5

การคั่วกาแฟในฟลูอิดไดซ์เบด

นายสมหมาย ตรัยไชยาพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2528

ISBN 974-564-907-4

009174

i17791285

COFFEE ROASTING IN FLUIDIZED BED

Mr. Sommai Trichaiyaporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1985

ISBN 974-564-907-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคั่วกาแฟในฟลูอิดไดซ์เบด
โดย	นายสมหมาย ตรัยไชยาพร
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคั่วกาแฟในฟลูอิดไดซ์เบด
ชื่อนิสิต	นายสมหมาย ตรัยไชยาพร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2528

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาวิธีการคั่วกาแฟแบบใหม่โดยใช้ฟลูอิดไดซ์เบด ในโครงการนี้ใช้กาซฟลูอิไดซ์เบดระบบปิดในการคั่วกาแฟตัวอย่างพันธุ์โรบัสต้า และอราบิกา สภาวะของการทดลองคือ อุณหภูมิขาเข้าของอากาศ 230-260°ซ. น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 200-500 กรัม และอัตราการไหลของกากาศ 186-225 ม.^{3}/ชม. (วัดที่ 25°ซ.) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟคือ 2.6-15.8 นาที ปริมาณน้ำหนักกาแฟที่หายไปร้อยละ 14.70-19.58 ปริมาณสารที่ละลายน้ำได้เป็นร้อยละ 24.44-29.84 และประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องคั่วกาแฟร้อยละ 3.35-17.69

การคั่วกาแฟในชั้นฟลูอิดไดซ์เบด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิขาเข้าของอากาศเป็นหลัก และอัตราการไหลของอากาศเป็นรอง กาแฟที่คั่วได้โดยวิธีนี้จะมีคุณลักษณะสม่ำเสมอ และคุณภาพที่ดีตลอดทั่วทั้งเบด

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title	Coffee Roasting in Fluidized Bed
Name	Mr. Sommai Trichaiyaporn
Thesis Advisor	Assistant Professor Chairit Sattayaprasert, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Professor Somsak Damronglerd, Ph.D.
Department	Chemical Engineering
Academic Year	1985

ABSTRACT

The main purpose of this research is to study the new method of roasting coffee bean in the fluidized bed. A closed system of fluidized bed was used for roasting Robusta and Arabica coffee samples. The experiment was run at 230 to 260^{o}C of inlet air temperature, 200 to 500 grams of green coffee, and 186 to 225 m^3/hr. (measured at 25^{o}C) of air flow rate. The experimental results are shown that the roasting time: 2.6-15.8 minutes, weight loss: 14.70-19.58%, water soluble substance: 24.44-29.84%, and the thermal efficiency of the roaster: 3.35-17.69% . The coffee roasting in fluidized bed depends more on the inlet air temperature than the air flow rate. The coffee roasted by this method has an uniform characteristic and good quality in whole range of bed.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ ทั้งทางด้านวิชาการ และความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย สุกาญจนัจที และ รองศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัทเยาซ่องอุตสาหกรรม จำกัด ที่กรุณามอบเมล็ดกาแฟไว้ใช้ในการวิจัย และสุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณวราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ คุณสังข์ ชมชื่น และคุณอวยพร ลีพลากร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ซ

สัญญลักษณ์ ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

2 วารสารปริทรรศน์ 5

3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง 26

4 วิธีทำการทดลอง 33

5 ผลการทดลอง 36

6 อภิปรายผลการทดลอง 55

7 สรุปผลการทดลอง 72

เอกสารอ้างอิง 74

ภาคผนวกที่ 1 77

ภาคผนวกที่ 2 79

ภาคผนวกที่ 3 80

ภาคผนวกที่ 4 82

ภาคผนวกที่ 5 83

ภาคผนวกที่ 6 89

ภาคผนวกที่ 7 90

ภาคผนวกที่ 8 93

ภาคผนวกที่ 9 94

ประวัติ 96

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ปริมาณและมูลค่ากาแฟนำเข้าของประเทศไทย.....	2
1-2	ปริมาณและมูลค่ากาแฟส่งออกของประเทศไทย.....	3
2-1	องค์ประกอบทางเคมีของกาแฟดิบ.....	19
2-2	องค์ประกอบทางเคมีของกาแฟคั่ว.....	23
2-3	แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละน้ำหนักที่หายไปกับสีที่เกิดขึ้น.....	24
5-1	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟ.....	37
6-1	แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสต้า) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 200 กรัม).....	63
6-2	แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสต้า) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 300 กรัม).....	64
6-3	แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสต้า) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 400 กรัม).....	65
6-4	แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์โรบัสต้า) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 500 กรัม).....	66
6-5	แสดงพลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ (พันธุ์อราบิกา) พลังงานที่สูญเสียให้สิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพทางความร้อน.....	67

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	ลักษณะต่าง ๆ ของฟลูอิไดซ์เบด	6
2-2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันกับอัตราเร็วของอากาศ	9
2-3	แสดงความสัมพันธ์ของค่านุสเซล และค่าเรย์โนลด์จากข้อมูลของการทดลอง	12
2-4	การอบแห้งของแข็งในระบบที่ไม่ต่อเนื่อง (แสดงความเร็วของการอบแห้งที่คงที่และที่ลดลง)	14
2-5	แสดงขั้นกำหนดความเร็วของการอบแห้งของแข็งในระบบฟลูอิไดซ์เบดที่ไม่ต่อเนื่อง	17
3-1	แสดงแผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	27
3-2	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของฟลูอิไดซ์เบดคอลัมน์	28
3-3	แสดงรายละเอียดของไซโคลน	30
3-4	แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของเตาให้ความร้อน	31
5-1	แสดงค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดซ์ (กาแฟพันธุ์โรบัสตา)	38
5-2	แสดงค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดซ์ (กาแฟพันธุ์อราบิกา)	39
5-3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 230°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา)	40
5-4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 240°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา)	41
5-5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 250°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา)	42
5-6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 260°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา)	43

รูปที่ หน้า

5-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 200 กรัม, กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 44

5-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 300 กรัม, กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 45

5-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 400 กรัม, กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 46

5-10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 500 กรัม, กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 47

5-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟดิบเริ่มต้น 200 กรัม, กาแฟพันธุ์อราบิกา) 48

5-12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น 300 กรัม, กาแฟพันธุ์อราบิกา) 49

5-13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับน้ำหนักของกาแฟในเบด (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 230°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 50

5-14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับน้ำหนักของกาแฟในเบด (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 240°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 50

5-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 250°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 51

รูปที่ หน้า

5-16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับน้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น (อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าเบด 260°ซ., กาแฟพันธุ์โรบัสตา) 51

5-17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับอัตราการไหลของอากาศ (กาแฟพันธ์โรบัสตา 200 กรัม) 52

5-18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับอัตราการไหลของอากาศ (กาแฟพันธุ์โรบัสตา 300 กรัม) 52

5-19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น, กาแฟพันธุ์โรบัสตา) ... 53

5-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับอัตราการไหลของอากาศ (น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น, กาแฟพันธ์โรบัสตา) ... 53

5-21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับอัตราการไหลของอากาศ (กาแฟพันธุ์อราบิกา 200 กรัม) 54

5-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละปริมาณสารที่ละลายน้ำกับอัตราการไหลของอากาศ (กาแฟพันธุ์อราบิกา 300 กรัม) 54

6-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศออกจากเบดกับเวลา 58

6-2 แสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในเครื่องคั่วกาแฟ..... 59

6-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและออกจากเบดกับเวลา 62

6-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลิตผลกับค่าเรย์โนลด์ที่ได้จากการทดลอง 69

สัญญลักษณ์

a	อัตราส่วนของพื้นที่ผิวของของแข็งต่อปริมาตรของเบด	(เมตร$^{-1}$)
A_c	พื้นที่ภาคตัดขวางของคอลัมน์	(เมตร^2)
C_{pg}	ความร้อนจำเพาะของกาซ	(กิโลแคลอรี/กก.เคลวิน)
C_{ps}	ความร้อนจำเพาะของของแข็ง	(กิโลแคลอรี/กก.เคลวิน)
d_p	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง	(เมตร)
D_m	สัมประสิทธิ์การแพร่ของกาซ	(เมตร^2/วินาที)
E_L	พลังงานที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม	(กิโลแคลอรี)
E_M	พลังงานกลเทียบเป็นพลังงานความร้อน	(กิโลแคลอรี)
E_T	พลังงานที่ได้รับจากอากาศ	(กิโลแคลอรี)
E_{TR}	พลังงานที่ใช้ในการคั่วกาแฟ	(กิโลแคลอรี)
g	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	(เมตร/วินาที^{2})
g_c	ตัวคูณสำหรับแปรหน่วย	(9.8 กิโลกรัม·เมตร/กิโลกรัม$_{แรง}$·วินาที^{2})
G_o	ปริมาณการไหลของของไหลคิดเป็นมวล	(กิโลกรัม/เมตร^2·วินาที)
h_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับของแข็ง	(กิโลแคลอรี/เมตร^2·วินาที.^{o}ซ.)
l	ความสูง	(เมตร)
L_f	ความสูงของเบดที่มีฟองกาซ	(เมตร)
L_m	ความสูงของเบดนิ่ง	(เมตร)
L_{mf}	ความสูงของเบดที่จุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน	(เมตร)
Nu_p	ค่าของนุสเซล ($h_p d_p / k_g$)	(-)
m	อัตราส่วนความชื้นของอนุภาคของแข็ง	(-)
m_{cr}	อัตราส่วนความชื้นวิกฤต	(-)
m_f	อัตราส่วนความชื้นอิสระ	(-)
m_{fo}	อัตราส่วนความชื้นอิสระเริ่มต้น	(-)
m_m	อัตราส่วนความชื้นที่ตำแหน่งรัศมีใด ๆ	(-)

m_o	อัตราส่วนความชื้นของอนุภาคของแข็งเริ่มต้น	(-)
m_∞	อัตราส่วนความชื้นของอนุภาคของแข็งที่เวลาอนันต์	(-)
M	น้ำหนักของกาแฟในเบดเริ่มต้น	(กิโลกรัม)
ΔP	ผลต่างของความดันภายในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด	(ซม.ของน้ำ)
Q	อัตราการไหลของอากาศ	(เมตร^3/ชั่วโมง)
r	ระยะจากจุดกึ่งกลางของอนุภาคของแข็ง	(เมตร)
R	รัศมีของอนุภาคของแข็ง	(เมตร)
Re	ค่าเรย์โนลด์	(-)
Re_p	ค่าเรย์โนลด์ของอนุภาคของแข็ง ($\rho_g d_p u_o/\mu$)	(-)
t	เวลา	(วินาที)
t_R	เวลาที่ใช้ในการคั่วกาแฟ	(วินาที)
T	อุณหภูมิ	(องศาเซลเซียส)
ΔT	ผลต่างของอุณหภูมิของกาซ	(องศาเซลเซียส)
T_e	อุณหภูมิกาซที่จุดสมดุล	(องศาเซลเซียส)
T_g	อุณหภูมิของกาซ	(องศาเซลเซียส)
T_{gi}	อุณหภูมิของกาซขาเข้า	(องศาเซลเซียส)
$T_{g,in}$	อุณหภูมิของกาซขาเข้า	(องศาเซลเซียส)
$T_{g,out}$	อุณหภูมิของกาซขาออก	(องศาเซลเซียส)
T_S	อุณหภูมิของอนุภาคของแข็ง	(องศาเซลเซียส)
T_{So}	อุณหภูมิของอนุภาคของแข็งเริ่มต้น	(องศาเซลเซียส)
u_o	ความเร็วของกาซ	(เมตร/วินาที)
u_{mf}	ความเร็วต่ำสุดของกาซที่ทำให้เบดเริ่มฟลูอิไดซ์	(เมตร/วินาที)
W	น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง	(กิโลกรัม)
Φ_s	แฟกเตอร์รูปร่าง	(-)
ε_f	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่มีฟองกาซ	(-)
ε_m	สัดส่วนช่องว่างของเบดนิ่ง	(-)
ε_{mf}	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่จุดเริ่มฟลูอิไดเซชัน	(-)
$\mathcal{L}$	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	(กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)

η	ประสิทธิภาพทางความร้อน	(-)
ρ_g	ความหนาแน่นของกาซ	(กิโลกรัม/เมตร^3)
ρ_s	ความหนาแน่นของของแข็ง	(กิโลกรัม/เมตร^3)
μ	ความหนืดของกาซ	(กิโลกรัม/เมตร.วินาที)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย