บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

โบรอนในดิน

โดยธรรมชาติโบรอนเกิดจากดินที่มีแร่ tourmaline (มีโบรอนประมาณ 10%) (Sauchelli, 1969) ปริมาณโบรอนในดินอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20-200 ppm (Sauchelli, 1969; Mengel and Kirkby, 1987) สัดส่วนของโบรอนที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (ในน้ำร้อนที่ละลายได้) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.4-5 mg L^{-1} (Gupta, 1979) ปริมาณโบรอนในดินที่ละลายได้ในน้ำร้อนที่ทำให้พืชที่อ่อนแอขาดโดยทั่วไปมีค่า ≤0.3 mg kg^{-1} (Shorrocks, 1991) และความเข้มข้นโบรอนวิกฤติในดินที่ไม่ทำให้ผลผลิตลดลงและไม่ทำให้พืชแสดงอาการเป็นพิษมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-1.0 mg L^{-1} สำหรับพืชปลูกที่อ่อนแอ อยู่ระหว่าง 1.0-2.0 mg L^{-1} สำหรับพืชปลูกที่ทนทานปานกลางและอยู่ระหว่าง 2.0-4.0 mg L^{-1} สำหรับพืชปลูกที่ทน (Wilcox and Durum, 1967) ดินในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มากกว่า 50% ถูกจัดอยู่ในกลุ่มดิน Acrisols ซึ่งพบในประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย ลาว เวียดนามและไทยนั้นจัดว่าเป็นดินที่มีโบรอนที่ละลายได้ในน้ำร้อนอยู่ในระดับต่ำคือประมาณ 0.5-0.6 mg L^{-1} (Shorrocks, 1997) สำหรับประเทศไทยพบว่ามีโบรอนต่ำกว่าปริมาณเฉลี่ยที่พบในประเทศอื่นโดยเฉพาะในภาคเหนือมีปริมาณโบรอนที่ละลายได้ในน้ำร้อนเท่ากับ 0.13-0.25 μg g^{-1} (Hiranburana and Chawachati, 1986) เมื่อเทียบกับปริมาณโบรอนวิกฤติในดินที่พืชขาดเท่ากับ 0.15-0.34 μg g^{-1} (Morril et al., 1977) แต่ในภาคกลางของประเทศพบว่ามีปริมาณโบรอนสูงกว่า 0.40 mg kg^{-1} (สำเนา และสุวพันธ์, 2538) ซึ่งไม่ทำให้ถั่วลิสงแสดงอาการขาด เพิ่มพูนและสุกัญญา (2532) ยังพบว่าดินบางแห่งของภาคใต้ก็มีการขาดโบรอนเช่นเดียวกับภาคอื่นๆ ของประเทศ

ในบางประเทศดินมีระดับโบรอนตั้งแต่ขาดไปจนถึงระดับที่เป็นพิษเช่นบริเวณ Central Southern Anatolian ของประเทศตุรกีที่มีการเพาะปลูกพืช มีฝนตกน้อยและมีการให้น้ำชลประทาน พบว่าบางส่วนของพื้นที่มีปริมาณโบรอนที่เป็นพิษและบางส่วนยังต้องใส่ปุ๋ยโบรอน จากการศึกษาของ Gezgin et al. (2001) ปริมาณโบรอนในดินของพื้นที่นี้ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่ในช่วงระหว่าง 0.02-63.9 mg kg^{-1} เมื่อพิจารณาปริมาณโบรอนที่ทำให้พืชขาด (<0.5 mg kg^{-1}) และที่ทำให้พืชเป็นพิษ (>

0.5 mg kg^{-1}) (Reisenauer et al., 1973; Karen and Bingham, 1985) พบว่า 26.6% ของตัวอย่างดินขาดโบรอน และ 9.9% มีระดับโบรอนที่เป็นพิษ แต่ส่วนใหญ่ (63.5%) ของตัวอย่างดินมีความเข้มข้นโบรอนที่พอเพียงต่อการเจริญเติบโตของพืชส่วนใหญ่ (0.5-5.0 mg kg^{-1}) ในกรณีนี้ 18% ของตัวอย่างดินมีโบรอนมากกว่า 3 mg kg^{-1} เป็นปริมาณที่เป็นพิษต่อธัญพืชซึ่งเป็นพืชปลูกที่สำคัญของพื้นที่นี้ ประเทศไทยก็มีโอกาสที่จะพบปัญหานี้เพราะดินของประเทศส่วนใหญ่มีโบรอนต่ำและแก้ปัญหาด้วยการใส่ปุ๋ยโบรอน การใช้เป็นประจำสำหรับพื้นที่ปลูกธัญพืชเมืองหนาวเช่นข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์อาจตกค้างเกิดการเป็นพิษในดินได้ โดยทั่วไปปุ๋ยโบรอนที่ใช้สำหรับธัญพืชเท่ากับ 10 kg borax ha^{-1} จากการศึกษาผลตกค้างของปุ๋ยโบรอนต่อถั่วลิสงที่ปลูกเป็นปีที่ 2 และที่ 3 ที่จังหวัดขอนแก่นของเพิ่มพูนและประเทือง (2532) พบว่าการใส่ปุ๋ยโบรอนในอัตรา 0.5 และ 1 kg borax ha^{-1} มีผลในการเพิ่มน้ำหนักเมล็ดถั่วลิสงที่ปลูกเป็นปีที่ 2 และ 3 แต่ไม่มีผลเพิ่มน้ำหนักแห้งของส่วนเหนือดินและการเพิ่มปุ๋ยโบรอนอัตราสูงกว่า 1 kg borax ha^{-1} จะทำให้น้ำหนักลำต้นและใบของถั่วลิสงลดลงซึ่งอาจส่งผลต่อการสร้างส่วนของเมล็ดได้

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเป็นประโยชน์ของโบรอนในดิน

โบรอนที่ละลายในดินส่วนหลักเกิดจากกรดบอริก ($B(OH)_3$) ซึ่งการดูดใช้โบรอนของพืชขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดบอริกในสารละลายดิน (Karen and Bingham, 1985) ปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ของโบรอน และสัดส่วนของโบรอนที่ถูกดูดซับไว้ในดินคือ ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายดิน (Soil pH) โครงสร้างดิน (Soil texture) ความชื้นในดิน (Soil moisture) และอุณหภูมิดิน (Soil temperature) (Goldberg, 1997) ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการขาดโบรอนในดิน Shorrocks (1997) ได้อธิบายว่าเกี่ยวข้องกับ 1) ความสามารถของดินที่จะให้โบรอนที่เป็นประโยชน์และพอเพียงแก่พืชในช่วงฤดูปลูก: แหล่งดินต้นกำเนิดที่มีโบรอนในกลุ่ม gabbro และ basalt จะมีความเข้มข้นโบรอนอยู่เพียง 5 mg kg^{-1} ซึ่งต่ำสุดเมื่อเทียบกับดินกลุ่มอื่น (Sillanpaa and Vlek, 1985) และโครงสร้างของดินที่มีเนื้อหยาบจะมีโบรอนที่ละลายน้ำได้ต่ำกว่าดินเนื้อละเอียด ทั้งสองอย่างเป็นปัจจัยดินที่สำคัญที่ทำให้ดินมีโบรอนต่ำ 2) ความต้องการโบรอนของพืชและการเคลื่อนย้ายโบรอน: สำหรับปัจจัยนี้พบว่าพืชแต่ละชนิดต้องการโบรอนแตกต่างกันและทำให้การเคลื่อนย้ายโบรอนออกไปกับพืชแตกต่างกัน พืชปลูกส่วนมากนำโบรอนออกไปจากดินน้อยกว่า 100 g B ha^{-1} มีเพียง lucerne และ beet ที่มักนำ

โบรอนออกไปจากดินมากกว่า 300 g B ha^{-1} ในขณะที่ธัญพืชนำโบรอนออกไปจากดินน้อยกว่า 3) ภูมิอากาศ: สภาพที่มีน้ำฝน อุณหภูมิ และความยาวนานของการเปลี่ยนแปลงอากาศในดินเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้สูญเสียโบรอนจากดิน สภาพอากาศร้อนและแห้งทำให้พืชแสดงอาการขาดมากขึ้นและลดประโยชน์ของโบรอนที่ใส่ลงดิน 4) การจัดการ: การจัดการเพาะปลูกเช่นในอาร์เจนตินาที่มีการปลูก lucerne เพื่อให้สัตว์กินนั้นจะยิ่งทำให้โบรอนสูญเสียจากดินแต่จะเป็นการหมุนเวียนยูเรียและของเสียต่างๆ ได้ นอกจากนี้ความเป็นพิษของโบรอนโดยทั่วไปเกิดขึ้นจากการใช้ปุ๋ยโบรอนในปริมาณมากเกินไป หรือเกิดจากการที่ในดินมีความเข้มข้นโบรอนสูง เช่นดินที่เกิดจากตะกอนดินที่พัดมาจากทะเล อย่างไรก็ตามการเป็นพิษของโบรอนมักเกิดขึ้นในพื้นที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้งซึ่งระดับโบรอนในดินมักจะสูง สภาพของโบรอนในน้ำชลประทานก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเป็นพิษ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ทำให้โบรอนในดินเป็นพิษนั้น Nable et al. (1997) สรุปไว้ว่าเกิดจาก 1) น้ำชลประทาน: เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้โบรอนในดินมีปริมาณสูง (Chauhan and Power, 1978) 2) การทำเหมืองแร่: เป็นการสร้างสารคาร์บอเนตซึ่งเป็นแหล่งของโบรอน การเกิดออกซิเดชันของสารนี้ทำให้มีโบรอนที่ละลายน้ำได้มากขึ้น 3) ผงขี้เถ้า: การปนเปื้อนของฝุ่นผงขี้เถ้าทำให้ความเข้มข้นโบรอนในดินสูงขึ้น (Adriano, 1986) โดยเฉพาะอย่างยิ่งโบรอนที่อยู่ในผงขี้เถ้านี้สามารถละลายน้ำได้และถ้ามีปริมาณมากจะเพิ่ม pH ของดิน และ 4) การใช้โบรอนในทางอุตสาหกรรม: กรดบอริกและ borate minerals ถูกใช้มากในการผลิตแก้ว เครื่องหนัง พรม ปุ๋ย เป็นต้น ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้จะลงสู่น้ำใต้ดินและไหลลงสู่ทะเล (Vengosh et al., 1994)

บทบาทของโบรอนในพืช

บทบาทของโบรอนในพืชเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาเมื่อพืชขาดโบรอนและเกี่ยวข้องกับสรีระและชีวเคมีของพืช โบรอนมีบทบาทพื้นฐานใน Lignin biosynthesis (Ascerbo et al., 1973) ในพืชที่มีท่อลำเลียง (Lewis, 1980) Gauch and Dugger (1954) กล่าวถึงความสามารถของโบรอนว่ามีบทบาทช่วยให้การเคลื่อนย้ายน้ำตาลภายในต้นพืชง่ายขึ้น โบรอนยังมีบทบาทเกี่ยวข้องกับ nucleic metabolism, protein metabolism, การสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรท, การสังเคราะห์แสงและไม่นานมานี้พบว่าโบรอนมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการคงสภาพและการรักษาเนื้อเยื่อ (Dugger, 1983; Pilbeam and Kirkby, 1983) การขาดโบรอนจะยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อ

เจริญ เช่น เนื้อเยื่อเจริญปลายราก เนื้อเยื่อเจริญบริเวณส่วนยอดพืช หรือเนื้อเยื่อแคมเบียม Gupta (1979) พบว่าการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อเจริญจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องเมื่อได้รับโบรอน และโบรอนเป็นธาตุที่ใช้ในการสังเคราะห์ N-bases เช่น Uracil (Albert, 1968) Mengel and Kirkby (1987) ได้สรุปผลการศึกษาที่ผ่านมาว่าโบรอนมีบทบาทใน N-base utilization และ RNA metabolism นอกจากนี้ Matoh (1997) ยังได้อธิบายถึงบทบาทของโบรอนในผนังเซลล์ว่าเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบต่างๆ ของผนังเซลล์และที่สำคัญเกี่ยวข้องกับความคงตัวหรือความแข็งแรงของผนังเซลล์เพื่อรักษาความแข็งแรง รูปร่างและความมีชีวิตของเซลล์ เมื่อขาดโบรอนรากและต้นของถั่วปากอ้า (*Vicia faba*) ที่ปลูกในสารละลายจะบางและสั้นลง (Warington, 1923)

Wagner and Michael (1971) กล่าวว่าเมื่อพืชขาดโบรอน การสังเคราะห์ไซโตไคนินในพืชจะถูกยับยั้ง ซึ่ง Shkolnik (1974) ได้กล่าวถึงบทบาทของโบรอนในพืชว่าการสะสม auxins และ phenols ที่มากเกินไปเป็นสาเหตุให้เกิด necrosis ซึ่งเกี่ยวข้องกับการขาดโบรอน อาจเป็นไปได้ว่าโบรอนมีบทบาทเกี่ยวข้องกับ auxin metabolism, การสังเคราะห์โปรตีน และการนำฟอสเฟตไปใช้ ซึ่งได้มีการศึกษาโดย Price et al. (1972) และจากการศึกษาของ Dugger (1983) พบว่ามีความแตกต่างระหว่างการขาดโบรอนและการเป็นพิษของ IAA กล่าวคือการที่โบรอนมีบทบาทต่อการเจริญของเซลล์ คือ ช่วยให้เซลล์ยืดตัว พบว่ารากพืชที่ขาดโบรอนจะสั้นมากการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือกิจกรรมของเอนไซม์ IAA oxidase เพิ่มอย่างรวดเร็ว แต่ Fackler et al. (1985) พบว่าไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างระดับ IAA และอาการขาดโบรอนซึ่งพบโดย Smirnov et al. (1977) บทบาทที่สำคัญอีกบทบาทหนึ่งนั้น Brown (1979) เสนอว่าโบรอนมีบทบาทเฉพาะคือจะเกี่ยวข้องกับการงอกของหลอดละอองเรณู (pollen tubes) เมื่อพืชได้รับโบรอนไม่เพียงพอ การงอกของ pollen ถูกยับยั้งและการติดผลล้มเหลว โดยผลมีขนาดเล็กมากและมีคุณภาพต่ำ (Gärtel, 1974)

Dell and Huang (1997) ได้สรุปว่าโบรอนมีบทบาทที่สำคัญต่อทั้งการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบและการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ ซึ่งบทบาทของโบรอนต่อการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบของพืชนั้นเกี่ยวข้องกับการเจริญของราก, การเปลี่ยนแปลงเนื้อเยื่อท่อลำเลียง, การเจริญของใบและการสังเคราะห์แสง และการเคลื่อนย้ายถ่ายเทโบรอนระหว่างต้นและราก สำหรับบทบาทต่อการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชในเรื่องการออกดอก, การพัฒนาเกสรตัวผู้, การพัฒนาเกสรตัวเมีย, การถ่ายละอองเรณูเพื่อการปฏิสนธิ, การพัฒนาเมล็ดและผล และความมีชีวิตของเมล็ดและการงอก

จากรายงานที่ผ่านมาพบว่าบทบาทของโบรอนในพืชที่แน่ชัดนั้นเกี่ยวข้องกับโบรอนในผนังเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์และโครงสร้าง (Matoh, 2001; Matoh and Kobayashi; 2001; Brown et al., 2002) เป็นสำคัญ โดย Matoh (1997) เสนอว่าแท้จริงแล้วโบรอนไม่ได้มีบทบาทในการสังเคราะห์สารที่เป็นผนังเซลล์ แต่ช่วยให้สารเหล่านั้นจัดเรียงตัวอย่างเหมาะสม โดยทั่วไปผนังเซลล์พืชประกอบด้วย cellulose, hemicellulose, pectin, สารประกอบไขมัน และสารประกอบอื่นๆ (สมบุญ, 2544) ซึ่งโบรอนจะรวมอยู่กับผนังเซลล์ โบรอนในส่วนนี้เกือบทั้งหมดรวมอยู่กับ pectin (อยู่ในผนังเซลล์ชั้นปฐมภูมิ และเป็นสารที่ช่วยให้ผนังเซลล์ยืดหยุ่นได้) โดยสาร pectin จะมี RG-II (Rhamnogalacturonan II) (Matoh, 2001; Matoh and Kobayashi; 2001) ซึ่งเป็น polysaccharide ที่มีในสาร pectin (pectic polysaccharide) โบรอนส่วนใหญ่อยู่ใน RG-II และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างสาย pectic polysaccharide สองสายที่อยู่ใน RG-II และมี Ca^{2+} ที่ช่วยให้พันธะนี้แข็งแรงขึ้น ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงและเสถียร เนื่องจากมีโครงสร้าง pectin ที่สมบูรณ์ (Matoh, 2001) โบรอนที่สามารถรวมอยู่ในพันธะนี้ได้ดีจะต้องรวมกับอินทรีย์สารที่อยู่ในรูปของ diols และ polyols โดยเฉพาะ *cis*-diol โบรอนที่รวมกับอินทรีย์สารในรูป *cis*-diol นี้จะเป็นรูปที่โบรอนรวมตัวกับอินทรีย์สารที่มีน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล โดยเฉพาะ mannitol, mannan และ polymannuronic acid (น้ำตาลเหล่านี้เป็นองค์ประกอบของ hemicellulose) กลายเป็นสารประกอบโบรอนเชิงซ้อน โบรอนในรูปสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะมีโครงสร้างที่แข็งแรงและเสถียรเมื่อรวมกับ *0*-diphenolics (เช่น caffeic acid และ hydroxyferulic acid) (Marschner, 1995) ดังนั้นหากพืชขาดโบรอนจะทำให้ผนังเซลล์พืชคงสภาพต่อไปไม่ได้ และเสียหายในที่สุด เนื่องจากมีองค์ประกอบของผนังเซลล์ที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้มีโครงสร้างผนังเซลล์ที่ไม่แข็งแรง กระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช Matoh (1997) ยังพบว่า RG-II จะพบเห็นได้ในผนังเซลล์ทุกเซลล์ เช่นในรากของหัวผักกาด (radish) และพบในผนังเซลล์ของหลอดละอองเรณูที่กำลังเจริญ ดังนั้นเมื่อพืชขาดโบรอนหลอดละอองเรณูจะแตกเสียหาย (Nyomura, 1995 (อ้างโดย Brown et al., 2002)) เนื่องจากผนังเซลล์ส่วนนี้ไม่แข็งแรงจนไม่สามารถเจริญเติบโตเป็นหลอดละอองเรณูที่สมบูรณ์ได้ กระทบต่อความมีชีวิตและการถ่ายละอองเรณูและความผิดปกติในการปฏิสนธิในที่สุด

การขาดโบรอนในพืชและความทนทานต่อการขาด

พืชตอบสนองต่อโบรอนต่ำในดินแตกต่างกันอย่างกว้างขวางระหว่างชนิดพืชและแตกต่างระหว่างพันธุ์ในพืชชนิดเดียวกัน ความต้องการโบรอนและความอ่อนแอต่อระดับโบรอนต่ำในดินสามารถจำแนกได้ตามประเภทของพืชแต่ละชนิด พืชใบเลี้ยงคู่ต้องการโบรอนมากกว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และผักในตระกูล *Cruciferous* และ *Umbelliferous* จะมีความต้องการโบรอนสูง (Martens and Westermann, 1991) พืชที่อ่อนแอต่อระดับโบรอนต่ำเช่น ถั่วลูเซิน (*Medicago sativa*), *Brassica spp.*, หัวบีท (*Beta vulgaris*), celery (*Apium graveolens*) เป็นต้น (Jones, 1991) สำหรับความต้องการโบรอนที่แตกต่างกันระหว่างพันธุ์ในพืชชนิดเดียวกันเช่น ในระหว่างพันธุ์พืชตระกูลถั่วที่เป็นอาหารสัตว์ red clover (*Trifolium pratense*) อ่อนแอที่สุดตามด้วยถั่วลูเซิน, Alsike clover (*Trifolium hybridum*) และ white clover (*Trifolium rapens*) ซึ่งทนทานต่อการขาดโบรอนที่สุด (Sherrell, 1983)

ช่วงความแตกต่างทางพันธุกรรมภายในพืชชนิดเดียวกันบางครั้งอาจกว้างซึ่งช่วงของชนิดพืชอาจเปลี่ยนแปลงภายในพันธุ์พืชนั้นเช่นประสิทธิภาพการใช้โบรอนของถั่วเหลือง (*Glycine max*) (Rerkasem et al., 1993) ถั่วเขียว (*Vigna radiata*) และถั่วเขียวผิวดำ (*Vigna mungo*) จะแตกต่างกันขึ้นกับพันธุ์ที่เลือกมาเปรียบเทียบ (Rerkasem, 1990; Rerkasem et al., 1989) ในทานตะวัน พันธุ์ที่ทนต่อการขาดโบรอนมีความเข้มข้นของโบรอนสูงในใบแก่ที่อยู่ที่ยอด (Blamey et al., 1979) เช่นเดียวกับในถั่วเขียวผิวดำและถั่วเขียว พันธุ์ที่ได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของโบรอนที่ต่ำในดินจะมีความเข้มข้นของโบรอนสูงใน YFEL (Rerkasem, 1990) สำหรับข้าวสาลีพบว่ามีความทนทานสูงกว่าพืชใบเลี้ยงคู่ในสภาพที่มีโบรอนต่ำ (Martens and Westermann, 1991) อย่างไรก็ตาม Rerkasem and Jamjod (1997b) พบว่าความแตกต่างระหว่างพันธุ์ของข้าวสาลีมีช่วงกว้างสำหรับประสิทธิภาพในการใช้โบรอน บางพันธุ์อาจมีประสิทธิภาพในการใช้โบรอนน้อยกว่าพืชใบเลี้ยงคู่ จากความแตกต่างนี้ Rerkasem and Jamjod (1997a) แบ่งกลุ่มการตอบสนองต่อการขาดโบรอนของข้าวสาลีจากดัชนีการติดเมล็ดเทียบกับที่ระดับโบรอนปกติได้เป็น 5 กลุ่มตั้งแต่อ่อนแอมาก (very sensitive) จนถึงทนต่อการขาด (tolerant)

Rerkasem and Jamjod (1997b) อธิบายว่าสำหรับกลไกของพืชที่ทนต่อการขาด (มีประสิทธิภาพในการใช้โบรอน) อาจสันนิษฐานว่าเป็นไปในทางเดียวกันกับ "ประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหาร"

(Marschner, 1995) ประสิทธิภาพการใช้โบรอนเป็นความสามารถของพืชที่จะเจริญเติบโตได้ดีในดินที่ขาดโบรอนสำหรับพันธุ์มาตรฐาน (Graham, 1984) พันธุ์ที่มีหรือไม่มีประสิทธิภาพการในการใช้โบรอนอาจขึ้นกับกลไกเดียวหรือมากกว่า ได้แก่ ความสามารถในการหาหรือนำโบรอนจากดิน การลำเลียงหรือกระจายโบรอนภายในต้น และการนำโบรอนไปใช้ภายในต้น (Rerkasem and Jamjod,1997b) ประสิทธิภาพการใช้โบรอนมีกลไกที่แตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด กลไกนี้อาจแตกต่างไปในแต่ละพันธุ์ และความแตกต่างขึ้นกับความรุนแรงของการขาด และยังขึ้นกับหน้าที่ของโบรอนทางสรีรวิทยาของพืชอีกด้วย (Yang and Römheld, 1999)

กลไกสำหรับพืชที่ทนต่อการขาดแตกต่างกันระหว่างชนิดพืช กลไกในการทนต่อการขาดจะเกี่ยวกับลักษณะสำคัญทางสรีรวิทยา ส่วนมากเกี่ยวข้องกับบทบาทของโบรอนในผนังเซลล์ (Matoh, 1997) การเคลื่อนย้ายของโบรอนในท่ออาหาร (phloem mobility) และศักยภาพในการ remobilisation (Brown and Shelp, 1997) บทบาทในการทนทานต่อการขาดโบรอนในพืชบางชนิดอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดโบรอน (uptake) อีกด้วย (Brown and Hu, 1996) โดยทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการโบรอนของพืช

ความทนทานต่อการขาดโบรอนของพืชเกี่ยวข้องกับโบรอนในผนังเซลล์ เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีผนังเซลล์ที่มีอินทรีย์สารเป็นองค์ประกอบต่างกันทำให้พืชมีความต้องการโบรอนไม่เท่ากัน พืชใบเลี้ยงคู่มี pectin เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์มากกว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยว จึงทำให้พืชใบเลี้ยงคู่ต้องการโบรอนเพื่อสร้างผนังเซลล์มากกว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Matoh et al., 1996) พืชที่ต้องการโบรอนน้อยจะมีความทนทานต่อการขาดโบรอนมากกว่าพืชที่ต้องการโบรอนมาก ความต้องการโบรอนยังขึ้นกับเนื้อเยื่อในแต่ละส่วนของพืช (Yang and Römheld, 1999) พืชที่ทนต่อการขาดโบรอนจะต้องการโบรอนในช่วงการเจริญทางการสืบพันธุ์ต่ำ เช่นในการพัฒนาผนังเซลล์ของเกสรตัวผู้และละอองเรณู ความทนทานต่อการขาดโบรอนในพืชยังวัดได้จากปริมาณ pectin (Hu et al., 1996) หรือวัดจาก RG-II ที่อยู่ใน pectin ได้ (Matoh, 2001) พืชที่มี RG-II สูงจะต้องการโบรอนสูง (ไม่ทนต่อการขาดโบรอน)

การเคลื่อนที่ของโบรอนในท่ออาหารและการเคลื่อนย้ายโบรอนกลับมาใช้ใหม่ (B retranslocation) ในพืชบางชนิดเริ่มเป็นกลไกหนึ่งที่สำคัญสำหรับประสิทธิภาพในการใช้โบรอน การเคลื่อนย้ายของโบรอนในท่ออาหาร (phloem mobility) พบในพืชบางชนิดที่มีน้ำตาลชนิด sorbital, mannitol หรือ dulcitol เป็นองค์ประกอบ โดยสามารถรวมกับโบรอนเป็นสารประกอบโบรอนเชิงซ้อนที่เสถียร (Brown and Hu, 1996) เช่นที่พบในแอปเปิล ท้อ และ celery (Hu et al., 1997) น้ำตาลชนิดนี้

ช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของโบรอนในท่ออาหาร และลดความต้องการโบรอนภายนอก (Bell et al., 2001) และจะพบว่าพืชที่ทนต่อการขาดโบรอนสามารถเคลื่อนย้ายของโบรอนในท่ออาหารได้ดีและต้องการโบรอนต่ำ เช่นเดียวกับผักกาดหัว rutabaga พันธุ์ Wihelmsberger ทนทานต่อการขาดโบรอนเพราะสามารถนำโบรอนที่สะสมไว้ในใบกลับมาใช้ใหม่เพื่อพัฒนายอด (Shelp and Shattuck, 1987) และ พันธุ์บร๊อคโคลีที่มีประสิทธิภาพในการใช้โบรอนสามารถนำโบรอนกลับมาใช้ใหม่ในใบอ่อน และดอกย่อยได้อีก (Shelp et al., 1992) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของโบรอนในท่ออาหารโดยการยึดอะตอมโบรอนด้วยน้ำตาลแอลกอฮอล์ (polyols-B complex) เช่น mannitol, sorbitol เพื่อลำเลียงขนส่งโบรอนในท่ออาหาร (Brown and Shelp, 1997)

นอกจากนี้ความสามารถในการดูดโบรอนยังเกี่ยวข้องกับความทนทานต่อการขาดโบรอนในพืชบางชนิด พบว่าปริมาณโบรอนในเนื้อเยื่อของพืชใบเลี้ยงคู่บางชนิดมีมากกว่า 20 mg B kg^{-1} ของน้ำหนักแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับพืชใบเลี้ยงเดี่ยวซึ่งเท่ากับ 5-10 mg B kg^{-1} เมื่อปลูกในดินเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าพืชใบเลี้ยงคู่มีความสามารถดูดโบรอนไปใช้ได้ดีกว่า (Gupta, 1979) และพบว่าพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นข้าวสาลีมีอัตราการดูดโบรอนต่อหน่วยของรากต่ำกว่าพืชใบเลี้ยงคู่บางชนิด เช่น ถั่วลันเตา, white lupin (*Lupinus albus*) และ lentil (*Lens culinalis*) โดย lentil จะต้องการโบรอนสูงในใบ ซึ่งสูงกว่าในใบข้าวสาลี ทำให้ lentil มีอัตราการถ่ายเทสารสังเคราะห์และอัตราการดูดโบรอนที่สูงกว่า ดังนั้นพืชใบเลี้ยงคู่ เช่น lentil จึงมีความทนทานต่อการขาดโบรอนมากกว่าข้าวสาลี (Chapman et al., 1997)

การเป็นพิษของโบรอนในพืชและความทนทานต่อการเป็นพิษ

Gupta et al. (1985) พบว่าในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นโบรอนสูงในน้ำชลประทาน พืชจะแสดงอาการเป็นพิษ ความเป็นพิษของโบรอนที่เกิดขึ้นในพืชปลูก เช่น ข้าวบาร์เลย์ (Cartwright et al., 1984) bread wheat (Cartwright et al., 1986) ถั่วลันเตา (Bagheri et al., 1992) และ durum wheat (Jamjod et al., 1997) ทำให้ผลผลิตของพืชเหล่านี้ลดลง

Nable et al. (1997) กล่าวว่าพืชมีความแตกต่างทางพันธุกรรมในการตอบสนองต่อความเข้มข้นสูงของโบรอนทั้งระหว่างพืชต่างชนิดและระหว่างพันธุ์ในพืชชนิดเดียวกันและมีช่วงกว้างในการตอบสนองต่อโบรอนพบในพืชหลายชนิดเช่น bread wheat (*Triticum aestivum*) (Chatterjee et al.,

1980) durum wheat (*Triticum aestivum* var. *durum*) (Jamjod, 1996) ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) (Christensen, 1934) ข้าว (*Oryza sativa*) (Cayton, 1985) ถั่วลันเตา (*Pisum sativum*) (Bagheri et al., 1992) annual medics (Paull et al., 1992) citrus (*Citrus spp.*) (Chapman and Vanselow, 1955) เป็นต้น

Rathjen et al. (1987) เสนอว่ากลไกของพืชที่มีความทนทานต่อธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นสูงนั้นมี 3 กลไกคือ กลไกในการหลีกเลี่ยง (avoidance) กลไกในการกีดกัน (exclusion) และเกิดจากความทนทานของพืชเอง (internal tolerance) กลไกในการหลีกเลี่ยงธาตุอาหารที่เป็นพิษของพืชเกี่ยวข้องกับลักษณะกายวิภาคของระบบราก (Nable, 1992) พืชหลีกเลี่ยงการสะสมธาตุที่มีมากเกินไปโดยลดการดูดธาตุของราก ทำให้การเคลื่อนย้ายธาตุจาก root cortex ไปยังท่อน้ำช้าลง และธาตุนั้นจะถูกแยกออกไปจาก root symplasm หรือจาก endodermis (Hagemeyer and Breckle, 1996)

สำหรับกลไกการกีดกันนี้จะลดการสะสมโบรอนในพืชทั้งหมดและกีดกันไม่ให้โบรอนเข้าไปในส่วนพืชหรือเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้อง พันธุ์ทนจะสะสมโบรอนในรากและในต้นในระดับต่ำกว่าพันธุ์ที่ไม่ทน กลไกการกีดกันนี้พืชแต่ละชนิดมีการตอบสนองแตกต่างกันและต่างกันภายในพืชชนิดเดียวกันแต่ต่างพันธุ์หรือใกล้เคียงกัน พันธุ์พืชที่อ่อนแอโดยทั่วไปจะมีความเข้มข้นโบรอนสูงทั้งในใบและต้นมากกว่าพันธุ์ทน (Eaton, 1944) เช่น Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) มีความเข้มข้นโบรอนในใบสูงกว่าอีกชนิดที่ทนกว่าคือ ทานตะวัน (*Helianthus annuus*) มะนาว (*Citrus limonin*) สะสมโบรอนในใบมากกว่าอีกชนิดที่ทนกว่าคือ ส้มพันธุ์ Chinese box (*Severina buxifolia*) (Eaton and Blair, 1935) หรือ มะเขือเทศพันธุ์ปลูก (*Lycopersicon esculentum*) อ่อนแอต่อการเป็นพิษของโบรอนและสะสมโบรอนในต้นมากกว่าพันธุ์ป่า (*L. cheesmanii*) (Toledo and Spurr, 1984) และในธัญพืชหลายชนิดและพืชตระกูลถั่วนั้นพันธุ์ที่อ่อนแอต่อการเป็นพิษของโบรอนจะมีความเข้มข้นโบรอนในต้นมากกว่าพันธุ์ทน (Begheri et al., 1992) ข้าวสาลีก็มีความแตกต่างระหว่างพันธุ์ในการทนต่อการเป็นพิษของโบรอนซึ่งแสดงให้เห็นจากทั้งต้นหรือส่วนใดส่วนหนึ่งและในระดับเซลล์ (Huang and Graham, 1990) Nable (1988) พบว่าพันธุ์ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ที่ทนจะมีโบรอนต่ำทั้งในรากและต้น ในข้าวบาร์เลย์พบว่าพันธุ์ที่ทนต่อการเป็นพิษจะสะสมโบรอนในเนื้อเยื่อน้อย ในขณะที่พันธุ์ไม่ทนสะสมโบรอนในเนื้อเยื่อมาก (Nable et al., 1988)

ส่วนกลไกที่เกิดจากความทนทานของพืชนั้น Brown and Hu (1996) กล่าวว่าอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเคลื่อนย้ายโบรอนในท่ออาหาร (phloem mobility) ซึ่งแตกต่างกันระหว่าง

ชนิดพืช มีพืชหลายชนิดที่โบรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ในท่ออาหารซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้พืชนั้นอ่อนแอต่อการเป็นพิษของโบรอน เนื่องจากโบรอนที่มีมากจะเคลื่อนจากใบแก่ไปสะสมยังใบอ่อน และเนื้อเยื่อเจริญ เช่นในองุ่น ฝ้าย และหัวผักกาด (Brown and Shelp, 1997) ดังนั้นการที่พืชไม่มีความสามารถเคลื่อนย้ายโบรอนในท่ออาหารได้จัดว่าเป็นกลไกที่เกิดจากความทนทานต่อการเป็นพิษของพืชเอง และ Brown et al. (2001) ยังกล่าวว่าพืชที่สามารถสะสมโบรอนในใบแก่และจำกัดการเคลื่อนที่ของโบรอนไปยังเนื้อเยื่อเจริญจัดเป็นความทนทานต่อความเป็นพิษของโบรอนเช่นกัน เช่นใน pistachio และ walnut

ความสัมพันธ์ระหว่างความทนทานต่อการขาดและความทนทานต่อการเป็นพิษของโบรอน

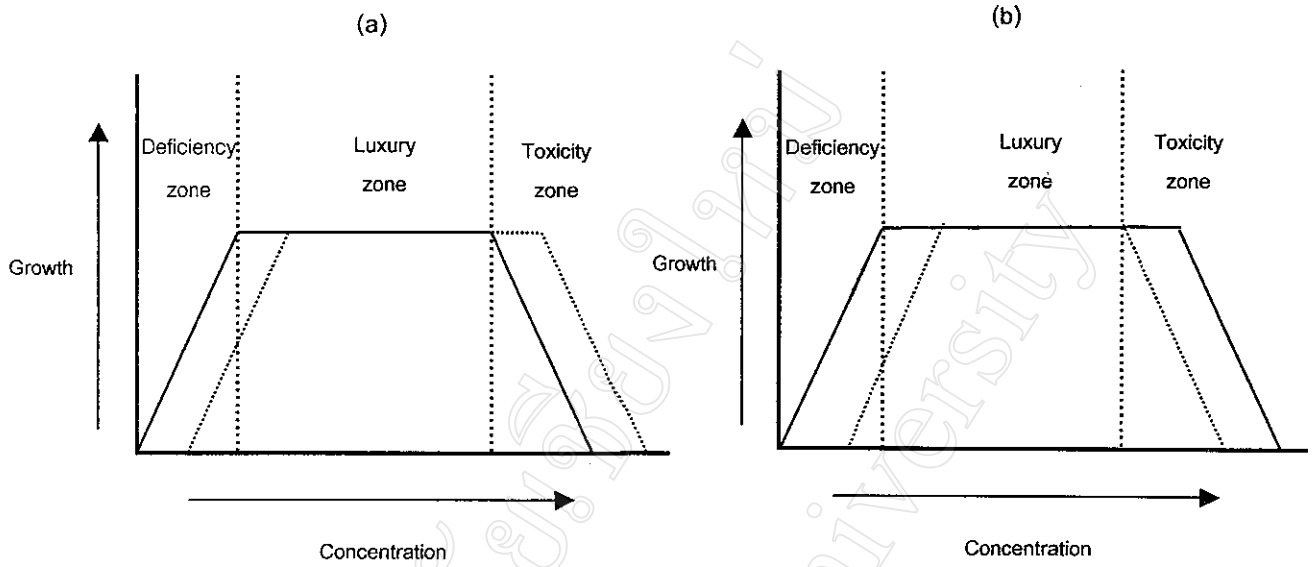
Nable (1992) พบว่าพืชที่ทนต่อความเข้มข้นของโบรอนสูงมักอ่อนแอต่อการขาดโบรอน ความสัมพันธ์เกี่ยวกับการทนต่อการขาดและการทนต่อการเป็นพิษในพืชหลายชนิดเช่น ยาสูบทนทานต่อความเป็นพิษของโบรอนที่สุดเมื่อเทียบกับพืชอื่น 5 ชนิด แต่ยาสูบยังคงต้องการโบรอนปริมาณสูงสุดกว่าพืชชนิดอื่นเพื่อการเจริญเติบโตที่เหมาะสม (Grandhi and Mehta, 1959) sugar beet มีความทนทานมากกว่าฝ้ายและถั่วเหลืองต่อความเข้มข้นโบรอนสูง แต่ผลผลิตของมันลดลงเมื่อโบรอนต่ำ (Oertli and Roth, 1969) เมื่อระดับความเข้มข้นโบรอนต่ำ *Eucalyptus* 3 ชนิดมีการตอบสนองในลักษณะตรงข้ามกับเมื่อปลูกในสภาพความเข้มข้นโบรอนสูง (Malavolta et al., 1978)

Nable (1988) พบว่ามีความแตกต่างระหว่างพันธุ์ในการทนต่อการขาดและการเป็นพิษของโบรอนในข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีและยังพบว่าข้าวบาร์เลย์พันธุ์ที่ทนต่อการเป็นพิษจะไม่ทนต่อการขาดเช่นเดียวกับที่พบในพันธุ์ข้าวสาลี พันธุ์ข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีที่ทนต่อการเป็นพิษของโบรอนจะสะสมโบรอนในเนื้อเยื่อน้อยเมื่อเทียบกับพันธุ์อ่อนแอทั้งในรากและต้น และจากการศึกษาของ Campbell et al. (1998) พบว่าพันธุ์ข้าวสาลีที่ทนต่อการเป็นพิษของโบรอนจะมีความยาวรากยาวกว่าพันธุ์อ่อนแอเมื่อปลูกในสารละลาย จากการศึกษาพันธุ์ข้าวสาลีเดียวกันนี้ในสภาพขาดโบรอน (0 mg kg^{-1}) พบว่าพันธุ์ทนต่อการเป็นพิษของโบรอนจะมีความเข้มข้นโบรอนในต้นต่ำกว่าพันธุ์อ่อนแอ (Paull et al., 1990) ลักษณะนี้พบเช่นเดียวกับในพันธุ์ถั่วลันเตาของออสเตรเลีย พันธุ์ที่ทนต่อการเป็นพิษของโบรอนที่สุดจะมีความเข้มข้นโบรอนในต้นต่ำสุด (Bagheri et al., 1992) และเมื่อปลูกในดินที่ไม่ใส่โบรอนพบว่ามีความเข้มข้นโบรอนในต้นต่ำกว่าพันธุ์ที่อ่อนแอต่อการเป็นพิษของโบรอน

จากผลการศึกษาที่ผ่านมากล่าวได้ว่าพืชพันธุ์ที่ทนต่อการขาดโบรอนจะมีความสามารถในการดูดโบรอน (uptake) แต่สำหรับพืชพันธุ์ที่ทนต่อการเป็นพิษของโบรอนจะมีความสามารถในการลดการดูดโบรอน พืชพันธุ์ที่ทนต่อการขาดโบรอนจะมีโบรอนในต้นสูงกว่าในรากส่วนพืชพันธุ์ที่ทนต่อการเป็นพิษของโบรอนจะมีความเข้มข้นโบรอนในรากและต้นต่ำเมื่อปลูกที่ระดับโบรอนสูงๆ นอกจากนี้จากที่ Brown and Shelp (1997) กล่าวไว้ว่าการเคลื่อนที่ของโบรอนในท่ออาหารเป็นกลไกหนึ่งสำหรับพืชที่ทนต่อการขาดโบรอน ในทางตรงข้ามพืชที่ไม่มีความสามารถในการเคลื่อนย้ายโบรอนในท่ออาหารได้จัดว่าเป็นกลไกความทนทานต่อความเป็นพิษของโบรอนซึ่งพืชที่โบรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ในท่ออาหารจะอ่อนแอต่อการเป็นพิษของโบรอน (Brown and Hu, 1996; Brown and Shelp, 1997)

จากความแตกต่างระหว่างพันธุ์พืชหรือพันธุ์ข้าวสาลีที่มีช่วงกว้างสำหรับการขาดและการเป็นพิษของโบรอนและความสัมพันธ์ของกลไกดังกล่าวนี้เป็นประเด็นสำคัญที่ทำให้มีการศึกษาการตอบสนองต่อการขาดและการเป็นพิษของโบรอน เพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างการขาดและการเป็นพิษของโบรอนโดยการเปรียบเทียบลักษณะการใช้โบรอนในพันธุ์ข้าวสาลีที่มีการตอบสนองต่อโบรอนแตกต่างกันและนำไปสู่ความเข้าใจในการคัดเลือกพันธุ์ไปใช้ในพื้นที่ที่ในดินมีระดับโบรอนตั้งแต่ขาดไปจนถึงเป็นพิษ

เนื่องจากการทนต่อการขาดและการทนต่อความเป็นพิษเกี่ยวข้องกับหลายกลไก ตั้งแต่การดูด การลำเลียงขนส่ง และการนำไปใช้ Macnair (1993) กล่าวว่าโดยทั่วไปพืชพันธุ์หนึ่งจะมีการตอบสนองต่อความเข้มข้นของธาตุอาหาร โดยมีการ ตอบสนองเป็นดังภาพที่ 1 (a) เมื่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ำมากๆ (อยู่ในขอบเขตที่ขาด) พืชจะได้รับความเสียหายเนื่องจากขาดธาตุนั้น และเมื่อความเข้มข้นธาตุอาหารเพิ่มมากเกินไปจนเป็นพิษ พืชก็จะได้รับความเสียหายเช่นกัน (อยู่ในขอบเขตที่เป็นพิษ) ความแตกต่างในความทนทานต่อธาตุอาหารจึงขึ้นกับชนิดพืชและความรุนแรงของระดับความเข้มข้นธาตุอาหารที่พืชได้รับ ความแตกต่างในความทนทานต่อธาตุอาหารจึงอาจเกิดจากการย้ายกราฟในภาพที่ 1 ทั้งกราฟไปทางซ้ายหรือขวาโดยกราฟมีขนาดเท่าเดิม การตอบสนองเช่นนี้เป็นกรณีของพืชที่ทนต่อการขาดเพียงอย่างเดียว (เส้นทึบ) หรือทนต่อความเป็นพิษเพียงอย่างเดียว (เส้นประ) (อาจเกิดจากกลไกเพียงกลไกเดียว) อย่างไรก็ตามพืชอาจตอบสนองโดยขยายหรือลดขอบเขตในขอบเขตใดขอบเขตหนึ่ง (อาจเกิดจากหลายกลไก) เช่นหากพืชพันธุ์นั้นทนต่อทั้งการขาดและการเป็นพิษ การตอบสนองของพืชจะเป็นไปดังภาพที่ 1 (b) (เส้นทึบ) และหากพืชไม่ทนต่อทั้งการขาดและการเป็นพิษ การตอบสนองของพืชจะเป็นไปดังภาพที่ 1 (b) (เส้นประ)



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของพืชและความเข้มข้นธาตุอาหาร พันธุ์พืชจะมีการตอบสนองแตกต่างกันในแต่ละช่วง (Macnair, 1993) ภาพที่ 1 (a) พืชที่มีความทนทานต่อการขาดธาตุนั้นเพียงอย่างเดียวจะตอบสนองตามเส้นทึบ หรือทนต่อความเป็นพิษเพียงอย่างเดียวจะตอบสนองตามเส้นประ และภาพที่ 1 (b) พืชที่มีความทนทานต่อทั้งการขาดและการเป็นพิษจะตอบสนองตามเส้นทึบ หรือไม่ทนต่อทั้งการขาดและการเป็นพิษจะตอบสนองตามเส้นประ (ดัดแปลงจาก Macnair (1993))

วิธีทดสอบ/เปรียบเทียบความทนทานต่อการขาดและการเป็นพิษของโบรอนในข้าวสาลี

สำหรับข้าวสาลีพันธุ์มาตรฐานที่ทนต่อการขาดนั้น Rerkasem and Jamjod (1997a) ได้จำแนกระดับความทนทานต่อการขาดโบรอนไว้โดยใช้ดัชนีการติดเมล็ด (Grain Set Index; GSI) เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกสำหรับข้าวสาลี โดยดัชนีการติดเมล็ดเป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นถึงการติดเมล็ด (grain set) ไม่ใช่การเติมเต็มสารอาหารในส่วนของเมล็ด (grain filling) และยังหลีกเลี่ยงอิทธิพลจากชนิดและขนาดของรวง (Anantawiroon et al., 1997) การใช้ GSI ดีกว่าวัดจาก %การติดเมล็ดจากจำนวนเมล็ดต่อจำนวนดอก (grains spikelet^{-1}) เพราะ GSI เป็นค่าที่ทำให้พันธุ์ข้าวสาลีแต่ละพันธุ์มีขอบเขตของการติดเมล็ดอยู่ในช่วงเดียวกันคือตั้งแต่ 0-100% จึงเป็นค่าการติดเมล็ดของแต่ละพันธุ์ที่นำมาเปรียบเทียบได้ โดยได้จากการปลูกในสภาพขาดโบรอนเพียงอย่างเดียวโดยไม่ต้องใช้ระดับโบรอนที่พอ

เพียงทดสอบเปรียบเทียบแต่มีพันธุ์เปรียบเทียบปลูกทดสอบด้วย (เช่นพันธุ์ทนขาดและพันธุ์อ่อนแอต่อการขาด) ในขณะที่ %การติดเมล็ดจากจำนวนเมล็ดต่อจำนวนดอก เป็นค่าการติดเมล็ดที่จะนำมาเปรียบเทียบได้ต่อเมื่อปลูกทั้งในสภาพขาดโบรอน และมีโบรอนพอเพียงเป็นระดับเปรียบเทียบ และข้าวสาลีแต่ละพันธุ์มีขนาดรวงไม่เท่ากัน (จำนวนดอกไม่เท่ากัน) จึงไม่มีขอบเขตที่แน่นอน

GSI ได้จากเปอร์เซ็นต์การติดเมล็ดจากดอกข้าง 2 ดอกย่อย (basal florets) ของแต่ละดอก (spikelets) บริเวณกลางรวงจำนวน 10 ดอก (Rerkasem and Loneragan, 1994) ซึ่ง Rerkasem and Jamjod (1997a) แบ่งกลุ่มการตอบสนองต่อการขาดโบรอนได้เป็น 5 ระดับตั้งแต่ทนมากที่สุด (GSI>85%) จนถึงอ่อนแอมากที่สุด (GSI=0-20%) โดยพันธุ์ที่ทนต่อการขาดโบรอนสามารถเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตสูงในดินที่มีโบรอนต่ำ และดัชนีการติดเมล็ดซึ่งเป็นลักษณะที่ตอบสนองในทางบวกต่อระดับโบรอนและมีความสัมพันธ์ (correlation) ใกล้ชิดกับผลผลิตในข้าวสาลี (Rerkasem and Loneragan, 1994)

ส่วนพันธุ์มาตรฐานที่ทนต่อการเป็นพิษนั้น Chantachume et al. (1995) ได้แบ่งระดับการตอบสนองต่อการเป็นพิษของโบรอนไว้แล้วโดยใช้ความยาวรากเป็นดัชนีที่สำคัญในการจำแนกความแตกต่างระหว่างพันธุ์ทนและพันธุ์อ่อนแอ ดังนั้นวิธีการหรือขั้นตอนที่ใช้ในการคัดเลือกพันธุ์ที่ดีและมีประสิทธิภาพจะช่วยให้ได้พันธุ์ที่มีมาตรฐาน ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการที่จะต้องคัดเลือกพันธุ์ที่มีจำนวนมากขึ้นได้

จากเหตุผลดังกล่าวนั้นทำให้มีการศึกษาวิธีการที่ใช้ในการคัดเลือกพันธุ์ดังที่ได้มีนักวิจัยศึกษากันอย่างแพร่หลาย Paull et al. (1990) ได้ประเมินความทนทานของข้าวสาลีต่อการเป็นพิษของโบรอนเมื่อปลูกใน soil culture โดยปลูกในกระถางและในแปลงเปรียบเทียบกันโดยใช้พันธุ์ที่ทราบระดับความทนทานแล้วมาศึกษา พบว่าพันธุ์ข้าวสาลีที่ทนและอ่อนแอตอบสนองต่อการเป็นพิษของโบรอนในระดับเดียวกันทั้งในกระถางและในแปลง โดยศึกษาจนถึงระยะสุกแก่ใช้เวลาประมาณ 6 สัปดาห์และใช้ลักษณะต่างๆ ในการประเมินการตอบสนอง เช่น การแตกกอ การให้คะแนนความรุนแรงของอาการ necrosis ความเข้มข้นโบรอนในส่วนต่างๆ ของพืช เป็นต้น พบว่าสามารถใช้ลักษณะดังกล่าวจำแนกความแตกต่างระหว่างพันธุ์ทนและอ่อนแอได้ พันธุ์ทนจะมีอาการ necrosis และความเข้มข้นโบรอนที่สะสมในส่วนต่างๆ น้อยกว่าพันธุ์อ่อนแอและมีการแตกกอที่ดีกว่า และการตอบสนองต่อการเป็นพิษในระยะแรกๆ ของการเจริญเติบโตสามารถทำนายผลผลิตได้โดยพันธุ์ที่มีการแตกกอน้อยและมีอาการเป็นพิษมากจะให้ผลผลิตต่ำ ส่วน Chantachume et al. (1995) และ Jamjod

(1996) ได้คัดเลือกพันธุ์ข้าวสาลีโดยใช้ความยาวรากเป็นเกณฑ์ในการจำแนกความแตกต่างระหว่างพันธุ์ในการตอบสนองต่อการเป็นพิษของโบรอน โดยทดสอบใน solution culture ด้วยวิธี filter paper โดยใช้เวลา 12 วัน พบว่าพันธุ์ทนมีความยาวรากมากกว่าพันธุ์อ่อนแอและมีอาการ necrosis มากกว่า และพบว่าพันธุ์ที่ตอบสนองดังกล่าวนี้ตอบสนองเช่นเดียวกับที่มีการศึกษาใน soil culture นอกจากนี้ Campbell et al. (1998) ใช้ความยาวรากเป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกเช่นกันแต่ใช้วิธีที่เรียกว่า drip tray โดยทดสอบในถังพลาสติกที่มีสารละลายโบรอนแทนที่จะทำใน filter paper ใช้เวลา 12 วัน พบว่าข้าวสาลีมีการตอบสนองเช่นเดียวกับที่ Chantachume et al. (1995) และ Jamjod (1996) ศึกษาแต่วิธีการศึกษาใน solution culture โดย drip tray method นี้ช่วยให้โบรอนกระจายได้สม่ำเสมอดีกว่าใน soil culture ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า และยังสะดวกกว่าหากจะต้องคัดเลือกพันธุ์ที่มีจำนวนมากขึ้น

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University