมีประมาณร้อยละ 75-85 ของเถ้าทั้งหมดที่เกิดขึ้น สำหรับกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 40,000 ตัน/วัน จากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ก่อให้เกิดเถ้าลอยลิกไนต์ประมาณ 8,000 ตัน/วัน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

2.3.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

เมื่อถ่านหินลิกไนต์ถูกบดละเอียดและถูกเผาที่อุณหภูมิสูงระดับ 900 องศาเซลเซียส คาร์บอนในถ่านหินจะถูกเผาไหม้จนหมดไป สิ่งที่ปนอยู่ในถ่านหิน เช่น Clay, Quatz, Felspar จะร้อนจัดและอยู่ในสภาพที่ใกล้หลอมตัวเป็นของเหลว แต่กลับถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จึงเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในสภาพที่แข็งตัว กลายเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเล็ก (Sintering) ในขณะที่ลอยตัวขึ้นไปถึงบริเวณที่มีการถ่ายเทความร้อนในอัตราที่สูง (สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, CD-ROM)

เมื่อเถ้าลอยลิกไนต์อยู่ในสภาพที่แข็งจะเป็นฝุ่นผงสีเทาคล้ายปูนซีเมนต์ อาจเป็นสีเทาดำหรือสีเทาปนน้ำตาล เมื่อสัมผัสด้วยมือจะรู้สึกเนียนละเอียดและลื่นเหมือนแป้งฝุ่น โดยอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีลักษณะค่อนข้างกลม และกลวง (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2542; อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2544) ขนาดระหว่าง 10-100 ไมครอน อนุภาคโดยเฉลี่ยมีขนาด 30-40 ไมครอน และมีความถ่วงจำเพาะ 1.9-2.2 (สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, CD-ROM)

2.3.3 ลักษณะสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์นั้น บ่งชี้ถึงโอกาสในการเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชได้ เนื่องจากมีทั้งธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหาร ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) ซัลเฟอร์ (S) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ในปริมาณ 600-2,500, 1,534-34,700, 5,400-177,100, 4,900-50,800, 0.11-0.25, 31-4,400, 30-3,020, 14-13,000 ppm ตามลำดับ (Adriano et al, 1980; U.S. EPA, 1988) ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีจะมีปริมาณแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด โดยแหล่งกำเนิดเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้จากแหล่งต่างๆ ของประเทศไทยก็มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2542)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณร้อยละเฉลี่ย (โดยน้ำหนัก)			
	แม่เมาะ	ระยอง	สมุทรสาคร	กาญจนบุรี
Al_2O_3	26.43	36.21	36.62	22.73
Fe_2O_3	10.71	4.09	3.97	6.29
CaO	7.61	3.64	3.05	8.36
SO_3	1.85	0.48	0.64	3.38
MgO	2.21	0.54	0.55	2.64
K_2O	3.07	0.31	0.44	2.95

โดยที่องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533-2541 นั้น ประกอบด้วยปริมาณ SiO_2 ร้อยละ 37.3-52.8 ปริมาณ Al_2O_3 ร้อยละ 18.0-28.1 ปริมาณ Fe_2O_3 ร้อยละ 8.5-15.0 และปริมาณ CaO ร้อยละ 10.0-17.4 นอกนั้นประกอบด้วย MgO K_2O SO_3 และ Na_2O ในปริมาณน้อย ดังตารางที่ 2.8

อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยลิกไนต์ยังประกอบด้วยธาตุพิษต่างๆ เช่น นิกเกิล (Ni) แคดเมียม (Cd) และอลูมิเนียม (Al) ในปริมาณ 1.8-8,000, 0.1-250, 11,500-144,000 ppm ตามลำดับ (U.S. EPA, 1988; Adriano et al, 1980)

2.3.4 การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

จากคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ประกอบไปด้วยธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหาร ประกอบกับการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นการนำ

เถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการจัดการเถ้าลอยลิกไนต์จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสม

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่างปีพ.ศ. 2533-2541 (สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, CD-ROM)

ปี พ.ศ.	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	Na_2O
2533	37.8	20.5	14.2	17.4	3.3	2.1	3.9	0.9
2534	42.8	23.3	14.	10.5	2.4	2.3	3.9	0.8
2535	40.3	24.0	15.0	11.2	2.8	2.6	3.1	1.0
2536	43.1	20.2	13.2	13.0	2.7	2.4	2.6	1.3
2537	52.8	18.0	8.5	13.3	1.4	2.0	2.8	0.9
2538	40.6	22.3	12.8	14.4	2.5	2.0	2.8	0.7
2539	40.6	23.6	13.0	13.0	2.5	3.0	2.4	1.2
2540	41.5	28.1	12.3	10.0	1.2	3.3	2.0	0.6
2541	37.3	22.1	14.4	11.4	2.7	2.7	2.5	1.1

1) การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

เถ้าลอยลิกไนต์ส่วนใหญ่ซึ่งมีขนาดทรายแป้ง (Silt) สามารถปรับปรุงเนื้อดิน (Soil texrure) ให้มีโครงสร้างดีขึ้นเมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์เติมลงในดินทราย (Sand) หรือดินเหนียว (Clay) (Chang et al., 1977) โดยลักษณะทรายแป้งของเถ้าลอยลิกไนต์ทำให้เกิดช่องว่างในเนื้อดินสำหรับเก็บกักน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช (Millar, Turk and Foth, 1965)

ความสามารถในการเก็บกักน้ำในดินขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ดีของเนื้อดิน ซึ่งดินที่มีโครงสร้างละเอียดจะมีความจุอุ้มน้ำ (Water holding capacity) หรือการเก็บกักน้ำของดินสูงสุด แต่ปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์สูงสุดคือส่วนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคดิน (Interparticle pore space) แสดงให้เห็นว่าการเก็บกักน้ำที่เป็นประโยชน์ในดินสูงนั้นสัมพันธ์กับปริมาณของดินทรายแป้ง (Silt) โดยพบว่าการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินร่วนทราย (Sandy loam) และดินทราย (Sand) ช่วยเพิ่มความจุอุ้มน้ำที่เป็นประโยชน์ (Availability water holding capacity) แก่ดิน (Salter et al., 1971; Aitken and Bell, 1985)

นอกจากนี้การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินร่วนทราย (Sandy loam) และดินทราย (Sand) จะเพิ่มความชื้นในดิน (Soil moisture) จาก 25% เป็น 70% (Jacob et al., 1991) ซึ่งความชื้นที่เพิ่มขึ้นในดินจะเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช

2) การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีของดิน

เถ้าลอยลิกไนต์สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีของดินได้ เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์ส่วนใหญ่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูง ซึ่งการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดินเปรี้ยวจะช่วยยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินได้ (Plank et al., 1975; Martens and Beahm, 1976; Moliner and Street, 1982; Elseewi and Page, 1984; Riekerk, 1984; Petruzzelli et al., 1987)

นอกจากนี้การศึกษาของฐิติยา อังสัจจะพงษ์ (2539) ที่ทำการใส่เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในปริมาณ 0 1.8 และ 3.6 ตัน/ไร่ ในชุดดินโคราชซึ่งเป็นดินร่วนปนทราย พบว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เถ้าลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น และยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างจาก 5.3 ไปอยู่ที่ระดับ 6.5-6.7 เมื่อเติมเถ้าลอยลิกไนต์ในปริมาณ 1.8 ตัน/ไร่ ส่วนการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่ปริมาณ 3.6 ตัน/ไร่ จะยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างไปอยู่ที่ 7.3-7.5 โดยการที่จะยกระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินให้อยู่ที่ 7.00 สำหรับดินเหนียว (pH 5.87) และดินร่วน (pH 5.00) จะต้องเติมเถ้าลอยลิกไนต์ 14.2 และ 16 ตัน/ไร่ ตามลำดับ (อรวรรณ ศิริรัตน์พิริยะ, 2544)

ขณะเดียวกันเถ้าลอยลิกไนต์ก็ทำหน้าที่เพิ่มธาตุอาหารเมื่อเติมลงในดิน เนื่องจากเถ้าลอยลิกไนต์มีส่วนประกอบของธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และจุลธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) ซัลเฟอร์ (S) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) (Adriano et al, 1980; U.S. EPA, 1988) ซึ่งช่วยในการเจริญเติบโตของพืช

3) การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในการเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช

เถ้าลอยลิกไนต์สามารถใช้เป็นแหล่งของธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืชได้ ได้แก่ โบรอน (B) (Martens, 1971; Mulford and Martens, 1971; Plank and Martens,1974; Wallace and Wallace, 1986), แคลเซียม (Ca) (Martens and Beahm, 1976; Wallace et al., 1980), ทองแดง (Cu) (Wallace et al., 1980), โพแทสเซียม (K) (Martens et al., 1970a), แมกนีเซียม (Mg) (Hill and Lamp, 1980), โมลิบดีนัม (Mo) (Doran and Martens, 1972; Furr et al., 1976; Wallace et al., 1980; Elseewi and Page, 1984), ซัลเฟอร์ (S) (Hill and Lamp, 1980) และสังกะสี (Zn) (Martens, 1971; Schnappinger et al., 1975; Wallace et al., 1980) โดยการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ยังทำให้ผลผลิตของ

ข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจาก 65 เป็น 77.5 88.2 91.1 และ 92.2 ถัง/ไร่ และยังส่งผลต่อองค์ประกอบผลผลิตเฉลี่ยข้าวเปลือก ได้แก่ จำนวนเมล็ด/รวงเพิ่มขึ้นจาก 108 เป็น 109 118 130 และ 137 ตามลำดับ เมื่อมีการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ที่อัตราเติม 0 0.5 1.0 1.5 และ 2 ตัน/ไร่ ในหนึ่งฤดูปลูกข้าว (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และกรมพัฒนาที่ดิน, 2541)

นอกจากนี้การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ยังเพิ่มผลผลิตของ Rhodes grass และ French bean (Aitken and Bell, 1985) และจากการศึกษาของ Rees and Sidrak (1956) พบว่า การเติมเถ้าลอยลิกไนต์ทำให้การเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อใบสูงขึ้นในข้าวบาร์เล่ย์ และผักขม

4) ความเสี่ยงในการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร

นอกจากเถ้าลอยลิกไนต์จะประกอบไปด้วยธาตุอาหารต่างๆ แล้ว เถ้าลอยลิกไนต์ยังมีจุลธาตุอาหาร และธาตุพิษเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นการเติมเถ้าลอยลิกไนต์ลงไปในดินเพื่อให้เป็นแหล่งธาตุอาหารพืชก็อาจส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุพิษในดิน น้ำใต้ดิน หรือถูกดูดดึงและสะสมในพืชแล้วถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารซึ่งจะส่งผลต่อมนุษย์และสัตว์ได้ในที่สุด (Silveria, 1986; Paris, Robotti and Gavazzi, 1987)

(1) การสะสมจุลธาตุอาหารและธาตุพิษในดิน

จุลธาตุอาหารเป็นธาตุที่พืชต้องการในปริมาณน้อย ช่วงปริมาณพอเหมาะสำหรับพืชเป็นช่วงที่แคบมาก หากพืชได้รับจุลธาตุอาหารน้อยกว่าช่วงพอเหมาะก็จะแสดงสภาพขาด (Deficiency) แต่หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดสภาพพิษ (Toxicity) ดังนั้นการละลายได้ของจุลธาตุจึงเป็นปัจจัยบ่งชี้สภาพดังกล่าว ซึ่งปัจจัยที่ควบคุมสภาพการละลายได้ ได้แก่ ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เนื้อดิน วัตถุต้นกำเนิดดิน ชนิดและปริมาณสารประกอบอินทรีย์ในดิน ไอออนของธาตุอื่นในดิน อุณหภูมิของดิน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540) โดยที่การเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุลงในดินจะช่วยลดความเป็นประโยชน์ของโลหะหนักที่เป็นจุลธาตุอาหาร และธาตุพิษบางชนิดในดินได้ (Siriratpiriya et al., 1985)

จุลธาตุอาหาร และธาตุพิษบางชนิดที่เป็นโลหะหนัก มีความสามารถยึดเกาะ (Fixation capacity) ในส่วนที่เป็น Clay fraction ได้ดี ดินที่เป็นดินเหนียว (Clay) จึงมีการสะสมจุลธาตุอาหารและธาตุพิษที่เป็นโลหะหนักได้ดีกว่าดินทราย (Sand) ซึ่งมีส่วนที่เป็น Clay fraction น้อยกว่า (Dias and Polo, 1988) อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายของจุลธาตุอาหารและธาตุพิษส่งผลต่อสภาพการละลายได้ ซึ่งระดับปกติ และระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืชของจุลธาตุอาหารและธาตุพิษในดินแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปริมาณจุลธาตุอาหารและธาตุพิษในดินที่ระดับปกติ และระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืช (Schlipkoter and Brockhaus, 1988; Alloway, 1990; Pendias and Pendias, 1992)

ธาตุ	ปริมาณทั้งหมดที่ระดับปกติในดิน (ppm)	ปริมาณในดินที่เริ่มเกิดอาการเป็นพิษในพืช (ppm)
อาร์เซนิก (As)	0.1-50	15-50
แคดเมียม (Cd)	0.1-2	3-5
ทองแดง (Cu)	2-100	60-100
ปรอท (Hg)	0.1-1	2-5
ตะกั่ว (Pb)	0.1-30	100-400
สังกะสี (Zn)	3-50	250-400
นิกเกิล (Ni)	2-50	100

(2) การสะสมจุลธาตุอาหารและธาตุพิษในพืช

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดดึงและสะสมจุลธาตุอาหาร และธาตุพิษที่มีอยู่ในพืช ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช รูปทางเคมีในดิน ธาตุอื่นซึ่งเกี่ยวข้องกับการตกตะกอนและการถูกดูดซับ ปริมาณที่ละลายได้ ชนิดของดิน และสภาพอากาศ (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540) ซึ่งปริมาณปกติ ปริมาณที่เป็นพิษในพืช และปริมาณที่ทำให้ผลผลิตลดลงแสดงดังตารางที่ 2.10

พืชที่มีการเจริญเติบโตบนเถ้าลอยลิกไนต์จะมีการสะสมจุลธาตุอาหาร และธาตุพิษต่างๆ ได้แก่ อาร์เซนิก (As) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) นิกเกิล (Ni) โบรอน (B) และซีลีเนียม (Se) (Townsend and Gillham, 1975) นอกจากนี้ยังพบว่ามีปริมาณของอาร์เซนิก (As) ทองแดง (Cu) โบรอน (B) โพแทสเซียม (K) อลูมิเนียม (Al) และซีลีเนียม (Se) เพิ่มขึ้นใน White sweet clover ที่เจริญเติบโตบนเถ้าลอยลิกไนต์ (Furr et al., 1978b)

อย่างไรก็ดีการเพิ่มความเข้มข้นของจุลธาตุอาหาร และธาตุพิษบางชนิดจะเป็นไปตามการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ลงในดิน ดังนั้นการพิจารณาการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องรู้ปริมาณจุลธาตุอาหาร และธาตุพิษก่อนนำไปใช้ ซึ่งเป็นการนำไปสู่การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอย่างเหมาะสมและปลอดภัยในที่สุด

ตารางที่ 2.10 ปริมาณจุลธาตุอาหารและธาตุพิษในพืชที่ระดับปกติ ระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษในพืช และค่าที่ทำให้ผลผลิตลดลง 10% (Schlipkoter and Brockhaus, 1988; Alloway, 1990; Pendias and Pendias, 1992)

ธาตุ	ปริมาณทั้งหมดที่ระดับปกติในพืช (ppm)	ปริมาณในพืช (ppm น้ำหนักแห้ง)	
		เกิดอาการในพืชที่ไวต่อพิษ	ค่าที่ทำให้ผลผลิตลดลง 10%
อาร์เซนิก (As)	0.1-5	n.a.	1-20
แคดเมียม (Cd)	0.2-0.8	5-10	10-20
ทองแดง (Cu)	4-15	15-20	10-30
ปรอท (Hg)	n.a.	0.5-1	1-8
ตะกั่ว (Pb)	0.1-10	n.a.	n.a.
สังกะสี (Zn)	15-200	20-30	10-30
นิกเกิล (Ni)	1	150-200	100-500

2.3.5 การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์ทางวิศวกรรม

1) การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาทำผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง

นำเถ้าลอยลิกไนต์มาทำเป็นซีเมนต์บล็อกก่อผนังและซีเมนต์บล็อกปูพื้น โดยสามารถใช้เถ้าลอยลิกไนต์ 85% และซีเมนต์ 15% เพื่อทำผลิตภัณฑ์ซีเมนต์บล็อก และใช้เถ้าลอยลิกไนต์ 70% และซีเมนต์ 30% เพื่อทำเป็นซีเมนต์บล็อกปูพื้น (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

2) การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงาน Back Fill

นำเถ้าลอยลิกไนต์ผสมน้ำประมาณ 15-20% ทำการบดอัดเพื่อแก้ปัญหาฐานรากทรุดตัว โดยมีการนำเถ้าลอยลิกไนต์ผสมน้ำ 40-50% เทลงบริเวณที่ทรุดตัวของดินระหว่างผนังดินและผนังคอนกรีตของคลองส่งน้ำจากเขื่อนแม่ขาม (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

3) งาน Grouting

ทำการอัดฉีดน้ำปูนซึ่งใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วน 1:1 เข้าไปตามรอบแยกต่างๆ ของผนังบ่อเหมือง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยา

สันดาปกับถ่านหินลิกไนต์ภายในเหมือง ซึ่งจะก่อให้เกิดการลุกไหม้ติดไฟได้ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

4) งานก่อสร้างถนน

สำหรับงานก่อสร้างถนน ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์มาทำชั้นรองพื้นทางของถนน โดยการผสมน้ำ 15-20% แล้วทำการบดอัด (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

5) งานก่อสร้างเขื่อน

ได้มีการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในการสร้างเขื่อน เช่น งานก่อสร้างเขื่อนปากมูล เขื่อนคลองท่าด่าน เขื่อนแม่ปิงตอนล่าง เพื่อลดปริมาณความร้อนของคอนกรีต ช่วยให้คอนกรีตแข็งตัวช้า และป้องกันการแตกร้าวของเขื่อน (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2542)

6) งานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

เถ้าลอยลิกไนต์สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่ง เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กของรางระบบสายไฟในโรงไฟฟ้า ถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในงานคอนกรีตนั้นทำให้คอนกรีตมีการทำงานดีขึ้น เพราะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเป็นทรงกลม ช่วยให้คอนกรีตไหลไปตามจุดต่างๆ ได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสั่นสะเทือนเข้าช่วย (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2544)

2.4 ความต้องการธาตุอาหารของต้นข้าว

2.4.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าว

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ ราก (Root) ลำต้น (Stem) ใบ (Leaf) ดอกข้าว (Spikelet) และเมล็ดข้าว (Rice grain) (อรรควุฒิ ทัศน์สองชั้น, 2527)

1) ราก

หน้าที่หลักของรากข้าว คือ ค้ำจุนลำต้น และหาอาหาร ระบบรากของข้าวเป็นแบบรากฝอย (Fibrous root system) ตั้งแต่เมล็ดข้าวเริ่มงอก (germination) สิ่งที่งอกออกมาจากเมล็ดข้าวด้านติดกับก้านดอกตรงส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าว (Embryo) คือ รากอ่อน (Radicle) รากอ่อนจะเป็น Primary root และ Primary root จะแตกแขนงเป็น Lateral root รากชุดใหม่นี้เรียกว่า Adventitious root เมื่อต้นกล้าอายุได้ประมาณ 25-30 วันแล้ว รากแรกที่งอกออกมาจาก

เมล็ดก็จะหมดประสิทธิภาพในการหาอาหาร และจะหลุดไปในที่สุด ในระยะนี้จะมีรากเล็กๆ งอกอยู่ตามบริเวณโคนกล้า รากเหล่านี้เรียกว่า ระบบรากฝอย

2) ลำต้น

ลำต้นข้าวมีลักษณะทรงกลม (Terete) แกนกลางกลวง (Hollow) ส่วนมากลำต้นตั้งตรง (Erect) หลังจากที่กล้าข้าวเจริญเติบโตได้ประมาณ 30-40 วัน ต้นข้าวก็จะขยายตัวตามยาวที่เรียกว่า ย่างปล้อง โดยปล้องแรกๆ จะอยู่ใต้ผิวดินมีลักษณะสั้นมากจนแทบไม่อาจแยกได้ด้วยสายตา ส่วนที่เหนือผิวดินขึ้นมาลักษณะปล้องยาวจนถึงปล้องสุดท้ายที่อยู่เหนือผิวดินจะเป็นปล้องที่ยาวที่สุด ในระยะนี้จะเห็นข้อ (Node) ซึ่งมีลักษณะใหญ่ (Swollen) กว่าส่วนของต้นที่เป็นปล้อง หน้าที่หลักของลำต้น คือ ช่วยพยุงใบและช่อดอก และเป็นตัวการช่วยลำเลียงอาหาร (Food transport) ส่งผ่านไปยังส่วนต่างๆ ของต้นข้าว

3) ใบ

ใบข้าวมีลักษณะแบน บาง ยาว เกิดจากข้อบนลำต้น เกิดสลับกันเป็นสองแถวในทิศทางตรงกันข้าม มีหน้าที่หลัก คือ ปรุงอาหารโดยการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) หายใจ (Respiration) และคายน้ำ (Transpiration) ใบข้าวประกอบด้วยกาบใบ (Leaf sheath) คือ ส่วนล่างของใบ เป็นส่วนที่หุ้มข้อและปล้อง ตรงรอยต่อระหว่างกาบใบและตัวใบมีลักษณะคล้ายรอบพับเรียกว่า ข้อต่อใบ (Collar) ที่ข้อต่อจะมีเยื่อกันน้ำฝน (Ligule) มีลักษณะเป็นเยื่อบางใส ใกล้ๆ กับเยื่อกันน้ำฝนตรงรอยต่อส่วนที่ติดอยู่กับกาบใบจะมีเขี้ยวใบ (Auricle) มีลักษณะคล้ายทางมะพร้าวสีขาวอมชมพู

ใบสุดท้ายที่อยู่สูงสุดของต้นข้าว เรียกว่า ใบธง (Flag leaf) ที่อยู่ถัดจากรวงข้าวลงมา ถ้ามีลักษณะตั้งตรงและอยู่สูงพอๆ กับระดับรวง หรือสูงกว่ารวงข้าวจะเป็นลักษณะที่ดี เพราะการปรุงอาหารส่วนใหญ่ในระยะที่ข้าวออกดอก ผสมเกสร และสร้างเมล็ด ใบธงมีอิทธิพลอย่างมาก ดังนั้นถ้าใบธงไม่ถูกบังแสง โดยที่สามารถรับแสงได้ตลอดวันก็จะมีอาหารมากที่จะส่งไปยังช่อดอก ทำให้ดอกสมบูรณ์ การติดเมล็ดและน้ำหนักเมล็ดดี นอกจากนี้ใบธงที่ตั้งตรงอยู่เหนือช่อรวงยังทำให้นกไม่ชอบลงมากินข้าว เนื่องจากถูกใบธงทิ่มแทงได้ง่าย

4) ดอกข้าว

ดอก คือ ใบที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นอวัยวะสืบพันธุ์ ดอกข้าวมีลักษณะเป็นช่อเรียกว่า ช่อดอก (Inflorescence) มีแขนงบนช่อดอกเป็นแบบรวง (Panicle) แขนงแรก (Primary branch) ของรวงเกิดขึ้นตรงข้อบน (Panicle base) ของคอรวง (Uppermost internode) ซึ่งเป็น

ปล้องสุดท้ายของลำต้น แขนงต่อๆ ไปเกิดบนแกนรวง (Panicle axis) ถัดขึ้นไปจากข้อบนสุดจนถึงปลายรวง บนแขนงเหล่านี้ยังแตกเป็นแขนงย่อย (Secondary branch) ลงไปอีก แต่ละแขนงจะมีดอกข้าวเกิดขึ้นบนก้านดอก (Pedicel) ความถี่ของแขนงรากและแขนงย่อยจะมีผลต่อจำนวนเมล็ดต่อรวง ดอกข้าวที่เกิดบนก้านดอกเป็นดอกที่สมบูรณ์ (Perfect flower) ภายในดอกมีเกสรตัวผู้ (Stamen) และเกสรตัวเมีย (Pistil)

5) เมล็ดข้าว

ภายหลังที่นิวเคลียสจากเพศผู้อีกชุดหนึ่งจะรวมกับนิวเคลียสอื่นๆ ของเพศเมียในรังไข่ (Polar nuclei) เจริญเป็น Endosperm ซึ่งเป็นอาหารของข้าวในระยะที่เมล็ดเริ่มงอก Endosperm ซึ่งประกอบด้วยแป้ง (Starch) ซึ่งส่วนนี้คือส่วนที่มนุษย์ใช้บริโภค และหลังจากที่ผสมเกสรแล้วประมาณ 30 วัน ก็สามารถเก็บเกี่ยวได้

เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนภายนอกที่เป็นเปลือก (Hull) คือ กลีบดอกใหญ่และกลีบดอกเล็กหุ้มอยู่ภายใน เรียกว่า ข้าวกล้อง (Brown rice) ข้าวกล้องจะมีน้ำหนักประมาณ 72-78 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทั้งหมดของเมล็ดข้าว ข้าวกล้องมักจะมีสีน้ำตาลอ่อนๆ เมื่อผ่าตามยาวจะพบเยื่อบางๆ (Pericarp layer) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เห็นข้าวกล้องเป็นสีน้ำตาลอ่อนๆ ถัดจากเยื่อบาง คือ เปลือกหุ้มเมล็ดชั้นใน (Seed coat) ต่อจากนั้น คือ Nucellus และชั้นในสุดเป็นเยื่อบางๆ คือ Aleurone layer หุ้มส่วนที่เป็นแป้ง ซึ่งมีสีขาวข้น หรือขาวใส และส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าว (Embryo)

ส่วนของเมล็ดแป้งใน Endosperm ประกอบด้วยเม็ดแป้ง (Starch granules) และโปรตีน (Protein bodies) โดยที่โปรตีนส่วนมากจะอยู่ตรงรอบนอกใกล้กับชั้นในสุดของเยื่อหุ้มแป้ง (Aleurone layer) ส่วนเม็ดแป้งจะอยู่ด้านใน

2.4.2 การเจริญเติบโตของต้นข้าว

วงจรชีวิต (life cycle) ของข้าวในรอบหนึ่งๆ จะใช้เวลามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติประจำพันธุ์ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 90-180 วัน โดยวงจรชีวิตในการเจริญเติบโตและพัฒนาการของข้าวแบ่งเป็น 3 ช่วง (อรรควุฒิ ทัศน์สองชั้น, 2527) คือ

1) ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบ (Vegetative phase)

หลังจากที่ยอดอ่อนโผล่พ้นเมล็ดข้าวได้ประมาณ 3 วัน จะเห็นใบแรกโผล่ออกมาจากปลอกหุ้มยอดอ่อน (Coleoptile) อีกประมาณ 5-10 วัน ใบที่ 2 และใบที่ 3 ก็จะตามออกมา จากนั้นต้นอ่อนของข้าวก็จะเจริญเติบโตต่อไปจนกระทั่งถึงระยะก่อนที่หน่อแรกเจริญออกมาจาก

ตาที่ส่วนโคนของลำต้นแม่ ซึ่งจะใช้เวลาตั้งแต่ 15-20 วันเป็นอย่างน้อย นับตั้งแต่เริ่มเห็นใบที่ 5 สมบูรณ์ ต้นอ่อนของข้าวหรือที่นิยมเรียกกันว่า ต้นกล้า ก็พร้อมที่จะถอนไปปักดำได้ โดยเฉลี่ยในระยะนี้ต้นกล้าจะมีใบประมาณ 5-7 ใบ อาหารที่สะสมในเมล็ดจะถูกใช้จนหมด และมีระบบรากฝอยที่สมบูรณ์ ลำต้นสูงประมาณ 20-30 เซนติเมตร เมื่อนำไปปักดำแล้วการเจริญเติบโตทางต้นและใบก็จะดำเนินการเข้าสู่ระยะการแตกกอ (Tillering) โดยปกติหลังปักดำได้ 7-10 วันต้นกล้าก็จะเริ่มแตกกอ หน่อแรกเริ่มแทงออกมาจากข้อที่ต่ำที่สุดของโคนต้น หลังจากที่หน่อแรกเจริญแล้วหน่อที่สองก็จะเจริญตามออกมา ระยะแตกกอนี้จะอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 35-45 วันนับจากเมล็ดเริ่มงอก อาจแบ่งระยะการแตกกอได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะแตกกอสูงสุด (Maximum tillering stage) เมื่อการเพิ่มจำนวนของหน่อที่สองหยุดลง การเพิ่มจำนวนของหน่อที่สามจะเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ดูไม่ออกว่าต้นไหนเป็นต้นแม่ ต้นไหนเป็นหน่อใหม่ และระยะการยืดตัวของลำต้น (Stem elongation) ในพันธุ์ข้าวที่มีวงจรชีวิตยาว การยืดตัวของลำต้นจะเกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มสร้างรวงอ่อน (Panicle initiation) ซึ่งเป็นระยะต่อจากการแตกกอ สำหรับพันธุ์ข้าวที่มีอายุสั้นการยืดตัวและการสร้างรวงอ่อนเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน

2) ช่วงการสืบพันธุ์ (Reproductive phase)

เมื่อเข้าถึงช่วงนี้การเจริญเติบโตทางต้นและใบ เช่น การแตกกอและการเจริญทางด้านความสูงจะหยุดลง พัฒนาการในช่วงต่อไปจะเข้าสู่ระยะดังนี้

(1) การสร้างรวงอ่อน (Panicle initiation) เมื่อการเจริญเติบโตของข้าวถึงระยะแตกกอสูงสุด ถ้าฉีกกาบใบตรงข้อบนสูงสุดออกให้หมด ที่ข้อสุดท้ายของลำต้นจะเห็นยอดรวงอ่อน (Panicle primodia) โผล่ออกมาจากตรงปลายสุดของปล้องสุดท้าย

(2) การพัฒนาช่อดอก (Panicle development) ยอดรวงอ่อนซึ่งยังหุ้มด้วยกาบใบสุดท้ายจะพัฒนาเป็นรวงอ่อน ดอกเล็กๆ บนก้านรวงอ่อนก็จะพัฒนาตัวเองเช่นกัน โดยเพิ่มจำนวนขึ้น ฉะนั้นในช่วงนี้ถ้าหากว่าขาดน้ำและธาตุอาหารจะกระทบกระเทือนการสร้างจำนวนดอก ซึ่งจะทำให้ผลผลิตลดลงได้

(3) การตั้งท้อง (Booting) หลังจากที่ข้าวมีการพัฒนารวงนับจากวันที่เห็นยอดรวงอ่อนพ้นข้อบนสุดของปล้องสุดท้ายของต้นแม่ได้ประมาณ 15-20 วัน ถ้าดูจากภายนอกจะเห็นว่ากาบใบของใบสุดท้ายที่เรียกว่าใบธง จะพองกลม ใหญ่กว่าส่วนล่างของลำต้น ลักษณะนี้เรียกว่าข้าวตั้งท้องเต็มที่

(4) การโผล่ของช่อดอก (Heading) ก้านช่อดอกข้าวจะค่อยๆ ส่งช่อดอกข้าวให้พ้นกาบใบธง

(5) การออกดอก (Flowering) เมื่อก้านช่อดอกส่งช่อดอกข้าวพ้นใบธงแล้ว ช่อดอกจะยังคงมีลักษณะตั้งตรง ดอกข้าวจะเริ่มบานจากปลายช่อลงมาถึงโคน นับจากวันที่เห็นตุ่มยอดรวงอ่อนได้ประมาณ 25 วัน ก็จะเห็นดอกข้าวเริ่มบาน

(6) การผสมเกสรและการปฏิสนธิ (Pollination and fertilization) ดอกข้าวจะบานในช่วงเช้า ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น และคุณสมบัติประจำพันธุ์ หลังจากผสมเกสรแล้วก็จะเกิดการปฏิสนธิภายในรังไข่ จากนั้นก็ถึงช่วงการสุกแก่

3) ช่วงการสุกแก่ (Ripening phase)

หลังจากปฏิสนธิในรังไข่ได้ประมาณ 7-10 วัน ข้าวจะเข้าสู่ระยะน้ำนม (Milky stage) และจะเข้าระยะสุกแก่ทางสรีรวิทยาหลังจากที่ปฏิสนธิได้ประมาณ 30-35 วัน ซึ่งเป็นระยะที่พร้อมจะเก็บเกี่ยวได้

2.4.3 วิธีการปลูกข้าว

ข้าวที่ปลูกโดยทั่วไป สามารถจำแนกตามวิธีการทำนา หรือสภาพการปลูกได้ 3 ประเภท ได้แก่ ข้าวไร่ คือ ข้าวที่ปลูกแบบพืชไร่ที่ปกติไม่มีน้ำขัง โดยใช้วิธีหยอด หรือโรย หรือหว่านเมล็ดข้าวแห้งลงไปในดินโดยตรง ข้าวนาดำ คือ ข้าวที่ปลูกด้วยการใช้ต้นอ่อน หรือกล้าไปปลูก โดยต้องมีการตกกล้า และเลี้ยงกล้าให้โตจนได้ขนาด แล้วจึงนำไปปักดำ และข้าวนาหว่าน คือ ข้าวที่ปลูกด้วยวิธีหว่านลงไปในแปลงนาโดยตรง โดยไม่ต้องตกกล้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ นาหว่านข้าวแห้ง หรือนาหว่านสำรวย เป็นการทำนาด้วยการนำเมล็ดข้าวที่เป็น เมล็ดแห้ง หว่านลงในแปลงนาโดยตรง และนาหว่านข้าวงอก หรือนาหว่านน้ำตม เป็นการทำนาโดยการนำเมล็ดข้าวที่เพาะจนงอกหว่านลงในแปลงนาโดยตรง อาจเป็นการหว่านบนดินโคลน หรือหว่านลงในแปลงนาที่มีน้ำขังก็ได้

2.4.4 ความต้องการธาตุอาหารในแต่ละระยะของต้นข้าว

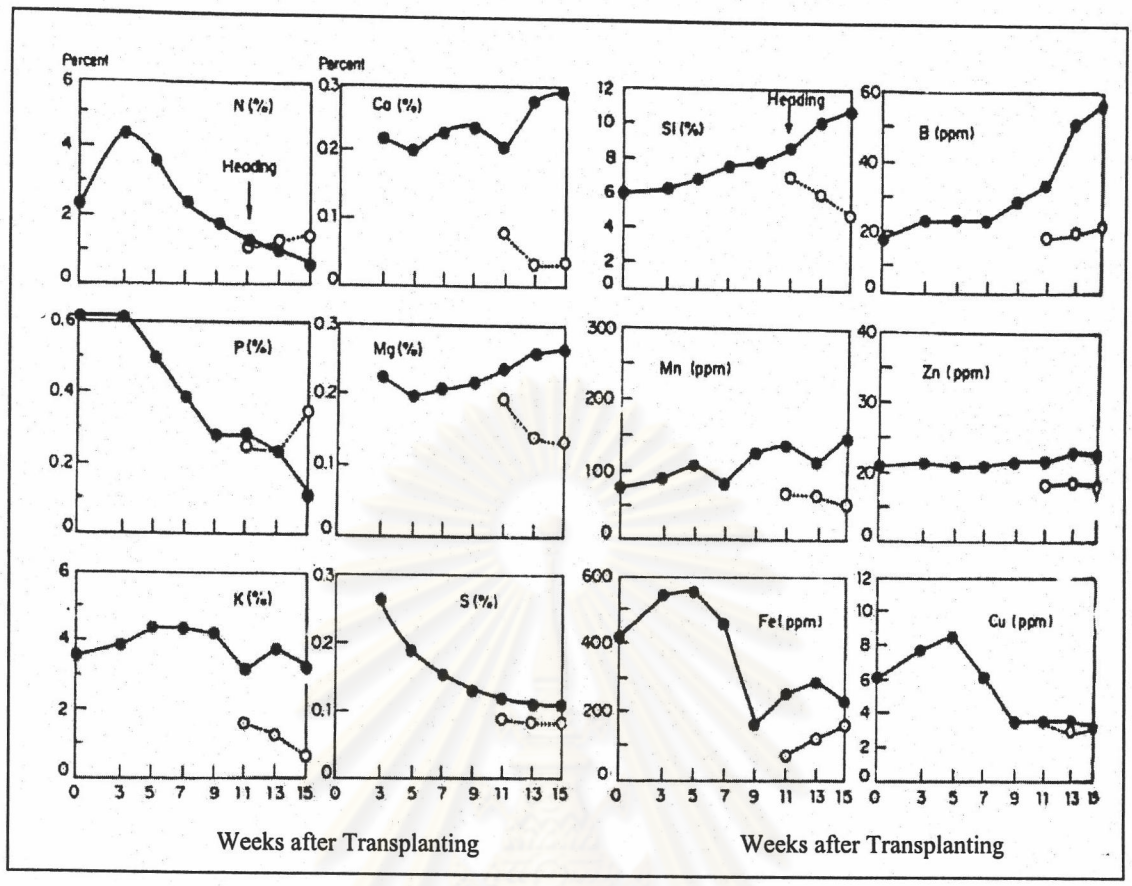
ปัจจัยสำคัญในการควบคุมผลผลิตข้าว คือ ปริมาณและวิธีการใส่ปุ๋ย (Ishizuka,1964) เนื่องจากข้าวมีความต้องการธาตุอาหารที่แตกต่างกันในแต่ละระยะการเจริญเติบโต โดยมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารในระยะต่างๆ ของการเจริญเติบโตของข้าวทั้งในแถบอบอุ่น แถบร้อนชื้น พบว่า ภูมิอากาศ สมบัติของดิน ชนิดและปริมาณปุ๋ยที่ใส่ พันธุ์ข้าว และการเขตกรรมมีอิทธิพลต่อการดึงดูดธาตุอาหาร (Tanaka et al., 1964; Ishizuka, 1971)

เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในข้าวลดลงเล็กน้อยหลังจากเพาะปลูก และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระยะออกดอก (Flowering) หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง

ระยะน้ำนมในเมล็ดข้าวแข็งขึ้น (Dough stage) ส่วนเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่ทำการเพาะปลูก ต่อจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และจะมีมากที่สุดที่ระยะเริ่มต้นการออกดอก (Start of flowering) โดยจะมีเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสสูงต่อเนื่องในระหว่างออกดอก แล้วจะลดลงในระยะน้ำนมในเมล็ดข้าวแข็งขึ้น (Dough stage) เนื่องจากมีการเคลื่อนย้ายไปสะสมเป็นแป้งในเมล็ด สำหรับเปอร์เซ็นต์โพแทสเซียมจะลดลงอย่างช้าๆ ในระหว่างการเจริญเติบโต และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ระยะออกดอก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของโพแทสเซียมนั้นเหมือนกับแคลเซียม นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์ของแมกนีเซียมจะเพิ่มขึ้นหลังจากทำการเพาะปลูกจนกระทั่งระยะแตกกอ (Tillering stage) ก็จะลดลงอย่างช้าๆ ส่วนเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์จะลดลงในระหว่างการเจริญเติบโต (De datta, 1981)

นอกจากนี้การศึกษาของ Yoshida (1981) พบว่า ปริมาณไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S) ในส่วนของตอซัง (ใบและต้น) จะมีค่าสูงในระยะแรกของการเจริญเติบโต และจะลดลงเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ปริมาณโบรอน (B) และซิลิกอน (Si) จะมีค่าต่ำในช่วงแรกของการเจริญเติบโต และค่อยๆ เพิ่มเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้น โดยที่ปริมาณของไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ในรวงข้าวจะมีค่าสูงกว่าในตอซัง ในขณะที่ปริมาณแคลเซียม (Ca) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Si) โบรอน (B) แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) จะมีค่าสูงในตอซัง ส่วนปริมาณซัลเฟอร์ (S) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) จะมีปริมาณใกล้เคียงกันทั้งในส่วนของตอซัง และรวงข้าว ดังรูปที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ปริมาณธาตุอาหารในข้าวพันธุ์ IR 8 ที่ระยะการเจริญเติบโตต่างๆ ของต้นข้าว (Yoshida, 1981)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย