

## บทที่ 5

### การทดสอบแบบจำลอง เจริญไข และผลการชิมูเลต

#### 5.1 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาและทดสอบแบบจำลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมของโรงงานแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.1

##### ส่วนประกอบที่สำคัญ

1. แหล่งให้ความร้อน ใช้เตาเผาให้ความร้อนแก่น้ำมันตัวกลาง (Oil Medium) และน้ำมันตัวกลางนี้จะไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อนให้ลมที่จะใช้อบแห้งอีกทอดหนึ่ง

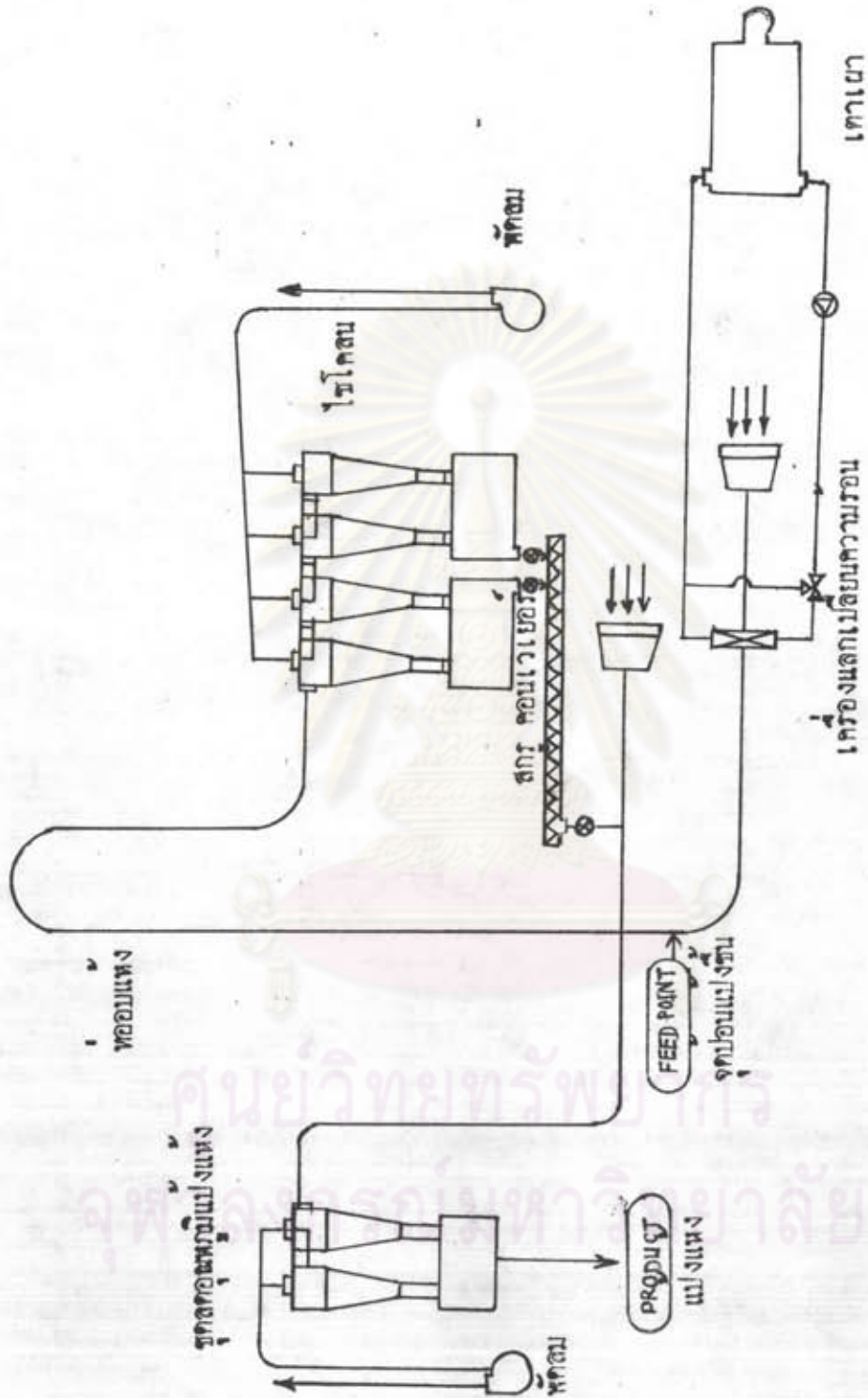
2. อุปกรณ์ป้อนวัสดุขึ้น ใช้ตัวป้อนแบบสกรู (Screw Feeder) โดยมี Sling เป็นตัวกระจายแป้งขึ้นก่อนเข้าท่ออบแห้งบริเวณ Venturi ของท่ออบแห้ง อัตราการป้อนแป้งขึ้นจะควบคุมให้สัมพันธ์กับอุณหภูมิของลมร้อนและความชื้นสุดท้ายของแป้งแห้งที่ต้องการ

3. ท่ออบแห้ง เป็นท่อขาวในแนวตั้ง และปลายบนโค้งงอลงเข้าหาไซโคลน ท่ออบแห้งจะมีการหุ้มฉนวนใยแก้วเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

4. ไซโคลน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกแป้งแห้งออกจากลมร้อน

5. ชุดลดอุณหภูมิแป้งแห้ง แป้งแห้งที่ออกจากไซโคลนจะยังร้อนมาก จะต้องทำการลดอุณหภูมิ โดยดูดลมเย็นผ่านแป้งร้อน เพื่อให้แป้งคายความร้อนให้ลมเย็น แล้วแยกแป้งกับลมโดยไซโคลนอีกชุดหนึ่ง

กระบวนการผลิตแป้งซึ่งสนใจในที่นี้เฉพาะส่วน การอบแห้งเท่านั้น โดยแป้งขึ้นที่มีความชื้นประมาณ 30 - 40 % จากเครื่องเซนติฟิวส์ จะถูกส่งมาที่รางเก็บแป้งขึ้นซึ่งจะมีการกวาดตลอดเวลา แป้งขึ้นถูกส่งเข้าท่ออบแห้งที่บริเวณ Venturi โดยตัวป้อนแบบสกรู และมี Sling ตีให้แป้งขึ้นกระจาย ลมร้อนจะเป็นตัวพาแป้งขึ้นไปตามท่ออบแห้ง และในขณะเดียวกันจะเกิดการอบแห้งไปด้วย แป้งแห้งจะถูกแยกออกจากลมร้อนขาออกด้วยไซโคลน ส่วนลมร้อนถูก



รูปที่ 5.1 ไลอะแกรมแสดงเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในโรงงานที่ศึกษา

ศูนย์วิทยพักรัง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปล่อยทิ้ง สำหรับลมร้อนขาเข้าที่ใช้ในการอบแห้ง จะได้มาจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันตัวกลางกับลม โดยเตาเผาจะเผาน้ำมันตัวกลางให้ร้อนและน้ำมันนี้จะไหลผ่านขดลวดแลกเปลี่ยนความร้อน และจะมีลมไหลผ่านขดลวดนี้ ทำให้ลมรับความร้อนจากน้ำมันร้อนไปใช้ในการอบแห้งได้ การควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนจะควบคุมผ่านน้ำมันร้อนโดยควบคุม อุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำมันร้อน

## 5.2 วิธีการเก็บข้อมูล

เนื่องจากการศึกษาทดสอบนี้ใช้เครื่องระดับโรงงาน เพราะฉะนั้นการเก็บข้อมูลบางอย่างจึงไม่อาจเก็บต่อเนื่องได้ จำต้องใช้ข้อมูลจากการวัดเป็นครั้งคราวเป็นตัวแทนข้อมูล เช่น การวัดความเร็วลมร้อน การวัดความดันลด เป็นต้น รายละเอียดการเก็บข้อมูล เป็นดังต่อไปนี้

5.2.1 การวัดอุณหภูมิลมร้อน จะทำการวัดที่จุดทางเข้าและทางออกของท่ออบแห้งเท่านั้น การวัดจะใช้เทอร์โมคอปเปิล ชนิด K ส่งสัญญาณมาที่ห้องควบคุม แปลงสัญญาณเป็นตัวเลข

5.2.2 การวัดอุณหภูมิกระเปาะเป็ยอกของลมร้อน จะทำการวัดที่ทางเข้าและทางออกของท่ออบแห้งเช่นกัน การวัดจะใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท โดยใช้ผ้าเป็ยอกหุ้มไว้ที่กระเปาะของเทอร์โมมิเตอร์หย่อนเข้าไปในท่ออบแห้งให้ลึกประมาณ 10-15 cm ต้องระวังไม่ให้ผ้าแห้งและมีแป้งเกาะผ้าด้วย

5.2.3 การวัดความเร็วของลม ใช้ท่อปีโตต์วัดผลต่างระหว่างค่าความดันรวม และความดันสถิต เพื่อคำนวณหาความเร็วของลม โดยสอบเทียบ กับ เครื่องวัดความเร็วลม Anemometer Model 24-6111

5.2.4 การวัดอุณหภูมิแห้ง  
กรณีแห้งขึ้น ทำโดยนำตัวอย่างแห้งใส่ภาชนะประมาณ 1 ลิตร ใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทจุ่มลงในแห้งขึ้นให้ลึกประมาณ 5-10 cm รอให้อุณหภูมิคงที่ก่อน อ่านค่า

กรณีแห้งแห้ง ทำโดยวิธีเดียวกันแต่ต้องอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

5.2.5 การหาความชื้นของแป้ง โดยชั่งตัวอย่างแป้งอย่างละเอียด (ประมาณ 5 g.) นำไปอบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 100 - 120 °C นาน 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาชั่งให้เย็นในโถอบความชื้น (dessicator) ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างแป้งที่เหลือ คำนวณค่าความชื้นของแป้งได้

5.2.6 การวัดอัตราการป้อนแป้งเข้าที่อบแห้ง ในทางปฏิบัติ เนื่องจากการวัดที่ทางเข้าเครื่องอบแห้งทำได้ลำบาก เพราะฉะนั้นจึงใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับจากค่าปริมาณแป้งแห้งที่อบแห้งได้ โดยถือว่าระบบอยู่ในสภาวะคงที่และไม่มีการตกหล่นของแป้งในระหว่างการผลิต

5.2.7 การหาความชื้นของอากาศ ทำโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิกะเปาะเปียกและอุณหภูมิกะเปาะแห้งของลมร้อนมาเทียบหา ความชื้นจากแผนภูมิความชื้น (Humidity Chart)

### 5.3 ผลการเก็บข้อมูล

จากการเก็บข้อมูลการปฏิบัติงานของโรงงานในสภาพปัจจุบัน เป็นเวลาประมาณ 5 เดือน ตั้งแต่ เดือน กุมภาพันธ์ 2538 ถึง มิถุนายน 2538 จำนวน 98 ข้อมูล สรุปได้ดังต่อไปนี้

อุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง อยู่ในช่วง 180-220 °C การปรับค่าอุณหภูมิลมร้อนจะพิจารณาจาก ความชื้นและปริมาณของแป้งที่ทางเข้า และจะใช้ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นแนวทางในการปรับเพื่อให้ได้ความชื้นที่ต้องการที่ทางออก

อุณหภูมิวัสดุที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 25 - 35 °C ความชื้นลมร้อนที่ทางเข้า มีค่าอยู่ในช่วง 0.010 - 0.018 kg ไอน้ำ / kg อากาศแห้ง

ความชื้นของวัสดุที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 35-40 % (dry basis)

ความเร็วของลมร้อน มีค่าประมาณ 30 m/sec และอุณหภูมิลมร้อนที่ทางออกเครื่องอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 90 - 110 °C

อุณหภูมิวัสดุที่ทางออกเครื่องอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 50 - 60 °C

ความชื้นลมร้อนที่ทางออก มีค่าอยู่ในช่วง 0.020 - 0.060  
kg ไอน้ำ / kg อากาศแห้ง

ความชื้นของวัสดุที่ทางออกเครื่องอบแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 10-13 %  
(dry basis)

เมื่อนำข้อมูลที่เงื่อนไขต่าง ๆ มาทำคูลมวล พบว่า มีค่าความ  
ผิดพลาดประมาณ 10 % และคูลของพลังงานความร้อน มีความผิดพลาด  
ประมาณ 12 % สำหรับรายละเอียดของข้อมูลการวัดต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก

#### 5.4 แนวทางการซึ่มเลต

แนวทางการซึ่มเลตกระบวนการอบแห้งในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งเป็น  
2 ขั้นตอน ดังนี้

1. ทดสอบความถูกต้องเชื่อถือได้ของแบบจำลองคณิตศาสตร์
2. ประเมินผลการปฏิบัติงานภายใต้เงื่อนไขการผลิตต่างๆ ที่สนใจ  
เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

ค่าตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการซึ่มเลต มีดังต่อไปนี้

##### ขนาดของเครื่องอบแห้ง

- ความยาวของท่ออบแห้ง	57	เมตร
- เส้นผ่าศูนย์กลางของท่ออบแห้ง	1.0	เมตร
- พื้นที่หน้าตัดของท่ออบแห้ง	0.7854	ตารางเมตร

##### คุณสมบัติของวัสดุขึ้น

- ความหนาแน่นที่แท้จริง	1540	kg / m <sup>3</sup>
- ความร้อนจำเพาะของวัสดุไ้้น้ำ	0.44	kcal/kg.K
- ความร้อนจำเพาะของน้ำ	1.0024	kcal/kg.K
- เส้นผ่าศูนย์กลางเชิงประสิทธิ์ผลของแป้้ง	0.00045	m
- ความเร็วของแป้้งที่ป้อนเข้า	0.06	m/min

##### คุณสมบัติของอากาศ

- ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	0.4512	kcal/kg.K
- ความเร็วของลมร้อนที่ป้อนเข้า	31.94	m/sec

### 5.5 ผลการทดสอบความถูกต้องเหมาะสมของแบบจำลอง

เพื่อทดสอบความถูกต้องเหมาะสมของ แบบจำลองได้ทำการซีมูลेट โดยใช้ข้อมูลจริงของการปฏิบัติงานที่ทางเข้าของ เครื่องอบแห้งเป็นเงื่อนไขที่ทางเข้าของแบบจำลอง แล้วเปรียบเทียบผลการซีมูลेटที่ทางออกของเครื่องอบแห้งกับผลข้อมูลจริงที่เก็บบันทึกได้ในโรงงาน

เนื่องจากที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง อนุภาคแป้งขึ้นจะมีการเกาะตัวกันทำให้มีขนาดเชิงประสิทธิผลแตกต่างจากอนุภาคแป้งปฐมภูมิโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความชื้นอนุหภูมิ คุณสมบัติทางกายภาพของแป้ง เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ค่า  $h_a$  ที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าการคำนวณไม่ตรงกัน จาก การทดลอง (เรียวโซ โทเอ, 2529) ที่ผ่านมาพบว่า ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมียาวกว่า 3 mm. ค่า  $h_a$  ที่คำนวณได้จะตรงกับค่าการทดลอง แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 1.5 mm. ค่า  $h_a$  ที่ทดลองได้จะเท่ากับ  $1/3$  ของค่าคำนวณ และสำหรับอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.8 mm. ค่า  $h_a$  ที่ทดลองได้จะประมาณ  $1/8$  ของค่าคำนวณ เพราะฉะนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการซีมูลेटการปฏิบัติงานของ เครื่องอบแห้งโดยใช้ขนาดอนุภาคต่างๆ กัน เพื่อหาขนาดเชิงประสิทธิผลที่เหมาะสมโดยให้ผลการซีมูลेटใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากที่สุด ณ ทางออกของเครื่องอบแห้ง ขนาดเชิงประสิทธิผลที่ทดลองใช้คือ 0.35, 0.40, 0.42, 0.435, 0.45, 0.47, 0.50 mm. (ในโรงงานได้ลองวัดหาขนาดเฉลี่ยที่แท้จริงของอนุภาคแป้งแห้ง โดยวิธีการร่อนบนชุดตะแกรงมาตรฐาน พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแป้งแห้ง = 0.121 mm. โดยขั้นตอนการหามีแสดงไว้ในภาคผนวก) จากนั้นเกณฑ์ที่ใช้กำหนดหาขนาดเชิงประสิทธิผลที่เหมาะสมที่สุดคือ

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_{i(c=1m)} - X_{i(c=xb)})^2}{n}} \dots (5.1)$$

- โดยที่  $n$  = จำนวนข้อมูล ณ ทางออกทั้งหมดที่ใช้ ( 98 ข้อมูล )
- $X_{i(\text{aim})}$  = ค่าของตัวแปร  $i$  ที่ทางออกเครื่องอบแห้งที่ซีมิเลตได้อันได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน ( $Tg$ ), อุณหภูมิของแป้ง ( $Ts$ ), ความชื้นของลมร้อน ( $H$ ), หรือความชื้นของแป้งแห้ง ( $w$ )
- $X_{i(\text{exp})}$  = ค่าของตัวแปร  $i$  ที่ทางออกเครื่องอบแห้งที่วัดได้จริงในโรงงานอันได้แก่ อุณหภูมิลมร้อน ( $Tg$ ), อุณหภูมิของแป้ง ( $Ts$ ), ความชื้นของลมร้อน ( $H$ ), หรือ ความชื้นของแป้งแห้ง ( $w$ )

ค่าของ  $S_x$  ที่ประเมินได้มีสรุปไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.2 (ก) - (ง)

ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $S_x$  กับขนาดเชิงประสิทธิผลของอนุภาคที่ใช้ซีมิเลต

ขนาดเชิงประสิทธิผล ( $d_p$ mm)	$S_x = \sqrt{\sum (X_{i(\text{aim})} - X_{i(\text{exp})})^2}$			
	กรณี $X=Tg$	กรณี $X=Ts$	กรณี $X=H$	กรณี $X=w$
0.350	190.467	119.945	0.0866	0.9461
0.400	113.248	122.003	0.0485	0.4282
0.420	88.943	122.570	0.0354	0.3079
0.45	76.978	123.827	0.0276	0.2399
0.47	76.558	124.159	0.0254	0.3925
0.50	95.147	124.875	0.0345	0.5219
0.55	134.046	139.618	0.0527	0.8004

จากรูปที่ 5.2 (ก) ถึง (ง) เห็นได้ว่าค่าขนาดเชิงประสิทธิ์ผล  
ที่เหมาะสมเมื่อพิจารณาจากกรณีต่าง ๆ จะเป็นดังนี้

กรณีของ Tg ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม คือ 0.45-0.47  $\mu\text{m}$ .

กรณีของ Ts ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม คือ น้อยกว่า 0.50  $\mu\text{m}$ .  
แต่ยิ่งเล็กยิ่งดี

กรณีของ H ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม คือ 0.45-0.47  $\mu\text{m}$ .

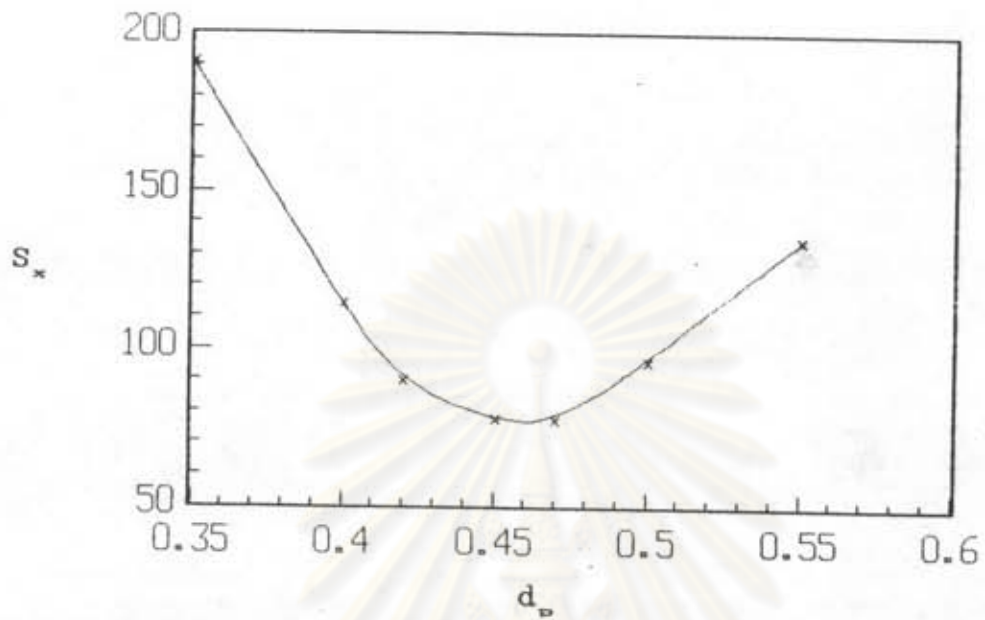
กรณีของ W ขนาดอนุภาคที่เหมาะสม คือ 0.45  $\mu\text{m}$ .

เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว ค่า  $d_p = 0.45 \mu\text{m}$ . น่าจะเหมาะสม  
ที่สุด ดังนั้นในการขีมูลทุกครั้งต่อจากนี้ จะใช้ค่า  $d_p$  นี้เสมอ

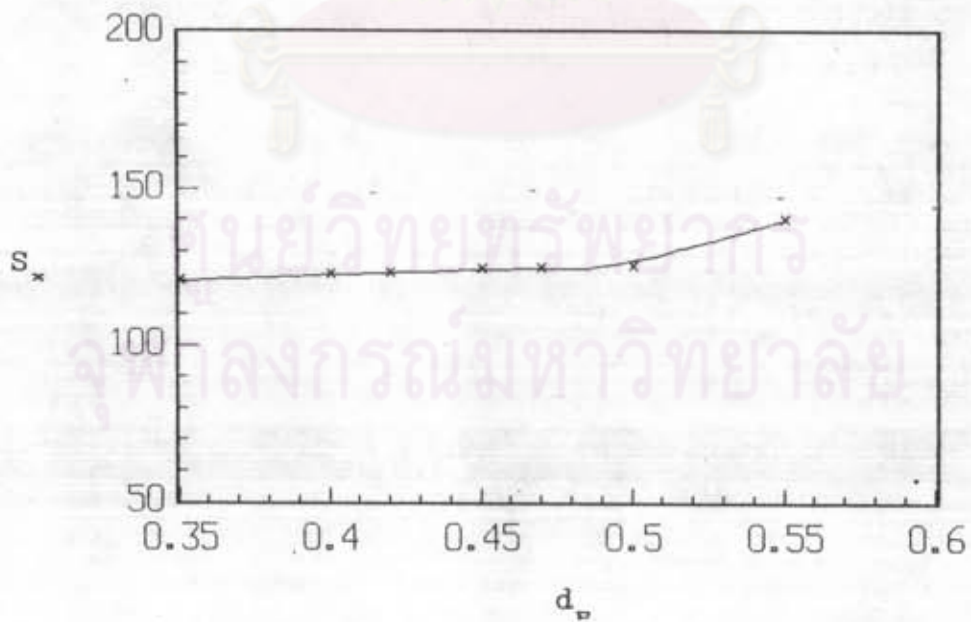


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

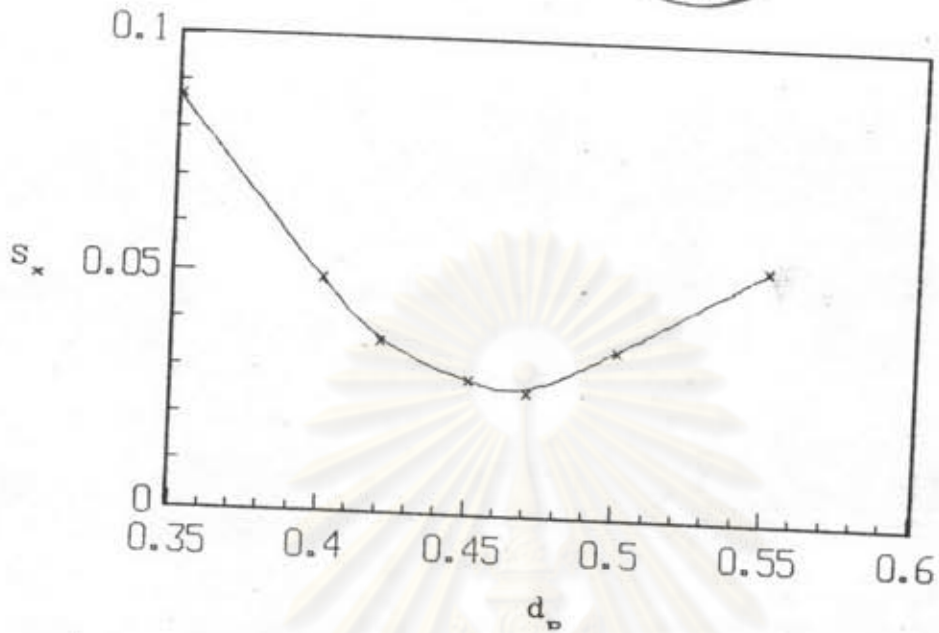




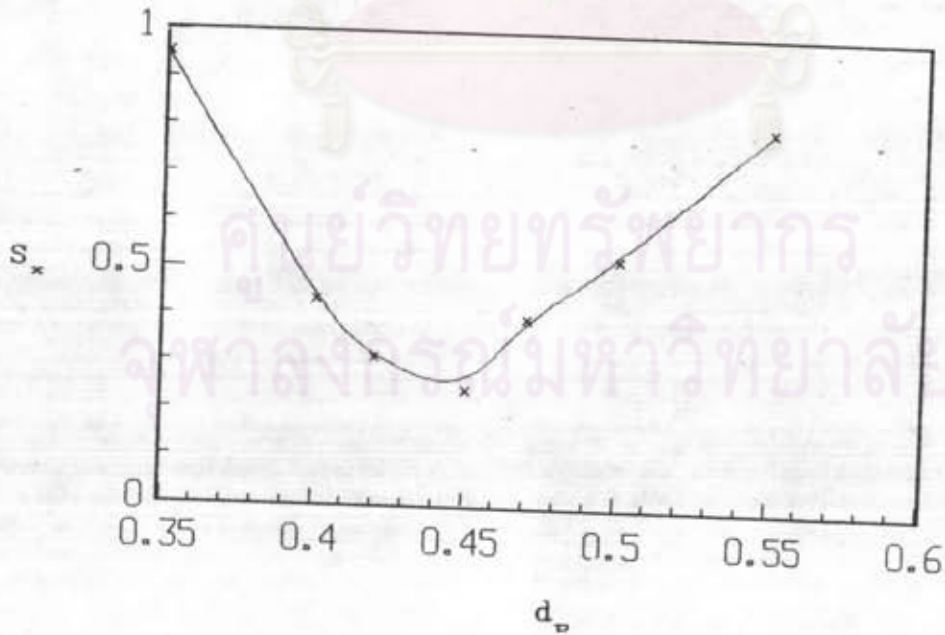
รูปที่ 5.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_x$  กับ  $d_p$   
สำหรับกรณี  $X = Tg [^{\circ}C]$



รูปที่ 5.2 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $S_x$  กับ  $d_p$   
สำหรับกรณี  $X = Ts [^{\circ}C]$



รูปที่ 5.2 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $s_x$  กับ  $d_p$  สำหรับกรณี  $X = H [-]$



รูปที่ 5.2 (ง) ความสัมพันธ์ระหว่าง  $s_x$  กับ  $d_p$  สำหรับกรณี  $X = w [-]$

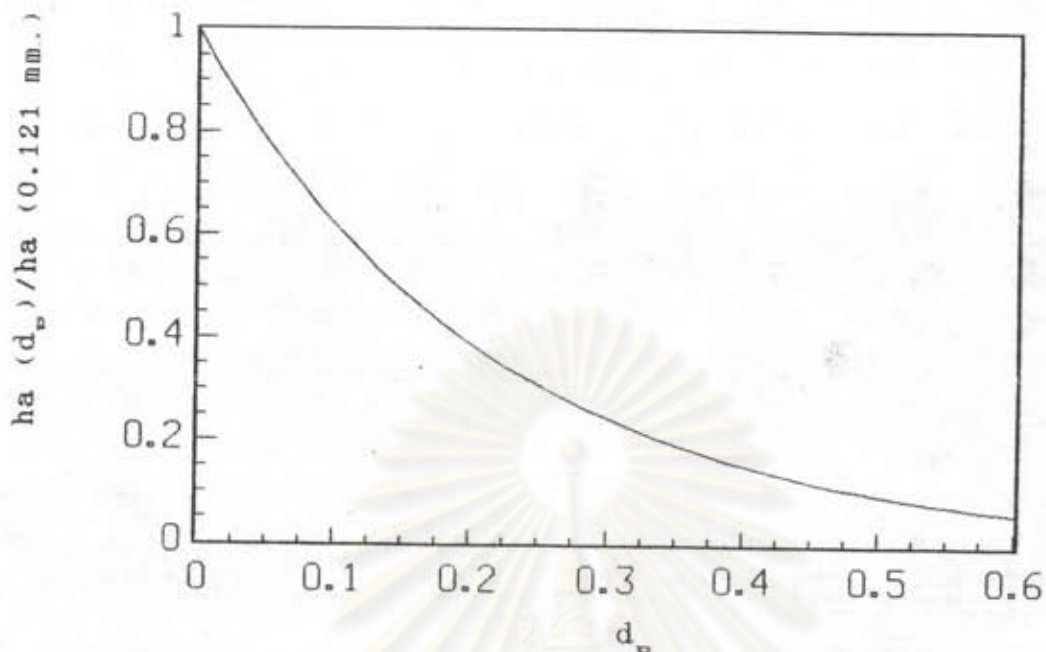
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร  $ha$  ที่คำนวณได้จากสมการ ( 4.14 ) และ ( 4.15 ) สำหรับขนาดต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ที่ ขนาดเชิงประสิทธิ์ผลที่เหมาะสม ( $d_p = 0.45$  mm.) ค่า  $ha$  ที่คำนวณได้จะมีค่าเป็น 0.12 เท่าของค่า  $ha$  ที่  $d_p = 0.121$  mm.

ตารางที่ 5.2 ค่าคำนวณของ  $ha$ . สำหรับอนุภาคขนาดต่าง ๆ

ขนาดอนุภาค ( $d_p$ , mm.)	$h$	$a$	$ha$ .	$\frac{ha (d_p \text{ ต่างๆ})}{ha (d_p = 0.121)}$
0.121	0.4844	24793.38	12010.84	1
0.350	0.2496	8571.43	2139.42	0.1781
0.400	0.2304	7500.00	1728.30	0.1439
0.420	0.2239	7142.86	1598.94	0.1331
0.450	0.2149	6666.66	1432.59	0.1193
0.470	0.2094	6382.98	1336.88	0.1113
0.500	0.2019	6000.00	1211.75	0.1009
0.550	0.1909	5454.55	1041.80	0.0867

$h$  มีหน่วย kcal /  $m^2 \cdot sec \cdot ^\circ C$

ผลการเปรียบเทียบ ค่า  $ha$  มีแสดงอยู่ในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน  $ha(d_p)/ha(0.121 \text{ mm.})$  กับ  $d_p$  (mm.)

เมื่อได้  $d_p$  เชิงประสิทธิผลที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเปรียบเทียบผลการซีมูลेट กับผลการปฏิบัติการจริงของเครื่องอบแห้งในโรงงาน รูปที่ 5.4 (ก) ถึง (ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิลมร้อนที่ทางออก  $T_g$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซีมูลेट, คู่ของอุณหภูมิของวัสดุที่ทางออก  $T_s$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซีมูลेट, คู่ของความชื้นของลมร้อนที่ทางออก  $H$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซีมูลेट และคู่ของความชื้นวัสดุที่ทางออก  $w$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซีมูลेट ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขการเดินเครื่องต่างๆในโรงงาน ในกรณีที่ผลการทดลองกับผลการซีมูลेटนั้นตรงกัน 100 % ความสัมพันธ์ ของแต่ละคู่จะอยู่บนเส้นทะแยงมุมที่ลากไว้ในรูปพอดี

จะเห็นได้ว่า โดยทั่วไปผลการซีมูลेटค่า  $T_g$  ส่วนใหญ่จะต่ำกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย (ประมาณ  $3-5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ดังในรูป 5.4 (ก) ผลการซีมูลेटค่า  $T_s$  ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มต่ำกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมาก (ประมาณ  $10-15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ตลอดเวลา เนื่องจากสมมุติฐานที่ว่าเครื่องอบแห้งทั้งหมดเกิดขึ้นใน

ช่วงการระเหยน้ำจากผิววัสดุอนุภาค โดยไม่คำนึงถึงช่วงอัตราการอบแห้งที่ช้าลง ทั้งนี้เพราะวัสดุแป้งมีอนุภาคค่อนข้างเล็ก ( $d_p$  เฉลี่ย = 0.45 mm.) ดังในรูป 5.4 (ข) ผลการซึมเลตค่า  $H$  ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มสูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย (ประมาณ 0.001-0.005 kg ไอน้ำ/kg อากาศแห้ง) ดังในรูป 5.4 (ค) และผลการซึมเลตค่า  $w$  ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มสูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย (ประมาณ 0.01-0.06 kg น้ำ/kg วัสดุไว้ความชื้น) ดังในรูป 5.4 (ง)

เพื่อให้การซึมเลต  $T_s$  มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มแบบจำลองสำหรับช่วงการอบแห้งที่ช้าลง ซึ่งจะทำให้สลับซับซ้อนเกินความจำเป็น ในที่นี้จะประเมิน  $T_s$  จากค่าซึมเลตของ  $T_g$ ,  $H$ ,  $w$  ที่ทางออกโดยใช้สมการต่อไปนี้ (เว็ชวโช โทเอ 2529)

$$\frac{T-T_s}{T-T_w} = \frac{r_w \cdot F - C_w (T-T_w) (F/F_w)^{F_c r_w / (C_w (T-T_w))}}{r_w F_w - C_w (T-T_w)} \quad \dots (5.2)$$

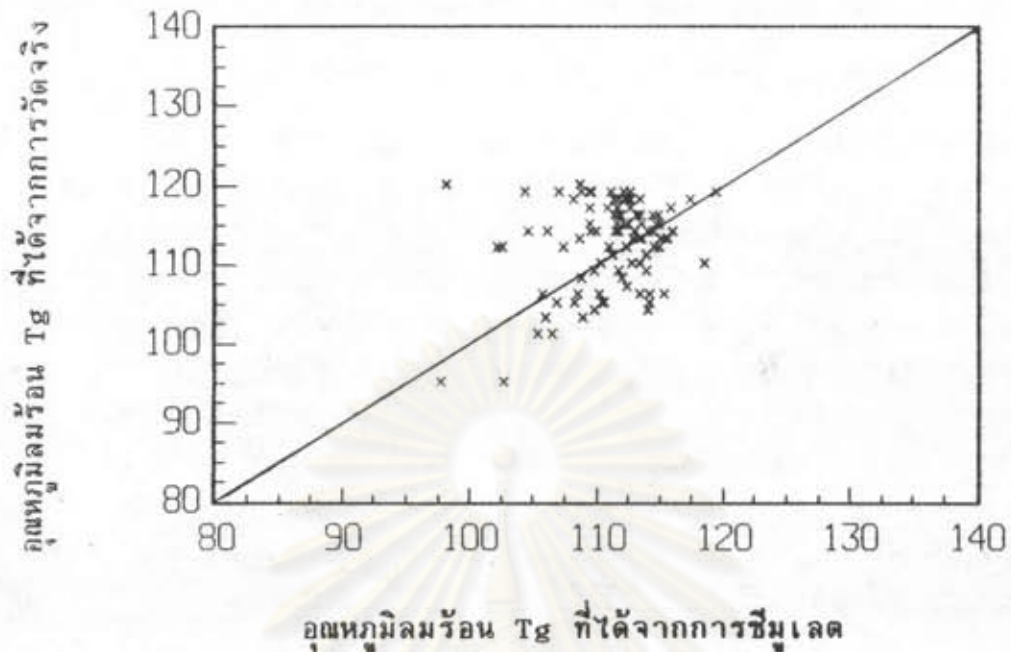
ในที่นี้  $T, T_w$  = อุณหภูมิกระเปาะเปียบและอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนตามลำดับ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$F_w$  = อัตราส่วนความชื้นอิสระวิกฤต (=  $w_c - w_w$ )

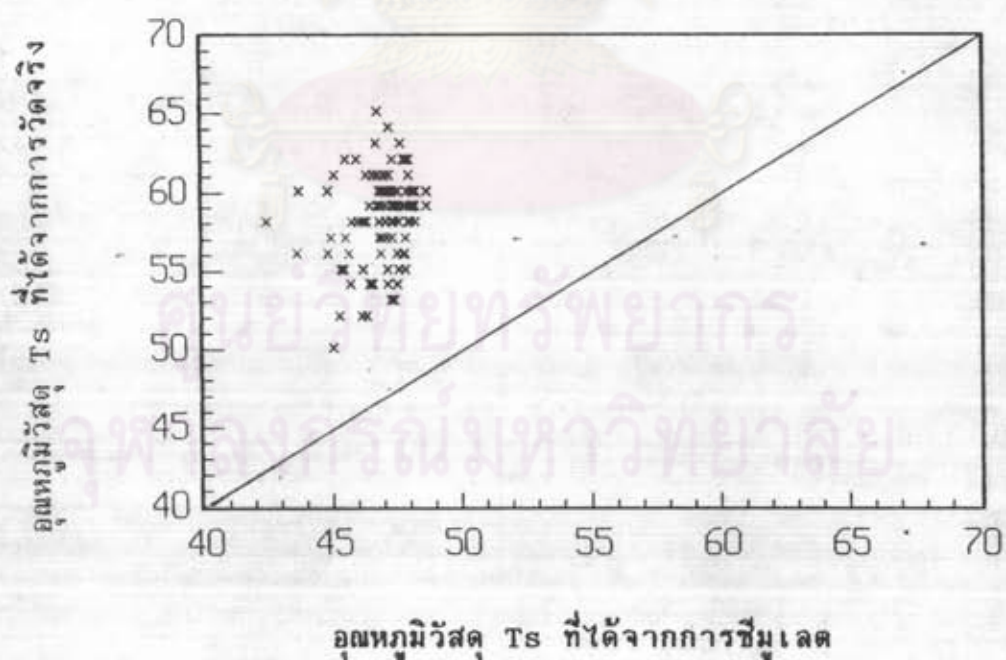
$w_c$  = อัตราส่วนความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

$w_w$  = อัตราส่วนความชื้นสมดุลย์ (Equilibrium moisture content)

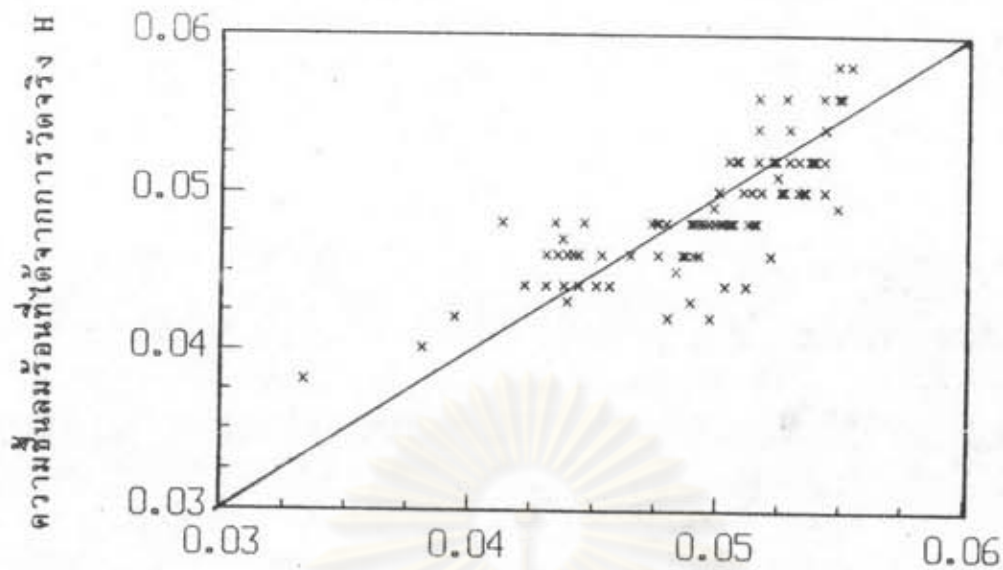
$r_w$  = ความร้อนแฝงของการระเหยเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิ  $T_w$  (kcal/kg)



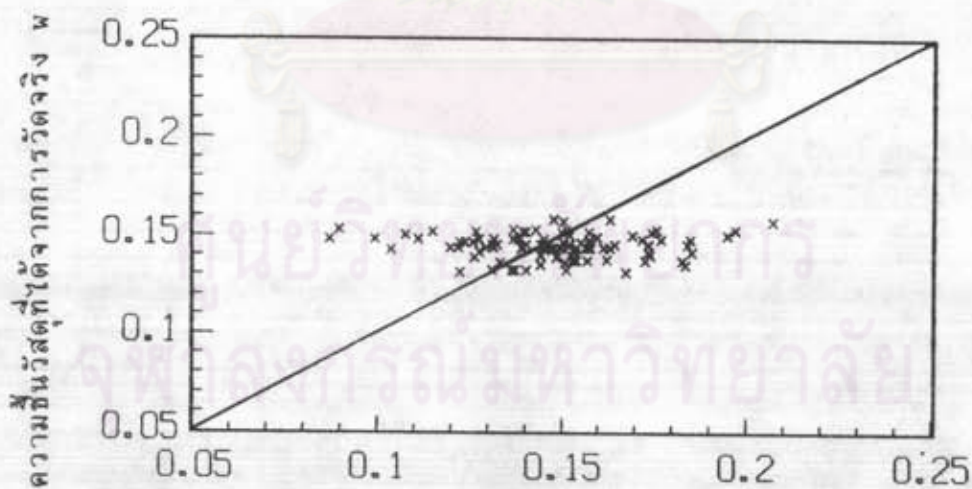
รูปที่ 5.4 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของอุณหภูมิหลอมร้อนที่ทางออก Tg ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซิมูเลต



รูปที่ 5.4 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก Ts ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซิมูเลต

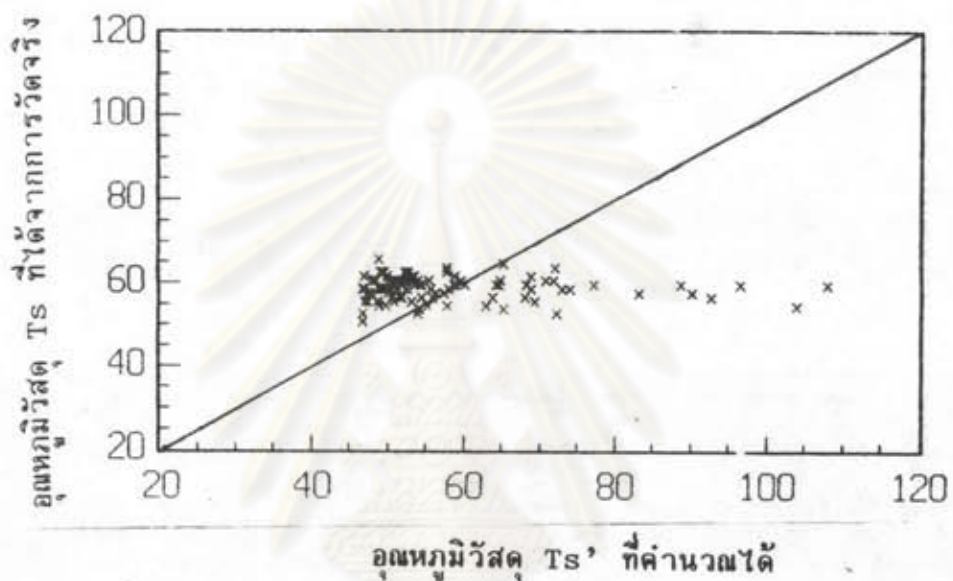


ความชื้นลมร้อนที่ได้จากการวัดจริง H  
 ความชื้นของลมร้อน H ที่ได้จากการชิมูเลต  
 รูปที่ 5.4 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความชื้นของลมร้อนที่ทางออก H ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชิมูเลต



ความชื้นวัสดุ w ที่ได้จากการชิมูเลต  
 รูปที่ 5.4 (ง) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความชื้นของวัสดุที่ทางออก w ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชิมูเลต

จากรูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า  $T_s'$  ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการ (5.1) กับค่าที่ได้จากการปฏิบัติจริงในโรงงาน จะเห็นว่า ผลการคำนวณค่า  $T_s'$  ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มสูงกว่าความเป็นจริง ประมาณ 10-15 °C ซึ่งผลจะต่ำกว่าค่า  $T_s$  เดิมเล็กน้อย ในที่นี้ใช้ค่า  $w_c = 0.17$  และ  $w_u = 0.10$



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก  $T_s'$  ซึ่งคำนวณได้กับค่าที่ได้จากการปฏิบัติจริงในโรงงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



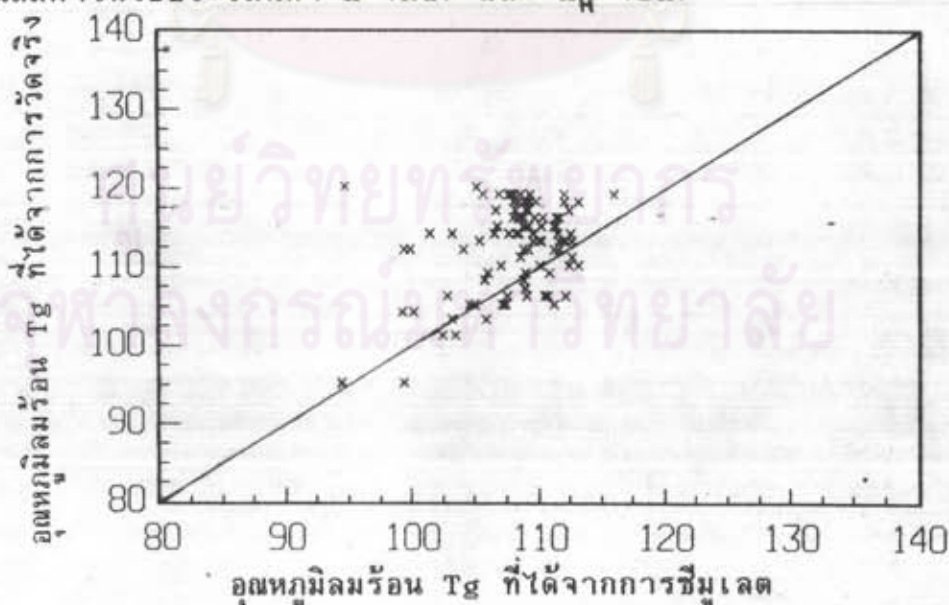
เพื่อให้การขีมูลค่าความชื้นที่ทางออกของวัสดุ  $w$  ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด สามารถทำได้ดียิ่งขึ้น ในที่นี้จะทดลองปรับค่าตัวคงที่  $a$  ในสมการที่ใช้ประเมิน ค่า  $h$  (หรือ  $Nu$ ) และค่า  $k_H$  (หรือ  $Sh$ ) ต่อไปนี้

$$Nu = 2 + a Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \dots\dots (5.3)$$

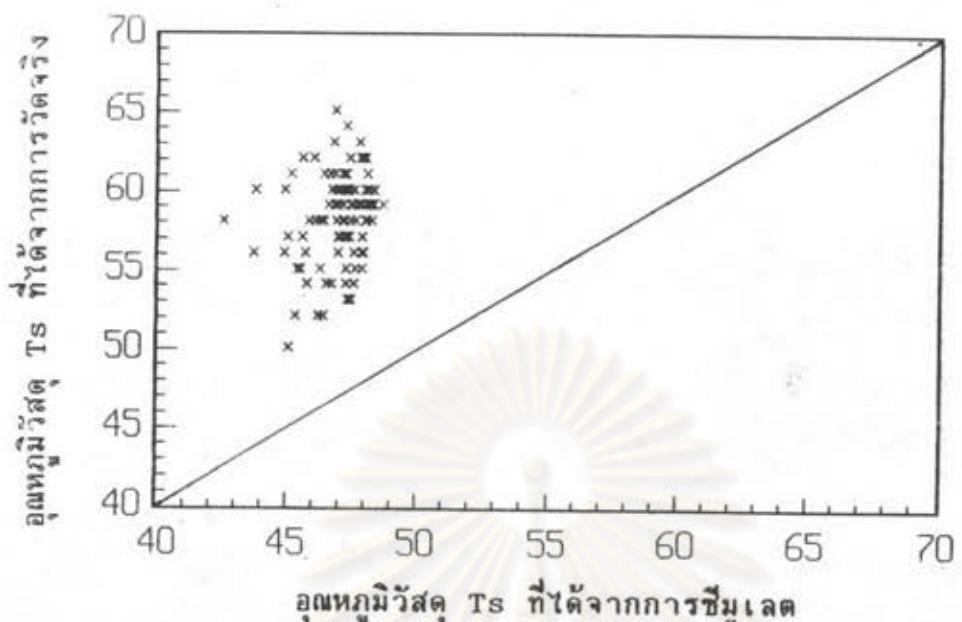
$$Sh = 2 + a Re_p^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots (5.4)$$

โดยทั่วไปค่าของ  $a$  ที่นิยมใช้กัน คือ 0.60 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการขีมูลค่าทั้งหมดข้างต้นเมื่อทำการปรับค่า  $a$  ที่ 0.65 , 0.68 , 0.70 ในสมการดังกล่าว แล้วทำการขีมูลค่าโดยใช้ค่า  $d_p = 0.45$  mm. จะได้ผลการเปรียบเทียบค่าต่างๆ ระหว่างผลการขีมูลค่ากับผลการวัดจริงในโรงงาน ดังรูปที่ 5.6(ก) ถึง (ง) รูปที่ 5.7(ก) ถึง (ง) และรูปที่ 5.8(ก) ถึง (ง) อนึ่งรูปที่ 5.9(ก) ถึง (ค) แสดงผลการเปรียบเทียบค่าของ  $T_s'$  ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (5.1) กับผลการปฏิบัติการจริง

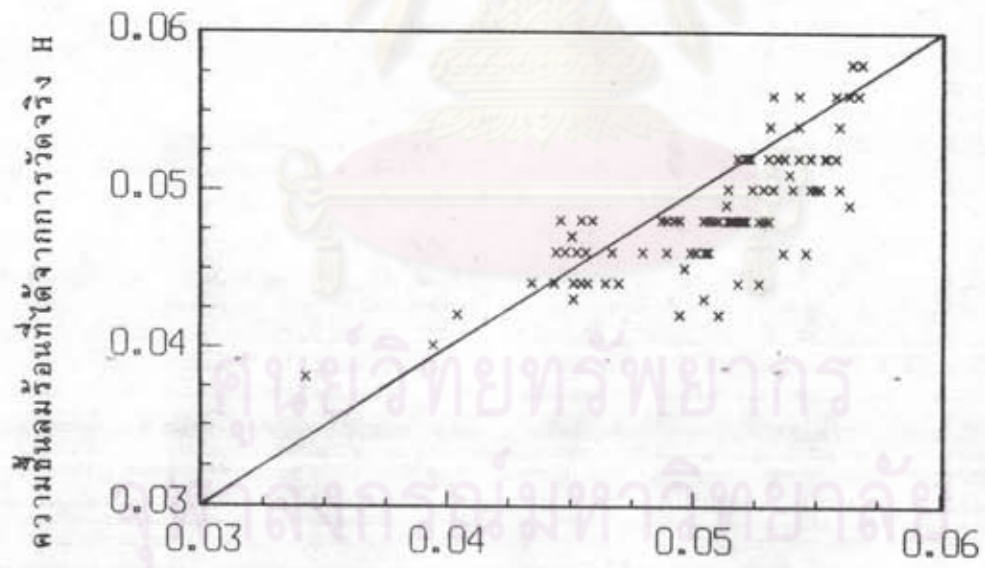
สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สามารถทำนายผลได้ดีที่สุดในแง่ของ ความชื้นขาออกวัสดุคือ ขนาดอนุภาค  $d_p = 0.45$  mm. และค่าคงที่  $a = 0.65$  ทั้งในสมการที่ใช้ประเมินค่า  $h$  ( $Nu$ ) และ  $k_H$  ( $Sh$ )



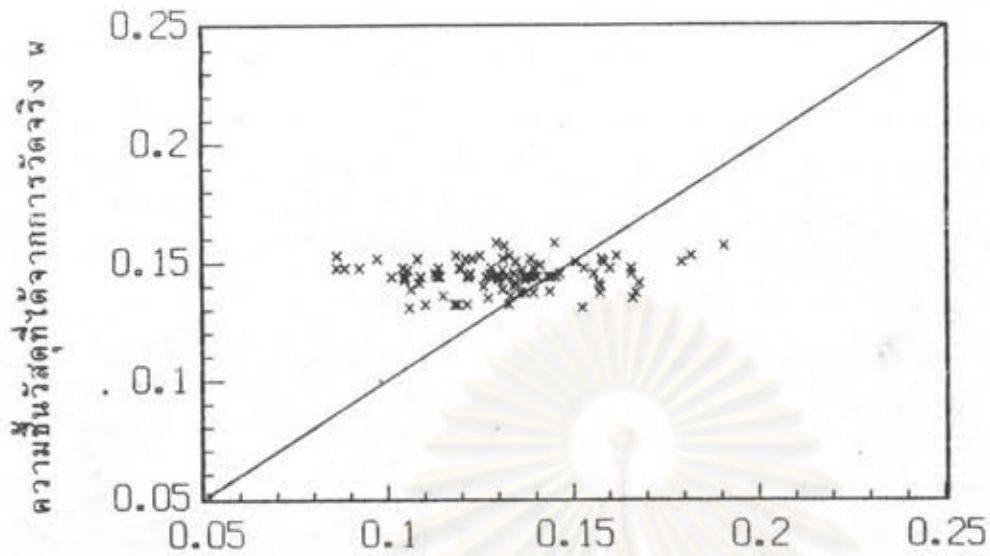
รูปที่ 5.6(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของอุณหภูมิร้อนที่ทางออก  $T_g$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการขีมูลค่า กรณี  $a=0.65$



รูปที่ 5.6(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัดที่ทางออก Ts ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชั่งหลอด กรณี  $a=0.65$

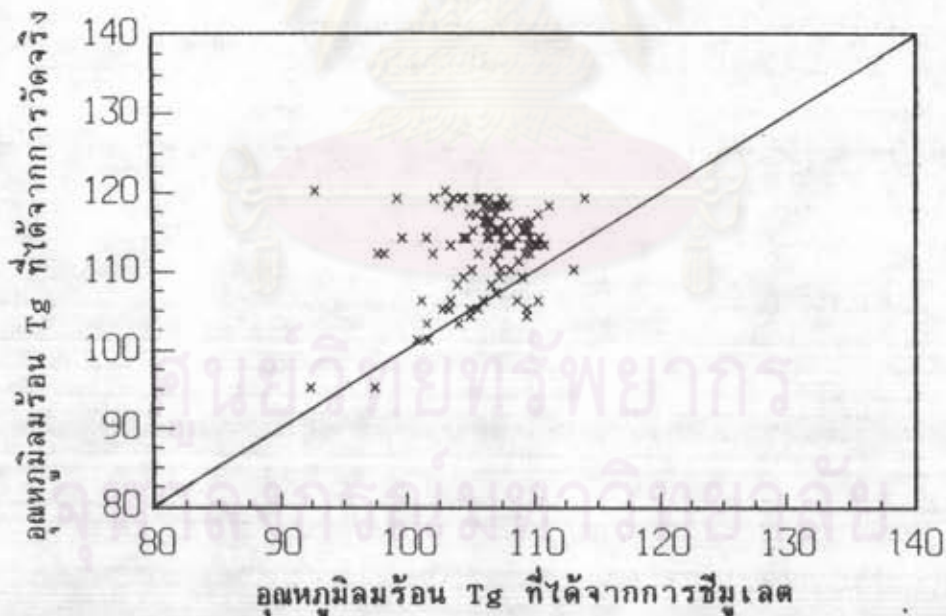


รูปที่ 5.6(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความชื้นของลมร้อนที่ทางออก H ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชั่งหลอด กรณี  $a=0.65$



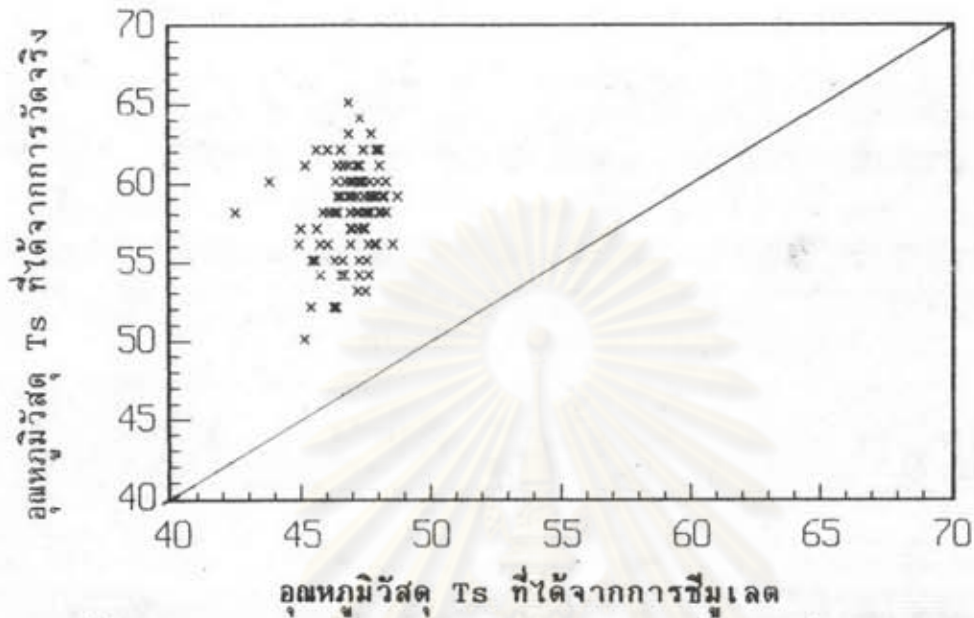
ความข้นวิสกั w ที่ได้จากกการวัตจจว้ง

รูปที่ 5.6(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความข้นของวิสกัที่ทางออก w ที่ได้จากกการวัตจจว้งกับที่ได้จากกการควบคุม กรณี  $\alpha=0.65$

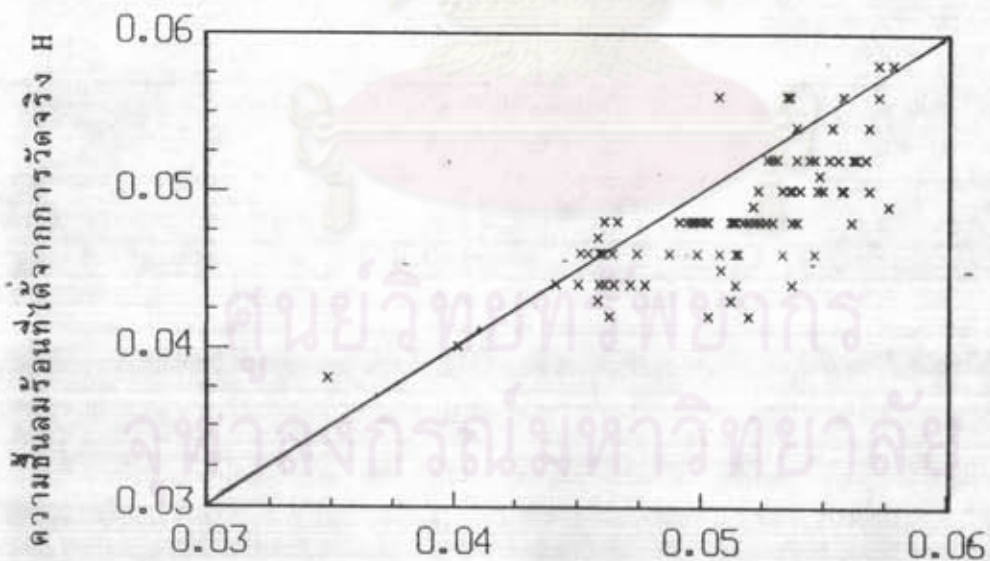


อุณหภูมิร้อน Tg ที่ได้จากกการวัตจจว้ง

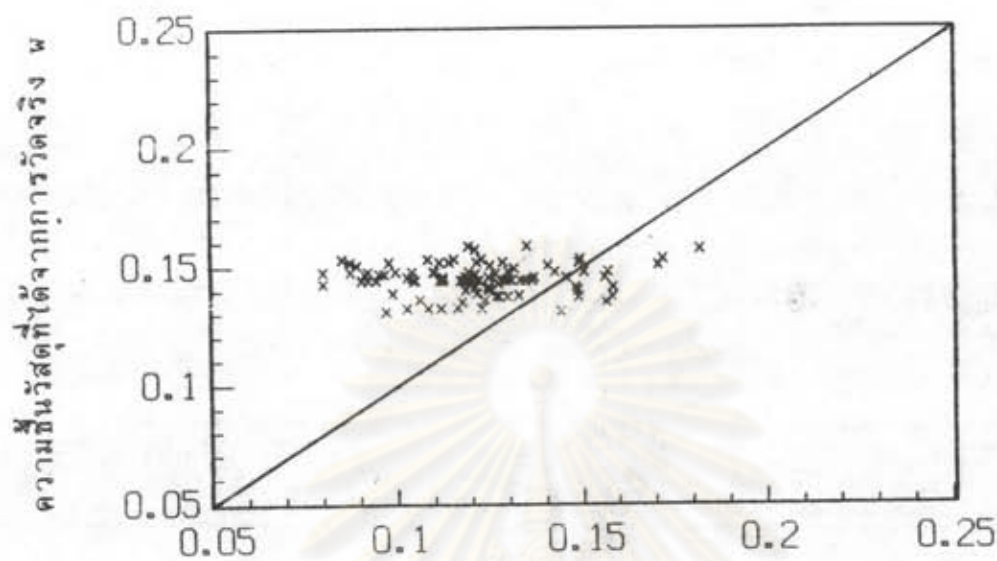
รูปที่ 5.7(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิร้อนที่ทางออก Tg ที่ได้จากกการวัตจจว้งกับที่ได้จากกการควบคุม กรณี  $\alpha=0.68$



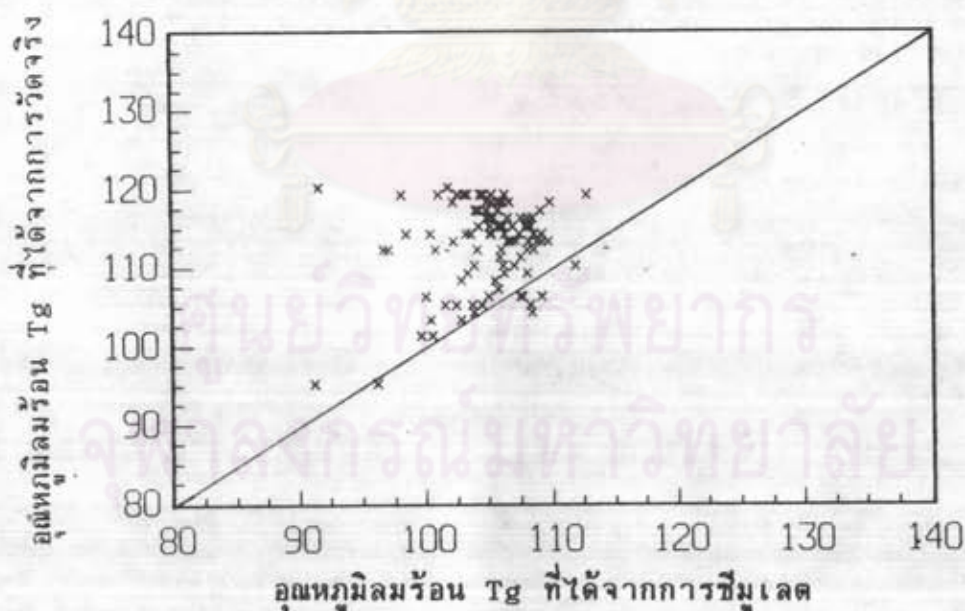
รูปที่ 5.7 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัดที่ทางออก Ts ที่ได้จากภาวทดลองกับที่ได้จากการชั่ง กรณี  $a=0.68$



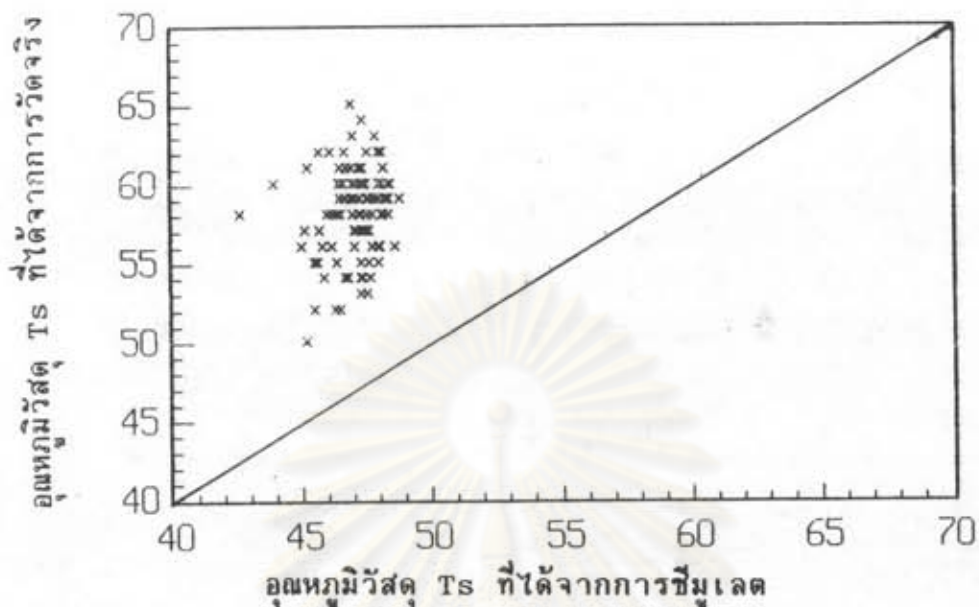
รูปที่ 5.7 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความชื้นของลมนที่ทางออก H ที่ได้จากภาวทดลองกับที่ได้จากการชั่ง กรณี  $a=0.68$



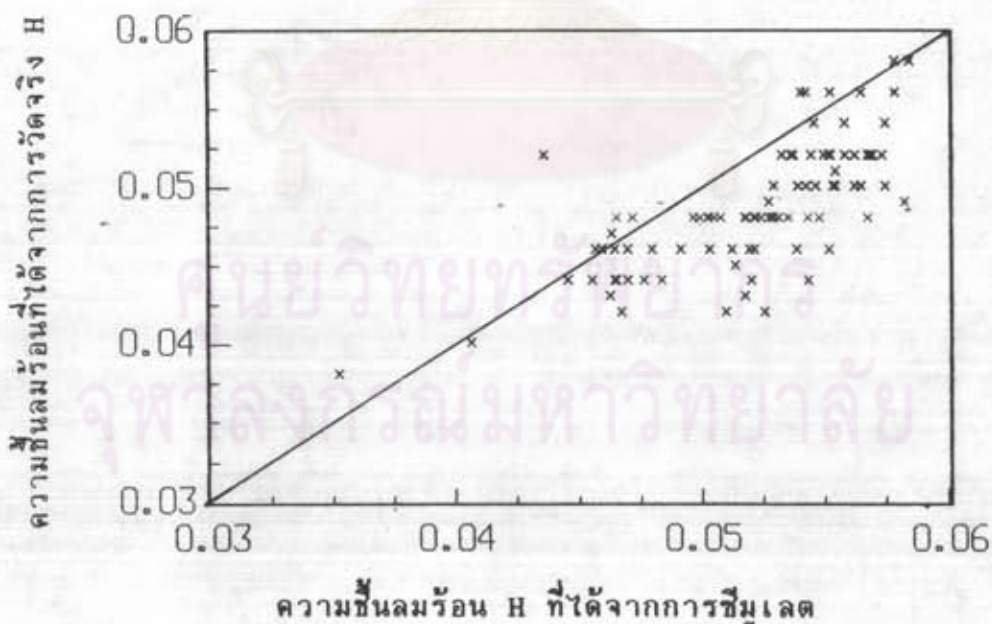
รูปที่ 5.7(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความขึ้นของวัสดุที่ทางออก  $w$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชั่งเลต กรณี  $a=0.68$



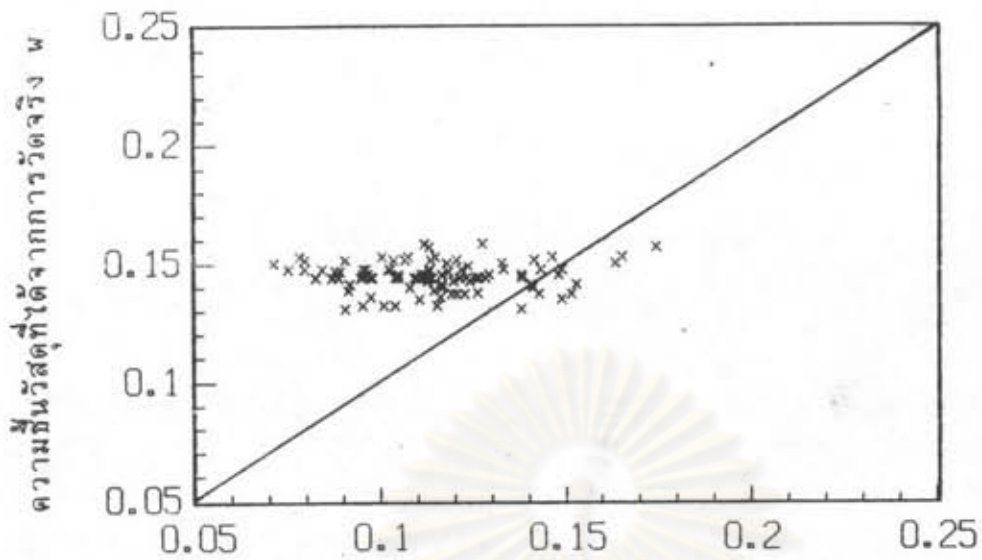
รูปที่ 5.8(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิร้อนที่ทางออก  $T_g$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชั่งเลต กรณี  $a=0.70$



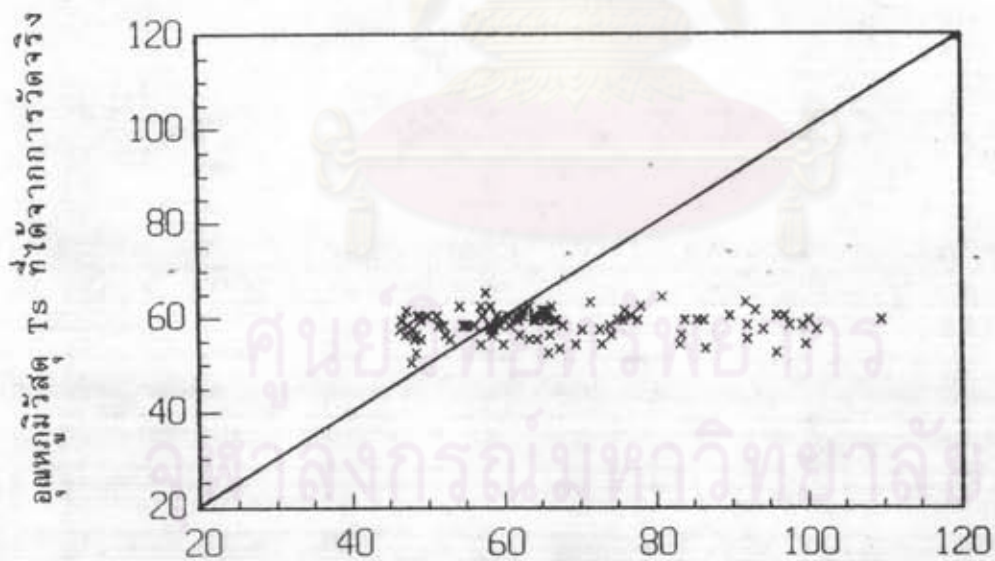
รูปที่ 5.8 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก Ts ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซิมูเลต กรณี  $a=0.70$



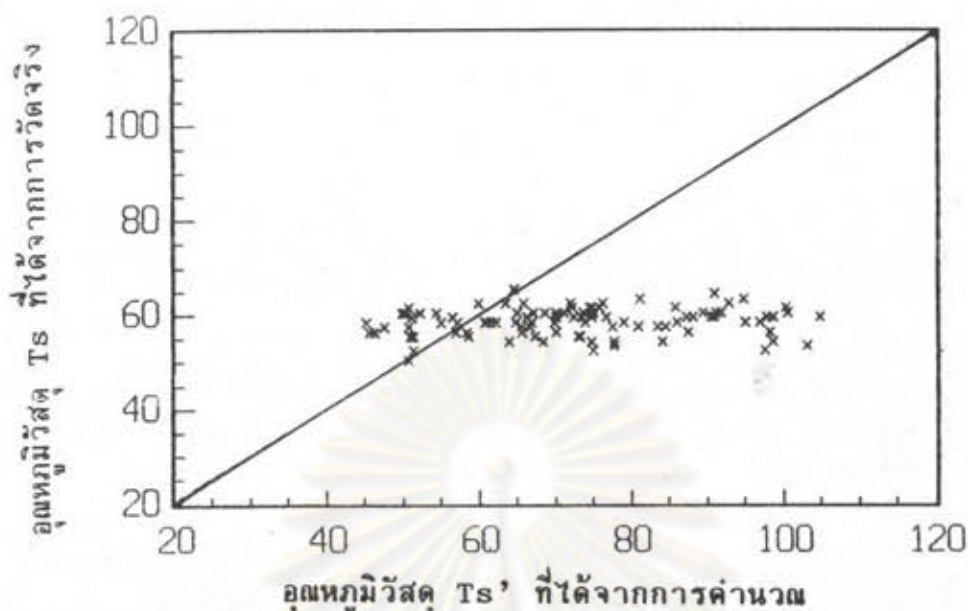
รูปที่ 5.8 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความชื้นของลมร้อนที่ทางออก H ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการซิมูเลต กรณี  $a=0.70$



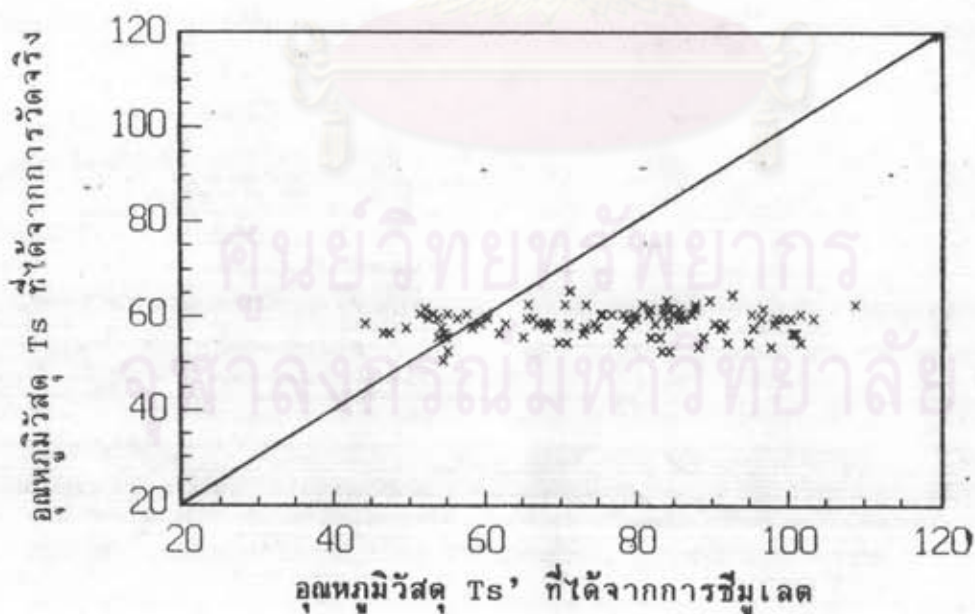
รูปที่ 5.8(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของความชื้นของวัสดุที่ทางออก  $p$  ที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการชั่งเบต กรณี  $a=0.70$



รูปที่ 5.9(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก  $Ts'$  ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการ (5.1) กับค่าที่ได้จากการปฏิบัติจริงในโรงงาน กรณี  $a=0.65$



รูปที่ 5.9(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก  $T_s'$  ซึ่งคำนวณได้โดย ใช้สมการ (5.1) กับค่าที่ได้จากการปฏิบัติจริงในโรงงาน กรณี  $a=0.68$



รูปที่ 5.9(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างคู่ของอุณหภูมิวัสดุที่ทางออก  $T_s'$  ซึ่งคำนวณได้โดย ใช้สมการ (5.1) กับค่าที่ได้จากการปฏิบัติจริงในโรงงาน กรณี  $a=0.70$

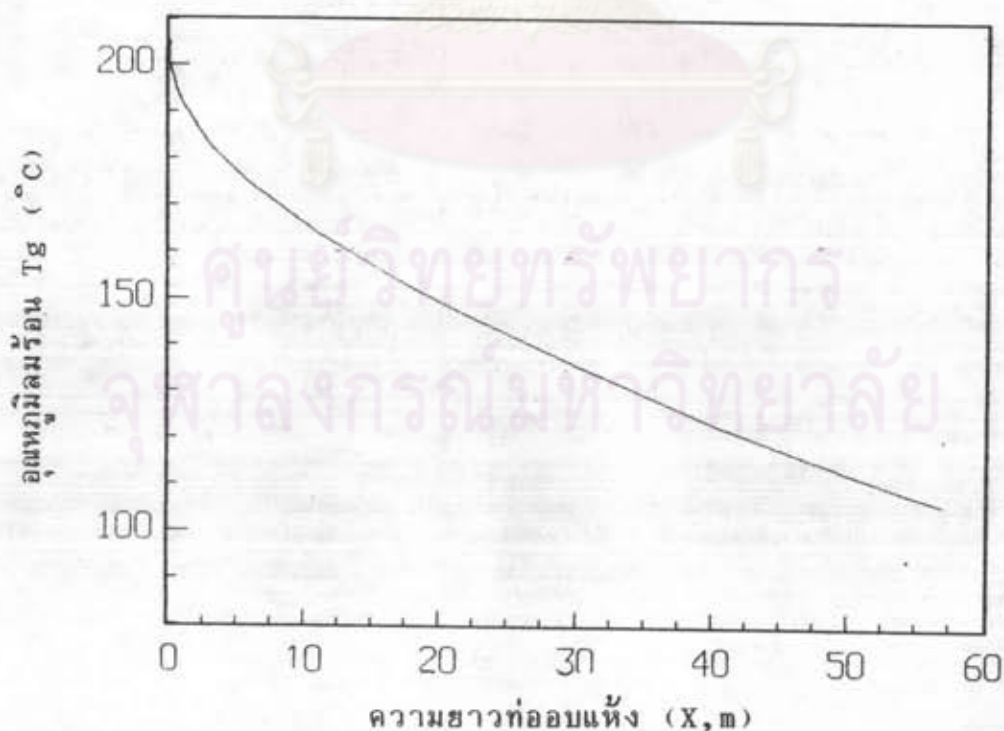


รูปที่ 5.10 ถึง 5.13 แสดงตัวอย่างของผลการซึมเล็ด เครื่องอบแห้งในโรงงานดังกล่าวโดยใช้พารามิเตอร์และเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้  $d_p = 0.45 \text{ mm}$ . ค่าคงที่  $a = 0.65$

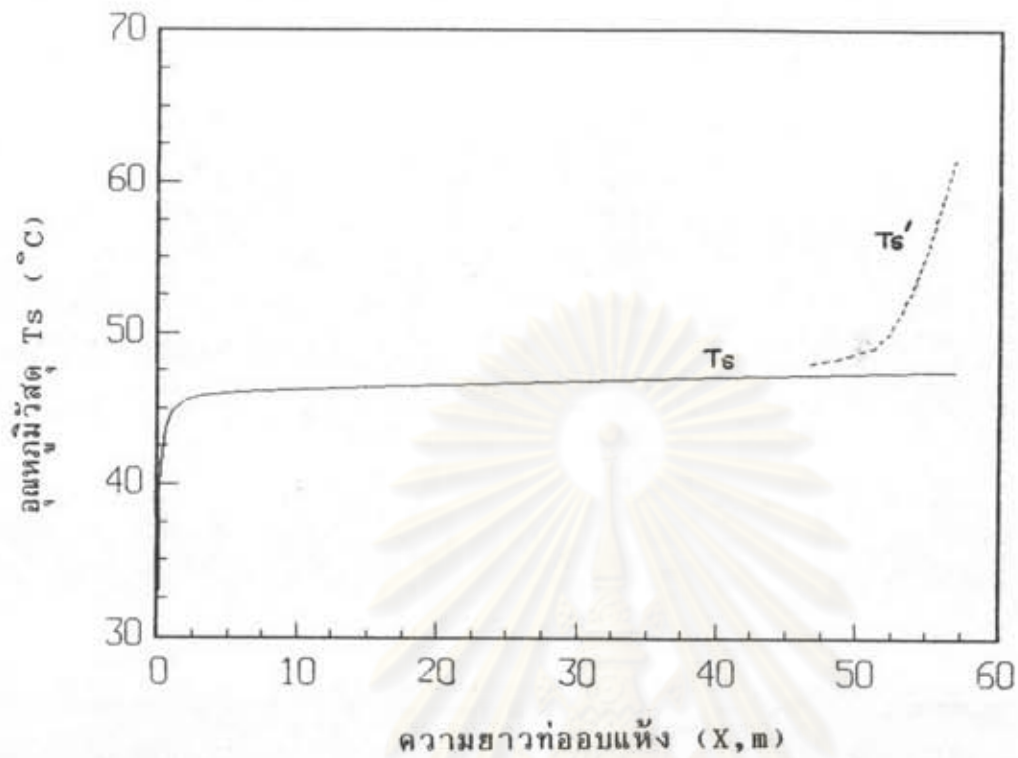
ตัวอย่างข้อมูลมีอยู่ในตาราง 5.3

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ซึมเล็ด

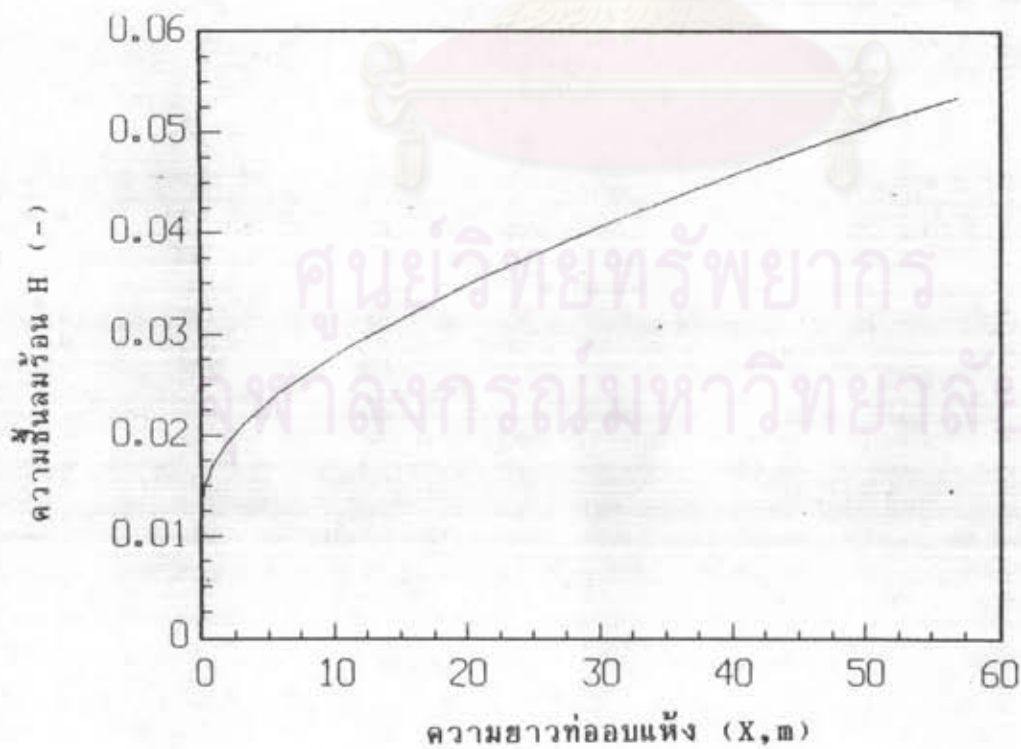
ข้อมูล	ที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง	ที่ทางออกเครื่องอบแห้ง
อุณหภูมิลมร้อน ( $^{\circ}\text{C}$ )	205	107
อุณหภูมิวัสดุ ( $^{\circ}\text{C}$ )	33	58
ความชื้นลมร้อน (-)	0.014	0.052
ความชื้นวัสดุ (-)	0.6129	0.1429
อัตราการป้อนแป้ง (kg วัสดุ ไร่ น้ำ/hr)	5758.63	5758.63



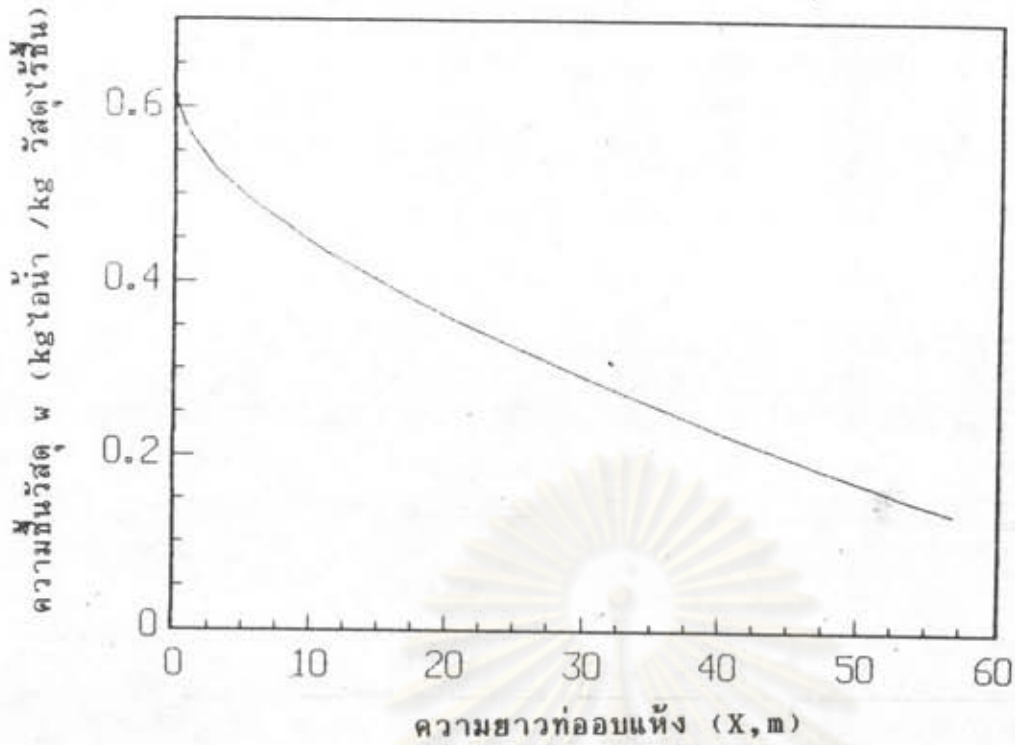
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อน  $T_g$  ที่ได้จากการซึมเล็ด กรณี  $a=0.65$  กับความยาวของเครื่องอบแห้ง



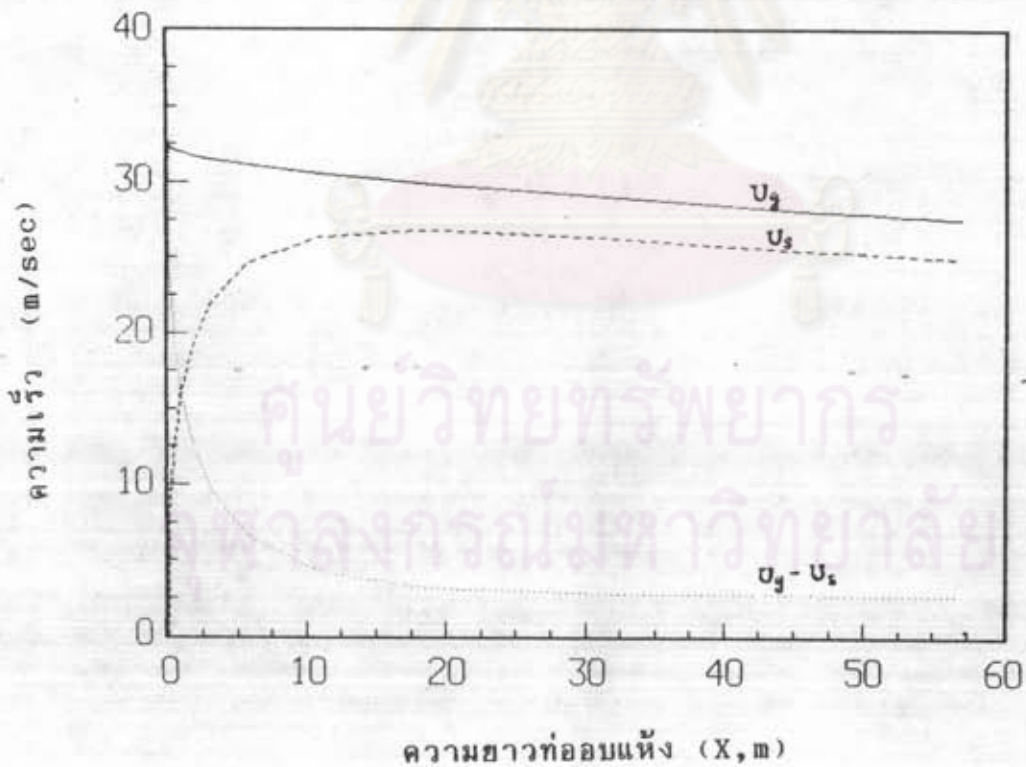
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวัสดุ  $T_s$  และ  $T_s'$  ที่ได้จาก การซิมูเลต กรณี  $a=0.65$  กับความยาวของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของลมร้อนที่ทางออก  $H$  ที่ได้ จาก การซิมูเลต กรณี  $a=0.65$  กับความยาวของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของวัสดุที่ทางออก  $w$  ที่ได้จาก การซีมูลेट กรณี  $a=0.65$  กับความยาวของเครื่องอบแห้ง



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $u_x, u_g, (u_x - u_g)$  ที่ได้จาก การซีมูลेट (กรณี  $a=0.65$ ) กับความยาวของเครื่องอบแห้ง  
โดย  $u_x$  = ความเร็วของลมร้อน  
 $u_g$  = ความเร็วของวัสดุ

จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิของลมร้อน  $T_g$  จะลดลงตามความยาวของเครื่องอบแห้ง เนื่องมาจากลมร้อนได้ถ่ายเทความร้อนให้วัสดุใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิของวัสดุ  $T_s$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของความยาวเครื่องอบแห้งอย่างรวดเร็ว เพราะความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนจะนำมาใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน จากนั้นอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มคงที่จนเกือบถึงทางออกเครื่องอบแห้งเพราะความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนช่วงนี้ถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำในวัสดุ อุณหภูมิวัสดุช่วงนี้จึงไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก จนถึงช่วงปลายท่ออบแห้ง ค่าอุณหภูมิวัสดุที่คำนวณจากสมการ (5.2)  $T_s'$  จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึงทางออกเครื่องอบแห้ง เพราะในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะเริ่มช้าลง ความร้อนที่ได้รับจากลมร้อนจึงไปทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้น อนึ่ง ความชื้นของลมร้อน  $H$  จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามความยาวของเครื่องอบแห้ง เนื่องมาจากลมร้อนได้รับความชื้นที่ระเหยออกมาจากวัสดุ ส่วนความชื้นของวัสดุ  $w$  จะค่อย ๆ ลดลงตามความยาวของเครื่องอบแห้ง เนื่องมาจากวัสดุได้รับความร้อนจากลมร้อนมาระเหยความชื้นออกไป ช่วงปลายท่ออบแห้ง  $w$  ค่อนข้างคงที่ เพราะว่าในช่วงนี้อัตราการอบแห้งเกิดขึ้นช้าลง

ความเร็วของลมร้อน  $u_x$  จะค่อยๆ ลดลงตามความยาวของเครื่องอบแห้ง ในขณะที่ความเร็วของวัสดุ  $u_s$  ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ตามความยาวของเครื่องอบแห้งโดยช่วงแรกของท่ออบแห้ง  $u_x$  จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะช่วงนี้เป็นภาระเร่งความเร็วของวัสดุให้มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของลมร้อน และสูงมากกว่าความเร็วขั้นปลายของวัสดุ (Terminal velocity) จากนั้นความเร็ววัสดุก็เกือบจะคงที่ตามความยาวเครื่องอบแห้งโดยผลต่างของความเร็วลมร้อนกับความเร็ววัสดุ  $(u_x - u_s)$  นั้นจะมีค่าน้อยมากเพราะว่า ขนาดอนุภาควัสดุเล็กมาก ทำให้ความเร็วของวัสดุเกือบจะเท่ากับความเร็วของลมร้อน

## 5.6 การหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ในการปฏิบัติงาน ถ้าเงื่อนไขการปฏิบัติงานไม่เหมาะสมอาจทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากเกินไป เพราะฉะนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมโดยพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเป็นหลัก และยังศึกษาถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิของลมร้อน ความเร็วของลมร้อน เป็นต้น ที่มีต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการปฏิบัติงาน กรณีศึกษามี 2 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 การหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมกว่าปัจจุบัน (กำลังการผลิตเท่าเดิม)

กรณีที่ 2 การหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เพิ่มกำลังการผลิตของ เครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

การศึกษานี้ จะพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพียง 2 ประเภท เท่านั้น คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการผลิตลมร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งลมร้อน ดังต่อไปนี้

### ก. ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความร้อน

พิจารณาค่าใช้จ่ายในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับลมร้อนเท่านั้น โดยถือว่าระบบไม่มีการสูญเสียความร้อน ขั้นตอนการพิจารณามีดังนี้

- คำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิลมจากอุณหภูมิบรรยากาศ ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง จาก

$$Q = G_o \cdot C_o \cdot (T_1 - T_{amb}) \dots (5.5)$$

- คำนวณค่าใช้จ่ายในการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน (H. Cost) โดยคำนวณจากปริมาณการใช้ น้ำมันเตาในการให้ความร้อน

$$H. Cost = [Q / (n \cdot \text{Heating Value})] \cdot 3.50 \dots (5.6)$$

โดยที่  $n =$  ค่าประสิทธิภาพของเตาเผา ( 55 % )  
 Heating value ของน้ำมันเตาเกรด C = 9800 kcal / lit  
 ราคาซื้อน้ำมันเตาเกรด C = 3.50 บาทต่อลิตร

### ข. ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า

พิจารณาค่าใช้จ่ายในการเดินพัดลมของ เครื่องอบแห้งเพียงอย่าง  
 เดียว ขั้นตอนการพิจารณามีดังนี้

- คำนวณ ความดันลด ปริมาตรการไหลของลมร้อนผ่านเครื่องซึ่งมี  
 อบแห้งรายละเอียดแสดงไว้ใน ภาคผนวก จ.

- คำนวณค่าใช้จ่าย ของพลังงานไฟฟ้า (B.Cost)

$$B.Cost = kW \cdot 1.07 \quad \dots (5.7)$$

โดยที่

$$\text{กำลังไฟฟ้า (kW)} = (\text{Vol. flow rate, m}^3/\text{sec}) (\Delta P, \text{kg/m}^2) (0.0098) \\
 (\text{Overall eff. of fan} = 0.8)$$

$$\text{อัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง} \\
 = 1.07 \text{ บาท/หน่วย (kW-hr)}$$

ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานรวม (T.Cost)

$$= B.Cost + H.Cost \quad \dots (5.8)$$

5.6.1 การหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมกว่าปัจจุบัน (กำลังการผลิตเท่าเดิม)

เงื่อนไขการปฏิบัติงานของเครื่องอบแห้งจะคำนึงถึง ความชื้นของแป้งแห้งที่ทางออกเครื่องเป็นหลัก ( ความชื้นที่กำหนด = 11-14 % หรือ 0.1236 - 0.1628 kg น้ำ /kg วัสดุไ้่น้ำ ) โดยให้อุณหภูมิลมร้อนที่แต่ทางเข้าคงที่ ปรับเปลี่ยนค่าความเร็วลมร้อน

ขั้นตอนการหาเงื่อนไขการปฏิบัติงาน มีดังนี้

- ใช้แบบจำลองข้างต้นทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง ที่เงื่อนไขปัจจุบันของโรงงาน

- ทดลองปรับตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วลม อุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้า
- คำนวณค่าใช้จ่ายที่เงื่อนไขต่าง ๆ
- พล็อตกราฟหาเงื่อนไขการปฏิบัติที่เหมาะสม
- เปรียบเทียบ ค่าใช้จ่าย ที่สภาพปัจจุบันกับที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ตัวอย่างข้อมูลที่ใช้พิจารณา ดังตารางที่ 5.3

อุณหภูมิลมร้อนที่พิจารณา คือ 190 , 205 , 220 °C

ความเร็วลมร้อนที่พิจารณา คือ 15 , 20 , 25 , 30 , 35 m/sec

ตารางที่ 5.4 ค่าทำนายของความชื้นของวัสดุที่ทางออกเครื่องอบแห้ง

ความเร็วลมร้อน (m/sec)	กรณี $T_1 = 190$ ( °C )	กรณี $T_1 = 205$ ( °C )	กรณี $T_1 = 220$ ( °C )
15	0.272	0.250	0.230
20	0.181	0.148	0.117
25	0.160	0.120	0.079
30	0.177	0.135	0.093
35	0.203	0.162	0.121

ตารางที่ 5.5 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ความเร็วลมร้อนต่างๆ  
(อุณหภูมิลมร้อนทางเข้า = 190 °C)

ความเร็วลมร้อน (m/sec)	$\Delta P$ (cm.H <sub>2</sub> O)	kW (kW)	Q x10 <sup>4</sup> (kcal/hr)	B.cost (Baht)	H.cost (Baht)	T.cost (Baht)
15	19.419	28.026	2.152	29.98	1397.34	1427.33
20	34.369	66.134	2.869	70.76	1853.12	1933.88
25	53.557	128.819	3.587	137.84	2328.90	2466.73
30	76.982	222.198	4.304	237.75	2794.68	3032.43
35	104.646	352.386	5.021	377.05	3260.46	3637.51

ตารางที่ 5.6 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานความเร็วลมร้อนต่าง ๆ  
(อุณหภูมิลมร้อนทางเข้า = 205 °C)

ความเร็วลมร้อน (m/sec)	$\Delta P$ (cm.H <sub>2</sub> O)	kW (kW)	Q x10 <sup>4</sup> (kcal/hr)	B.cost (Baht)	H.cost (Baht)	T.cost (Baht)
15	18.397	26.550	2.362	28.41	1533.90	1562.31
20	32.551	62.636	3.149	67.02	2045.20	2112.22
25	50.716	121.986	3.937	130.53	2566.50	2687.03
30	72.892	210.390	4.724	225.12	3067.80	3292.92
35	99.078	333.636	5.512	356.99	3579.10	3936.09

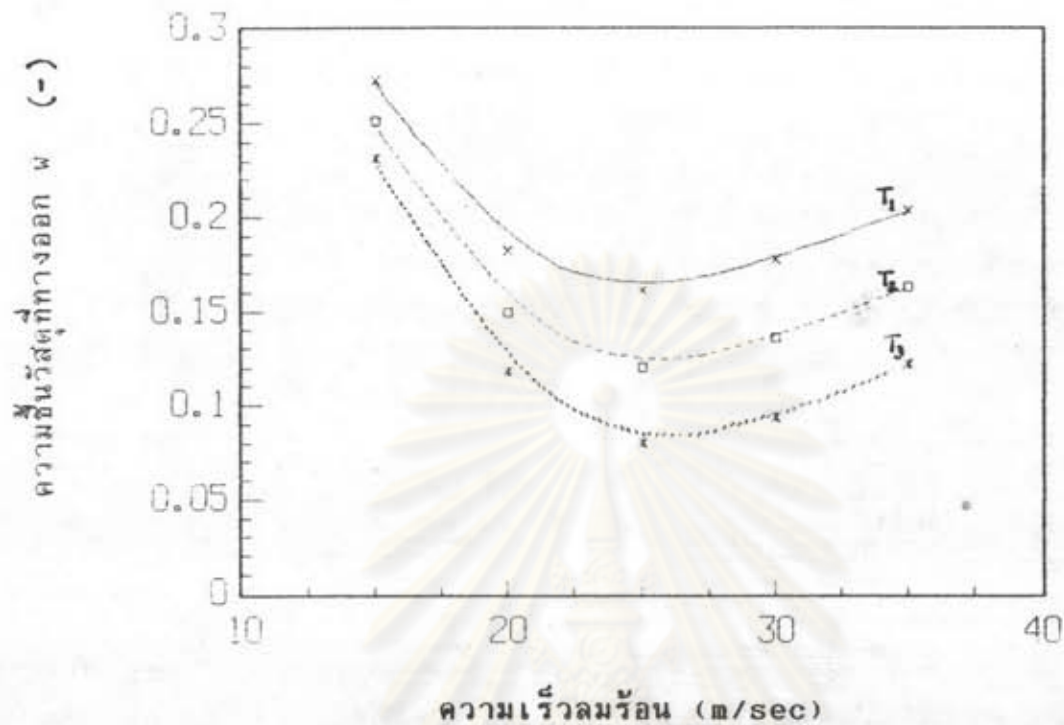


ตารางที่ 5.7 ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ความเร็วลมร้อนต่าง ๆ  
(อุณหภูมิลมร้อนทางเข้า = 220 °C)

ความเร็วลมร้อน (m/sec)	$\Delta P$ (cm.H <sub>2</sub> O)	kW (kW)	Q x10 <sup>6</sup> (kcal/hr)	B.cost (Baht)	H.cost (Baht)	T.cost (Baht)
15	17.462	25.200	2.573	26.96	1670.69	1695.89
20	30.888	59.436	3.430	63.60	2227.59	2287.03
25	48.117	115.736	4.288	123.84	2784.49	2900.23
30	69.149	199.589	5.146	213.56	3341.39	3540.98
35	93.958	316.485	6.003	338.64	3898.29	4214.77

ตารางที่ 5.8 ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานต่อหน่วยแป้งแห้ง (บาท / ตัน แป้งแห้ง) กับความเร็วลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าต่างๆ

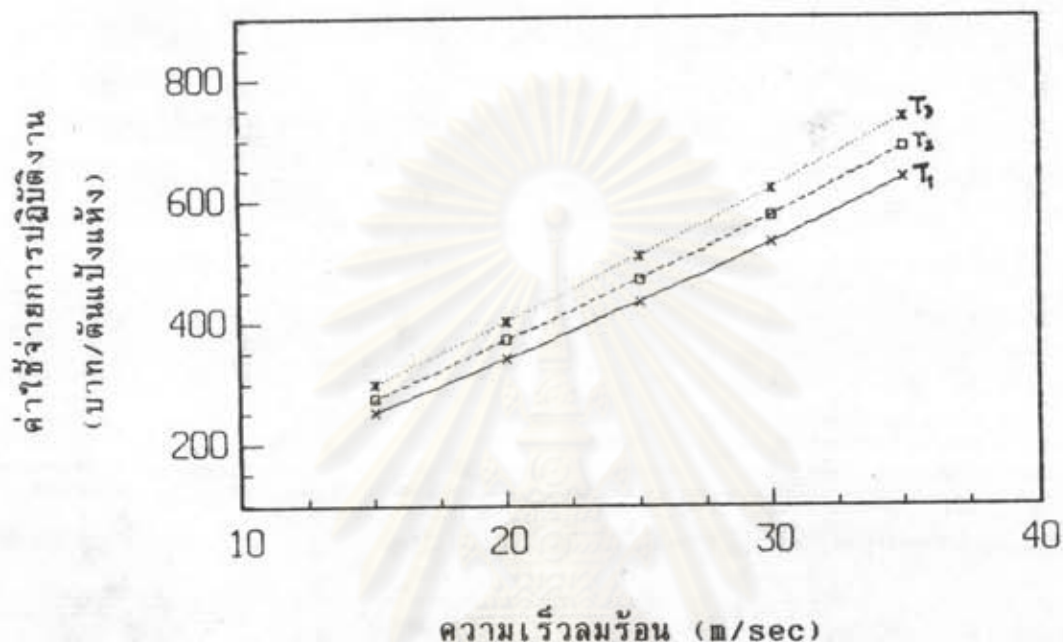
ความเร็วลม (m/sec)	T=190 °C			T=205 °C			T=220 °C		
	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost
15	5.1	242.7	247.8	4.9	266.4	271.3	4.7	290.1	294.8
20	12.3	321.8	334.1	11.6	355.2	366.8	11.0	386.8	397.8
25	23.9	404.4	428.3	22.7	445.7	468.4	21.5	483.5	505.0
30	41.3	485.3	526.6	39.1	532.7	571.8	37.1	580.2	617.3
35	65.5	566.2	631.7	62.0	621.5	683.5	58.8	677.0	735.8



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นวัสดุที่ทางออกเครื่องอบแห้ง กับความเร็วลมร้อน (ผลการซีมูล)

กรณี	$T_1$	=	190	°C
	$T_2$	=	205	°C
	$T_3$	=	220	°C

จากรูปข้างต้น พบว่า ที่ความเร็วลมร้อนตั้งแต่ 10-20 m/sec ค่าความชื้นวัสดุที่ทางออก w จะค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนสูงขึ้น เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนสูงขึ้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับวัสดุจะสูงตามไปด้วย ประกอบกับเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่องยังนานพอ อัตราการอบแห้งจึงสูง และ ความชื้นของผลิตภัณฑ์แป้งจึงลดลง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนสูงขึ้นอีก 20-30 m/sec พบว่าค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์แป้งค่อยๆสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วลมร้อนสูง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงก็ตามแต่เวลาอยู่ในเครื่องของวัสดุจะสั้นลงมาก จึงทำให้การอบแห้งเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นความชื้นของแป้งจึงค่อยๆ สูงขึ้น อนึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้าให้สูงขึ้น ความชื้นวัสดุจะลดต่ำลง เพราะผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างลมร้อนกับวัสดุจะสูงขึ้น



รูปที่ 5.16 ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานต่อหน่วยแป้งแห้ง (บาท/ตันแป้งแห้ง) กับความเร็วลมร้อน

กรณี	$T_1 = 190$	$^{\circ}\text{C}$
	$T_2 = 205$	$^{\circ}\text{C}$
	$T_3 = 220$	$^{\circ}\text{C}$

จากรูป พบว่า ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานรวมจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของลมร้อนโดยคงอัตราการป้อนวัสดุอบแห้งเมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขการปฏิบัติงานสภาวะปัจจุบัน ( $u_{20} = 31$  m/sec  $T_1 = 205$   $^{\circ}\text{C}$ ) พบว่ายังไม่ใช่เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดเพราะยังสามารถลดความเร็วลมร้อนลงได้อีกหรือเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน โดยยังได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์แป้งตามกำหนด (0.11 - 0.15)

กรณีที่ 1 ถ้าลดความเร็วลมร้อนลงเหลือ 25 m/sec จะได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้ง = 0.12 แต่ลดค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานรวมลงได้ ประมาณ = 105 บาท/ตัน แป้งแห้ง หรือ 430,000 บาท/ เดือน

กรณีที่ 2 ถ้าเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนให้สูงขึ้นเป็น 220 °C ( $u=31\text{m/sec}$ ) จะได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้ง = 0.10 โดยต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานรวม = 43 บาท / ตัน แป้งแห้ง

กรณีที่ 3 ในทางกลับกันถ้าลดอุณหภูมิลมร้อนลงที่ 190 °C ผลิตภัณฑ์แห้งจะขึ้นมากเกินไปกำหนด

สรุปแล้วเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่อัตราการป้อนแห้งและความชื้นแห้งขาเข้านี้ คือ อุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้า 205 °C และความเร็วลมร้อนที่ทางเข้า 25 m/sec

อนึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมพบว่าการเพิ่มความเร็วลมร้อน มีผลทำให้ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานรวมสูงขึ้นประมาณ 20 บาท/ตัน แป้งแห้ง ต่อการเพิ่มความเร็วทุก 1 m/sec ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นประมาณ 2 บาท / ตัน แป้งแห้ง ต่อการเพิ่มอุณหภูมิทุก 1°C ดังนั้นจะเห็นว่าในการปรับความเร็วจะมีผลต่อค่าใช้จ่ายมาก เพราะว่าการปรับค่าความเร็วจะทำให้ อัตราการไหลเชิงมวลของลมร้อนเปลี่ยนแปลงทำให้พลังงานความร้อนที่ป้อนให้ลมร้อนเปลี่ยนแปลงมาก ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายพลังงานความร้อนและค่าไฟฟ้าของพัดลมเปลี่ยนแปลงมากด้วย เพราะฉะนั้นในการหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสม ควรพิจารณาเลือกค่าความเร็วลมร้อนให้เหมาะสมก่อน

ในแง่การปฏิบัติงานจริง ถ้าทำการปรับความเร็วลมด้วยแผ่นกัน (damper) ความดันสูญเสียของลมร้อนและค่าไฟฟ้าของพัดลมจะไม่ลดลง ดังนั้นจึงควรใช้ระบบปรับความเร็วรอบของพัดลมในการปรับตั้งความเร็วลมจึงจะประหยัดทั้งพลังงานความร้อนและค่าไฟฟ้าได้พร้อมๆกันในเวลาลดความเร็วลมร้อน

### 5.6.2 การหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เพิ่มกำลังการผลิตเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

ในกรณีของเครื่องอบแห้งที่ใช้งานอยู่ ประเด็นหนึ่งที่น่าสนใจคือ การใช้เครื่องอบแห้งนี้เต็มประสิทธิภาพแล้วหรือไม่ในที่นี้ได้ทดลองซีมูลेट โดยปรับเปลี่ยนกำลังการผลิต กำลังการผลิตที่พิจารณา คือ

- 5758.63 kg ไร่ความชื้น /hr (กรณีปกติ)
- 6334.49 kg ไร่ความชื้น /hr (เพิ่ม 10 %)
- 6910.36 kg ไร่ความชื้น /hr (เพิ่ม 20 %)
- 7486.22 kg ไร่ความชื้น /hr (เพิ่ม 30 %)

ตารางที่ 5.9 ความชื้นของแป้งที่ทางออกเครื่องอบแห้งที่กำลังการผลิตและความเร็วลมร้อน ต่างๆ

สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า  $T_1 = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$

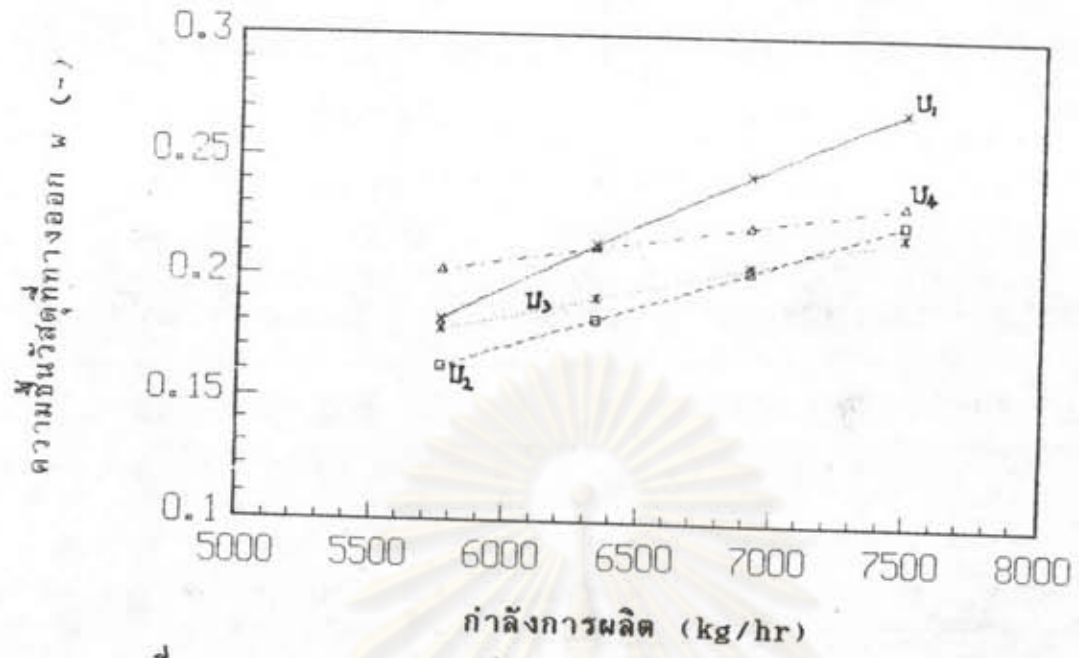
กำลังการผลิต (kg ไร่ความชื้น /hr)	$U_{\infty}=20$ (m/sec)	$U_{\infty}=25$ (m/sec)	$U_{\infty}=30$ (m/sec)	$U_{\infty}=35$ (m/sec)
5758.63	0.1813	0.1612	0.1768	0.2026
6334.49	0.2136	0.1819	0.1908	0.2124
6910.36	0.2426	0.2029	0.2046	0.2218
7486.22	0.2694	0.2233	0.2182	0.2313

ตารางที่ 5.10 ความชื้นของแป้งที่ทางออกเครื่องอบแห้งที่กำลังการผลิตและความเร็วลมร้อนต่างๆ  
สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า  $T_1 = 205 \text{ } ^\circ\text{C}$

กำลังการผลิต (kg ไร่ความชื้น/hr)	$U_{\text{air}}=20$ (m/sec)	$U_{\text{air}}=25$ (m/sec)	$U_{\text{air}}=30$ (m/sec)	$U_{\text{air}}=35$ (m/sec)
5758.63	0.1484	0.1195	0.1348	0.1623
6334.49	0.1845	0.1441	0.1509	0.1731
6910.36	0.2169	0.1681	0.1664	0.1841
7486.22	0.2461	0.1912	0.1821	0.1947

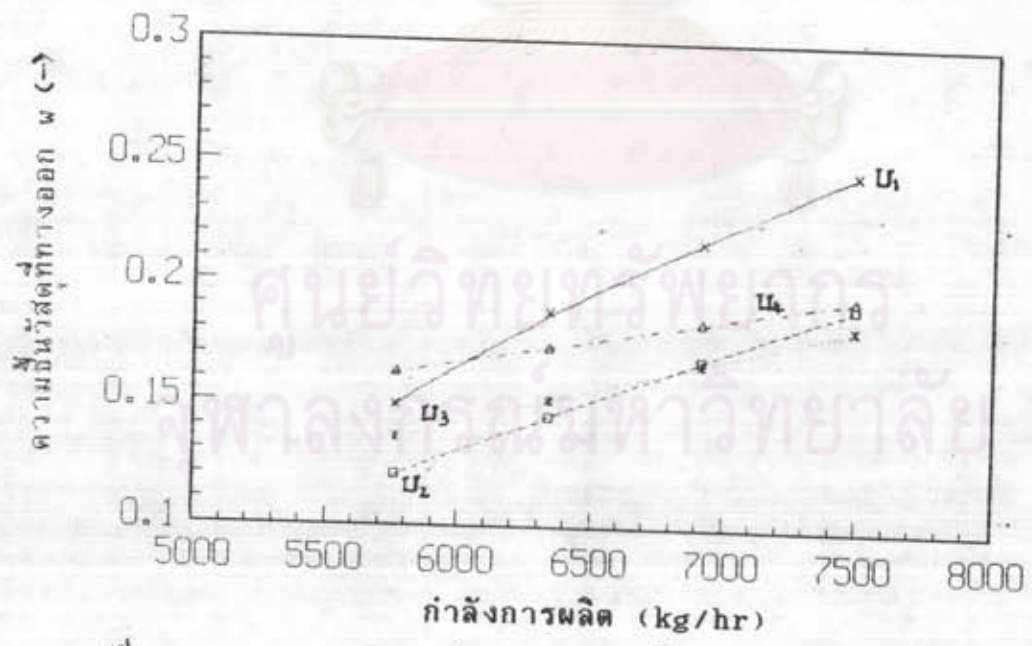
ตารางที่ 5.11 ความชื้นของแป้งที่ทางออกเครื่องอบแห้งที่กำลังการผลิตและความเร็วลมร้อนต่างๆ  
สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า  $T_1 = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$

กำลังการผลิต (kg ไร่ความชื้น/hr)	$U_{\text{air}}=20$ (m/sec)	$U_{\text{air}}=25$ (m/sec)	$U_{\text{air}}=30$ (m/sec)	$U_{\text{air}}=35$ (m/sec)
5758.63	0.1168	0.0790	0.0926	0.1212
6334.49	0.1567	0.1069	0.1105	0.1334
6910.36	0.1923	0.1339	0.1282	0.1455
7486.22	0.2239	0.1599	0.1458	0.1577



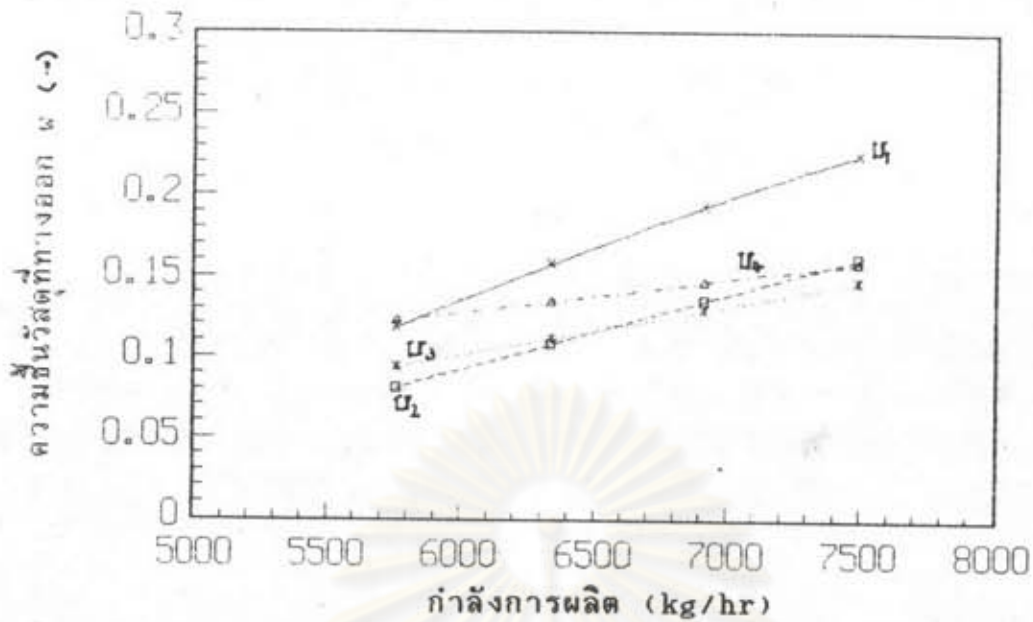
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแป้งกับกำลังการผลิต สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 190 °C

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 20 \text{ m/sec} & U_2 &= 25 \text{ m/sec} \\
 U_3 &= 30 \text{ m/sec} & U_4 &= 35 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแป้งกับกำลังการผลิต สำหรับ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 205 °C

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 20 \text{ m/sec} & U_2 &= 25 \text{ m/sec} \\
 U_3 &= 30 \text{ m/sec} & U_4 &= 35 \text{ m/sec}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแป้งกับกำลังการผลิต  
สำหรับ อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 220 °C

$$U_1 = 20 \text{ m/sec} \quad U_2 = 25 \text{ m/sec}$$

$$U_3 = 30 \text{ m/sec} \quad U_4 = 35 \text{ m/sec}$$

ตารางที่ 5.12 ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานต่อหน่วย (บาท/ตันแป้งแห้ง) กับ  
กำลังการผลิต สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 190 °C

กำลังการผลิต (kg/hr)	$U_{\text{air}} = 20 \text{ m/sec}$			$U_{\text{air}} = 25 \text{ m/sec}$			$U_{\text{air}} = 30 \text{ m/sec}$		
	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost
5758.63	12.3	323.5	335.8	23.9	404.4	428.3	41.3	485.3	526.6
6334.49	11.2	294.1	305.3	21.8	367.7	389.5	37.6	441.2	478.8
6910.36	10.3	261.6	271.9	20.0	337.0	357.0	34.5	404.4	438.9
7486.22	9.5	248.9	258.4	18.5	311.1	329.6	31.8	373.3	405.1



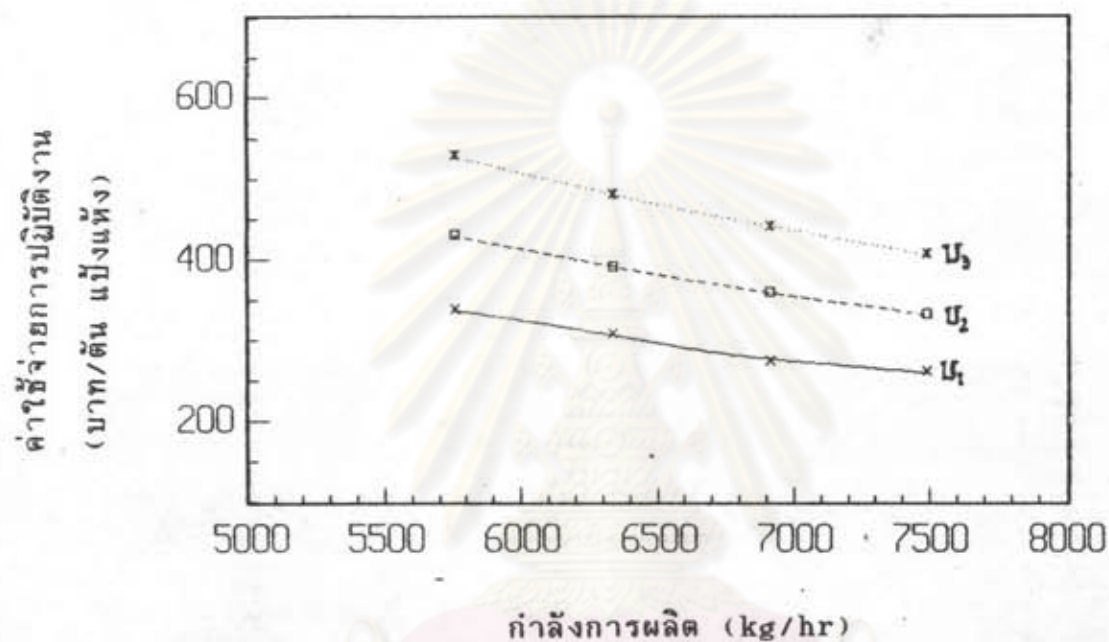


ตารางที่ 5.13 ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานต่อหน่วย (บาท/ตันแป้งแห้ง) กับกำลังการผลิต สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 205 °C

กำลังการผลิต (kg/hr)	U <sub>oo</sub> = 20 m/sec			U <sub>oo</sub> = 25 m/sec			U <sub>oo</sub> = 30 m/sec		
	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost
5758.63	11.6	355.2	366.8	22.7	444.4	467.1	39.1	532.7	571.8
6334.49	10.6	322.9	333.5	20.6	403.6	424.2	35.6	484.3	519.9
6910.36	9.7	296.0	305.7	18.9	370.0	388.9	32.6	443.9	476.5
7486.22	9.0	273.2	282.2	17.5	341.5	359.0	30.2	409.8	440.0

ตารางที่ 5.14 ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานต่อหน่วย (บาท/ตันแป้งแห้ง) กับกำลังการผลิต สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 220 °C

กำลังการผลิต (kg/hr)	U <sub>oo</sub> = 20 m/sec			U <sub>oo</sub> = 25 m/sec			U <sub>oo</sub> = 30 m/sec		
	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost	Bcost	Hcost	Tcost
5758.63	11.0	386.8	397.8	21.5	483.5	505.0	37.1	580.2	617.3
6334.49	10.1	351.7	361.8	19.6	439.6	459.2	33.8	527.5	561.3
6910.36	9.2	322.4	331.6	18.0	402.9	420.9	31.0	483.5	514.5
7486.22	8.5	297.6	306.1	16.6	371.9	380.5	28.6	446.3	474.9



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานต่อหน่วย  
(บาท/ตัน แป้งแห้ง) กับกำลังการผลิต

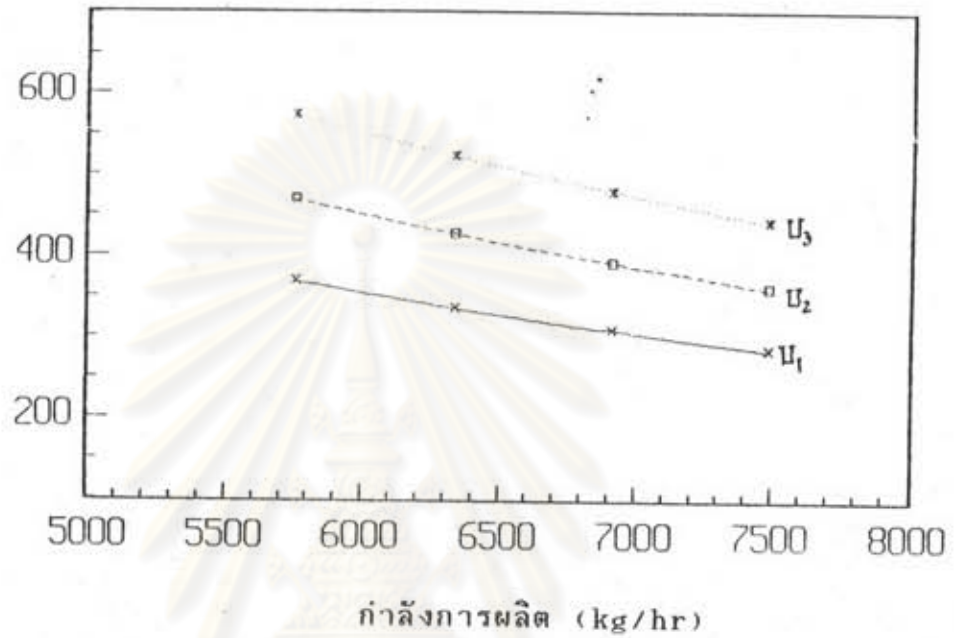
สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 190 °C

$$U_1 = 20 \text{ m/sec}$$

$$U_2 = 25 \text{ m/sec}$$

$$U_3 = 30 \text{ m/sec}$$

ค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงาน  
(บาท/ตันแป้งแห้ง)



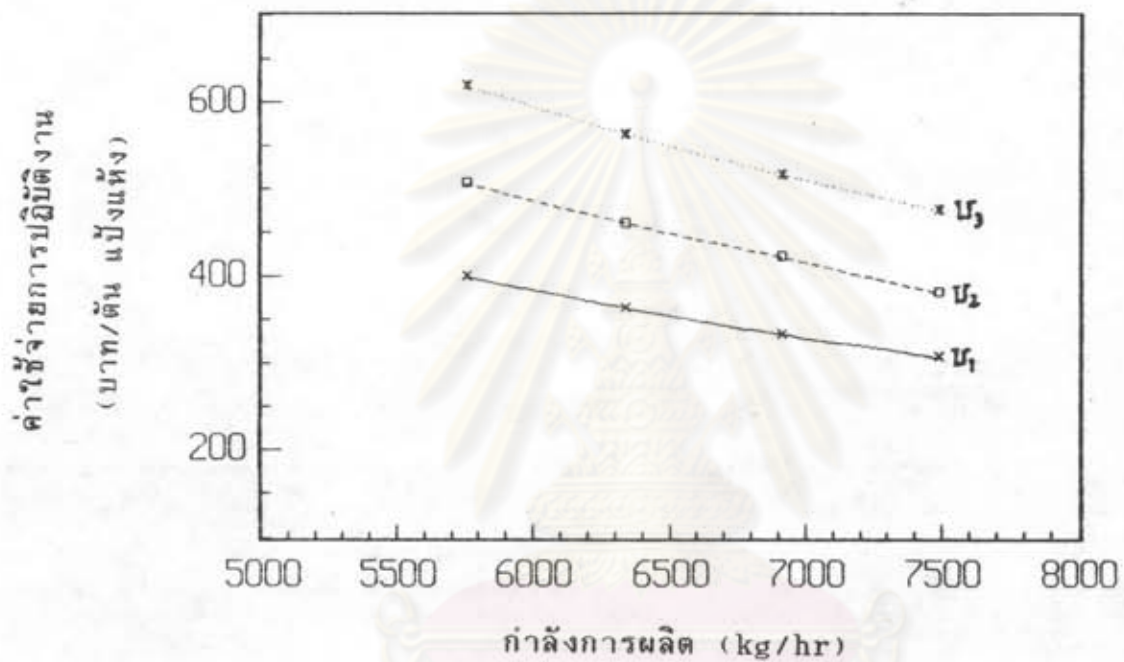
รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายปฏิบัติงานต่อหน่วย  
(บาท/kg แป้งแห้ง) กับกำลังการผลิต  
สำหรับอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า = 205 °C

$$U_1 = 20 \text{ m/sec}$$

$$U_2 = 25 \text{ m/sec}$$

$$U_3 = 30 \text{ m/sec}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายปฏิบัติงานต่อหน่วย (บาท/ตัน แปะงแห้ง) กับกำลังการผลิต สำหรับอุณหภูมิร้อนชาเข้า = 220 °C

$$U_1 = 20 \text{ m/sec}$$

$$U_2 = 25 \text{ m/sec}$$

$$U_3 = 30 \text{ m/sec}$$

จากรูป 5.17 ถึง 5.19 พบว่าที่เงื่อนไขการปฏิบัติงานปัจจุบัน ( $T=205^{\circ}\text{C}$ ,  $U=31\text{ m/sec}$ ) นั้นยังสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้อีกประมาณ 10 % (6330 kg/hr) โดยที่ความชื้นวัสดุที่ทางออก  $= 0.1509$  อีกทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานต่อหน่วยลงได้ประมาณ 520 บาท ต่อตัน แป้งแห้ง อนึ่งถ้าพิจารณาที่ความเร็ว 25 m/sec สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ประมาณ 15 % โดยที่ค่าใช้จ่ายลดลงประมาณ 50 บาท/ตัน แป้งแห้ง แต่ที่ความเร็วอื่นๆ จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้น้อยมาก

ในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิลมร้อนเป็น  $220^{\circ}\text{C}$  ที่ความเร็วลมร้อน 30 m/sec จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้สูงขึ้นประมาณ 30 % โดยที่ความชื้นของแป้งที่ทางออก  $= 0.1458$  และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายการปฏิบัติงานลงได้ 960 บาท / ตัน แป้งแห้ง

เนื่องจากในการหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสม เป้าหมายหลักคือ ลดค่าใช้จ่ายรวมให้ต่ำที่สุดแต่เพิ่มกำลังการผลิตสูงสุดโดยที่ยังได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามกำหนด จากผลการศึกษาข้างต้นสามารถสรุปผลการหาเงื่อนไขการปฏิบัติงานที่เหมาะสมได้เป็น 2 กรณี ดังนี้

วิธีที่ 1 เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น แต่ผลผลิตยังเท่าเดิม โดยการปรับความเร็วลมร้อน และ/หรือ อุณหภูมิลมร้อน สำหรับสภาวะปัจจุบันของโรงงานใช้ลมร้อนความเร็วสูงเกินไป ถ้าปรับลดความเร็วลมร้อนลงจะลดค่าใช้จ่ายลงได้ประมาณ 20 บาท / ตัน แป้งแห้ง ต่อการลดความเร็วลมร้อนทุก 1 m/sec

วิธีที่ 2 เพิ่มกำลังการผลิตของเครื่องอบแห้งที่มีอยู่ให้สูงขึ้น โดยการปรับความเร็วลมร้อน และ/หรือ อุณหภูมิลมร้อน แต่การปรับอุณหภูมิลมร้อนจะสามารถเพิ่มผลผลิตได้อย่างประหยัดกว่า

ในทางปฏิบัติจริงควรปรับทั้ง ความเร็วลม และอุณหภูมิลมร้อน จะให้ผลดีมากยิ่งขึ้น