



## สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

## 6.1 การวิเคราะห์ทางคุณภาพของปุ๋ยผสมโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและดิฟแฟรกทอ เมตริ

จากการวิเคราะห์ทางคุณภาพของปุ๋ยผสมเกรดต่าง ๆ กันโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและดิฟแฟรกทอเมตริ แสดงในตารางที่ 5.9 และดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของปุ๋ยผสมบาง เกรดแสดงในรูปที่ 1.3 A - 1.19 A ในภาคผนวกที่ 1 จากผลการทดลองพบว่าปุ๋ย 91 ตัวอย่างซึ่งเก็บมาจากแหล่งต่างๆ กันนั้น มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต การนำเทคนิคทางเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกทอเมตริมาใช้ในการวิเคราะห์ทางคุณภาพของปุ๋ยผสมนั้นพบว่า เป็นเทคนิคที่ให้ผลในการวิเคราะห์ที่แน่นอนและรวดเร็ว แต่จากการทดลองพบอุปสรรคบางประการในการแปลผลจากดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

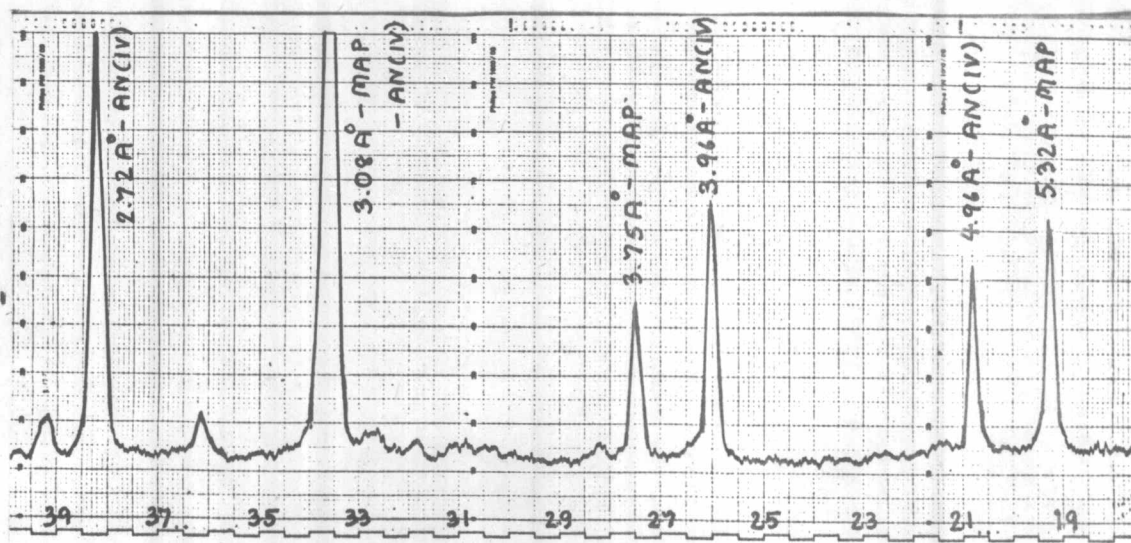
1. ในกรณีที่ปุ๋ยผสมมียูเรีย, ไคแคลเซียมฟอสเฟตและโมโนแคลเซียมฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบ พบว่าพีคของสารประกอบเหล่านี้แสดงให้เห็นเฉพาะพีคที่มีค่า  $I/I_1 = 100$  เท่านั้น สาเหตุเนื่องมาจากยูเรียซึ่งเป็นสารประกอบของไนโตรเจนส่วนใหญ่จะใช้เป็นปริมาณน้อย (ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์) ส่วนไคแคลเซียมและโมโนแคลเซียมฟอสเฟตนั้นพบว่าสารประกอบทั้งสองตัวนี้มีความสามารถในการเป็นผลึก (degree of crystallinity) ต่ำ ซึ่งจะมีสารประกอบที่ไม่มีรูปผลึก (amorphous) ผสมอยู่ด้วยจึงทำให้ความเข้มของดิฟแฟรกเทคไลน์ต่ำซึ่งจะพบแต่พีคที่มีความเข้มสูงสุดในบางครั้งจะต้องตรวจสอบว่าเป็นพีคของสารประกอบเหล่านี้จากผลการวิเคราะห์ทางเคมี

2. ในกรณีที่ปุ๋ยผสมมีแอมโมเนียมไนเตรตเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปแอมโมเนียมไนเตรตจะมีโครงสร้างของผลึกหลายเฟส (phase) ด้วยกัน แต่เฟสที่น่าสนใจในทางการอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยก็คือ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) ซึ่งจะเสถียรระหว่างช่วงอุณหภูมิ  $84^\circ\text{C}$  ถึง  $32^\circ\text{C}$  และ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (IV) ซึ่งเสถียรในช่วงอุณหภูมิ  $32^\circ\text{C}$  ถึง  $-18^\circ\text{C}$  เมื่อแอมโมเนียมไนเตรตเกิดการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิที่สูงกว่า  $32^\circ\text{C}$  จะทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนเพิ่มขึ้นซึ่งมีสาเหตุหลายประการด้วยกัน แต่ที่สำคัญเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก (7) เกิดจากการลดปริมาตรของผลึกจาก  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (IV) ไปเป็น  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการแตกตัวของผลึกหรือทำให้ขนาดของผลึกเล็กลง และมีผิวสัมผัส (contact surface) เพิ่มขึ้น

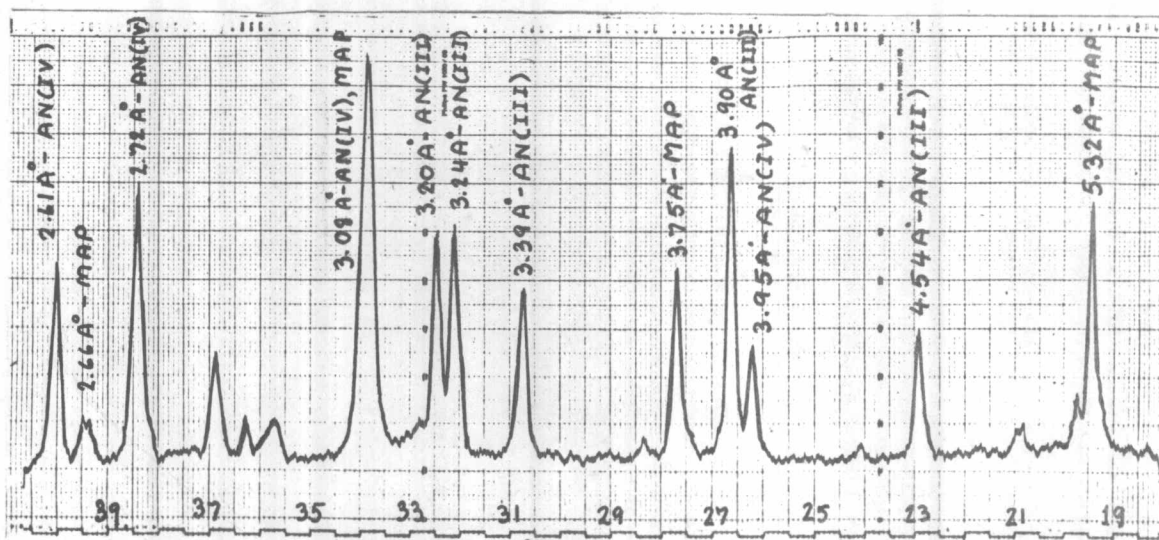
จากการที่แอมโมเนียมไนเตรดหลายเฟสนั้น ทำให้การแปลผลจากดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นยุ่งยาก เพราะจะมีทั้ง  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) และ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (IV) เกิดขึ้นโดยที่มีอุณหภูมิ ของการแปรเปลี่ยน ( transition temperature) ที่  $32^\circ \text{C}$  และเนื่องจากปุ๋ยที่มีแอมโมเนียมไนเตรดเป็นองค์ประกอบนั้นบางครั้งจำเป็นต้องไล่ความชื้นโดยการอบที่อุณหภูมิ  $65^\circ \text{C}$  ประมาณ 1 ชั่วโมง จึงทำให้เกิด  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) แต่ก็เป็นไปได้ว่าในปฏิกิริยาที่ผลิตปุ๋ยผสมส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิสูงกว่า  $32^\circ \text{C}$  จึงทำให้ฟีดของ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) ปนอยู่ด้วย ซึ่งบางกรณีอาจจะเปลี่ยนจาก  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (IV) ไปเป็น  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) จนหมดก็ได้ ในที่นี้จะแสดงดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นจากดิฟแฟรกทอมิเตอร์ของปุ๋ยผสมเกรด 26-14-0 ดังรูปที่ 6.1 โดยรูปที่ 6.1 A เป็นแพทเทิร์นที่ได้จากตัวอย่างปุ๋ยที่ไม่ได้อบ ส่วนรูปที่ 6.1 B เป็นแพทเทิร์นจากตัวอย่างปุ๋ยซึ่งอบที่  $65^\circ \text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. ในกรณีที่ปุ๋ยผสมมีเกลือแอมโมเนียมและโพแทสเซียมอยู่ด้วยกันโดยเฉพาะอย่างยิ่ง แอมโมเนียมไนเตรดและโพแทสเซียมคลอไรด์หรือโพแทสเซียมซัลเฟต ปรากฏการณ์ทางเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้ก็คือ การแลกเปลี่ยนระหว่าง  $\text{K}^+$  และ  $\text{NH}_4^+$  ซึ่งถ้าพิจารณาขนาด  $\text{K}^+$  และ  $\text{NH}_4^+$  พบว่ารัศมีของ  $\text{K}^+ = 1.33 \text{ \AA}$  และ  $\text{NH}_4^+ = 1.43 \text{ \AA}$  ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันจึงสามารถแลกเปลี่ยนอะตอมกันได้ การเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกันนั้นอาจเกิดการแลกเปลี่ยนกันอย่างสมบูรณ์ หรือเพียงบางส่วนก็ได้ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากการเปลี่ยนตำแหน่งของดิฟแฟรกเทคไลน์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 6.2 A และ 6.2 B

ในรูปที่ 6.2 A เป็นดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของปุ๋ยผสมเกรด 16-16-16 (จากตัวอย่างที่ 55, ตารางที่ 5.9 ) ซึ่งเป็นปุ๋ยที่ผลิตจากต่างประเทศ จากแพทเทิร์นพบว่าฟีดที่ 5.33, 3.75, 3.07 และ  $2.66 \text{ \AA}$  เป็นฟีดของโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต และคาดว่าปุ๋ยชนิดนี้เป็นปุ๋ยพวกแอมโมฟอสหรือไนโตรฟอสกา จึงควรมีแอมโมเนียมไนเตรดเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แต่จากแพทเทิร์นไม่ปรากฏฟีดของ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (III) และ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (IV) และพบว่าฟีดที่ 4.67, 3.87, 3.78, 3.31, 3.03, 2.77 และ  $2.74 \text{ \AA}$  เกิดขึ้นแทน เมื่อเปรียบเทียบกับ PDF แล้วคาดว่าฟีดที่ 4.67, 3.78, 3.03, 2.77 และ  $2.66 \text{ \AA}$  เป็นฟีดของ  $\text{KNO}_3$  และฟีดที่ 2.87 และ  $2.74 \text{ \AA}$  เป็นฟีดของ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  นอกจากฟีดที่กล่าวมาแล้วพบว่าฟีดที่  $3.14 \text{ \AA}$  ซึ่งเป็นฟีดของ  $\text{KCl}$  และฟีดที่  $3.31 \text{ \AA}$  ซึ่งพบว่าฟีดนี้มีความเข้มสูงมาก ทำให้สังเกตเห็นได้ยากว่าปุ๋ยผสมชนิดนี้มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นอย่างไร แต่เมื่อพิจารณาถึงผลการวิเคราะห์ทางเคมีได้ว่าตัวอย่างปุ๋ยเกรดนี้มี  $\text{NO}_3^- - \text{N} = 6.64$  เปอร์เซ็นต์,  $\text{K}_2\text{O} - \text{P} = 16.15$  เปอร์เซ็นต์,  $\text{S} = 0.73$  เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{Cl} = 12.01$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปกติ



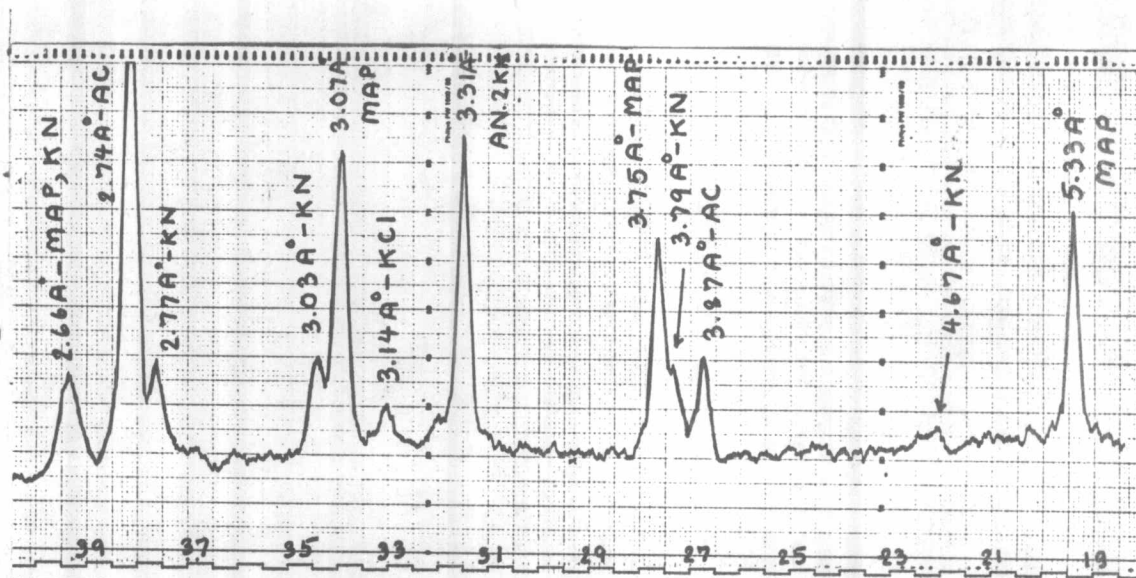
A



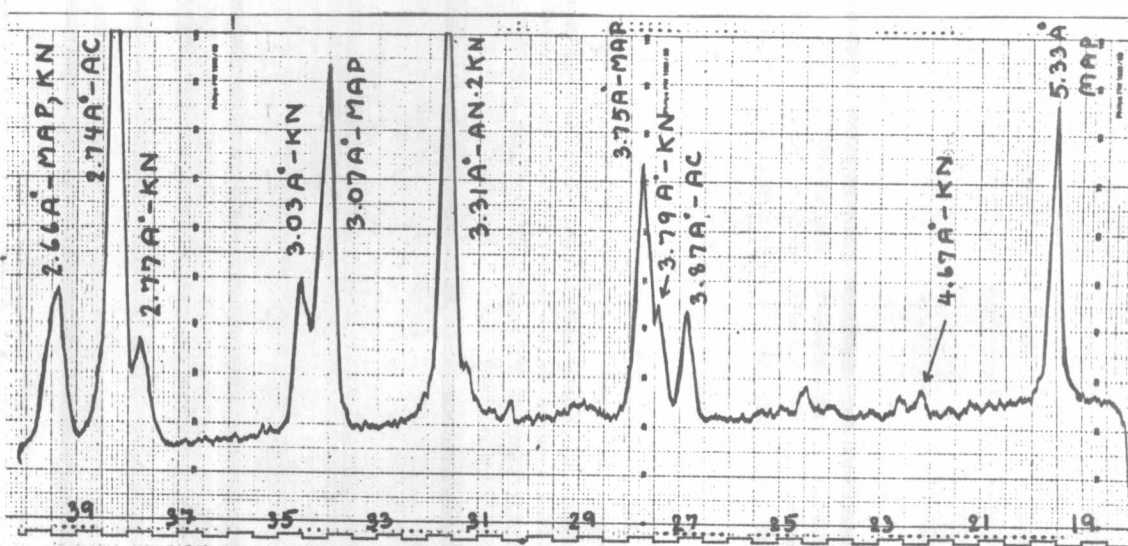
B

รูปที่ 6.1 ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของปุ๋ยผสมเกรด 26-14-0 (ตัวอย่างที่ 37 จากตารางที่ 5.6) A เป็นตัวอย่างปุ๋ยโดยตรง B เป็นตัวอย่างปุ๋ยซึ่งอบที่อุณหภูมิ  $65^{\circ}\text{C}$  , 1 ชั่วโมง





A



B

รูปที่ 6.2 ดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นของปุ๋ยผสมเกรด 16-16-16 (ตัวอย่างที่ 55 , ตารางที่ 5.6) A เป็นตัวอย่างปุ๋ย B เป็นตัวอย่างปุ๋ยที่ผสมขึ้นเอง จากสารมาตรฐาน  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  และ KCl

$\text{NO}_3^-$ -N จะมาจาก  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  มากกว่า  $\text{KNO}_3$  และโพแทสเซียมจะมาจาก  $\text{KCl}$  มากกว่า  $\text{KNO}_3$  เพราะปุ๋ย  $\text{KNO}_3$  มีราคาแพงไม่ค่อยนิยมใช้ นอกจากจะมีความจำเป็นกับพืชบางชนิดเท่านั้น ดังนั้นจึงคาดว่าปุ๋ยชนิดนี้ควรมี  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  และ  $\text{KCl}$  เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เพื่อยืนยันความคิดนี้จึงได้เตรียมปุ๋ยเกรด 16-16-16 ขึ้นมาซึ่งมี  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  และ  $\text{KCl}$  โดยนำสารประกอบแต่ละตัวซึ่งเป็นสารมาตรฐานมาผสมกันให้ได้อัตราส่วน โดยนำหนักตามเกรดปุ๋ยที่ระบุไว้บดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน นำไปวิเคราะห์ด้วยดิฟแฟรคโทมิเตอร์ซึ่งมีแพทเทิร์นดังรูปที่ 6.2 B ซึ่งมีพีคทุกพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกับตัวอย่างปุ๋ยดังกล่าว ยกเว้นในรูปที่ 6.2 B ไม่มีพีคที่ 3.14 Å

ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจจะอธิบายได้ว่าเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่าง  $\text{K}^+$  และ  $\text{NH}_4^+$  ในระหว่างการอบด้วยรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีความชื้นในอากาศเป็นตัวกลาง ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ดูดความชื้นได้ดี) ปฏิกิริยาการแทนที่อาจจะอธิบายได้ดังนี้คือ



พีคของ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  และ  $\text{KCl}$  หายไปแต่เกิดพีคของ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  และ  $\text{KNO}_3$  แทน ในกรณีของตัวอย่างปุ๋ยเกรด 16-16-16 มีพีคของ  $\text{KCl}$  ที่ 3.14 Å ( $I/I_1 = 100$ ) เกิดขึ้นแต่มีความเข้มต่ำมาก ส่วนกรณีของปุ๋ยที่ผสมขึ้นเองไม่มีพีคที่ 3.14 Å แสดงว่าปฏิกิริยาการแทนที่อาจจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์จึงไม่มี  $\text{KCl}$  หลงเหลืออยู่เลย พีคที่น่าสนใจอีกพีคหนึ่งก็คือพีคที่ 3.31 Å เมื่อเปรียบเทียบกับ PDF แล้วพบว่าอาจจะ เป็นพีคของเกลือเชิงซ้อน (double salt) ของ  $\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 2\text{KNO}_3$  ซึ่งเป็นเกลือเชิงซ้อนที่มักจะเกิดขึ้นในปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  กับ  $\text{KNO}_3$  ในการผลิตปุ๋ย (8) ในรูปที่ 6.2 B มีพีคที่ 3.31 Å ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าในรูป 6.2 A อธิบายได้ว่า  $\text{KCl}$  ในปุ๋ยที่เตรียมขึ้นเองเกิดปฏิกิริยาการแทนที่อย่างสมบูรณ์ได้  $\text{KNO}_3$  ทั้งหมด และเนื่องจากปุ๋ยชนิดนี้มีปริมาณ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ค่อนข้างสูงจึงเกิดปฏิกิริยากับ  $\text{KNO}_3$  ได้  $\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 2\text{KNO}_3$  ในปริมาณสูงกว่าในตัวอย่างปุ๋ยซึ่งเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ไม่สมบูรณ์ (มีพีคของ  $\text{KCl}$  ปรากฏอยู่)

จากการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่าปุ๋ยแอมโมฟอสหรือไนโตรฟอสกา ซึ่งมี  $\text{KCl}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  กับ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแทนที่ได้  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{KNO}_3$  หรือบางทีอาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้  $\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 2\text{KNO}_3$  ซึ่งปุ๋ยส่วนใหญ่เป็นปุ๋ยที่ผลิตจากต่างประเทศ ในปุ๋ยบางเกรดอาจจะพบว่ามี  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  หรือ  $\text{KCl}$  เหลืออยู่บ้าง การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวอาจจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองดังที่อธิบายไว้แล้วหรืออาจจะเกิด

ขึ้นในปฏิกิริยาการผลิตปุ๋ยก็ได้ ดังนั้นปุ๋ยตัวอย่างใดก็ตามโดยเฉพาะปุ๋ยที่ผลิตจากต่างประเทศที่มีส่วนประกอบของ  $KNO_3$ ,  $NH_4Cl$  หรือ  $NH_4NO_3 \cdot 2KNO_3$  จะมีส่วนประกอบที่แท้จริงคือ  $NH_4NO_3$  และ  $KCl$

4. ในกรณีที่ปุ๋ยผสมมีสารประกอบซึ่งมีค่า d ซ้ำกันหรือใกล้เคียงกัน การนำผลจากดิฟแฟรกชันแพทเทิร์นมาตัดสินอย่างเดียวนั้นไม่ได้ จึงต้องนำผลการวิเคราะห์ทางเคมีมาใช้ร่วมกัน ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยเกรด 12-24-12 (ตัวอย่างที่ 79, จากตารางที่ 5.9) จากแพทเทิร์นพบว่าพีคที่  $3.14 \text{ \AA}$  ซึ่งในตอนแรกเข้าใจว่าเป็นพีคของ  $KCl$  แต่จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า มี  $Cl$  1.61 เปอร์เซ็นต์และ  $S$  8.94 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าไม่ใช่  $KCl$  และ  $K_2SO_4$  (ดูจาก PDF) แต่มีเปอร์เซ็นต์ของ  $Mg=2.75$  แสดงว่าต้องเป็น  $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$  ซึ่งมีพีคที่  $3.14 \text{ \AA}$  มีความเข้ม  $I/I_1 = 100$

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า การวิเคราะห์ปุ๋ยทางคุณภาพโดยวิธีเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและดิฟแฟรกทอเมตรีนั้น ให้ผลการวิเคราะห์ดี สำหรับปุ๋ยที่ไม่มีแร่โพแทสเซียมอยู่ด้วย ในกรณีที่ไม่มีแร่โพแทสเซียมอยู่ด้วยจะทำให้การแปลผลจากแพทเทิร์นยุ่งยากเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนในสภาวะของแข็ง แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ปุ๋ยประเภทนี้เป็นจำนวนมาก ๆ แล้วก็จะทำให้เข้าใจถึงรายละเอียดต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ได้ดียิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์ทางคุณภาพสามารถสรุปได้ว่า

1. ปุ๋ยที่ผลิตจากต่างประเทศ กรรมวิธีการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตปุ๋ยผสมในสารละลาย ซึ่งเป็นปุ๋ยประเภทปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟตหรือปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยไนตริกฟอสเฟตซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า ไนโตรฟอสกา (nitrophoska)

ปุ๋ยแอมโมเนียมฟอสเฟต ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดผสมระหว่างกรดไนตริกและกรดซัลฟูริกกับแอมโมเนีย ซึ่งจะได้โมโนแอมโมเนียมและ/หรือไดแอมโมเนียมฟอสเฟตผสมกับแอมโมเนียมซัลเฟต ได้แก่ปุ๋ยเกรด 16-20-0 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 1-7), 18-22-0 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 35-36) นอกจากนี้ยังได้มีการใช้สารละลายของแอมโมเนียมไนเตรตทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกและแอมโมเนียได้โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตผสมกับแอมโมเนียมไนเตรต เช่นปุ๋ยเกรด 26-14-0 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 37 - 39) 23-23-0 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 54) ในกรณีที่ต้องการปุ๋ยที่สมบูรณ์โดยการเติมแร่โพแทสเซียมเช่นปุ๋ยเกรด 16-16-16 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 55) ซึ่งประกอบด้วยแอมโมเนียมฟอสเฟต, แอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมคลอไรด์



ปุ๋ยไนโตรฟอสกา ปุ๋ยชนิดนี้เป็นปุ๋ยที่ผลิตกันมากที่สุดในยุโรปและอเมริกา เพราะใช้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าวิธีการผลิตอื่น ๆ โดยการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับซูเปอร์ฟอสเฟต ปุ๋ยชนิดนี้ประกอบด้วย โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต, ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต, แอมโมเนียมไนเตรต, โคแคลเซียมฟอสเฟต, โมโนแคลเซียมฟอสเฟต และแร่โพแทช ในกรณีที่ต้องการปุ๋ยสมบูรณ์ เช่น ปุ๋ยเกรด 14-14-21 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 67-69) 4-16-24 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 59) และ 13-13-21 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 62) เป็นต้น นอกจากปุ๋ยทั้งสองชนิดที่กล่าวมาแล้วยังมีปุ๋ยผสมซึ่งได้จากการผลิตแบบแห้งที่เป็นผงหรือเม็ด เช่นปุ๋ยเกรด 16-16-8 (ตัวอย่างปุ๋ยที่ 71) ประกอบด้วยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต, ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต, แอมโมเนียมซัลเฟต, แอมโมเนียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมคลอไรด์

2. ปุ๋ยที่ผลิตในประเทศ ปุ๋ยที่ผลิตในประเทศส่วนใหญ่เป็นปุ๋ยผสมที่มีกรรมวิธีการผลิตแบบแห้งที่เป็นผง ซึ่งผลิตโดยบริษัทไทยเซมทริล เดมี จำกัด โดยการนำปุ๋ยเดี่ยวชนิดต่าง ๆ เช่น โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต, ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต, แอมโมเนียมซัลเฟต, แอมโมเนียมคลอไรด์, ยูเรีย โพแทสเซียมคลอไรด์ เป็นต้น มาผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน เช่นปุ๋ยเกรด 16-20-0 (ตัวอย่างที่ 8-22), 18-22-0 (ตัวอย่างที่ 23-34) และ 10-16-9 (ตัวอย่างที่ 61) เป็นต้น

จากผลการวิเคราะห์ทางคุณภาพของปุ๋ยจากต่างประเทศและในประเทศ ก็พอที่จะทราบถึงแนวโน้มของการใช้วัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยผสมซึ่งแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แนวโน้มของการใช้วัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยผสมจากต่างประเทศและในประเทศ  
( \* ใช้มาก, Δ ใช้น้อย)

ธาตุ	วัตถุดิบที่ใช้	
	ต่างประเทศ	ในประเทศ
N	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4^\Delta$ , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4^*$ , $\text{NH}_4\text{NO}_3^*$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4^*$ , $\text{NH}_4\text{Cl}^\Delta$ , $\text{NH}_2\text{CONH}_2^\Delta$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4^*$ , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4^*$ , $\text{NH}_4\text{Cl}^*$ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4^*$ , $\text{NH}_2\text{CONH}_2^\Delta$
P	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4^\Delta$ , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4^*$ , $\text{CaHPO}_4^*$ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}^*$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4^*$ , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4^*$
K	$\text{KCl}^*$ , $\text{K}_2\text{SO}_4^\Delta$	$\text{KCl}^*$ , $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4^\Delta$

โดยการนำวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องกีเนียร์-เฮกส์และดิฟแฟรคทอเมตรีมาใช้ในการวิเคราะห์ปุ๋ยทางคุณภาพ พบว่าวิธีการทั้งสองนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่แน่นอนและรวดเร็ว ซึ่งแต่ละเทคนิคก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป สำหรับข้อดีของดิฟแฟรคทอเมตรีก็คือ สามารถวิเคราะห์ได้รวดเร็วและเลือกขนาดมุม 2 $\theta$  ช่วงไหนก็ได้ และสามารถขนาดมุม 2 $\theta$  ได้ทั้งหยาบและละเอียด การวัดตำแหน่งและความเข้มของพีคทำได้สะดวกรวดเร็ว ส่วนข้อเสียก็คือ กำลังในการแยกแยะไม่ค่อยสูง ซึ่งสังเกตจากพีคซึ่งมีค่า  $d$  ใกล้เคียงกันไม่สามารถแยกให้เห็นได้ ส่วนกล้องกีเนียร์-เฮกส์นั้นมีการกำลังในการแยกแยะค่อนข้างสูง แต่ก็มีข้อเสียซึ่งได้แก่ เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับปุ๋ยผสมซึ่งใช้เวลาถึง 2 ชั่วโมง และในบางกรณีที่ไม่สามารถใช้ระบบสัญญาณภาคได้ ทำให้ได้ภาพที่มีเส้นไม่ชัดเจนทำให้เกิดความยุ่งยากในการแปลผล แต่เมื่อนำเทคนิคทั้งสองวิธีมาใช้ควบคู่กันจะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ดียิ่งขึ้น

## 6.2 การวิเคราะห์ทางปริมาณของปุ๋ยผสมโดยวิธี XRFs

การนำหลักการทาง XRFs มาใช้ในการวิเคราะห์ปุ๋ยผสมเป็นจำนวน 6 ตัวอย่าง จากการตรวจสอบปริมาณธาตุต่าง ๆ ในปุ๋ยผสมอย่างคร่าว ๆ (ดูแพทเทิร์นในรูปที่ 2.1 A - 2.6 A) พบว่าความสูงของพีคแต่ละธาตุจะแปรโดยตรงกับปริมาณของธาตุนั้น แสดงว่าวิธีการของ XRFs สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณของธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะธาตุ P, K, S, Cl, Ca และ Mg เมื่อนำวิธีนี้มาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล่านี้ในปุ๋ยผสมเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางเคมี โดยคำนวณค่า  $\gamma^2$  และความเข้มข้นของธาตุซึ่งใช้วิธีการคำนวณแบบค่ากำลังสองน้อยที่สุด พบว่าค่า  $\gamma^2$  ในตัวอย่างปุ๋ยที่ไม่เจือจางด้วยอลูมินามีค่าต่ำกว่าค่า  $\gamma^2$  ในตัวอย่างปุ๋ยที่เจือจางด้วยอลูมินาเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเจือจางปุ๋ยผสมด้วยอลูมินานั้นเป็นการลดการรบกวนจากธาตุข้างเคียง จึงทำให้ผลการวิเคราะห์ดีขึ้น (ดูค่า  $\gamma^2$  จากตารางที่ 5.11)

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ด้วย XRFs กับการวิเคราะห์ทางเคมีแสดงดังตารางที่ 5.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์เมื่อคิดเฉพาะพีคที่ใช้วิเคราะห์เพียงอย่างเดียว กับผลการวิเคราะห์เมื่อแก้ไขจากพีคของแบคกราวนด์แตกต่างกันน้อยมาก (S.D. และ C.V. มีค่าใกล้เคียงกัน) แสดงว่าค่า cps ที่ได้จากพีคที่ใช้วิเคราะห์เพียงอย่างเดียวก็เพียงพอแล้วในการคำนวณและผลการทดลองพบว่า ค่าความเข้มข้นของธาตุที่วิเคราะห์ได้จาก XRFs มีค่าน้อยกว่าที่วิเคราะห์ได้จากทางเคมีทั้งที่วิเคราะห์จากตัวอย่างปุ๋ยโดยตรง และจากตัวอย่างปุ๋ยที่เจือจางด้วยอลูมินา ยกเว้นในกรณีของ S ซึ่งมีค่าสูงกว่า แต่ผลการวิเคราะห์ปุ๋ยที่เจือจางด้วยอลูมินาจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่าการ



วิเคราะห์จากตัวอย่างป้อนโดยตรง (พิจารณาจากค่า S.D. และ C.V.)

ในตารางที่ 6.2 เป็นการเปรียบเทียบ sensitivity ในการวิเคราะห์ป้อนที่เจือจางและไม่เจือจางด้วยอลูมินาในเทอมของ cps

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบ sensitivity โดยการวัดค่า cps ของป้อนที่ไม่เจือจางด้วยอลูมินา (10% ธาตุ) และที่เจือจางด้วยอลูมินา (1% ธาตุ)

ธาตุ	cps	
	ตัวอย่างป้อนโดยตรง (10% ธาตุ)	ตัวอย่างที่เจือจางด้วยอลูมินา (1% ธาตุ)
P(Rp)	48205	3160
P(Rp-Rb)	48044	3131
K	103372	68480
S	42502	3554
Cl	41104	10609
Ca	722624	92061
Mg(Rp)	7163	1014
Mg (Rp-Rb)	6909	894

จากตารางที่ 6.2 พบว่า ธาตุ P และ S มี sensitivity ลดลงเมื่อเจือจางธาตุ แต่สำหรับธาตุอื่น ๆ จะมี sensitivity เพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณธาตุ P, K และ S ที่วิเคราะห์ได้จาก XRFS มีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการรบกวนของธาตุข้างเคียง หรือเกี่ยวข้องกับการจัดสภาวะต่าง ๆ ของเครื่องมือ ดังนั้นวิธีการทดลองที่ควรปรับปรุงคือ

1. การใช้ป้อนมาตรฐานซึ่งทราบส่วนประกอบและปริมาณธาตุต่าง ๆ อย่างแน่นอน เพื่อใช้ทำกราฟมาตรฐานของธาตุต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ป้อนผสมแต่ละชนิด กล่าวคือใช้ standard matrix.

2. การทดลองหาสภาวะต่าง ๆ ในการทดลองเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ดีขึ้น เช่นการเลือกใช้ผลึกที่ใช้วิเคราะห์อื่น ๆ การใช้กำลังของหลอดรังสีเอ็กซ์ให้เหมาะสม เป็นต้น

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ผู้เขียนได้พยายามนำวิธีทางเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ (ในรูปของสารประกอบ) โดยใช้เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกทอมีเตอร์และหลักการของ internal standard ซึ่งใช้ควอทซ์เป็นสารมาตรฐาน แต่การทดลองให้ผลไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์มีค่าไม่แน่นอน เนื่องจากสาเหตุหลายประการคือ

1. ขนาดของตัวอย่างผลึกผง การวิเคราะห์โดยวิธีนี้ขนาดของตัวอย่างผลึกผงมีความสำคัญมาก กล่าวคือถ้าขนาดของผลึกไม่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าจางเข้มไม่เป็นส่วนสัมพันธ์กับปริมาณของสารประกอบชนิดนั้น ๆ ขนาดของผลึกผงไม่ควรต่ำกว่า 200 mesh ในการวิเคราะห์ปุ๋ยผสมนั้นเนื่องจากมีสารประกอบหลายชนิดซึ่งมีคุณสมบัติของความแข็งมากน้อยแตกต่างกันไป และปุ๋ยบางชนิดเช่น  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  มีความชื้นมาก จึงไม่สามารถควบคุมขนาดของผลึกผงได้

2. ความคลาดเคลื่อนของความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์เนื่องจาก การบรรจุสารและการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ เมื่อตัวอย่างปุ๋ยถูกอบด้วยรังสีเอ็กซ์ ความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบนั้น ๆ ในตัวอย่างซึ่งขึ้นอยู่กับเตรียมตัวอย่างปุ๋ย ถ้าอัดตัวอย่างปุ๋ยแน่นหรือหลวมเกินไป จะทำให้ความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์เปลี่ยนแปลงได้ และการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของตัวอย่างปุ๋ยก็ทำให้ความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์เปลี่ยนแปลงได้เหมือนกัน

3. ความคลาดเคลื่อนของความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์เนื่องจากการที่มีสารอัมมอร์ฟ (amorphus substance) ปนอยู่ด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปุ๋ยผสมจะมีการเติม filler (สารใด ๆ ก็ตามที่เติมลงไปเป็นปุ๋ยผสมเพื่อให้ได้น้ำหนักครบตามที่ต้องการ) ส่วนใหญ่เป็น ดิน, ทราย, กากถั่ว เป็นต้น สิ่งเจือปนเหล่านี้ทั้งที่มีและไม่มีรูปผลึกจะทำให้ความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์ของสารประกอบที่สนใจลดลง นอกจากนี้สารประกอบบางชนิดเช่น ไคแคลเซียมฟอสเฟต, โมโนแคลเซียมฟอสเฟตที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาทางเคมี มีคุณสมบัติในการเป็นผลึกต่ำ ทำให้ความเข้มของดิฟแฟรกเตดไลน์ลดลง

จากสาเหตุต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วจึงทำให้ผลการวิเคราะห์ปุ๋ยผสมทางปริมาณโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันไม่ได้ผล การทดลองวิเคราะห์ปุ๋ยผสมทั้งทางปริมาณและคุณภาพของปุ๋ยผสมจึงต้องอาศัยวิธีการของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ และเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันควบคู่กันไป ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองคือ

1. นำปุ๋ยผสมมาวิเคราะห์ด้วยเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อวิเคราะห์หาสารผสมในปุ๋ยผสมนั้น ๆ
2. หาปริมาณธาตุต่าง ๆ โดยวิธีเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยเลือกปุ๋ยมาตรฐานซึ่งมีส่วนประกอบเหมือนกับในตัวอย่างปุ๋ย เพื่อทำกราฟมาตรฐาน จากนั้นจึงหาปริมาณธาตุต่าง ๆ จากกราฟมาตรฐาน

จากข้อมูลและผลการทดลองโดยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันและเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงให้เห็นว่าการนำหลักการทางเอ็กซ์เรย์มาใช้ในการวิเคราะห์ปุ๋ยทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพ ให้ผลได้ดีพอสมควร ซึ่งถ้าได้มีการปรับปรุงวิธีการและเทคนิคในการวิเคราะห์ก็จะทำให้ผลการวิเคราะห์ดีขึ้นและสามารถนำไปทำเป็นงานก็จวัตรได้