วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 2561 : 36 (1) :161-172

การใช้ยิปซัมที่ได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเกษตร

Using Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum, By-Product of Coal-Fired Power Plants in Agriculture

จักรชัยวัฒน์ กาวีวงศ์[1]*
Jakchaiwat Kaweewong[1]

บทคัดย่อ

ยิปซัมเป็นแร่อะโลหะซัลเฟตในรูปเกลือธรรมชาติชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และโมเลกุลของน้ำ (H_2O) มีสูตรทางเคมี $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ พบได้ทั้งในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ในกระบวนการต่างๆ รวมถึงยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง เรียกยิปซัมชนิดนี้ว่า flue gas desulfurization gypsum หรือ FGD Gypsum ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ในการเกษตรได้เช่นเดียวกับยิปซัมประเภทอื่นๆ โดยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน อัตราการแทรกซึมน้ำลงสู่ผิวดิน ลดภาวะแน่นทึบของดิน ลดการสูญเสียธาตุอาหารพืชจากการชะละลายจากผิวหน้าดินลงสู่แหล่งน้ำ และลดการพังทลายของดิน นอกจากนี้ยังช่วยปรับสมดุลของธาตุโซเดียมในดินเค็ม ลดความเป็นพิษของอะลูมินัมในดินกรด อีกทั้งแคลเซียมและกำมะถันจาก FGD Gypsum ยังเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชอีกด้วย ถึงแม้ว่ายังมีข้อกังวลเกี่ยวกับการปนเปื้อนของโลหะหนักในองค์ประกอบของ FGD Gypsum ที่ได้จากกระบวนการการสังเคราะห์อยู่บ้าง แต่มีรายงานว่าหากใช้ในปริมาณที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากวัสดุเหลือใช้ในโรงผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้เกษตรกรสามารถแก้ไขปัญหาความเสื่อมโทรมของดิน ช่วยฟื้นฟูสภาพดินให้เหมาะสมต่อการเพาะปลูก และช่วยเพิ่มผลผลิตในการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนอีกด้วย

คำสำคัญ : เอฟจีดียิปซัม สารปรับปรุงดิน แคลเซียม กำมะถัน ดินเสื่อมโทรม

Abstract

Gypsum is a non-metallic mineral sulphate in natural form of salt. Its structure consists of calcium ion (Ca2+), sulphate ion (SO42-) and molecules of water (H2O). Its formula is CaSO4•2H2O, found in nature and synthesis in various processes including gypsum as a by-product of scrubbing sulfur from combustion gases at coal-fired power plants, called Flue Gas Desulfurization Gypsum or FGD Gypsum. It can be used in agriculture, as well as other types of gypsum, as a conditioner to improve soil physical properties, and water infiltration and storage; to reduce compaction in soil, nutrient movement to surface water (run off), and erosion. Moreover, it also helps to balance the sodium content of saline soils; to decrease aluminum toxicity in acid soil. In addition, calcium and sulfur in FGD Gypsum are also essential nutrients for plant growth and yield. Currently, there are some concerns about heavy metal contamination of FGD Gypsum derived from synthetic process. However, some researchers reported that using appropriate rate of FGD gypsum would not cause on environmental impacts. Therefore, gypsum, a manufactured by-product

[1]สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง อ.เมือง จ.ลำปาง 52100

* Corresponding author: jakchaiwat_k@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of the coal-fired combustion process in power plants, is an alternative way to help farmers solve the problem of land degradation, improves soil structure, and increase agricultural profit effectively and sustainably.

Keywords: FGD gypsum, soil amendment, calcium, sulfur, soil degradation

คำนำ

ปัญหาการใช้ที่ดินและทรัพยากรดินเพื่อการผลิตพืชเริ่มทวีความรุนแรงมากขึ้นอันเนื่องมาจากการขาดการอนุรักษ์ ปรับปรุงและบำรุงรักษาดิน ส่งผลทำให้ดินเกิดความเสื่อมโทรม ทั้งในด้านกายภาพ เคมี ชีวภาพ รวมถึงสมดุลของธาตุอาหารพืชภายในดิน ซึ่งกระทบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืชอย่างมาก เกษตรกรแก้ปัญหาโดยการใช้ปุ๋ยและสารเคมีต่างๆลงในดินเพียงเพราะต้องการเพิ่มผลผลิต โดยขาดการปรับปรุงบำรุงดินเป็นระยะเวลานาน ส่งผลทำให้ดินมีความแน่นทึบ อัตราการแทรกซึมน้ำเข้าสู่ผิวดินต่ำ เกิดการไหลบ่าของน้ำบนหน้าดินและเกิดการกร่อนดินอย่างรุนแรง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อดิน อินทรียวัตถุและธาตุอาหารพืชเป็นปริมาณมาก การปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของดินให้ดีขึ้น เป็นการสร้างพื้นฐานความยั่งยืนทางการเกษตร เพราะดินเป็นแหล่งที่ให้ธาตุอาหารที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช สารปรับปรุงดินมีหลายประเภทที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาและปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในนั้นคือ ยิปซัม (gypsum) ซึ่งมีคุณสมบัติในการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน รวมทั้งเป็นแหล่งของธาตุอาหารพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเกษตรได้อย่างยั่งยืน (นุจรินทร์, 2554) ยิปซัมเป็นแร่ที่อยู่ในรูปของเกลือซัลเฟตมีสูตรทางเคมี $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ซึ่งมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 18 และมีแคลเซียมอยู่ประมาณร้อยละ 23 (ปิยะ, 2553) ยิปซัมอาจมีชื่อเรียกได้หลายแบบ เช่น เกลือจืด เกลือแกลบ หรือหินแก้ว สามารถเกิดได้ในธรรมชาติ ซึ่งกระจัดกระจายอยู่ในพื้นที่ต่างๆทั่วโลก และจากการสังเคราะห์ในกระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำยิปซัมซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์มาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรเพิ่มมากขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการใช้เพื่อปรับปรุงบำรุงดินและการเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืช (American Coal Ash Association, 2015) เนื่องจากในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) อันอาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและคุณภาพชีวิตของประชาชน ดังนั้นโรงไฟฟ้าทุกแห่งทั่วโลก จำเป็นต้องมีเครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (flue gas desulfurization, FGD) ติดตั้งอยู่เพื่อลดปัญหาดังกล่าว จึงทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่เป็นผลพลอยได้เกิดขึ้น ซึ่งชนิดของผลิตภัณฑ์จะขึ้นอยู่กับประเภทของตัวดูดซับที่ใช้ ในกรณีที่ตัวดูดซับเป็นหินปูน ($CaCO_3$) จะได้ ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เป็นผลิตภัณฑ์ เรียกว่า flue gas desulfurize gypsum หรือ FGD Gypsum (Norton and Rhoton, 2007) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเกษตรเช่นเดียวกับยิปซัมตามท้องตลาดทั่วไป

ในปัจจุบันการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของ FGD Gypsum ในภาคการเกษตรของประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก เนื่องด้วยยิปซัมที่ได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเพิ่งจะเกิดขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ แต่มีรายงานในต่างประเทศที่บ่งชี้ว่าสามารถใช้เป็นสารปรับปรุงดินและสามารถเพิ่มผลผลิตของพืชได้ ดังนั้นการรวมรวมข้อมูลประโยชน์ของยิปซัมที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินในการเกษตรในครั้งนี้ น่าจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ช่วยให้เกษตรกรสามารถนำไปแก้ไขปัญหาในพื้นที่ของตนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flue Gas Desulfurization Gypsum (FGD Gypsum)

ในการเกษตรได้มีการใช้ประโยชน์จากยิปซัมเพื่อการผลิตพืชมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติในการปรับปรุงดินให้เหมาะแก่การปลูกพืชรวมทั้งเป็นแหล่งของธาตุแคลเซียมและกำมะถันที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ยิปซัมไม่เพียงแต่จะสามารถพบได้ในธรรมชาติเท่านั้น ยังสามารถพบได้จากแหล่งอื่นๆอีกด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยิปซัมที่ได้จากการสังเคราะห์จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าอันเป็นผลพลอยได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดอ๊อกไซด์จากถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งถือเป็นแหล่งผลิตยิปซัมขนาดใหญ่ในปัจจุบัน (Norton and Rhoton, 2007)

กระบวนการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์จะใช้วิธีผ่านก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไปในน้ำปูนขาว โดยที่ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นกลายเป็นซัลเฟต (SO_4^{2-}) จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับ $CaCO_3$ กลายเป็นยิปซัม (Figure 1) ดังสมการ

$$SO_2 + CaCO_3 \longrightarrow CaSO_3 \cdot \tfrac{1}{2} H_2O + CO_2 + O_2 \longrightarrow CaSO_4 \cdot 2\,H_2O \text{ (Gypsum)}$$

สารยิปซัมที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า flue gas desulfurization gypsum หรือ FGD Gypsum (Figure 2) ซึ่งหมายถึง การแปรสภาพของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไปเป็นสารประกอบของแข็งซัลเฟอร์ที่สามารถรวบรวมเพื่อนำไปกำจัดหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้น ซึ่งในกระบวนการแปรรูปจะแบ่งเป็นกระบวนการแบบเปียกและแบบแห้งซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งการใช้ตัวดูดซับและผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยกระบวนการแบบเปียกจะใช้หินปูน ($CaCO_3$) หรือปูนขาวแห้ง ส่วนกระบวนการแบบแห้งจะใช้ปูนขาวที่มีความชื้น (Chen and Dick, 2011)

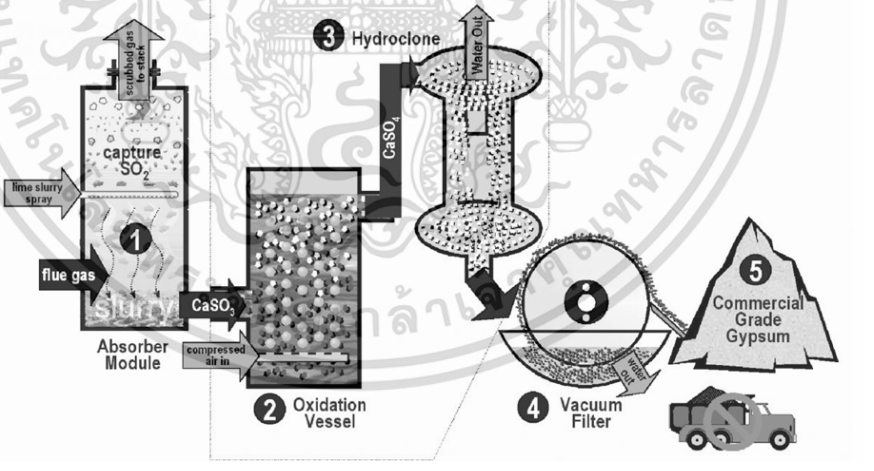

Figure 1 Schematic of the scrubbing process to produce FGD gypsum (Dontsova *et al*., 2005)

ลักษณะและคุณสมบัติของ FGD Gypsum และ ยิปซัมที่มีในธรรมชาติ

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมามีการศึกษาลักษณะและคุณสมบัติทางแร่วิทยา คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีระหว่าง FGD Gypsum และยิปซัมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าว (Dontsova *et al*., 2005; Graf, 2010; Mitchell, 2010; Kost *et al*., 2014) พบว่า $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ และควอตซ์ (Quartz, SiO_2) เป็นองค์ประกอบพื้นฐานทางแร่วิทยาของยิปซัมทั้งสองชนิด ส่วนแร่โดโลไมท์ [$CaMg(CO_3)_2$]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเป็นส่วนประกอบที่พบเฉพาะยิปซัมจากธรรมชาติเพียงเท่านั้น ด้วยองค์ประกอบทางแร่และการกำเนิดที่ต่างกันนี้ทำให้ FGD Gypsum ส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและเสถียรกว่ายิปซัมจากธรรมชาติ โดยมากกว่า 95 % ของขนาดอนุภาคใน FGD Gypsum มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมคอน (Table 1) สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของ FGD Gypsum นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของถ่านหิน วิธีการแปรรูป รวมไปถึงตัวดูดซับที่ใช้ในกระบวนการการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดอ๊อกไซด์ (Chen and Dick, 2011) ส่วนใหญ่พบว่า FGD Gypsum มีความบริสุทธิ์ของ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ สูงมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่ายิปซัมที่พบในธรรมชาติ (Dontsova *et al*., 2005; Chen *et al*. 2008; Marchis *et al*., 2016) สำหรับความเข้มข้นของธาตุอื่นๆที่พบในยิปซัมทั้งสองชนิดได้แสดงใน Table 2

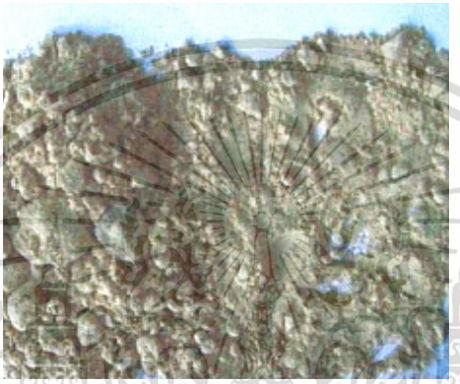

Figure 2 Flue gas desulfurization gypsum.

Table 1 Some mineralogical and physical properties of FGD gypsum and natural gypsum.

Property	FGD gypsum	Natural gypsum
Minerals present	Gypsum, Quartz	Gypsum, Quartz, Dolomite
Water content (%)	5.5	0.38
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (%)	99.6	87.1
Particle size		
> 250 Microns (%)	0.14	100
150 - 250 Microns (%)	3.2	0
105 - 150 Microns (%)	33	0
74 - 105 Microns (%)	33	0
< 74 Microns (%)	31	0

Sources: Dontsova *et al*. (2005); Chen and Dick (2011)

ความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ใน FGD Gypsum

FGD Gypsum ส่วนใหญ่จะได้จากกระบวนการแบบเปียกที่ใช้หินปูน ($CaCO_3$) มาเป็นตัวดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แล้วทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ทำให้มีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายจากผิวดินลงสู่ดินชั้นล่าง ซึ่งมีผลต่อระดับความเข้มข้นของธาตุต่างๆในสารละลายดินรวมถึงการดูดใช้ธาตุอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรากพืชอีกด้วย (Korcak, 1998) จาก Table 2 พบว่า FGD Gypsum มีร้อยละของธาตุแคลเซียมและกำมะถันอยู่เป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูง จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินและเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินให้ดีขึ้น (Shainberg *et al*., 1989) นอกจากนี้ยังพบปริมาณของจุลธาตุอื่นๆ ที่ส่งเสริมและสนับสนุนต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืชอีกด้วย ถึงแม้ว่าจะพบปริมาณของโลหะหนัก เช่น สารหนู (As), ตะกั่ว (Pb), แคดเมียม (Cd) และ ปรอท(Hg) รวมถึงโลหะอื่นๆปะปนอยู่ใน FGD Gypsum แต่ก็สามารถใช้ได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักดังกล่าวไม่เกินค่ามาตรฐานสำหรับใช้เป็นสารปรับปรุงดิน (EPRI, 2011)

Table 2 Chemical properties of FGD gypsum from different sources and natural gypsum.

Element (unit)	FGD gypsum[1]	FGD gypsum[2]	FGD gypsum[3]	FGD gypsum[4]	Natural gypsum[5]
Calcium (Ca), (%)	24.3	23.0	18.2	33.4*	24.7
Sulfur (S), (%)	18.5	18.7	14.9	19.8*	20.7
Nitrogen (N), (%)	< 0.10	-	< 0.10	-	0.13
Phosphorus(P), (mg kg^{-1})	< 0.10	-	< 1	-	< 100
Potassium (K), (mg kg^{-1})	< 74	-	183	400*	500
Magnesium (Mg), (mg kg^{-1})	200	300	120	312*	1300
Boron (B), (mg kg^{-1})	13	55.1	7	-	168
Iron (Fe), (mg kg^{-1})	150	45	636	-	1,500
Manganese (Mn), (mg kg^{-1})	0.6	< 2.60	3	-	31
Copper (Cu), (mg kg^{-1})	< 0.40	< 42	< 0.40	1.12†	< 0.80
Molybdenum (Mo), (mg kg^{-1})	3.2	< 65	1	-	0.80
Nickel (Ni), (mg kg^{-1})	< 3	< 44	1.90	0.54†	2.30
Zinc (Zn), (mg kg^{-1})	1.20	< 21	18	0.34†	6.10
Elements of environmental concern					
Arsenic (As), (mg kg^{-1})	< 11	0.56	< 1.2	2.74†	< 2.60
Barium (Ba), (mg kg^{-1})	5.50	-	299	2.20†	-
Cadmium (Cd), (mg kg^{-1})	< 1.00	< 39	< 0.04	0.01†	0.30
Chromium (Cr), (mg kg^{-1})	< 1.00	< 37	<	15.6†	4.80
Lead (Pb), (mg kg^{-1})	< 5.00	< 26	-	1.13†	1.20
Mercury (Hg), (mg kg^{-1})	-	-	2.70	-	0.02
Selenium (Se), (mg kg^{-1})	< 25	0.90	-	0.13†	< 1.20
Source of FGD-Gypsum	Moscow, Ohio, USA	Cincinnati, Ohio, USA	Birmingham, Alabama, USA	Mae Moh Lampang, TH	-

Sources: [1]Dontsova *et al*. (2005); Chen and Dick (2011), [2]Chen *et al*. (2005), [3]Mitchell (2010),

[4*]Chindaprasirt *et al*. (2011); †ปฏิภาณ และคณะ (2560), [5]Mupambwa *et al*. (2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของ FGD Gypsum ต่อสมบัติและการเปลี่ยนแปลงของดิน

1. ผลต่อสมบัติทางกายภาพของดิน

การแน่นทึบของดิน (soil compaction) รวมถึงการแข็งตัวและการแตกระแหงของผิวหน้าดิน (surface crusting) ที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชหลายประการ เช่น การงอกของเมล็ด การแผ่ขยายของระบบราก การใช้ประโยชน์จากน้ำ อากาศ ธาตุอาหารพืชในดิน รวมถึงผลผลิตของพืช การใช้ FGD Gypsum สามารถปรับปรุงและแก้ไขปัญหาปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจาก FGD Gypsum มีประจุไฟฟ้าที่ช่วยป้องกันการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน นอกจากนี้แคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบหลังของ FGD Gypsum เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) อันมีบทบาทช่วยให้อนุภาคดินเกิดการเกาะกลุ่มกันเป็นเม็ดดินที่เสถียรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินเนื้อละเอียด (Marchis *et al*., 2016) ส่งผลให้ดินมีการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศได้ดี เหมาะการเจริญเติบโตของพืชและการแพร่กระจายของระบบราก นอกจากนี้ยังเพิ่มอัตราการแทรกซึมน้ำเข้าสู่ผิวดิน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเก็บสะสมแหล่งน้ำใต้ดินในช่วงฤดูฝน อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณการสูญเสียหน้าดินจากการถูกชะล้างและการพังทลายอีกด้วย (Chang *et al*., 1989; Donstsova *et al*., 2005; Norton, 2008; Marchis *et al*., 2016)

2. ผลต่อสมบัติทางเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดิน

เนื่องจากธรรมชาติของ FGD Gypsum ที่ได้มาจากการเผาถ่านหินมีธรรมชาติของความเป็นอัลคาไลน์ การศึกษาจึงเน้นไปที่ผลลัพธ์ของมันในการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านเคมีของดิน (Baligar *et al*., 2011) ยิปซัมมีสมบัติในการช่วยลดระดับความอิ่มตัวของโซเดียมไอออน (Na^{+}) ในดินเค็ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเค็มโซดิก ที่มีร้อยละของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูง (ค่า exchangeable sodium percentage > ร้อยละ 15) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชอย่างมาก กลไกของยิปซัมที่จะช่วยในการปรับสมดุลของธาตุโซเดียมไม่ให้ละลายอยู่ในสารละลายดินมากเกินไปนั้น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่แตกตัวจาก FGD Gypsum จะเข้าไปแทนที่โซเดียมไอออน (Na^{+}) ที่ถูกดูดยึดอยู่ที่ผิวคลอลอยด์ดิน ทำให้โซเดียมถูกชะออกมาแล้วรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งเป็นไอออนลบที่แตกตัวมาจาก FGD Gypsum กลายเป็นเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ดังสมการ

$$2Na\text{---}\boxed{Clay} + CaSO_4\ (FGDGypsum) \longrightarrow Ca\text{---}\boxed{Clay} + Na_2SO_4$$

เกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ที่ได้จากปฏิกิริยานี้ มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ทำให้โซเดียมไอออน (Na^{+}) ที่แตกตัว ถูกชะละลายออกไปจากดินได้ง่ายโดยฝนหรือน้ำที่ใช้เข้าไปเพื่อล้างเกลือโซเดียมซัลเฟตออกจากพื้นที่ ส่งผลให้ดินมีความอิ่มตัวด้วยเกลือโซเดียมน้อยลง ปกติการเติม FGD Gypsum หรือยิปซัมธรรมชาติลงไปในดินกรดจะไม่ได้ช่วยยกระดับ pH ของดินให้สูงขึ้น หรือสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหากเทียบกับปูน (Fisher, 2011) อย่างไรก็ตามยิปซัมทั้งสองประเภทสามารถช่วยลดความเป็นพิษของอลูมินัมที่มีอยู่ในดินกรดได้ (Chen and Dick, 2011; Marchis *et al*., 2016) โดยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จากยิปซัมเหล่านี้จะไปไล่ที่อะลูมินัมไอออน (Al^{3+}) ที่ดูดยึดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวให้หลุดออกมาอยู่ในสารละลายดิน จากนั้นอะลูมินัมไอออนจะไปรวมตัวกับซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ทำให้ลดความเป็นพิษของอะลูมินัมในดินลงได้

Chen *et al*. (2005) รายงานว่าการใช้ FGD Gypsum เป็นสารปรับปรุงดิน ไม่เพียงแต่จะทำให้มีปริมาณของธาตุแคลเซียมและซัลเฟอร์เพิ่มขึ้นในช่วง 0-80 เซนติเมตรแล้ว ยังส่งผลให้มีปริมาณของแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นด้วย (Figure 3) ถึงแม้ว่าจะมีแมกนีเซียมอยู่ในองค์ประกอบของ FGD Gypsumในปริมาณต่ำก็ตาม ทำให้สัดส่วนของแคลเซียม และแมกนีเซียมในสารละลายดินลดลง เนื่องจากแมกนีเซียมภายในแร่ดินเหนียวถูกไล่ที่โดยแคลเซียมที่มาจาก FGD Gypsum นั่นเอง ดังนั้นการเติมยิปซัมหรือ FGD Gypsum ลงไปในดินจึงต้องมีการพิจารณาถึงปริมาณที่จะใส่ และสมบัติของดินนั้นๆด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลต่อสมบัติทางชีวภาพของดิน

ผลการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางชีวภาพที่มีผลกระทบจากการใช้ FGD Gypsum ไม่ได้รับความสนใจมากนัก แม้จะมีสมมติฐานว่าการเติม FGD Gypsum ลงไปนั้นอาจส่งผลในทางตรงและทางอ้อมต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของจุลินทรีย์บางชนิด มีรายงานว่าการใช้ FGD Gypsum มีแนวโน้มที่จะลดปริมาณของเชื้อ *Salmonella* spp. และ *Escherichia coli* จุลินทรีย์ก่อโรคที่เจริญเติบโตอยู่ในแหล่งน้ำ (Jenkins *et al*.,2014) อันเนื่องมาจากการปนเปื้อนจากปุ๋ยมูลสัตว์ที่ถูกชะล้างลงในแม่น้ำลำคลอง (Guan and Holley, 2003) แต่อย่างไรก็ตามข้อสมมติฐานและผลการทดลองดังกล่าวยังจะต้องมีการศึกษาค้นคว้าให้ละเอียดต่อไป

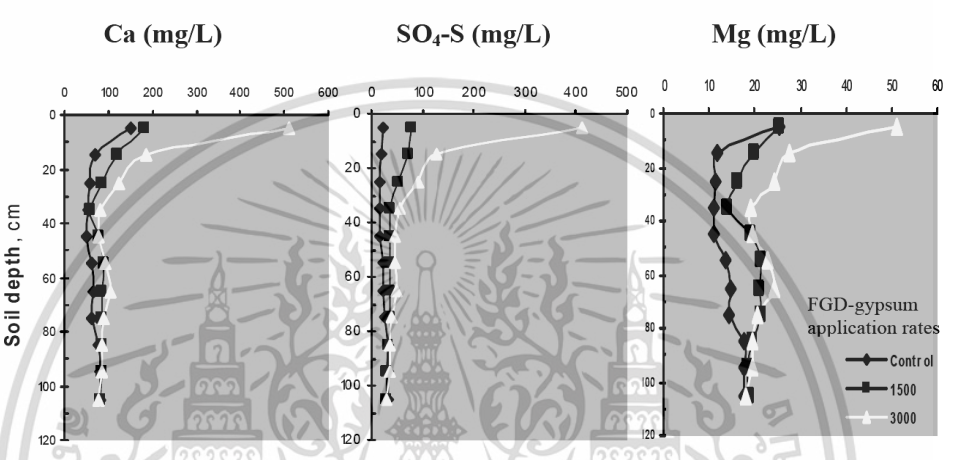

Figure 3 Calcium, sulfur and magnesium movement into soil profiles is enhanced by the addition of FGD gypsum. (Chen *et al*., 2005)

4. ผลของ FGD Gypsum ในด้านอื่น ๆ

4.1 ผลของ FGD Gypsum ต่อการชะล้างพังทลายและการไหลบ่าบนหน้าดิน

ในพื้นที่ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยมูลสัตว์ หรือปุ๋ยหมักต่างๆ ในปริมาณที่สูงเกินกว่าที่พืชจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโต จะส่งผลให้มีปริมาณของธาตุอาหารละลายอยู่ในสารละลายดินในปริมาณมาก ซึ่งความเข้มข้นส่วนเกินของธาตุอาหารเหล่านี้ จะเกิดการชะลงไปสะสมในแม่น้ำลำคลอง มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เมื่อมีการเคลื่อนย้ายลงสู่แหล่งน้ำจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า ยูโทรฟิเคชั่น (eutrophication) โดยที่ฟอสเฟตจะช่วยให้สาหร่ายและพืชชั้นต่ำเติบโตอย่างรวดเร็ว และเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น สูญเสียภาวะสมดุลของสิ่งมีชีวิตในน้ำ จนสิ่งมีชีวิตอื่นๆไม่สามารถดำรงชีพอยู่ได้ FGD Gypsum ที่มีปริมาณของ $CaSO_4$ ในปริมาณสูงจะช่วยลดการละลายของฟอสฟอรัส (P) โดยจะเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก ซึ่งช่วยลดการละลายของฟอสฟอรัสลงสู่น้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน (Stout *et al*., 1999) Torbert และ Watts (2014) ศึกษาผลของการใช้ FGD Gypsum ต่อการสูญเสียธาตุฟอสฟอรัสจากการไหลบ่าบนผิวหน้าดิน ในดินร่วนปนทรายร่วมกับการใช้ปุ๋ยมูลสัตว์ พบว่าการใช้ FGD Gypsum ในอัตราประมาณ 1500 กิโลกรัมต่อไร่สามารถลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ถูกชะออกละลายจากหน้าดินได้ถึงร้อยละ 61 เช่นเดียวกันกับการทดลองของ Endale *et al*. (2014) ที่ทำการประเมินประสิทธิภาพของการใช้ FGD Gypsum ร่วมกับการใช้ปุ๋ยมูลไก่ที่ได้มาจากอุตสาหกรรมสัตว์ปีกในตอนใต้ของประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อการลดการสูญเสียปริมาณแอมโมเนียม (NH_4^+), ไนเตรท (NO_3^-) และฟอสฟอรัส (P) ในดิน โดยทดสอบกับดินที่มีการแข็งตัวและแตกระแหงบนผิว (crusting) ซึ่งมีความรุนแรงต่อการเกิดการชะล้างพังทลายของดินอยู่สูง (Langdale *et al*., 1985) Endale *et al*. (2014) พบว่าการใช้ FGD Gypsum ในอัตรา 1,440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิโลกรัมต่อไร่ร่วมกับปุ๋ยมูลไก่อัตรา 2000 กิโลกรัมต่อไร่ ไม่เพียงแต่จะเพิ่มความสามารถของการซึมน้ำเข้าสู่ผิวดินเท่านั้น ยังสามารถลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการชะละลายจากผิวหน้าดินลงสู่แหล่งน้ำได้อีกด้วย โดยสามารถลดการสูญเสียดังกล่าวได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์

4.2 ผลของ FGD Gypsum ต่อความเป็นพิษของโลหะหนักในดิน

ถึงแม้ว่ากระบวนการ FGD Gypsum ที่ได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์จะให้ pure calcium sulfate dehydrate ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) สูงถึงร้อยละ 95 แต่ก็ยังเป็นที่กังวลถึงผลกระทบของโลหะหนักซึ่งอาจจะเกิดการตกค้างในดินและพืชเมื่อมีการเติม FGD Gypsum ลงไป มีรายงานการวิเคราะห์ปริมาณของโลหะหนักใน FGD Gypsum ที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์เกือบทุกพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่ามีปริมาณของสารหนู (As), แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), เซเลเนียม (Se), นิเกิล (Ni) เจือปนอยู่ในองค์ประกอบด้วย แต่ส่วนใหญ่ตรวจพบในระดับที่ค่อนข้างต่ำกว่ามาตรฐาน มีเพียงบางพื้นที่เท่านั้นที่พบว่ายังมีปริมาณโลหะหนักบางตัวสูงกว่าค่ามาตรฐานอยู่บ้างเล็กน้อย (Dontsova *et al*., 2005 ; Chen *et al*., 2005) ซึ่งค่าดังกล่าวถูกกำหนดโดย RCRA (resource conservation and recovery act) (Table 3) เมื่อไม่นานมานี้มีรายงานเกี่ยวกับสารปรอท (Hg) ที่ปะปนมากับ FGD Gypsum ในกระบวนการการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งตรวจพบความเข้มข้นผันแปรอยู่ในช่วง 0.01-1.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Chen *et al*., 2014; EPRI, 2011) ซึ่งสูงกว่ายิปซัมที่พบได้ตามธรรมชาติและยิปซัมที่ใช้ในการเกษตรทั่วไปถึง 1000 เท่า จึงมีความกังวลเกี่ยวกับการนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตร ซึ่งอาจก่อให้เกิดการตกค้างของปริมาณของโลหะหนักในดิน Briggs *et al*. (2014) ได้ศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของปรอท (Hg) ที่ปลดปล่อยมาจาก FGD Gypsum ซึ่งถูกผลิตจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ 3 แห่ง สำหรับนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินในการเกษตร พบว่าความเข้มข้นของปรอทใน FGD Gypsum อยู่ในช่วง 0.079 – 0.391 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยนำยิปซัมดังกล่าวมาบ่มกับดินที่ใช้ในการทดลองเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าปรอทถูกปลดปล่อยออกมาในสารละลายดินต่ำกว่าความเข้มข้นของปรอทใน FGD Gypsum ที่นำมาทดลองทั้งหมด เช่นเดียวกันกับรายงานของ Chen และคณะ (2014) พบว่าเมื่อใช้ FGD Gypsum ในอัตราตั้งแต่ 300-3000 กิโลกรัมต่อไร่ จะมีปริมาณความเข้มข้นของปรอทที่ถูกปลดปล่อยลงสู่สารละลายดินเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกรรมวิธีที่ไม่ใช้ FGD Gypsum และไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเทียบกับการใช้ยิปซัมในแต่ละอัตรา อีกทั้งความเข้มข้นของปรอทไม่สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ RCRA กำหนด ซึ่งกำหนดไว้ว่าค่าความเข้มข้นของปรอทในสารละลายดินไม่ควรเกิน 2.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) อย่างไรก็ตามในการที่จะนำยิปซัมที่ได้มาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งต่างๆมาใช้ประโยชน์ในการเกษตร ควรต้องใช้อย่างระมัดระวัง เพื่อไม่ให้เกิดธาตุที่เป็นพิษต่อพืชและดินจนมีค่าสูงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้

การใช้ FGD Gypsum ในการผลิตพืช

ในระบบการเกษตรที่ยั่งยืนส่วนใหญ่ได้มีการนำยิปซัมมาใช้ในการปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรมากขึ้น FGD Gypsum ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารพืช เนื่องจากให้ธาตุแคลเซียม(Ca) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการสร้างเซลล์และโครงสร้างของเซลล์ และกำมะถัน (S) ที่มีส่วนช่วยในการสร้างโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของพืช ดินที่มีปริมาณของแคลเซียมและกำมะถันไม่เพียงพอจะส่งผลให้พืชชะงักการเจริญเติบโตและนำไปสู่ผลผลิตที่ลดลง (Chen and Dick, 2011) สำนักวิจัยและพัฒนา (2546) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้ศึกษาผลของการใช้ FGD Gypsum ต่อผลผลิตและคุณภาพของส้มในดินกรดที่ปลูกในจังหวัดแพร่และน่าน พบว่าการใช้ยิปซัมดังกล่าวให้ผลทางบวกต่อการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผลส้ม อีกทั้งยังช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของดินให้เหมาะสมกับพืช พร้อมทั้งเพิ่มปริมาณแคลเซียม และซัลเฟอร์ให้กับดินอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3 The total heavy metal concentration in FGD gypsum samples and the maximum allowable limits of heavy metals in soils .

Element (Unit)	FGD gypsum[1]	FGD gypsum[2]	FGD gypsum[3]	FGD gypsum[4]	ค่ามาตรฐานในดิน[5]
Arsenic (As), (mg kg^{-1})	< 11	0.56	< 1.2	2.74	< 3.90
Cadmium (Cd), (mg kg^{-1})	< 1.0	< 39	< 0.04	0.01	< 37
Chromium (Cr), (mg kg^{-1})	< 1.0	< 37	4.90	15.6	< 300
Lead (Pb), (mg kg^{-1})	< 5.0	< 26	-	1.13	< 400
Mercury (Hg), (mg kg^{-1})	-	-	2.70	-	< 23
Selenium (Se), (mg kg^{-1})	< 25	0.90	-	0.13	< 390
Source of FGD-Gypsum	Moscow, Ohio, USA	Cincinnati, Ohio, USA	Birmingham, Alabama, USA	Mae Moh Lampang, TH	-

Sources: [1]Dontsova *et al.* (2005); Chen and Dick (2011), [2]Chen *et al.* (2005), [3]Mitchell (2010), [4]ปฏิภาณ และคณะ (2560), [5]กรมควบคุมมลพิษ (2547)

Punshon *et al.* (2001) ทำการศึกษาโดยการเติม FGD Gypsum กับพืชทดสอบ 4 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด, ผักกาด, ฝ้าย และถั่วเหลือง เพื่อศึกษาอัตราการงอกและปริมาณชีวมวลของพืช พบว่าในระยะแรกของการปลูกพืชไม่พบผลกระทบใดๆต่ออัตราการงอก แต่พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของชีวมวลในใบอ่อนของพืชทั้ง 4 ชนิดในสัปดาห์ที่ 10 อันเป็นผลมาจากการเติม FGD Gypsum

Chen *et al.* (2001) ได้ศึกษาการใช้ FGD Gypsum สำหรับการปลูกอัลฟาฟ่าและถั่วเหลือง โดยเติมลงไปในดินกรด เปรียบเทียบกับชุดควบคุมพบว่าเมื่อเติม FGD Gypsum ลงไปในดินดังกล่าวจะช่วยให้ถั่วเหลืองและอัลฟาฟ่ามีผลผลิตเพิ่มขึ้น 5 ถึง 8 เท่าตามลำดับในระยะเวลา 2 ปี จากผลที่ได้นี้ Chen *et al.* (2005) จึงได้ลองศึกษาเกี่ยวกับการใช้ FGD Gypsum กับพืชชนิดอื่น โดยเลือกข้าวโพดเป็นพืชทดสอบ พบว่าการใช้ FGD Gypsum ในอัตราที่สูงจะทำให้ผลผลิตของข้าวโพดสูงขึ้นด้วย โดยที่เติม FGD Gypsum ลงไปในอัตรา 1500 ปอนด์ต่อเอเคอร์ และ 3,000 ปอนด์ต่อเอเคอร์ จะทำให้ผลผลิตของข้าวโพดเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.9 และ 8.8 ตามลำดับ (Figure 4) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าการเติม FGD Gypsum ประมาณ 800-1200 กิโลกรัมต่อไร่ลงในดินที่ขาดธาตุแคลเซียมจะส่งเสริมให้ถั่วลิสงสร้างฝักและติดฝักดีขึ้น รวมทั้งส่งเสริมผลผลิตและคุณภาพของผลผลิตของมะเขือเทศและข้าวโพดหวานอีกด้วย (Baligar *et al.*, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

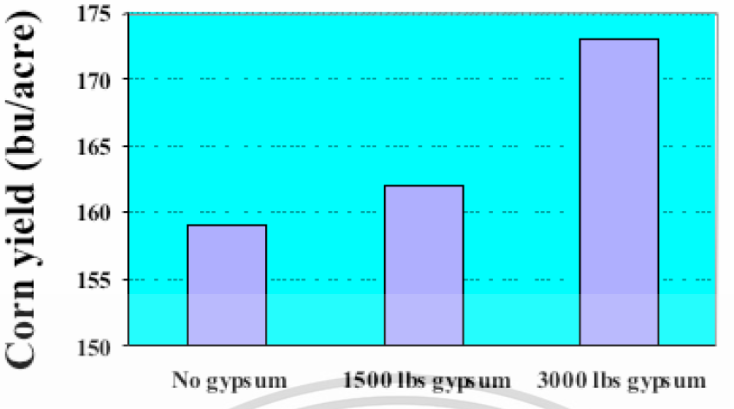

Figure 4 Corn grain yield as affected by application of FGD gypsum (Chen *et al.*, 2005)

สรุป

ยิปซัมที่ได้จากการกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (FGD Gypsum) อันเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนท์ สามารถนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินในการเกษตรเพื่อลดปัญหาความเสื่อมโทรมของดินให้เหมาะสมกับการเพาะปลูกพืชได้ การใช้ในอัตราที่เหมาะสม จะเกิดผลดีอย่างเด่นชัดต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน อีกทั้งยังเพิ่มปริมาณธาตุแคลเซียมและกำมะถันอันเป็นธาตุอาหารรองที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตพืช นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องของการอนุรักษ์ดินและน้ำ ลดการสูญเสียหน้าดินจากการชะล้าง แต่อย่างไรก็ตามการนำ FGD Gypsum ไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตรยังคงต้องมีการตรวจสอบการแพร่กระจายของโลหะหนักทั้งก่อนและหลังใช้ เพื่อให้แน่ใจว่าจะนำยิปซัมดังกล่าวไปใช้ในอัตราที่เหมาะสมจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาตามมาในภายหลัง

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ.2547. ข้อมูลมาตรฐานคุณภาพดินและน้ำ. แหล่งที่มา: http://www.pcd.go.th/info_serv/service.html, 17 เมษายน 2560.

นุจรินทร์ ศิริวาลย์.2554. การปรับปรุงคุณภาพดินโดยใช้ยิปซัมเพื่อความยั่งยืนทางการเกษตร. ว.วิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 5: 118-126.

ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร, สมชาย องค์ประเสริฐ, จีราภรณ์ อินทสาร, จักรพงษ์ ไชยวงศ์ และวันวิสาข์ จันทิกา. 2560. การตอบสนองของอ้อยต่อ FGD ยิปซัมในดินที่ขาดแคลน Ca และ S. ไฟล์นำเสนอผลงานภาคบรรยาย, การประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติครั้งที่ 5. โรงแรมเซ็นทรา บาย เซ็นทรา กรุงเทพฯ. แหล่งที่มา:http://www.ldd.go.th/WEB_NSFC/PDF/portfolio_2.pdf, 19 กันยายน 2560.

ปิยะ ดวงพัตรา.2553. สารปรับปรุงดิน. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 256 น.

สำนักวิจัยและพัฒนา.2546. การใช้ยิปซัมจากโรงงานไฟฟ้าในการเกษตร. สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 18 น.

American Coal Ash Association. 2015. Coal combustion products production and use statistics. Available Source: https://www.acaa-usa.org/Publications/Production-Use-Reports, April 12, 2017.

Baligar, V. C., R.B. Clark, R.F. Korcak, and R.J. Wright.2011. Flue Gas Desulfurization Product Use on Agricultural Land. Advances in Agronomy 111: 51-86.

Briggs, C.W, R. Fine, M. Markee, and M.S. Gustin. 2014. Investigation of the potential for mercury release from flue gas desulfurization solids applied as an agricultural amendment. J. Environ. Qual. 43: 253–262.

Chang, A.C., A.L. Page, and L.J. Lund.1989. Municipal sledges and utility ashes in California and their effects on soils. Ecological Studies, Springer-Verlag J. 74: 125-139.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chen, L., W.A. Dick, and S. Nelson. 2001. Flue gas desulfurization by-products as sulfur sources for alfalfa and soybean. Agron. J. 97: 265–271.

Chen, L., Y.B. Lee, C. Ramsier, J. Bigham, S. Brian, and W. Dick. 2005. Increased crop yield and economic return and improved soil quality due to land application of FGD Gypsum. Available Source: http://www.flyash.info/2005/127che.pdf, April 12, 2017.

Chen, L., W.A. Dick, and S. Nelson. 2008. Flue gas desulfurization products as sulfur source for corn. Soi. Sci. Soc. Am. J. 72: 1464-1470.

Chen, L. and W.A. Dick.2011. Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines. The Ohio State University Extension, Columbus. Available Source : https://fabe.osu.edu/sites /fabe/files/imce/files/Soybean /Gypsum%20Bulletin.pdf, April 12, 2017.

Chen, L., D. Kost, Y. Tian, X. Guo, D. Watts, D. Norton, R.P. Wolkowski, and W.A. Dick. 2014. Effects of gypsum on trace metals in soils and earthworms. J. Environ. Qual. 43:263–272.

Chindaprasirt, P., K. Boonserm, T. Chairuangsri, W. Vichit-Vadakan, T. Eaimsin, T. Sato and K. Pimraksa. 2011. Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. Const. Build. Mater. 25 (8): 3193-3203.

Dick W.A.,L. Chen and D. Kost.2008. Use of FGD Gypsum Soil Amendments for Improved Forage and Corn Production Ohio State University. Available Source: http://acaa-usa.org/Portals/9/Files/PDFs/FGDproducts/1-Use_of_FGD_Gypsum_Soil_Amendments_for_Improved_Forage_and_Corn_Production.pdf, April 22, 2017.

Dontsova, K, Y.B. Lee, B.K. Slater, and J.M. Bigham. 2005. Gypsum for Agricultural Use in Ohio. Ohio State University Extension. Available Source: http://ohioline.osu.edu/factsheet/anr-20, April 15, 2017.

Endale, D.M., H.H. Schomberg, D.S. Fisher, D.H. Franklin, and M.B. Jenkins. 2014. Flue gas desulfurization gypsum: Implication for runoff and nutrient losses associated with broiler litter use on pastures on Ultisols. J. Environ.Qual. 43: 281–289.

EPRI. 2011. Composition and leaching of FGD gypsum and mined gypsum. 1022146. EPRI, Palo Alto, CA.

Fisher, M. 2011. Amending soils with gypsum. Crops & Soils Magazine, November-December 2011. Available Source: https://www.agronomy.org/files/publications/crops-and-soils/amending-soils-with-gypsum.pdf, April 20, 2017.

Graf, L.A. 2010. Isothermal dehydration of natural and synthetic gypsum and the effect of clinker. Portland Cement Association.3-5.

Guan, T. Y. and R. A. Holley. 2003. Pathogen survival in swine manure environments and transmission of human enteric illness. Rev. in Environmental Quality. 32: 383-392.

Jenkins, M.B., H.H. Schomberg, D.M. Endale, D.H. Franklin, and D.S. Fisher. 2014. Hydrologic transport of fecal bacteria attenuated by flue gas desulfurization gypsum. J. Environ. Qual. 43: 297–302.

Korcak, R.F.1998. Agricultural uses of municipal animal and industrial by products. Conservation Research Report No.44, Available Source: http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/ag_use_ars.pdf, April 22, 2017.

Kost, D., L. Chen, X. Guo, Y. Tian, K. Ladwig, and W.A. Dick. 2014. Effects of flue gas desulfurization and mined gypsums on soil properties and on hay and corn growth in eastern Ohio. J. Environ. Qual. 43: 312–321.

Langdale, G.W., H.P. Denton, A.W. White, Jr., J.W. Gilliam, and W.W. Frye.1985. Effects of soil erosion on crop productivity of southern soils. In: R.F.Follett and B.A. Stewart, editors, Soil erosion and crop productivity. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 251–270.

Marchis, D., C. Badulescu, M.C. Nistor.2016. Benefit of using fgd gypsum from S.E. Turceni in agriculture. J. Agri. Sci. 48: 247-253.

Mitchell, C.C. 2010. FGD gypsum on alabama fields. Timely Information: Alabama Agricultural Extension System, s(01), 10. Available Source : http://aces.edu/timelyinfo/Ag%20Soil/2010/March/S-01-10.pdf, April 15,2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mupambwa H.A, E. Dube, P.N.S. Mnkeni. 2015. Fly ash composting to improve fertilizer value – a review. South Afr. J. Sci;111:26–31.

Norton, L. D. and F. Rhoton. 2007. FGD gypsum influences on soil surface sealing, crusting, infiltration and runoff. Presented at the workshop on Agricultural and Industrial Uses of FGD Gypsum. October 2007, Atlanta, Ga. Available Source: http://library. acaa-usa.org/5-FGD_Gypsum_Influences_on_Soil_Surface_Sealing _ Crusting_Infiltration_and_ Runoff. pdf, April 15, 2016.

Norton, L.D. 2008. Gypsum soil amendment as a management practice in conservation tillage to improve water quality and tillage. J. Soil Water Conserv. 63: 46A–48A.

Punshon, T. 2001. Effect of Flue gas desulfurization residue on plant establishment and soil and leachate quality. J. Environ. Qual. 30: 1071-1080.

Shainberg, I., M.E. Summer, W.P. Miller, M.P.W. Farina, M.A. Pavan, and M.V. Fey. 1989. Use of gypsum on soils: A review. Adv. Soil Sci. 9: 1–11.

Stout, W.L., A.N. Sharpley, W.J. Gburek and H.B. Pionke. 1999. Reducing phosphorus export from croplands with FBC fly ash and FGD gypsum. Fuel. 78(2): 175-178.

Torbert, H.A., and D.B. Watts. 2014. Impact of flue gas desulfurization gypsum application on water quality in a Coastal Plain soil. J. Environ. Qual. 43: 273–280.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้