บทที่ 3

ผลการทดลอง

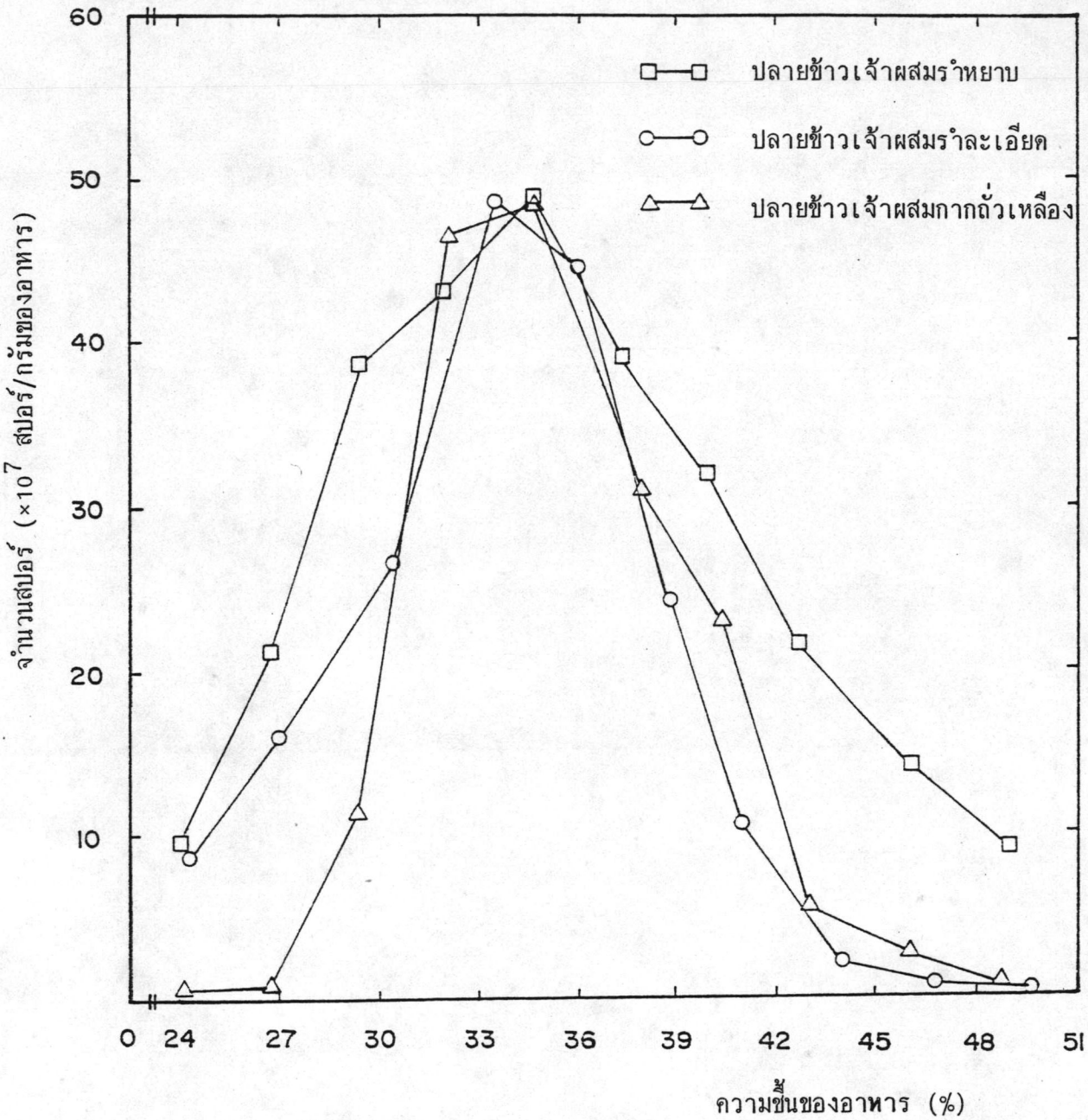
3.1 การศึกษาสภาพของสารอาหารที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ของ R. oligosporus เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้น

3.1.1 ผลการหาชนิดของอาหารและความชื้นที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์

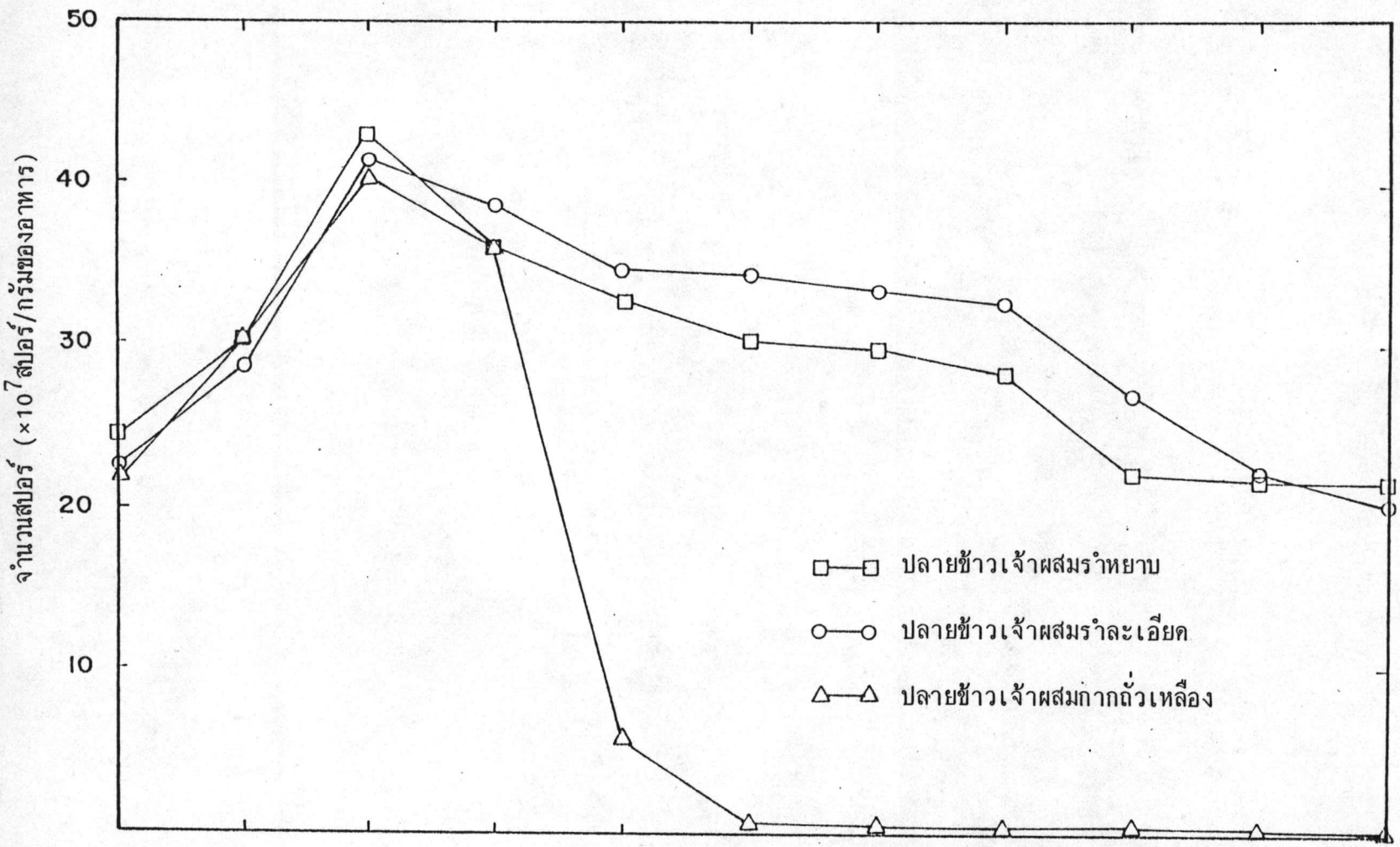
ผลการนับจำนวนสปอร์ของ R. oligosporus ที่เลี้ยงในอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิด ตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ 2.3.1 โดยใช้อัตราส่วนของอาหารคงที่ที่ 9:1 โดยน้ำหนักแห้ง แต่ผันแปรความชื้นของอาหารระหว่าง 24-50% พบว่าอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิด คือปลายข้าวเจ้าผสมรำหยาบ ปลายข้าวเจ้าผสมรำละเอียด และปลายข้าวเจ้าผสมกากถั่วเหลือง จะให้สปอร์สูงสุดใกล้เคียงกันประมาณ $4.8-4.9\times10^8$ สปอร์/กรัม อาหารแข็ง เมื่อความชื้นของอาหารทั้ง 3 ชนิด มีค่า 34.7, 33.1 และ 34.7% ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละชนิดในการทดลองต่อไป ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1 และตารางภาคผนวก ง-1.1, ง-1.2 และ ง-1.3

3.1.2 ผลการหาอัตราส่วนของอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิดที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์

ผลการนับจำนวนสปอร์ของ R. oligosporus ที่เลี้ยงในอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิด ตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ 2.3.2 โดยใช้ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอาหารแข็งแต่ละชนิด แต่ผันแปรอัตราส่วนของปลายข้าวเจ้าผสมรำหยาบ ปลายข้าวเจ้าผสมรำละเอียด และปลายข้าวเจ้าผสมกากถั่วเหลือง ตั้งแต่ใช้ปลายข้าวล้วน จนถึง 10:10 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการสร้างสปอร์ของอาหารแข็งทั้ง 3 ชนิด คือ 9:1 ซึ่งจะให้สปอร์สูงสุดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และตารางภาคผนวก ง-2.



รูปที่ 3.1 จำนวนสปอร์ของ R. oligosporus จากอาหารแข็ง 3 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย ปลายข้าวเจ้าผสมรำหยาบ ปลายข้าวเจ้าผสมรำละเอียด และปลายข้าวเจ้าผสมกากถั่วเหลือง ในอัตราส่วนคงที่ 9:1 โดยน้ำหนักแห้ง แต่ผันแปรความชื้นของอาหารระหว่าง 24-50% บ่มเชื้อที่ 30 °ซ เป็นเวลา 5 วัน



ส่วนผสมของอาหารแข็ง

ปลายข้าวเจ้า (กรัมน้ำหนักแห้ง)	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
รำหยาบ หรือรำละเอียด หรือกากถั่วเหลือง (กรัมน้ำหนักแห้ง)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

รูปที่ 3.2 จำนวนสปอร์ของ R. oligosporus จากอาหารแข็งซึ่งผันแปรอัตราส่วนของปลายข้าวเจ้าผสมรำหยาบ ปลายข้าวเจ้าผสมรำละเอียด และปลายข้าวเจ้าผสมกากถั่วเหลือง ตั้งแต่ใช้ปลายข้าวล้วน ถึง 10:10 โดยน้ำหนักแห้ง และใช้ความชื้นของอาหาร 34.7, 33.1 และ 34.7% ตามลำดับ บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นเวลา 5 วัน

3.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันเมื่อหมักด้วย R. oligoporus ในกล่องหมัก

3.2.1 ผลการศึกษาขนาดของชิ้นมันที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมัน

เนื่องจากมันที่ใช้ในการหมักได้จากการบดมันเส้นและแยกขนาดด้วยการร่อน ซึ่งในการหมักอาหารแข็งขนาดของวัตถุดิบจะมีผลต่อความพรุนของชั้นหมัก รวมทั้งประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลและความร้อน ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงขนาดของมันที่เหมาะสม จึงทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ 2.7.2.1 โดยหมักมันขนาดต่าง ๆ กัน คือ 10, 6, 3, 1 และผงมันขนาดเล็กกว่า 1 มม. ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% ปริมาณสปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง และใช้ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. หมักที่อุณหภูมิ 37 °ซ และมีการให้อากาศในอัตรา 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ผลการทดลองดังนี้

3.2.1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก

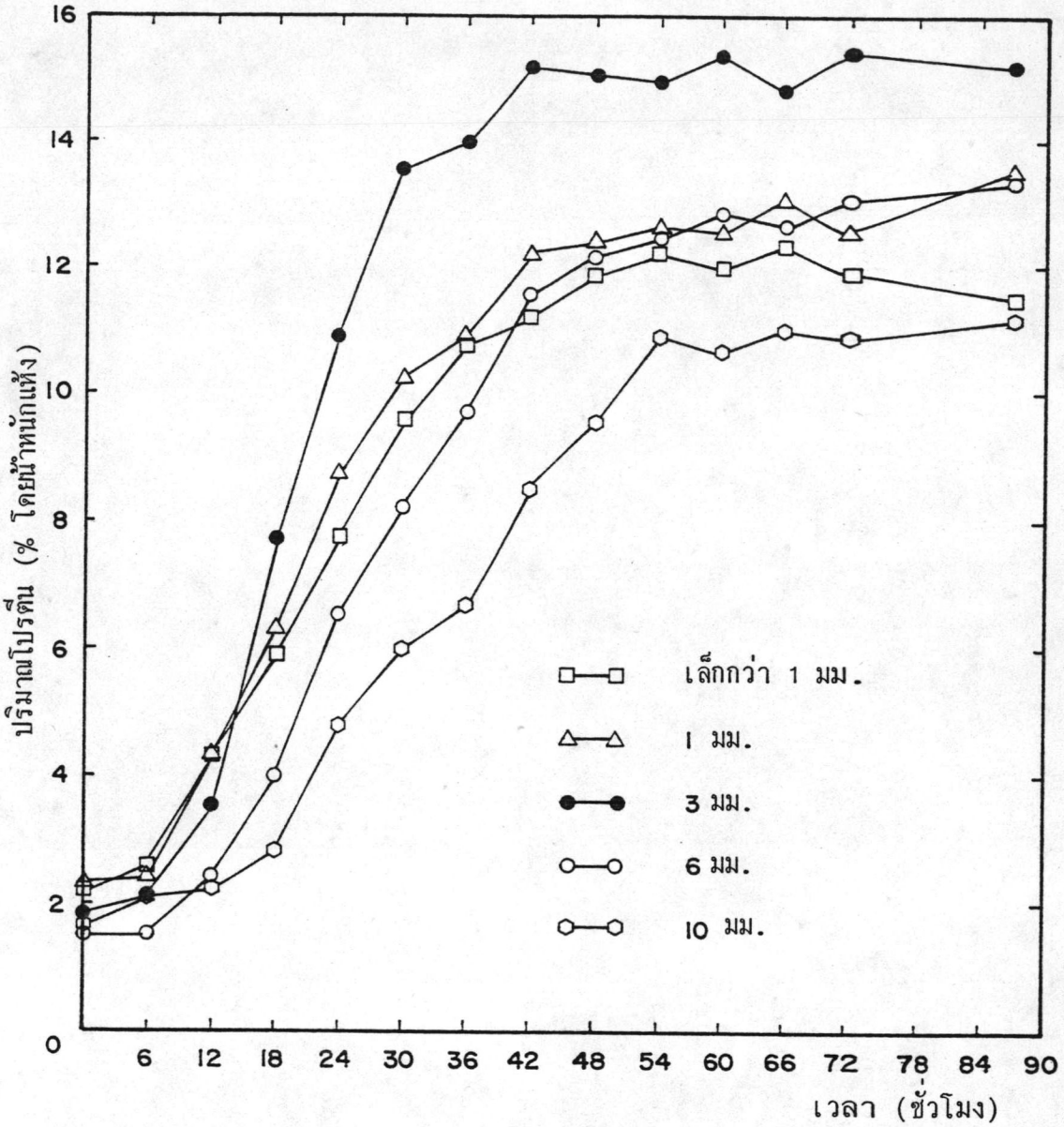
ผลการทดลองพบว่า ปริมาณโปรตีนของมันหมักมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มขนาดของมันที่ใช้ และได้ปริมาณโปรตีนสูงสุดเมื่อใช้มันขนาด 3 มม. เมื่อเพิ่มขนาดของมันมากกว่านี้ปริมาณโปรตีนที่ได้มีค่าลดลง โดยเมื่อใช้มันขนาด 3 มม. จะได้โปรตีน 15.2% โดยน้ำหนักแห้งในชั่วโมงที่ 42 ดังแสดงในรูป 3.3 และตารางภาคผนวก ง-3

3.2.1.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์

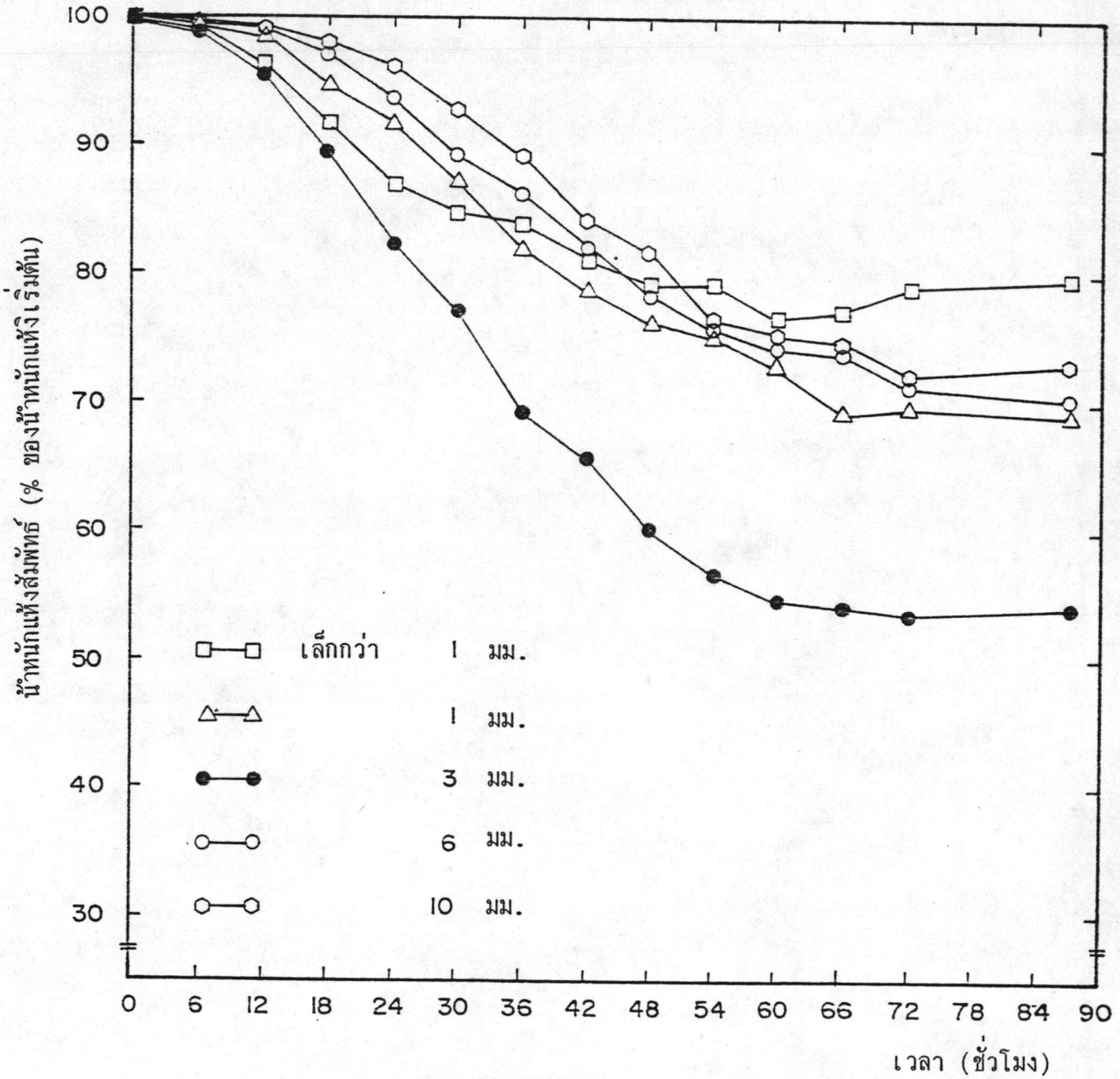
ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดของมันที่ใช้หมัก การลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น และการลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เกิดมากที่สุดเมื่อใช้มันขนาด 3 มม. เมื่อเพิ่มขนาดของมันมากกว่านี้ ทำให้การลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เกิดน้อยลง โดยเมื่อใช้มันขนาด 3 มม. จะมีน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ 65.6% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น ในชั่วโมงที่ 42 ดังแสดงในรูป 3.4 และภาคผนวก ง-5

3.2.1.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้น

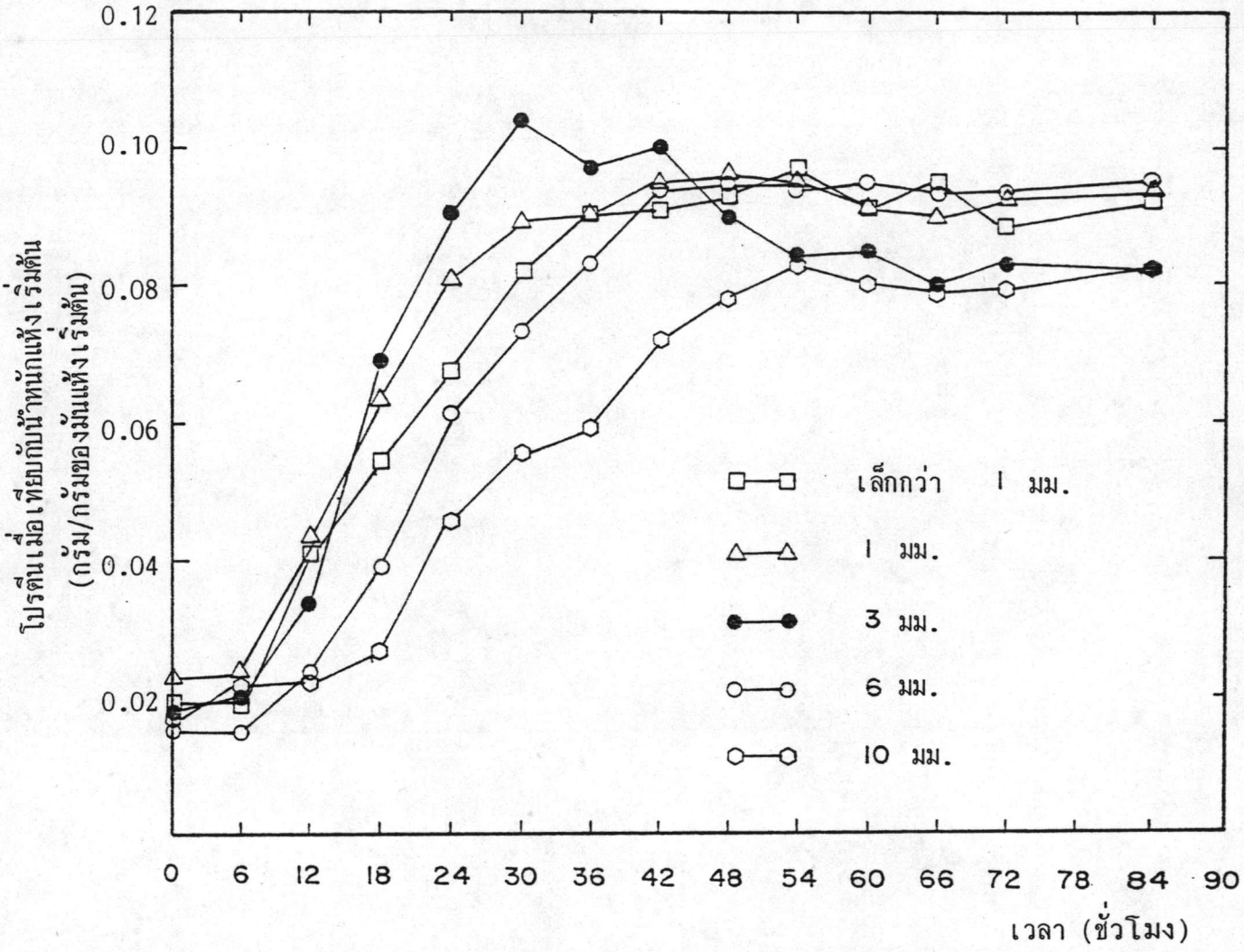
เมื่อใช้มันขนาด 3 มม. นั้น ปริมาณโปรตีนดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 และจะมีค่าสูงสุดคือ 0.104 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น โดยใช้เวลาน้อยที่สุดคือ 30 ชั่วโมง หลังจากนั้นปริมาณโปรตีนดังกล่าวจะมีค่าลดลงจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก เมื่อใช้มันที่มีขนาดเล็กและใหญ่กว่า 3 มม. การเปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่อัตราการเพิ่มของโปรตีนและปริมาณโปรตีนที่ได้จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 3.5 และตารางภาคผนวก ง-6



รูปที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เพื่อผันแปรขนาดของมันต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15–20 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ (%) ของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันเส้นต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมักโดยใช้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันเส้นต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. และอุณหภูมิ 37 °ซ

3.2.1.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก

เมื่อหมักมันขนาดต่าง ๆ กัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันหมักมีลักษณะไม่แตกต่างกันกล่าวคือ เมื่อเริ่มต้นการหมักความชื้นเริ่มต้นของมันทุกขนาดมีค่า 60-61% หลังจากนั้นความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก ดังแสดงในรูป 3.6 และตารางภาคผนวก ง-7

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นสรุปได้ว่า ขนาดของมันที่เหมาะสมต่อการเพิ่มของโปรตีนมีค่า 3 มม. ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงเลือกใช้มันขนาด 3 มม. ในการศึกษาขั้นต่อไป

3.2.2 ผลการศึกษาความชื้นเริ่มต้นของมันหมักที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีน

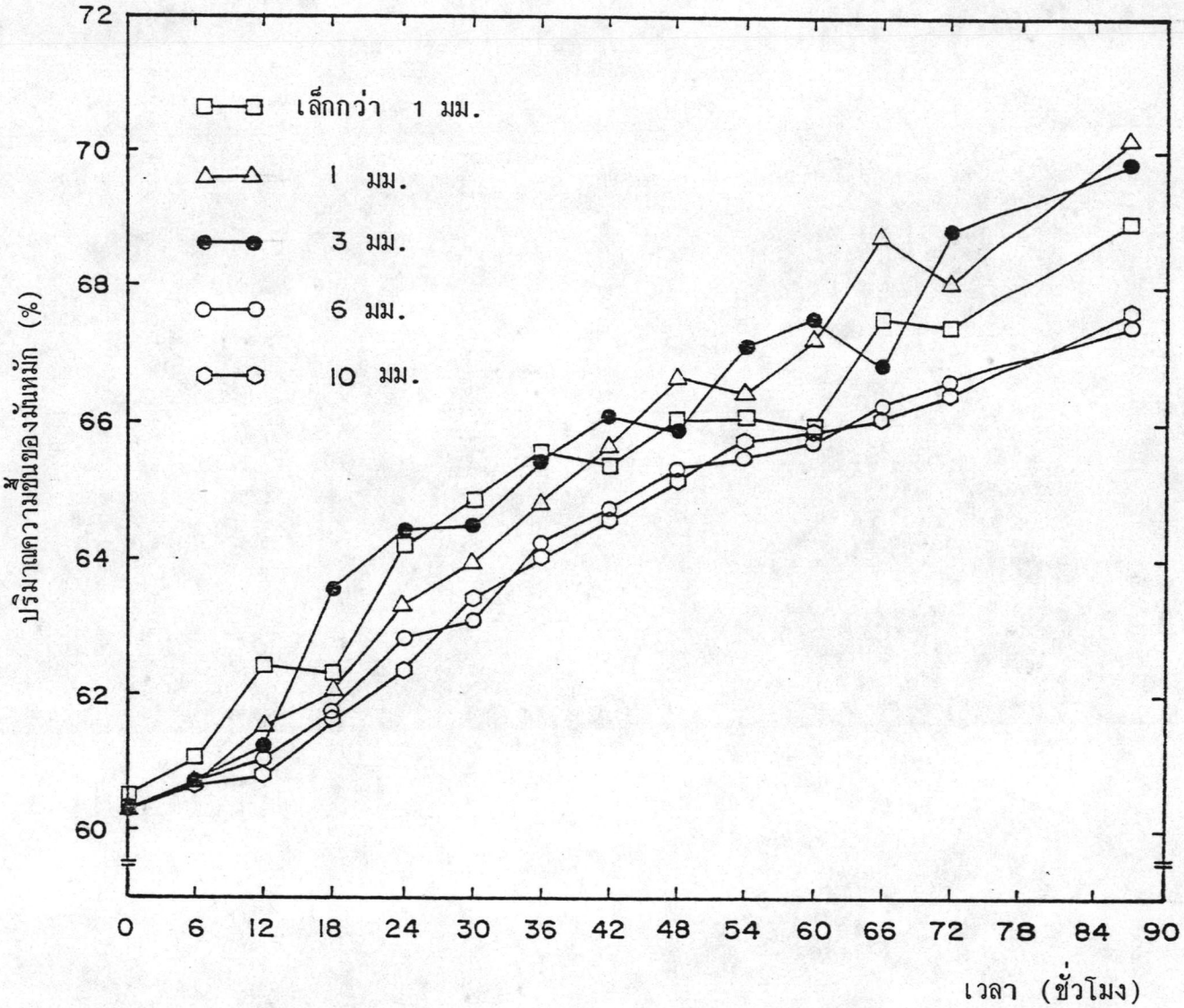
เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นจัดเป็นปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญของการหมักในอาหารแข็ง (Nagai, 1979) เพราะจะมีผลต่อการเจริญของรา รวมทั้งความพรุน (porosity) ภายในชั้นหมัก นอกจากนี้ในการหมักนี้ได้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศให้มีค่า 100% ซึ่งคาดว่าจะให้ผลดี (Stanton & Wallbridge, 1972) ดังนั้นเพื่อทราบถึงปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมัน จึงทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ 2.7.2.2 โดยหมักมันขนาด 3 มม. ซึ่งมีปริมาณสปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง โดยชั้นหมักสูง 15-20 มม. หมักที่อุณหภูมิ 37 °ซ และให้อากาศในอัตรา 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง แต่ผันแปรความชื้นเริ่มต้นของมันหมักตั้งแต่ 45-70% ผลการทดลองแยกออกได้ดังนี้

3.2.2.1 ปริมาณโปรตีนที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการหมัก

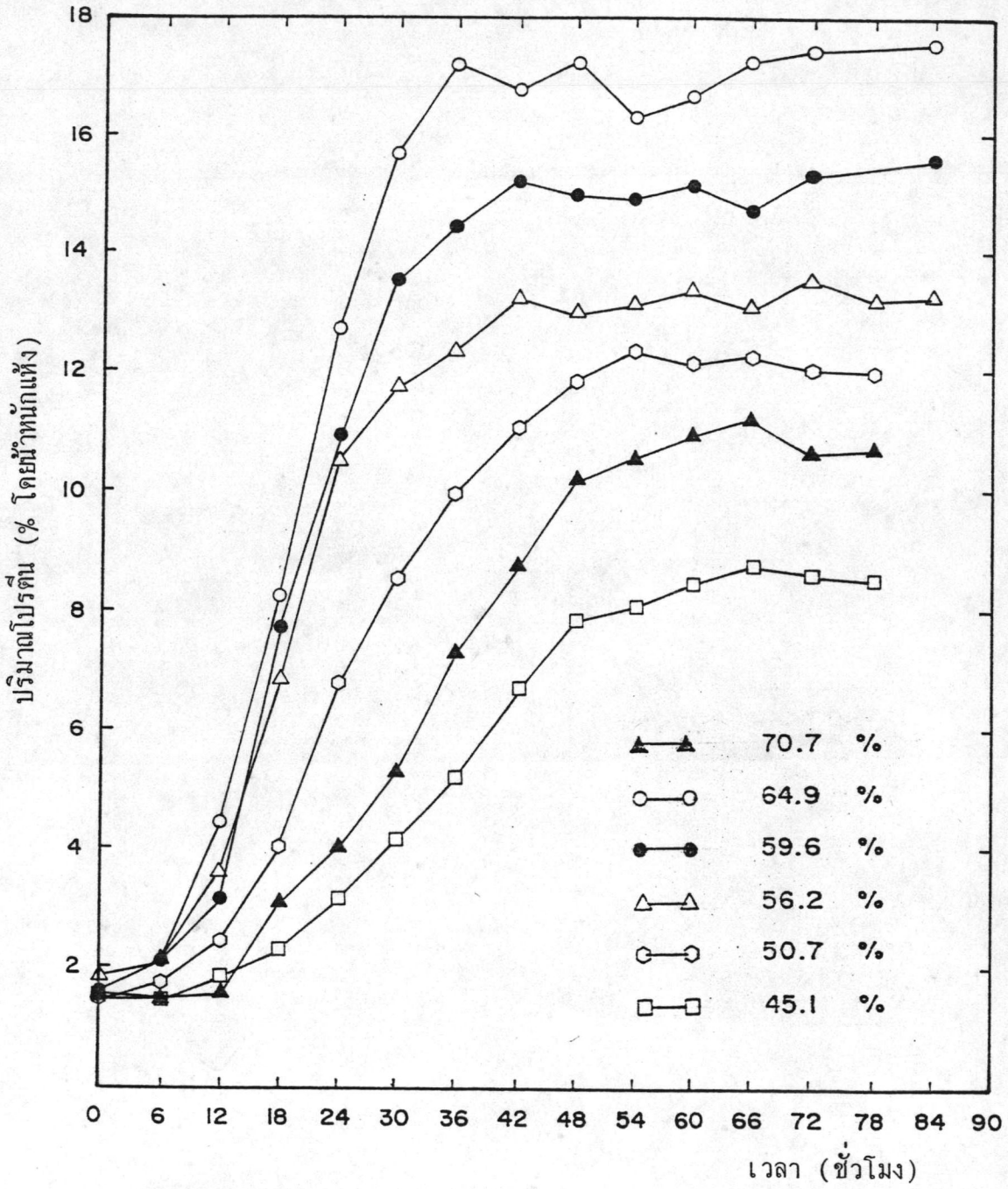
เมื่อใช้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 64.9% ปริมาณโปรตีนจะเพิ่มหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และได้โปรตีนสูงที่สุด (17.3% โดยน้ำหนักแห้ง) ในชั่วโมงที่ 36 ของการหมัก ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นที่สุด ส่วนการใช้ความชื้นเริ่มต้นในปริมาณที่สูงกว่าและต่ำกว่า 64.9% นั้น การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนมีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่อัตราการเพิ่มของโปรตีนและปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ได้จะมีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อความชื้นเริ่มต้นของมันหมักมีค่าต่ำกว่า 56.2% จะมีสปอร์เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูป 3.7 และตารางภาคผนวก ง-8

3.2.2.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก

พบว่าเมื่อใช้ค่าความชื้นเริ่มต้นในปริมาณ 64.9% ทำให้น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์มีอัตราการลดมากที่สุด โดยน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ลดหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และ



รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรขนาดของมันต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 60% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นของมันหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ

มีน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เหลืออยู่ 71.6% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น ที่ชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก เมื่อใช้ความชื้นเริ่มต้นสูงกว่าและต่ำกว่า 64.9% นั้น การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งมีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่อัตราการลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์มีค่าน้อยกว่าการใช้ความชื้นเริ่มต้นในปริมาณ 64.9% ดังแสดงในรูป 3.8 และตารางภาคผนวก ง-10

3.2.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้น

เมื่อใช้ค่าความชื้นเริ่มต้น 64.9% ปริมาณโปรตีนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และเพิ่มสูงสุดโดยใช้เวลาน้อยที่สุดในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก ซึ่งได้โปรตีน 0.12 กรัม/กรัมของมันแห้งเริ่มต้น หลังจากนั้นปริมาณโปรตีนมีค่าลดลง เมื่อความชื้นเริ่มต้นของมันหมักมีค่าสูงหรือต่ำกว่า 64.9% ปริมาณโปรตีนที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้ความชื้นเริ่มต้น 64.9% ผลการทดลองแสดงในรูป 3.9 และตารางภาคผนวก ง-11

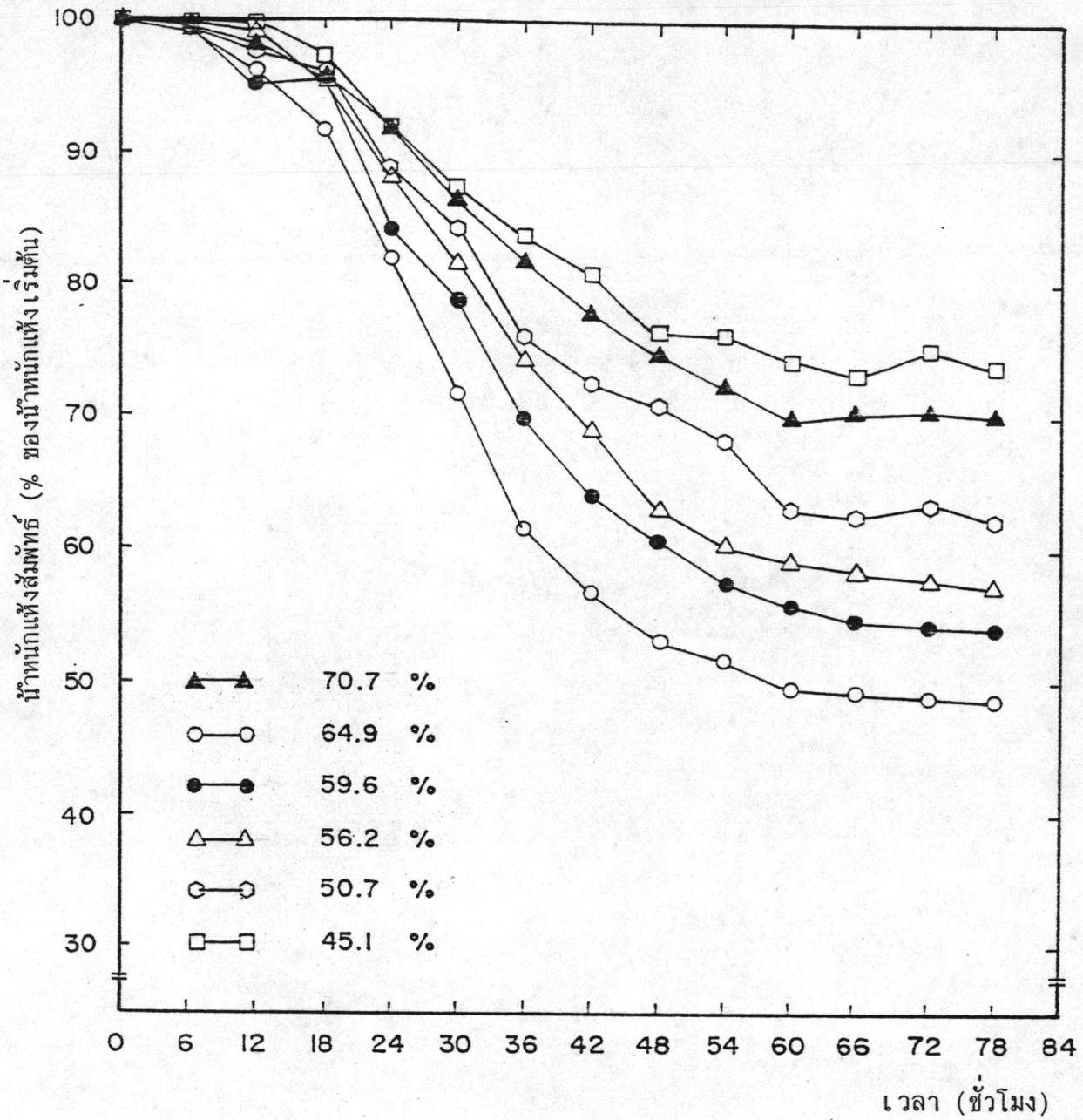
3.2.2.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก

พบว่าในทุก ๆ การทดลองที่ใช้ค่าความชื้นเริ่มต้นของมันหมักต่าง ๆ กัน ยกเว้นที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 45.1% ความชื้นของมันหมักมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก นอกจากนี้พบว่าความชื้นของมันหมักในแต่ละการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นไม่ทันกัน ถึงแม้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะมีค่าสูงถึง 100% ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และตารางภาคผนวก ง- 12

จากผลสรุปของการศึกษาดังกล่าว แสดงว่าความชื้นเริ่มต้นมีอิทธิพลต่อการหมักในอาหารแข็งที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็น 100% และความชื้นเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันมีค่าประมาณ 65% ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ความชื้นเริ่มต้น 65% ในการหมัก

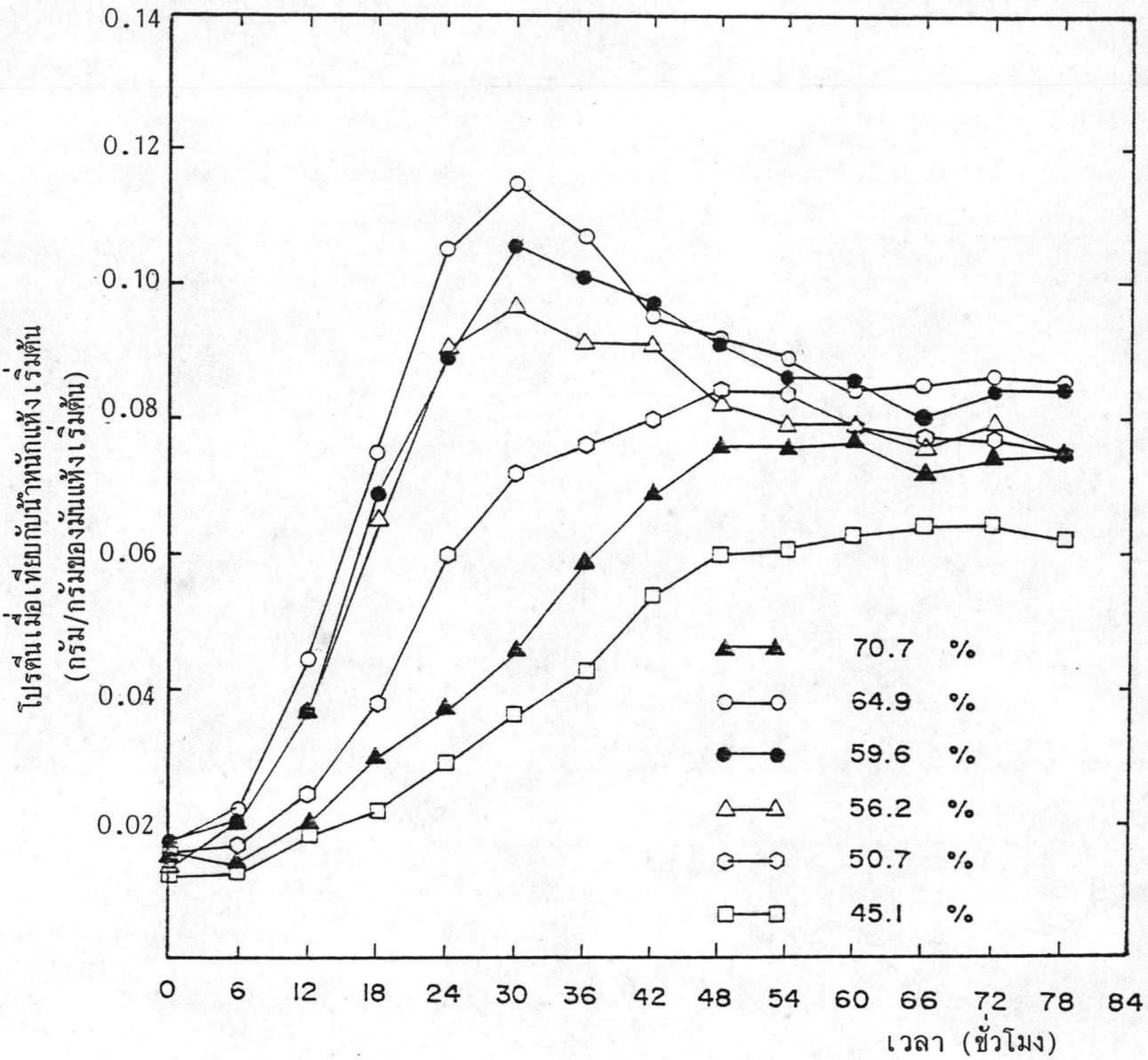
3.2.3 ผลการศึกษาความสูงของชั้นหมักที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมัน

เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่มีการกวนหรือพลิกกลับชั้นหมัก ดังนั้นการถ่ายเทมวลและความร้อนจะเกิดจากผลของการให้อากาศแก่ชั้นหมัก ประกอบการใช้ความสูงของชั้นหมักที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อน (Rathbun & Shuler, 1983) และเพื่อให้การถ่ายเทออกซิเจนให้แก่ราภายในชั้นหมักเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง ดังนั้นจึงทดลองหาค่าความสูงของชั้นหมักที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมัน โดยทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ 2.7.2.3 หมักมันขนาด 3 มม. ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้น 65% และ

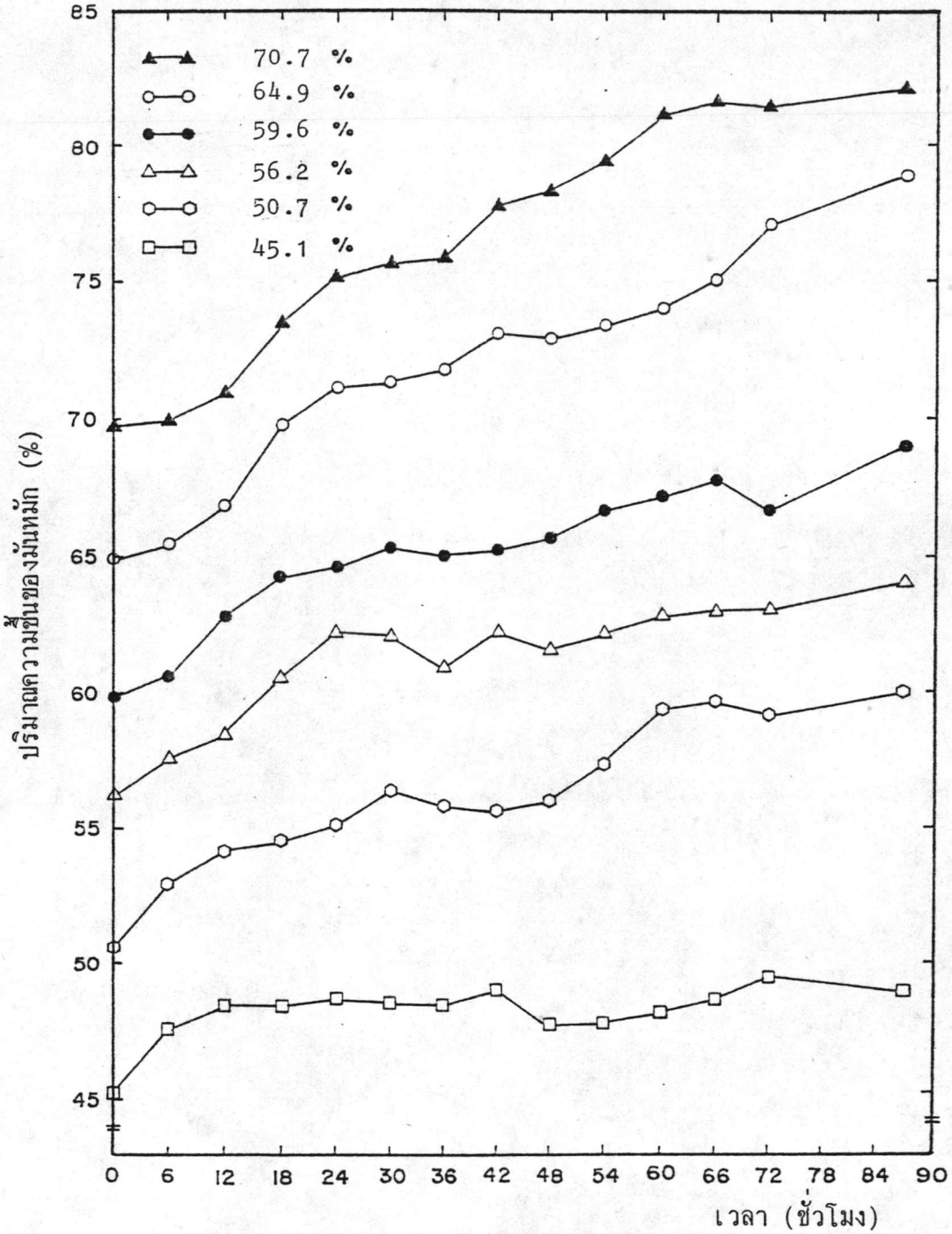


รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นของมันหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15–20 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นของมันหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความชื้นเริ่มต้นของมันหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ความสูงของชั้นหมัก 15–20 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก. มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ

มีปริมาณสปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง หมักที่ 37 °ซ และให้อากาศในอัตรา 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง แต่ใช้ความสูงของชั้นหมักต่าง ๆ กันดังนี้ 5, 15, 30 และ 50 มม. ผลการทดลองที่ศึกษาแยกออกได้ดังนี้คือ

3.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีนของมันหมักเมื่อความสูงของชั้นหมักมีค่า 5 และ 15 มม. มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยสามารถให้ปริมาณโปรตีนสูงสุดประมาณ 16% โดยน้ำหนักแห้ง ในชั่วโมงที่ 36 ของการหมัก ส่วนในการทดลองที่ความสูงของชั้นหมักมีค่ามากกว่า 15 มม. นั้นพบว่าอัตราการเพิ่มของโปรตีนและปริมาณโปรตีนที่ได้จะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 3.11 และตารางภาคผนวก ง-13

3.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก

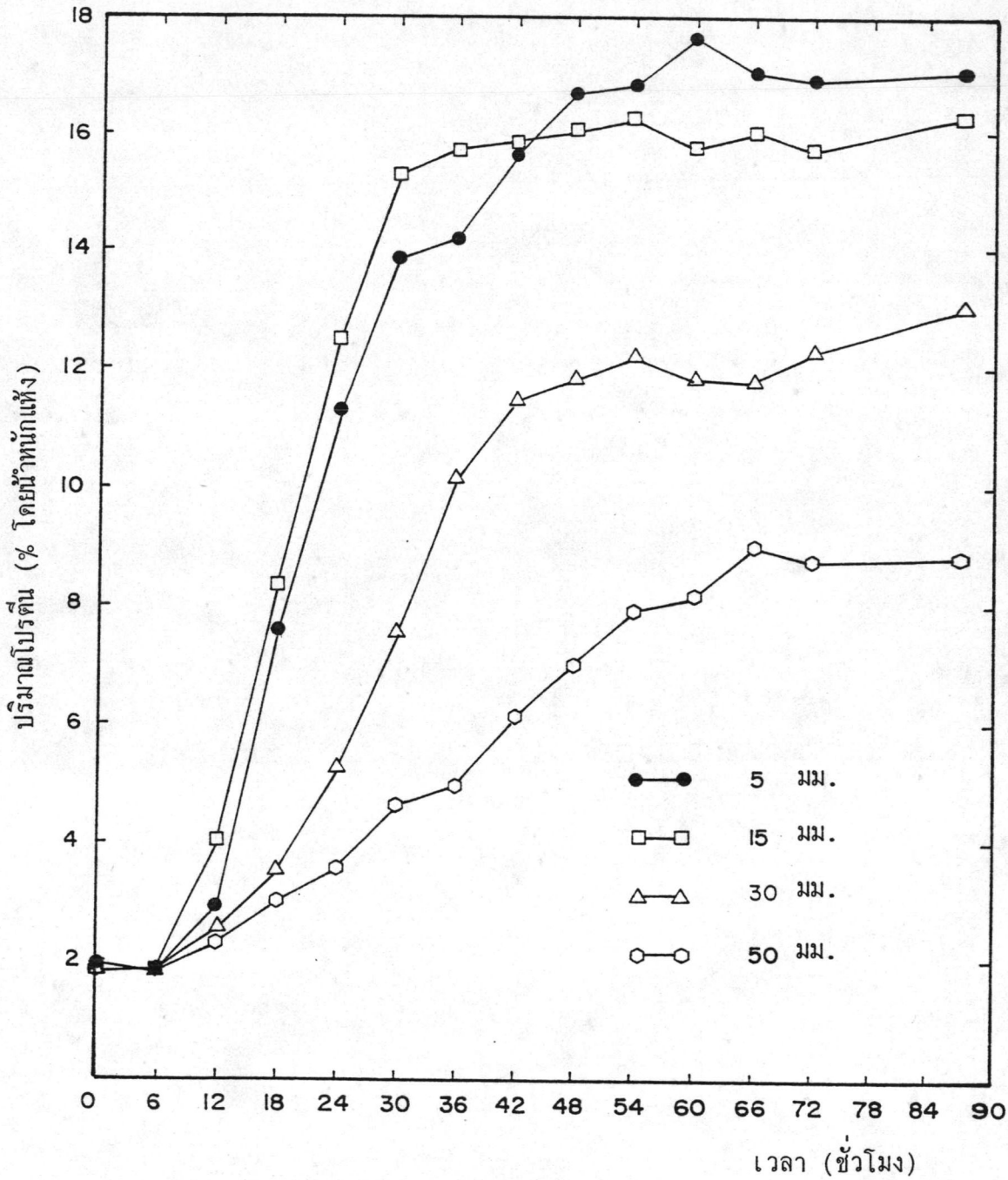
การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เมื่อความสูงของชั้นหมักมีค่าเท่ากับ 5 และ 15 มม. มีลักษณะไม่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เหลืออยู่ 68.2% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก สำหรับในการทดลองที่ชั้นหมักสูงกว่า 15 มม. นั้นพบว่าการลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เกิดน้อยลง ดังแสดงในรูป 3.12 และตารางภาคผนวก ง-15

3.2.3.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้น

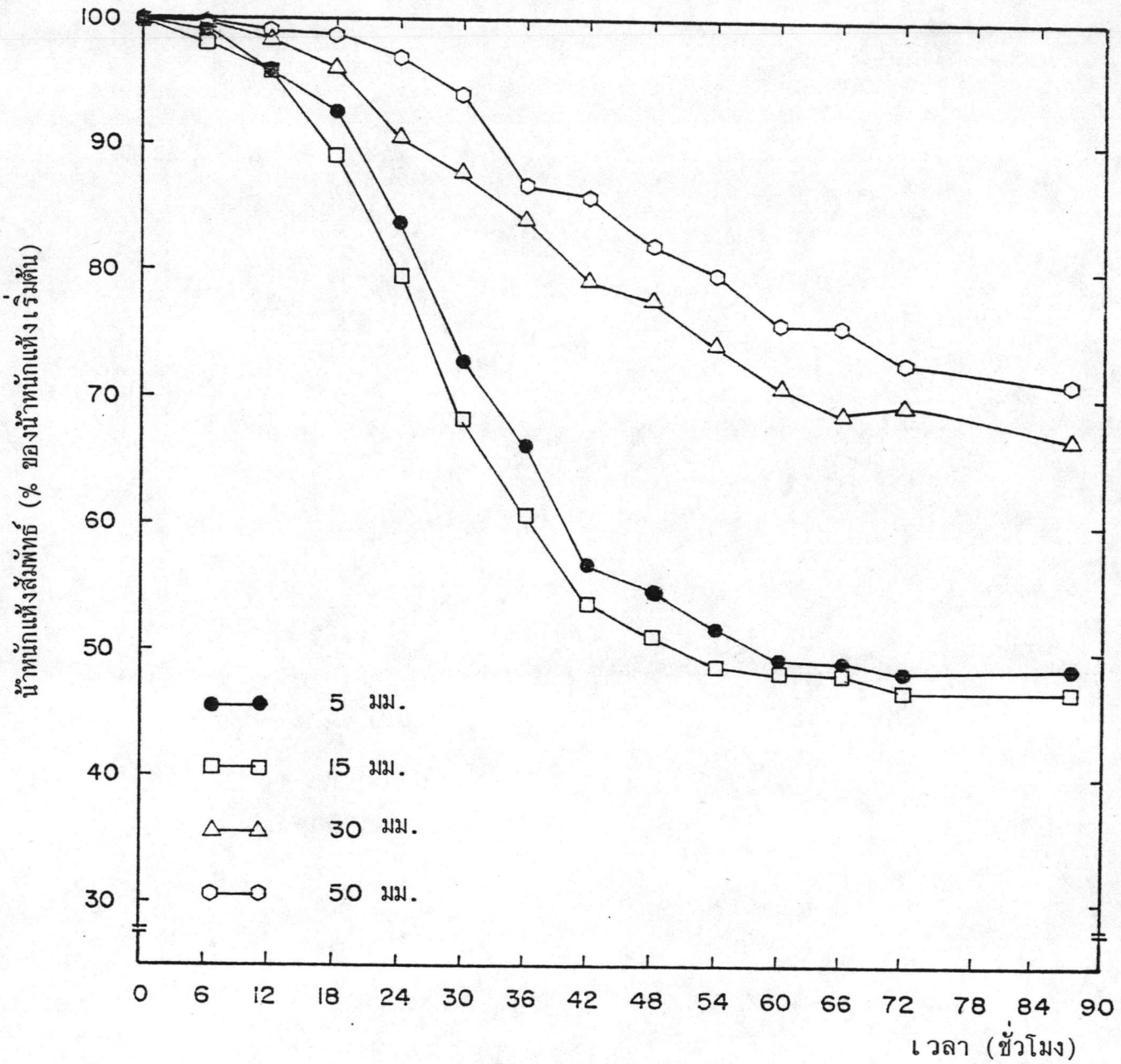
การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนดังกล่าวเมื่อความสูงของชั้นหมักมีค่า 5 และ 15 มม. มีลักษณะไม่แตกต่างกัน โดยปริมาณโปรตีนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และเข้าสู่ระดับสูงสุดพร้อมกันในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก โดยได้โปรตีนสูงสุด 0.104 กรัม/กรัมของมันแห้งเริ่มต้น หลังจากนั้นปริมาณโปรตีนมีค่าลดลง ส่วนในการทดลองที่ความสูงของชั้นหมักมีค่ามากกว่า 15 มม. นั้น พบว่าเมื่อความสูงของชั้นหมักมีค่ามากขึ้น อัตราการเพิ่มของโปรตีนและปริมาณโปรตีนที่ได้มีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 3.13 และตารางภาคผนวก ง-16

3.2.3.4 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของมันหมัก

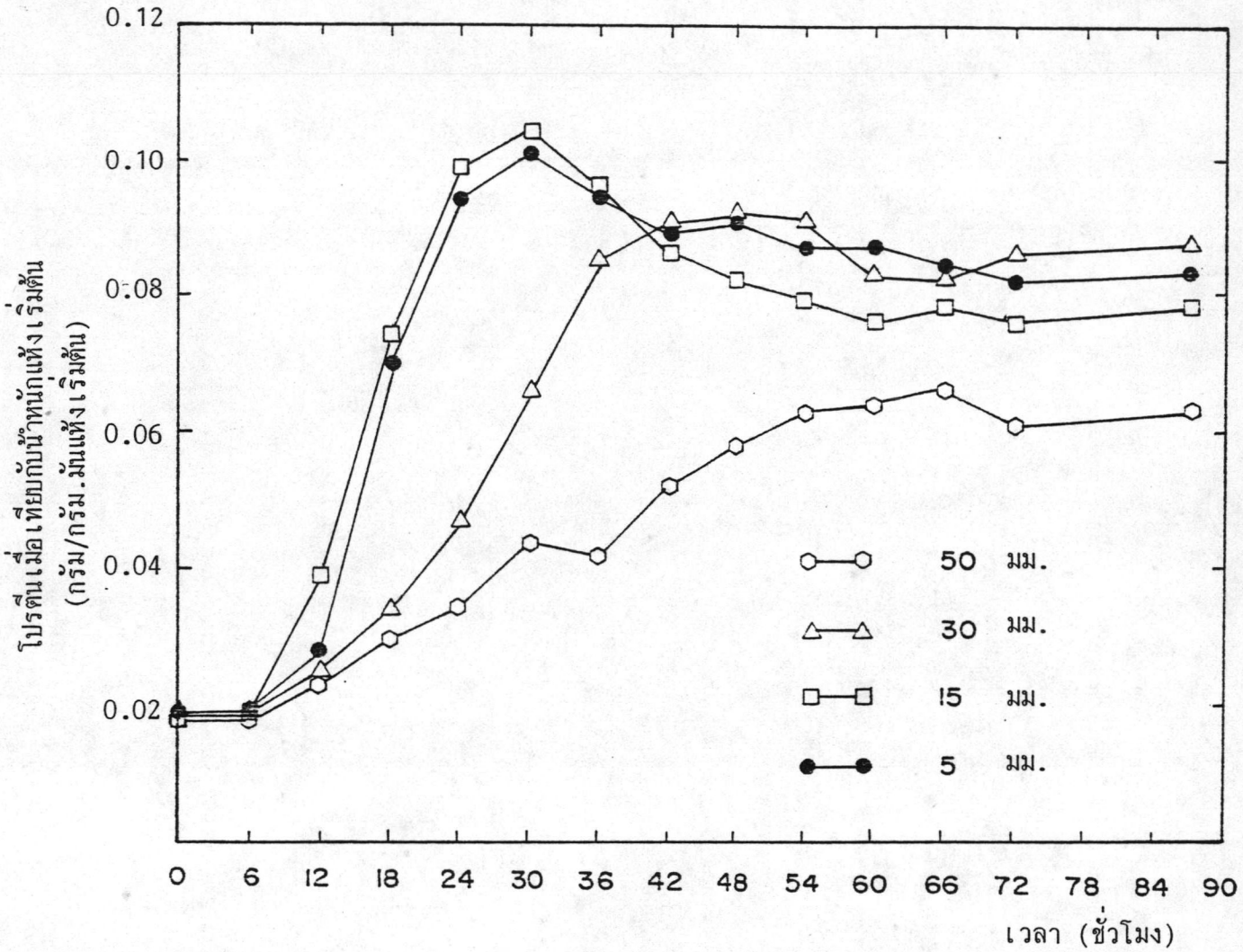
ผลการวิเคราะห์ความชื้นของมันหมักพบว่า ทุก ๆ การทดลองที่ใช้ความสูงของชั้นหมักต่าง ๆ กันนั้น เมื่อเริ่มต้นการหมัก ความชื้นเริ่มต้นมีค่าประมาณ 65% หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก แต่อย่างไรก็ตามพบว่า



รูปที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักมันแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัมมันแห้ง ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ

ความชื้นของมันหมักในการทดลองที่ความสูงของชั้นหมักมีค่า 5 และ 15 มม. มีแนวโน้มว่าจะมีการเพิ่มมากกว่าเมื่อความสูงของชั้นหมักมีค่า 30 และ 50 มม. ดังแสดงในรูป 3.14 และตารางภาคผนวก ง-17

จากผลสรุปของการทดลองพบว่า ความสูงของชั้นหมักที่เหมาะสมควรมีค่าไม่เกิน 15 มม. ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไปยังคงใช้ความสูงของในระดับนี้ในการหมัก

3.2.4 ผลการศึกษาปริมาณสปอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมัน

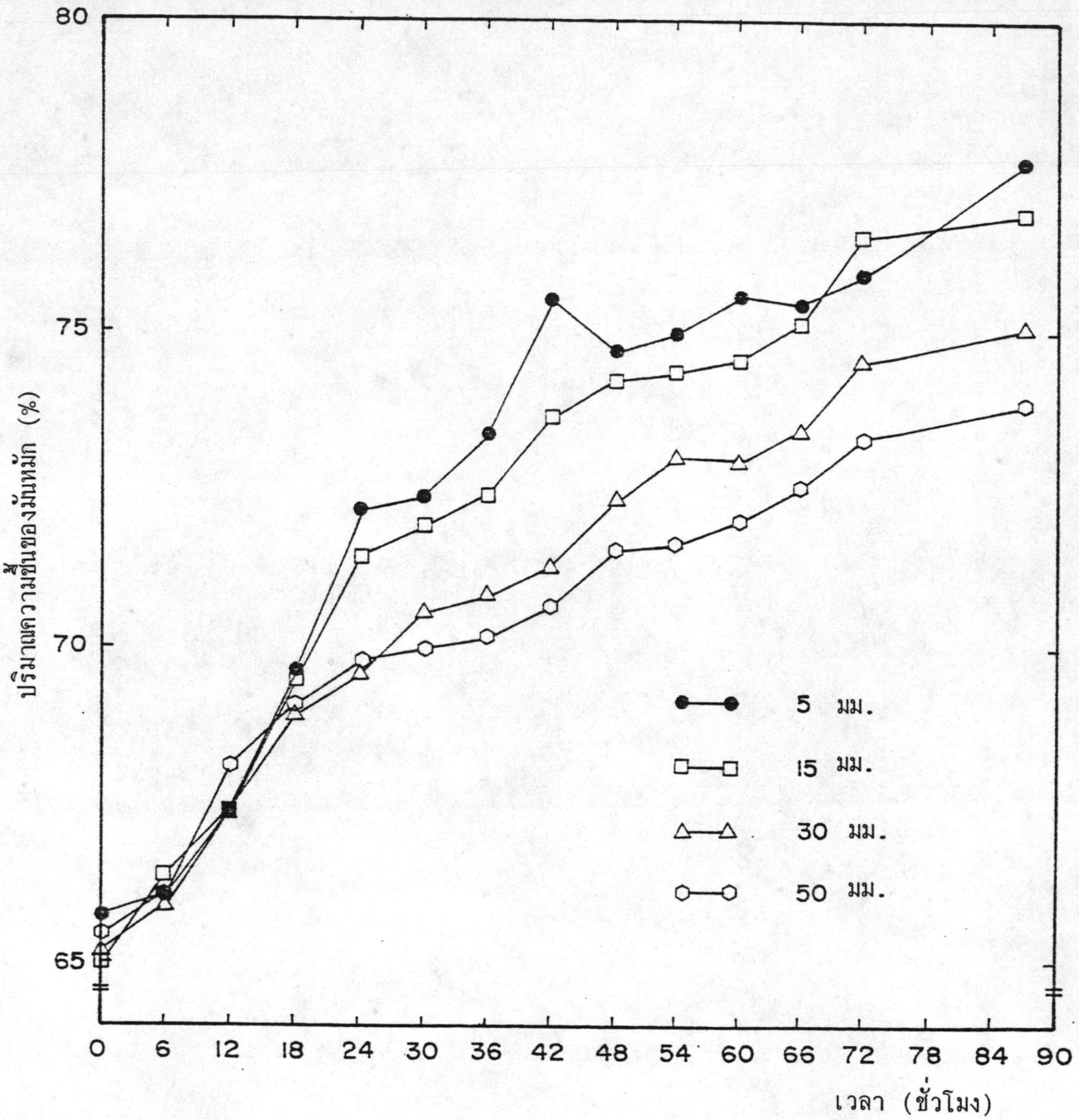
วิธีการหมักอาหารแข็งไม่สามารถทำได้ในสภาพปลอดเชื้ออย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงศึกษาถึงปริมาณสปอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมซึ่งทำให้การเจริญของราและการเพิ่มโปรตีนของมันเกิดขึ้นเร็ว เพื่อลดปัญหาจากจุลชีพปนเปื้อนและลดปริมาณสปอร์ที่จะใช้ โดยทำการทดลองตามวิธีในบทที่ 2 ข้อ 2.7.2.4 โดยหมักมันขนาด 3 มม. ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% และใช้ความสูงของชั้นหมัก 15 มม. หมักที่อุณหภูมิ 37 °ซ และให้อากาศในอัตรา 3.86×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง แต่ใช้ปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 2.5×10^3-2.5×10^7 สปอร์/กรัม มันแห้ง ผลการทดลองแยกได้ดังนี้

3.2.4.1 การเปลี่ยนแปลงโปรตีนของมันหมัก

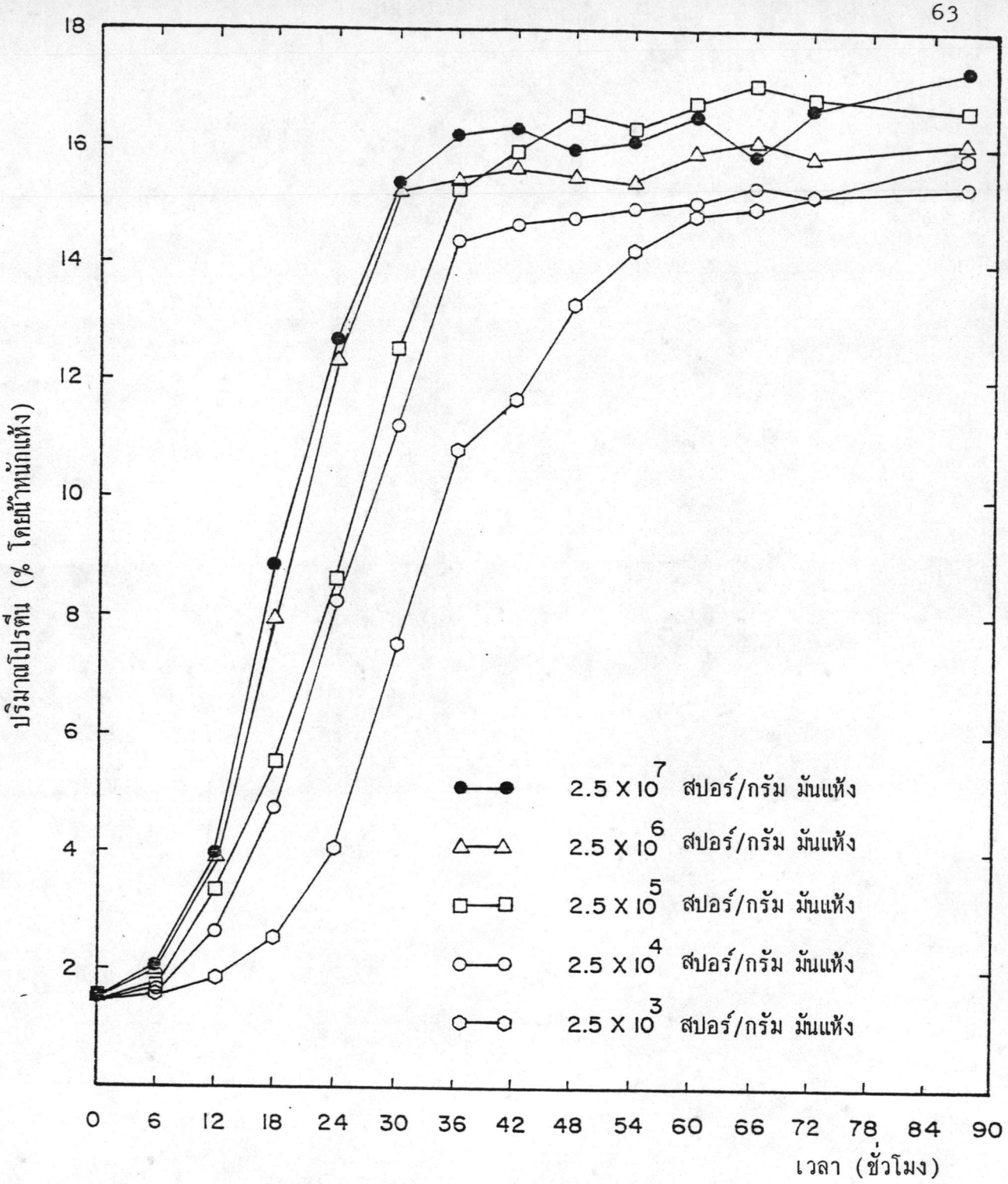
การเพิ่มของปริมาณโปรตีนของมันหมักเมื่อปริมาณสปอร์เริ่มต้นมีค่า 2.5×10^6 และ 2.5×10^7 สปอร์/กรัม มันแห้ง จะมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยได้โปรตีนสูงสุด 16% โดยน้ำหนักแห้ง ในชั่วโมงที่ 36 ของการหมัก สำหรับการทดลองที่ใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณต่ำกว่า 2.5×10^6 สปอร์/กรัม มันแห้ง การเพิ่มโปรตีนของมันเกิดช้ากว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และตารางภาคผนวก ง-18

3.2.4.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก

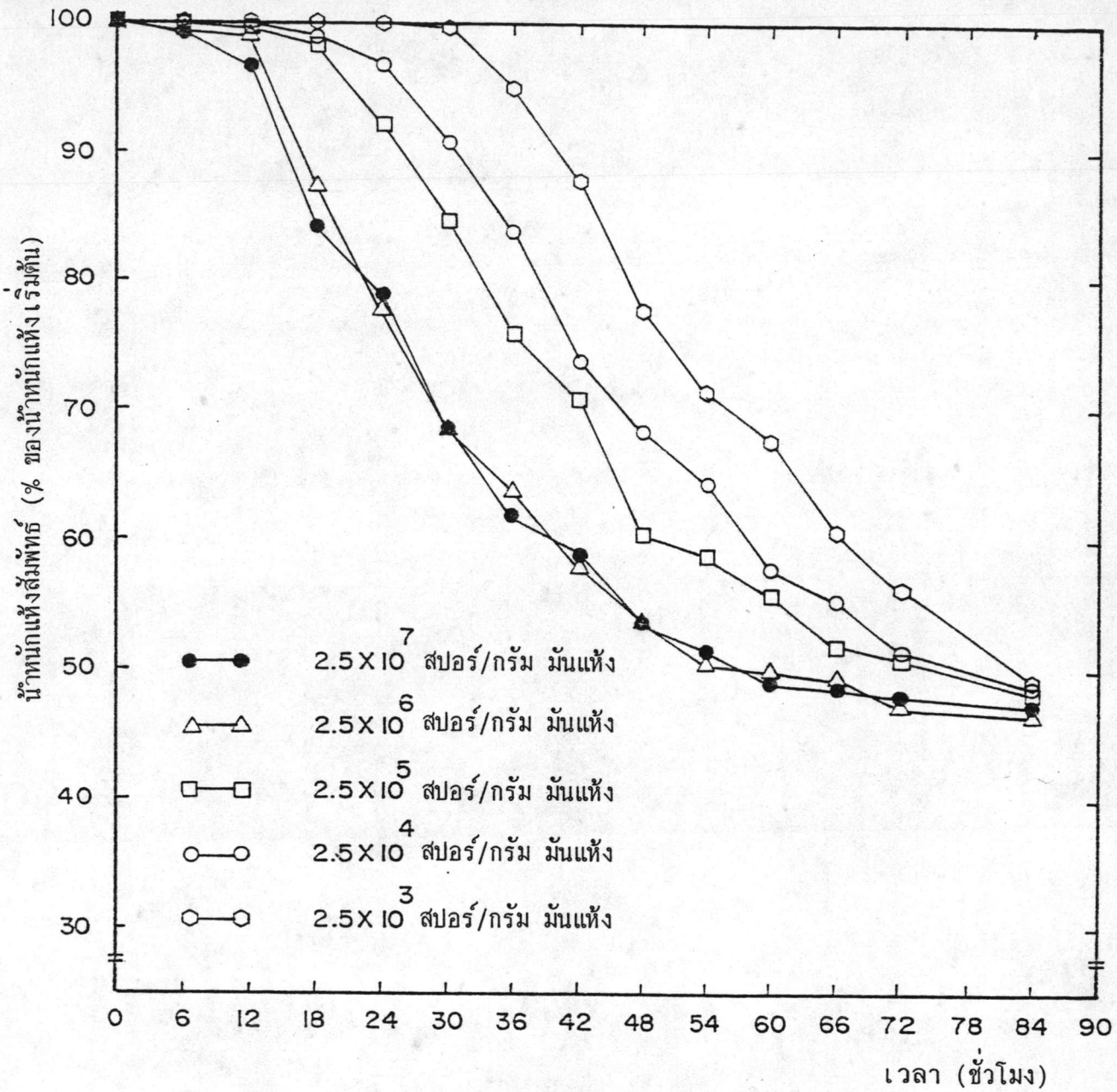
การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งเมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณสูง (2.5×10^6 และ 2.5×10^7 สปอร์/กรัม มันแห้ง) จะมีลักษณะใกล้เคียงกันและมีน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ 68.6% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้นที่ชั่วโมงที่ 30 เมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณต่ำ (2.5×10^5-2.5×10^3 สปอร์/กรัม มันแห้ง) ทำให้อัตราการลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์มีค่าน้อยลง ดังแสดงในรูป 3.16 และตารางภาคผนวก ง-20



รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรความสูงของชั้นหมักต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.15 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมัก 15 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.16 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมัก 15 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ

พอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักมันแห้งเริ่มต้น

การใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณสูง (2.5×10^{6} และ 2.5×10^{7} สปอร์/กรัม มันแห้ง) ทำให้การเพิ่มของโปรตีนใน 30 ชั่วโมงแรกของการหมักเกิดขึ้นเร็วกว่าเมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณต่ำ (2.5×10^{3}-2.5×10^{5} สปอร์/กรัม มันแห้ง) แต่การใช้สปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กันมีแนวโน้มว่าจะให้ปริมาณโปรตีนสูงสุดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูป 3.17 และตารางภาคผนวก ง-21

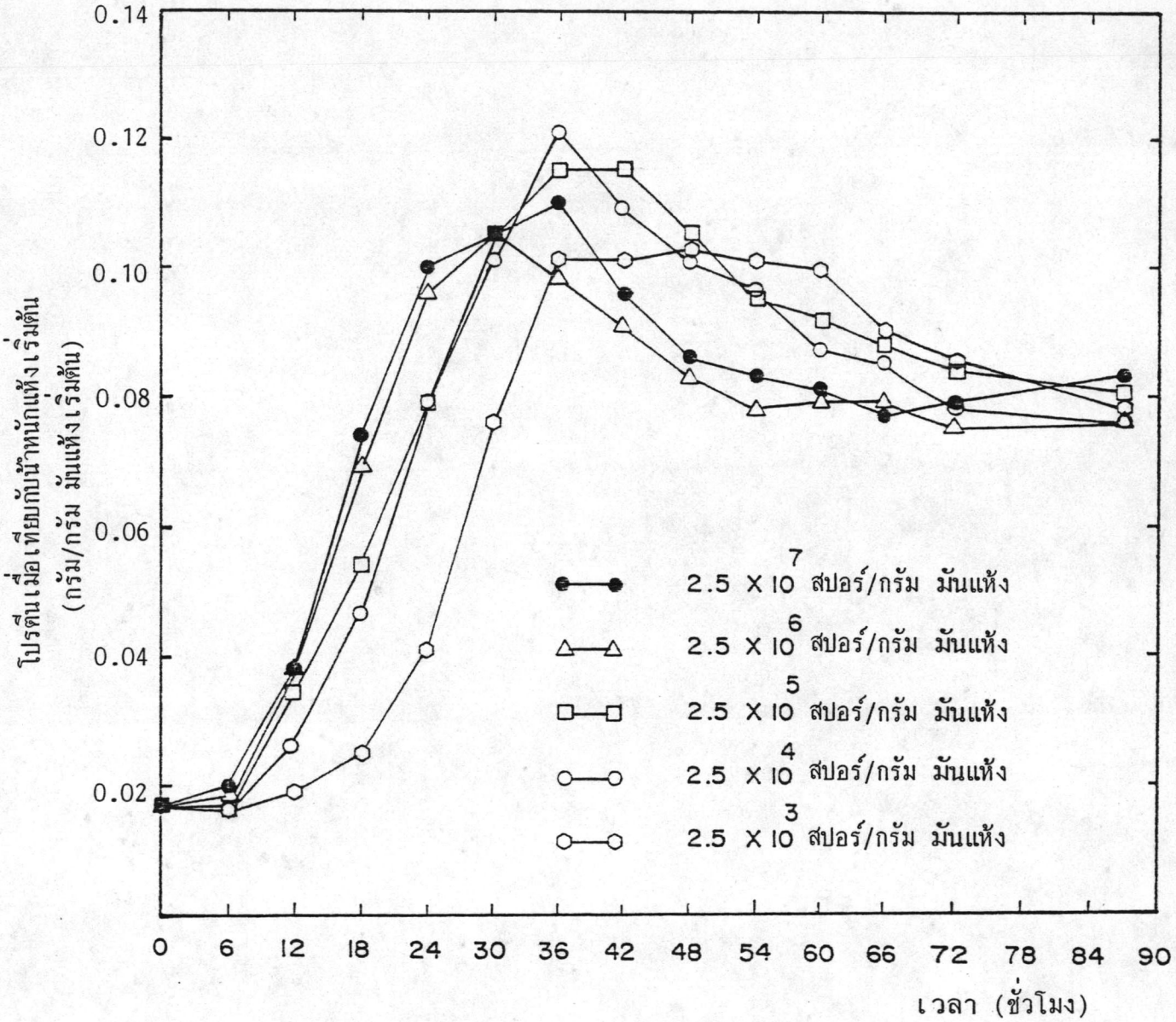
3.2.4.4 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของมันหมัก

ในทุกการทดลองที่ใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณต่าง ๆ กัน ทำให้ความชื้นของมันหมักซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้น 65% มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก และพบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันหมักมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากที่สุดเมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณสูง (2.5×10^{6}-2.5×10^{7} สปอร์/กรัม มันแห้ง) ดังแสดงในรูป 3.18 และตารางภาคผนวก ง-22

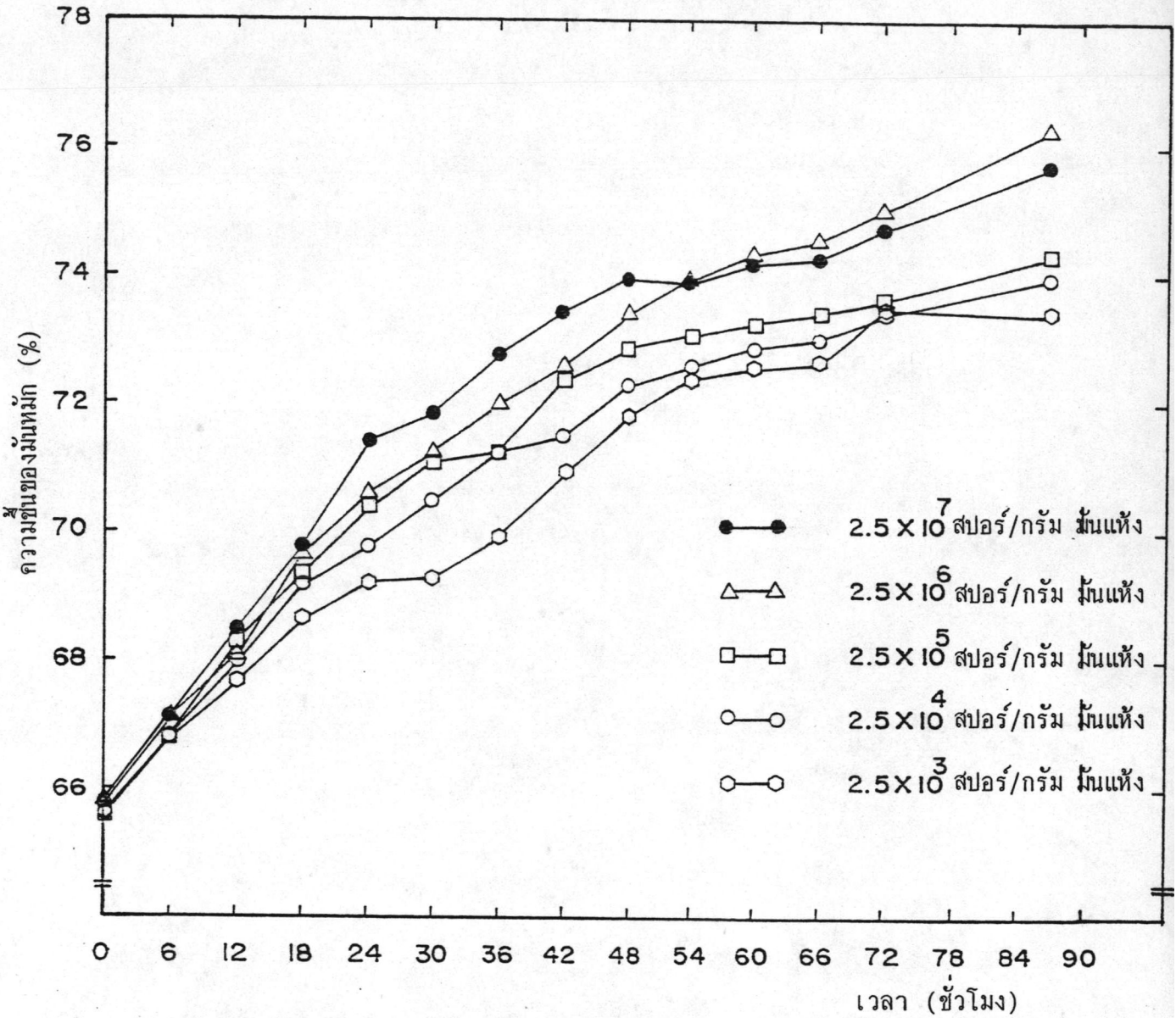
ผลการทดลองสรุปได้ว่าปริมาณสปอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมคือ 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง เพราะการใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณนี้จะให้โปรตีนสูงสุดที่เวลาเดียวกับเมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณสูงกว่า และเร็วกว่าเมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นในปริมาณต่ำกว่า ในขณะที่ปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ได้เมื่อใช้สปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กันมีแนวโน้มว่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน

3.3 ผลการศึกษาถึงอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมันในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้น เมื่อหมัก 1 ถาด

เนื่องจากการทดลองนี้ไม่มีการกวนหรือพลิกกลับชั้นหมัก มีแต่การให้อากาศและเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ไม่มีอุปกรณ์สำหรับถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการให้อากาศในอัตราที่เหมาะสมจึงมีอิทธิพลโดยตรงต่อการถ่ายเทมวลและความร้อน รวมทั้งการเจริญของรา เพื่อให้ทราบถึงอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมต่อการเพิ่มโปรตีนให้กับมัน จึงทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ 2.9.2.1 โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษาในกล่องหมักคือ ใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้น 65% ปริมาณสปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง ความสูงของชั้นหมักประมาณ 15 มม. แต่ให้อากาศในอัตราต่าง ๆ กันคือ 0.15×10^{-4}, 0.31×10^{-4}, 0.76×10^{-4}, 1.53×10^{-4} และ 3.83×10^{-4} m^3/วินาที/กก.มันแห้ง ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมัก 15 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ



รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของมันหมัก เมื่อผันแปรปริมาณสปอร์เริ่มต้นต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในกล่องหมัก โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมัก 15 มม. ปริมาณการไหลของอากาศ 3.86×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง และอุณหภูมิ 37 °ซ

3.3.1 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีนของมันหมัก

การให้อากาศในอัตรา 0.76×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง สามารถเพิ่มโปรตีนให้กับมันหมักได้สูงที่สุด (16.9%) ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก เมื่อเทียบกับการให้อากาศในอัตราอื่น ๆ ส่วนการให้อากาศในอัตราที่สูงกว่านี้ปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ได้ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมักมีแนวโน้มว่าจะลดลง ในขณะที่การให้อากาศในอัตราที่ต่ำกว่านี้จะให้โปรตีนสูงสุดหลังชั่วโมงที่ 30 และปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ได้มีแนวโน้มว่าจะลดลงเช่นกัน ดังแสดงในรูป 3.19 และตารางภาคผนวก ง-23

3.3.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก

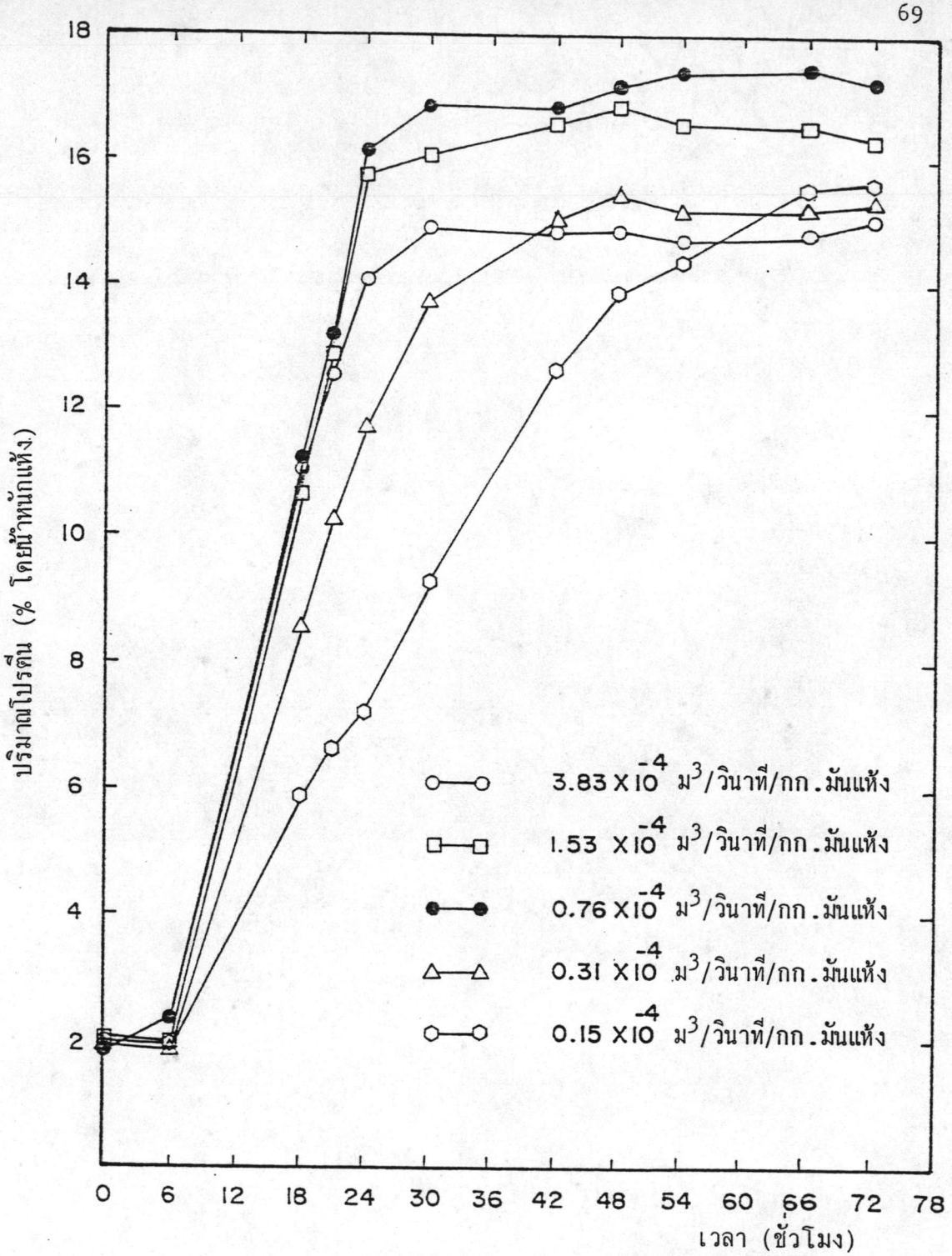
การให้อากาศในอัตรา 0.76×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง ทำให้การลดของน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เกิดขึ้นมากกว่าการให้อากาศในอัตราอื่น ๆ โดยปริมาณน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์มีค่าลดลงหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และมีน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ 72.0% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้นในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก ดังแสดงในรูป 3.20 และตารางภาคผนวก ง-25

3.3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้น

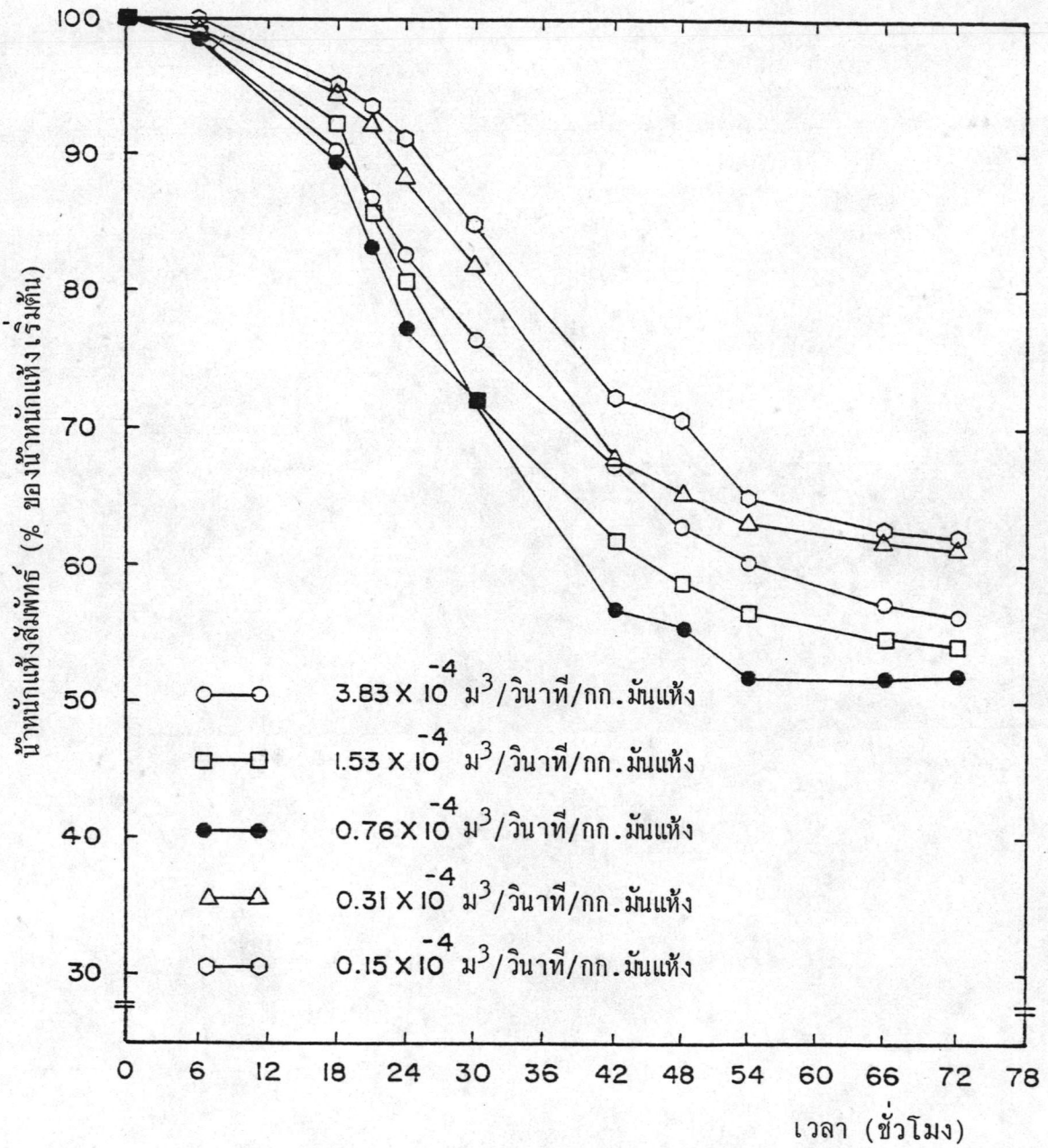
การให้อากาศในอัตรา 1.53×10^{-4} และ 0.76×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง สามารถให้ปริมาณโปรตีนสูงสุด เร็วกว่าการให้อากาศในอัตราอื่น ๆ คือในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก และในขณะเดียวกันปริมาณโปรตีนที่ได้มีค่าสูงกว่าการให้อากาศในอัตราอื่นเช่นกัน โดยปริมาณโปรตีนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.127 และ 0.124 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น ตามลำดับ ดังนั้นอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมคือ 0.76×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง เพราะเป็นอัตราการให้อากาศที่ต่ำพอที่สามารถจะให้ปริมาณโปรตีนสูงที่สุด โดยใช้เวลาสั้นที่สุด ผลการทดลองแสดงในรูป 3.21 และตารางภาคผนวก ง-26

3.3.4 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

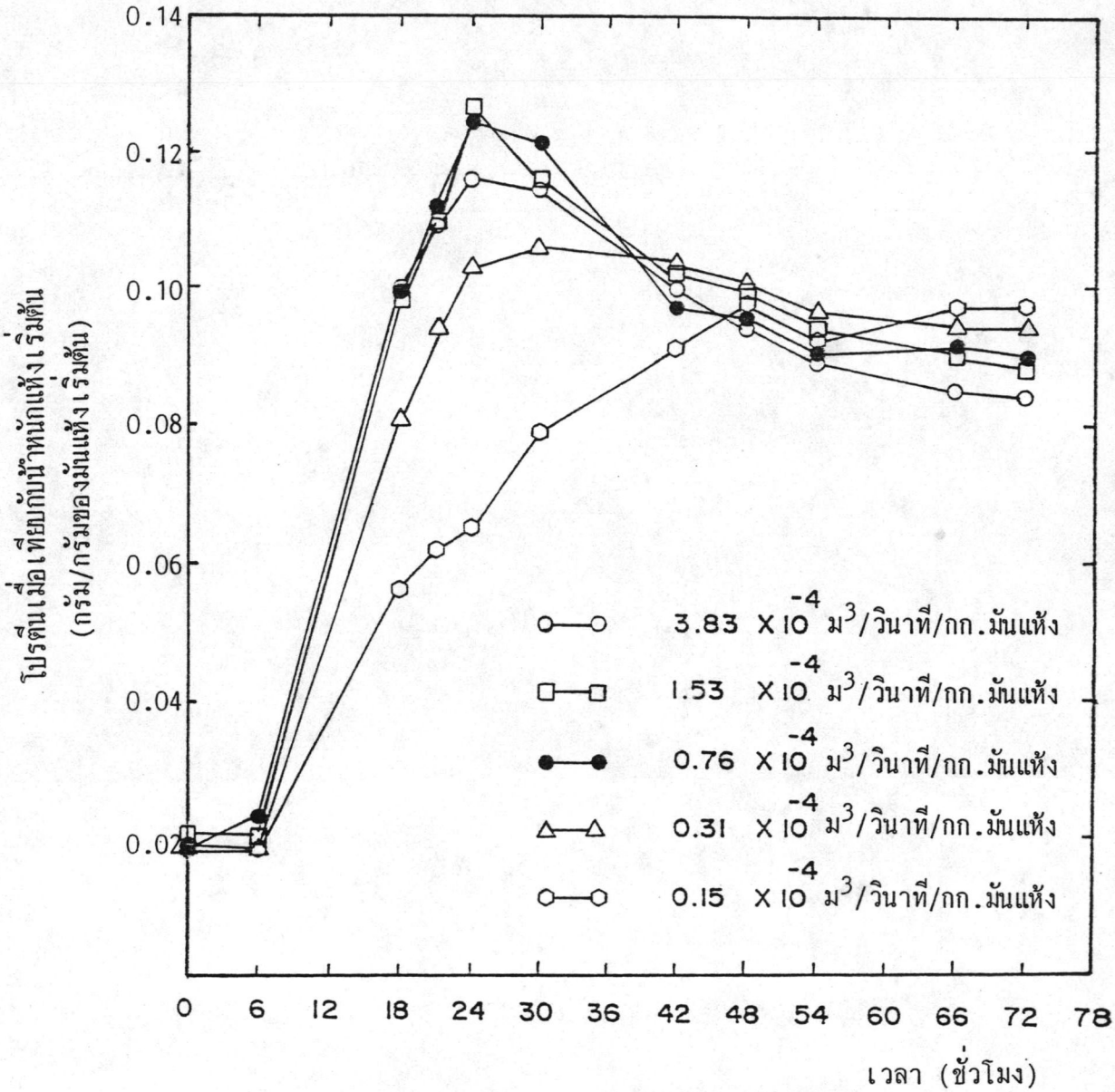
การให้อากาศในอัตรา 0.76×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง ทำให้ได้อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการให้อากาศในอัตราอื่น ๆ โดยได้อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดคือ 3.83×10^{-7} กก./วินาที/กก.มันแห้ง ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก ดังแสดงในรูป 3.22 และตารางภาคผนวก ง-27



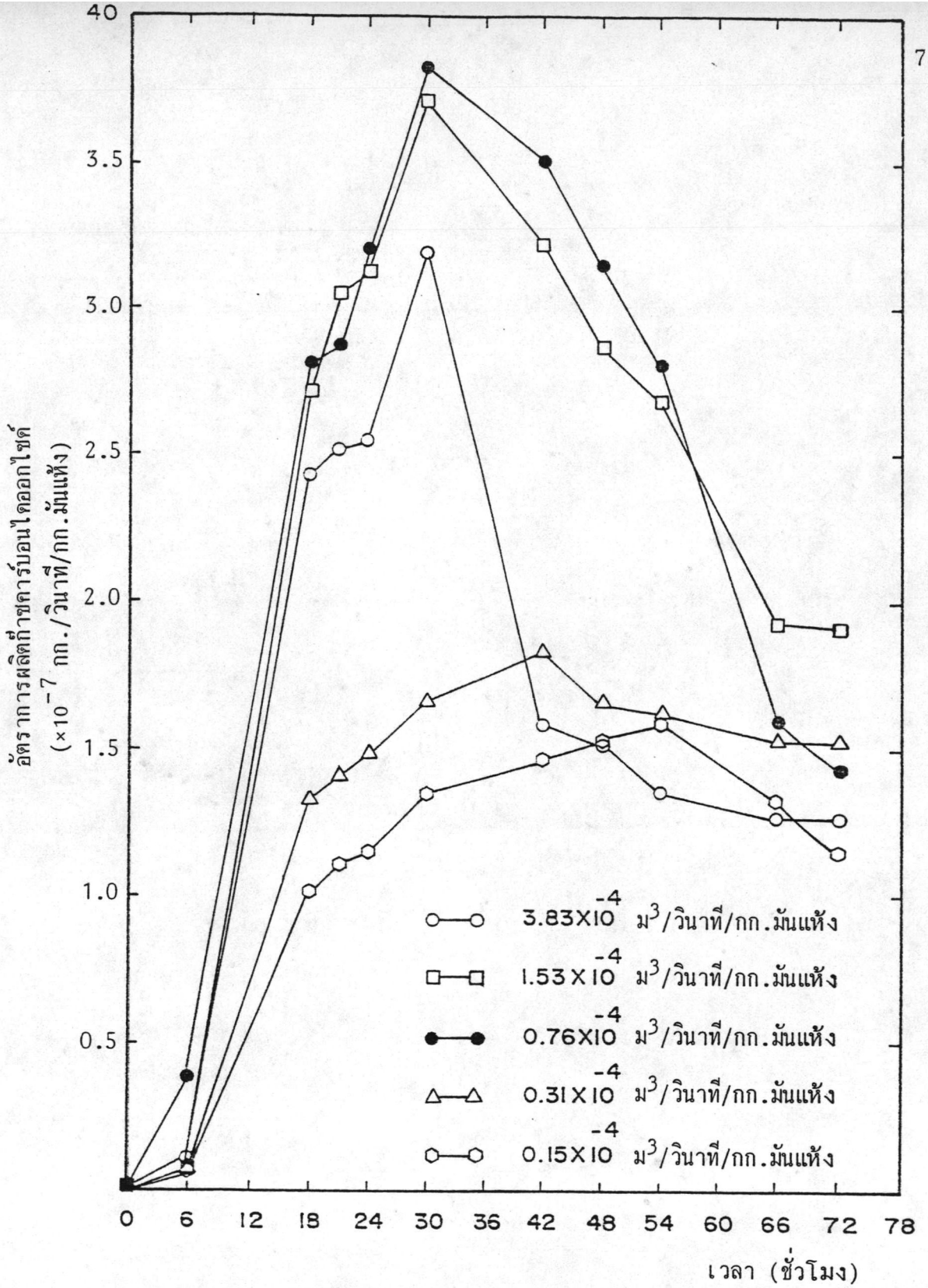
รูปที่ 3.19 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน (% โดยน้ำหนักแห้ง) ของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน เมื่อใช้ถาดหมัก 1 ถาด โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ



รูปที่ 3.20 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน เมื่อใช้ถาดหมัก 1 ถาด โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^6 สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ



รูปที่ 3.21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน เมื่อใช้ถาดหมัก 1 ถาด โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^6 สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ



รูปที่ 3.22 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยหมัก 1 ถาด ใช้มันขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ

3.3.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันหมัก

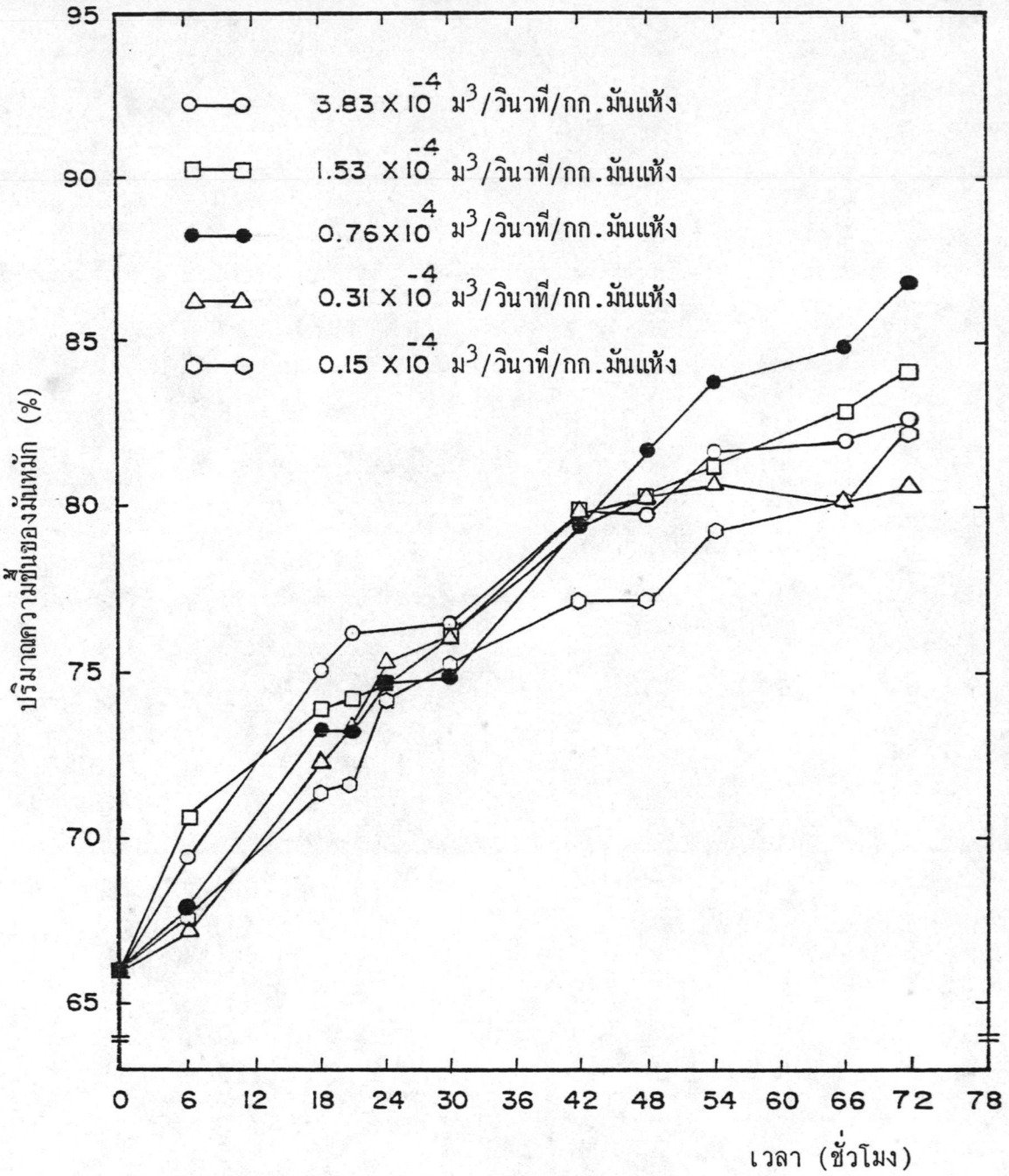
การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของมันหมักพบว่าในทุก ๆ การทดลองที่ให้อากาศในอัตราต่าง ๆ กัน มีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือในชั่วโมงแรกของการหมักนั้น มันหมักมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% หลังจากนั้นความชื้นของมันหมักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก ดังแสดงในรูป 3.23 และตารางภาคผนวก ง-28

3.3.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในการถ่ายเทมวล

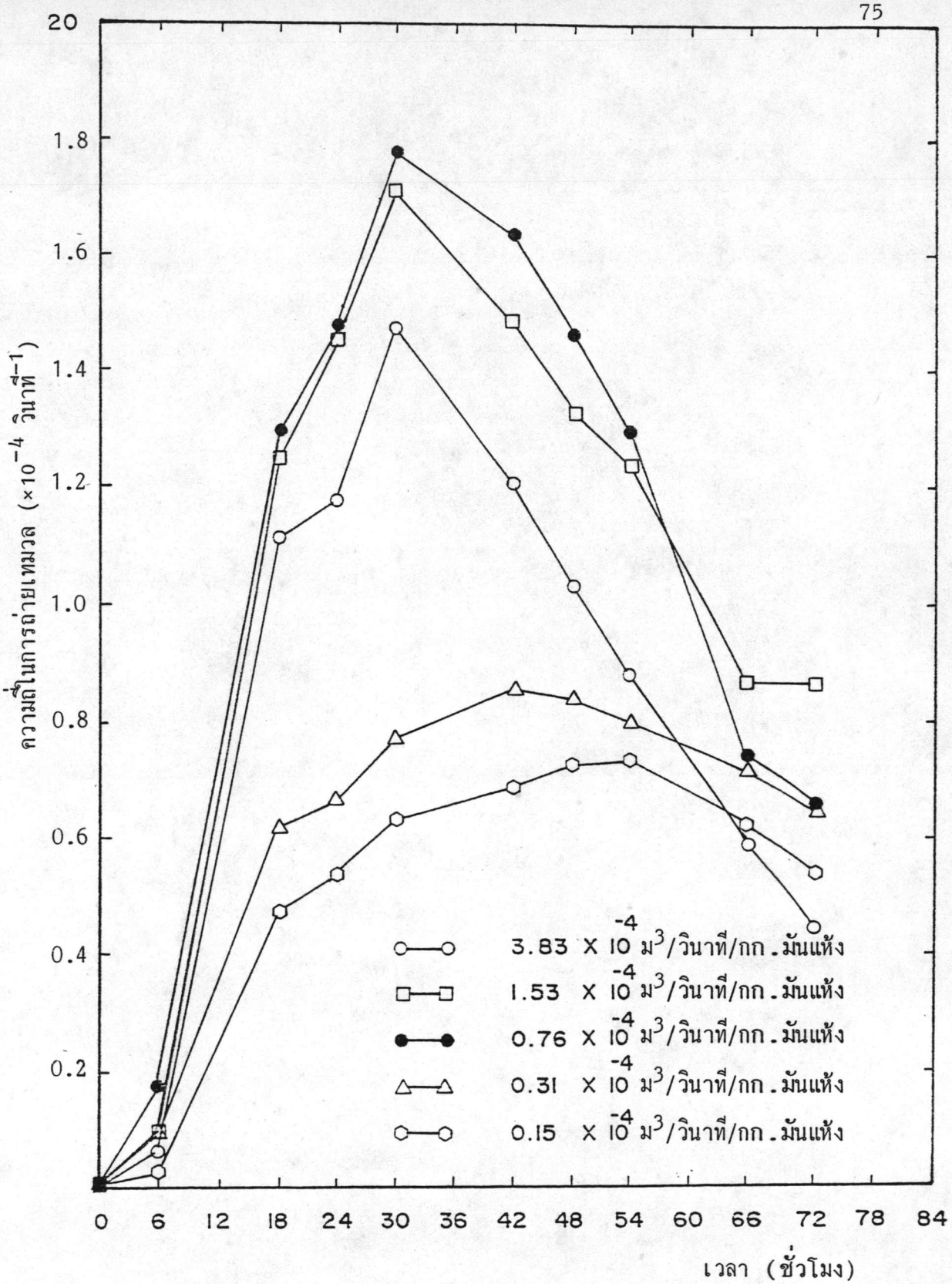
ในทุกการทดลองที่ให้อากาศในอัตราต่าง ๆ กัน ความถี่ในการถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาในช่วงแรกของการหมัก และจะเพิ่มสูงสุด หลังจากนั้นจะลดลงตลอดเวลา โดยในการทดลองที่มีการให้อากาศในอัตรา 0.76×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง จะให้ค่าความถี่ในการถ่ายเทมวลสูงสุดคือ 1.78×10^{-4} หน่วย/วินาที ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก เมื่อให้อากาศในอัตราที่สูงกว่า 0.76×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ค่าความถี่ในการถ่ายเทมวลสูงสุดที่ได้ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมักมีค่าลดลง ส่วนการทดลองที่ให้อากาศในอัตราที่ต่ำกว่า 0.76×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง จะให้ค่าความถี่ในการถ่ายเทมวลสูงสุดหลังชั่วโมงที่ 30 และค่าความถี่ในการถ่ายมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 3.24 และตารางภาคผนวก ง-29

3.4 ผลการศึกษาการเพิ่มโปรตีนให้กับมันในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นเมื่อหมัก 3 ถาดซ้อนกัน

จากการศึกษาถึงปัจจัยทางกายภาพที่เหมาะสมในกล่องหมัก และอัตราการให้อากาศที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ จึงนำผลการศึกษาดังกล่าวมาใช้ในการทดลองนี้ต่อไป เพื่อศึกษาถึงสภาพปัญหาต่าง ๆ ซึ่งอาจจะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นี้ต่อไป ทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 2 ข้อ2.9.2.2โดยหมักมันขนาด 3 มม. ซึ่งมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% ปริมาณสปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง และใช้ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ทำการหมักที่อุณหภูมิ 37 °ซ โดยหมัก 3 ถาด แต่ให้อากาศในอัตรา 0.79×10^{-4} และ 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง



รูปที่ 3.23 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมันหมัก เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยหมัก 1 ถาด ใช้มันขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ



รูปที่ 3.24 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในการถ่ายเทมวล เมื่อใช้ปริมาณการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน หมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยหมัก 1 ถาด ใช้มันเส้นขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^6 สปอร์/กรัมมันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ

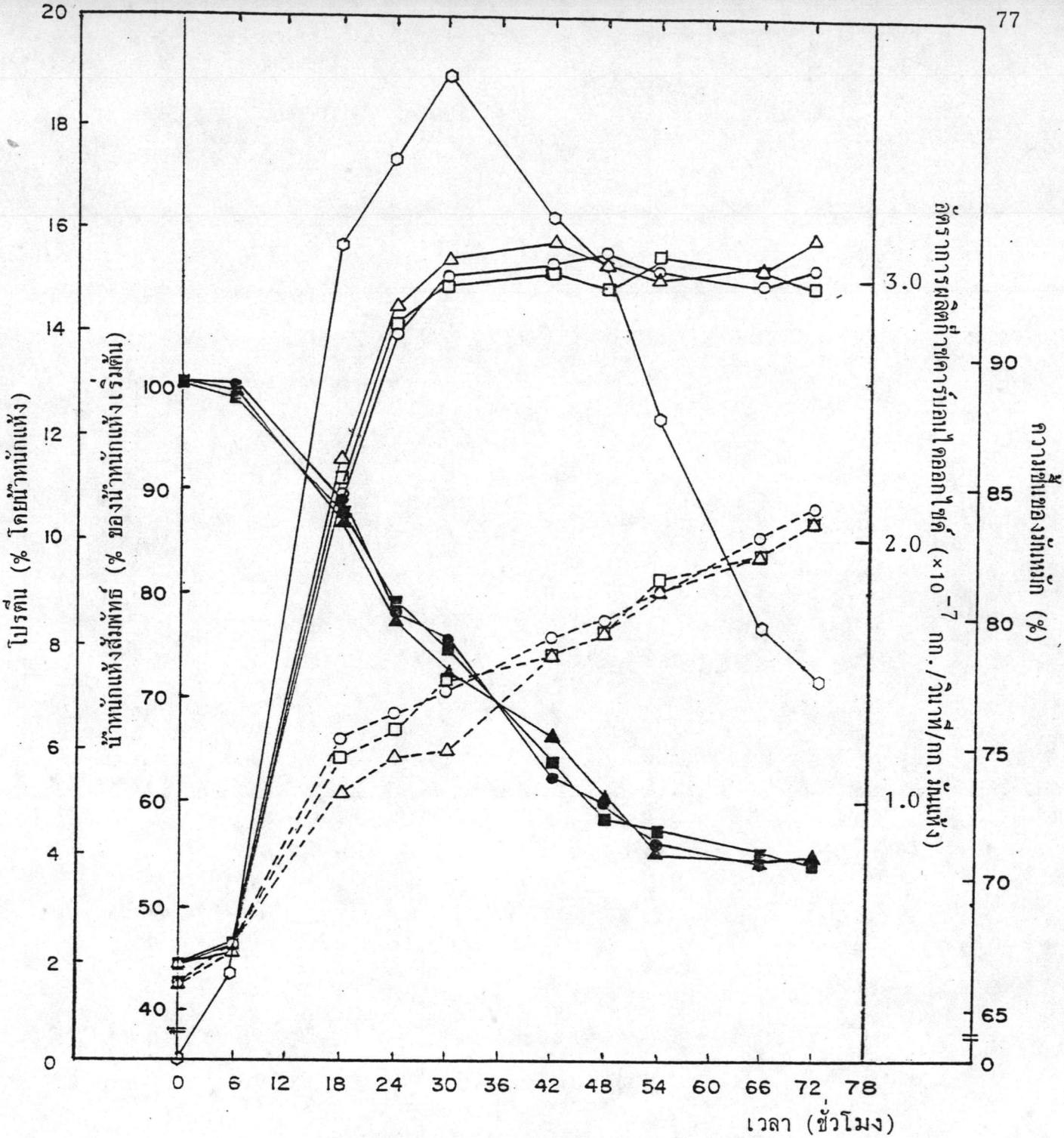
3.4.1 ผลการหมักในถาดหมัก 3 ถาด เมื่อให้อากาศในอัตรา 0.79×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง

ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ และปริมาณความชื้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยปริมาณโปรตีนของมันหมักทั้ง 3 ถาด จะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และมีค่าสูงสุดพร้อมกันที่ชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก โดยปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ได้มีค่า 15.1% โดยน้ำหนักแห้ง (ค่าเฉลี่ย) ส่วนปริมาณน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีค่าลดลงหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และมีน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์เหลืออยู่ประมาณ 74.2% ที่ชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก หลังจากนั้นจึงมีค่าคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 54 ของการหมัก เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการหมักพบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาในช่วงแรกของการหมัก และได้ค่าอัตราการผลิตก๊าซ-คาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 3.79×10^{-7} กก./วินาที/กก.มันแห้ง ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก หลังจากนั้นค่าที่ได้ลดลง ส่วนปริมาณความชื้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก ผลการทดลองข้างต้นแสดงในรูป 3.25 และตารางภาคผนวก ง-30, ง-32, ง-33 และ ง-34

ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด จะมีลักษณะไม่แตกต่างกัน โดยพบว่าปริมาณโปรตีนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 และมีค่าสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก โดยปริมาณโปรตีนสูงสุดของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.11 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น (ค่าเฉลี่ยจาก 3 ถาด) หลังจากนั้นปริมาณโปรตีนดังกล่าวจะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 3.26 และตารางภาคผนวก ง-35

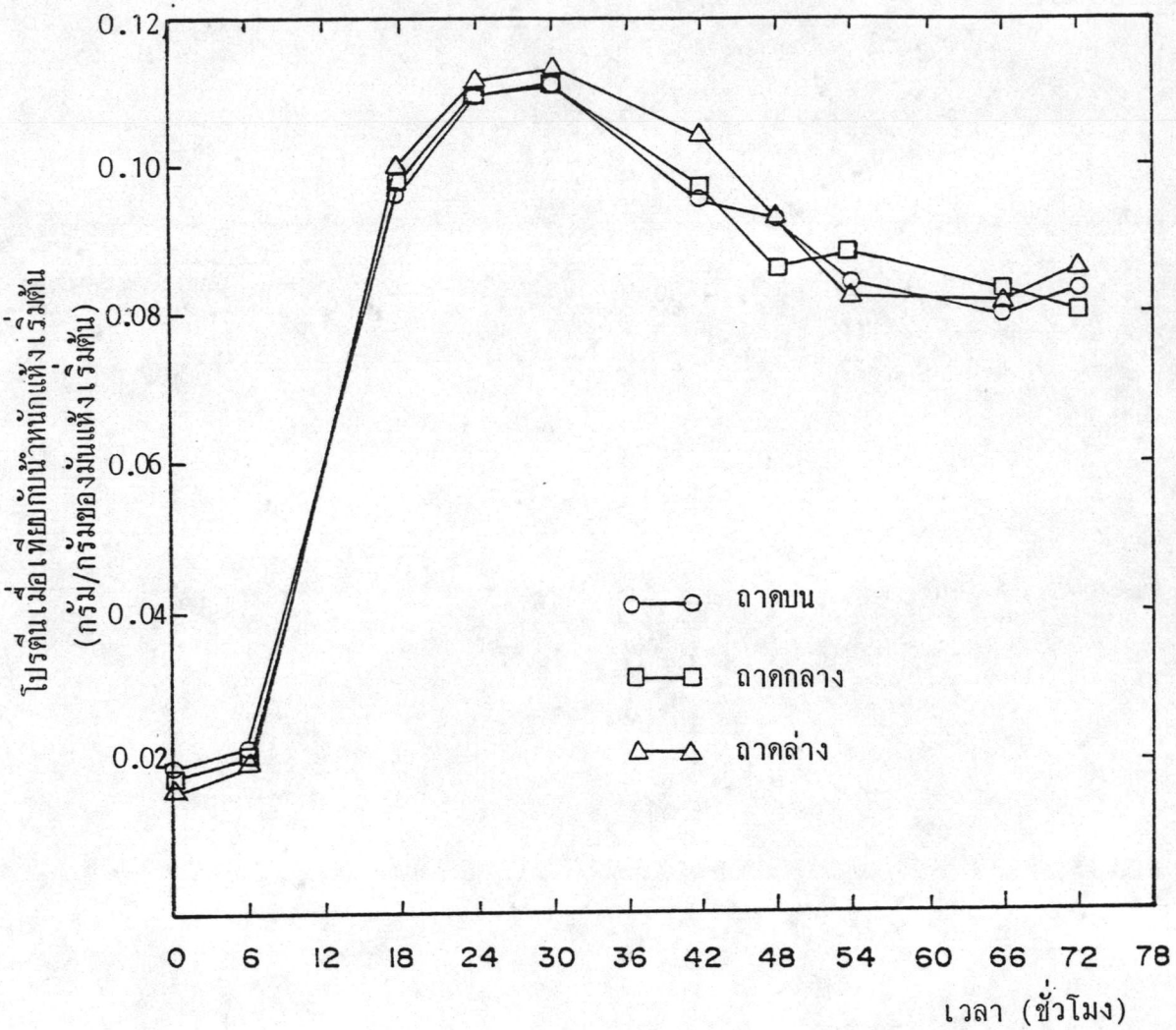
สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ในการถ่ายเทมวลพบว่า ความถี่ในการถ่ายเทมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการหมัก และมีค่าสูงสุดคือ 1.46×10^{-4} หน่วย/วินาที ที่ชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก หลังจากนั้นจะลดลง ดังแสดงในรูป 3.27 และตารางภาคผนวก ง-36

ผลการทดลองข้างต้นแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีลักษณะไม่แตกต่างกัน การหมัก 3 ถาดซ้อนกันมีแนวโน้มว่าจะให้โปรตีนลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการหมัก 1 ถาด เมื่อใช้อัตราการให้อากาศเท่า กัน

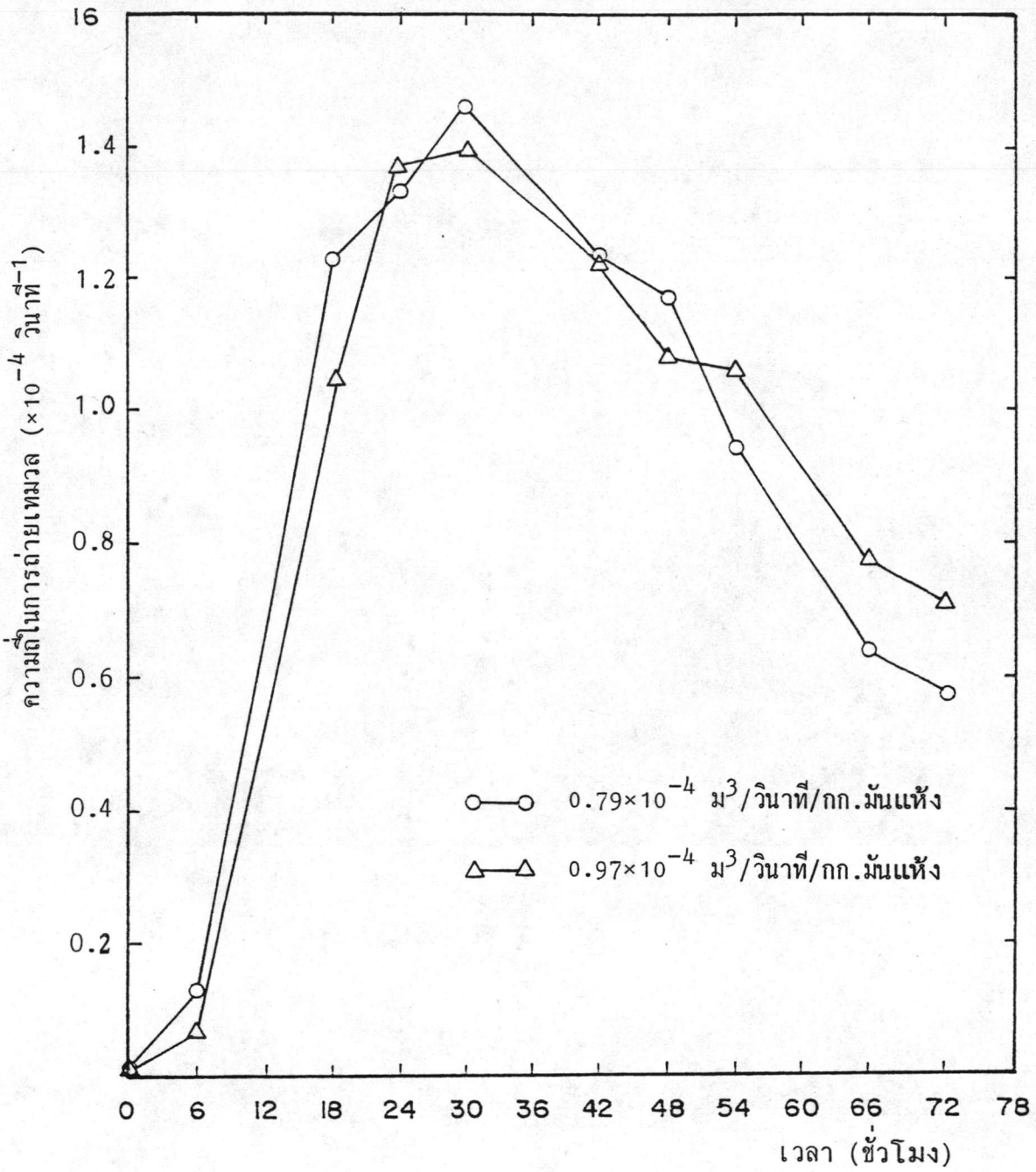


รูปที่ 3.25 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ ความชื้นของมันหมัก และอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อหมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.79×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง

โปรตีนถาดบน โปรตีนถาดกลาง โปรตีนถาดล่าง
น้ำหนักแห้งถาดบน น้ำหนักแห้งถาดกลาง น้ำหนักแห้งถาดล่าง
ความชื้นถาดบน ความชื้นถาดกลาง ความชื้นถาดล่าง
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.26 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อหมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.79×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ใช้มันขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^{6} สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ



รูปที่ 3.27 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในการถ่ายเทมวล เมื่อหมักมัน 3 ถาด ด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน และใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.79×10^{-4} และ 0.97×10^{-4} ม^3/วินาที/กก.มันแห้ง โดยใช้มันขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^6 สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ

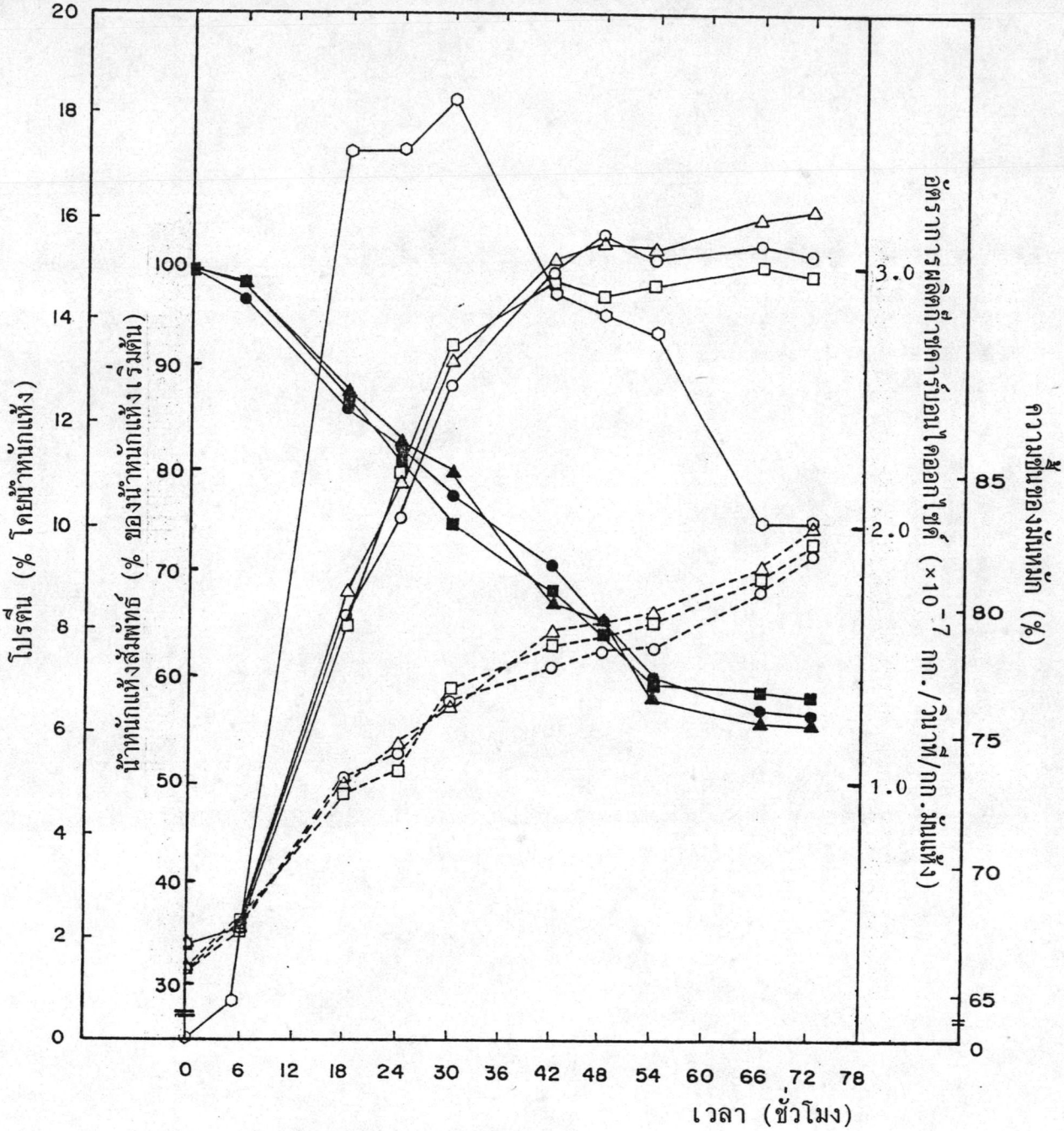
3.4.2 ผลการหมักในถาดหมัก 3 ถาด เมื่อให้อากาศในอัตรา 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง

ผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ และปริมาณความชื้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยปริมาณโปรตีนของมันหมักทั้ง 3 ถาด จะมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และมีค่าสูงสุดในชั่วโมงที่ 42 ของการหมัก ได้โปรตีน 14.9% โดยน้ำหนักแห้ง (ค่าเฉลี่ยของ 3 ถาด) ส่วนน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีค่าลดลงหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และมีน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ประมาณ 69.3% ของน้ำหนักแห้งเริ่มต้น (ค่าเฉลี่ยของ 3 ถาด) ที่ชั่วโมงที่ 42 ของการหมัก หลังจากนั้นจึงมีค่าคงที่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 54 ของการหมัก เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหมัก พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาในช่วงแรกของการหมัก และได้ค่าอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด 3.64×10^{-7} กก./วินาที/กก.มันแห้ง ในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก หลังจากนั้นจึงลดลง ส่วนปริมาณความชื้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการหมัก ผลการทดลองข้างต้นดังแสดงในรูป 3.28 และตารางภาคผนวก ง-37, ง-39, ง-40 และ ง-41 ตามลำดับ

ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด จะมีลักษณะไม่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณโปรตีนดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นหลังชั่วโมงที่ 6 ของการหมัก และมีค่าสูงสุดในชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก โดยมีค่า 0.11 กรัม/กรัม มันแห้งเริ่มต้น (ค่าเฉลี่ยของ 3 ถาด) หลังจากนั้นปริมาณโปรตีนดังกล่าวจะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูป 3.29 และตารางภาคผนวก ง-42

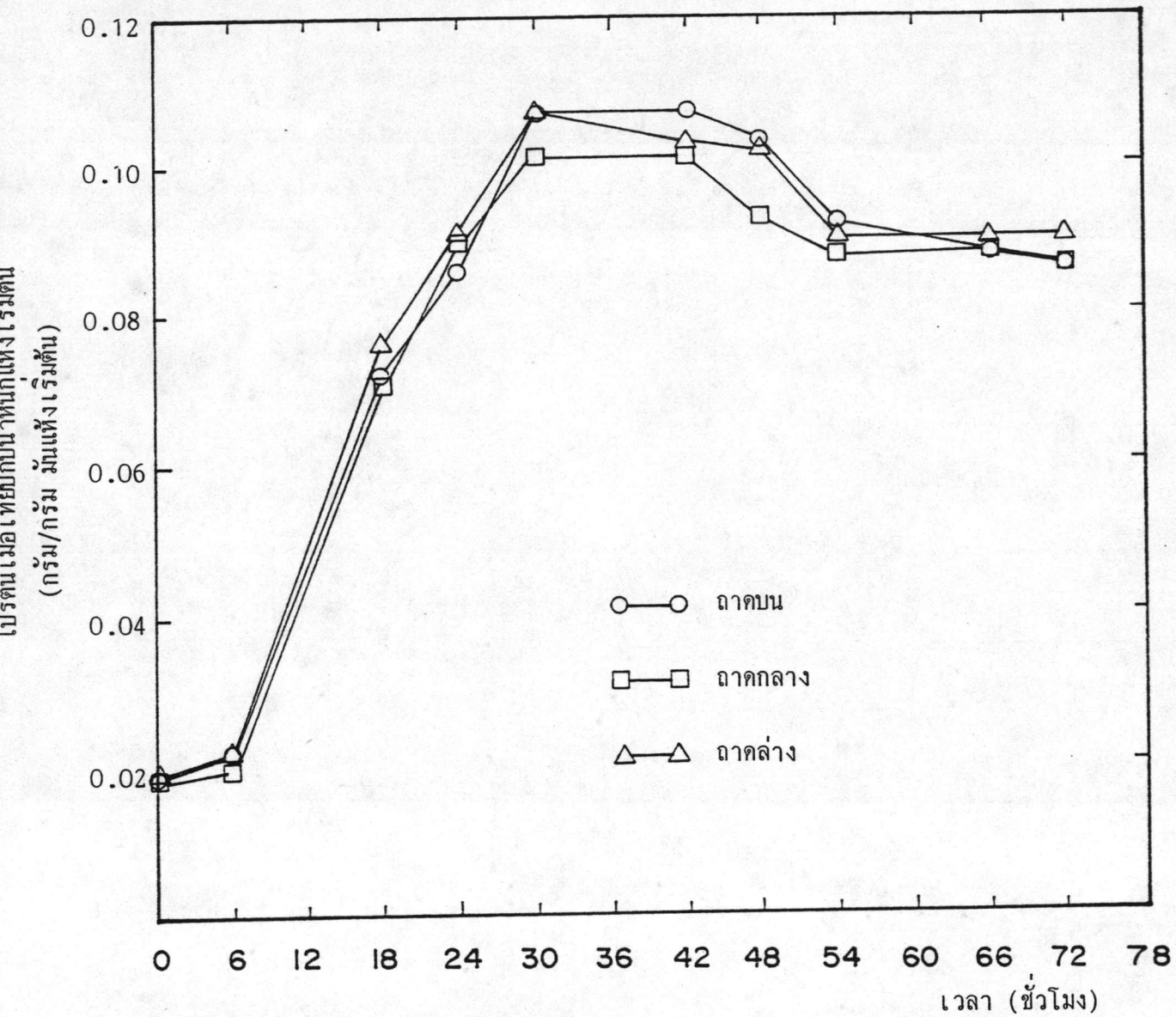
สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่ในการถ่ายเทมวล พบว่าความถี่ในการถ่ายเทมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการหมัก และมีค่าสูงสุดคือ 1.39×10^{-4} หน่วย/วินาที ที่ชั่วโมงที่ 30 ของการหมัก หลังจากนั้นมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.27 และตารางภาคผนวก ง-36

ผลการหมักแสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของมันหมักทั้ง 3 ถาด ไม่แตกต่างกัน และผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเมื่อหมัก 3 ถาด เมื่อมีการให้อากาศในอัตรา 0.79×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง

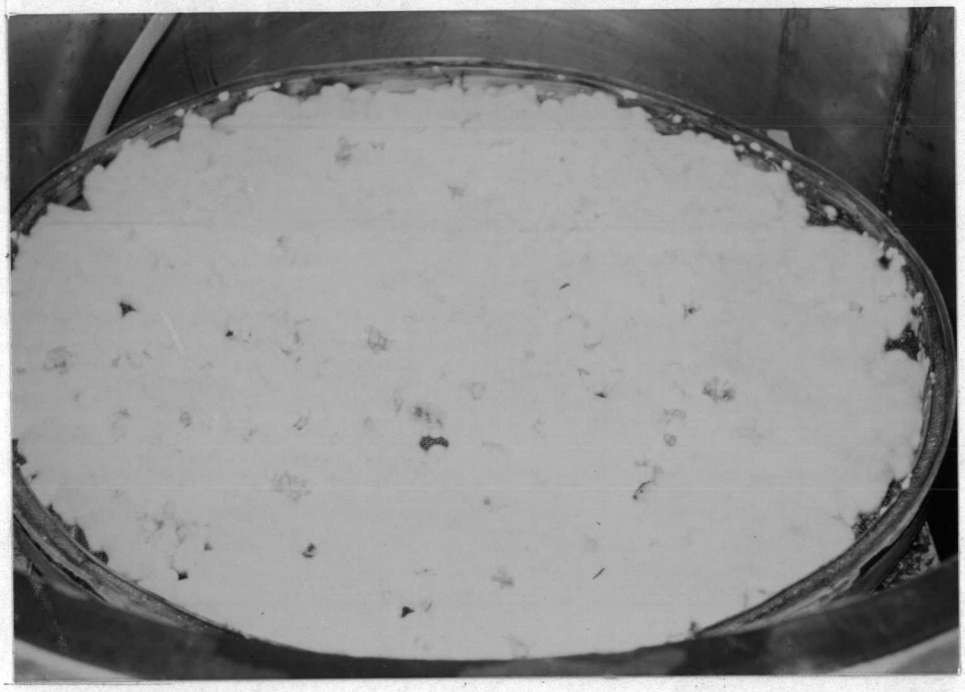


รูปที่ 3.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ ความชื้นของมันหมัก และอัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อหมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.97×10^{-4}/วินาที/กก.มันแห้ง

โปรตีนถาดบน โปรตีนถาดกลาง โปรตีนถาดล่าง
น้ำหนักแห้งถาดบน น้ำหนักแห้งถาดกลาง น้ำหนักแห้งถาดล่าง
ความชื้นถาดบน ความชื้นถาดกลาง ความชื้นถาดล่าง
อัตราการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนเมื่อเทียบกับน้ำหนักแห้งเริ่มต้นของมันหมักทั้ง 3 ถาด เมื่อหมักด้วย R. oligosporus ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตรึงชั้นระดับขยายส่วน โดยใช้ปริมาณการไหลของอากาศ 0.97×10^{-4} $ม^3$/วินาที/กก.มันแห้ง ใช้มันขนาด 3 มม. ความสูงของชั้นหมัก 15-20 มม. ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 65% สปอร์เริ่มต้น 2.5×10^6 สปอร์/กรัม มันแห้ง อุณหภูมิประมาณ 37 °ซ



รูปที่ 3.30 มันหมักจากเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.31 มันหมักจากเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ