หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

อภิปรายผลการทดลอง

6.1 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบดต่อเวลาในการคั่วกาแฟ

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5-7 ถึง 5-12 และตารางในภาคผนวกที่ 5 ซึ่งใช้เมล็ดกาแฟตัวอย่างชนิดอราบิกา และโรบัสตา ผลการทดลองนี้ได้จากการคั่วกาแฟหนัก 200-500 กรัม ที่ค่าอัตราการไหลของอากาศอยู่ระหว่าง 186-225 ม.^{3}/ชม. เทียบเป็นความเร็วของอากาศอยู่ระหว่าง 2.74-3.31 เมตร/วินาที (วัดที่ 25^{o}ซ.) หรือ $1.75 < u_o/u_{mf} < 2.11$ สำหรับกาแฟพันธุ์อราบิกา หรือ $1.39 < u_o/u_{mf} < 1.68$ สำหรับกาแฟพันธุ์โรบัสตา และค่าอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบดอยู่ระหว่าง 230-260^{o}ซ.

จากผลที่ได้พบว่า ที่อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบดค่าหนึ่ง เวลาในการคั่วกาแฟจะลดลงเมื่ออากาศมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น และที่อัตราการไหลของอากาศคงที่ เวลาในการคั่วกาแฟจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบดเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้จัดว่าสมเหตุสมผลเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างกาซกับอนุภาคของแข็ง และเป็นการลดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิของกาซตามแนวยาวภายในเบด ทำให้เบดมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศเป็นการเพิ่มแรงขับในการถ่ายเทความร้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดได้ดี เวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟจึงลดลง

ถ้าวิเคราะห์ในแง่ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในฟลูอิไดซ์เบด จะให้ผลสรุปที่สอดคล้องกัน กล่าวคือ จากสมการ (2-19) เวลาที่ใช้ในการทำให้ของแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดที่ต้องการ เป็นสัดส่วนผกผันกับความเร็วของกาซ และจากสมการ (2-15), (2-16) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่านุสเซล และค่าเรย์โนลด์ จะเห็นว่าเมื่อค่าเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงความเร็วของกาซ หรืออัตราการไหลของกาซเพิ่มขึ้น ค่านุสเซลจะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ในทำนองเดียวกัน อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศพิจารณาได้จากสมการ (2-19) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด จะทำให้เทอมทางซ้ายมือของสมการ (2-19) มีค่ามากขึ้น และเป็นผลให้ค่าของเวลาลดลง หรือถ้าพิจารณาในแง่ทฤษฎีการอบแห้งที่ความเร็ว

ของการอบแห้งคงที่ ซึ่งขึ้นกับความเร็ว และอุณหภูมิของกาซ ดังสมการ (2-20) ก็ให้ผลสรุปเช่นเดียวกัน

อนึ่ง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศต่อเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟมีผลมากกว่าอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ โดยสังเกตจากเวลาที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในช่วงที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ (อัตราการไหลของอากาศคงที่) มีค่ามากกว่าเวลาที่เปลี่ยนไปในช่วงที่มีการเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ (อุณหภูมิของอากาศคงที่) โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิประมาณ 20^{o}ซ. จะทำให้เวลาในการคั่วกาแฟลดลงเกือบครึ่งหนึ่ง

สำหรับการทดลองคั่วกาแฟพันธุ์อราบิกานั้น มีสิ่งที่น่าสังเกตคือ ในช่วงอัตราการไหลของอากาศ 186 ถึง 218 ม.^{3}/ชม. เวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราการไหลของอากาศที่มากกว่า 218 ม.^{3}/ชม. เวลาในการคั่วกาแฟกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกาแฟพันธุ์อราบิกามีความหนาแน่นน้อย (มีน้ำหนักเบา) เมื่อปล่อยให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็วสูง ย่อมทำให้เบดมีความสูงเพิ่มขึ้น ลัดส่วนช่องว่างในเบดก็มีค่ามากขึ้น เมล็ดกาแฟจะอยู่ห่างกันมากขึ้น การผสมกันของเมล็ดกาแฟจึงเกิดได้ไม่ดี และส่งผลมาถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำลง เวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟจึงเพิ่มขึ้น

6.2 อิทธิพลของน้ำหนักกาแฟในเบดเริ่มต้นต่อเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟ

การศึกษานี้ใช้สภาวะของการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 7.1 ผลการทดลองแสดงอยู่ในรูปที่ 5-3 ถึง 5-6 และตารางในภาคผนวกที่ 5 สรุปได้ว่าเวลาในการคั่วกาแฟจะแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักของกาแฟในเบด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีดังสมการ (2-19) และ (2-21) การอธิบายก็คล้ายกับการอธิบายถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศ กล่าวคือ เมื่อน้ำหนักของกาแฟในเบดเพิ่มขึ้น จะก่อให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิของกาซอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะมีผลในการชะลอปฏิกิริยาไพโรไลซีส เวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟจึงมีค่ามากขึ้น ปรากฏการณ์นี้แสดงในรูปที่ 6-1 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า อุณหภูมิต่ำสุดจะเปลี่ยนจากค่า 187^{o}ซ. สำหรับกาแฟหนัก 500 กรัม ไปสู่ค่า 210^{o}ซ. สำหรับกาแฟหนัก 200 กรัม

6.3 การศึกษาทางด้านพลังงาน[18]

พลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการคั่วกาแฟ แบ่งออกได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

6.3.1 พลังงานกล (E_M)

พลังงานกลในที่นี้หมายถึง พลังงานที่ใช้พยุงเมล็ดกาแฟในเบดให้อยู่ในสภาพฟลูอิไดซ์ สามารถคำนวณได้จาก

$$E_M = \int Q dp$$
$$= Q \cdot \Delta P \qquad .....(6-1)$$

ในที่นี้ Q คือ อัตราการไหลของอากาศ

ΔP คือ ผลต่างของความดันภายในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด

ในการคำนวณค่า ΔP เราพิจารณาเล่มือนพลังงานที่ต้องสูญเสียไปในการพยุงเมล็ดกาแฟ ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเมล็ดกาแฟในเบด หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

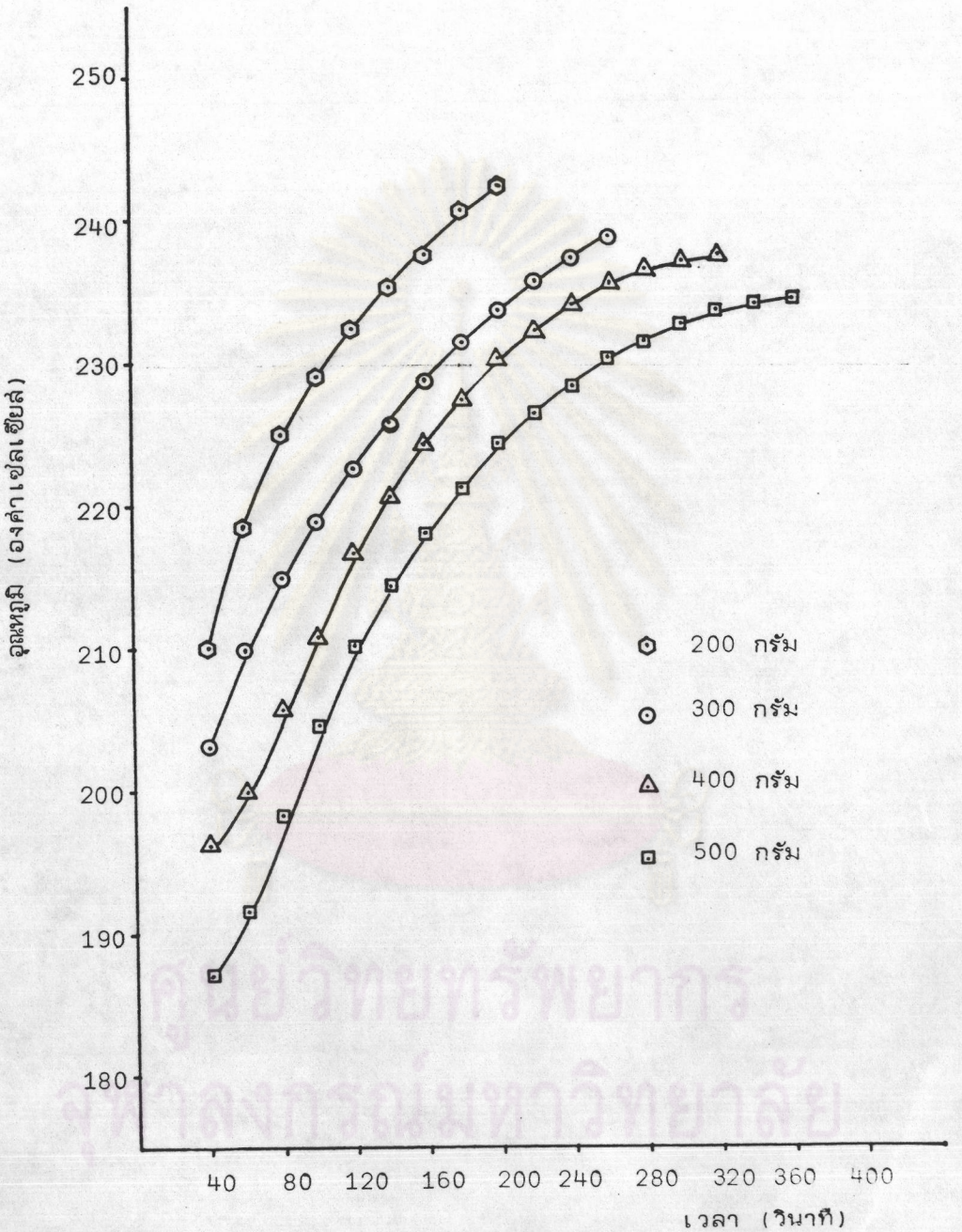
$$\Delta P = \frac{Mg}{A} \qquad .....(6-2)$$

ดังนั้น พลังงานกลที่สูญเสียไปทั้งหมดจะเป็น

$$E_M = \frac{QMg}{A} \qquad .....(6-3)$$

โดยการคำนวณดังแสดงในภาคผนวกที่ 7 จะเห็นว่าค่าพลังงานกลที่สูญเสียไปนั้นมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการคั่วกาแฟซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



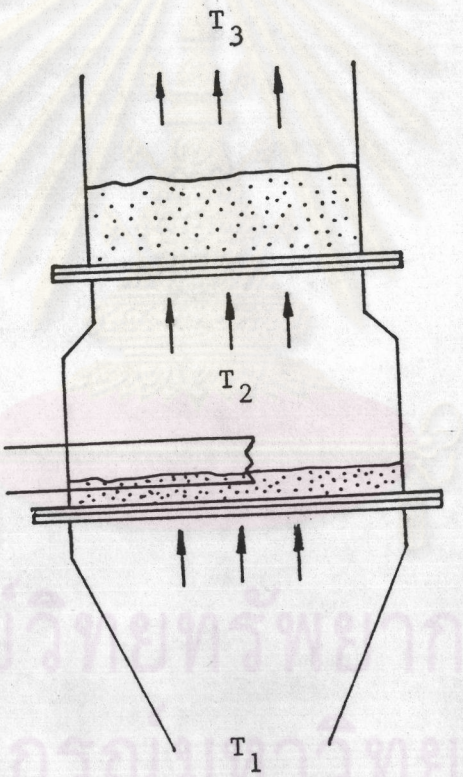
รูปที่6 - 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศออกจากเบดกับเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3.2 พลังงานความร้อน

พลังงานความร้อนในที่นี้หมายถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ไปในการคั่วกาแฟ เพื่อให้กาแฟสุก ในการพิจารณาถือว่าอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบดมีค่าคงที่ และไม่มีการสะสมความร้อนโดยกาซ

ถ้า ρ_g คือความหนาแน่นของอากาศ, C_{pg} คือความจุความร้อนของอากาศ, ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเตา และอุณหภูมิของอากาศออกจากเตา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $T_2 - T_1$ ดังแสดงในรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 แสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในเครื่องคั่วกาแฟ

พลังงานความร้อนที่อากาศได้รับจากยอดลวดความร้อนคือ

$$E_T = Q\rho_g C_{pg} (T_2 - T_1) \qquad \ldots\ldots(6-4)$$

พลังงานที่ได้รับนี้ส่วนหนึ่งจะสูญเสียให้ผนังคอลัมน์ และสิ่งแวดล้อมอีกส่วนหนึ่งจะถ่ายเทให้เมล็ดกาแฟในเบด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซีส

จากตัวอย่างในรูปที่ 6-3 (แสดงข้อมูลในภาคผนวกที่ 8) แสดงการเปรเปลี่ยนของอุณหภูมิเข้าและออกจากเบด เปรียบเทียบกับเวลา ตัวอย่างนี้มีอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด $T_2 = 250^{o}$ซ. หลังจากใส่เมล็ดกาแฟลงในคอลัมน์ จะทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิของกาซอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อการคั่วกาแฟดำเนินต่อไป ค่าอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้น ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของกาซไปสู่เมล็ดกาแฟ ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้สำหรับไล่น้ำออกจากเมล็ดกาแฟก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซีส อีกส่วนหนึ่งนั้นจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟ

นอกจากนั้น เราจะเห็นว่ามีช่องว่างระหว่างอุณหภูมิเข้าและออกจากเบดของกาซประมาณ 20^{o}ซ. ซึ่งถือว่ามีค่าค่อนข้างสูง แสดงให้ทราบว่าเกิดการสูญเสียความร้อนขึ้นในคอลัมน์ของการคั่วกาแฟ

ถ้า t_R คือเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟ สมดุลพลังงานของการคั่วกาแฟแสดงได้เป็น

$$\begin{bmatrix}\text{พลังงานความร้อนที่ใช้}\\ \text{ในการคั่วกาแฟ}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{พลังงานความร้อน}\\ \text{ที่ได้จากอากาศ}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{พลังงานความร้อน}\\ \text{ที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม}\end{bmatrix}$$

$$E_{TR} = Q\rho_g C_{pg} \int_{t=0}^{t_R} (T_2 - T_3(t))\, dt - E_L \qquad .....(6\text{-}5)$$

ดังแสดงในรูปที่ 6-3 ค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อมคือบริเวณที่ระบายด้วยเส้นประนั่นคือ

$$E_L = Q\rho_g C_{pg} (T_2 - T_3(0))\, t_R \qquad .....(6\text{-}6)$$

และ E_{TR} คือบริเวณที่ระบายด้วยเส้นทึบ

ในการอินทิเกรทหาค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากอากาศตามสมการ (6-5) ใช้ Simpson's Rule[19] ในการหาพื้นที่ใต้กราฟ แล้วนำไปคำนวณ ดังแสดงในภาคผนวกที่ 7 และค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการคั่วกาแฟ แสดงในตารางที่ 6-1 ถึง 6-5

สมการที่ (6-6) เป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้คอลัมน์ ส่วนพลังงานความร้อนที่อากาศร้อนสูญเสียให้กับเครื่องมือในช่วงที่ออกจากคอลัมน์จนถึงก่อนจะเข้าเตาให้ความร้อน คำนวณได้จากสมการ

$$E_L' = Q_m \rho_{gm} C_{pm} (T_3(t) - T_1) t_R \qquad \text{.....(6-7)}$$

ในที่นี้ ρ_{gm} คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศระหว่างอุณหภูมิ T_1 และ $T_3(t)$

C_{pm} คือ ความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของอากาศระหว่างอุณหภูมิ T_1 และ $T_3(t)$

E_L' คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับท่อ

Q_m คือ อัตราการไหลของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_1 และ $T_3(t)$

ดังนั้นเราสามารถหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องได้คือ

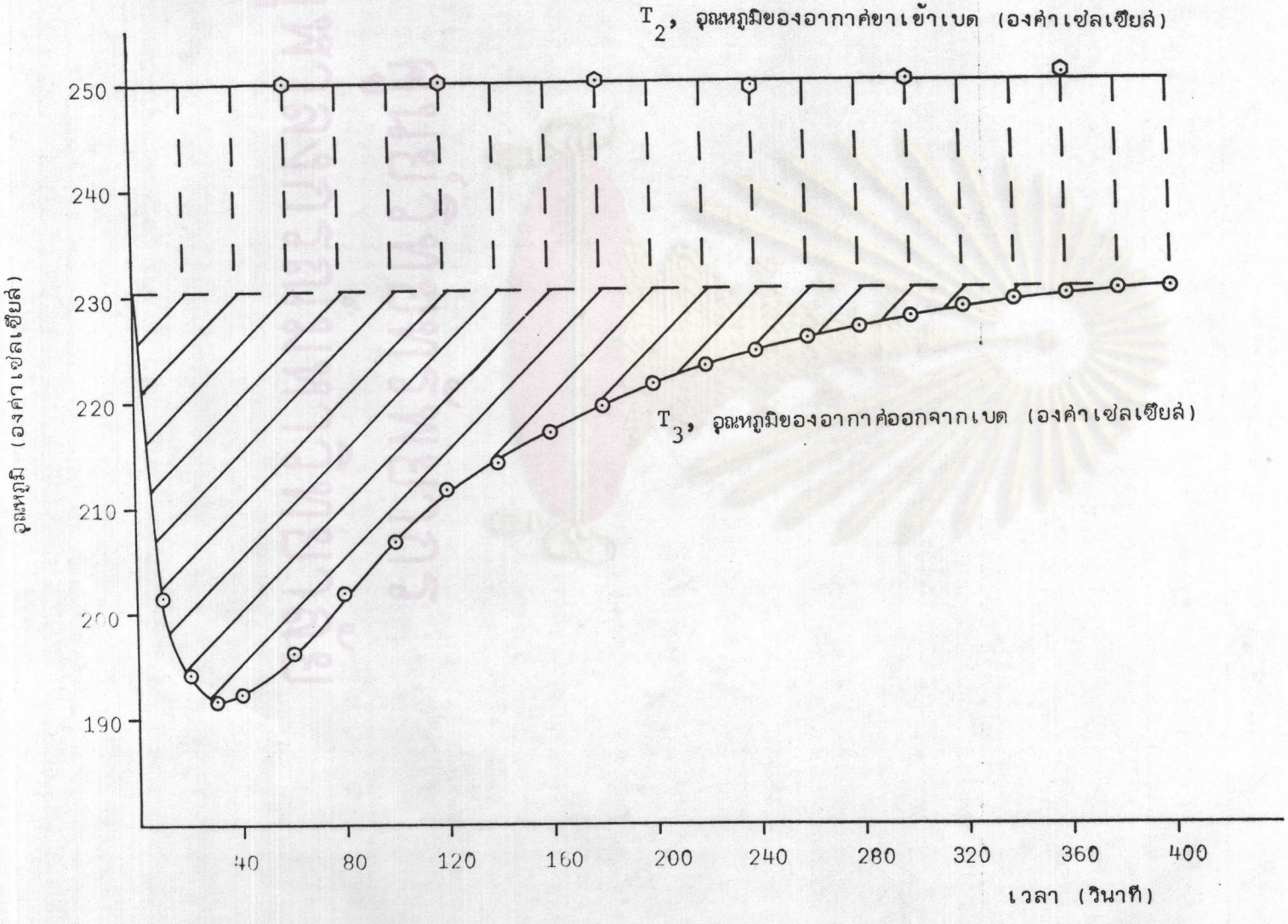
$$\eta = \frac{E_{TR}}{E_{TR} + E_L + E_L'} \times 100 \qquad \text{.....(6-8)}$$

ค่า E_L' และ η แสดงในตารางที่ 6-1 ถึง 6-5 การคำนวณแสดงในภาคผนวกที่ 7

ค่าพลังงานในการคั่วกาแฟที่ได้จากสมการ (6-5) มีค่าอยู่ระหว่าง 17.92-134.23 กิโลแคลอรี และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องมีค่าอยู่ระหว่าง 3.35-17.69% เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ใช้ลมร้อน จะมีประสิทธิภาพประมาณ 30 % จะเห็นว่าเครื่องคั่วกาแฟแบบฟลูอิไดซ์นี้มีประสิทธิภาพต่ำ เพราะมีปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อมมาก (ดังแสดงในตารางที่ 6-1 ถึง 6-5) เนื่องจากฉนวนความร้อนที่ใช้ในการทดลองนี้มีความหนาเพียง 1 นิ้ว เราอาจจะแก้ไขได้โดยเพิ่มความหนาของฉนวนความร้อนเพื่อลดปริมาณความร้อนที่ต้องเสียไป และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องมือ

จากตารางที่ 6-1 ถึง 6-5 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องคั่วกาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6-3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและออกจากเบดกับเวลา

ตารางที่ 6-1 แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสตา) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน

M (กรัม)	T_2 ($^oซ.$)	t_R (วินาที)	Q(25 ^oC) ($ม.^3/ชม.$)	Q(T^oC) ($ม.^3/ชม.$)	E_{TR} (กิโลแคลอรี)	E_L (กิโลแคลอรี)	E'_L (กิโลแคลอรี)	η (ร้อยละ)
200	230	779	186	241.65	31.04	238.79	601.73	3.56
200	240	570	186	244.04	48.04	158.83	570.27	6.18
200	250	395	186	246.40	60.46	107.79	424.69	10.20
200	260	234	186	248.75	49.74	66.95	261.56	13.15
200	230	601	206	267.63	20.02	187.03	522.93	2.74
200	240	450	206	270.28	35.21	57.38	511.98	5.82
200	250	340	206	272.90	55.11	69.65	386.37	10.78
200	260	200	206	275.50	28.13	86.27	207.82	8.73
200	230	505	218	283.22	21.72	164.25	462.01	3.35
200	240	350	218	286.02	56.58	113.36	338.07	11.14
200	250	302	218	288.80	28.64	132.83	296.74	6.25
200	260	169	218	291.54	17.92	62.07	188.89	6.66
200	230	400	225	292.31	43.44	72.47	404.14	8.35
200	240	300	225	295.21	41.73	66.86	309.42	9.98
200	250	210	225	298.07	21.99	61.49	216.49	7.33
200	260	160	225	300.91	18.62	67.91	177.93	7.04

ตารางที่ 6-2 แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสตา) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน

M (กรัม)	T_2 (^{o}ซ.)	t_R (วินาที)	Q(25 ^{o}C) ($ม.^3$/ชม.)	Q(T^{o}C) ($ม.^3$/ชม.)	E_{TR} (กิโลแคลอรี)	E_L (กิโลแคลอรี)	E'_L (กิโลแคลอรี)	η (ร้อยละ)
300	230	894	186	241.65	60.24	266.78	702.34	5.85
300	240	640	186	244.04	72.40	208.54	644.15	7.83
300	250	410	186	246.40	77.69	158.23	383.13	12.55
300	260	280	186	248.75	42.95	85.52	320.09	9.58
300	230	689	206	267.63	61.33	198.47	628.51	6.90
300	240	585	206	270.28	75.33	203.66	583.85	8.73
300	250	380	206	272.90	61.48	179.24	374.24	10.00
300	260	270	206	275.50	57.23	150.41	248.87	12.54
300	230	590	218	283.22	56.12	118.83	645.47	6.84
300	240	484	218	286.02	62.06	179.62	421.34	9.36
300	250	350	218	288.80	39.37	113.23	360.41	7.67
300	260	250	218	291.54	25.18	116.11	253.52	8.69
300	230	484	225	292.31	44.45	161.11	437.51	6.91
300	240	456	225	295.21	33.87	146.08	421.35	5.63
300	250	300	225	298107	65.66	110.63	324.74	13.11
300	260	240	225	300.91	39.97	109.44	272.30	9.48

ตารางที่ 6-3 แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสตา) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน

M (กรัม)	T_2 (^{o}ซ.)	t_R (วินาที)	Q(25 ^{o}C) ($ม.^3$/ชม.)	Q(T^{o}C) ($ม.^3$/ชม.)	E_{TR} (กิโลแคลอรี)	E_L (กิโลแคลอรี)	E'_L (กิโลแคลอรี)	η (ร้อยละ)
400	230	910	186	241.65	90.78	121.51	961.52	7.73
400	240	660	186	244.04	94.04	104.11	711.33	10.34
400	250	440	186	246.40	61.68	87.41	472.50	9.92
400	260	340	186	248.75	80.92	99.60	379.29	14.45
400	230	740	206	267.63	90.81	69.47	818.13	9.28
400	240	630	206	270.28	87.24	113.28	704.41	9.64
400	250	420	206	272.90	92.02	64.80	493.22	14.16
400	260	320	206	275.50	62.28	75.25	383.21	11.96
400	230	640	218	283.22	70.78	54.87	672.90	8.86
400	240	540	218	286.02	90.06	105.66	628.66	10.92
400	250	400	218	288.50	71.34	104.81	463.06	11.16
400	260	304	218	291.54	93.42	96.28	379.14	16.42
400	230	600	225	292.31	67.78	87.64	609.97	8.86
400	240	500	225	295.21	97.15	100.98	558.78	12.84
400	250	380	225	298.07	81.18	70.86	416.70	14.27
400	260	290	225	300.91	58.15	73.29	348.91	12.11

ตารางที่ 6-4 แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสต้า) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน

M (กรัม)	T_2 (^{o}ซ.)	t_R (วินาที)	Q(25 ^{o}C) (m^3./ชม.)	Q(T^{o}C) (m^3./ชม.)	E_{TR} (กิโลแคลอรี)	E_L (กิโลแคลอรี)	E'_L (กิโลแคลอรี)	η (ร้อยละ)
500	230	950	186	241.65	134.23	78.32	1,015.56	10.93
500	240	680	186	244.04	98.07	119.01	727.64	10.38
500	250	450	186	246.40	91.01	129.99	507.33	12.50
500	260	400	186	248.75	80.22	87.20	471.01	12.57
500	230	820	206	267.63	119.14	104.93	883.76	10.75
500	240	650	206	270.28	90.58	162.46	720.50	9.30
500	250	430	206	272.90	108.92	90.26	494.92	15.69
500	260	370	206	275.50	80.02	118.65	436.74	12.59
500	230	740	218	283.22	114.08	112.79	751.34	11.66
500	240	620	218	286.02	105.66	89.52	702.07	11.78
500	250	410	218	288.80	82.66	63.58	485.37	13.09
500	260	350	218	291.54	90.69	95.02	389.64	15.76
500	230	700	225	292.31	109.16	86.52	706.61	12.10
500	240	580	225	295.21	107.40	127.64	612.78	12.67
500	250	390	225	298.07	94.50	80.26	446.81	15.20
500	260	320	225	300.91	70.28	84.83	415.81	12.31

ตารางที่ 6-5 แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์อราบิกา) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน

M (กรัม)	T_2 (°ซ.)	t_R (วินาที)	Q(25 °C) ($ม.^3$/ชม.)	Q(T°C) ($ม.^3$/ชม.)	E_{TR} (กิโลแคลอรี)	E_L (กิโลแคลอรี)	E_L' (กิโลแคลอรี)	η (ร้อยละ)
200	240	500	186	244.04	44.87	70.24	527.63	6.98
200	240	440	206	270.28	23.02	61.16	475.18	4.12
200	240	420	218	286.02	47.92	64.00	457.38	8.42
200	240	560	225	295.21	41.77	131.04	605.29	5.37
200	260	180	186	248.75	43.52	37.20	204.89	15.24
200	260	180	206	275.50	46.21	63.61	196.02	15.11
200	260	170	218	291.54	20.89	37.55	230.54	7.23
200	260	200	225	300.91	24.21	56.31	229.76	7.80
300	240	540	186	244.04	73.08	32.33	625.93	9.99
300	240	500	206	270.28	72.52	69.50	550.86	10.47
300	240	480	218	286.02	58.11	71.90	544.60	8.61
300	240	760	225	295.21	47.91	171.49	828.66	4.57
300	260	220	186	248.75	64.95	39.72	262.45	17.69
300	260	200	206	275.50	45.07	49.80	231.33	13.82
300	260	190	218	291.54	60.89	47.03	252.30	16.90
300	260	340	225	300.91	69.61	112.55	386.11	14.83

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

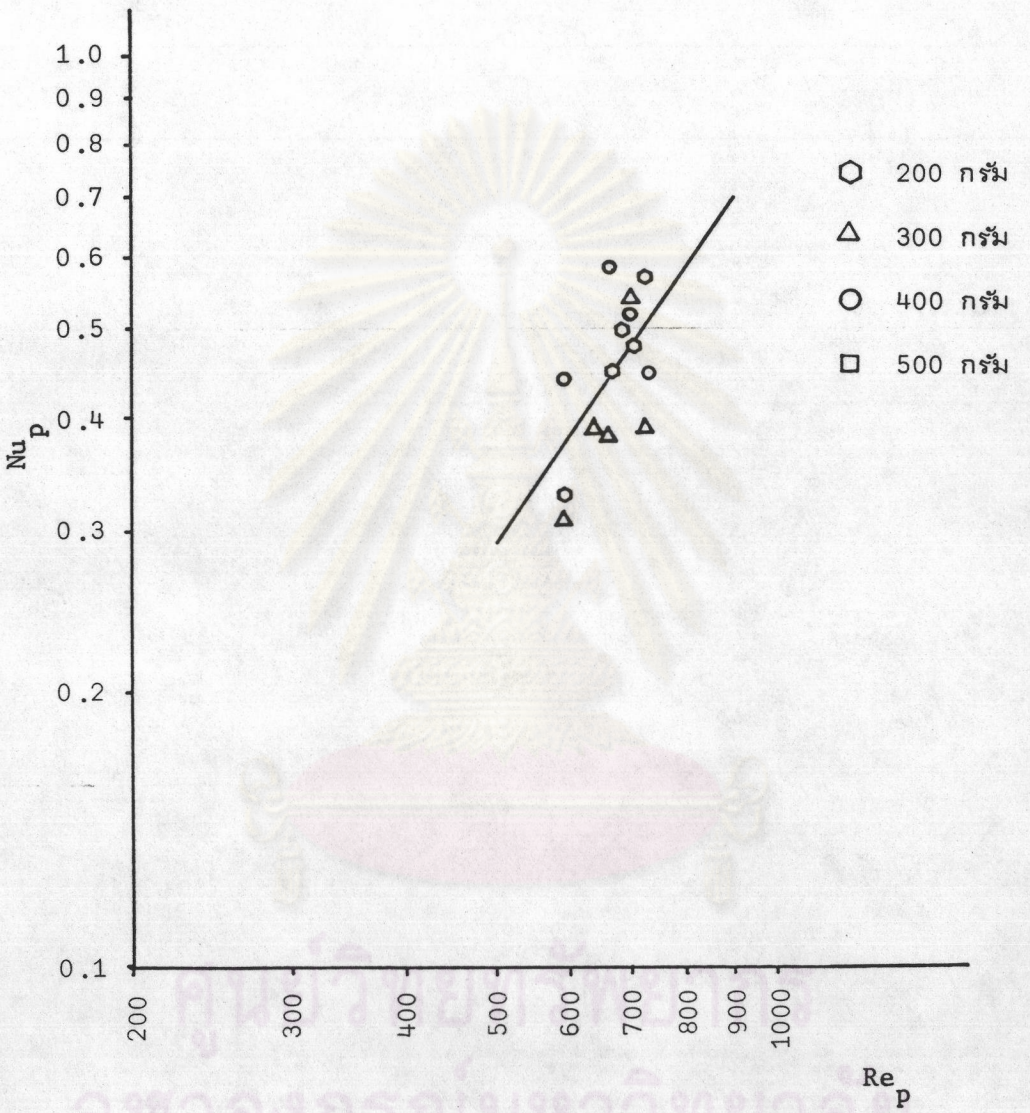
6.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเครื่องคั่วกาแฟ

การถ่ายเทความร้อนในเครื่องคั่วกาแฟมิใช่เป็นการเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดกาแฟเพียงอย่างเดียว แต่ยังเป็นการไล่ความชื้น (อบแห้ง) รวมถึงช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยสมการ (2-14) และข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งทราบอุณหภูมิขาเข้าของอากาศ อุณหภูมิขาออกของอากาศเริ่มต้น อุณหภูมิขาออกของอากาศที่เวลาของการคั่วกาแฟ และคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศและเมล็ดกาแฟ เราสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ โดยคิดจากเวลาที่อุณหภูมิขาออกของอากาศมีค่าต่ำสุด จนถึงเวลาสุดท้ายของการคั่วกาแฟ ทั้งนี้เพราะในช่วงเวลาต้น ๆ ที่เริ่มป้อนเมล็ดกาแฟ ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นช่วงต้นของการถ่ายเทความร้อน จึงไม่นำมาคำนวณ วิธีการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวกที่ 9

จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ สามารถนำไปคำนวณค่านุสเซลและเมื่อทราบอัตราการไหลของอากาศ ก็สามารถคำนวณค่าเรย์โนลด์ได้ รูปที่ 6-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านุสเซลกับค่าเรย์โนลด์ที่คำนวณจากข้อมูลของการทดลองบางส่วน ได้ความสัมพันธ์คือ

$$Nu_p = 1.35 \times 10^{-5} Re_p^{1.6} \qquad \text{.....(6-9)}$$

ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการ (2-16) จะเห็นว่าเลขยกกำลังของ Re_p มีค่าใกล้เคียงกัน ความแตกต่างของสมการ (2-16) และ (6-9) ส่วนใหญ่อาจจะเนื่องมาจากค่าเรย์โนลด์ และขนาดของอนุภาคของแข็งที่แตกต่างกัน เพราะในการทดลองนี้มีค่าเรย์โนลด์สูง คือมีค่าอยู่ระหว่าง 557-722 และเมล็ดกาแฟมีขนาดใหญ่ แต่การทดลองที่นำมาเปรียบเทียบโดยทั่วไปใช้อนุภาคขนาดเล็ก และค่าเรย์โนลด์ไม่สูงมากนัก เช่นข้อมูลของสมการ (2-15) มีค่าเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง 0.1-170 และเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง 0.06-1.1 มิลลิเมตร อนึ่งสมการ (6-9) ได้มาจากค่าอัตราการไหลของอากาศที่แปรเปลี่ยนในช่วงแคบเกินไปที่จะนำมาสร้างความสัมพันธ์ที่จะใช้เป็นตัวแทนของระบบนี้ สมการ (6-9) เพียงแต่แสดงแนวทางของของการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 6-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่านุสเซิลกับค่าเรย์โนลด์ที่ได้จากการทดลอง

6.5 คุณภาพของกาแฟคั่ว

ในแง่คุณภาพของกาแฟคั่ว เราพิจารณาถึงร้อยละน้ำหนักกาแฟที่หายไปหลังการคั่ว และร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำได้ของกาแฟ (water soluble) ซึ่งเป็นส่วนที่เราบริโภค จากตารางในภาคผนวกที่ 5 ร้อยละของน้ำหนักกาแฟที่หายไปหลังการคั่วมีค่าอยู่ระหว่าง 14.70-19.58 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับของความสุกในการคั่วกาแฟมีความแตกต่างกัน เพราะการตัดสินว่าเมื่อใดควรจะหยุดคั่วกาแฟโดยการสังเกตการเปลี่ยนสี และเปรียบเทียบสีนั้นมีความผิดพลาดมาก เมื่อพิจารณาถึงร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำได้ของกาแฟ จากการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 24.44-29.84 ซึ่งต่ำกว่าค่าจากตารางที่ 2-2 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 27-35 เราพอสรุปได้ว่า กาแฟที่ได้จากการคั่วด้วยระบบฟลูอิไดซ์เบดมีคุณภาพใกล้เคียงกับคุณภาพโดยทั่วไปจากการคั่วด้วยวิธีอื่น ทั้งนี้เพราะร้อยละของน้ำหนักกาแฟที่หายไปโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 18-20 (Sivetz[7]) ดังนั้นร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำของการทดลองนี้ที่น้อยกว่าค่าทั่วไปเนื่องมาจากระดับความสุกที่น้อยกว่านั่นเอง

นอกจากนั้น เราจะเห็นว่าร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำไม่ขึ้นกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 5-13 ถึง 5-16 เพราะเหตุว่าปริมาณสารที่ละลายน้ำเมื่อคิดต่อหน่วยน้ำหนักของกาแฟดิบเท่ากัน ในระดับความสุกที่เท่ากัน ย่อมจะให้ร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำใกล้เคียงกัน แต่ข้อมูลจากการทดลองมีความเบี่ยงเบนไปจากเส้นกราฟที่ขนานกับแกนนอน เนื่องมาจากระดับของความสุกในแต่ละการทดลองไม่เท่ากัน อีกประการหนึ่งที่สำคัญคือ กาแฟเป็นผลิตผลทางเกษตร องค์ประกอบทางเคมีของแต่ละเมล็ดย่อมมีปริมาณไม่เท่ากัน อีกทั้งลักษณะทางกายภาพก็ไม่เหมือนกันด้วย

ร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับอัตราการไหล และอุณหภูมิของกาซ กล่าวคือ เมื่ออัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำได้จะเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า อัตราการไหลและอุณหภูมิของอากาศที่สูงขึ้นนั้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดี ปฏิกิริยาไพโรไลซีส์จึงดำเนินไปได้ดี สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ในเมล็ดกาแฟจะถูกเปลี่ยนให้มีโมเลกุลเล็กลง และละลายน้ำได้ดี

สิ่งที่น่าสังเกตคือ สำหรับกาแฟพันธุ์อราบิกา อัตราการไหลของอากาศที่เกินกว่า 218 ม.^{3}/ชม. จะทำให้ร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำได้ลดลง เพราะเมื่อพิจารณากลับไปถึงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศต่อเวลาในการคั่วกาแฟ พบว่าอัตราการไหลของอากาศเกิน 218 ม.^{3}/ชม. ต้องใช้เวลาในการคั่วเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากสัดส่วนช่องว่างในเบดมากขึ้น

การผสมกันของอนุภาคของแข็ง และการถ่ายเทความร้อนน้อยลง และไปชลอปฏิกิริยาไพโรไลซีส์ ร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำจึงมีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย