



บทที่ 4

เงื่อนไขของการซีมูล และ ผลการซีมูล เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน

4.1 เงื่อนไขของการซีมูล

เงื่อนไขของการซีมูลการอบแห้งในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแยกสรุปเป็น 2 กลุ่มใหญ่
คือ

4.1.1 ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ ในกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนลม
ที่กลับมาใช้อีก โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองศึกษาของผู้อื่น ดังต่อไปนี้

4.1.1.1 ซีมูลการอบแห้งชั้นวัสดุบางแบบไหลผ่าน เพื่อเปรียบเทียบกับ
ตัวอย่าง 6.1 ใน (43)

4.1.1.2 ซีมูลการอบแห้งมันสำปะหลังหนา (40 ซม.) เพื่อเปรียบ
เทียบกับผลการทดลองใน (2) ซึ่งยังแบ่งเป็น 2 กรณีย่อย คือ

4.1.1.2.1 กรณีการอบแห้งธรรมดา

4.1.1.2.2 กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุชั้นในชั้นวัสดุเป็น
ครั้งคราว

4.1.2 ซีมูลการอบแห้งเมล็ดข้าวโพด (shelled corn drying) ในเชิง
อุตสาหกรรม ในกรณีที่มีการหมุนเวียนลมร้อนทั้งส่วนหนึ่งกลับมาใช้อีก วัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้ได้แก่

4.1.2.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของลมร้อนที่ป้อนเข้า เครื่องอบแห้ง

4.1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด

4.1.2.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วของลมร้อน

4.1.2.4 ศึกษาอิทธิพลของช่วงห่างของเวลาในการผสมวัสดุชั้นในแบบเป็น

ครั้งคราว

ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ (เงื่อนไขต่างๆ) ที่ใช้ในการซีมูล
ต่างๆ ตามหัวข้อดังกล่าวข้างต้น มีแสดงอยู่ในตาราง 4.1 - 4.5 และภาคผนวก ข

ตาราง 4.1 ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ขีมีมูลและการอบแห้งชั้นวัสดุบาง
ในหัวข้อ 4.1.1.1

ขนาดของ เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน		
พื้นที่หน้าตัด	1	m ²
ความสูงของ เบค	0.06	m
จำนวนถังกวน	6	
ลักษณะ สมบัติของ วัสดุชั้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของ วัสดุแห้ง	1.675	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของ น้ำ	4.187	(kJ/kg dry solid/°C)
เส้นผ่าศูนย์กลาง สมมูล	0.006	m
ความชื้นวิกฤต	0.1	d.b.
อัตราส่วนช่องว่าง	0.5	
ความหนาแน่นปรากฏ	800	kg total/m ³
พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร	500	m ² /m ³
ลักษณะ สมบัติของอากาศชั้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง	1.005	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	1.926	(kJ/kg dry solid/°C)
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 0°C	2491	kJ/kg water
เงื่อนไขของการขีมีมูล		
ความชื้นวัสดุ เริ่มต้น	0.5	d.b.
ความชื้นวัสดุสุดท้าย	0.05	d.b.
ความชื้นสมมูลของ วัสดุ	0.00001	d.b.
ความชื้นเฉลี่ย เริ่มต้น	0.5	d.b.
อุณหภูมิวัสดุ เริ่มต้น	30	°C
อุณหภูมิลมร้อนที่เข้า เครื่องอบแห้ง	80	°C
ความชื้นของลมร้อน	0.02	kg water/kg dry air
อุณหภูมิลมใหม่	30	°C
ความชื้นของลมใหม่	0.02	kg water/kg dry air
อัตราส่วนการหมุนเวียนลมแห้ง	0	
ช่วงเวลาที่ขีมีมูลทั้งหมดไม่เกิน	30	นาที
ช่วงเวลาการอินทรีเกต	0.005	วินาที
ไม่มีการผสมวัสดุในเบค		
ค่าสปส.การถ่ายเทมวลในเชิงปริมาตร	244,262	kg water/(m ³ hr)
ค่าสปส.การถ่ายเทความร้อนในเชิงปริมาตร	256902	kJ/(m ³ hr °C)

ตาราง 4.2 ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ขีมีมูลและการอบแห้งชั้นวัสดุหนา (40 ซม.) ในหัวข้อ 4.1.1.2.1

ขนาดของ เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน		
พื้นที่หน้าตัด	0.008659	m ²
ความสูงของ เบค	0.40	m
จำนวนตั้งกวน	8	
ลักษณะ สมบัติของ วัสดุชั้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง	0.837	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.187	(kJ/kg dry solid/°C)
เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล	0.00409	m
ความชื้นวิกฤต	3.85	d.b.
อัตราส่วนช่องว่าง	0.768	
ความหนาแน่นปรากฏ	214.368	kg total/m ³
พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร	117.2	m ² /m ³
ลักษณะ สมบัติของอากาศชั้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง	1.005	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	1.926	(kJ/kg dry solid/°C)
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 0 °C	2491	kJ/kg water
เงื่อนไขของการขีมีมูล		
ความชื้นวัสดุ เริ่มต้น	1.68	d.b.
ความชื้นวัสดุสุดท้าย	0.130	d.b.
ความชื้นสมมูลของ วัสดุ	0.0001	d.b.
ความชื้นเฉลี่ย เริ่มต้น	1.68	d.b.
อุณหภูมิวัสดุ เริ่มต้น	35	°C
อุณหภูมิลมร้อนที่ เข้า เครื่องอบแห้ง	65	°C
ความชื้นของลมร้อน	0.018	kg water/kg dry air
อุณหภูมิลมใหม่	30	°C
ความชื้นของลมใหม่	0.018	kg water/kg dry air
อัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง	0	
ช่วงเวลาขีมีมูลทั้งหมดไม่เกิน	330	นาที
ช่วงเวลาการอินทริเกต	0.01	วินาที
ไม่มีการผสมวัสดุในเบค		
ค่าสปส. การถ่ายเทมวลในเชิงปริมาตร	55,000	kg water/(m ³ hr)
ค่าสปส. การถ่ายเทความร้อนในเชิงปริมาตร	57912	kJ/(m ³ hr °C)

ตาราง 4.3 ค่าของตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ขีมีเลตการอบแห้งชั้นวัสดุหนา (40 ซม.) กรณีที่มีการผสมวัสดุในเบตทุกๆ 150 นาที ในหัวข้อ 4.1.1.2.2

ขนาดของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน		
พื้นที่หน้าตัด	0.008659	m ²
ความสูงของเบค	0.40	m
จำนวนถังกวน	8	
ลักษณะสมบัติของวัสดุชั้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง	0.837	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.187	(kJ/kg dry solid/°C)
เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล	0.00409	m
ความชื้นวิกฤต	3.85	d.b.
อัตราส่วนช่องว่าง	0.768	
ความหนาแน่นปรากฏ	214.368	kg total/m ³
พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร	117.2	m ² /m ³
ลักษณะสมบัติของอากาศชั้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง	1.005	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	1.926	(kJ/kg dry solid/°C)
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 0°C	2491	kJ/kg water
เงื่อนไขของการขีมีเลต		
ความชื้นวัสดุเริ่มต้น	1.68	d.b.
ความชื้นวัสดุสุดท้าย	0.130	d.b.
ความชื้นสมดุลของวัสดุ	0.0001	d.b.
ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น	1.68	d.b.
อุณหภูมิวัสดุ เริ่มต้น	35	°C
อุณหภูมิลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้ง	65	°C
ความชื้นของลมร้อน	0.018	kg water/kg dry air
อุณหภูมิลมใหม่	30	°C
ความชื้นของลมใหม่	0.018	kg water/kg dry air
อัตราส่วนการหมุนเวียนลมทั้ง	0	
ช่วงเวลาที่ขีมีเลตทั้งหมดไม่เกิน	330	นาที
ช่วงเวลากการอินทรีเกต	0.03	วินาที
ช่วงห่างของเวลาในการผสมวัสดุในเบค	150	นาที
ค่าสปส.การถ่ายเทมวลในเชิงปริมาตร	55,000	kg water/(m ³ hr)
ค่าสปส.การถ่ายเทความร้อนในเชิงปริมาตร	57912	kJ/(m ³ hr °C)

ตาราง 4.4 ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ขีมีเลิศการอบแห้ง เมล็ดข้าวโพดในเชิงอุตสาหกรรม ในหัวข้อ 4.1.2

ขนาดของ เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน		
พื้นที่หน้าตัด	2.0	m ²
ความสูงของ เบค	0.40	m
จำนวนถังกวน	8	
ลักษณะ สมบัติของวัสดุขึ้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง	1.122	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.187	(kJ/kg dry solid/°C)
เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล	0.006	m
ความชื้นวิกฤต	0.6	d.b.
อัตราส่วนช่องว่าง	0.4	
ความหนาแน่นปรากฏ	557	kg total/m ³
พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร	784.12	m ² /m ³
ลักษณะ สมบัติของอากาศขึ้น		
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง	1.005	(kJ/kg dry solid/°C)
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	1.926	(kJ/kg dry solid/°C)
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 0°C	2491	kJ/kg water

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.5 ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ขี้นในการอบแห้ง เมล็ดข้าวโพดในเชิงอุตสาหกรรม ในหัวข้อ 4.1.2

ความเร็วลมร้อน ต้นแบบ (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนเชิงปริมาตร (kJ/m ³ /hr)	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท มวลเชิงปริมาตร (kg water/4H/m ³ /hr)	ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)	อุณหภูมิร้อน พาเข้า (°C)	ความชื้นสมดุล (d.b.)	อัตราการอบแห้งของผล											
						0		0.33		1.0		2.0		3.0		4.0	
						ช่วงห่างของเวลาทดสอบ (min.)											
						8	15	30	∞	30	30	30	30	30	30		
0.4634	273398	261200	0.20	60	0.0494	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*		
				40	0.0929	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*		
			0.25	50	0.0640	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*		
				60	0.0494	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*		
			0.225	70	0.0327	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*		
				60	0.0494	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*		
			0.20	60	0.0494	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
0.6594	328718	311563	0.20	60	0.0494	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
0.8792	378457	358703	0.20	60	0.0494	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		

หมายเหตุ :
 * : หมายถึง เจือใช้การอบแห้ง
 - : หมายถึง เจือใช้ไม่ได้การอบแห้ง

หน่วยใช้ต่าง คือ
 ความชื้นตัว 0.137 d.b.
 ความชื้นของร้อน 0.020 kg water/kg dry air
 ความชื้นของใหม่ 0.020 "
 อุณหภูมิของใหม่ 30 °C
 อุณหภูมิของร้อน 30 °C
 ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุเริ่มต้น = ความชื้นเริ่มต้น
 เวลาเริ่มต้น 0 นาที

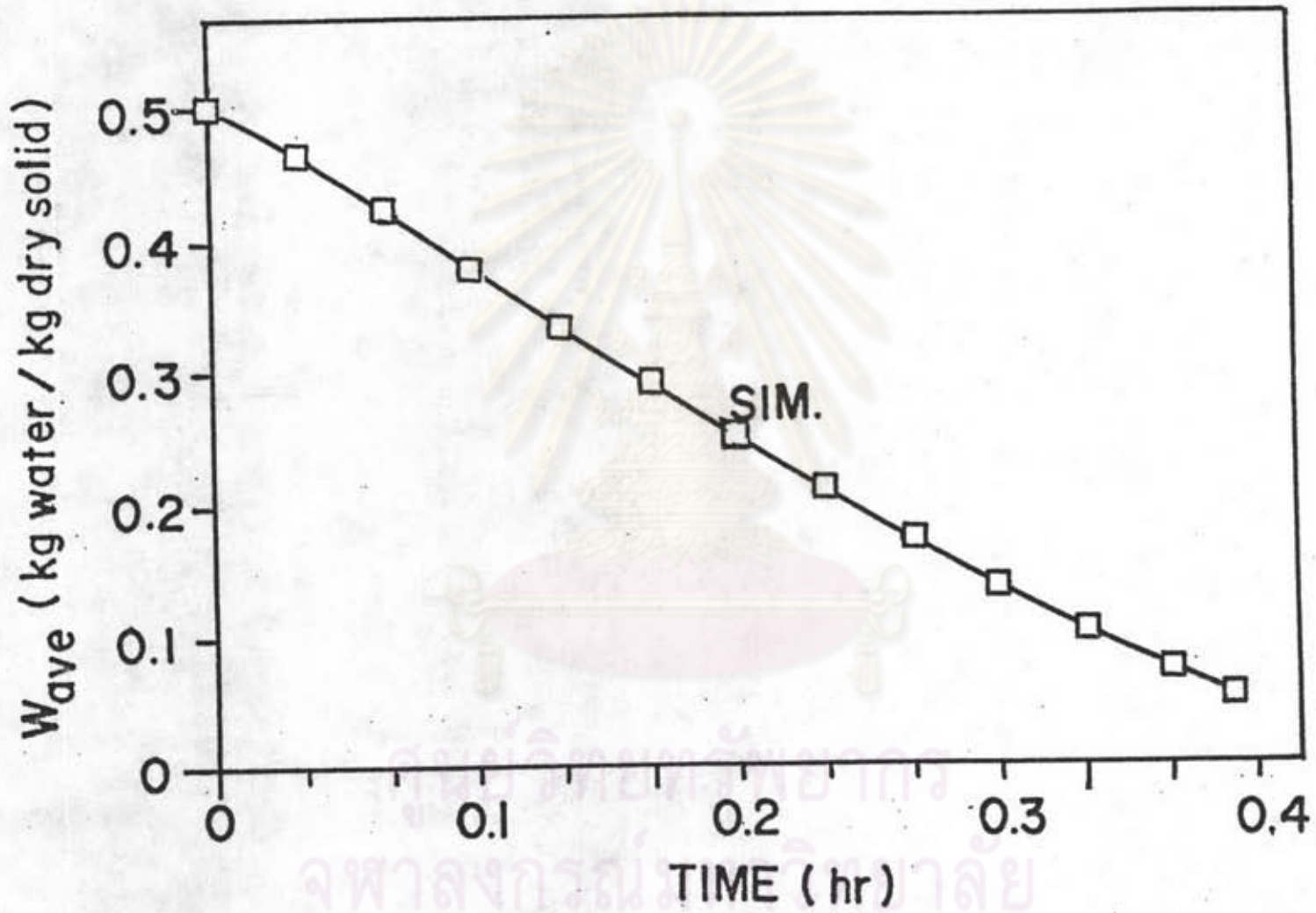
4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

4.2.1 กรณีชั้นวัสดุบาง

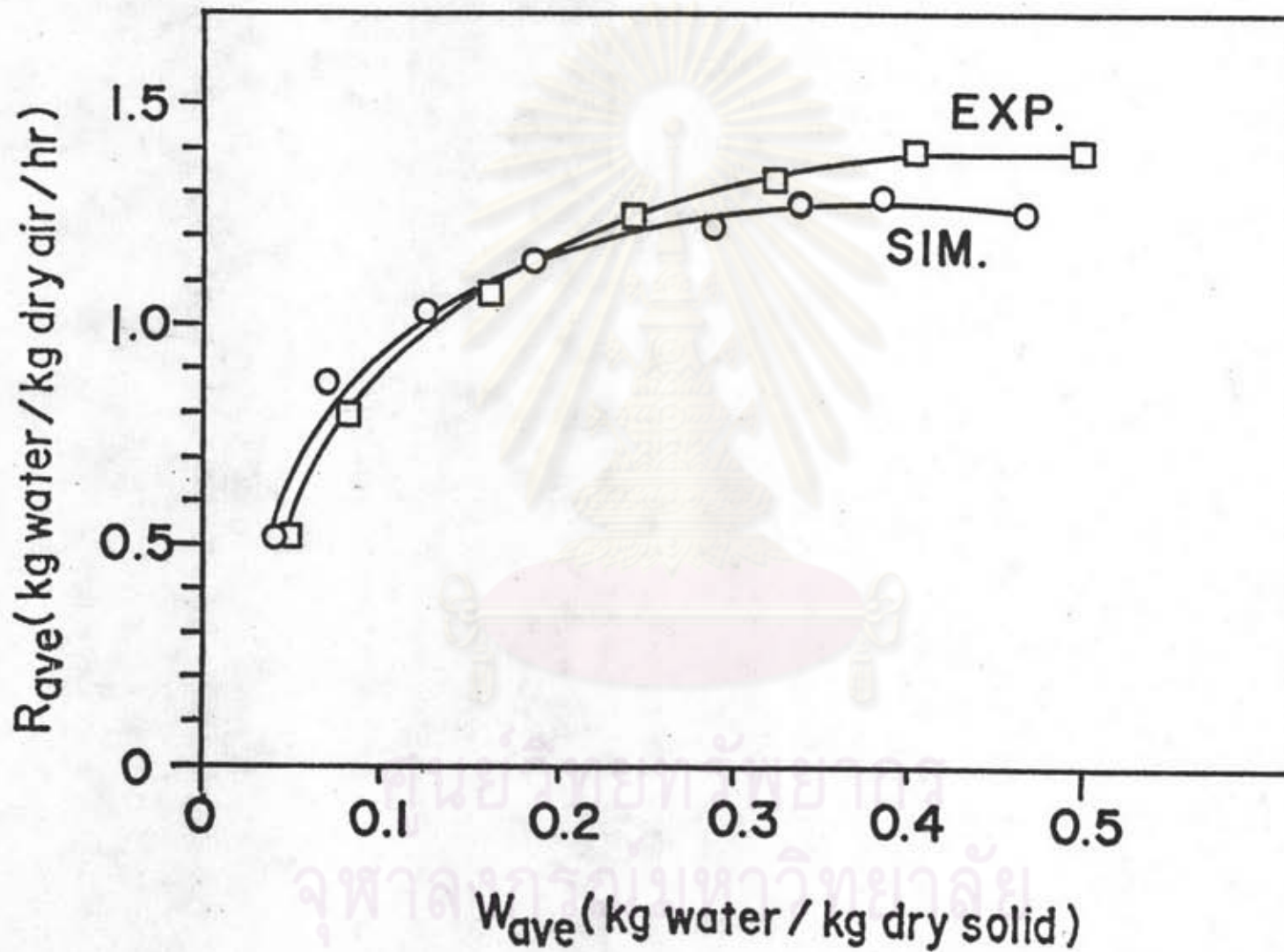
รูป 4.1 และ รูป 4.2 แสดงกราฟความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลาที่ได้จาก การซีมูลเต และกราฟเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ระหว่างผลการซีมูลเต กับการทดลองใน 6.1 (43) (รายละเอียดผลการซีมูลเตและผลของตัวอย่าง มีอยู่ในภาคผนวก ช.1.1)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเฉลี่ยกับเวลาอบแห้งที่ซีมิเลตโต้ (กรณีแบบบาง)



รูป 4.2 ผลเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ระหว่างผลการซึ่มุเลขกับตัวอย่างการอบแห้งเบคบาง

รูป 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นเฉลี่ยกับเวลาอบแห้งที่ซีมูลเตคได้มีลักษณะเหมือนกับการอบแห้งวัสดุทั่วไป (ดูรูป 3.1) นั่นคือ ความชื้นเฉลี่ยจะค่อยาลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในตัวอย่าง 6.1 นั้นไม่ได้แสดงกราฟความชื้นเฉลี่ยกับเวลาเอาไว้จึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับผลของการซีมูลเตคได้ทันที อย่างไรก็ตามเวลาที่คงใช้ในการอบแห้งทั้งหมดเท่ากับ 23.4 นาที ในกรณีของการซีมูลเตค และ 22.98 นาที ในกรณีของตัวอย่าง 6.1 ซึ่งต่างกัน +1.8% (ดูตาราง 4.6)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.6 เปรียบเทียบผลการซีมูลเตค กับ ผลในตัวอย่าง 6.1 (43)

เรื่อง	ผลการซีมูลเตค	ผลตัวอย่าง
ก. ช่วงปรับตัวเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ความชื้นแรกเริ่ม (% d.b.)	0.5	0.5
เวลาที่ใช้ในช่วงนี้ (นาท)	2	-
ข. ช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ อุณหภูมิของวัสดุ (°C)	36.03	36.2
ความร้อนแฝงการระเหยของน้ำ (kJ/kg water)	2417.9	2409.5
อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (kg water/kg dry solid hr)	1.29	1.39
เวลาที่ใช้ในช่วงนี้ (นาท)	4.0	4.08
ความชื้นวิกฤต (% d.b.)	0.1	0.1
ค. ช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลดลง ความชื้นเฉลี่ยสุดท้าย (% d.b.)	0.01	0.01
เวลาที่ใช้ในช่วงนี้ (นาท)	17.4	18.9
เวลาในการอบแห้งทั้งหมด (นาท)	23.4	22.98

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

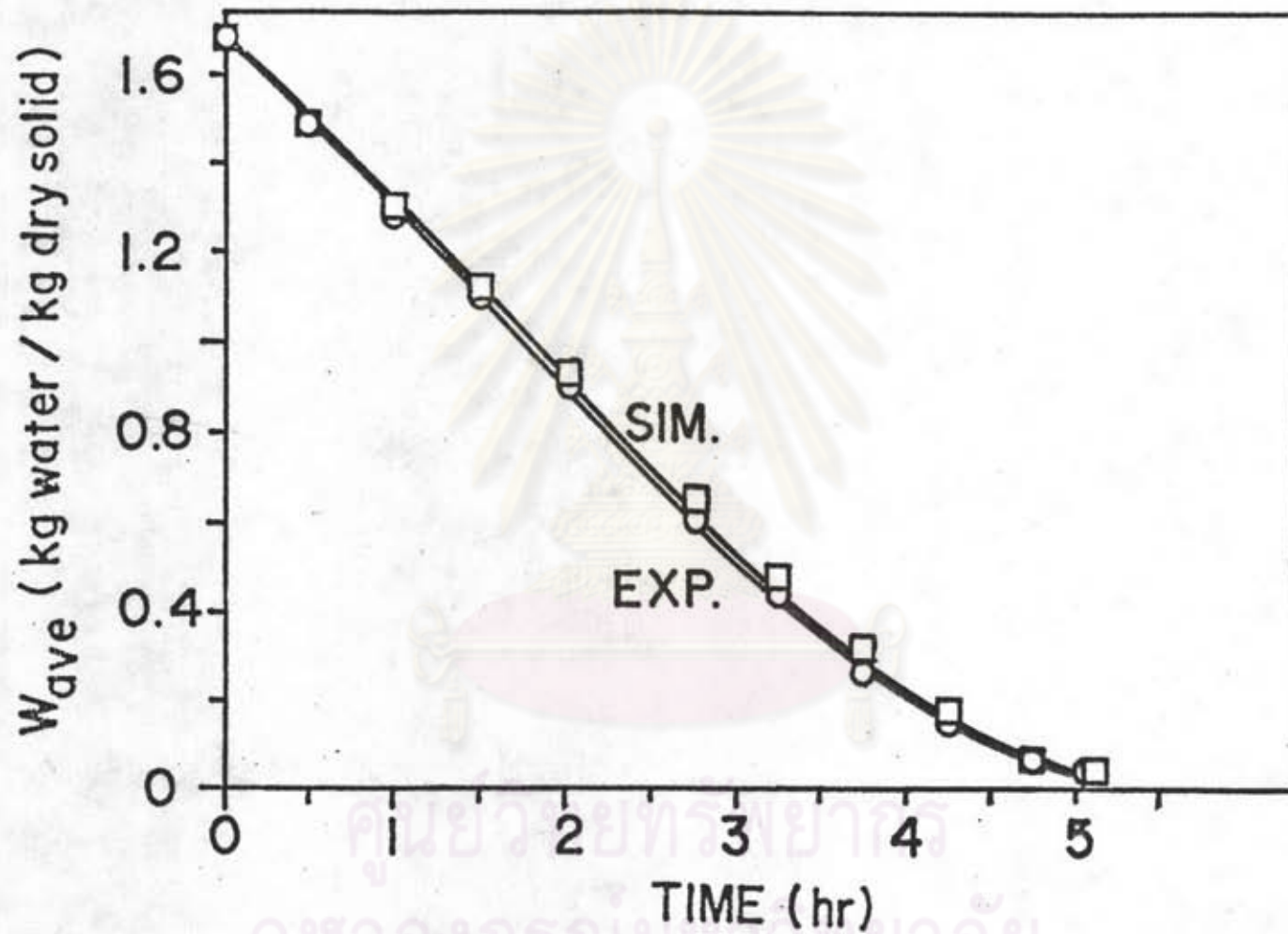
จากรูป 4.2 ซึ่งเปรียบเทียบกราฟของอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย (หรือเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง) ระหว่างผลที่ซีมูเลตได้ กับค่าที่ได้จากตัวอย่าง 6.1 พบว่ากราฟทั้งสองมีลักษณะ และแนวโน้มเหมือนกันคือ อัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ได้จากการซีมูเลตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงปรับตัวเข้าสู่สภาวะคงที่ (ซึ่งในตัวอย่างถือว่าไม่มีช่วงนี้) เพราะว่าคุณสมบัติเริ่มต้นต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน และมีค่าคงที่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ และมีค่าลดลงในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงตามลำดับ อนึ่งที่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่นั้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ซีมูเลตได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าในตัวอย่างประมาณ 7.2% เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุชั้นที่ซีมูเลตในช่วงนี้ มีค่าเท่ากับ 36.03 °C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน (อุณหภูมิวัสดุในตัวอย่าง) 36.2 °C เล็กน้อย ทำให้ความร้อนแฝงการระเหยน้ำที่ซีมูเลตได้เท่ากับ 2409.5 kJ/kg water สูงกว่าค่าในตัวอย่าง 2417.9 kJ/kg water อันเป็นผลให้วัสดุในกรณีของการซีมูเลตสามารถระเหยความชื้นได้น้อยกว่า แต่เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงนี้ใกล้เคียงกันคือ 4.0 นาที กับ 4.08 นาที นั่นคือผลที่ได้จากซีมูเลตผิดพลาดไป -1.9% ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลดลงนั้น อัตราการอบแห้งที่ซีมูเลตได้กลับมีค่าสูงกว่าค่าในตัวอย่างเล็กน้อย จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงนี้เท่ากับ 17.4 นาที ในกรณีของการซีมูเลต และในกรณีของตัวอย่างเท่ากับ 18.9 นาที ซึ่งผิดพลาดไป -8.62% เมื่อรวมเวลาทั้งหมดที่ใช้อบแห้งพบว่าเวลาใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปได้ว่าผลซีมูเลตนั้นสอดคล้องกับตัวอย่างการอบแห้ง แบบบางพอสมควร

4.2.2 กรณีชั้นวัสดุหนา

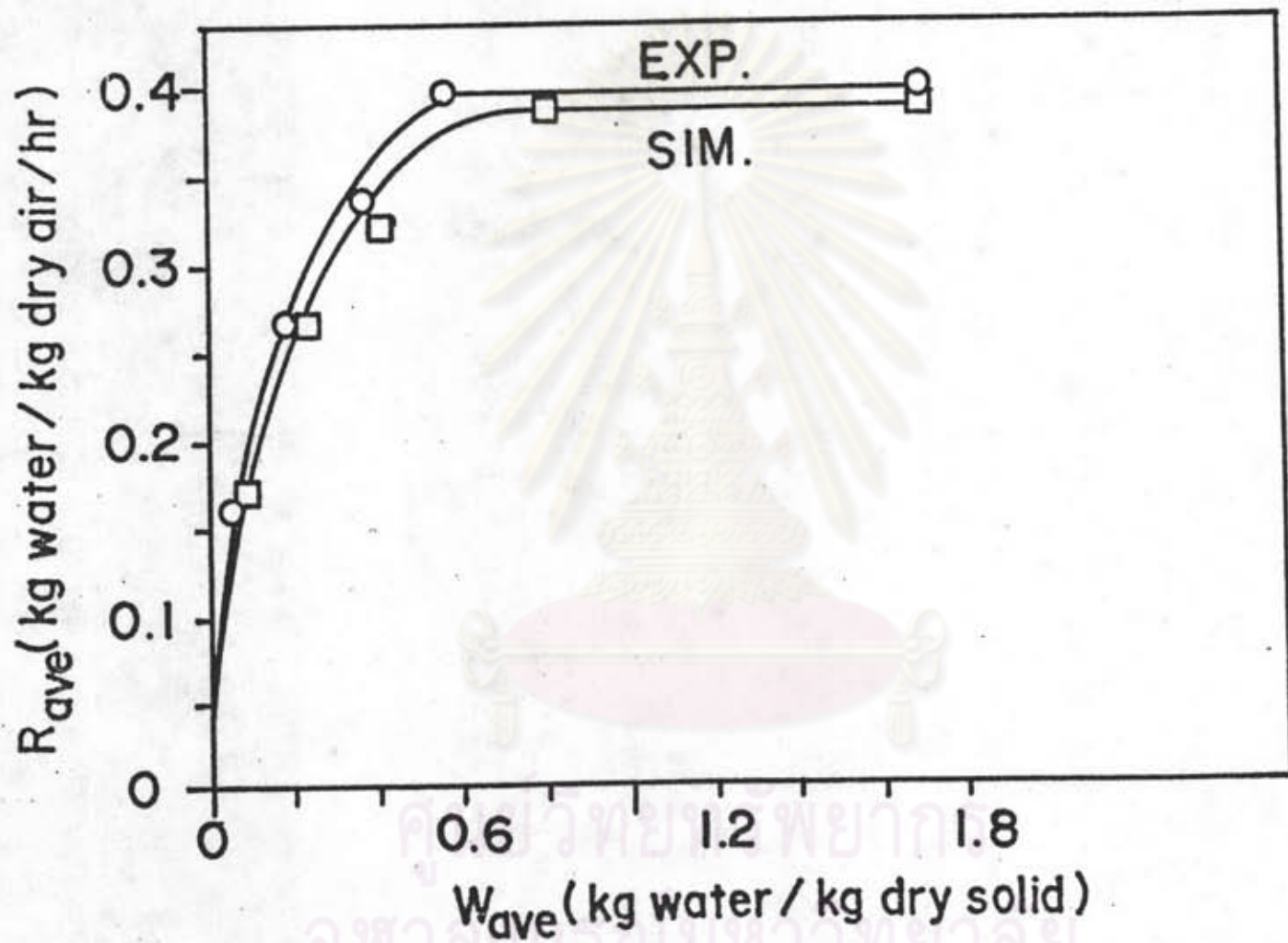
4.2.2.1 กรณีการอบแห้งธรรมดา (โดยไม่มีการผสมวัสดุเป็นครั้งคราว)

ผลการซีมูเลตการอบแห้งขึ้นมันสำปะหลังในเบคสูง 40 ซม. มีแสดงอยู่ในรูป 4.3-4.5 ซึ่งประกอบด้วยกราฟความชื้นเฉลี่ยกับเวลา, อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย (เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง) และกราฟการกระจายความชื้นภายในเบคที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆตามลำดับ (รายละเอียดของผลการซีมูเลตและผลการทดลองอยู่ในภาคผนวก ช.1.2.1)

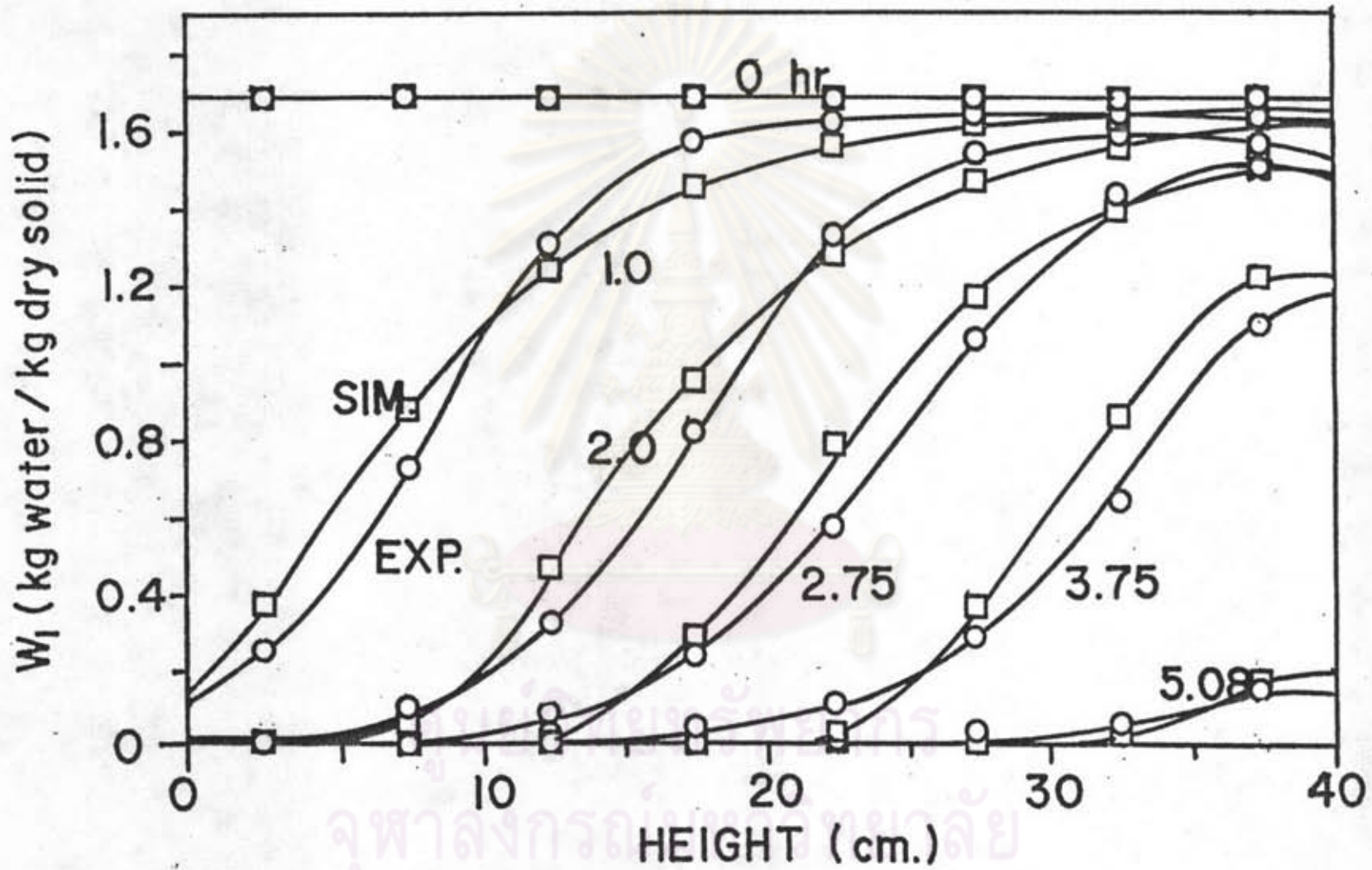
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.3 การเปรียบเทียบของความชื้นเฉลี่ยกับเวลาระหว่างผลการซึ่มเลดกับผลการทดลอง (กรณี การอบแห้ง ชั้นมันสำปะหลังหนา)



รูป 4.4 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย (เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง) ที่ซีมูลเตตได้กับผลการทดลองอบแห้งมันสำปะหลังหนา 40 ซม. (กรณีลมร้อนไหลปกติ)



รูป 4.5 การเปรียบเทียบการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆในชั้นมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ระหว่างผลการซึ่มุเลดกับผลการทดลอง (กรณีการอบแห้งปกติ)

รูป 4.3 แสดงให้เห็นว่า ผลการขีมีูลความขึ้นเฉลี่ยับเวลา และผลการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ขีมีูลได้กับผลการทดลองที่เวลาต่างๆ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.0187 หรือผิดพลาดไม่เกิน 10.9% อนึ่งเมื่อวิเคราะห์ค่าเอฟ (F-test) ของทั้งสองกรณีี่เวลาต่างๆกัน พบว่าได้ค่า $F = 7374.6$ ที่ระดับอิสระภาพ (degree of freedom) เท่ากับ 1 และ 9 (ดูตาราง 4.7) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าเอฟ (10.56) จากตารางการกระจาย ที่มีระดับนัยสำคัญ 1% (49,53) จึงเป็นการยืนยันว่า ผลการขีมีูลนั้นสอดคล้องกับผลการทดลองจริง และเงื่อนไขของการขีมีูลนั้น ก็เหมาะสมกับผลการทดลอง นอกจากนี้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็ไม่ต่างกันมาก คือผลการขีมีูลใช้เวลานาน 307 นาที ผลการทดลองใช้เวลานาน 305 นาที หรือผิดพลาด +0.75%



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4.7 วิเคราะห์ค่าเอฟ (F-test)

เวลา (นาที)	ความชื้นเฉลี่ย (มาตรฐานแท้) W_{AVE}	
	ผลการทดลอง	ผลการซิมูเลต $W_{AVE, SIM}$
0	1.68	1.68
30	1.493	1.4913
60	1.293	1.3005
90	1.104	1.1108
120	0.905	0.9229
165	0.611	0.6474
195	0.451	0.4720
225	0.271	0.3090
255	0.144	0.1683
285	0.065	0.0628
305	0.026	0.0204

$$W_{AVE, EXP} = 0.7313$$

$$RSS = (W_{AVE, SIM}(t) - W_{AVE, EXP}(t))^2 = 3.4921$$

$$ESS = (W_{AVE, SIM}(t) - W_{AVE, EXP}(t))^2 = 4.7353 \times 10^{-4}$$

ระดับอิสระภาพ (degree of freedom)

$$\nu_1 = 1$$

$$\nu_2 = 11 - 2 = 9$$

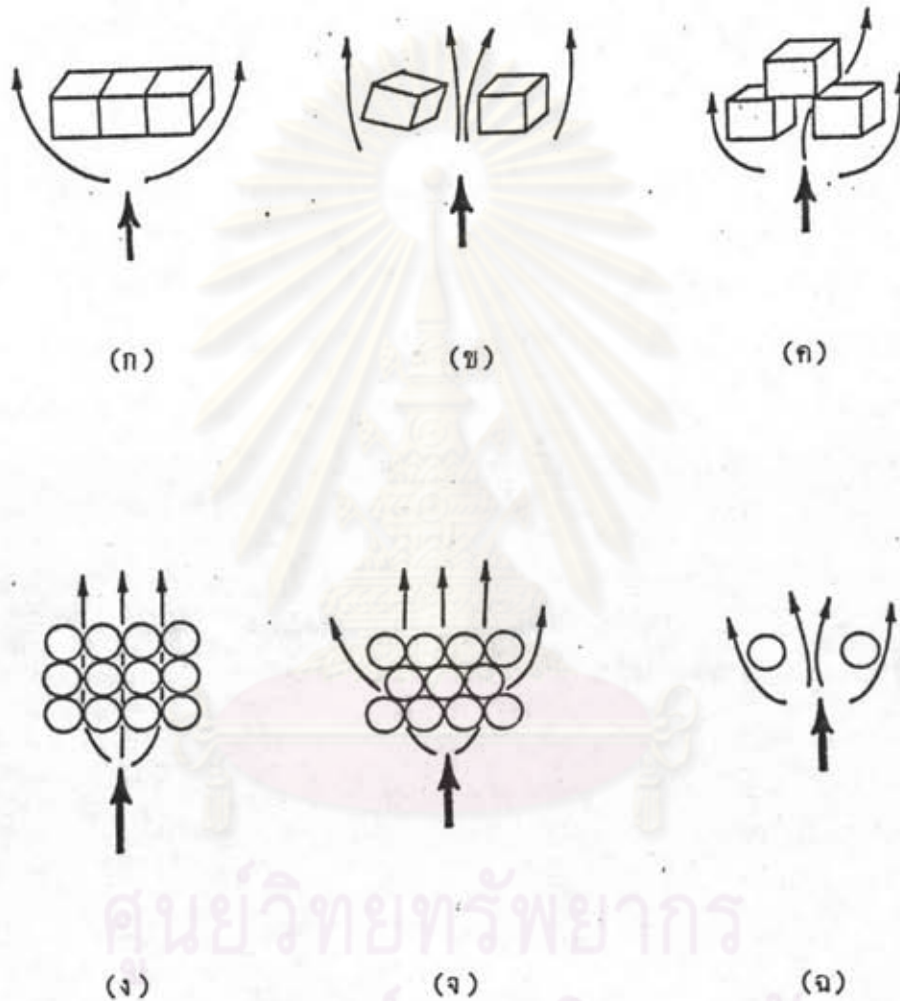
$$F = \frac{RSS / \nu_1}{ESS / \nu_2} = 7374.6$$

จากรูป 4.4 พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย (หาได้จากความชันของกราฟรูป 4.3) ที่ได้จากการซีมูเลต และผลการทดลองต่างก็ใกล้เคียง และมีแนวโน้มเหมือนกัน โดยที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ได้จากการซีมูเลตจะมีค่าต่ำกว่าผลการทดลองไม่เกิน (7.9%) อนึ่งรูป 4.4 ยังแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งมันสำปะหลังนั้น โดยทั่วไปจะมีทั้งโซนการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ และโซนการอบแห้งที่ความเร็วลดลงอยู่ร่วมกัน เพราะชั้นวัสดุหนานั้นจะเกิดการอบแห้งเป็นโซน (ดูรูป 3.10) นั่นคืออัตราการอบแห้งเฉลี่ยในแต่ละชั้นบาง จะเท่ากับอัตราการอบแห้งที่กำลังเกิดขึ้นในชั้นบางๆนั้น ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วช้าลงช่วงที่หนึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อชั้นทางเข้าของลมร้อนมีความชื้นเท่ากับความชื้นวิกฤตผิวหน้า (front) ของการอบแห้งช้าลงนั้นจะขยับลึกเข้าไปเรื่อยๆ จนในที่สุดถึงชั้นที่ปลายทางออกของลมร้อน จากนั้นอัตราการอบแห้งที่ช้าลงชั้นที่สอง

เมื่อสังเกตการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ และเวลาต่างๆ ในรูป 4.5 พบว่าในช่วงต้นๆของการอบแห้ง เช่น ที่เวลา 60 นาที การกระจายของความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆที่ได้จากการซีมูเลต จะมีแนวโน้มเหมือนผลการทดลอง ที่บริเวณทางเข้าวัสดุชั้นจะระเหยความชื้นในกรณีผลการซีมูเลตได้น้อยกว่าผลการทดลอง และที่บริเวณตอนกลางเบควัสดุกลับระเหยความชื้นได้ดีกว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ผลการซีมูเลตจะให้การกระจายความชื้นที่ใกล้เคียงผลการทดลองมากขึ้น โดยมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยที่ปากทางออก แต่ต่ำกว่าที่ปากทางเข้าของลมร้อน จากการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างผลการซีมูเลตกับผลการทดลองที่เวลาต่างๆ พบว่ามีค่าไม่เกิน 0.119 สาเหตุของการเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลอง อาจเนื่องจากการสมมติฐานที่ใช้ในการทำนายค่าของความดันไอของความชื้นที่ผิววัสดุ และความร้อนแฝงการระเหยของน้ำในมันสำปะหลัง ในที่นี้เราถือว่าความดันไอ (สมมูลย์) ของมันสำปะหลังจะเท่ากับความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นวัสดุประเภทชอบดูดน้ำ (hygroscopic) ดังนั้นสมมติฐานดังกล่าวจึงถูกต้อง เฉพาะเมื่อมันสำปะหลังมีความชื้นสูงกว่า 0.4 (มาตรฐานแห้ง) แต่ที่ความชื้นวัสดุต่ำกว่า 0.4 ความดันไอ (สมมูลย์) ของมันสำปะหลังนั้น จะมีค่าต่ำกว่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (54) อนึ่งเมื่อทำนายความดันไอลากเคลื่อนไป ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำที่ทำนายก็ย่อมคลาดเคลื่อนไปด้วย

นอกจากนี้ผลการซีมูเลตยังชี้ให้เห็นว่า ค่าที่ถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเชิงปริมาตร (k_a) นั้นจะน้อยกว่าค่าที่เคยประเมินได้ในการศึกษาก่อน (2) เหตุที่เป็นเช่นนั้น เพราะค่าของ a หรือพื้นที่ผิวจำเพาะเชิงประสิทธิผล (effective surface area) นั้นต่างกัน ทั้งๆที่ค่า k ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยปกติค่า a นั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะการวางตัวของวัสดุในเบค ในการทดลองนั้นชั้นมันสำปะหลังเป็นรูปลูกบาศก์ซึ่งมีโอกาสแนบติดกันได้ง่าย ดังนั้นการประเมินค่า a โดยเปรียบเสมือนเป็นรูปทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากัน (ซึ่งผิวสัมผัสมีน้อยมาก) จึงไม่ถูกต้องนัก เพราะชั้นมันอาจเรียงตัวดังรูป 4.6 ก ก็ได้

ในกรณีนี้พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงประสิทธิผลจะมีค่าน้อยกว่ากรณีรูปทรงกลมมาก (รูป 4.6 ง-4.6 ฉ)
จากการวิเคราะห์ พบว่าค่าของ a ที่ถูกต้องควรเท่ากับ 117.2 m^2 หรือประมาณ 34.4% ของ
ที่คำนวณใน (2) (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข)



รูป 4.6 ลักษณะการเรียงตัวแบบต่างๆในเบคของเม็ดวัสดุขึ้นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์กับรูปทรงกลม

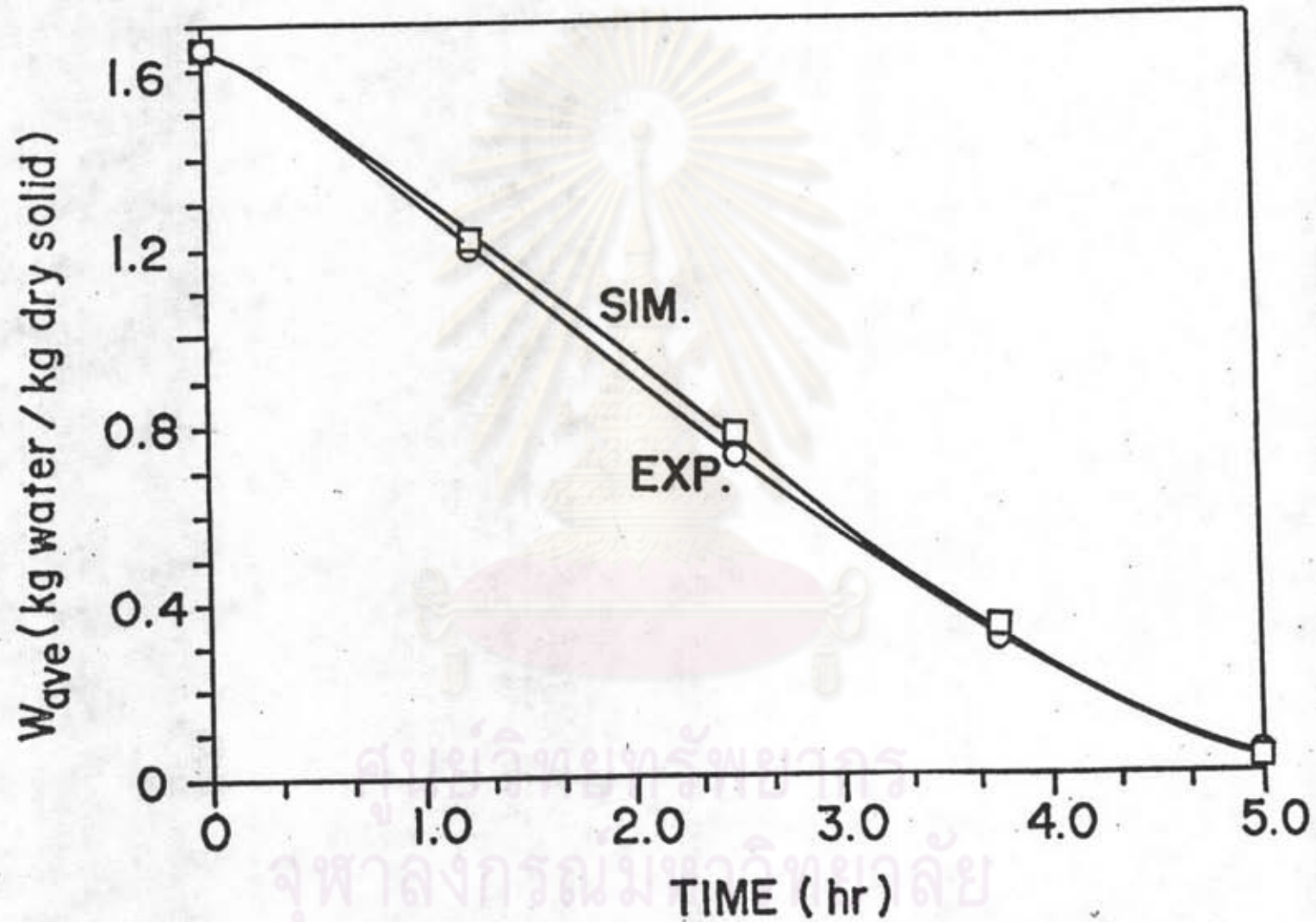
4.2.2.2 กรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุขึ้นเป็นครั้งคราว

ผลการซีมูลผลการอบแห้งแบบผสมวัสดุเป็นครั้งคราว ดังในหัวข้อ

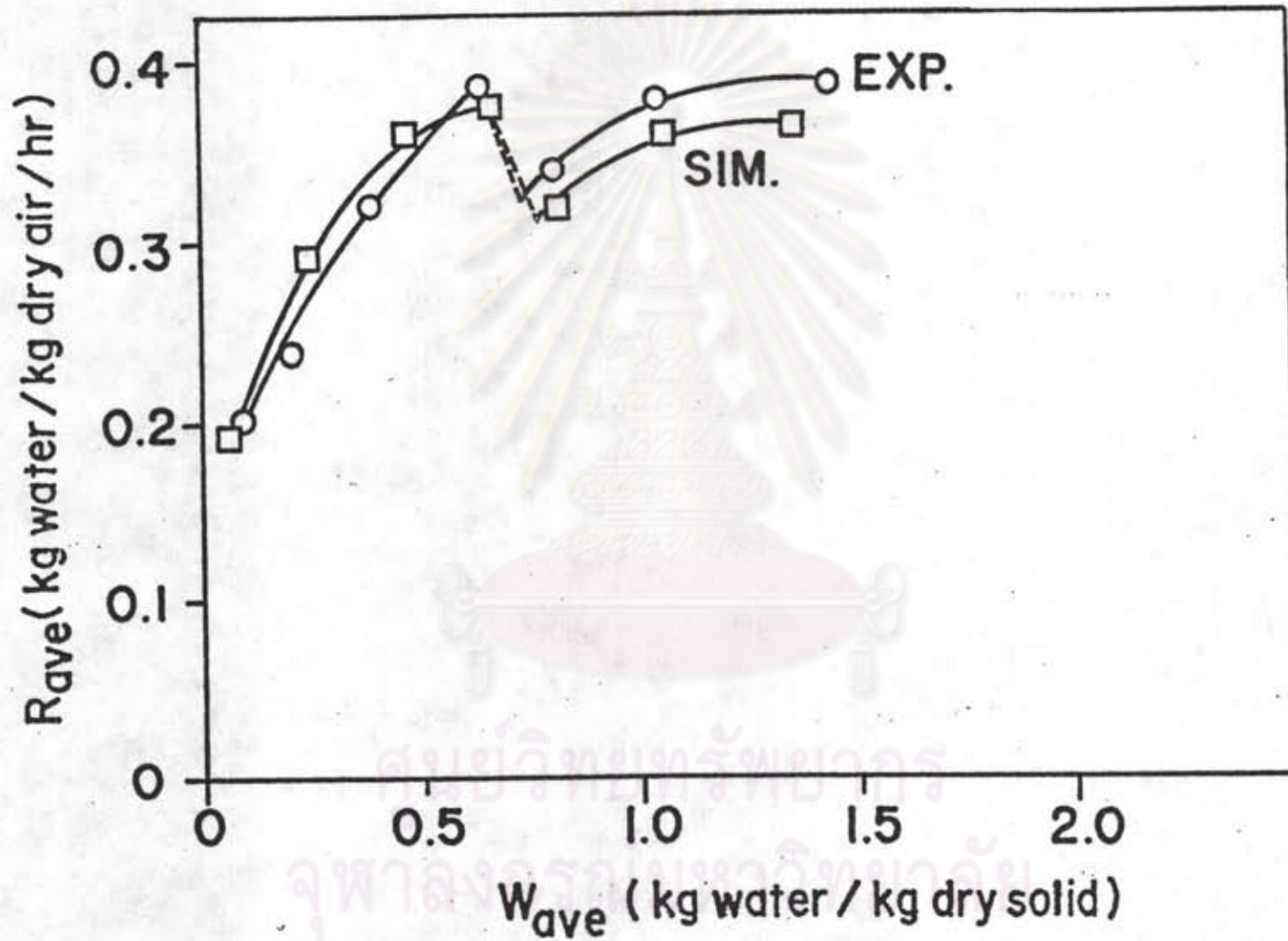
4.1.2.2 มีแสดงอยู่ในรูป 4.7 - 4.9 ซึ่งได้แก่กราฟความชื้นเฉลี่ยกับเวลา, กราฟอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย และกราฟการกระจายของความชื้นภายในเบคที่ตำแหน่งและเวลา ใดๆ ตามลำดับ (รายละเอียดของผลการซีมูล และผลการทดลองมีอยู่ในภาคผนวก ข.1.2.2)



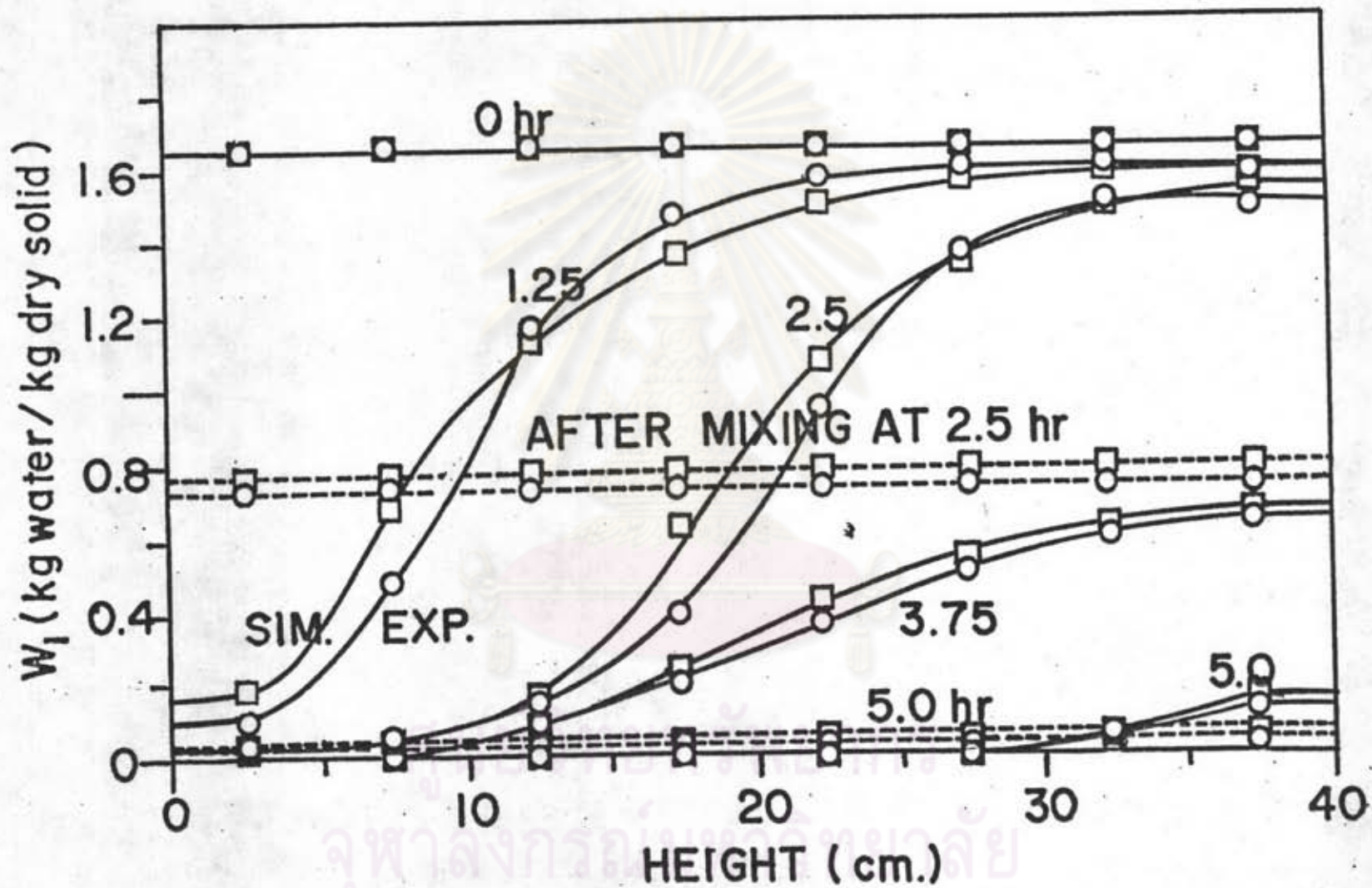
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.7 การเปรียบเทียบความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ระหว่างผลการซิมูเลตกับผลการทดลอง (กรณีการอบแห้งมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ที่มีการผสมวัสดุในเบคทูภา 150 นาที)



รูป 4.8 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ระหว่างผลการซึ่มเสกกับผลการทดลองมันสำปะหลังหนา 40 ซม. ที่มีการผสมวัสดุในเบคทุกา 150 นาที



รูป 4.9 การเปรียบเทียบการกระจายความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลา ระหว่างผลการซึ่มเลดกับผลการทดลองอบมันสำปะหลังหนา 40 ซม. และมีการผสมวัสดุในเบคทูภา 150 นาที

จากรูป 4.7 เห็นว่าผลการซีมูลความชื้นเฉลี่ยกับเวลา นั้นมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลอง (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการซีมูลกับผลการทดลองเท่ากับ 0.0268) ก่อนการผสมวัสดุ ผลการซีมูลให้ความชื้นวัสดุที่ทางออกสูงกว่าผลการทดลองเล็กน้อย แต่หลังการผสมแล้วผลการซีมูลจะให้ความชื้นเฉลี่ยต่ำกว่าผลการทดลองเล็กน้อย ส่วนเวลาในการอบแห้งก็ไม่ต่างกันเลย เพราะผลการซีมูลใช้เวลา 299.3 นาที ส่วนผลการทดลองใช้เวลา 300 นาที หรือผิดพลาดไปเพียง -0.24%

รูป 4.8 แสดงและเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย (ได้จากความชันของกราฟในรูป 4.7) ระหว่างผลการซีมูลกับผลการทดลอง เห็นได้ผลการซีมูลนั้นใกล้เคียงผลการทดลองมาก และมีแนวโน้มเหมือนกัน อนึ่งอัตราการอบแห้งที่ซีมูลได้จะมีค่าน้อยกว่าผลการทดลอง ในช่วงก่อนการผสมวัสดุ (ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเหมือนหัวข้อ 4.2.2.1) แต่ในช่วงหลังผสมวัสดุในเบค อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของการซีมูลจะมีค่าสูงชันกว่าผลการทดลอง (ในรูปช่วงกระโดด คือช่วงที่มีการผสมวัสดุในเบค)

ในกรณีที่เงื่อนไขอื่น ๆ ของลมร้อนที่เข้าเครื่องอบแห้งมีค่าคงที่ (เช่น ความเร็วลมร้อน และคุณสมบัติของลมร้อน เป็นต้น) อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของเบคจะขึ้นอยู่กับความชื้นของลมร้อนขาออกจากเครื่องอบแห้ง ในขณะที่กำลังอบแห้งลมร้อนที่ไหลผ่านเบคจะค่อยๆ มีอุณหภูมิค่าลง และขณะเดียวกันก็มีความชื้นสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ปลายทางออกของเบคหนา มาก อุณหภูมิของลมร้อนและของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงแรกของการอบแห้งถ้าอุณหภูมิแรกเริ่มของวัสดุต่ำกว่าอุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อน ความร้อนจากลมร้อนส่วนใหญ่จะใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ (อุ่น) วัสดุให้เท่ากับอุณหภูมิกะเปาะเปียก ดังนั้นอัตราการระเหยเฉลี่ยจึงมีค่าน้อย เมื่อวัสดุในเบคถูกอุ่นจนให้อุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อนแล้ว อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะสูงขึ้นและมีค่าค่อนข้างคงที่ (ช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่) จากนั้นอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ (ช่วงอัตราการอบแห้งช้าลงช่วงที่หนึ่งและช่วงที่สอง) ในทำนองเดียวกันในช่วงที่อุณหภูมิของลมร้อนจะลดลงในขณะที่ไหลผ่านเบค แต่ความชื้นของลมร้อนจะเพิ่มขึ้นไม่มาก และอัตราการอบแห้งเฉลี่ยก็ต่ำ เมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่อุณหภูมิลมร้อนจะเปลี่ยนแปลงไปตามเส้น adiabatic cooling line และลมร้อนก็จะมีอุณหภูมิขาออกใกล้เคียงอุณหภูมิวัสดุ (นั่นคือใกล้เคียงอุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อน) อัตราการอบแห้งเฉลี่ยในช่วงนี้จะมีค่าสูงสุด แล้วมีค่าลดลงในช่วงอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลดลง (ดูรูป 3.1 และ 3.2) เป็นต้น

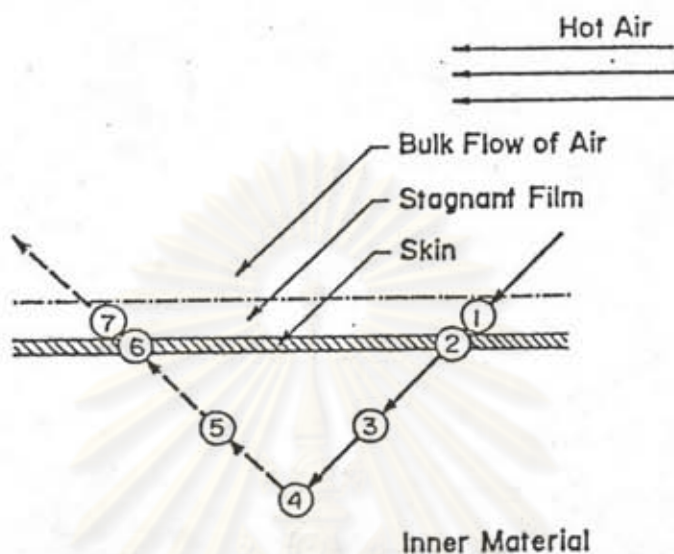
เมื่อมีการผสมวัสดุในเบค อุณหภูมิของวัสดุทั้งเบคหลังการผสมจะเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของเบคก่อนการผสมวัสดุ จากนั้นการอบแห้งจะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับที่เมื่อเริ่มต้นอบแห้งวัสดุ ดังกล่าวมาข้างต้น

รูป 4.9 เปรียบเทียบการกระจายความชื้นภายในเบคที่เวลาต่าง ๆ พบว่าแนวโน้มของผลการซีมูเลตจะตรงกับผลการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.2.1 แม้หลังการผสมวัสดุแล้ว ก็ยังพบว่าแนวโน้มยังตรงกับผลการทดลองอยู่ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างผลการซีมูเลตและผลการทดลองที่เวลาต่างๆ มีค่าไม่เกิน 0.104 นอกจากนี้ความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆ ในเบค จะลดลงเร็วกว่าผลการทดลองเล็กน้อย สรุปแล้วผลการซีมูเลตสอดคล้องกับผลการทดลอง เป็นที่น่าพอใจ

4.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรสำคัญบางตัวที่มีต่อการอบแห้ง

ก่อนอื่นที่จะกล่าวถึงผลการศึกษาต่อไปนั้น ปรากฏการณ์กลไกการอบแห้งที่เกิดขึ้นภายนอกและภายในผิววัสดุ (ซึ่งได้กล่าวถึงไปแล้วในบทที่ 3) นั้นจะเห็นได้จากรูป 4.10 ซึ่งแสดงขั้นตอนการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนเข้าไปในวัสดุเพื่อระเหยน้ำภายใน และการถ่ายเทมวลจากภายในวัสดุออกมาภายนอกขณะทำการอบแห้ง และแสดงถึงความต้านทานต่างๆ ที่เกิดขึ้นต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (2) ในรูป 4.10 จะเป็นตัวกำหนดอัตราการอบแห้งที่ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



LEGEND

- ① Film Heat Transfer Resistance
- ② Skin Heat Transfer Resistance
- ③ Internal Heat Transfer Resistance
- ④ Evaporation of Water Content
- ⑤ Internal Mass Transfer Resistance
- ⑥ Skin Mass Transfer Resistance
- ⑦ Film Mass Transfer Resistance

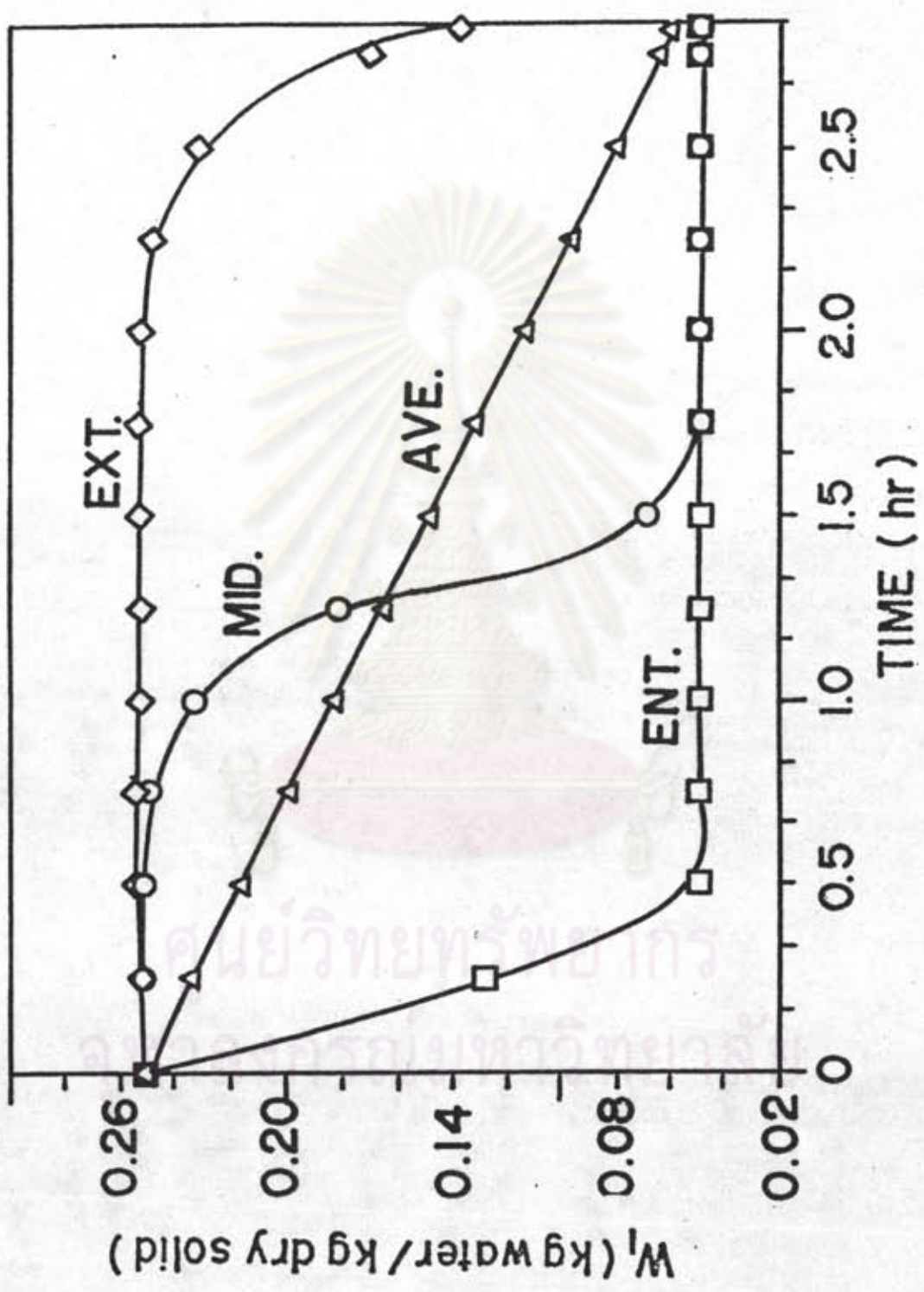
รูป 4.10 แสดงกลไกการระเหยน้ำจากวัสดุชั้นที่เกิดชั้นระหว่างการอบแห้ง

ตั้งเห็นได้จากรูป ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทเข้าไปภายในวัสดุ โดยผ่านความต้านทานของฟิล์ม (Film resistance) ความต้านทานของเปลือกวัสดุ (ด้ามี่) และความต้านทานภายในวัสดุ (Internal resistance) ตามลำดับ เมื่อน้ำในวัสดุได้รับความร้อน จะเกิดการระเหยและถ่ายเทออกจากวัสดุ โดยผ่านความต้านทานภายในวัสดุ, ความต้านทานของเปลือกและของฟิล์ม ตามลำดับ

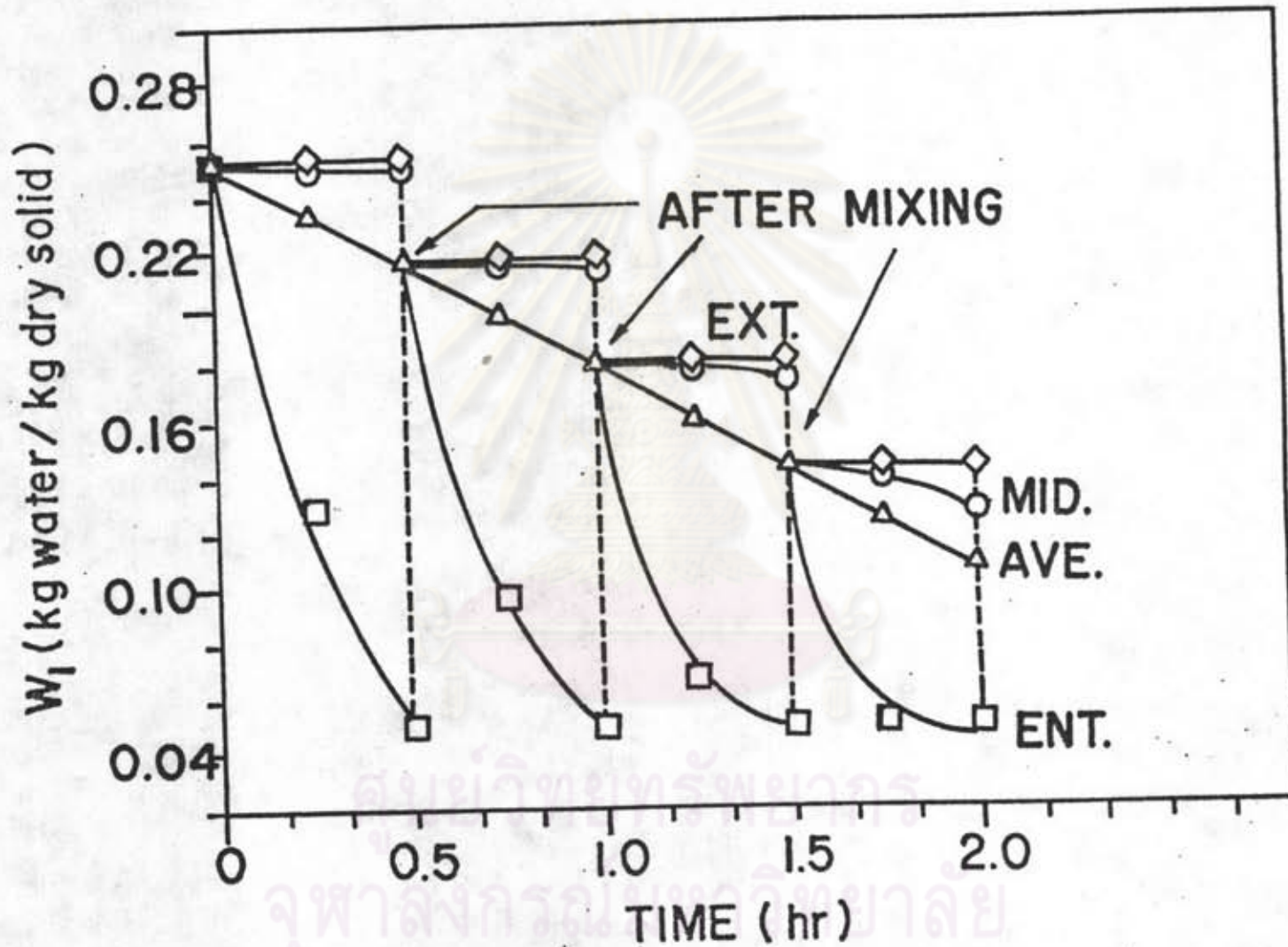
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิของลมร้อน

รูป 4.11-4.22 แสดงผลการขีมูลเลขการอบแห้ง เมล็ดข้าวโพด ซึ่งประกอบด้วยกราฟของความชื้นที่บริเวณต่างๆในเบคกับเวลา, กราฟอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่บริเวณต่างๆในเบคกับเวลา, กราฟการกระจายของอุณหภูมิวัสดุและลมร้อนที่บริเวณต่างๆในเบคกับเวลา, กราฟของความชื้นในลมร้อนที่ทางออกจากเครื่องอบแห้งกับเวลา, กราฟอุณหภูมิของลมร้อนขาออกกับเวลา และกราฟปริมาณพลังงานความร้อนที่อุ่นลมร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการกับเวลา กรณีอุณหภูมิลมร้อน 60°C , ความชื้นวัสดุเริ่มต้น 0.25 (d.b.), ความเร็วลมร้อนเมื่อผ่านเบค 0.4634 m/s และช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุภายในเบค 30 นาที (สำหรับกรณีอุณหภูมิลมร้อน 60°C จะเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีการผสมวัสดุเลยด้วย) โดยที่แต่ละอุณหภูมิของลมร้อนค่าหนึ่งก็จะมีค่าอัตราการหมุนเวียนลมทั้ง x ต่างกัน, รูป 4.23 - 4.24 กราฟความชื้นขาออกของลมร้อนกับเวลา, กราฟอุณหภูมิลมทั้ง (ลมร้อนขาออก) ที่อุณหภูมิลมร้อน 40°C ส่วนรูป 4.25-4.32 นั้นเป็นกราฟความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา และกราฟอัตราการอบแห้งเฉลี่ยของเบคกับความชื้นเฉลี่ยของเบค สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า $40, 50, 60$ และ 70°C ตามลำดับ โดยแปรค่า x ต่างกัน ที่แต่ละอุณหภูมิ (เงื่อนไขต่างงานั้นอยู่ในหัวข้อ 4.1.2 และรายละเอียดของผลการขีมูลเลขอยู่ในภาคผนวก ข.2.1)

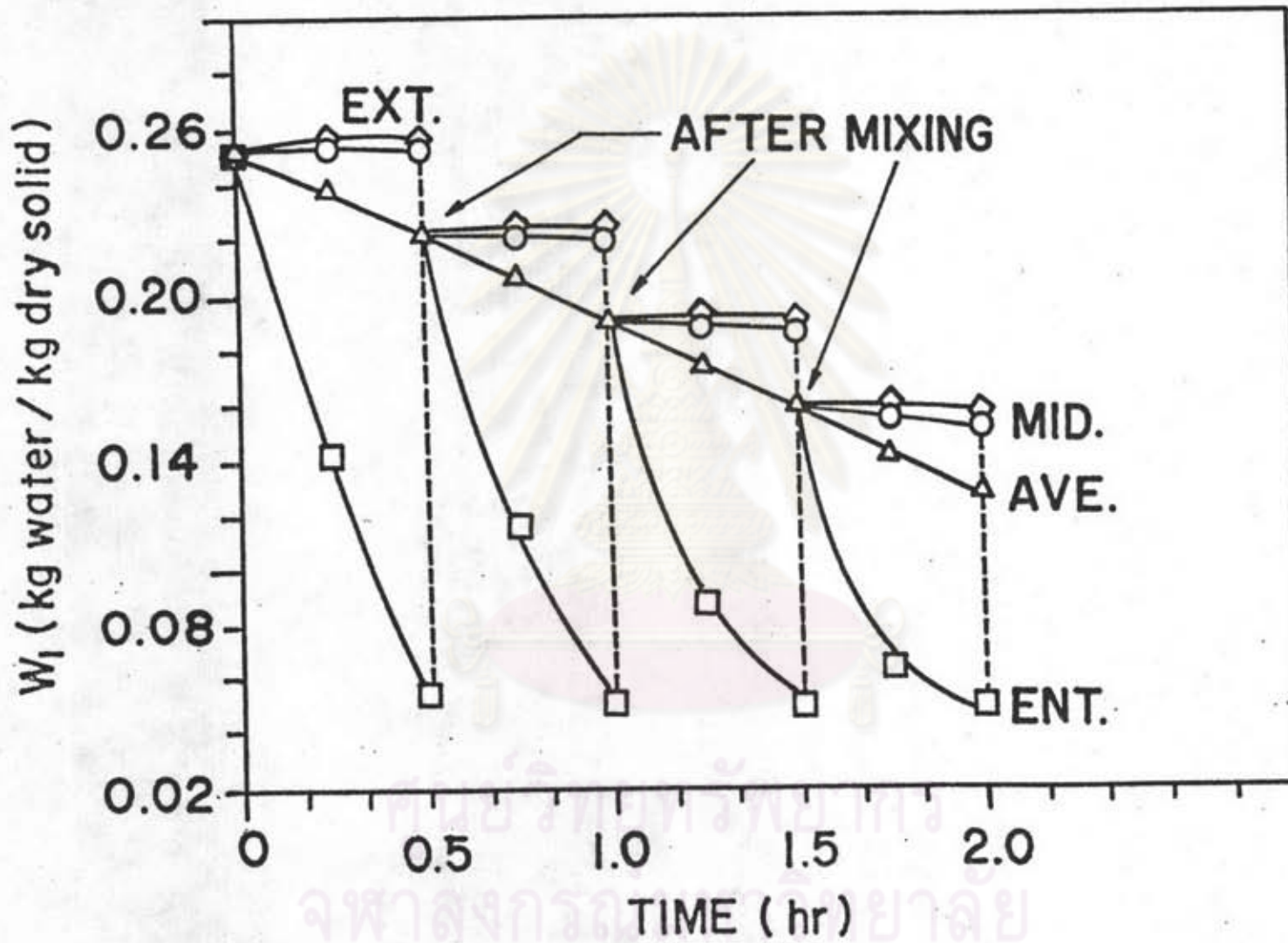
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



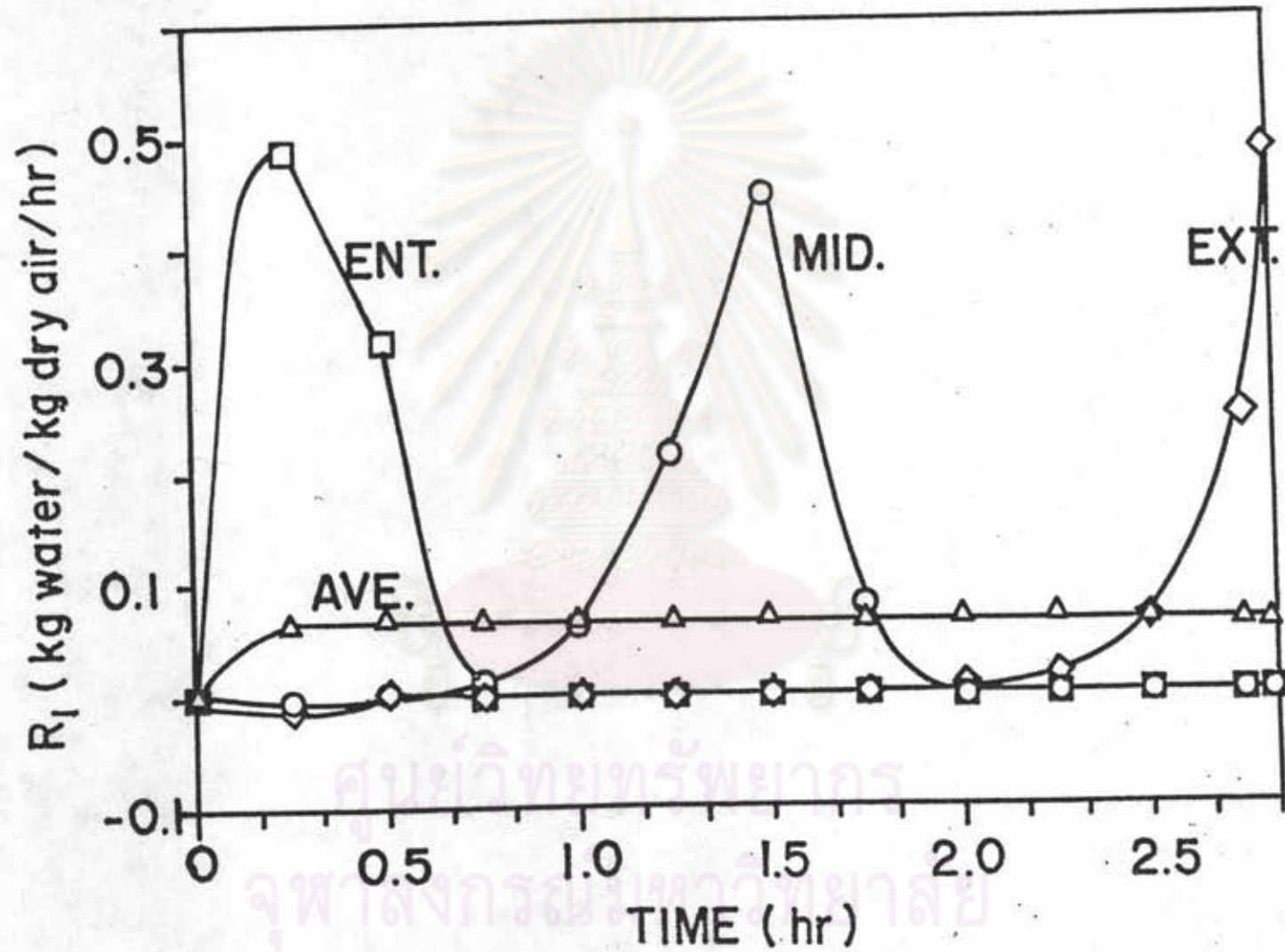
รูป 4.11 ความเข้มข้นเวลาตำแหน่งต่างในเบด ผลการซึมและการอบแห้งข้าวโพดที่ $W_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ C$ และ $r = 0$ (เส้นกราฟ ENT., MID., EXT. และ AVE. หมายถึง บริเวณทางเข้า, บริเวณตอนกลาง, บริเวณปลายทางออก และผลเฉลี่ยของทั้งเบด)



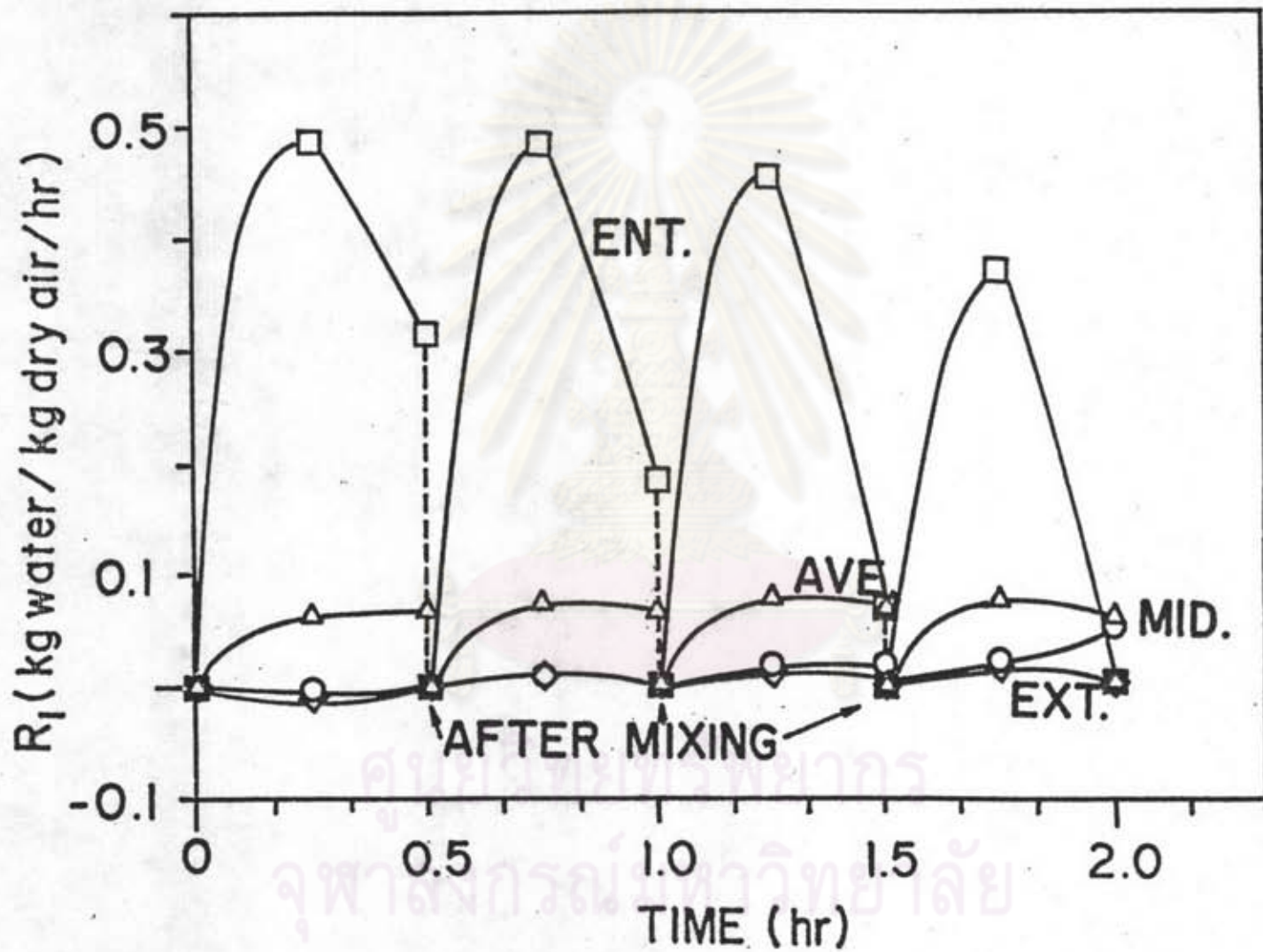
รูป 4.12 ความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลา ผลการขี้นุ้เลตการอบแห้งข้าวโพด กรณีการผสมวัสดุในเบดทุกๆ 30 นาที, $W_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 0$



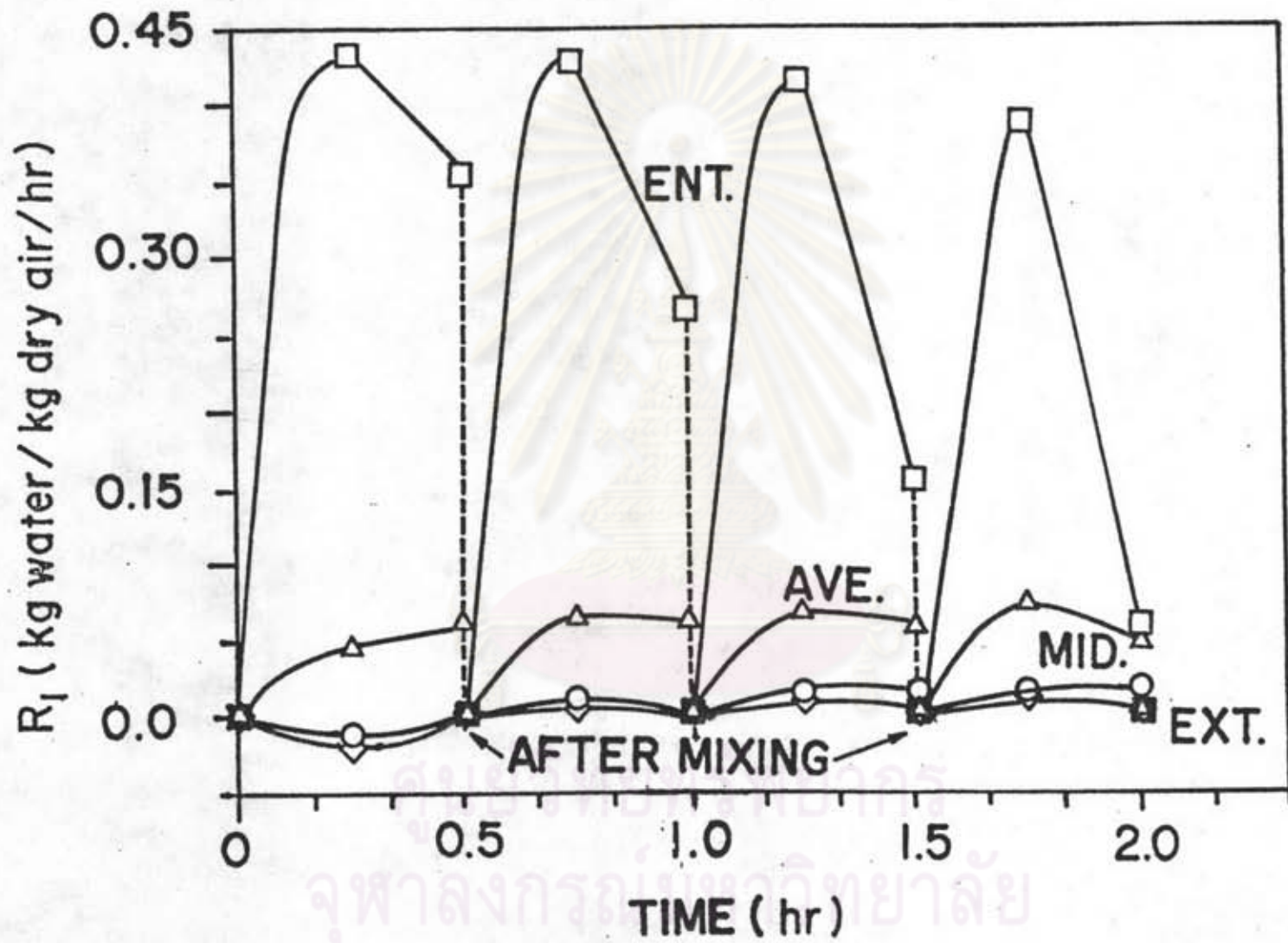
รูป 4.13 ความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลา ผลการซึมเล็ดการอบแห้งข้าวโพด กรณีที่มีการหมุนเวียนลมทั้ง $r = 1.0$, การผสมวัสดุในเบดทุกๆ 30 นาที, $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$



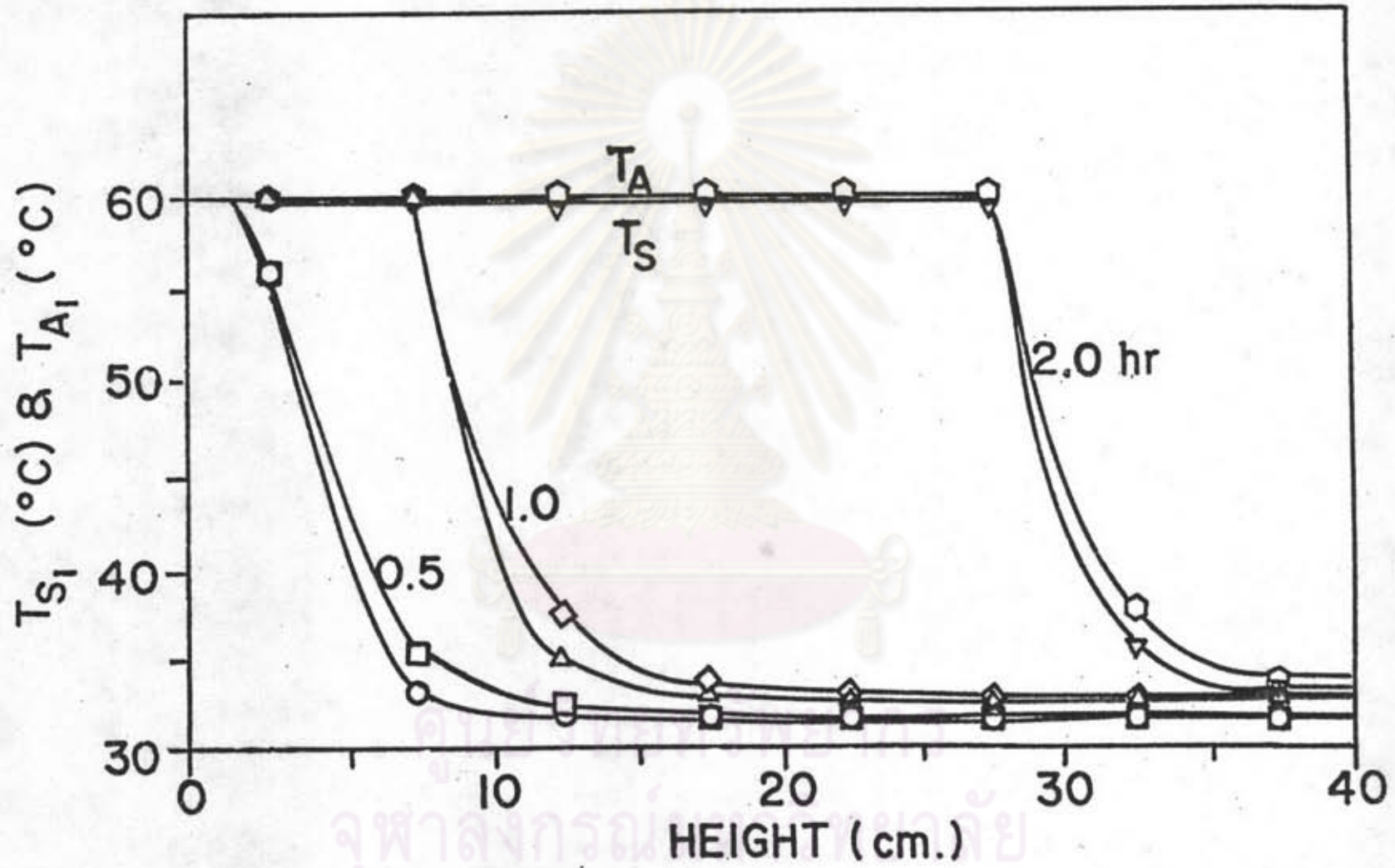
รูป 4.14 อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆในเบดกับเวลา ผลการขี้นุ้เลตการอบแห้งข้าวโพดกรด่ปกติ
 $W_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$



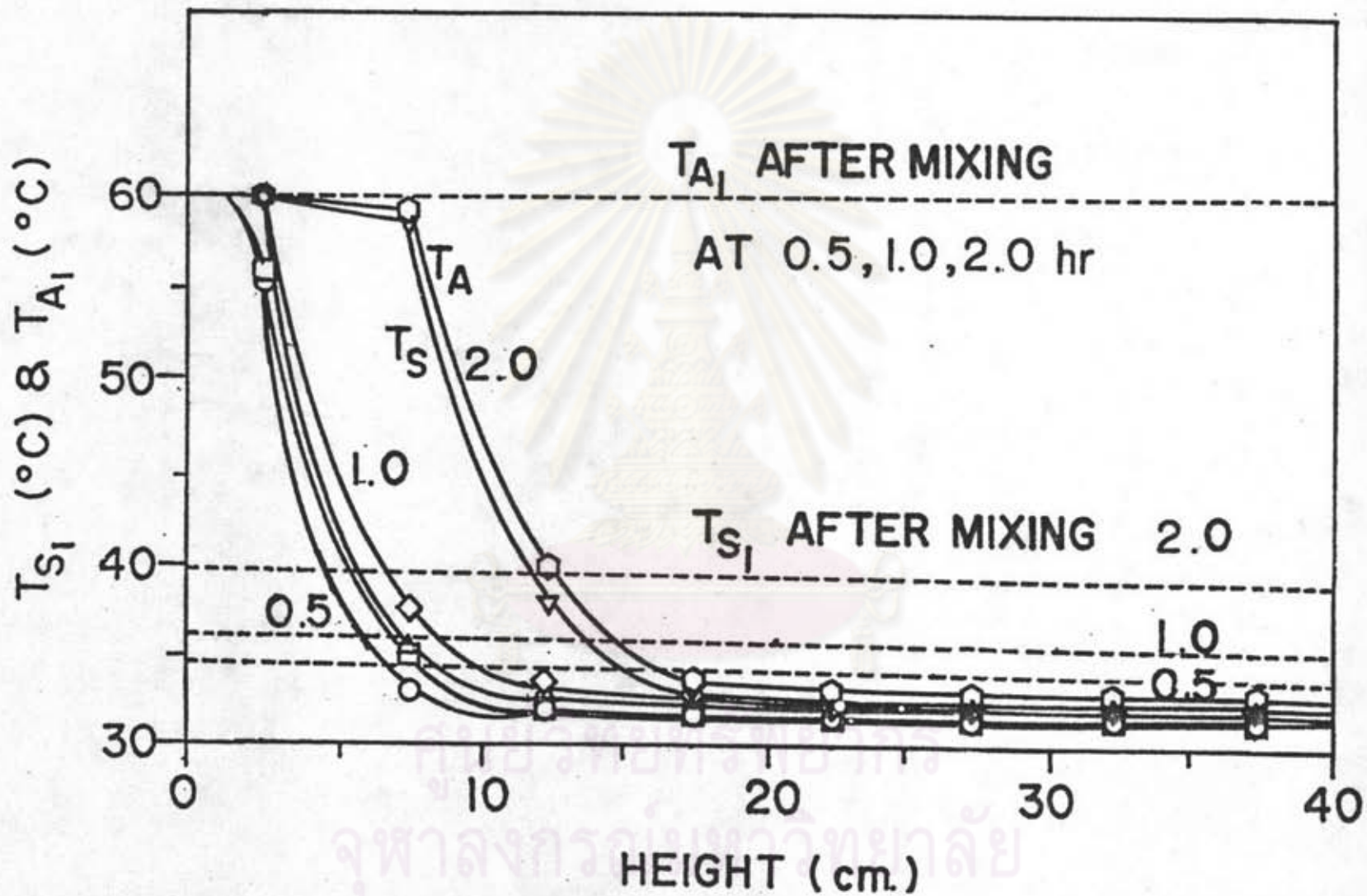
รูป 4.15 อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆในเบดกับเวลา ผลการซึมุเลตการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, การผสมวัสดุในเบดทุกๆ 30 นาที



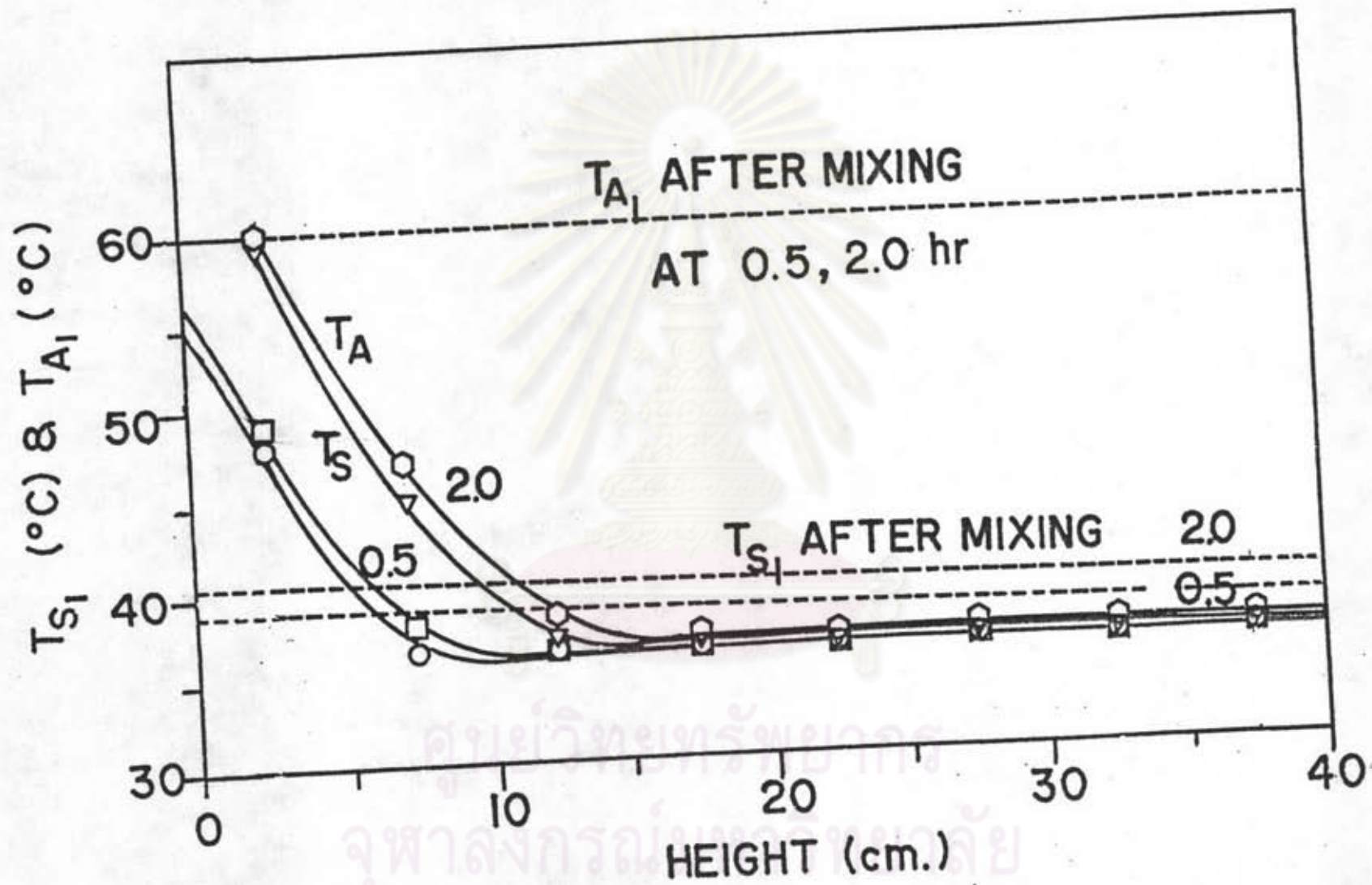
รูป 4.16 อัตราการอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆในเบดกับเวลา ผลการซึมเลดการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 1.0$, การผสมวัสดุในเบดทุกๆ 30 นาที



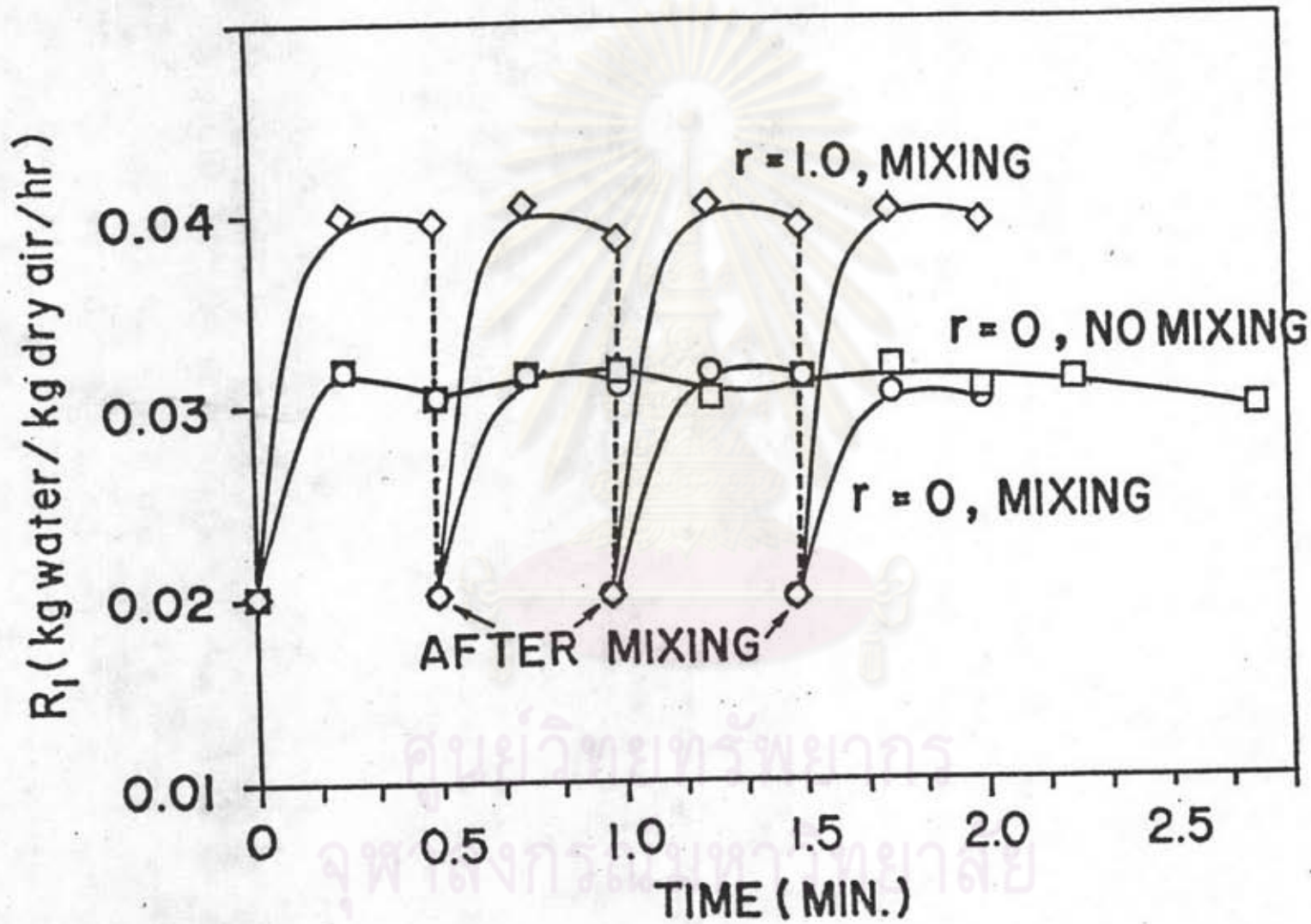
รูป 4.17 การกระจายของอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา ผลการขึ้นเลขการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b.,
 $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 0$



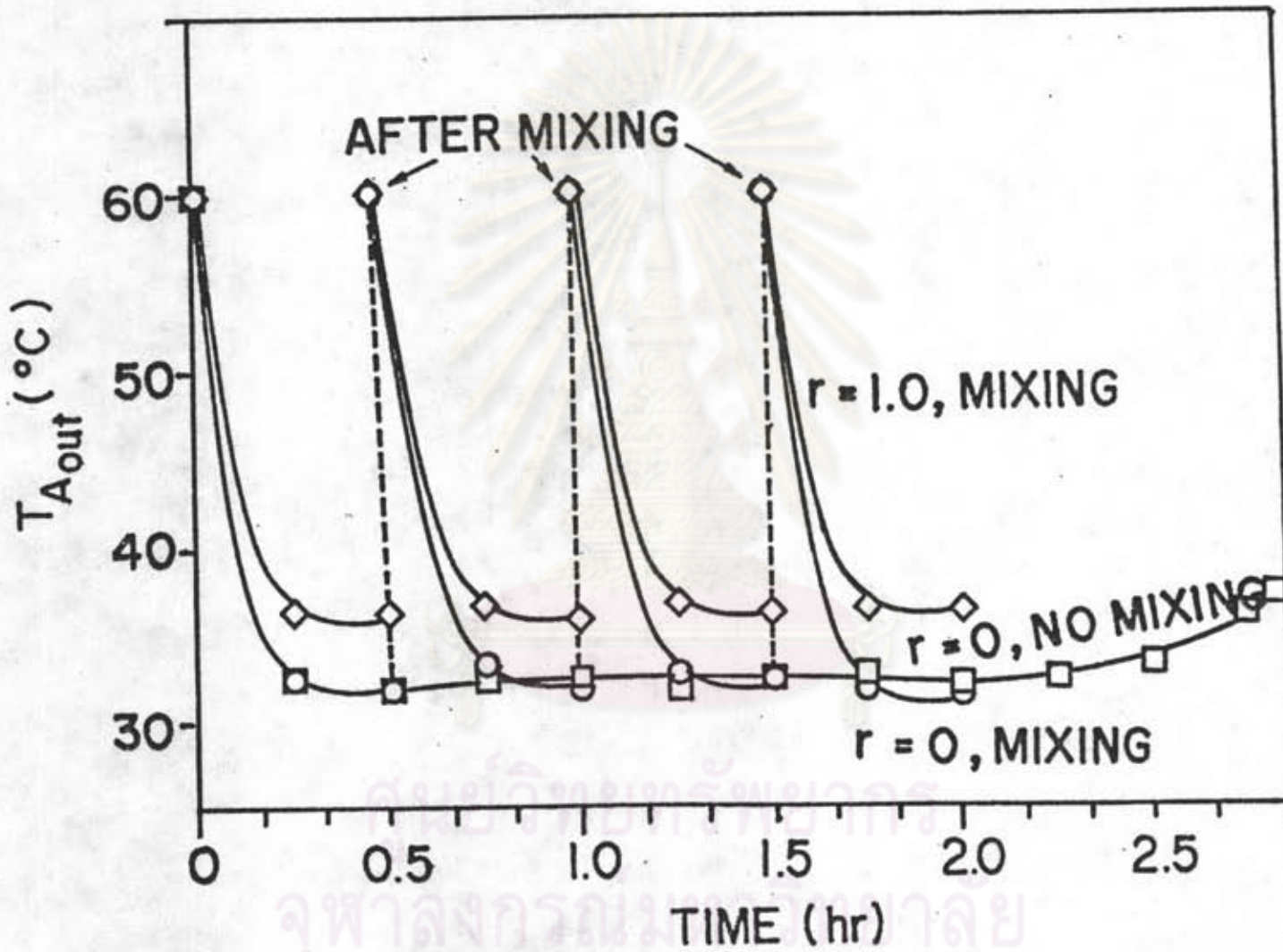
รูป 4.18 การกระจายของอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา ผลการซึมเลศการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 0$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที



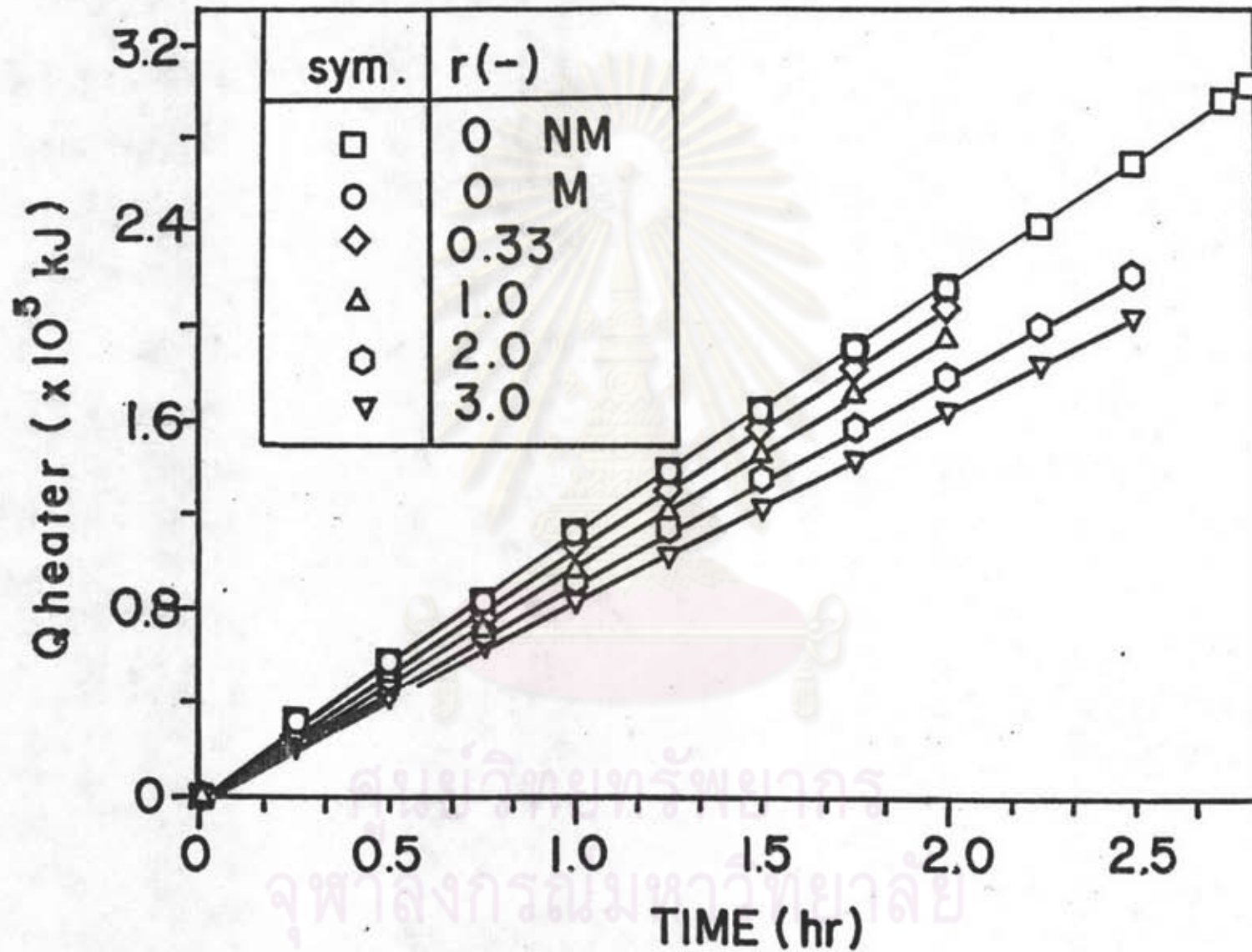
รูป 4.19 การกระจายของอุณหภูมิวัสดุและอุณหภูมิของลมร้อนกับเวลา ผลการขี้นุ้ลดการอบแห้งข้าวโพด
 $W_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, $r = 1.0$ และผสมวัสดุทุก
 30 นาที



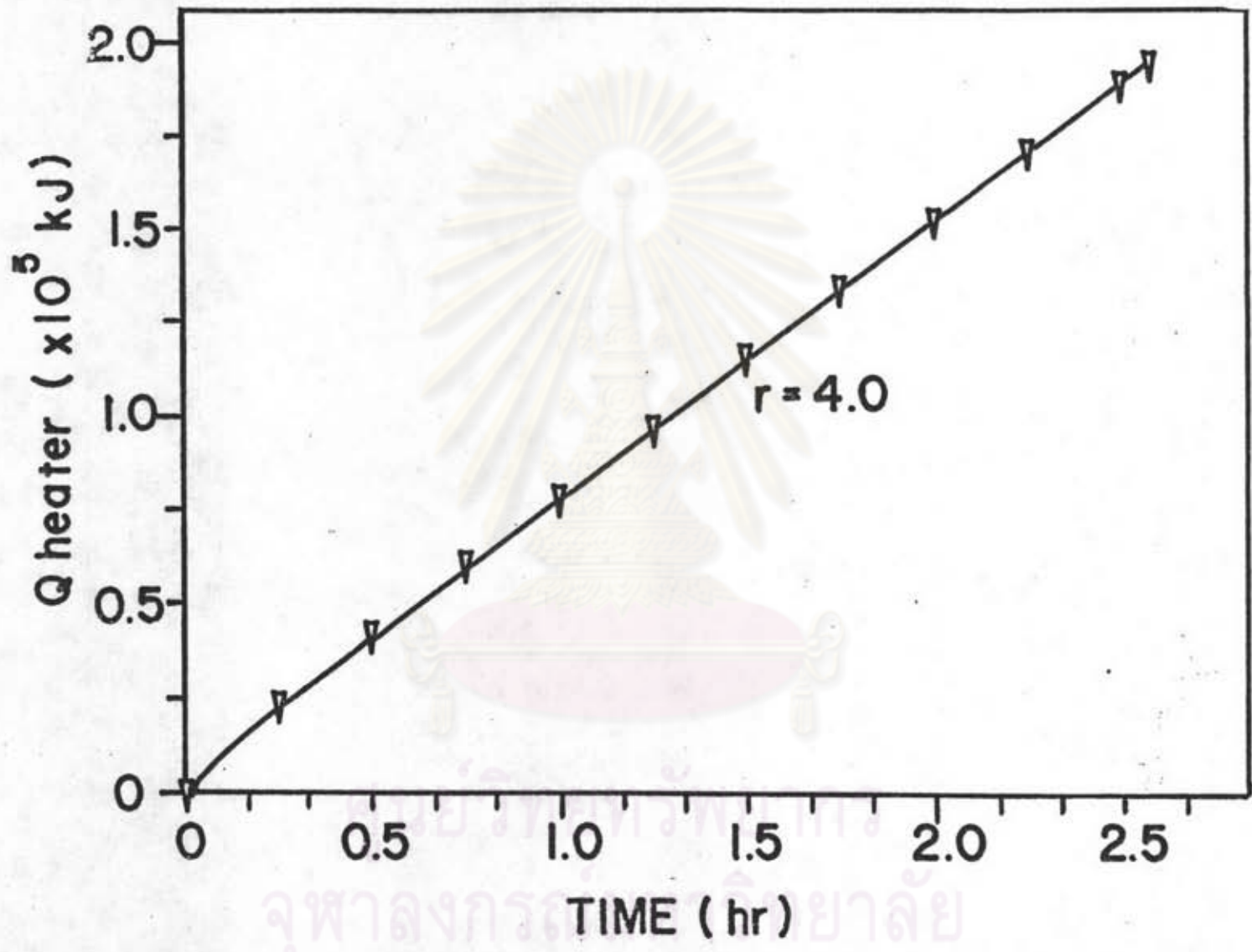
รูป 4.20 ความชื้นลมร้อนที่ทางออกจากเครื่องกับเวลา ผลการขี้นมเลตการอบแห้งข้าวโพด เปรียบเทียบ 3 กรณีคือ I) กรณีปกติ, II) กรณี $r = 0$ และผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที และ III) กรณี $r = 1.0$ และผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที โดยมี $w_{in} = 0.25 \text{ d.b.}$, $v_{bed} = 0.4634 \text{ m/s}$, $T_A = 60^\circ \text{C}$



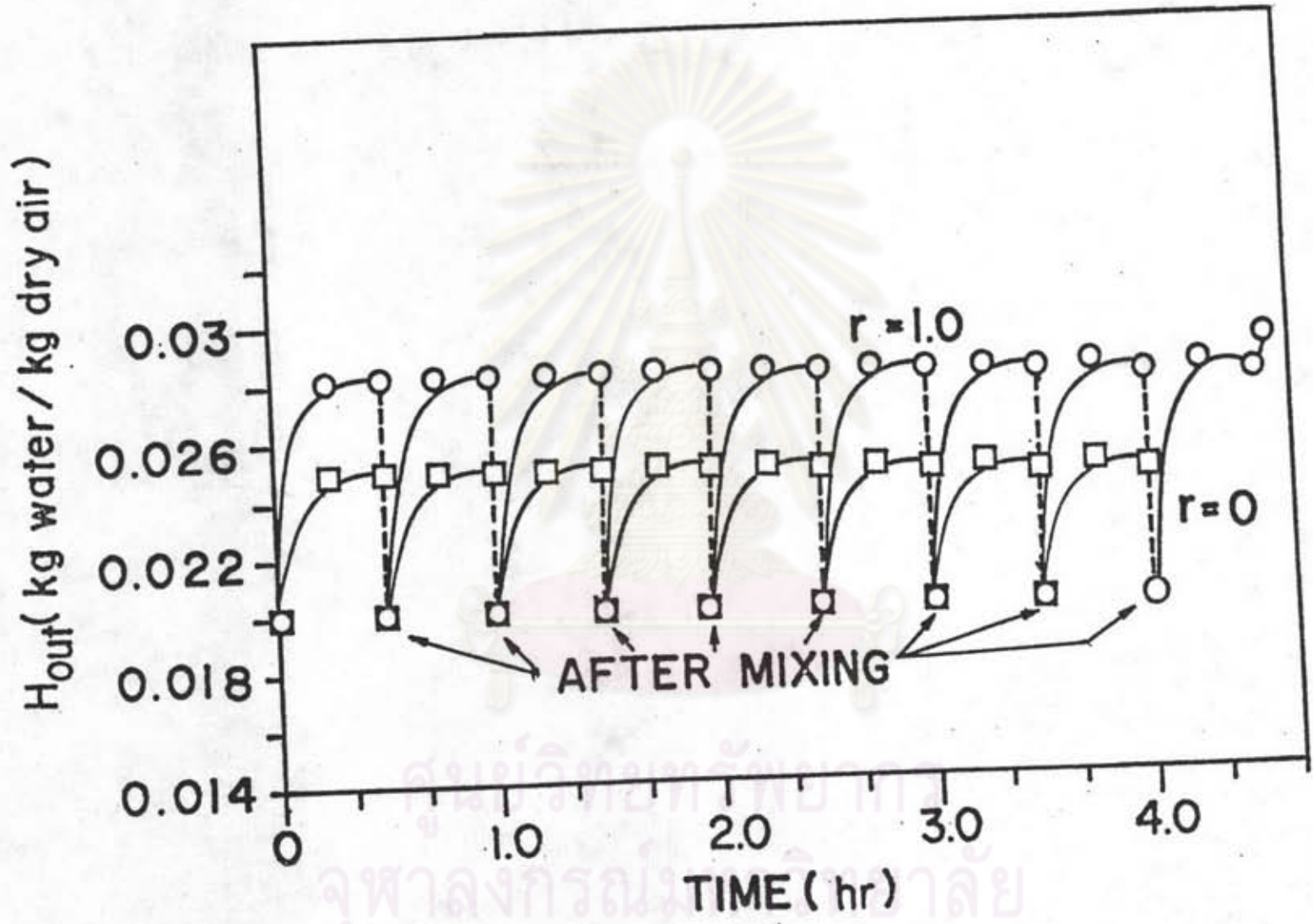
รูป 4.21 อุณหภูมิความร้อนขาออกจากเครื่องกับเวลา ผลการขึ้นเลขการรอบแห้งข้าวโพด เปรียบเทียบ 3 กรณี
 ดังรูป 4.20



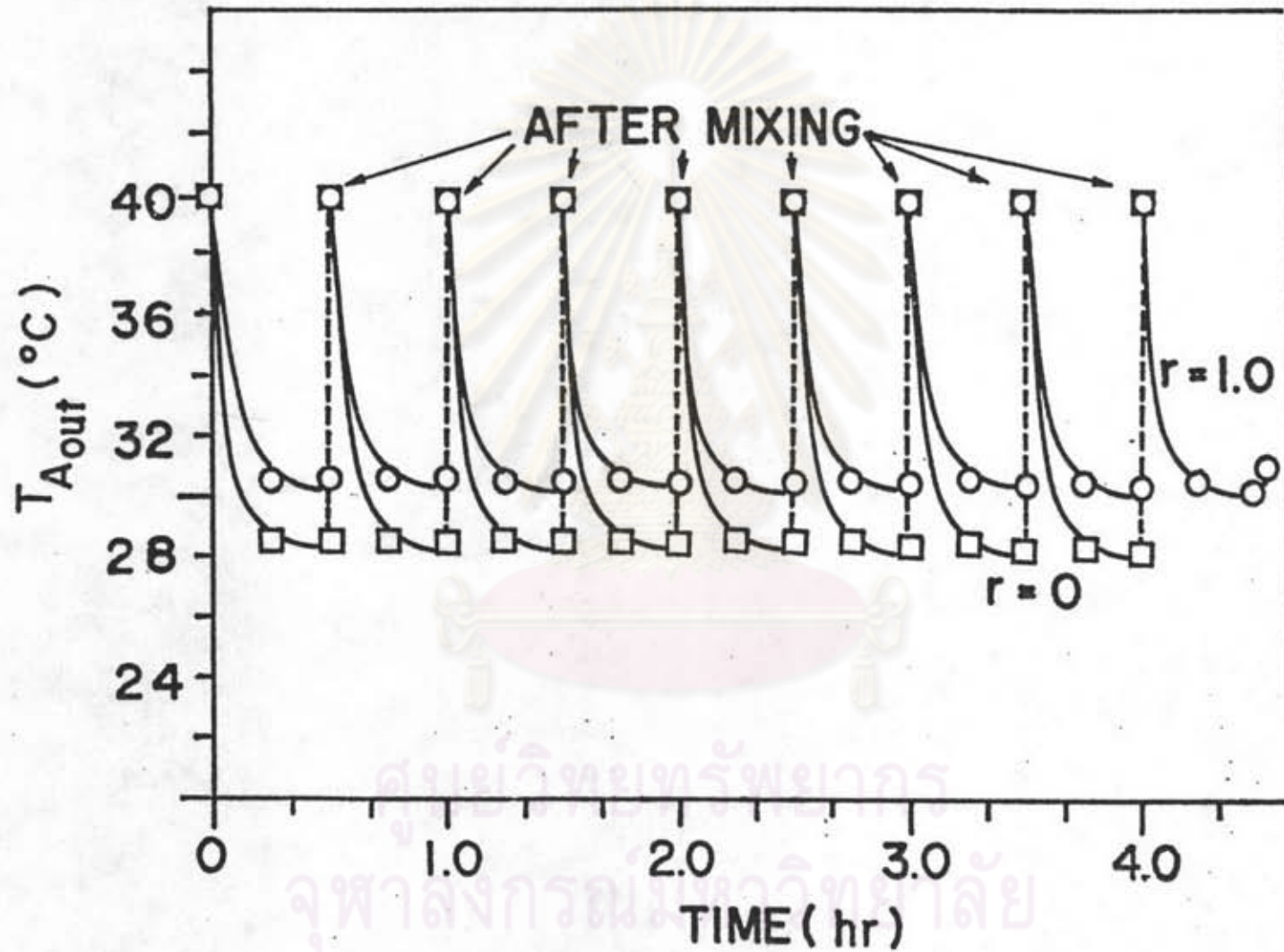
รูป 4.22 (a) ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมร้อนกับเวลา ผลการขี้นุมเลศการรอบแห้งข้าวโพดกรณี
 $T_A = 60^\circ\text{C}$, $W_{in} = 0.25 \text{ d.b.}$, $V_{bed} = 0.4634 \text{ m/s}$ (ยังมีต่อ)



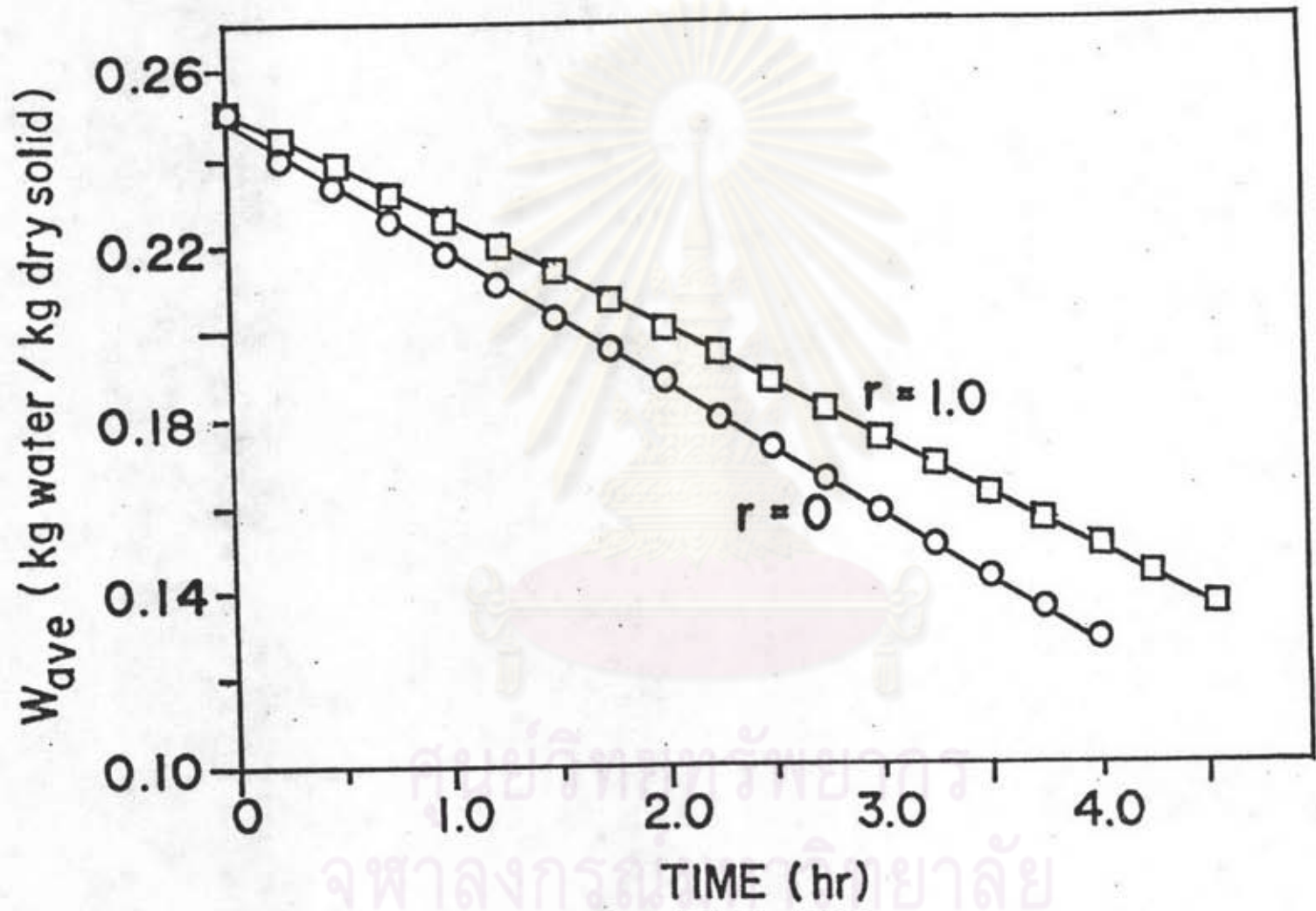
รูป 4.22 (b)



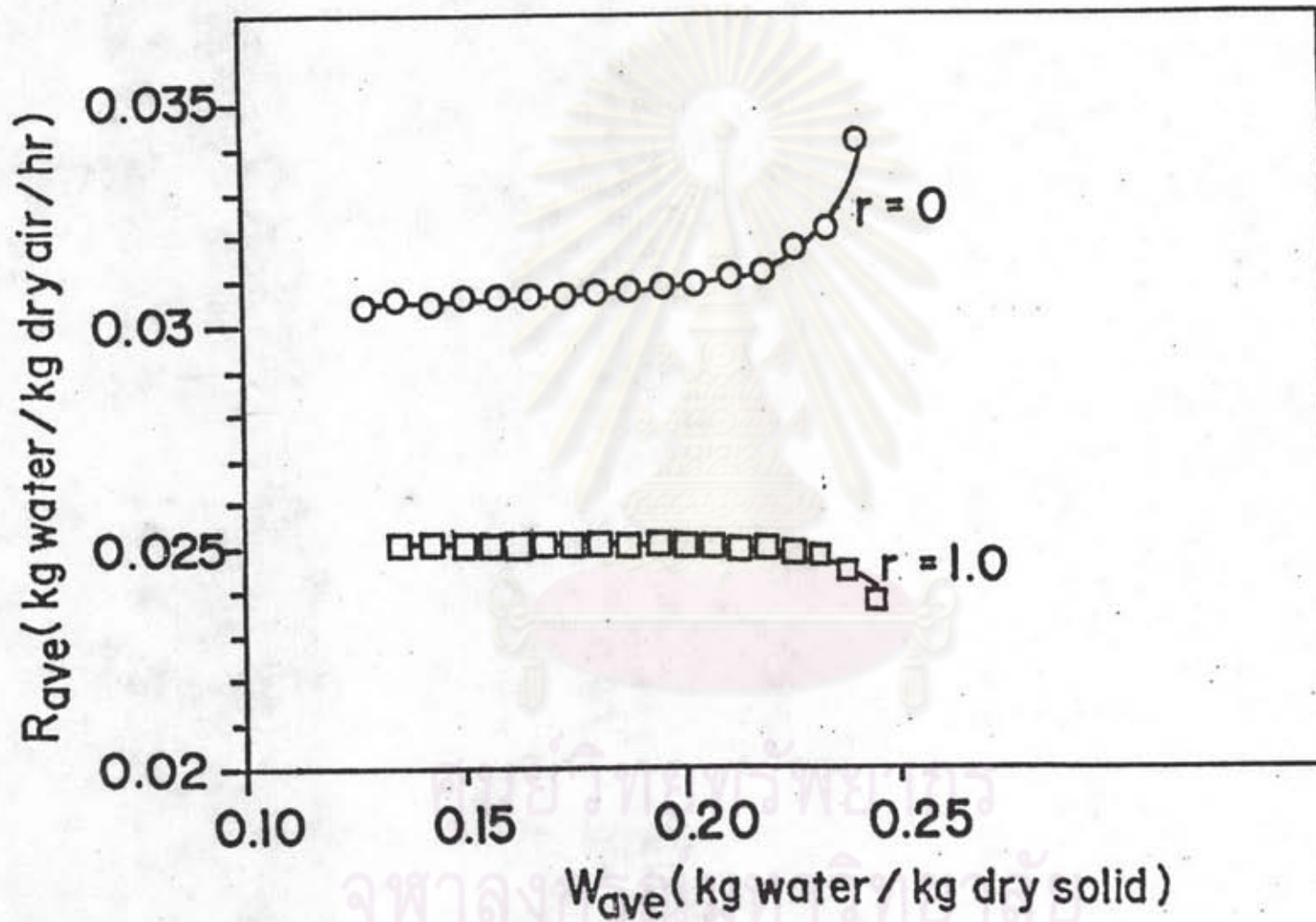
รูป 4.23 ความชื้นลมร้อนที่ทางออกจากเครื่องกับเวลา ผลการที่มุมเลศการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที, $T_A = 40^\circ\text{C}$



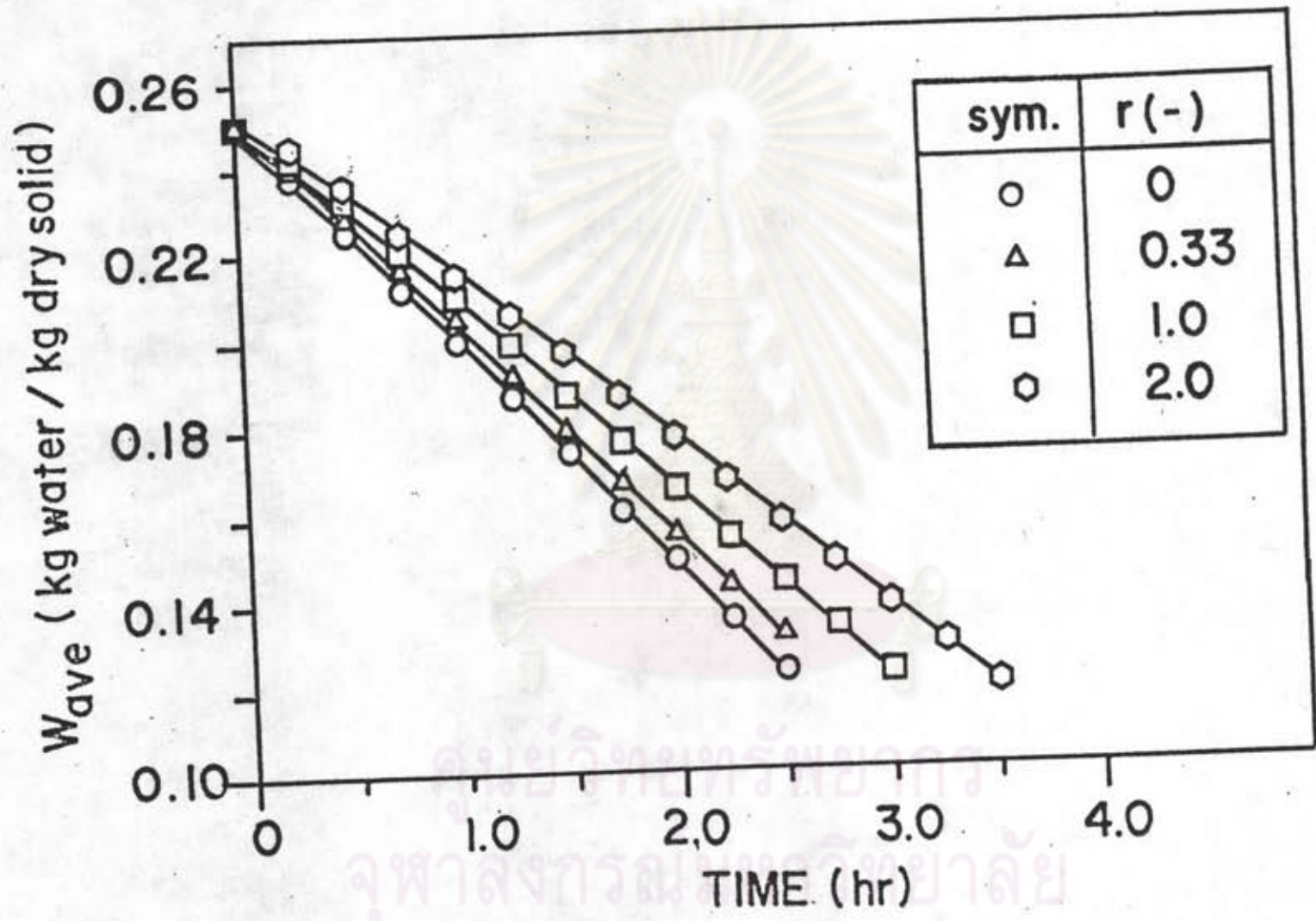
รูป 4.24 อุณหภูมิลมร้อนขาออกกับเวลา ผลการخم้เมล็ดการอบแห้งข้าวโพด $w_{in} = 0.25$ d.b.,
 $V_{bed} = 0.4634$ m/s, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที, $T_A = 40$ °C



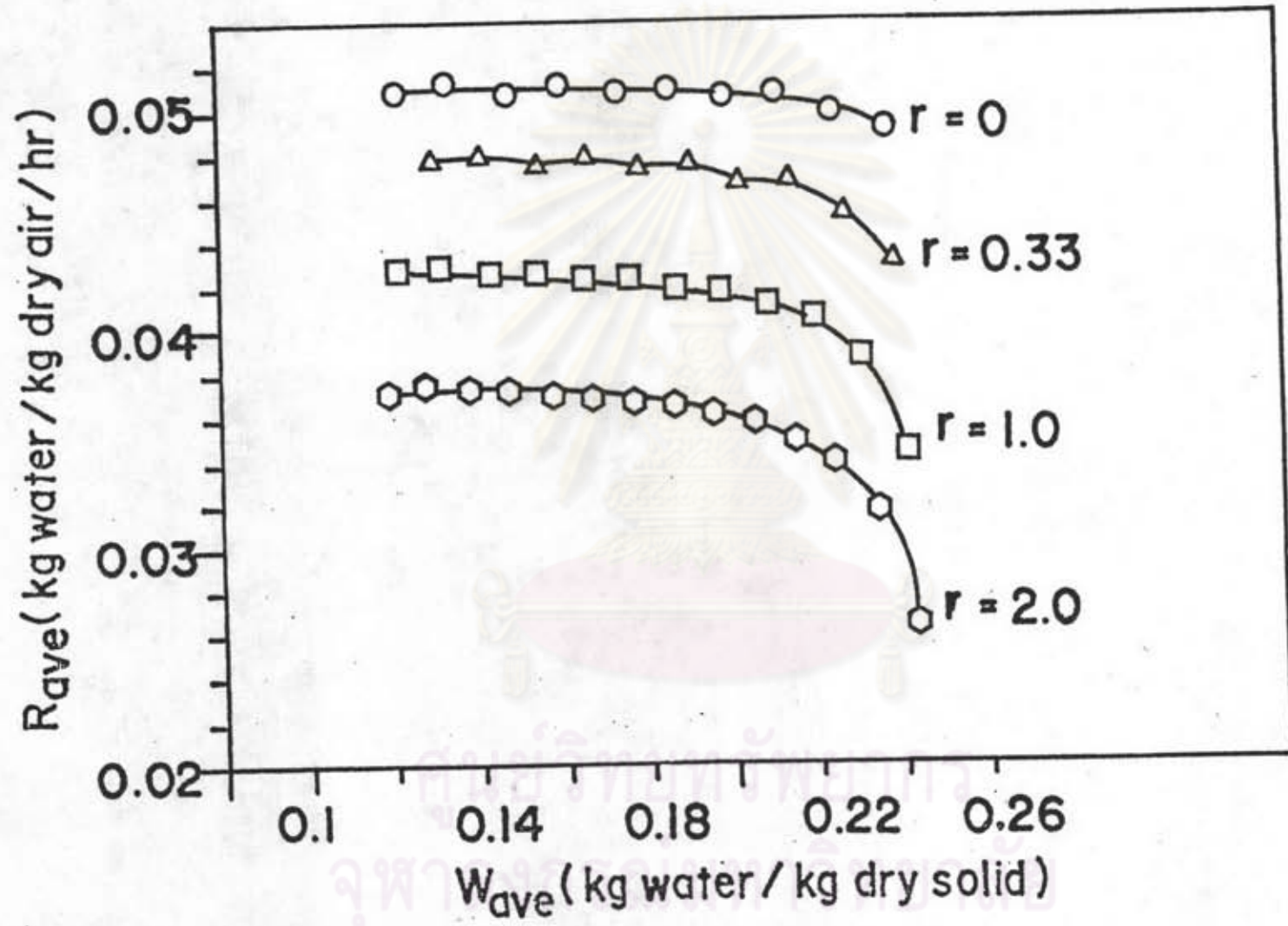
รูป 4.25 ความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ผลการขีมิ้เลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b.,
 $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 40^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อก่า $r = 0$ และ 1.0



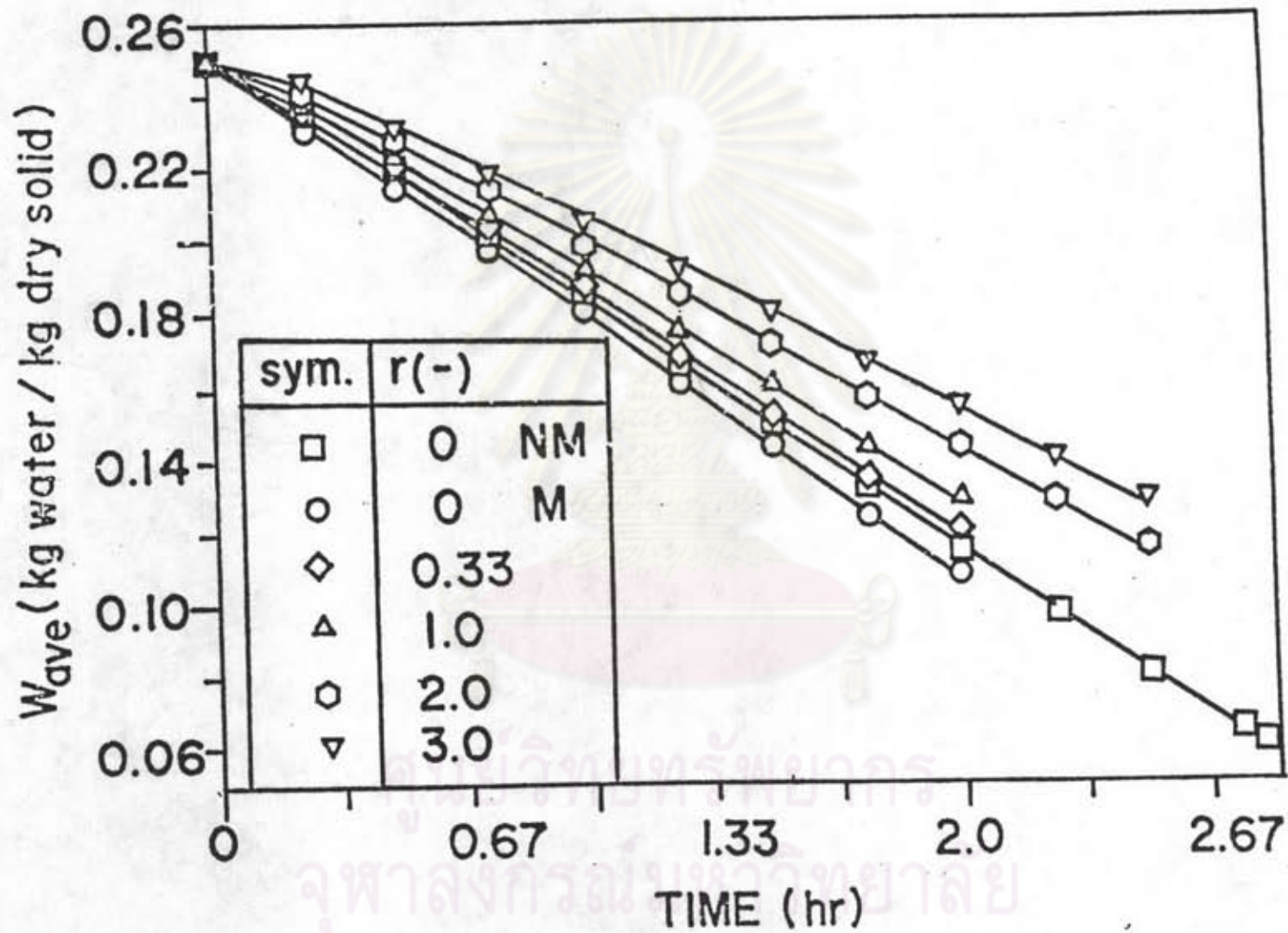
รูป 4.26 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขึ้นรูปเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 40$ °C, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0$ และ 1.0



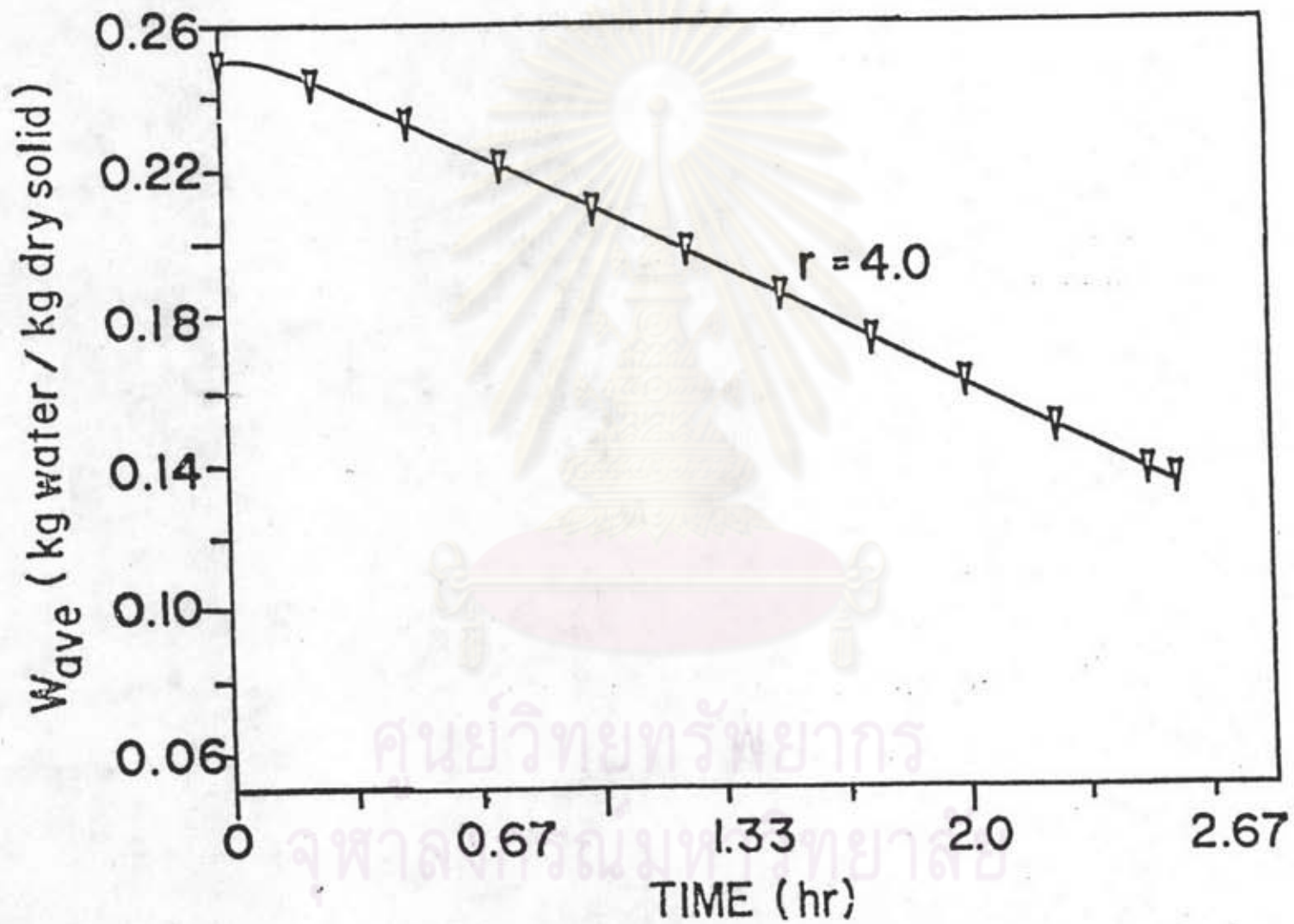
รูป 4.27 ความชื้นเฉลี่ยกับเวลา ผลการซึมเล็ดการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 50^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0



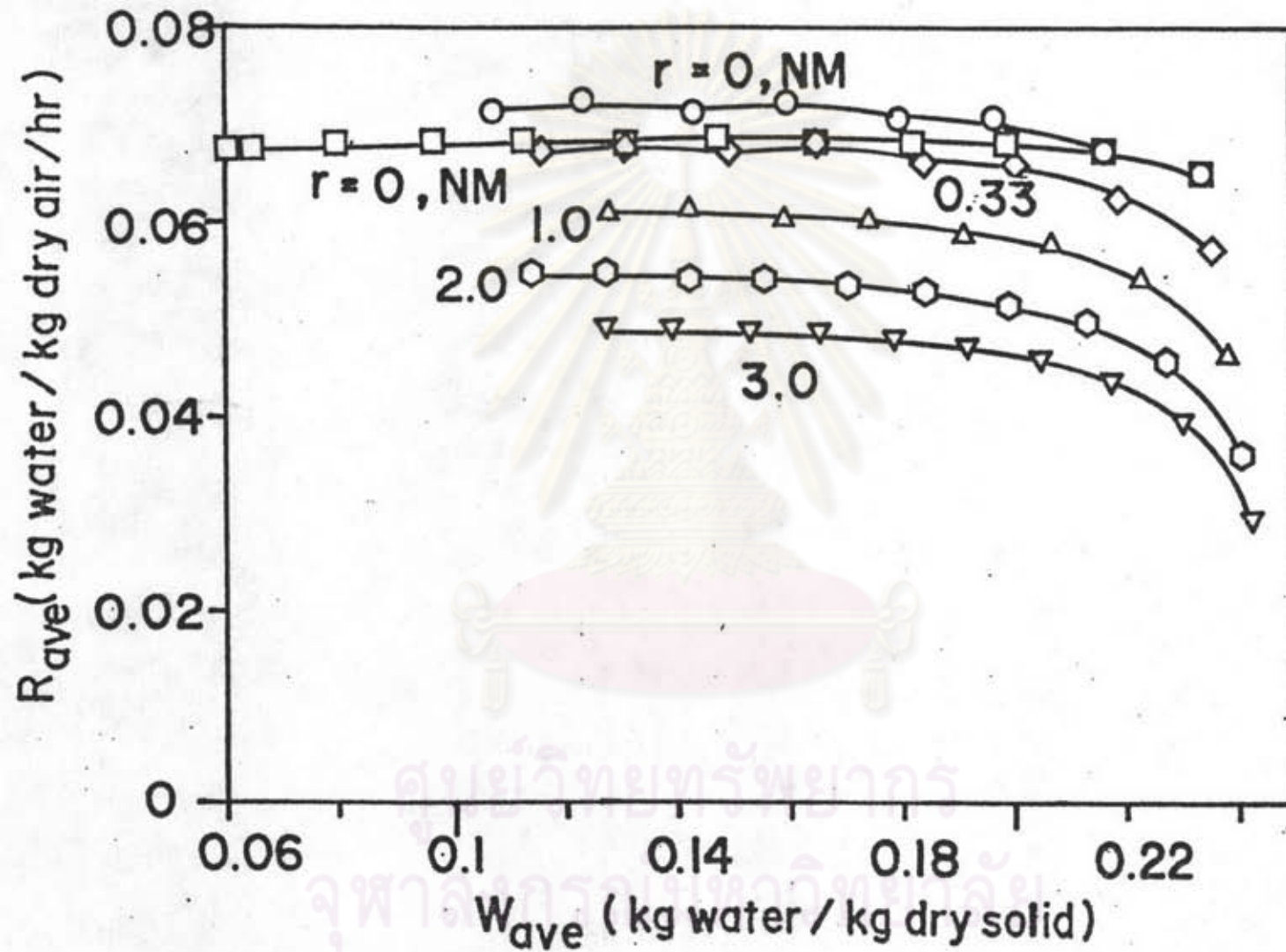
รูป 4.28 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการที่โมเลกุลการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 50^\circ\text{C}$, สัมผัสวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0



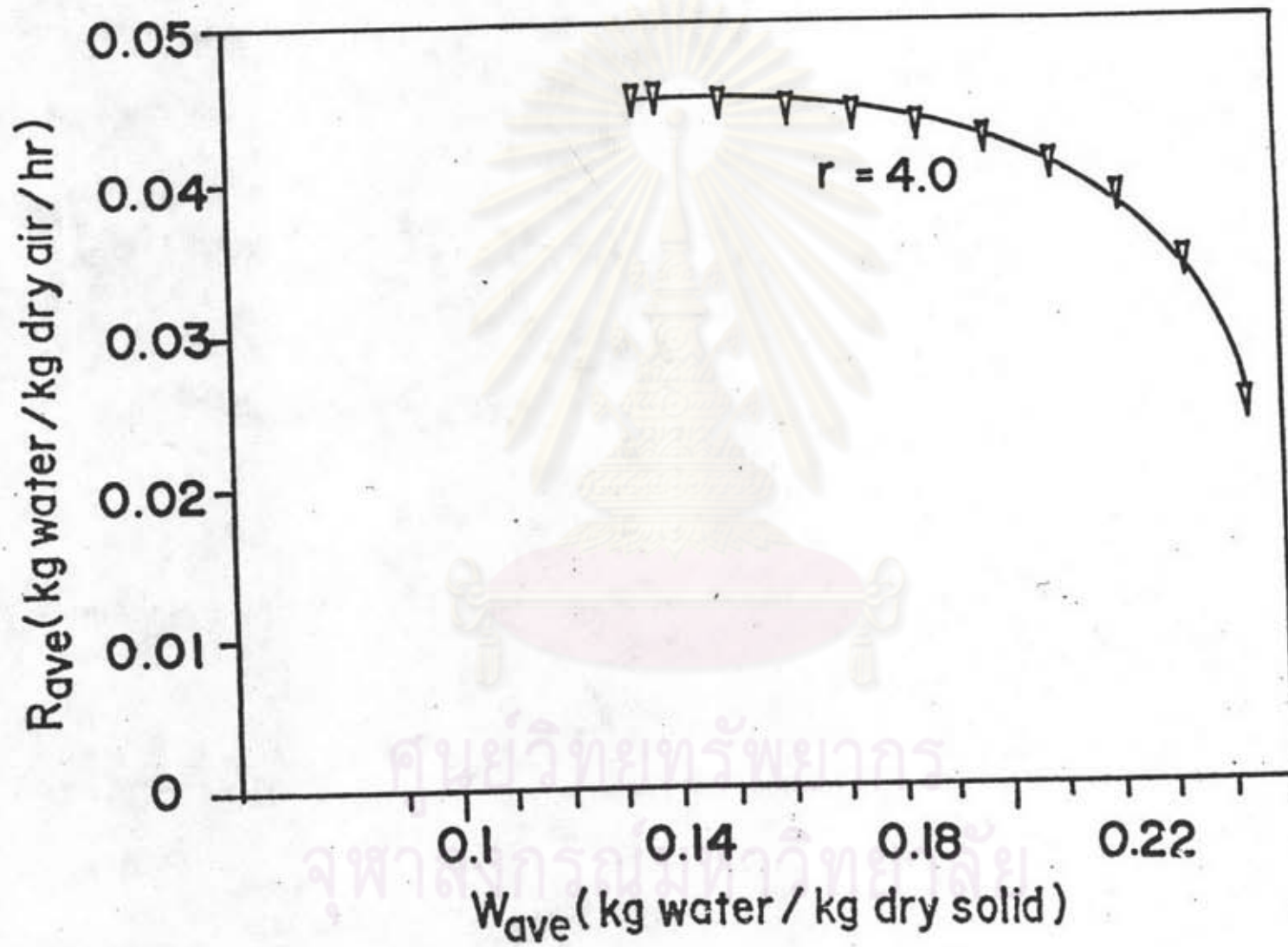
รูป 4.29 (a) ความชื้นเฉลี่ยของเบดกับเวลา ผลการซึมเล็ดการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ทั้งที่ไม่มีและมีการผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที (ยังมีต่อ)



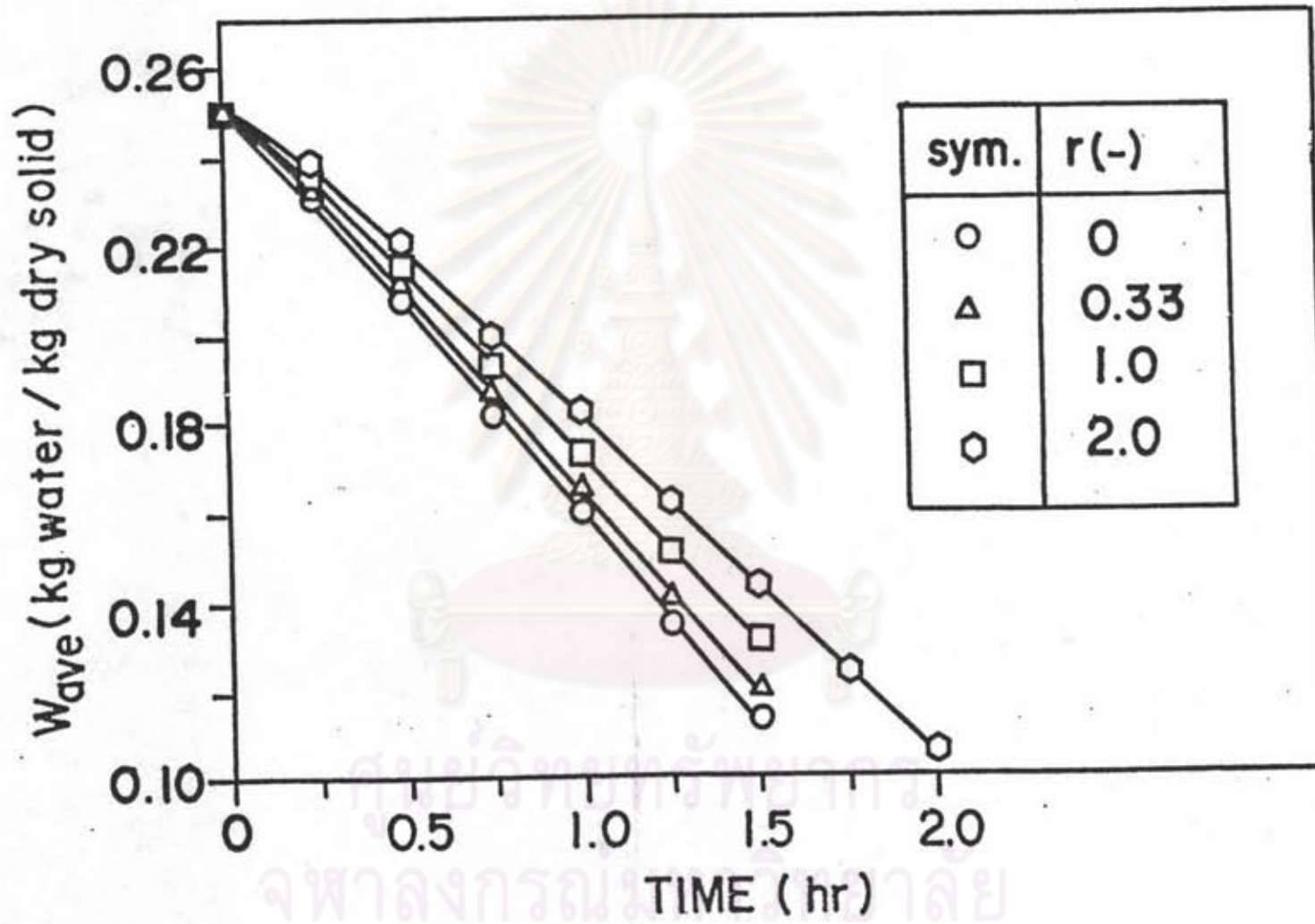
รูป 4.29 (b)



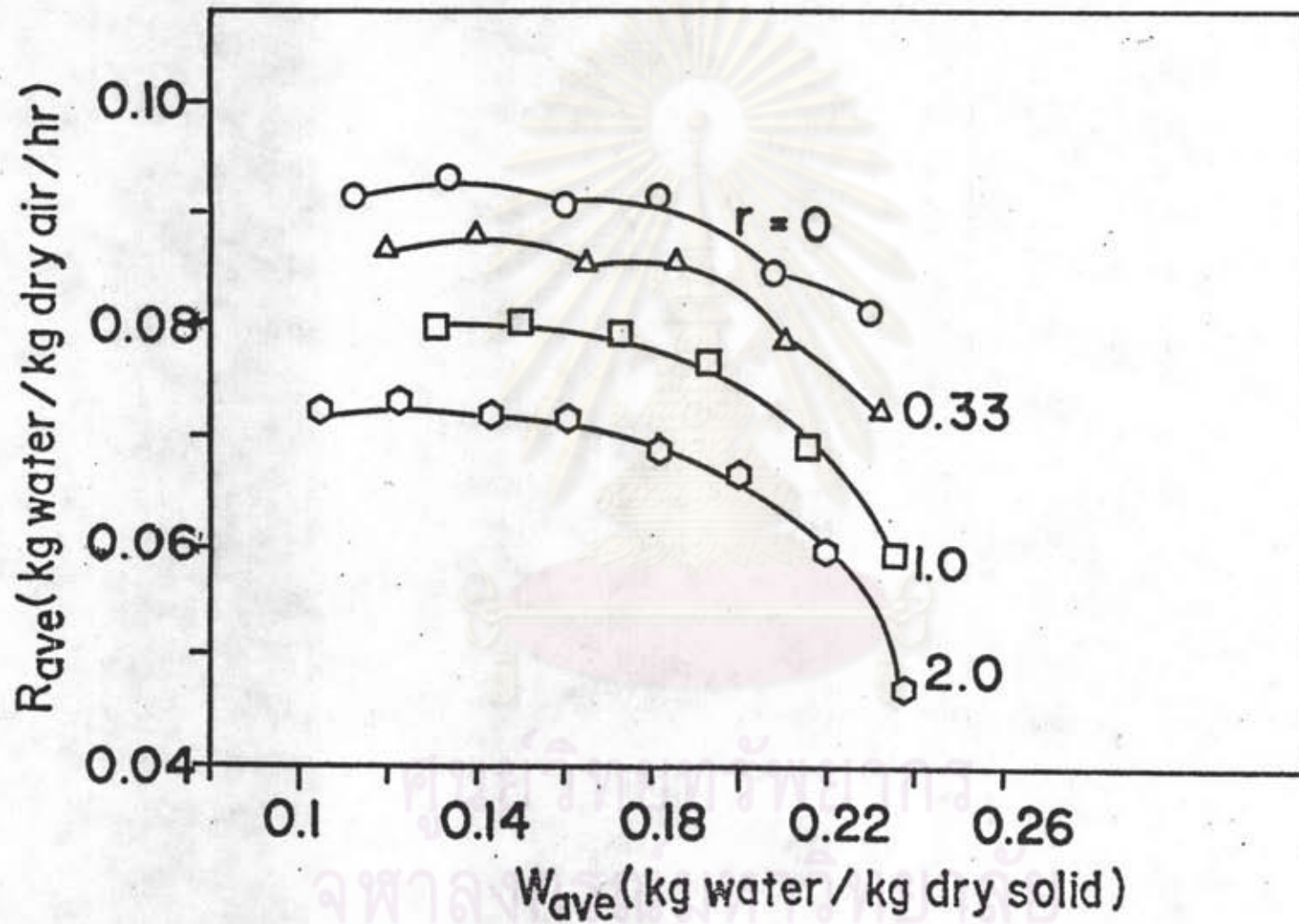
รูป 4.30 (a) อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขี้นผลของการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ C$, ทั้งที่ไม่มีและมีการผสมวัสดุทุกา 30 นาที (ยังมีต่อ)



รูป 4.30 (b)



รูป 4.31 ความชื้นเฉลี่ยของเบดกับเวลา ผลการซึมเลดการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 70$ °C, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0



รูป 4.32 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการหาค่าเฉลี่ยการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.25$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 70^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0

จากรูป 4.11 แสดงการกระจายของความชื้นที่บริเวณทางเข้าเครื่อง , บริเวณตรงกลาง และบริเวณทางออกกับเวลา และความชื้นเฉลี่ยกับเวลา สำหรับกรณีการอบแห้งธรรมดา (ไม่มีการผสมวัสดุ) พบว่าความชื้นของวัสดุระเหยออกมากที่บริเวณทางเข้า และระเหยน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ทางออกตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเกิดการควบแน่นใหม่ (recondensation) ของน้ำที่ด้านหลังของเบคไค้ ถ้าความดันย่อย (partial pressure) ของความชื้นในลมร้อนขณะนั้นมีค่ามากกว่าความดันไอของความชื้นในวัสดุ อนึ่งในกรณีที่มีการผสมวัสดุ (รูป 4.12) ปรากฏการณ์ก็จะเหมือนกับกรณีที่ไม่มีการผสมวัสดุ แต่ลักษณะของกราฟจะเป็นรูปขั้นปลาและบันได ก่อนการผสมวัสดุ กราฟจะมีรูปร่างเหมือนกับกรณีที่ไม่มีการผสมวัสดุ เมื่อทำการผสมวัสดุในเบค ความชื้นที่จุดต่างๆในเบคจะเท่ากับความชื้นเฉลี่ย ทำให้กราฟมีการกระโดดเป็นรูปขั้นและบันได เมื่อทำการอบแห้งต่อ กราฟก็จะยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม แต่ลดลงเร็วขึ้น (อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น) และเมื่อผสมวัสดุในเบคอีก กราฟก็จะมีการกระโดดไปอย่างนี้เรื่อยๆ จนกว่าจะถึงความชื้นตามความต้องการ

ส่วนกรณีที่มีการหมุนเวียนลมทั้ง เช่น $r = 1.0$ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ตำแหน่งต่างๆในเบคกับเวลา (ดูรูป 4.13) จะมีลักษณะเหมือนกับกรณีที่มีการผสมวัสดุในเบค (รูป 4.12) นั่นคือจะมีลักษณะเป็นขั้นและบันได แต่กราฟจะลาดน้อยกว่า (เนื่องจากอัตราการอบแห้งที่ต่ำกว่า) และใช้เวลาการอบแห้งนานกว่า (ดูตาราง 4.8)

จากรูป 4.14 แสดงอัตราการอบแห้งวัสดุที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลา ระหว่างการอบแห้งปกติ เมื่อเริ่มอบแห้งวัสดุที่บริเวณทางเข้าจะเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงอย่างรวดเร็ว และย่านที่เกิดการอบแห้งช้าลงนี้จะค่อยๆ เคลื่อนที่ไปหาปลายทางออก ณั้ขณะที่อยู่ ก็พบว่าบริเวณที่อยู่ด้านหลังของโซนอบแห้ง อาจเกิดการควบแน่นใหม่ของไอน้ำไค้ ส่วนอัตราการอบแห้งเฉลี่ยนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเหมือนรูป 3.2

สำหรับกรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุ รูป 4.15 แสดงอัตราการอบแห้งวัสดุกับเวลา พบว่าก่อนการผสมวัสดุในเบคจะมีลักษณะเหมือนกับรูป 4.14 และหลังผสมวัสดุในเบค อัตราการอบแห้งที่บริเวณทางเข้าจะมีค่าคงที่ แต่ที่บริเวณที่เหลือจะยังระเหยช้ากว่าที่บริเวณทางเข้า แต่ค่อยๆ เร็วขึ้นจากเดิม ลักษณะของกราฟยังคงเหมือนกับก่อนการผสมวัสดุในเบคและจะเปลี่ยนแปลงอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนความชื้นวัสดุจะถึงความต้องการ สำหรับเหตุผลที่ใช้อธิบายนั้นเหมือนกับในหัวข้อ 4.2.2.2

ส่วนกรณีการอบแห้งที่มีอัตราส่วน $r = 1.0$ และมีการผสมวัสดุในเบค (รูป 4.16) นั้น ลักษณะจะเหมือนกับกรณี การอบแห้งที่มีการผสมวัสดุในเบค แต่ $r = 0$ แต่อัตราการอบแห้งกับเวลาที่ตำแหน่งต่างๆจะน้อยกว่า เพราะว่าความชื้นในลมทั้งนั้นมีค่าสูง (ดูรูป 4.20 และ 4.21) เมื่อหมุนเวียนกลับมาผสมกับลมใหม่ (fresh air) แล้วอุณหภูมิตามต้องการลมร้อนที่ไค้จะมีความชื้นสูงขึ้น (และอุณหภูมิ กระเปาะเปียกก็จะสูงขึ้น) ทำให้ความสามารถใน

การอบแห้งของลมร้อนนี้ก็ย่อมต่ำลง แต่เมื่อมีการผสมวัสดุในเบค อัตรการอบแห้งก็จะเพิ่มขึ้นบ้าง ดังเห็นได้จากรูป 4.25 กราฟความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลาที่อุณหภูมิลมร้อน 40 °ซ มีลักษณะเหมือนกับรูป 4.29 และสามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน ส่วนกราฟอัตรการอบแห้งเฉลี่ย กับความชื้นเฉลี่ยนั้น ในรูป 4.25 ที่ $r = 0$ จะมีค่าสูงเมื่อเริ่มต้นและลดลงจนมีค่าคงที่ไปจนถึงความชื้นตามต้องการนั้น เพราะว่าเมื่อเริ่มต้นวัสดุซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อน การเปลี่ยนแปลงจึงมีลักษณะเหมือนรูป 3.2 และถึงแม้ว่าจะผสมวัสดุในเบคก็ตาม อุณหภูมิของวัสดุก็มีค่าเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อน จึงทำให้อัตรการอบแห้งหลังการผสมวัสดุมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ด้วยเหตุนี้การผสมวัสดุอบแห้งในเบค ในกรณีวัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อนจึงไม่จำเป็น

ในกรณีการอบแห้ง $r = 1.0$ และมีการผสมวัสดุในเบค เมื่อมีการหมุนเวียนลมทั้งกลับมาผสมกับลมใหม่จะทำให้ลมร้อนที่ได้มีความชื้นสูง, อุณหภูมิกะเปาะเปียกจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของวัสดุเริ่มต้น ทำให้กราฟอัตรการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเหมือนรูป 4.28 และเมื่อมีการผสมวัสดุในเบค อุณหภูมิของวัสดุก็ยังคงเท่ากับอุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อน จึงไม่มีผลให้อัตรการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเลย

จากรูป 4.16 - 4.18 จะเห็นว่า ลมร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงและความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อไหลผ่านเบค ขณะเดียวกันอุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ในช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ จนกระทั่งวัสดุในโชนแรกเริ่มระเหยไปจนเข้าสู่ช่วงอัตรการอบแห้งช้าลง อุณหภูมิของวัสดุส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นเข้าหาอุณหภูมิลมร้อน ส่วนอื่นๆก็ทยอยกันระเหยในช่วงดังกล่าวต่อไป จะพบว่าอุณหภูมิของวัสดุจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิลมร้อนมากในบริเวณปลายทางออก อันเป็นตัวควบคุมอัตรการอบแห้งเฉลี่ยดังที่กล่าวถึงไปแล้วข้างต้น เมื่อมีการผสมวัสดุนั้นจะทำให้อุณหภูมิของวัสดุมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งก็จะปรับตัวเข้าหาอุณหภูมิกะเปาะเปียกใกล้เคียง และอุณหภูมิของวัสดุที่ปลายทางออกก็จะเพิ่มขึ้น ส่วนการลดลงของอุณหภูมิลมร้อนและการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ยังคงเหมือนเดิม ส่วนกรณีที่ $r = 1.0$ และมีการผสมวัสดุด้วยนั้น การหมุนเวียนกลับมานั้นทำให้อุณหภูมิกะเปาะเปียกของลมร้อนมีค่าสูงขึ้น จึงให้กราฟในกรณีนี้ชันตัวสูงขึ้นกว่ากรณีปกติเล็กน้อยและจะพบว่ามีบางจุดที่อุณหภูมิของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิของลมร้อน เพราะเกิดการควบแน่นใหม่ คือ ความชื้นในลมร้อนควบแน่นกลับไปสู่วัสดุซึ่งจะทำให้วัสดุที่จุดนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 3)

จากรูป 4.25 - 4.32 แสดงกราฟความชื้นเฉลี่ยกับเวลา และกราฟของอัตรการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย สำหรับกรณีอุณหภูมิลมร้อนเข้า 50, 60 และ 70 °ซ ตามลำดับ เห็นได้ว่าปรากฏการณ์ต่างๆ จะพบว่าจะมีลักษณะเหมือนกับการที่อุณหภูมิลมร้อน 60 °ซ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิลมร้อน 40, 50, 60 และ 70 °ซ พบว่า เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น อัตรการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงและพลังงานความร้อนที่ต้องใช้อุ่นลมร้อนก็เพิ่มขึ้นด้วย เช่น อย่างกรณีการอบแห้ง $r = 0$ และผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที อุณหภูมิลมร้อน

40 °C เวลาอบแห้ง 240 นาที ต้องใช้พลังงานความร้อนอุ่นอากาศ 143,182.5 kJ, ส่วนกรณี
 อุณหภูมิลมร้อน 70 °C เวลาอบแห้ง 90 นาที ต้องใช้พลังงานความร้อนอุ่นอากาศ 214,773.2
 kJ เป็นต้น (ดูตาราง 4.8)

ตาราง 4.8 ผลการขี้นุผลของการอบแห้งข้าวโพคเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิลมร้อน

Win (d.b.)	Vbed (m/s)	Ta in (C)	R (-)	MIXING BED INTERVAL (min.)	Qheater (KJ)	DRYING TIME (min.)
0.25	0.4634	40	0.00	30.0	143182.3	240.00
			1.00		159845.3	273.48
0.25	0.4634	50	0.00	30.0	178977.7	150.00
			0.33		175758.9	150.00
			1.00		197417.2	180.00
			2.00		207090.9	210.00
0.25	0.4634	60	0.00	30.0	214805.9	120.00
			0.33		208878.2	120.00
			1.00		195040.0	120.00
			2.00		220709.3	150.00
			3.00		202724.9	150.00
			4.00		193744.6	154.62
0.25	0.4634	70	0.00	30.0	302580.0	169.08
			0.33		214773.2	90.00
			1.00		208398.8	90.00
			1.00		195234.7	90.00
			2.00		237801.4	120.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่ออุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนไปสู่วัสดุนั้นจะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนก็จะสูงขึ้นด้วย (สามารถพาความชื้นได้มากขึ้น) ทำให้วัฏศักระเหยความชื้นออกมาที่ผิวได้เร็วขึ้น และระเหยออกไปสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้น (ดูรูป 4.10) ดังนั้นอัตราการแห้งจึงเพิ่มขึ้น และเวลาในการอบแห้งจะลดลง

ส่วนเหตุที่ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิของลมแห้งก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย (พลังงานความร้อนสัมผัสของลมแห้งก็จะสูงขึ้น) หมายความว่าปริมาณพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเพื่อระเหยความชื้นในวัสดุปริมาณเท่ากัน จึงต้องใช้ปริมาณพลังงานความร้อนสูงขึ้น

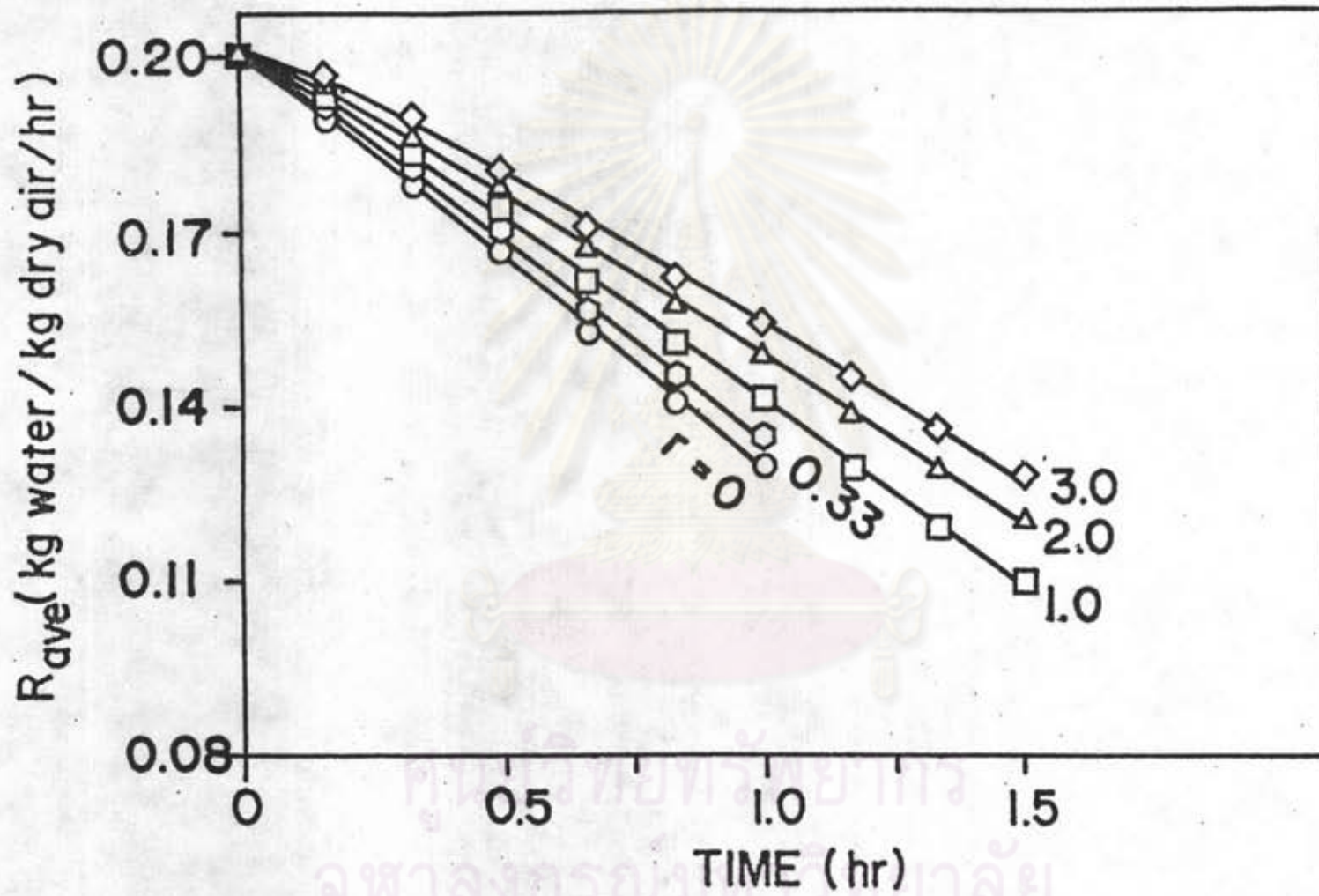
เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งวัสดุขึ้นภายใต้อุณหภูมิลมร้อนเดียวกัน แต่ค่าอัตราส่วนการหมุนเวียนลมแห้ง (r) ต่างๆ กัน เช่น ที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C (รูป 4.22) พบว่าเมื่อ r มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าลดลง (เมื่อเทียบกับกรณี $r = 0$) เพราะลมแห้งที่หมุนเวียนกลับมาที่มีความชื้นสูง เมื่อผสมกับลมใหม่ จะได้ลมร้อนที่มีความชื้นเพิ่มขึ้น (ถึงแม้ว่าจะทำให้อุณหภูมิกระเปาะเปียกเพิ่มขึ้นบ้าง ก็แทบไม่มีผลให้เห็นเลย) เมื่อลมนี้ไหลผ่านเบคย้อมระเหยความชื้นได้ช้าลง เลยทำให้เวลาอบแห้งเท่าเดิมหรือนานขึ้น แต่ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมร้อนก็ลดลง อนึ่งเมื่อ r มีค่าสูงเกินไป อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะช้าลงมาก จึงทำให้เวลาในการอบแห้งทวีมากขึ้น จนทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนอุ่นอากาศกลับมีค่าเพิ่มขึ้น

สำหรับค่า r ในช่วงที่ทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการมีค่าต่ำที่สุดคือช่วง $0.0 - 1.0$, $0.33 - 1.0$, $1.0 - 2.0$ และ $1.0 - 2.0$ ในเมื่ออุณหภูมิลมร้อน 40 , 50 , 60 และ 70°C ตามลำดับ (ดูตาราง 4.8)

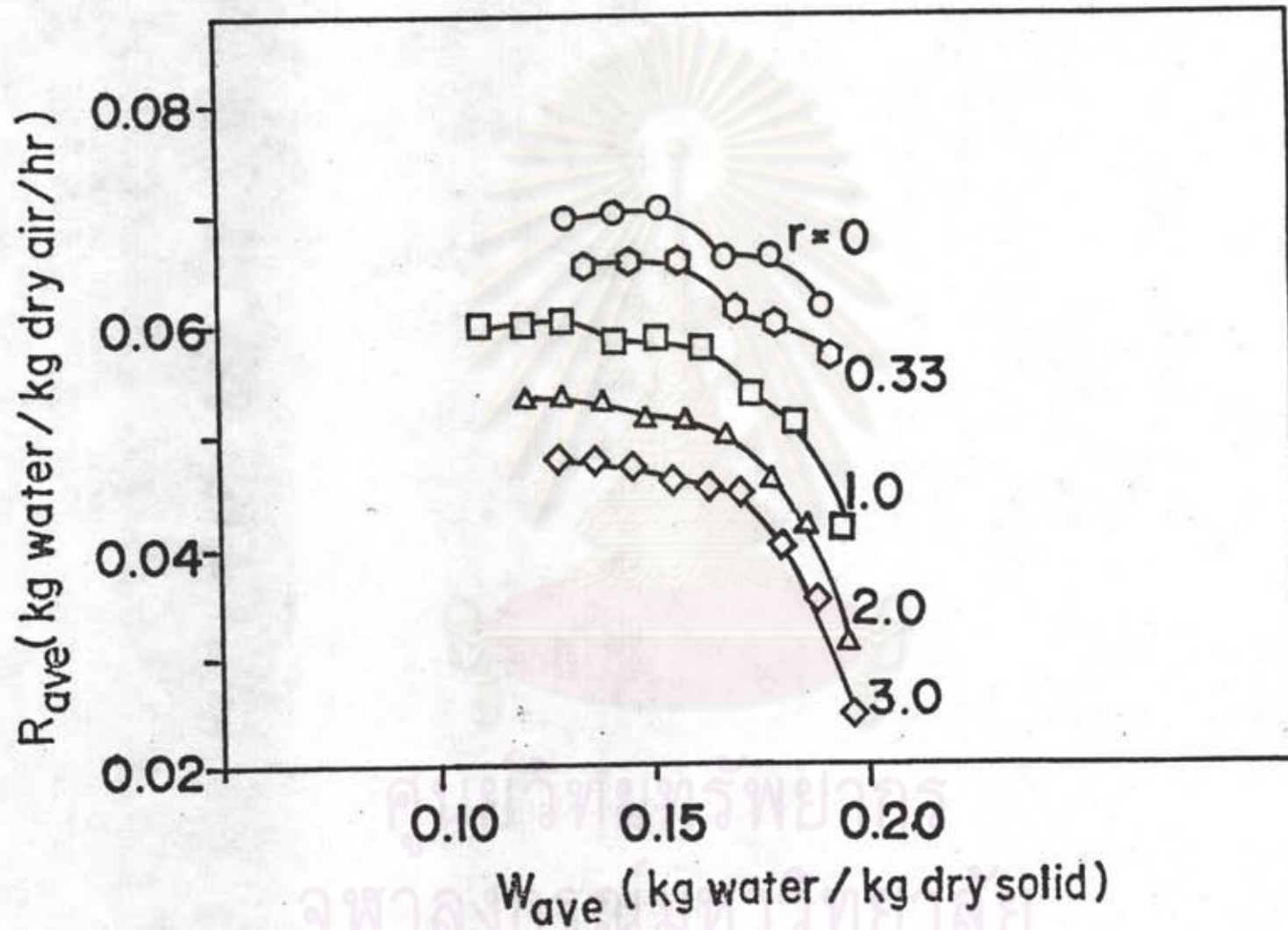
4.3.2 อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพด

ปกติความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดที่จะอบแห้งนั้น มักจะขึ้นอยู่กับฤดูกาลเก็บเกี่ยว, สถานที่ปลูก และพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย ความชื้นของข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวนั้นอยู่ในช่วง $25 - 33\%$ (มาตรฐานแห้ง) (55) งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดที่มีต่อการอบแห้ง

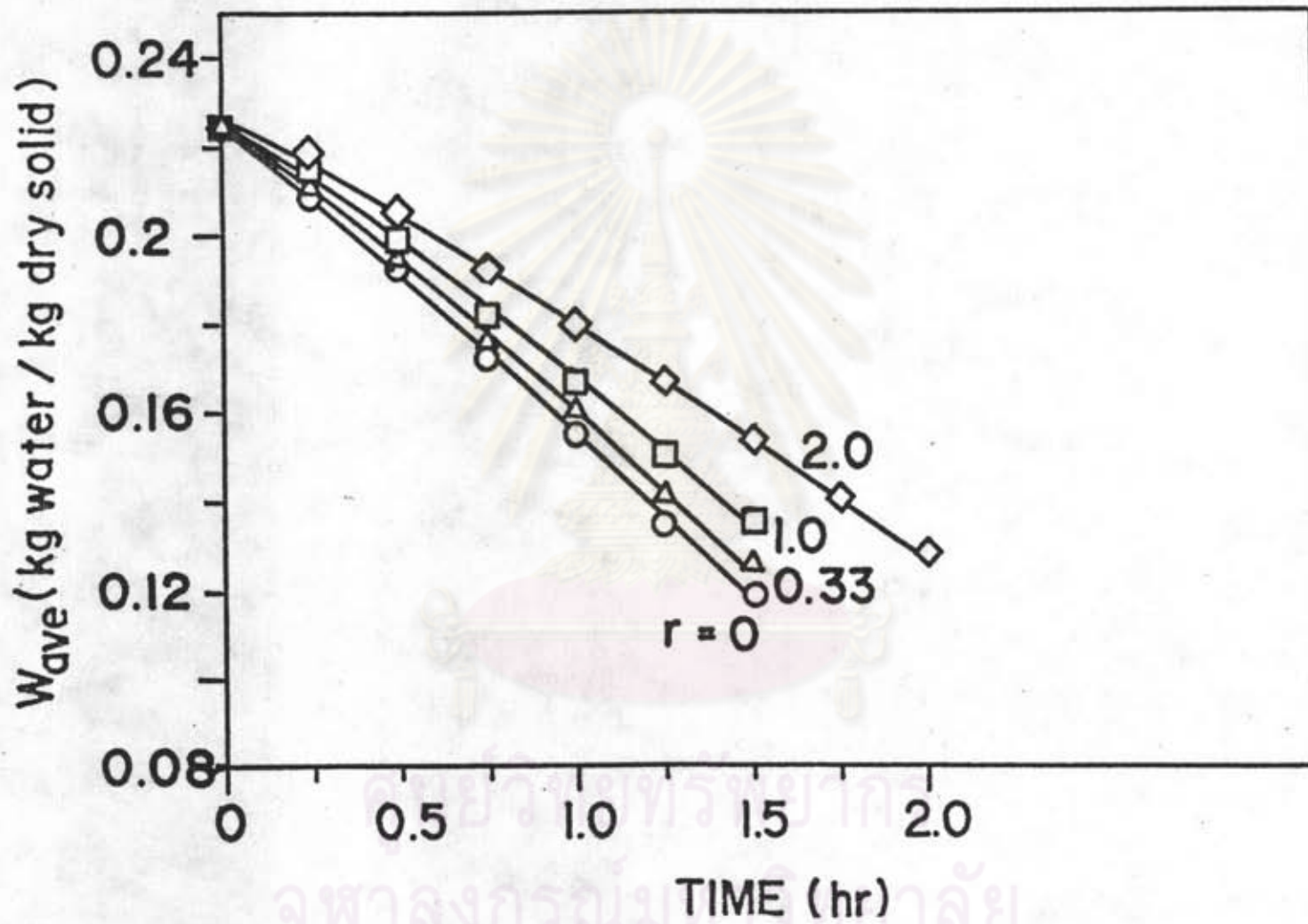
รูป 4.29 - 4.30 และรูป 4.33 - 4.38 แสดงกราฟผลการซีมูลการอบแห้งข้าวโพดความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา และกราฟอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย เมื่อทำการซีมูลการอบแห้งข้าวโพด โดยให้อุณหภูมิลมร้อน 60°C , ความเร็วของลมร้อน 0.4634 เมตร/วินาที, ผสมวัสดุในเบคทุกๆ 30 นาที และความชื้นเริ่มต้นต่างกัน 4 ค่า คือ 0.30 , 0.25 , 0.225 และ 0.20 ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ค่าความชื้นเริ่มต้นแต่ละค่า ก็จะมีค่าอัตราการหมุนเวียนลมแห้งต่างๆ กัน (ในหัวข้อ 4.1.2) (รายละเอียดข้อมูลซีมูลที่ได้อยู่ในภาคผนวก ข.2.2)



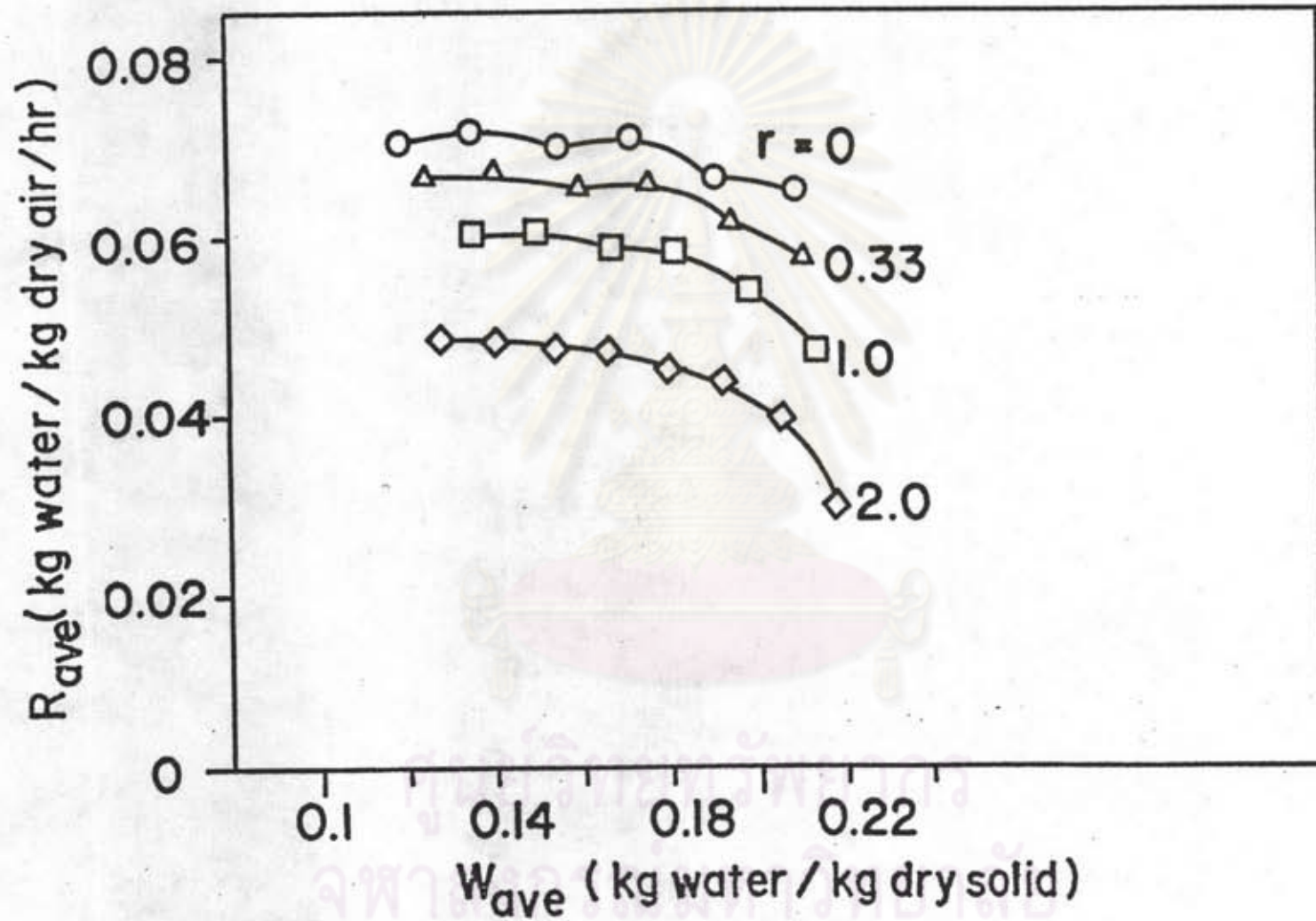
รูป 4.33 ความชื้นเฉลี่ยของเบดกับเวลา ผลการซึมเลดการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0, 2.0$ และ 3.0



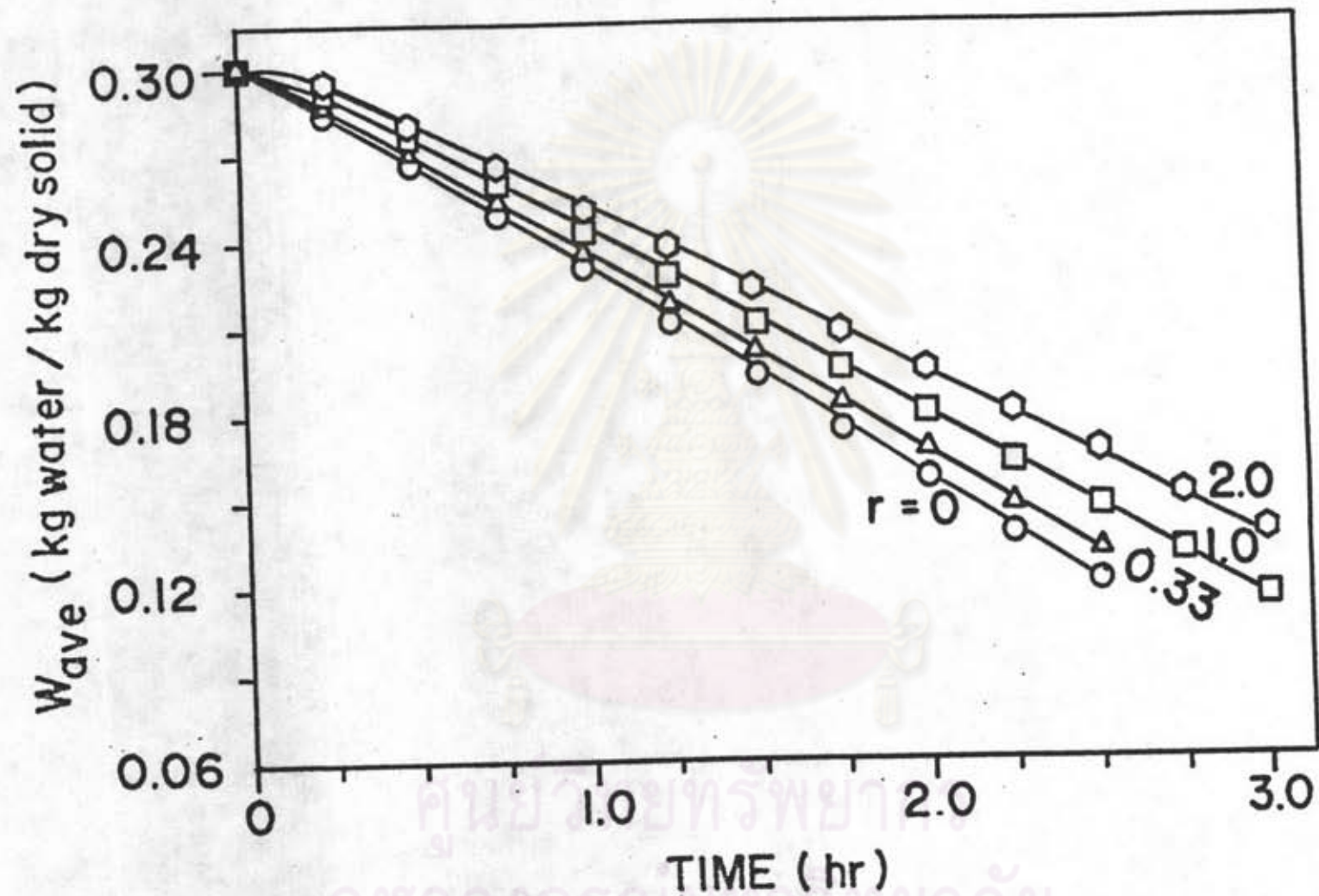
รูป 4.34 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขี้นมเลดการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สวมวัสดุทุกา 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0, 2.0$ และ 3.0



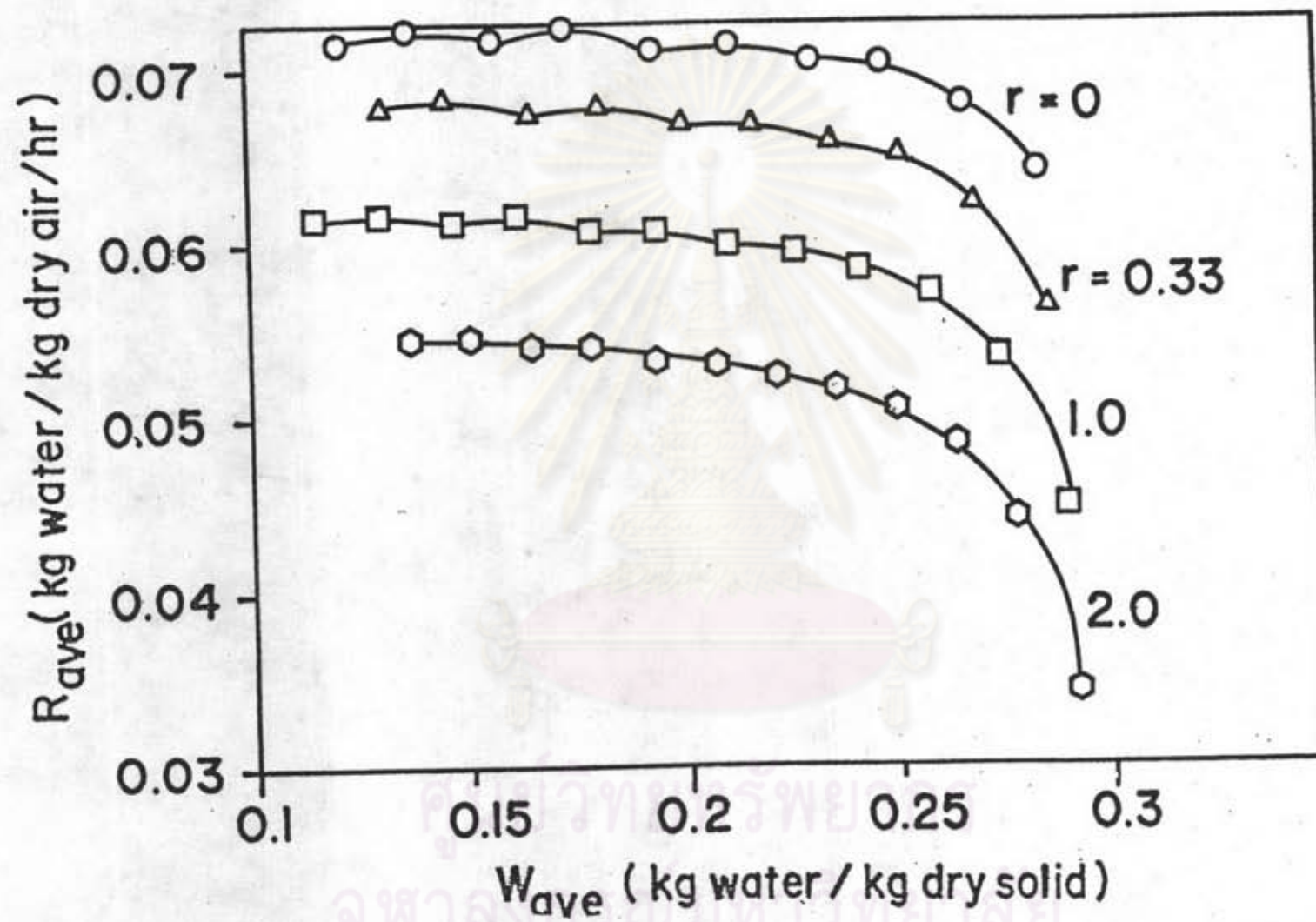
รูป 4.35 ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการขึ้นเบคการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.225$ d.b., $V_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สวมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 3.0



รูป 4.36 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขี้นุเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.225$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 3.0



รูป 4.37 ความชื้นเฉลี่ยของเบตกับเวลา ผลการขึ้นมูลเตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.30$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0



รูป 4.38 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขึ้นรูปและการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.30$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สสมวลสัปดาห์ 30 นาที เมื่อค่า $r = 0, 0.33, 1.0$ และ 2.0

ในรูป 4.29, 4.33, 4.35 และ 4.37 เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวโพคระหว่างค่าความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะใกล้เคียงกัน (ความชื้นของกราฟรูป 4.29, 4.33, 4.35 และ 4.37) ที่เวลาเดียวกัน และเวลาในการอบแห้งและปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น เช่น กรณีข้าวโพค ($r = 0$) มีความชื้นเริ่มต้น 0.20 เวลาอบแห้งนาน 60 นาที พลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมร้อน 107,386.8 kJ, กรณีความชื้นเริ่มต้น 0.30 เวลาอบแห้งนาน 150 นาที พลังงานความร้อนที่ใช้ 268,466.4 kJ เป็นต้น (ดูตาราง 4.9) และหลังการผสมวัสดุแล้ว อัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นและช่วงอัตราส่วน r ที่ทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมร้อนมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง 0.33 - 1.0, 1.0 - 2.0, 1.0 - 2.0 และ 1.0 - 2.0 สำหรับความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพค 0.20, 0.225, 0.25 และ 0.30 ตามลำดับ

ตาราง 4.9 ผลการขีมูลเตการอบแห้งข้าวโพค เพื่อศึกษาอิทธิพลความชื้นเริ่มต้น

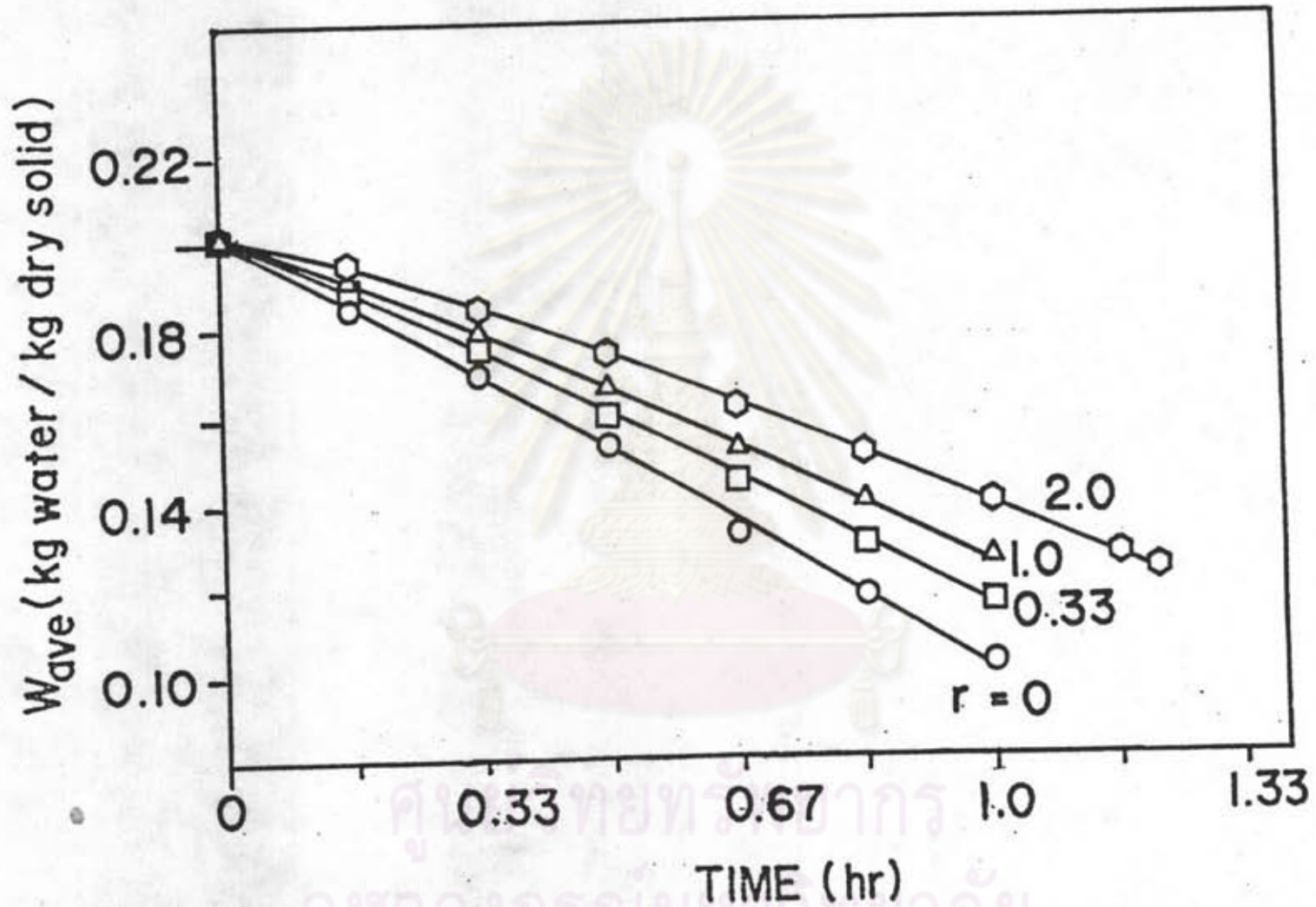
Win (d.b.)	Vbed (m/s)	Ta in (C)	R (-)	MIXING BED INTERVAL (min.)	Qheater (KJ)	DRYING TIME (min.)
0.30	0.4634	60	0.00	30.0	268466.4	150.00
			0.33		261069.6	150.00
			1.00		292064.1	180.00
			2.00		263782.2	180.00
0.25	0.4634	60	0.00	30.0	214805.9	120.00
			0.33		208878.2	120.00
			1.00		195040.0	120.00
			2.00		220709.3	150.00
			3.00		202724.9	150.00
0.225	0.4634	60	0.00	30.0	161078.8	90.00
			0.33		156745.8	90.00
			1.00		146567.3	90.00
			3.00		162826.3	120.00
0.20	0.4634	60	0.00	30.0	107386.8	60.00
			0.33		104630.2	60.00
			1.00		146661.5	90.00
			2.00		133360.0	90.00
			3.00		122968.4	90.00

เหตุที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ย มีค่าใกล้เคียงกันที่เวลาเดียวกัน เนื่องจากการอบแห้งวัสดุในเบคทานั้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอบแห้งอื่น ๆ อาทิ เช่น ความเร็วลมร้อน, อุณหภูมิของลมร้อน, ความชื้นของลมร้อนขาเข้า และช่วงเวลาการผสมวัสดุ เป็นต้น มากกว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ซึ่งแตกต่างกันไม่มาก (ในกรณีที่มีอุณหภูมิศึกษาช่วงความแตกต่างของความชื้นเริ่มต้นสูงสุด 0.1 หรือ 10% มาตรฐานแห้ง) เมื่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน เวลาในการอบแห้ง และพลังงานความร้อนที่ใช้ จึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ต้องระเหยเพิ่มขึ้น (ความชื้นเพิ่มขึ้น) สำหรับเหตุผลที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากผสมวัสดุในเบค และอิทธิพลของค่าอัตราส่วน x ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง สำหรับกรณีความชื้นเริ่มต้นของวัสดุขึ้นต่างกันั้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1

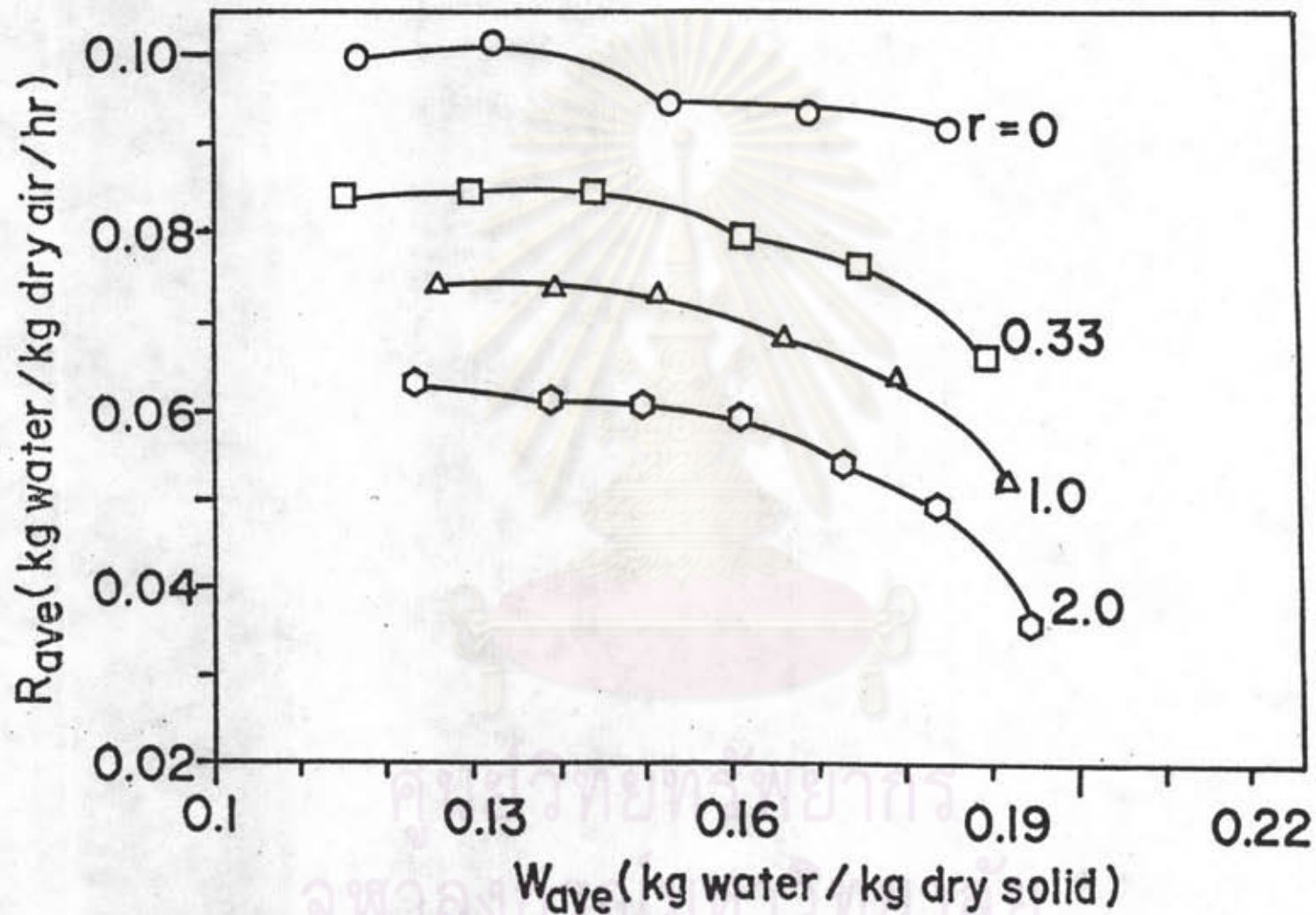
4.3.3 อิทธิพลของความเร็วมร้อน

รูป 4.33 - 4.34 และ รูป 4.39 - 4.42 แสดงกราฟผลการซีมูลการอบแห้งข้าวโพดความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา และกราฟอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย เมื่อซีมูลการอบแห้งข้าวโพด โดยให้อุณหภูมิลมร้อน 60 °ซ, ความชื้นเริ่มต้นของข้าวโพดเท่ากับ 0.20 d.b., ผสมวัสดุในเบคทุกๆ 30 นาที และความเร็วลมร้อนผ่านเบคต่างกัน 3 ค่า คือ 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 เมตร/วินาที ตามลำดับ อนึ่งที่ความเร็วลมร้อนแต่ละค่าก็แปรอัตราการหมุนเวียนลมทั้งต่างกักันด้วย (ในหัวข้อ 4.1.2) (รายละเอียดข้อมูลอยู่ในภาคผนวก ข.2.3)

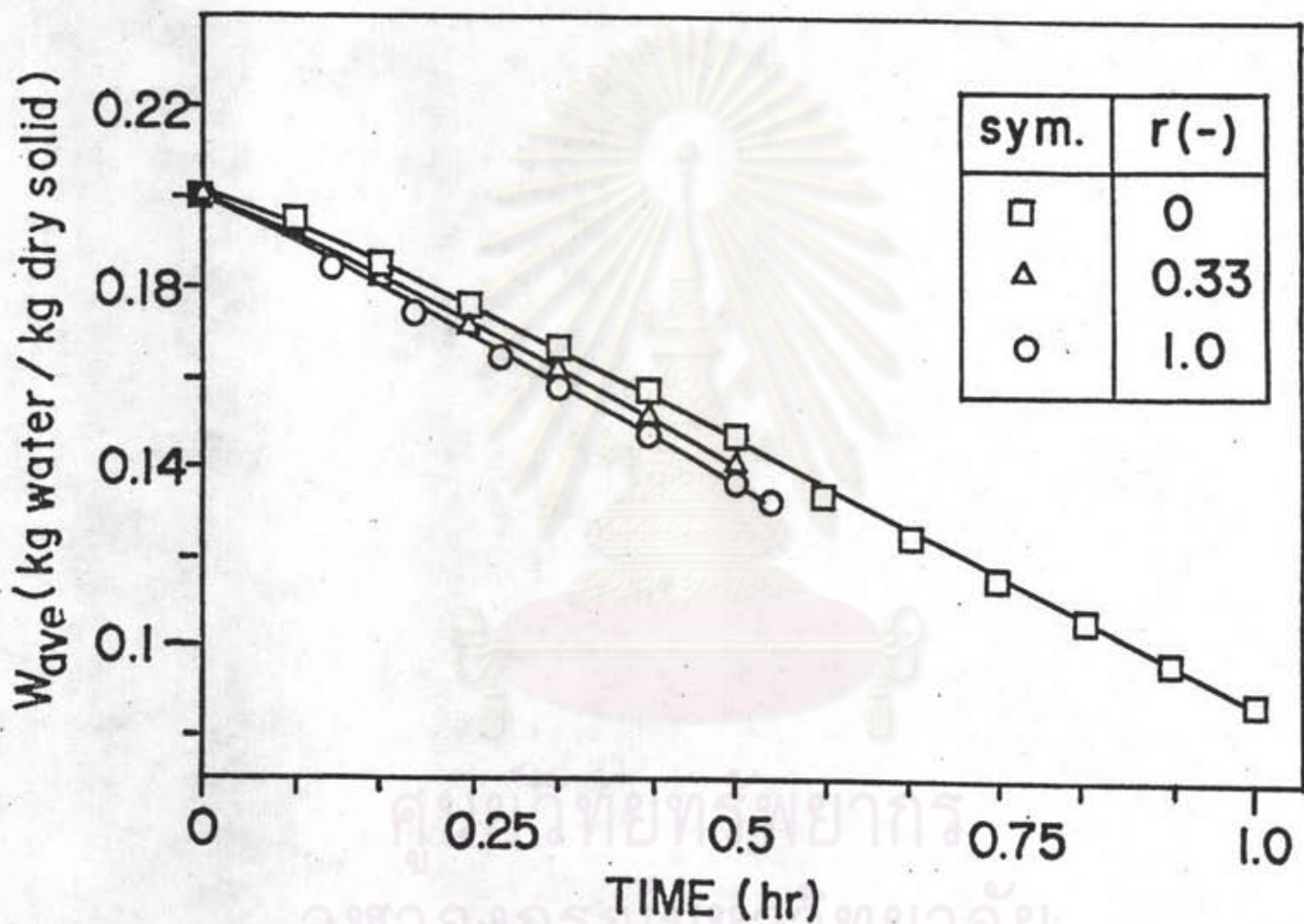
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



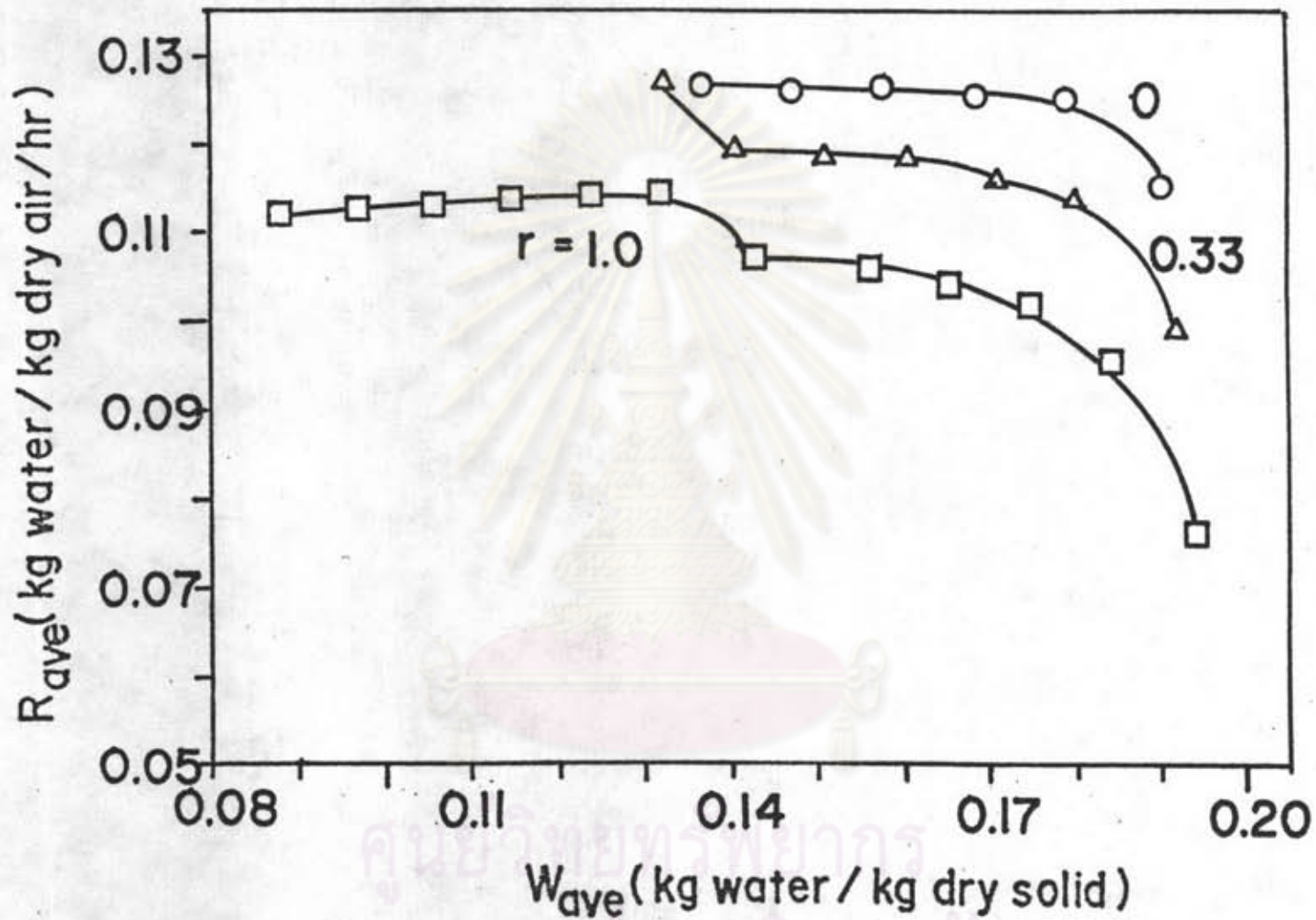
รูป 4.39 ความชื้นเฉลี่ยของเบดกับเวลา ผลการขึ้นเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ



รูป 4.40 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีมูเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผลมวลสดทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ



รูป 4.41 ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการขึ้นเม็ดการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สลมน้ำสุทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ



รูป 4.42 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขี้นุเลศการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $W_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 30 นาที เมื่อ r มีค่าต่างๆ

จากรูป 4.39 - 4.42 พบว่าเมื่อความเร็วของลมร้อนเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้อบแห้งลดลง แต่ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมร้อนเพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีความเร็วลมร้อนผ่านเบคเป็น 0.8792 เมตร/วินาที ในกรณีไม่มีหมุ่นเวียนลมทั้งกลับมาใช้อีก ($r = 0$) ซึ่งปริมาณพลังงานกลับมีค่าลดลง หนึ่งช่วงอัตราส่วน r ที่ทำให้ใช้พลังงานความร้อนในการอุ่นลมร้อนที่มีค่าต่ำสุด อยู่ในช่วง 0.33 - 1.0, 2.0 - 4.0 และ 0 - 0.33 สำหรับความเร็วลมร้อนผ่านเบค 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s ตามลำดับ (ดูตาราง 4.10) หลังการผสมวัสดุในเบคจะพบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ตาราง 4.10 ผลการขี้มูลเลคการอบแห้งข้าวโพคเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วมร้อน

Win (d.b.)	Vbed (m/s)	Ta in (C)	R (-)	MIXING BED INTERVAL (min.)	Qheater (KJ)	DRYING TIME (min.)
0.20	0.4634	60	0.00	30.0	107386.8	60.00
			0.33		104630.2	60.00
			1.00		146661.5	90.00
			2.00		133360.0	90.00
			3.00		122968.4	90.00
0.20	0.6594	60	0.00	30.0	152803.1	60.00
			1.00		139420.9	60.00
			2.00		126651.1	60.00
			4.00		131304.3	72.96
0.20	0.8792	60	0.00	30.0	101868.6	30.00
			0.33		106081.4	32.10
			1.00		185806.8	60.00

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

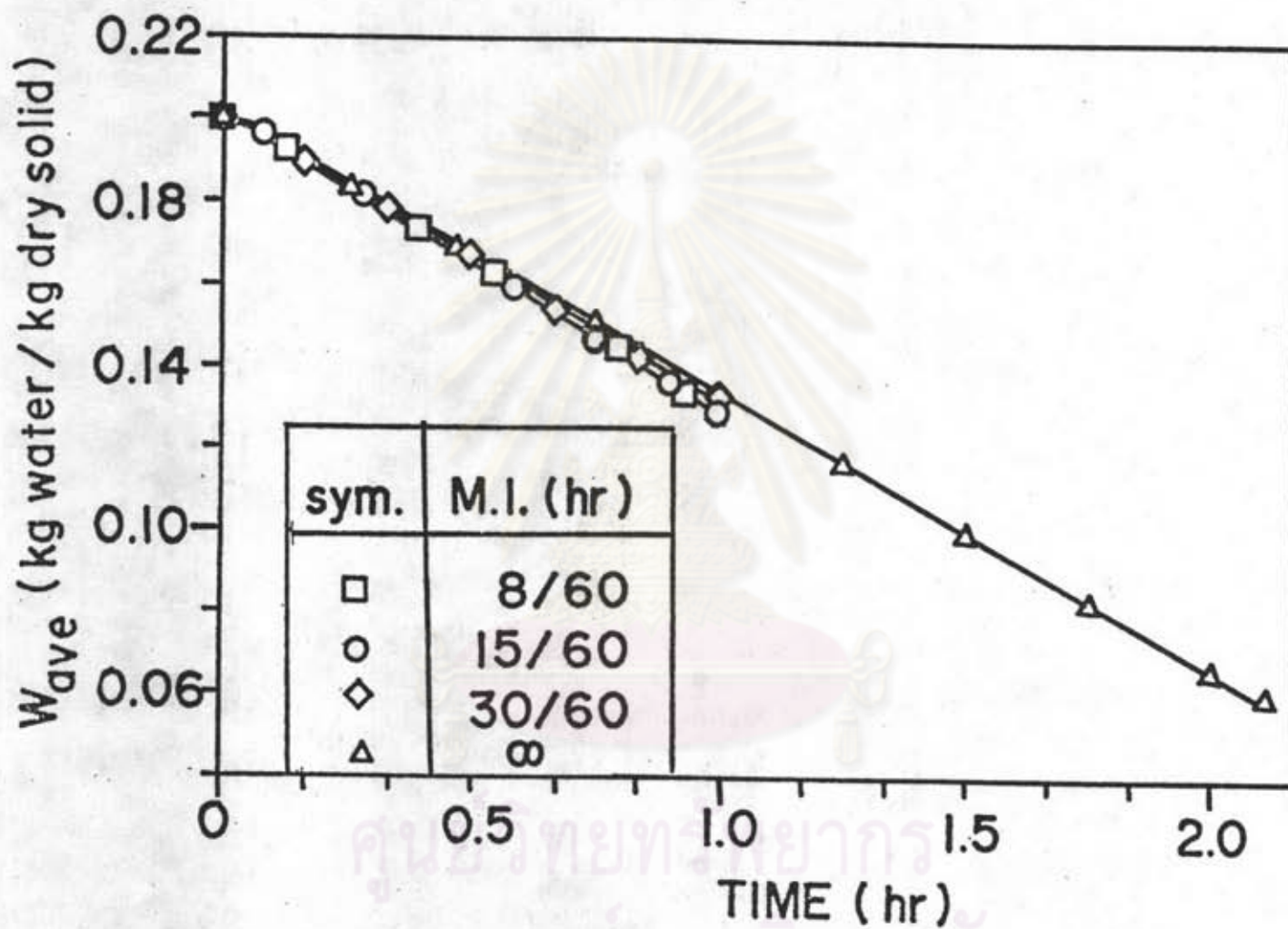
สาเหตุที่ทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น (ดูรูป 4.10) นั้นเนื่องจากการเพิ่มความเร็วลมร้อน จะทำให้ความหนาของฟิล์มขอบเขตรอบผิววัสดุลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มมีค่าลดลง (อนึ่งความต้านทานรวมของการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับผลบวกของความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มและของภายในวัสดุ ซึ่งค่อนข้างคงที่ ดังนั้นอิทธิพลของความเร็วลมร้อนที่มีต่ออัตราการอบแห้งจะขึ้นกับขนาดสัมพัทธ์ (relative magnitude) ของความต้านทานทั้งสองนี้ (2) อย่างเช่นเมื่ออยู่ในช่วงการอบแห้งวัสดุที่ความเร็วคงที่ ความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุจะมีขนาดโตกว่าความต้านทานภายในวัสดุ หรือเป็นกลไกควบคุมการอบแห้ง ซึ่งถ้าเพิ่มความเร็วลมร้อนก็จะสามารถทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง ความต้านทานภายในวัสดุจะสำคัญกว่า ทำให้กลายเป็นกลไกที่ควบคุมการอบแห้ง ถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเร็วลมร้อน ก็มีผลน้อยมากหรือไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ยเลย)

สาเหตุที่เมื่อความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาอยู่ในเครื่องอบแห้ง (resident time) มีค่าลดลง ทำให้ลมร้อนสัมผัส (contact) กับวัสดุได้สั้นลง ทำให้ระเหยความชื้นได้ไม่เต็มที่มากนัก หรือความชื้นของลมร้อนอาจออกยังไม่อิ่มตัว (saturated) ดังนั้นปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น

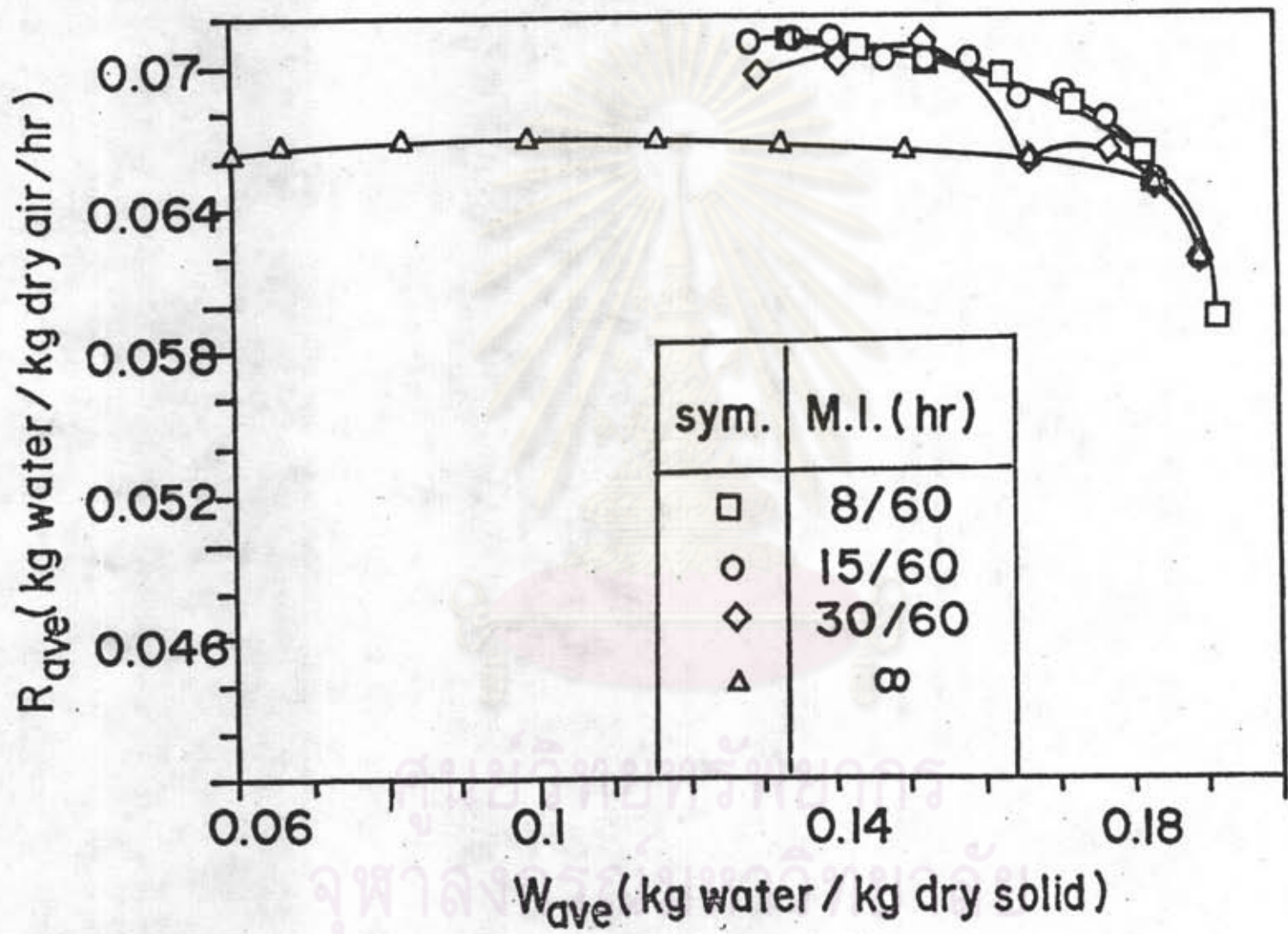
สาเหตุที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น หลังผสมวัสดุในเบค และผลกระทบของค่าอัตราส่วน x ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง สำหรับความเร็วลมร้อนค่าหนึ่งนั้น สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1

4.3.4 อิทธิพลของช่วงห่างของเวลาในการผสมวัสดุขึ้นในเบค

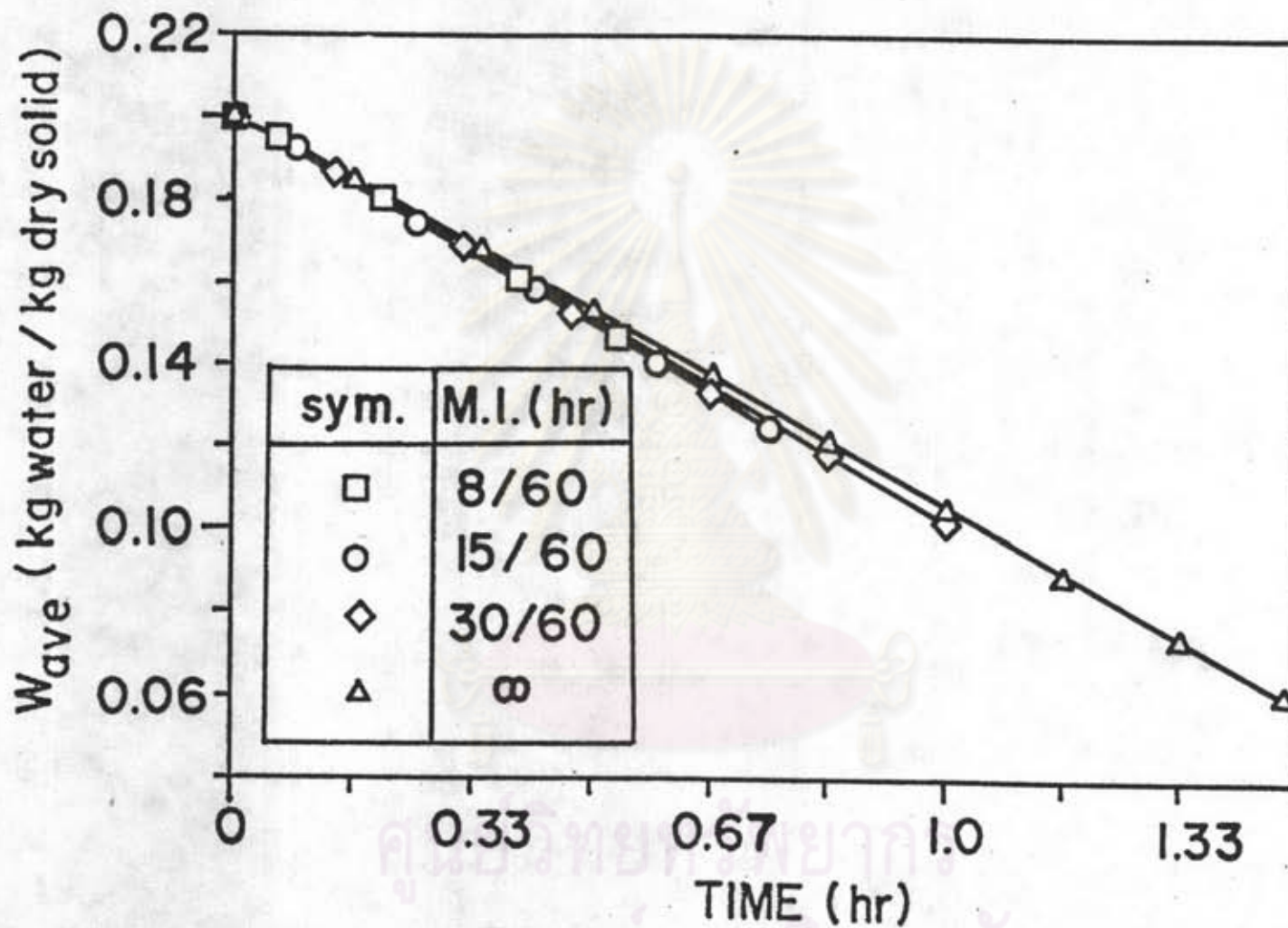
รูป 4.43 - 4.48 แสดงกราฟความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา และกราฟอัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ยเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิลมร้อน 60 °C, ความชื้นเริ่มต้น 0.20, ความเร็วลมร้อนผ่านเบค 0.4634, 0.6594 และ 0.8792 m/s และช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุเป็น 8, 15, 30 และ นาที ตามลำดับ โดยที่ไม่มีการหมุนเวียนลมทิ้งเลย ($x = 0$) (รายละเอียดของเงื่อนไขการชุมนุมเลขมีอยู่ในหัวข้อ 4.1.2 และผลการชุมนุมเลขอยู่ในภาคผนวก ข.2.4)



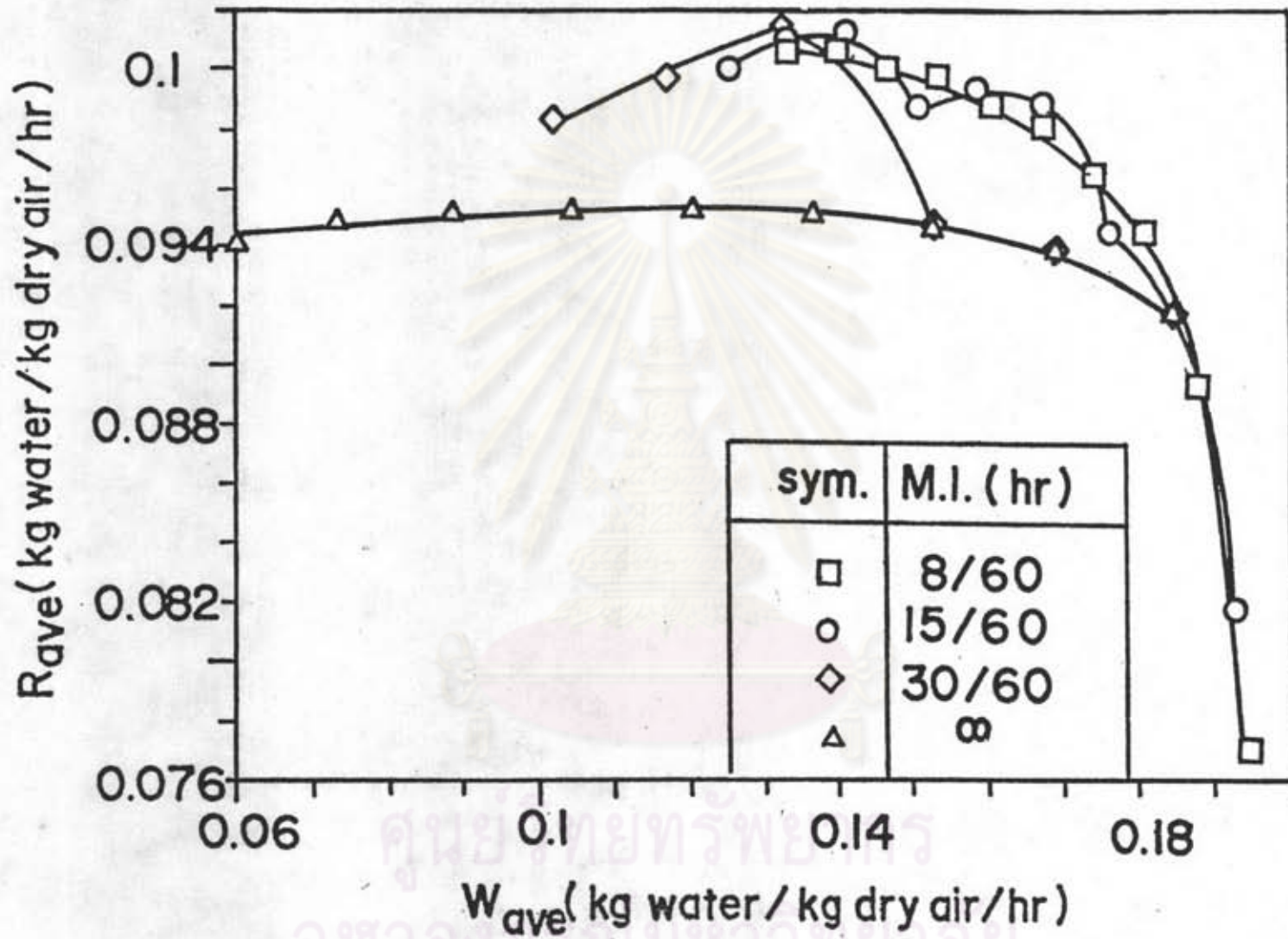
รูป 4.43 ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการขึ้นเลตการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 8,15,30 และ นาที เมื่อ $r = 0$



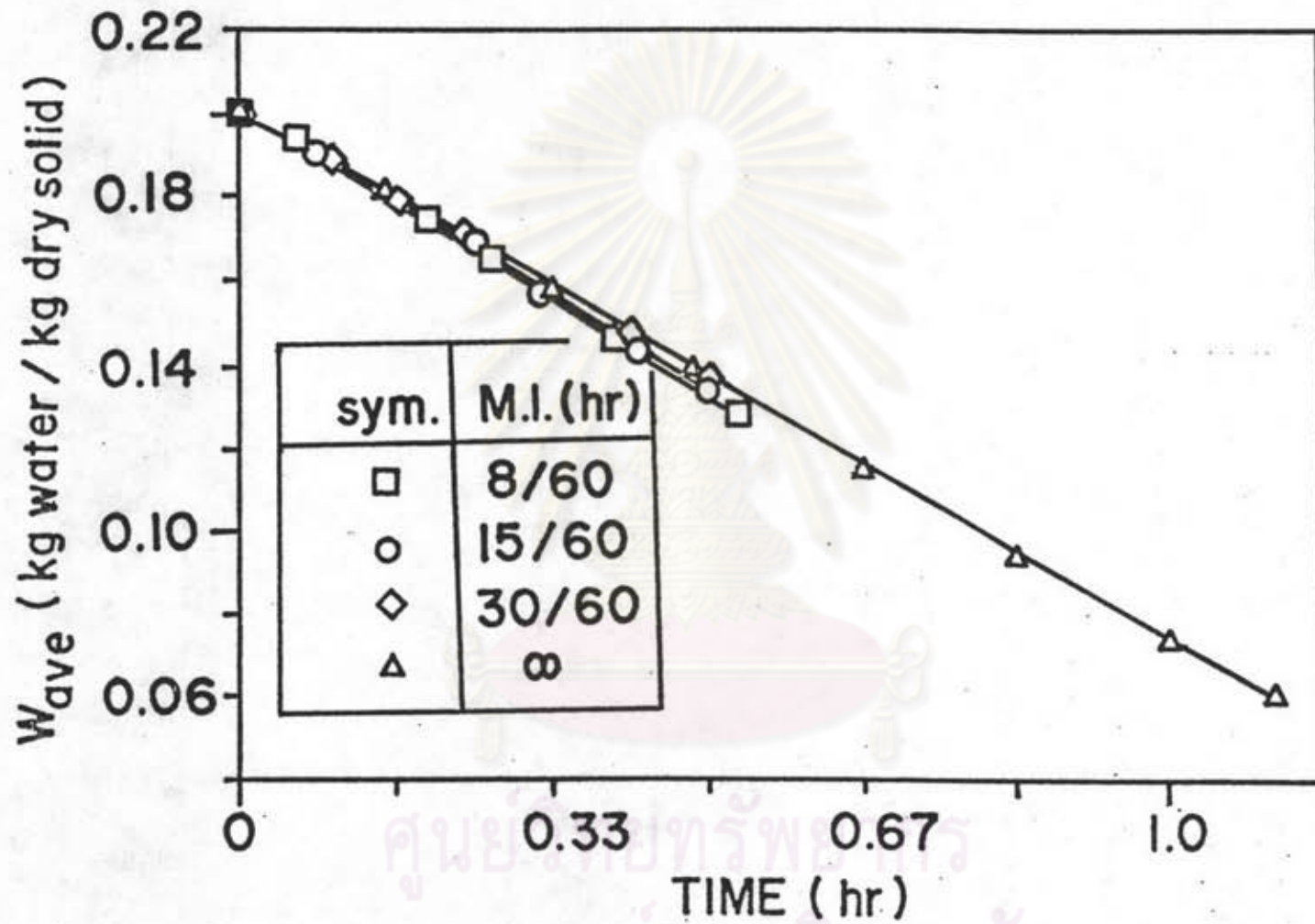
รูป 4.44 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการซีเมนต์การอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.4634$ m/s, $T_A = 60$ °C, ผสมวัสดุทุกๆ 8,15,30 และ นาที เมื่อ $r = 0$



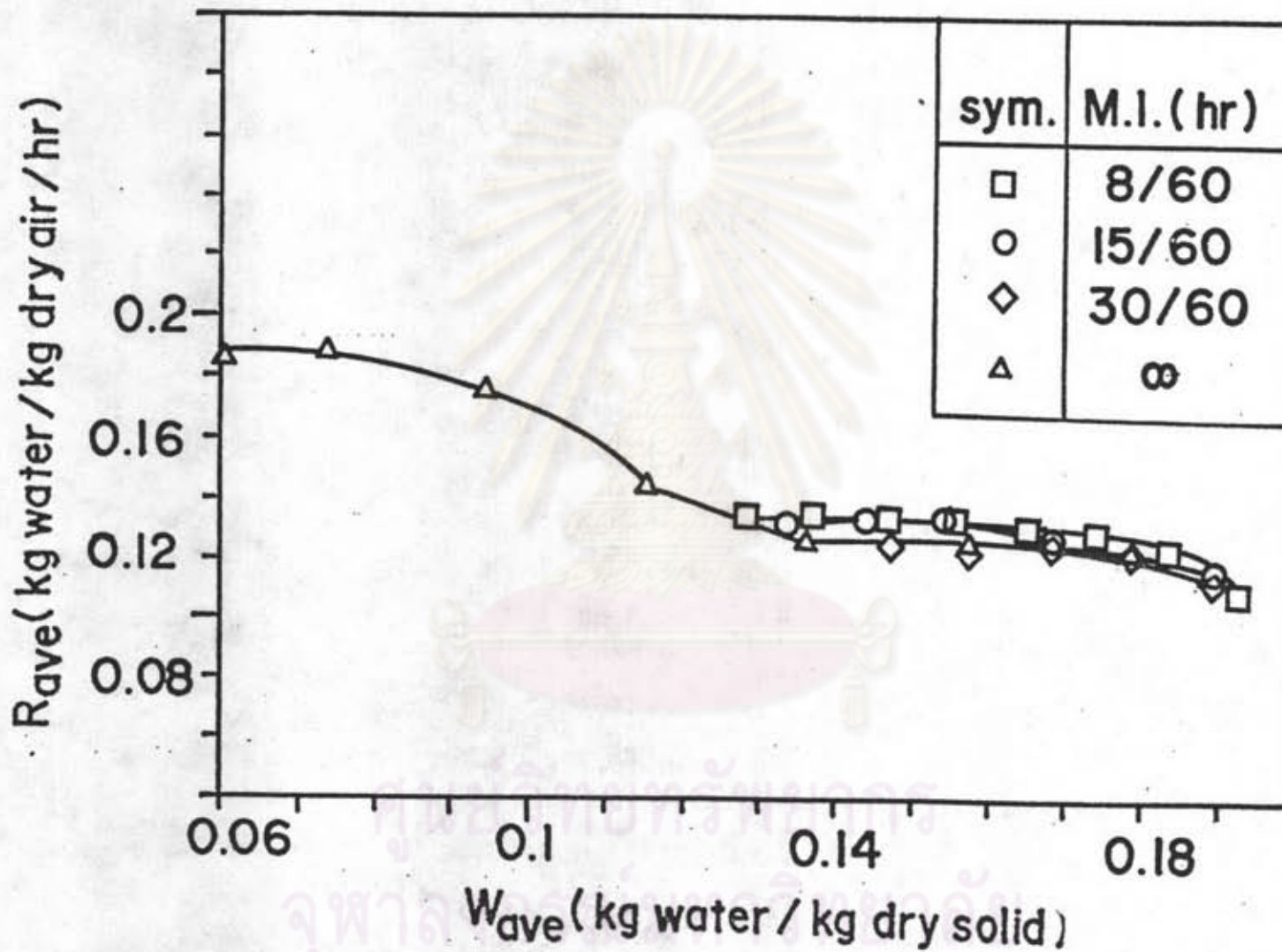
รูป 4.45 ความชื้นเฉลี่ยของเบดกับเวลา ผลการขี้นุ้เลตการอบแห้งข้าวโพท โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $V_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกๆ 8,15,30 และ นาที เมื่อ $r = 0$



รูป 4.46 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการขึ้นรูปเลกการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.6594$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สัมผัสตัวทุกๆ 8, 15.30 และ นาที เมื่อ $r = 0$



รูป 4.47 ความชื้นเฉลี่ยของเบคกับเวลา ผลการขี้นุผลการอบแห้งข้าวโพค โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, ผสมวัสดุทุกกา 8,15,30 และ นาที เมื่อ $r = 0$



รูป 4.48 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกับความชื้นเฉลี่ย ผลการชี้มูลผลการอบแห้งข้าวโพด โดยมี $w_{in} = 0.20$ d.b., $v_{bed} = 0.8792$ m/s, $T_A = 60^\circ\text{C}$, สหมวลศุทุกา 8.15.30 และ นาที เมื่อ $r = 0$

จากรูป 4.43 - 4.48 พบว่าที่ความเร็วลมร้อนค่าหนึ่งนั้น เมื่อวัสดุในเบคเป็นจำนวนที่มากขึ้น จะทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยเพิ่มขึ้น และเวลาในการอบแห้งจะลดลง ขณะเดียวกันพลังงานความร้อนในการอุ่นลมร้อนก็จะลดลงด้วย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความเร็วลมร้อนนั้น เมื่อความเร็วลมร้อนเพิ่มขึ้น เวลาในการอบแห้งลดลง และเมื่อช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบคค่าเหมือนกัน พลังงานความร้อนจะเพิ่มขึ้นและลดลง เช่น เมื่อพิจารณาช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบค 15 นาที เมื่อความเร็วลมร้อนเป็น 0.4634 m/s เวลาอบแห้งนาน 60 นาทีพลังงานที่ใช้ 107,386.8 kJ, เมื่อความเร็วลมร้อนเป็น 0.6594 m/s เวลาอบแห้งนาน 45 นาที พลังงานความร้อนที่ใช้ไป 114,602.3 kJ และเมื่อความเร็วลมร้อนเป็น 0.8792 m/s เวลาอบแห้งนาน 30 นาที พลังงานความร้อนที่ใช้ 101,868.6 kJ เป็นต้น (ดูตาราง 4.11)

ตาราง 4.11 ผลการเชื่อมโยงผลการอบแห้งข้าวโพค เพื่อศึกษาอิทธิพลของช่วงเวลผสมวัสดุขึ้นในเบค

Win (d.b.)	Vbed (m/s)	Ta in (C)	R (-)	MIXING BED INTERVAL (min.)	Qheater (KJ)	DRYING TIME (min.)
0.20	0.4634	60	0.00	8.0	100227.4	56.00
				15.0	107386.8	60.00
				30.0	107386.8	60.00
					226690.5	126.66
0.20	0.6594	60	0.00	8.0	101868.6	40.00
				15.0	114602.3	45.00
				30.0	152803.1	60.00
					226945.1	89.10
0.20	0.8792	60	0.00	8.0	108660.0	32.00
				15.0	101868.6	30.00
				30.0	101868.6	30.00
					227132.2	66.90

สาเหตุเมื่อช่วงห่างของเวลาผสมวัสดุในเบคสั้นลง เวลาในการอบแห้งจะลดลง และพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นลมน้อยลง สามารถอธิบายได้เหมือนกัน เมื่อผสมวัสดุในเบคจะพบว่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยจะมีค่าเพิ่มขึ้น (อธิบายด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.3.1) ก็จะทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง รวมถึงพลังงานความร้อนที่ใช้ก็จะลดลง (เวลาสั้นลง) และเมื่อความเร็วลมร้อนสูง อัตราการอบแห้งเฉลี่ยกรณีปกติ (ไม่มีการผสมวัสดุ) ก็มากกว่ากรณีความเร็วลมร้อนต่ำ ยิ่งเมื่อมีการผสมวัสดุแล้ว อัตราการอบแห้งเฉลี่ยก็ต้องสูงกว่าที่ความเร็วลมร้อนต่ำ เวลาในการอบแห้งก็ต้องน้อยกว่า และการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนขึ้นอยู่กับเวลาในการอบแห้ง ซึ่งอัตราการอบแห้งนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วลมร้อนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ดูบทที่ 3) จึงทำให้พลังงานความร้อนที่ใช้ไม่แปรตามความเร็วลมร้อนแบบเชิงเส้น

เมื่ออบแห้งวัสดุขึ้นด้วยลมร้อนซึ่งมีความเร็วลมร้อนผ่านเบคสูงนั้น อัตราการอบแห้งวัสดุจะมีค่าสูงมาก ทำให้การกระจายของความชื้นไม่สม่ำเสมอมาก จึงจำเป็นต้องมีการผสมวัสดุ เพื่อให้วัสดุมีความชื้นสม่ำเสมอทั้ง เบคและในการศึกษาของบทนี้ไม่คำนึงถึงพลังงานที่ใช้และเวลาที่ใช้ไประหว่างทำการผสมวัสดุในเบคจนมีความชื้นสม่ำเสมอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย