หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 3

กลสมบัติและคุณสมบัติทางฟิสิคส์ของข้าวเปลือก

กล่าวนำ

ในบทต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงวิธีการตลอดจนผลของการตรวจสอบกลสมบัติและคุณสมบัติทางฟิสิคส์ (Mechanical and Physical Properties) ของข้าวเปลือก ซึ่งจำเป็นต้องทราบสำหรับใช้ในการศึกษาลักษณะพฤติกรรมทางโครงสร้างเมื่อบรรจุลงในไซโล ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ว่า ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางฟิสิคส์ หรือกลสมบัติของเมล็ดธัญญาหาร หรือพืชพันธุ์อื่น ๆ ก็ตาม มีผู้ทำการวิจัยค้นคว้าไว้น้อยและเท่าที่มีอยู่นั้นก็ค่อนข้างคลาดเคลื่อนจากที่ควรเป็นจริงมาก อันเป็นผลให้ไม่สามารถคำนวณออกแบบไซโลที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานได้ ส่วนสาเหตุที่นำข้าวเปลือกมาเป็นตัวอย่างในการวิจัยก็เนื่องจากพิจารณาเห็นว่าเป็นธัญญาหารที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นวัสดุที่จะเก็บรักษาไว้ในไซโลได้อย่างเหมาะสม

โดยทั่วไปแล้วกลสมบัติหรือคุณสมบัติทางฟิสิคส์ของเมล็ดธัญญาหาร หรือพืชผลทางกสิกรรมต่าง ๆ จะแตกต่างกันออกไปไม่เพียงแต่ประเภทของพืชพันธุ์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับลักษณะอื่น ๆ อีกด้วย เช่น รูปร่างลักษณะและขนาดของเมล็ดในแต่ละพันธุ์และแต่ละท้องที่หรือบริเวณที่เพาะปลูก ความชื้นในขณะทำการบรรจุหรือระหว่างเก็บรักษาไว้ในไซโล รวมทั้งลักษณะการเรียงตัวและการเคลื่อนตัวของเมล็ดในมวลของธัญญาหารทั้งหมด เป็นต้น

สาเหตุที่ต้องศึกษากลสมบัติและคุณสมบัติทางฟิสิคส์ของธัญญาหาร

เมื่อประมาณ 17 ปีมาแล้ว ได้มีการนำไซโลเข้ามาใช้เก็บรักษาพืชพันธุ์ธัญญาหารต่าง ๆ เป็นครั้งแรกในสหราชอาณาจักร ผู้สนใจและผู้เกี่ยวข้องต่างไม่มั่นใจในความแข็งแรงปลอดภัย และประสิทธิภาพในการใช้งาน มหาวิทยาลัยแห่งนิวกาสเซิล[4] (university of

Nowcastle upon Tyne) จึงได้จัดให้มีการวิจัยขึ้น วัตถุประสงค์ขั้นแรกของการวิจัยคือ พยายามศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะและขนาดของแรงต่าง ๆ ที่เกิดในไซโลเนื่องจากน้ำหนักของธัญญาหารที่บรรจุ หลังจากการวิจัยดำเนินไปได้ระยะหนึ่งก็พบว่า การจะคำนวณหาแรงต่าง ๆ ที่เกิดในไซโลนั้น แม้กระทำได้ก็ให้ผลที่ไม่ถูกต้องตรงต่อความเป็นจริงนักถ้าปราศจากการศึกษาทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงคุณสมบัติทางฟิสิคส์บางประการและพฤติกรรมของมวลธัญญาหารในไซโล

คุณสมบัติทางฟิสิคส์ของบรรดาเมล็ดธัญญาหารที่สำคัญที่สุดในที่นี้คือน้ำหนักต่อหน่วย-ปริมาตร (γ), สัมประสิทธิ์ของความฝืดหรือความเสียดทาน (μ', Coefficient of Friction) ระหว่างมวลของธัญญาหารกับผนังไซโล และอัตราส่วน (k) ระหว่างแรงกันด้านข้าง (p_Y , Lateral Pressure) ต่อแรงกันในแนวดิ่ง (q_Y , Vertical Pressure) ที่เกิดเนื่องจากน้ำหนักของมวลธัญญาหารที่บรรจุ เคยมีผู้ทำการวิจัย[4]คุณสมบัติเหล่านี้ของพืชผลหรือธัญญาหารบางชนิดไว้บ้างแล้ว แต่ไม่ตรงกับลักษณะและชนิดของพืชผลของประเทศไทยนัก

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ') ระหว่างมวลธัญญาหารกับผิวไซโลที่บรรจุซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณออกแบบทั่วไปในปัจจุบัน เป็นผลงานที่นับว่ามีประโยชน์อย่างมากชิ้นหนึ่งของ Brubecker และ Pos.[4] ซึ่งทำการทดลองหาค่าดังกล่าวของเมล็ดธัญญาหารหลายชนิดที่มีต่อผิวของวัสดุต่าง ๆ ประเภทเดียวกัน แต่เป็นที่น่าเสียดายว่า ค่าสัมประสิทธิ์ μ' ที่ Brubecker และ Pos. ค้นคว้ารวบรวมไว้นี้ ปรากฏในภายหลังว่าที่นำมาใช้ได้ผลดีเป็นค่าที่ได้จากการทดลองเมื่อเมล็ดธัญญาหารมีความชื้นอยู่ในช่วง 40 – 50 เปอร์เซนต์เท่านั้น[4]

สำหรับค่า k อัตราส่วนของแรงกันด้านข้างต่อแรงกันในแนวดิ่งที่เกิดในไซโลเนื่องจากน้ำหนักของมวลธัญญาหารที่บรรจุอยู่ กล่าวโดยข้อเท็จจริงแล้วยังไม่มีข้อมูลที่แน่นอน แต่เชื่อกันว่าอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.6 ขึ้นอยู่กับขนาดของมุมแห่งความฝืดภายใน (ρ ,Angle of Internal Friction) ของมวลเมล็ดธัญญาหาร ซึ่งกำหนดค่าที่แน่นอนได้ยากมาก เนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่น ความชื้น รวมทั้งลักษณะหรือชนิดของธัญญาหาร

คุณสมบัติทางฟิสิคส์ของมวลเมล็ดธัญญาหารที่สำคัญที่สุดและกำหนดค่าได้ยากที่สุดคือ ความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร (γ) เมื่อบรรจุในไซโล ลักษณะทั่วไปของเมล็ดธัญญาหารส่วนใหญ่ ผิวภายนอกของเปลือกหุ้มเมล็ดจะประกอบด้วยขนอ่อน ๆ (Fibrous Material) ขึ้นอยู่ทั่วไป ความละเอียดอ่อน ความหนาแน่นตลอดจนความสั้นยาวของขนอ่อน ๆ เหล่านี้ขึ้นกับพันธุ์และชนิดของเมล็ดธัญญาหาร เมื่อบรรจุลงในไซโลในระยะแรก ๆ มวลธัญญาหารจะอยู่ในลักษณะหลวมตัวมากเพราะอากาศและความชื้นในสภาพของหยดน้ำเล็ก ๆ จะเกาะขนอ่อน ๆ ที่ผิวเมล็ดติดเข้าไปด้วย ต่อเมื่อระยะเวลาผ่านไปเมล็ดธัญญาหารจะจัดตัวเรียงกันเป็นระเบียบและแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างได้มากขึ้น อากาศบางส่วนจะถูกไล่ออกไป ขนอ่อน ๆ ที่ผิวเมล็ดจะหักงอหรือถูกทำลายเนื่องจากน้ำหนักตัวของมวลธัญญาหารที่ทับถมกันอยู่นาน ๆ ด้วยลักษณะเช่นนี้มวลธัญญาหารก็จะแน่นขึ้น ความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของมวลธัญญาหารในไซโลจึงสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ผ่านไปและตามระดับความลึกวัดจากผิวลงมา การจะตรวจสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของธัญญาหาร อันจะนำไปสู่การวิเคราะห์แรงดันที่เกิดกับผนังและพื้นของไซโลนี้ จึงเห็นได้ชัดว่า จำเป็นอยู่เองที่จะต้องศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสเตรช และสเตรน (Stress-Strain Relation) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเมล็ดธัญญาหารแต่ละชนิด นั่นคือจำเป็นจะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของธัญญาหาร (Material Parameter) ที่เป็นองค์ประกอบกำหนดความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ ได้แก่โมดูลัสแห่งการยืดหยุ่น (E , Modulus of Elasticity) และอัตราส่วนความเครียดของปัวซอง (ν , Poison's Ratio)

ข้าวเปลือกตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ข้าวเปลือกที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ เป็นข้าวเปลือกเจ้าพันธุ์ กข. 1. ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ดีที่คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ แห่งกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พิจารณาให้ใช้ขยายพันธุ์ในท้องถิ่นภาคกลางของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตค่อนข้างสูงมาก คือประมาณ 742 กิโลกรัมต่อไร่ ลักษณะเมล็ดโดยทั่วไปจะมีสีของเปลือกเป็นสีขาวฟาง ขนาดของเมล็ดโดยเฉลี่ยยาว 7.1

มิลลิเมตร กว้าง 2.3 มิลลิเมตร และหนา 1.9 มิลลิเมตร น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรในสภาพหลวมตัวที่ตรวจสอบได้ ประมาณ 617.9 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีความชื้นประมาณ 13 – 15 เปอร์เซนต์ ซึ่งเป็นความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่เก็บรักษาในยุ้งฉางโดยทั่วไป

การตรวจสอบความสัมพันธ์ของสเตรซ–สเตรน ของมวลข้าวเปลือก

1. สมมุติฐานและทฤษฎีในการตรวจสอบ

ด้วยเหตุที่เมล็ดธัญญาหารส่วนใหญ่ในธรรมชาติ จะมี Compressible Fibrous Material[4] ที่ผิวนอกของเปลือกหุ้มเมล็ด ข้าวเปลือกจึงควรมีลักษณะทำนองนี้เช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นการยุบตัวของมวลข้าวเปลือกเมื่อถูกน้ำหนักกดทับ ซึ่งเป็นภาวะที่ปรากฏเมื่อบรรจุทิ้งไว้ในไซโลนั้น นอกจากขนาดของน้ำหนักที่กดทับแล้ว ระยะเวลาที่ถูกน้ำหนักกดทับยังควรนำมาพิจารณาว่ามีอิทธิพลต่อการยุบตัวดังกล่าวอีกด้วย และจากสภาพที่เป็นจริง มวลข้าวเปลือกในไซโลจะมีลักษณะเป็น Continuum Material บรรจุอยู่ในโครงสร้างรูปทรงกระบอก 3 มิติ ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของมิติเมื่อถูกน้ำหนักกดทับจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันทั้ง 3 ด้าน ด้วยเหตุนี้ การหาความสัมพันธ์ระหว่างสเตรซ–สเตรน (Stress-Stain Relation) ของมวลข้าวเปลือก จึงควรอยู่ในรูป 3 มิติ และมีระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องอยู่ด้วย การทดลองโดยวิธี Triaxial Creep Test จะให้ข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ของสเตรซหรือแรงกระทำกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลข้าวเปลือกในลักษณะ 3 มิติ (Volumetric Strain) โดยขึ้นกับระยะเวลาที่จ่ายแรงกระทำลงบนตัวอย่างตรงตามต้องการและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างระหว่างข้าวเปลือกกับไซโลที่ใช้บรรจุได้ทันที

ในขั้นแรกของการวิจัย ได้พยายามใช้วิธี Triaxial Creep Test ตรวจสอบความสัมพันธ์ของสเตรซ–สเตรนในมวลข้าวเปลือก เพื่อให้ตรงกับทฤษฎีที่กล่าวข้างต้น แต่ไม่ประสบผลสำเร็จ เนื่องจาก Triaxial Cell ที่ใช้มีขนาดเล็กเกินไป ไม่เหมาะสมกับขนาดเมล็ดของข้าวเปลือกที่ทดลองซึ่งเมื่อบรรจุลงในถุงยาง (Watertight Membrane) เป็นตัวอย่างจะมีอัตราส่วนของช่องว่างในตัวอย่างนั้น ๆ ต่อขนาดของตัวอย่างสูง นอกจากนั้น

เครื่องมือที่ใช้ไม่สามารถควบคุมแรงดันในแนวดิ่งที่จ่ายให้ตัวอย่างให้คงที่ตลอดเวลาการทดสอบช่วงหนึ่ง ๆ ได้ จึงต้องติดตั้งเครื่องมือจ่ายน้ำหนักเสริมเข้าอีกส่วนหนึ่ง เครื่องมือที่เสริมเข้าช่วยนี้จะต้องสามารถจ่ายน้ำหนักให้ตัวอย่างได้ประมาณ 1.54 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คือเทียบเท่ากับน้ำหนักของข้าวเปลือกในสภาพหลวมตัวสูงประมาณ 25 เมตร ดังนั้นเฉพาะตัวเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นจึงมีขนาดและน้ำหนักที่ถ่ายลงบนตัวอย่างถึง 0.27 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (เทียบเท่าน้ำหนักข้าวเปลือกสูง 4.36 เมตร) ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ถ่ายลงบนตัวอย่างอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำจำนวนมากที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่างของตัวอย่างระบายออกไม่ทัน เป็นเหตุให้เกิด Pore Pressure ขึ้น และการวัดปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างจึงกระทำไม่ได้ การตรวจสอบจึงได้พิจารณาเปลี่ยนวิธีการเสียใหม่ โดยใช้วิธี Confined Creep Test แทน ซึ่งโดยลักษณะของ Confined Creep Test นี้ ไม่อาจกล่าวได้ว่าผลของการทดลองที่ได้จะเป็นข้อมูลสำหรับกำหนดความสัมพันธ์ของสเตรซ–สเตรนที่ถูกต้องกับลักษณะพฤติกรรมของมวลข้าวเปลือกในไซโลจริง ๆ เนื่องจากวัดสเตรน หรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างได้เพียงมิติเดียว ซึ่งไม่พอเพียงในการที่จะนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมของข้าวเปลือกในไซโล แต่ด้วยเหตุจำเป็นดังได้กล่าวมาแล้ว จึงต้องอนุโลมนำเอาวิธีนี้มาใช้ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาคุณสมบัติอื่นที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของข้าวเปลือกที่บรรจุในไซโลในลักษณะ 3 มิติต่อไป ซึ่งในที่นี้ก็คืออัตราส่วนความเครียดของปัวซอง (ν , Poison's Ratio) นั่นเอง

อย่างไรก็ตาม ก่อนจะกล่าวถึงวิธีการของ Confined Creep Test และผลของการตรวจสอบความสัมพันธ์ของสเตรซ–สเตรนที่ได้จากวิธีนี้ ในที่นี้จะได้กล่าวถึงวิธีการของ Triaxial Creep Test ไว้พอสังเขป เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจดำเนินการวิจัยต่อไป

2. วิธี Triaxial Creep Test

วิธีทดลอง ตัวอย่างข้าวเปลือกหรือเมล็ดธัญญาหารใด ๆ ก็ตาม ซึ่งต้องการตรวจสอบหาความสัมพันธ์ของสเตรซ–สเตรนโดยวิธี Triaxial Creep Test[11] นี้ ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) และความสูงประมาณ 2 เท่าของเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง การเตรียมตัวอย่างจะบรรจุลงในถุงยางบาง ๆ (Watertight Elastic Membrane) เป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยไม้สำหรับกระทุ้งให้แน่นพอสมควรเพื่อให้เมล็ดข้าวสาหารเรียงตัวเป็นระเบียบและมีความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรเท่า ๆ กันทุกชั้น แล้วหาน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรนี้ไว้ จากนั้นจะนำเข้าบรรจุใน Triaxial Cell การให้แรงดันกระทำกับตัวอย่างในขณะทดลองทั้งแรงดันในแนวดิ่ง และแรงดันด้านข้าง (แรงดันใน Triaxial Cell) จะต้องกระทำพร้อม ๆ กัน และควบคุมให้คงที่ตลอดเวลา การวัดระยะยุบตัวในแนวดิ่งของตัวอย่างจะวัดได้ด้วยมาตรวัดระยะ (Dial Gage) ส่วนขนาดของปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงจะวัดได้จากระดับน้ำในหลอดแก้วซึ่งต่อจากส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างผ่าน Triaxial Cell ออกมา ตามลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 การวัดการยุบตัวในแนวดิ่งและปริมาตรของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงนี้ จะวัดที่ระยะเวลาเป็นช่วง ๆ ตามต้องการ และเมื่อการยุบตัวหรือการเปลี่ยนแปลงปริมาตรยุติลงแล้ว จะเปลี่ยนตัวอย่างทำการทดลองใหม่โดยเปลี่ยนขนาดของแรงดันในแนวดิ่งเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับทุก ๆ ตัวอย่างที่ทดลองใหม่จนมีขนาดเท่ากับน้ำหนักของเมล็ดข้าวสาหารหรือแรงดันในแนวดิ่งที่มากที่สุด ซึ่งเกิดกับพื้นของไซโลเมื่อไม่คิดแรงเสียดทานที่เกิดกับผนังเนื่องจากความฝืดระหว่างมวลข้าวสาหารกับผิวผนังไซโล ส่วนแรงดันด้านข้างจะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วน k (อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านข้างกับแรงดันในแนวดิ่งที่เกิดในไซโลซึ่งอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 0.6) โดยเทียบกับแรงดันในแนวดิ่งที่จ่ายลงบนตัวอย่าง

<u>ผลของการทดลอง</u> ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำไปคำนวณค่าสเตรส–สเตรน อัตราส่วนความเครียดของปัวซอง (ν) น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร (γ) รวมทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อหน่วยความเค้นเฉลี่ยที่กระทำกับตัวอย่าง ($\frac{\epsilon_v}{d\sigma}$, Volumetric Creep Compliance) และอัตราการเกิดความเครียดในแนวแรงเฉือนต่อหน่วยแรงเฉือน ($\frac{\gamma_{xy}}{\tau_{xy}}$, Shear Creep Compliance) ซึ่งค่าที่กล่าวในตอนหลังทั้ง 2 ค่านี้ ก็คือส่วนกลับของโมดูลัสแห่งการยืดหยุ่น (E , Modulus of Elasticity or Bulk Modulus) และโมดูลัสของการเกร็งตัว (G , Modulus of Rigidity or Shear Modulus) ที่เวลาต่าง ๆ กัน และโดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ก็จะสามารถกำหนดความสัมพันธ์ของ

คุณสมบัติต่าง ๆ ที่คำนวณได้เหล่านี้ในรูปของสมการที่มีระยะเวลาเป็นตัวแปรร่วมอยู่ด้วย ซึ่งนำไปใช้เป็นข้อมูลในการตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างระหว่างมวลข้าวกับไซโลที่บรรจุได้ต่อไป

3. **Confined Creep Test**

วิธี Confined Creep Test[11] ซึ่งนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ หลังจากที่การใช้วิธี Triaxial Creep Test ล้มเหลว มีรายละเอียดการทดลองและการวิเคราะห์ผลของการทดลองที่ได้ดังต่อไปนี้

วิธีทดลอง สำหรับวิธีทดลองกระทำโดยอาศัยวิธีการเช่นเดียวกับวิธีทดลอง Consolidation Test[10] ของดินหรือทรายในวิชาปฐพีกลศาสตร์ แต่ขนาดภาชนะรูปทรงกระบอกที่ใช้บรรจุข้าวเปลือกในขณะทดลองจะมีขนาดใหญ่กว่า คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อให้รับกับขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก ความหนาของตัวอย่างข้าวเปลือกที่บรรจุลงในภาชนะเมื่อทำการทดลองจะต้องไม่มากเกินไป โดยเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อให้แรงกันที่กระทำลงบนผิวหน้าของตัวอย่างด้วยระบบคานงัด (Lever Arm Mechanism) ซึ่งจะต้องควบคุมให้คงที่ตลอดเวลาที่ทดสอบนั้นถ่ายลงอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนา และเพื่อลดอิทธพลของความฝืดระหว่างผิวของมวลข้าวเปลือกตัวอย่างกับผิวของภาชนะที่จะมีต่อขนาดและอัตราการยุบตัวของตัวอย่างด้วย อัตราการยุบตัวของข้าวเปลือกตัวอย่างดังกล่าวจะวัดได้จากมาตรวัดระยะ (Dial Gage) ที่ระยะเวลาเป็นช่วง ๆ คือ 2, 6, 30, 60, 120, 360 นาที และ 24 ชั่วโมง จากนั้นจะเปลี่ยนตัวอย่างทำการทดลองใหม่ โดยเพิ่มขนาดของแรงกันในแนวดิ่งทุก ๆ ครั้ง จนมีขนาดไม่น้อยกว่า 2 เท่าของแรงกันที่เกิดกับพื้นไซโลบรรจุข้าวเปลือกสูง 25 เมตร ในรูป 7 เป็นรูปแสดงลักษณะของการทดลองที่กล่าวมาทั้งหมดนี้

ผลของการทดลอง ตารางที่ 4 เป็นตัวอย่างของผลการทดลองที่ได้จากการใช้น้ำหนักกดลงบนตัวอย่าง 73 และ 170 กิโลกรัม หรือเท่ากับแรงกันประมาณ 0.55 และ 1.28 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นแรงกันที่พื้นของไซโลเมื่อบรรจุข้าวเปลือกสูง

ประมาณ 9 และ 20 เมตร ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการยุบตัวของข้าวเปลือกเกิดขึ้นน้อยมาก และในระยะท้าย ๆ ของการทดลอง คือหลังจาก 3 ชั่วโมงขึ้นไปแล้วการยุบตัวแทบจะไม่เกิดขึ้นเลย อัตราของการยุบตัวของข้าวเปลือกในการทดลองทั้งสองครั้งนี้มีเพียง 4.2 และ 6.9 เปอร์เซนต์ ในระยะเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง และการยุบตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระยะแรกของการทดลองซึ่งเป็นระยะที่เมล็ดข้าวเปลือกจัดเรียงตัวเองให้เป็นระเบียบ โดยแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างเมล็ดเมื่อถูกน้ำหนักกดทับ เพราะฉะนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการยุบตัวของมวลข้าวเปลือกจะเกิดขึ้นน้อยมาก และภายในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ในระยะแรกที่รับน้ำหนักเท่านั้น การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างสเตรซและสเตรนจึงไม่จำเป็นต้องนำเวลาเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ตารางที่ 5 เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับตัวอย่างข้าวเปลือกทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ลักษณะการทดลองเป็นการตรวจสอบขนาดของการยุบตัวเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกันในแนวดิ่งต่าง ๆ กัน โดยถึงระยะเวลาที่ใช้ในการยุบตัว อัตราการเพิ่มของน้ำหนักบรรทุกจะแตกต่างกันในการทดลองทั้ง 4 ครั้ง คือเพิ่มขึ้นครั้งละ 10, 20, 30 และ 40 กิโลกรัม ในการทดลองตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ และในรูปที่ 8 เป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกันในแนวดิ่งกับอัตราการยุบตัวเทียบกับขนาดความหนาเดิมของตัวอย่าง หรือความสัมพันธ์ของสเตรซกับสเตรนของข้าวเปลือกในการทดลองทั้ง 4 ครั้งนั่นเอง ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟเหล่านี้จะมีสมการอยู่ในรูปของ

$$y = a \exp.^{-b\left(1 - \frac{x}{1-x}\right)} x \qquad (3\text{–}1)$$

เพราะฉะนั้นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเสตรซกับสเตรนของข้าวเปลือกจะเขียนได้โดยเปรียบเทียบตัวแปรกับสมการ (3–1) ดังนี้

$$\frac{P}{A} = E_0 \cdot \exp.^{-\alpha\left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)} \frac{\Delta h}{h_0} \qquad (3\text{–}2)$$

โดยที่ $\frac{P}{A}$ = สเตรช (Stress), น้ำหนักบรรทุก (P) ที่กดทับลงบนผิวหน้าของตัวอย่างข้าวเปลือกต่อหน่วยพื้นที่ (A) ของผิวหน้าตัวอย่าง

$\frac{\Delta h}{h_o}$ = สเตรน (Strain), ขนาดความหนาที่เปลี่ยนแปลง (Δh) ต่อความหนาเดิมของตัวอย่างข้าวเปลือก (h_o)

$\frac{\gamma}{\gamma_o}$ = อัตราส่วนของความหนาแน่นเมื่อถูกน้ำหนักกดทับ (γ) ต่อความหนาแน่นเดิม (γ_o)

E_o และ α = ค่าตัวเลขคงที่ใด ๆ

ค่า $E_o \exp.^{-\alpha(1 - \frac{\gamma}{\gamma_o})}$ ในสมการ (3–2) ก็คือโมดูลัสแห่งการยืดหยุ่น (E , Modulus of Elasticity or Bulk Modulus) ของข้าวเปลือกนั่นเอง ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปรไปตามความหนาแน่นของมวลข้าวเปลือก สำหรับค่าคงที่ E_o และ α ก็สามารถคำนวณได้โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองและหลักเบื้องต้นของ Matrix Algebra ซึ่งได้แสดงขั้นตอนของการคำนวณไว้ในตารางที่ 6 และค่าของ E_o และ α ที่คำนวณได้ก็คือ

E_o = 12.1727 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

α = 7.6809

ดังนั้นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสเตรชกับสเตรน (Stress-Strain Relation) ของข้าวเปลือกซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการยุบตัวของมวลข้าวเปลือก และแรงกันต่าง ๆ ในไซโลต่อไปสำหรับการวิจัยนี้ก็คือ

$$\frac{P}{A} = 12.1727 \exp.^{-7.6809 (1 - \frac{\gamma}{\gamma_o})} \frac{\Delta h}{h_o} \qquad (3–3)$$

<u>การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความเครียดของปัวซอง (Poison's Ratio)</u>

กลสมบัติอีกข้อหนึ่งของข้าวเปลือกที่จำเป็นต้องทราบและไม่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ Consolidation Test ก็คือค่าของอัตราส่วนความเครียดของปัวซอง (ν, Poison's Ratio) เพราะฉะนั้นในการวิจัยนี้จึงต้องใช้วิธีคำนวณตรวจสอบค่า นี้ออกมา

ในการคำนวณจะใช้วิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ โดยแบ่งมวลของข้าวเปลือกซึ่งถูกน้ำหนักกดทับออกเป็นอีลีเมนต์ (Elements) เล็ก ๆ แล้วใช้ Computer เข้าช่วยในการคำนวณค่าสเตรช (Stress) และสเตรน (Strain) ของมวลข้าวเปลือก ข้อมูลและภาวะแวดล้อมที่เป็นเงื่อนไขในการคำนวณก็คือ ขนาดของแรงดันที่กดลงบนข้าวเปลือก ความหนาแน่นเริ่มต้น ความสัมพันธ์ระหว่างสเตรชและสเตรนที่วิเคราะห์ได้ในตอนแรกคือสมการ (3-3) และอัตราส่วนความเครียดของปัวซอง ν, ซึ่งกำหนดขึ้น รูปที่ 9 เป็นรูปแสดงการแบ่งมวลของข้าวเปลือกเป็นอีลีเมนต์เล็ก ๆ ในการคำนวณนี้ แรงที่ถูกกดลงบนผิวหน้าของมวลข้าวเปลือกจะกำหนดให้แบ่งกระทำลงเป็นจุดที่จุดเชื่อมต่อ (Nodal Points) ของอีลีเมนต์ชั้นบน การแบ่งแรงดันที่อยู่ในลักษณะของแรงต่อหน่วยพื้นที่ (Pressure)มาเป็นขนาดแรงกระทำที่แต่ละ Nodal Point คำนวณได้จากสมการ คือ

$$P_{r_1} = p(r_2 - r_1)\left[\frac{r_1}{2} + \frac{1}{6}(r_2 - r_1)\right] \qquad (3\text{-}4)$$

และ

$$P_{r_2} = p(r_2 - r_1)\left[\frac{r_1}{2} + \frac{1}{3}(r_2 - r_1)\right] \qquad (3\text{-}5)$$

ค่าของ P_{r_1} และ P_{r_2} ในสมการทั้งสองนี้คือค่าของแรงกระทำบน Nodal Point ที่อยู่ห่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางของมวลข้าวเปลือกที่ระยะ r_1 และ r_2 ตามลำดับ เมื่อมีแรงกดต่อหน่วยพื้นที่ p กระทำกับผิวหน้าตัวอย่างข้าวเปลือก ซึ่งได้แสดงการคำนวณนี้ไว้ในตารางที่ 7 ผลของการคำนวณคือค่าของสเตรชและสเตรนที่ได้จากการสมมุติค่า ν ขึ้นนี้ จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าของสเตรชและสเตรนที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟความสัมพันธ์ของสเตรช-สเตรน (Stress-Strain Relation) ที่ได้จากการคำนวณโดยกำหนดค่าของ ν เท่ากับ 0.20, 0.27, 0.29 และ 0.30 กับเส้นกราฟความสัมพันธ์ของสเตรช-สเตรนซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของการทดลอง Consolidation Test ทั้ง 4 ครั้ง และจากการเปรียบเทียบนี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าอัตราส่วนความเครียดของปัวซอง ν, ของข้าวเปลือกจะอยู่ในช่วง 0.27 ถึง 0.30 และจึงได้เลือกค่า $\nu = 0.29$ เป็นค่าที่ใช้ในการวิจัย เพราะฉะนั้น บัลคโมดูลัส (Bulk Modulus) ซึ่งก็คืออัตราส่วน K, ของขนาดความเค้นเฉลี่ย (σ_v , Volumetric Stress) ต่อขนาดการ

เปลี่ยนแปลงปริมาตร (ϵ_v , Volumetric Strain) และค่าโมดูลัสของการเกร็งตัว (G , Modulus of Rigidity) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องนำไปใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของข้าวเปลือกในไซโล จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้ คือ

$$K = \frac{E_o}{3(1-2\nu)} = \frac{12.1727}{3\,[1-2(0.29)]} = 9.66087 \text{ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร}$$

หรือ $K = 96.6087$ ตัน/ตารางเมตร (3–6)

และ $$G = \frac{E_o}{2(1+\nu)} = \frac{12.1727}{2(1+0.29)} = 4.71810 \text{ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร}$$

หรือ $G = 47.1810$ ตัน/ตารางเมตร (3–7)

ความเสียดทานระหว่างมวลข้าวเปลือกกับผิวผนังไซโล

การตรวจสอบความเสียดทานหรือความฝืดระหว่างมวลเมล็ดข้าวเปลือกกับผิวคอนกรีต ซึ่งเป็นผิวผนังของไซโลที่ใช้บรรจุ อันเป็นข้อมูลที่กำหนดภาวะแวดล้อมของข้าวเปลือกในไซโลในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์นั้น สำหรับการวิจัยนี้อาศัยหฤษฎีที่ว่าด้วยความฝืดที่เกิดระหว่างผิววัสดุทั่วไปกล่าวคือ แรงเสียดทานระหว่างผิวของวัสดุ 2 ชนิด จะขึ้นอยู่กับลักษณะของผิววัสดุและแรงในแนวตั้งฉากกับผิวที่เสียดสีกันหรือแนวของแรงเสียดทานนั้น[10] ซึ่งเขียนได้เป็นสมการดังนี้ คือ

$$\sigma_f = \mu' \sigma_n \qquad (3–8)$$

โดยที่ σ_f = หน่วยแรงเสียดทานต่อหน่วยพื้นที่ผิวที่เสียดสีกันของวัสดุ 2 ชนิด

σ_n = หน่วยแรงในแนวตั้งฉากกับผิวที่เสียดสีหรือแรงเสียดทาน

μ' = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของผิววัสดุทั้ง 2 ชนิดนั้น

<u>วิธีทดลอง</u> การตรวจสอบความสัมพันธ์ตามสมการ (3–8) หรือทดลองหาค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ' , ระหว่างมวลเมล็ดข้าวเปลือกกับผิวคอนกรีต กระทำโดยวิธีคล้าย ๆ กับการทดลองหาแรงเฉือนของ Cohesionless Soil[10] หรือทราย ด้วยเครื่องมือที่

เรียกว่า **Direct Single-Shear Apparatus** ลักษณะของเครื่องมือในขณะทดลองอยู่ในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 11

การทดลองจะเริ่มด้วยบรรจุข้าวเปลือกตัวอย่างเป็นชั้นบาง ๆ ประมาณ 1.0 เซนติเมตร ลงในส่วนบนของ **Shear Box** ซึ่งบรรจุแผ่นคอนกรีตอยู่ในส่วนล่างเรียบร้อยแล้ว ใช้แผ่นโลหะที่มีความหนาพอเพียงที่จะไม่เกิดการโก่งงอเมื่อถูกน้ำหนักมาก ๆ กดทับวางทับลงบนผิวหน้าข้าวเปลือกใน **Shear Box** ที่เกลี่ยให้ได้ระดับดีแล้ว เพื่อทำหน้าที่ถ่ายแรงในแนวตั้งฉาก P_n, ลงบนข้าวเปลือกตัวอย่างโดยสม่ำเสมอ จากนั้นจะเริ่มจ่ายแรงในแนวระดับผ่าน **Proving Ring** ดันวงแหวนส่วนบนของ **Shear Box** ให้พาข้าวเปลือกที่บรรจุอยู่ครูดไปบนผิวหน้าของแผ่นคอนกรีตด้วยอัตราการเคลื่อนที่สม่ำเสมอ ซึ่งสังเกตได้จากมาตรวัดระยะ **(Dial Gage)** ที่ติดไว้ในด้านตรงข้ามกับด้านที่จ่ายแรงดันนี้ ขนาดของแรงดันในแนวระดับที่อ่านได้จาก **Proving Ring Dial Gage** จะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่ง จากนั้นจะลดลงเล็กน้อยและอยู่ในลักษณะค่อนข้างคงที่เรื่อยไป ขนาดของแรงที่คงที่ดังกล่าวคือค่าของแรงเสียดทาน P_f, ระหว่างมวลข้าวเปลือกกับผิวคอนกรีตนั่นเอง ต่อจากนั้นจะเปลี่ยนตัวอย่างแล้วทำการทดลองใหม่หลาย ๆ ครั้ง โดยแต่ละครั้งเพิ่มขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก P_n, ขึ้นเรื่อย ๆ ค่าของแรงในแนวระดับที่อ่านได้จาก **Proving Ring Dial Gage** รวมทั้งระยะการเคลื่อนที่ **s**, จะถูกบันทึกไว้เป็นชุด ๆ ตามขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก P_n, ที่กดลงบนตัวอย่างแต่ละการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 8

<u>ผลของการทดลอง</u> รูปที่ 12 เป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงในแนวระดับที่จ่ายผ่าน **Proving Ring** กับระยะการเคลื่อนที่ **s**, ซึ่งเขียนขึ้นจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามตารางที่ 8 ดังกล่าวข้างต้น เพื่อใช้กำหนดค่าที่แน่นอนของแรงเสียดทาน P_f, ที่ขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก P_n, ต่าง ๆ กัน

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเสียดทาน ($\sigma_f = \frac{P_f}{A}$) กับหน่วยแรงในแนวตั้งฉาก ($\sigma_n = \frac{P_n}{A}$) ซึ่งแสดงไว้เป็นเส้นกราฟตามรูปที่ 13 อันเป็นผลจากการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่าไม่เป็นไปตามสมการ (3–9) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรง เพราะฉะนั้นจึงเป็นข้อยืนยันอีกข้อหนึ่งว่า

การคำนวณหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดในไซโลเนื่องจากน้ำหนักมวลธัญญาหารสำหรับประเทศไทย โดยนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน μ' , ของพืชผลธัญญาหารที่เพาะปลูกกันในต่างประเทศมาใช้แทนด้วยการเทียบเคียงลักษณะและชนิดของพืชผลที่เพาะปลูกในประเทศนั้น อาจจะถูกต้องและได้ผลดีกับพืชผลหรือธัญญาหารบางชนิดเท่านั้น แต่ย่อมใช้ไม่ได้กับข้าวเปลือกอย่างแน่นอน และถึงแม้ว่าเมื่อนำมาใช้แล้ว ผลการคำนวณสุดท้ายที่ได้จะไม่กระทบกระเทือนหรือเป็นปัญหายุ่งยากในการคำนวณออกแบบไซโลในภายหลังก็ตาม ก็ไม่อาจกล่าวได้ว่าเป็นการคำนวณออกแบบที่ถูกต้องตรงตามข้อเท็จจริง พิจารณาตามลักษณะของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเสียดทาน σ_f , กับหน่วยแรงกันในแนวตั้งฉาก σ_n , ในรูปที่ 13 ดังกล่าวจะพบว่าสมการของเส้นกราฟนี้ควรจะเขียนได้เป็น

$$\sigma_f = \mu' \sigma_n^a \qquad (3\text{–}9)$$

ซึ่งเมื่อเขียนอยู่ใน **Logarithmic Function** จะอยู่ในลักษณะของสมการเส้นตรงคือ

$$\log \sigma_f = \log \mu' + a \log \sigma_n \qquad (3\text{–}10)$$

และเมื่อนำค่าของ σ_f และ σ_n ที่ได้จากการทดลองมากำหนดเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ใน **Log Scale** ก็ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงตามรูปที่ 14 ถูกต้องตามสมการ (3–9) หรือ (3–10) ที่ได้สันนิษฐานไว้ เพราะฉะนั้นค่าของ μ' จึงเป็นค่าของหน่วยแรงที่เส้นกราฟในรูปนี้ตัดกับแกนของ σ_f และ a ก็คือค่าความชัน (Slope) ของเส้นกราฟนั่นเอง

สำหรับตารางที่ 9 เป็นการคำนวณตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของเส้นกราฟรูปที่ 14 โดยใช้หลักการของ **Matrix Algebra** เช่นเดียวกับในการวิเคราะห์ค่า E_o และ α ในตารางที่ 6 ซึ่งปรากฏว่าค่าของ σ_f ที่ได้จากการคำนวณตรวจสอบคลาดเคลื่อนจากค่าที่อ่านได้จากเส้นกราฟของการทดลองน้อยมากคืออยู่ในช่วง $\pm$ 0.5 % ค่าของ μ' และ a ที่คำนวณตรวจสอบได้และที่อ่านได้จากเส้นกราฟมีดังนี้

โดยการคำนวณตรวจสอบ ; $\mu' = 1.6709$

$a = 0.5304$

โดยอ่านจากกราฟรูปที่ 14; $\mu' = 1.70$

$a = 0.49$

ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนถือได้ว่าเป็นค่าเดียวกัน เพราะฉะนั้นจากการทดลองตรวจสอบนี้ จึงสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน ที่เกิดระหว่างมวลเมล็ดข้าวเปลือกกับผนังไซโลคอนกรีต กับแรงดันด้านข้างที่มีต่อผนังไซโลนั้น จะมีสมการเป็น

$$\sigma_f = 1.6709\ \sigma_n^{0.5304} \qquad (3\text{–}11)$$

ซึ่งจะเป็นสมการที่กำหนดภาวะแวดล้อมของมวลข้าวเปลือกในไซโลคอนกรีตในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่จะได้กล่าวในบทต่อไป

<u>การตรวจสอบค่าของมุมลาดชันปกติ (Angle of Repose) ของข้าวเปลือก</u>

ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์หน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดในไซโลสำหรับงานวิจัยนี้ ไม่ต้องนำค่าของมุมลาดชันปกติ (ϕ , Angle of Repose) ของข้าวเปลือกเข้ามาเกี่ยวข้องกับการคำนวณเลยก็ตาม (ทั้งนี้เพราะใช้คุณสมบัติด้านการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของมวลข้าวเปลือกเมื่อถูกแรงกระทำ มาวิเคราะห์หน่วยแรงได้โดยตรง) แต่เพื่อสร้าง Finite Element Model ที่จำลองลักษณะของมวลข้าวเปลือกแต่ละชั้นที่บรรจุลงในไซโลอย่างถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง ซึ่งจะได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 4 รวมทั้งเพื่อใช้เป็นค่าโดยประมาณของมุมแห่งความฝืดภายในระหว่างเมล็ดข้าวเปลือก (ϕ, Angle of Internal Friction) ในการคำนวณหน่วยแรงในไซโล โดยวิธีของแจนเสน เร็มเบิร์ท และแฮรี่ย์ ที่จะนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจสอบค่าของมุมลาดชันปกติ ϕ ของข้าวเปลือกไว้ดังรายละเอียดการทดลองและผลที่ได้ที่จะได้กล่าวต่อไปนี้

<u>วิธีทดลอง</u> การทดลองทำด้วยวิธีง่าย ๆ เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยภาชนะรูปกรวยปลายตัดสูงประมาณ 30 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสองด้านประมาณ 15 เซนติเมตร และ 5 เซนติเมตร สเกลสำหรับวัดความสูง เทปหรือเชือกสำหรับวัดเส้นรอบวงของ

กองข้าวเปลือก ในการทดลองบริเวณพื้นที่ทำการทดลองจะปรับระดับให้เรียบแล้วปูดาดด้วยข้าวเปลือกหนาประมาณ 3 เซนติเมตร จากนั้นเทข้าวเปลือกผ่านภาชนะรูปกรวยให้ไหลลงสู่พื้นดังกล่าว จนกระทั่งกองข้าวเปลือกมีความสูงประมาณ 20 เซนติเมตร วัดความสูงและขนาดเส้นรอบวงของกองข้าวเปลือกเพื่อใช้คำนวณค่ามุมลาดชันปกติ ϕ ได้ตามสมการดังนี้

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\pi h}{c} \qquad (3\text{-}12)$$

โดย h = ความสูงของกองข้าวเปลือก

c = ความยาวเส้นรอบวง

ค่าของมุม ϕ โดยเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้งหมดดังข้อมูลในตารางที่ 10 คือ 22.75° ซึ่งจะได้นำไปใช้เป็นข้อมูลของงานวิจัยนี้ต่อไป