



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำโดยการฉายรังสีแกมมา

Protein Digestibility Improvement of *Jatropha curcas* Press Cake by Gamma Irradiation

นามผู้วิจัย นายพิพัฒน์พงษ์ จันทร์แดง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สดประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จำเริญ เทียงธรรม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำโดยการฉายรังสีแกมมา

Protein Digestibility Improvement of *Jatropha curcas* Press Cake by Gamma Irradiation

โดย

นายพิพัฒน์พงษ์ จันทร์แดง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2553

พิพัฒน์พงษ์ จันทร์แดง 2553: การปรับปรุงความสามารถในการย่อยโปรตีนของกาก
เมล็ดสับดูดาโดยการฉายรังสีแกมมา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และ
ไอโซโทป) สาขารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D.
95 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดา
ด้วยเทคนิคการย่อยในห้องปฏิบัติการ (*in vitro* digestibility) โดยนำเมล็ดสับดูดาทั้ง 5 สายพันธุ์
ได้แก่ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 มาฉายรังสีแกมมาจาก
ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ปริมาณรังสีดูดกลืน 0, 10, 20, 30, 60 และ 100 กิโลเกรย์ ก่อนนำมา
หีบน้ำมัน นำกากที่ได้มาหาค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนโดยวิธี Trinitrobenzene sulphonic
acid (TNBS) ซึ่งเป็นการหาปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์
โดยใช้ *L*-Alanine เป็นสารมาตรฐาน โดย primary amines ทำปฏิกิริยากับสาร TNBS ได้ผลิตภัณฑ์
สีเหลืองมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ผลการศึกษาพบว่ารังสีแกมมา
ที่ปริมาณ 60 กิโลเกรย์ เป็นปริมาณรังสีดูดกลืนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อย
โปรตีนในกากเมล็ดสับดูดาได้ตั้งแต่ร้อยละ 15-92 เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการย่อย
โปรตีนของกลุ่มควบคุม โดยการฉายรังสีไม่มีผลต่อองค์ประกอบพื้นฐานทางโภชนาของเมล็ด
สับดูดา ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เถ้า และโปรตีน ยกเว้นปริมาณเชื้อยที่มีปริมาณลดลงอย่างมีนัย
สำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) หลังจากผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์ และจากการศึกษา
ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินกับค่าความสามารถในการย่อยโปรตีน
ของกากเมล็ดสับดูดาสายพันธุ์ KU BP-16 และ KU BP-20 พบว่าการฉายรังสีแกมมาสามารถเพิ่ม
ความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดาให้สูงขึ้น และสามารถลดกิจกรรมของสาร
ยับยั้งทริปซินลงได้ การฉายรังสีแกมมาจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับกากเมล็ด
สับดูดาและสนับสนุนให้มีการใช้ประโยชน์จากสับดูดาอย่างครบวงจร

Pipatpong Chundang 2010: Protein Digestibility Improvement of *Jatropha curcas* Press Cake by Gamma Irradiation. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanwisa Sudprasert, Ph.D. 95 pages.

The study was conducted to investigate the effect of gamma radiation on protein digestibility of *Jatropha curcas* press cake using *in vitro* digestibility technique. Five varieties of *Jatropha curcas* seeds, i.e., KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 and KU BP 80-3, were subjected to Cobolt-60 gamma radiation at 0, 10, 20, 30, 60 and 100 kGy. All treated seeds were defatted by screw press. *In vitro* protein digestibilities in defatted seeds were assayed using trinitrobenzene sulphonic acid (TNBS) method, by which the contents of alpha-amino induced from the function of enzymes were determined. The absorbance of yellow products generated from the reaction of primary amine and TNBS was obtained at the maximum wavelength of 420 nm. It was found that irradiation treatment at 60 kGy significantly increased the protein digestibility by 15-92 %, compared to controls or 0 kGy ($P < 0.05$). The results showed that moisture, crude protein, fat and ash were unchanged by irradiation whereas fiber was significantly decreased at 60 kGy radiation. The relationship between trypsin inhibitor activity and protein digestibility of irradiated *Jatropha curcas* press cake (KU BP-16 and KU BP-20) was studied. It was found that the protein digestibility was negatively correlated with trypsin inhibitor activity for all doses studied. Therefore, irradiation could serve as a possible processing method for protein utilization improvement in defatted *Jatropha curcas* seeds before using as a protein supplement in animal feed.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันวิสา สูดประเสริฐ ประธานกรรมการ
ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์
และกรุณาตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
จำเริญ เทียงธรรม กรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จ
สมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุทัยวรรณ โกวิทวาทิ ที่ได้ให้คำแนะนำแนวทาง
ในการทำวิจัยประกอบวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนสำเร็จการศึกษาและ
รวมทั้งเจ้าของผลงานวิจัยที่ข้าพเจ้าได้นำมาใช้อ้างอิงประกอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นายการุณ ทองประจุแก้ว นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดการทำวิจัย
ประกอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องนิสิตภาควิชารังสีประยุกต์และ
ไอโซโทปทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วง
ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนให้ความรักและเป็นกำลังใจ
ตลอดมา

พิพัฒน์พงษ์ จันทรแดง

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	35
ผล	35
วิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
สรุป	58
ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	60
ภาคผนวก	69
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	95

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบทางโภชนาในเมล็ดสนับดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ไม่ผ่าน การฉายรังสี	36
2	ปริมาณความชื้นระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทั้ง 5 สายพันธุ์	38
3	ปริมาณไขมันระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทั้ง 5 สายพันธุ์	38
4	ปริมาณเยื่อใยระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทั้ง 5 สายพันธุ์	39
5	ปริมาณเถ้าระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทั้ง 5 สายพันธุ์	39
6	ปริมาณโปรตีนระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทั้ง 5 สายพันธุ์	40
7	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ <i>p</i> -nitroaniline ตั้งแต่ 0.03-0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร	41
8	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ในกิจกรรมของ เอนไซม์ทริปซินจากการคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน ใน multienzyme	42
9	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้น ของ <i>L</i> -Alanine ตั้งแต่ 0.3-3 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร	43
10	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสนับดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี	44
11	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสนับดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์	45
12	ผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของสนับดำ ทั้ง 5 สายพันธุ์	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
1 ผลการวิเคราะห์ความชื้นในเมล็ดสับดูดำของตัวควบคุม (Control)	70
2 ผลการวิเคราะห์ความชื้นในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์	71
3 ผลการวิเคราะห์ความชื้นในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์	72
4 ผลการวิเคราะห์ไขมันในเมล็ดสับดูดำของตัวควบคุม (Control)	73
5 ผลการวิเคราะห์ไขมันในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์	74
6 ผลการวิเคราะห์ไขมันในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์	75
7 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยในเมล็ดสับดูดำของตัวควบคุม (Control)	76
8 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์	77
9 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์	78
10 ผลการวิเคราะห์เถ้าในเมล็ดสับดูดำของตัวควบคุม (Control)	79
11 ผลการวิเคราะห์เถ้าในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์	80
12 ผลการวิเคราะห์เถ้าในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์	81
13 ผลการวิเคราะห์โปรตีนในเมล็ดสับดูดำของตัวควบคุม (Control)	82
14 ผลการวิเคราะห์โปรตีนเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์	83
15 ผลการวิเคราะห์โปรตีนในเมล็ดสับดูดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์	84
16 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้น ของ <i>p</i> -nitroaniline ตั้งแต่ 0.03-0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร	85
17 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ในกิจกรรมเอนไซม์ ทริปซินจากการคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินใน multienzyme	86
18 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี	87
19 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์	88
20 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 20 กิโลเกรย์	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
21	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับุดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 30 กิโลเกรย์	90
22	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับุดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์	91
23	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับุดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 100 กิโลเกรย์	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ต้นสบู่ดำและช่อดอกของเมล็ดสบู่ดำ	5
2	ผลของสบู่ดำและเนื้อภายในเมล็ดมีสีขาว	5
3	โครงสร้างทางเคมีของ Tigliane	8
4	การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TNBS กับ Primary amines	20
5	เมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการหีบน้ำมันแบบเกลียวอัดและกากเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการบด	35
6	องค์ประกอบทางโภชนาในเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์	37
7	ปริมาณโปรตีนในเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ เทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี	40
8	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำของสายพันธุ์ KU BP-16 ที่ผ่านการฉายรังสี	47
9	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำของสายพันธุ์ KU BP-20 ที่ผ่านการฉายรังสี	47
10	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำของสายพันธุ์ KU BP-27 ที่ผ่านการฉายรังสี	48
11	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำของสายพันธุ์ KU BP 78-9 ที่ผ่านการฉายรังสี	48
12	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำของสายพันธุ์ KU BP 80-3 ที่ผ่านการฉายรังสี	49
13	ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ปริมาณรังสีต่างๆ	49
14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการย่อยโปรตีนและกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินของกากเมล็ดสบู่ดำสายพันธุ์ KU BP-16 และ KU BP-20 ที่ฉายรังสีปริมาณ 0-60 กิโลเกรย์	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่

หน้า

- | | | |
|---|--|----|
| 1 | กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน <i>p</i> -nitroaniline (ไมโคร โมลต่อมิลลิตร) | 93 |
| 2 | กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตรกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน <i>L</i> -alanine (ไมโคร โมลต่อมิลลิตร) | 94 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

K_2SO_4 = Potassium Sulphate

$CuSO_4$ = Copper Sulphate

H_2SO_4 = Sulfuric acid

$NaOH$ = Sodium Hydroxide

HCl = Hydrochloric acid

คำย่อ

kGy = kilogray (กิโลเกรย์)

μM = micromolar (ไมโครโมลาร์)

mM = millimolar (มิลลิโมลาร์)

M = molar (โมลาร์)

N = normal (นอร์มัล)

nm = nanometre (นาโนเมตร)

การปรับปรุงความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำ โดยการฉายรังสีแกมมา

Protein Digestibility Improvement of *Jatropha curcas* Press Cake by Gamma Irradiation

คำนำ

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งในอนาคตคาดว่าพลังงานไบโอดีเซลจะมีการแข่งขันในด้านเศรษฐกิจ จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่มีแนวโน้มลดลงอีกทั้งยังปลอดภัยสิ่งแวดล้อม (Veljkovic *et al.*, 2006) ในปัจจุบันไบโอดีเซลที่ผลิตจากเมล็ดสบู่ดำเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีการกล่าวถึงมากที่สุด โดยเมล็ดสบู่ดำที่นำมาใช้เป็นไบโอดีเซลประกอบด้วยโปรตีนประมาณร้อยละ 25-30 หลังจากการหีบน้ำมันแล้ว (Openshaw, 2000; Dianika *et al.*, 2010) กากเมล็ดสบู่ดำที่เหลือจากการหีบน้ำมันมีโปรตีนเทียบเท่ากับเมล็ดพืชที่ให้น้ำมันชนิดอื่น เช่น เมล็ดถั่วเหลือง เมล็ดคาโนลา หรือเมล็ดทานตะวัน แต่เมล็ดสบู่ดำประกอบด้วยสารพิษ เช่น curcin (Lin *et al.*, 2003) phorbol esters นอกจากนี้เมล็ดสบู่ดำยังประกอบด้วยสารต้านโภชนาอื่น ๆ เช่น lectin, saponin, phytate และสารยับยั้งทริปซิน ในปริมาณสูงซึ่งมีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน ทำให้สัตว์ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้อย่างเต็มที่จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ (Martinez *et al.*, 2006; Makkar and Becker, 1998)

กากเมล็ดสบู่ดำที่เหลือจากการหีบน้ำมันสามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นอาหารสัตว์ได้ หากมีการกำจัดหรือลดปริมาณสารพิษหรือสารต้านโภชนาเหล่านั้น ลงให้อยู่ในระดับที่ไม่สามารถทำอันตรายต่อร่างกายของสัตว์ รวมทั้งไม่มีผลกระทบต่อการผลิตและการเจริญเติบโตของสัตว์ การลดกิจกรรมของสารดังกล่าวโดยทั่วไปสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนโดยการใช้น้ำร้อนความดันไอน้ำ (Aderibigbe *et al.*, 1997; Martinez *et al.*, 2006) การถั่วในกระทะ (Makkar and Becker, 1998) และการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี (Chivandi *et al.*, 2004) เป็นต้น

นอกจากนี้ การใช้รังสีแกมมาก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดหรือลดสารพิษดังกล่าวลงได้และไม่มีผลต่อองค์ประกอบทางโภชนา ได้แก่ ความชื้น โปรตีน เยื่อใย ไขมัน และเถ้า รวมทั้งทำให้ความสามารถในการย่อยโปรตีนเพิ่มขึ้นหลังจากการฉายรังสี (Hania and Niely, 2007) รวมทั้งองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่เป็นส่วนประกอบของอาหารไก่เนื้อที่ผ่านการฉายรังสีไม่เปลี่ยนแปลง (Thayer, 1990)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาวิธีการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนโดยใช้เทคนิค *in vitro* protein digestibility ในกากเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ซึ่งเน้นการศึกษาผลของรังสีแกมมาที่มีต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนในเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการพัฒนาสายพันธุ์โดยศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ สถาบันอินทรีย์เกษตรสถิตย์เพื่อการค้นคว้าและพัฒนาพืชศาสตร์ ที่ผ่านการหีบน้ำมันแบบเกลียวอัด (screw press) ทั้งนี้ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณรังสีที่เหมาะสมในการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำกับผลของรังสีแกมมาต่อกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในกากเมล็ดสับดูดำจากการทดลองของ ศรายุทธ (2551) กับเพื่อนำข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางในการใช้กากเมล็ดสับดูดำเป็นแหล่งวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่อไปในอนาคต เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับกากเมล็ดสับดูดำและสนับสนุนให้มีการใช้ประโยชน์จากสับดูดำอย่างครบวงจร

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของรังสีแกมมาที่มีต่อองค์ประกอบพื้นฐานทางโภชนะในเมล็ดสับด้าโดยวิธีวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis)
2. ศึกษาผลของรังสีแกมมาที่มีต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับด้าโดยใช้เทคนิค *in vitro* digestibility
3. ศึกษาปริมาณรังสีแกมมาที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับด้า
4. เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการย่อยโปรตีนกับกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในกากเมล็ดสับด้าที่ผ่านการฉายรังสี

การตรวจเอกสาร

สบู่ดำ (Physic nut) เป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา Euphorbiaceae ซึ่งเพาะปลูกกันแถบตอนกลางและตอนใต้ของอเมริกา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประเทศอินเดีย และประเทศแอฟริกา (Schmook and Serralta, 1997) ต่อมา มีการเพาะปลูกกันแพร่หลายมากขึ้นในแถบทวีปลาตินอเมริกา ทวีปแอฟริกาและทวีปเอเชีย ทั้งนี้คำว่า *Jatropha* มีรากศัพท์ทางการแพทย์ของภาษากรีก 2 คำ คือ *iatros* แปลว่า หมอ และ *trophe* แปลว่า อาหาร ส่วนคำว่า *curcas* เป็นชื่อเรียกบริเวณเมือง Malabar ในประเทศอินเดีย นอกจากนี้สบู่ดำยังมีชื่อเรียกแตกต่างกันมากกว่า 200 ชื่อ เช่น purging nut (อังกฤษ) purgeernoot (เนเธอร์แลนด์) purgueira (โปรตุเกส) fagiola d' India (อิตาลี) เป็นต้น (Heller, 1996) ในประเทศไทยสบู่ดำเป็นชื่อเรียกในภาคกลาง ส่วนภาคอื่นๆ จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ภาคเหนือเรียกว่า มะหุ้งฮั่ว ภาคใต้เรียกว่า มะหงเทศ มะเคาะ ส่วนภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกว่า มะเข่า หรือ สี่หลอด เป็นต้น (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2548)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้นสบู่ดำเป็นพืชที่มีจำนวนโครโมโซมแบบดิพลอยด์ (Heller, 1996) เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร ลำต้นมีลักษณะเกลี้ยงเกลา ใบเรียบมี 4 แฉก คล้ายใบละหุ่ง แต่มีหยักตื้นกว่า ใบที่เจริญเติบโตเต็มที่ มีขนาดเท่าฝ่ามือ ลำต้น ใบ ผล และเมล็ด มีสาร hydrocyanic สังเกตได้เมื่อหักลำต้น ส่วนยอดหรือส่วนก้านใบจะมียางสีขาวข้นคล้ายน้ำมันไหลออกมา มีกลิ่นเหม็นเขียว ต้นสบู่ดำออกดอกเป็นช่อกระจุกที่ข้อส่วนปลายของยอด ขนาดดอกเล็กสีเหลืองมีกลิ่นหอมอ่อนๆ (ภาพที่ 1) มีดอกตัวผู้จำนวนมากและดอกตัวเมียจำนวนน้อยอยู่บนต้นเดียวกัน เมื่อติดผลแล้วมีสีเขียวอ่อนเกลี้ยงเกลาเป็นช่อพวงมีหลายผล เวลาสุกแก่จัดมีสีเหลืองคล้ายลูกจันทน์ เมล็ดมีสีดำและเนื้อภายในเมล็ดมีสีขาว ดังภาพที่ 2 (กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร, 2548)



(ก) ต๋นสบูดำ



(ข) ช่อดอกของเมล็ดสบูดำ

ภาพที่ 1 ต๋นสบูดำและช่อดอกของเมล็ดสบูดำ

ที่มา: กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร (2548)



ภาพที่ 2 ผลของสบูดำและเนื้อภายในเมล็ด

ที่มา: กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร (2548)

ภายในเมล็ดสบู่ดำประกอบด้วย เนื้อสีขาว (albumin หรือ kernel) ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันถึงร้อยละ 50-60 ของเนื้อเมล็ด โดยร้อยละ 21 ของน้ำมันเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว และอีกร้อยละ 79 เป็นกรดไขมันอิ่มตัว น้ำมันในเมล็ดประกอบด้วยกลุ่มสารเคมีหลายชนิด เช่น palmitic acid, linoleic acids, ricinoleic acids, oleic acid, stearic acid และ crotonoleic acids (Makkar *et al.*, 1997) และยังพบสารในกลุ่ม campesterol, stigmasterol, β -sitosterol, Δ^5 -avenasterol และ Δ^7 -stigmasterol ซึ่งเป็นสารที่พบในพืชที่ให้น้ำมัน (Akintayo, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อในของเมล็ดสบู่ดำที่สกัดน้ำมันออกแล้วมีปริมาณของเส้นใยธรรมชาติร้อยละ 3.5-6.1 (Makkar *et al.*, 1997) และกรดอะมิโนจำเป็นอย่างสูง ยกเว้น lysine เมื่อเทียบกับมาตรฐานขององค์การ FAO/WHO เช่น cystine, methionine, valine, isoleucine, leucine, tyrosine, phenylalanine, histidine, และ threonine ในปริมาณตั้งแต่ 1.60-1.81, 1.38-1.58, 3.79-4.72, 3.08-3.98, 5.92-7.61, 2.45-4.94, 3.82-5.76, 2.65-3.03 และ 3.15-3.85 g 16 g⁻¹N ตามลำดับ (Martinez-Herrera *et al.*, 2006)

การใช้ประโยชน์จากเมล็ดสบู่ดำ

เนื่องจากสบู่ดำเป็นพืชที่มีคุณสมบัติให้น้ำมันและให้โปรตีนสูง (Makkar *et al.*, 1998) จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดสบู่ดำมีคุณสมบัติช่วยในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลและสามารถทดแทนน้ำมันดีเซลได้ นอกจากนี้ยังใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้แสงสว่างภายในบ้านเนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันก๊าดแต่คุณสมบัติการเผาไหม้ไม่ดีเท่ากับน้ำมันก๊าด น้ำมันที่ได้จากเมล็ดสบู่ดำมีค่า saponification value สูงซึ่งเหมาะสมกับการใช้ผลิตสบู่และมีการนำมาผลิตสบู่กันอย่างกว้างขวางในประเทศอินเดีย นอกจากนี้ น้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อและรักษาอาการอักเสบของผิวหนังและใช้เป็นยาแก้ท้องผูกและยาถ่ายพยาธิในสัตว์โดยนำมาผลิตสบู่ดำผสมกับอาหารในปริมาณ 0.0025 กรัมต่อกิโลกรัมของอาหารเพื่อใช้เป็นยาถ่ายในแพะ ปัจจุบันมีการนำเมล็ดสบู่ดำมาผลิตเป็นยาใช้ภายนอก เพื่อรักษาโรคผิวหนังและใช้เป็นยาทาแผลสดแผลเรื้อรังอีกด้วย (Adbel *et al.*, 2003)

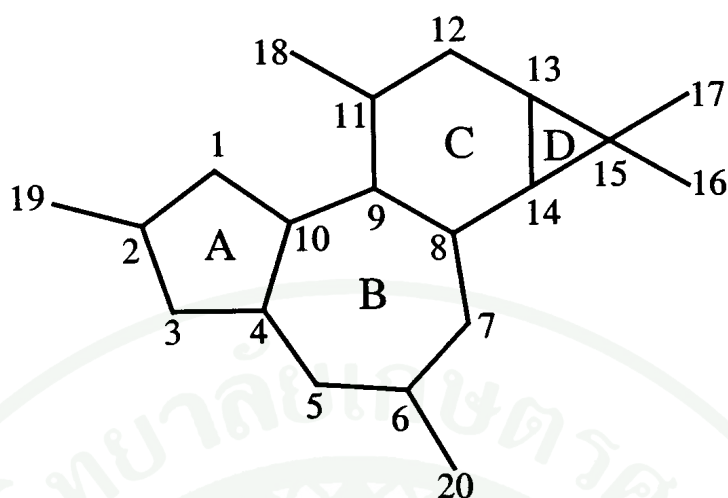
นอกจากนี้สารบางชนิดที่สกัดได้จากเมล็ดสบู่ดำยังสามารถใช้ควบคุมศัตรูพืชได้ เช่น ใช้ลดการเข้าทำลายของหนอนเจาะต้นข้าว ควบคุมแมลงในฝ้าย มันฝรั่ง และข้าวโพด (Heller, 1996) ส่วนเมล็ดที่เหลือจากการสกัดน้ำมันมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 31-34.5 (Martinez-Herrera *et al.*, 2006) จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น เป็ด ไก่ สุกร ควาย และ ปลา แต่ต้องใช้ในปริมาณที่จำกัด เนื่องจากมีปริมาณสารพิษและสารต้านโภชนาอยู่ (Aderibrigde *et al.*, 1997)

ความเป็นพิษในเมล็ดสับด้า

แม้ว่ากาณเื้อในของเมล็ดสับด้าที่ผ่านการหีบน้ำมันเหมาะสมในการใช้เป็นอาหารสัตว์ เนื่องจากมีโปรตีนสูงถึงร้อยละ 31-34.5 (Martinez-Herrera *et al.*, 2006; Liberalino *et al.*, 1988) และองค์ประกอบทางโภชนาอื่นๆ เช่น ความชื้น เยื่อใย ไขมัน และเถ้า ในปริมาณร้อยละ 0.57-0.83, 4.70-9.30, 44.83-49.67 และ 5.02-5.22 ตามลำดับ (ศรายุทธ, 2551) นอกจากนี้ยังมีค่าพลังงาน (gross energy) สูงถึง 30.5-31.5 MJ kg⁻¹ แต่ต้องใช้ในการปริมาณที่จำกัดเนื่องจากมีปริมาณสารพิษและสารต้านโภชนาอยู่ (Aderibrigde *et al.*, 1997) เช่น phorbol esters, trypsin inhibitor, phytic, lectin, และ saponin (Martinez-Herrera *et al.*, 2006) ซึ่งสารเหล่านี้ นอกจากจะทำอันตรายต่อตัวสัตว์แล้ว ยังทำให้การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของสัตว์ลดลง (Makkar, 1993) ดังนี้

1. Phorbol esters

Phorbol esters เป็นสารพิษหลักที่พบในเนื้อในของเมล็ดสับด้า (Martinez-Herrera *et al.*, 2006) เนื้อในของเมล็ดสับด้ามี Phorbol esters 2-3 มิลลิกรัมต่อกรัมของเนื้อในเมล็ดและในน้ำมัน 2-4 มิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำมัน (Makkar *et al.*, 1997) เป็นสารที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมากมักจะพบในพืชตระกูล Euphorbiaceae และ Thymelaeaceae สาร phorbol esters นี้เป็นเอสเทอร์ของ tricyclic diterpenes (Gubitz, 1999) ภาพที่ 3 Tricyclic เป็น tricyclic diterpene เมื่อเกิดปฏิกิริยา Hydroxylation จะมีหมู่ hydroxyl (OH) เข้าจับกับสาร Tricyclic ที่ตำแหน่งต่างๆ เกิดเป็นสารประเภท alcohol เกิดขึ้น เมื่อสารนี้รวมกับกรดก็จะเกิดเป็นสารประเภทเอสเทอร์เกิดขึ้นและเรียกว่าเป็นพวก phorbol ester สาร phorbol ester จะมีผลที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ในแง่ของการส่งเสริมให้เกิดเนื้องอก (tumor promotion) การอักเสบ การบวมของผิวหนัง เป็นต้น (Adolf, 1984) สาร phorbol ester นี้มีความจำเป็นที่จะต้องกำจัดออกจากน้ำมัน (detoxification) เพราะมีความเป็นไปได้ที่คนใช้น้ำมันจะสัมผัสกับน้ำมันทำให้มีโอกาสได้รับสาร phorbol ester เข้าสู่ร่างกาย (Aregheore *et al.*, 2003) นอกจากนี้มีการทดลองให้น้ำมันจากเมล็ดสับด้ากับหนูที่ตั้งครรภ์ในปริมาณ 2 กรัมต่อน้ำหนักของร่างกาย มีผลทำให้เกิดความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน โดยจะทำให้หนูที่ตั้งครรภ์นั้นแท้ง (Odusote *et al.*, 2002)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของ Tiglane

ที่มา: Wilhelm and Martin (2000)

2. สารยับยั้งทริปซิน (Trypsin inhibitor)

พบในเมล็ดสบู่ดำปริมาณ 19-21 มิลลิกรัมต่อกรัมของเมล็ด (Aderibrigde *et al.*, 1997) และเนื้อในของเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการหีบน้ำมันปริมาณตั้งแต่ 18.4-27.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (Makkar *et al.*, 1997) เป็นสารในกลุ่ม proteinase inhibitor (Siddhuraju *et al.*, 2002a) สามารถยับยั้งปฏิกิริยาการย่อยโปรตีน (proteolytic) ที่มีเอนไซม์ทริปซินเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เอนไซม์ทริปซินเป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการย่อยโปรตีนในสัตว์หลายชนิดรวมทั้งมนุษย์ (Clarke and Wiseman, 2005) จัดเป็นเอนไซม์ในกลุ่ม proteinase หรือ proteolytic enzyme ที่มีคุณสมบัติในการสลายพันธะเปปไทด์ (-CO-NH-) ด้วยน้ำ (ปราณี, 2547) ดังนั้น สารยับยั้งทริปซินมีผลทำให้สัตว์ที่บริโภคอาหารที่มีสารยับยั้งทริปซินอยู่ไม่สามารถย่อย หรือใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้อย่างเต็มที่ (Siddhuraju *et al.*, 2002a) นอกจากนี้การนำเมล็ดถั่วเหลืองที่มีสารยับยั้งทริปซินในปริมาณ 1.6 มิลลิกรัมต่อกรัมของอาหารหรือที่ปริมาณสูงกว่าให้กับปลา พบว่า การเจริญเติบโตช้าลง และพบว่าปริมาณ 0.6 มิลลิกรัมต่อกรัมของอาหารไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของปลา (Wee and Shu, 1989) และการใช้เนื้อในของเมล็ดสบู่ดำเป็นแหล่งโปรตีนร้อยละ 23 ซึ่งไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนในสูตรอาหารสำหรับปลา พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตช้าและในกลุ่มที่ผ่านความร้อนไม่มีผลทำให้การเจริญเติบโตลดลง (Makkar *et al.*, 1999)

3. Phytic acid

Phytic acid (hexaphosphates of myo-inositol) มีโครงสร้างเป็น inosital ring ถูกจับด้วย phosphate 6 ตัว พบมากในพืชโดยเฉพาะในเมล็ด ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ phytate หรือจับกับโปรตีน ถูกสร้างและสะสมขึ้นในถั่วระหว่างการเจริญเป็นถั่วเมล็ดแก่ โดยเนื้อในของเมล็ดสนุ่นดำมี phytate ประมาณร้อยละ 8.5-9.3 เนื่องจาก phytate มีคุณสมบัติในการจับกับแร่ธาตุได้หลายชนิด เช่น แคลเซียม เหล็ก สังกะสี แมกนีเซียม จึงมีบทบาทในการขัดขวางการดูดซึมของแร่ธาตุเหล่านี้ (Duffus and Duffus, 1991; Martinez-Herrera *et al.*, 2006) นอกจากนี้ phytic acid ยังสามารถจับกับโปรตีนซึ่งจะไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ เช่น ทริปซิน และเปปซิน ทำให้การย่อยได้และการดูดซึมของโปรตีนลดลง (Richardson *et al.*, 1985)

4. Saponin

Saponin เป็น glycoside ที่มีส่วน aglycone (sapogenin) เป็นสารจำพวกสเตอรอยด์หรือ triterpenoids มีคุณสมบัติเป็น detergent เมื่อละลายน้ำแล้วจะมีความเป็นพิษสูงต่อระบบหายใจทางเหงือกของปลา (Fenwick *et al.*, 1991) นอกจากนี้คุณสมบัติของ saponin ยังมีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตของสัตว์ โดยจะไปขัดขวางการย่อยโปรตีนของเอนไซม์โคโมทริปซินในถั่วเหลือง (Shimoyamada *et al.*, 1998) เป็นต้น

5. Lectin

Lectin หรือ phytohaemagglutinins พบในถั่วเหลืองและพืชเมล็ดแห้งชนิดอื่นๆ ในเมล็ดสนุ่นดำมี lectin ประมาณ 0.35-1.46 มิลลิกรัม ของเนื้อเมล็ดต่อมิลลิลิตรของการสังเคราะห์ haemagglutinins (Martinez-Herrera *et al.*, 2006) โดย lectin จะไปขัดขวางการย่อยโปรตีนในลำไส้เล็ก นอกจากนี้ lectin ยังสามารถลดคุณภาพของโปรตีนและลดอัตราการเจริญเติบโตในสัตว์ด้วย (Grant, 1991)

การลดความเป็นพิษในเมล็ดสับปะรด

การลดสารพิษและสารต้านโภชนาในเมล็ดสับปะรด เช่น สารยับยั้งทริปซินนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน หรือการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี และอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดสารพิษและสารต้านโภชนาในเมล็ดสับปะรดได้ คือ การใช้รังสีแกมมา ดังนี้

1. การใช้ความร้อน

การใช้ความร้อน โดยการนึ่งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ความชื้นร้อยละ 67) นาน 30 นาที อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส (ความชื้นร้อยละ 80) นาน 30 นาที และที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที ทำให้ปริมาณสารยับยั้งทริปซินจากเดิมที่มีอยู่ในเมล็ด 19-21 มิลลิกรัม ลดลง 5, 4 และ 3 มิลลิกรัมต่อกรัมของเมล็ดตามลำดับ (Aderibigbe *et al.*, 1997) และการกั่วในกระโถนนาน 15 นาที สามารถหยุดการทำงานของสารยับยั้งทริปซินได้ทั้งหมด (Makkar *et al.*, 1998)

2. การใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี

การใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที ร่วมกับการใช้โซเดียมคาร์บอเนต และการใช้ เอทานอล 90 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในเนื้อในของเมล็ดสับปะรดผ่านการหีบน้ำมันจากเดิม 36.0 มิลลิกรัม ลงเหลือ 0.68 และ 0.58 มิลลิกรัมต่อกรัมของเมล็ดสับปะรด ตามลำดับ (Martinez-Herrera *et al.*, 2006)

3. การใช้รังสีแกมมา

นอกจากการใช้ความร้อนหรือการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมีแล้ว การฉายรังสีแกมมาก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในเมล็ดสับปะรดโดยวิธีการฉายรังสีมีข้อดีกว่าวิธีอื่นหลายประการ เช่น การฉายรังสีทำได้ง่าย ใช้เวลาสั้น และรักษาคูณค่าทางโภชนาการไว้ได้ดี โดยมีการทดสอบคุณค่าทางโภชนาการและความเป็นพิษในข้าวสาลีที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0.2-2 กิโลเกรย์ ในหนูพบว่าไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตหรือการสืบพันธุ์ของหนู (Hickman *et al.*, 1964; Fifield *et al.*, 1967) และการใช้รังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีตั้งแต่ 10- 60 กิโลเกรย์ สามารถลด

กิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินลดลงเฉลี่ยร้อยละ 11.30-60.29 ตามลำดับ และพบว่าองค์ประกอบทางโภชนาไม่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากการฉายรังสี (ศรายุทธ, 2551) และการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 1-50 กิโลเกรย์ ในกากเมล็ด karanja พบว่า สามารถลดกิจกรรมของสารยับยั้งเอนไซม์ทริปซินลงได้ และทำให้ความสามารถในการย่อยโปรตีนเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 41.33-58.33 กรัมต่อ 100 กรัมโปรตีน (Rabab and Madhurima, 1997) นอกจากนี้การฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณ 50-1000 กิโลเกรย์ ไม่ส่งผลต่อระดับโปรตีน คุณภาพของโปรตีนและกรดอะมิโนในอาหารของหนูทดลอง (Ford, 1976) ในขณะที่การใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียสนาน 5 นาที มีผลต่อโครงสร้างโปรตีนในอาหาร (Provansal *et al.*, 1975) และการใช้สารเคมีที่เป็นตัวทำลายที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสารโภชนาการในอาหาร (Siddhuraju *et al.*, 2002a)

ผลของรังสีต่อสารชีวโมเลกุล

รังสี (radiation) เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดแล้วเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง ซึ่งพลังงานที่ปล่อยออกไปอาจอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) หรือลำของอนุภาค (particle หรือ corpuscular radiation) ขึ้นกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของรังสี โดยรังสีอาจถ่ายเทพลังงานโดยตรงให้กับสารชีวโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุล เรียกว่า การกระทำโดยตรง (direct effect) ซึ่งรังสีสามารถถ่ายเทพลังงานให้กับตัวกลางหรือให้กับโมเลกุลทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมหลุดออกเกิดเป็นโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้าขึ้น แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ในภายหลัง อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนอกจากจะมีความไวในการทำปฏิกิริยาทางเคมีแล้วยังสามารถส่งผลต่อสารชีวเคมีภายในเซลล์ได้ จนทำให้สารชีวโมเลกุลภายในเซลล์เกิดการเปลี่ยนแปลง เรียกว่า การกระทำโดยอ้อม (indirect effect) ซึ่งรังสีอาจทำให้เกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับสารประกอบที่มีความสำคัญในขบวนการ metabolism เพื่อการดำรงชีวิตของเซลล์ รวมทั้งมหโมเลกุล (macro molecules) ได้แก่ พวกรโปรตีน เอนไซม์ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เป็นต้น รังสีก่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ทั้งทางตรงและทางอ้อมกับสารประกอบเหล่านี้และทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป คุณสมบัติที่อาจเปลี่ยนไป ได้แก่ (Casarett, 1968; Hall *et al.*, 1994; Siddhuraju *et al.*, 2002)

1. คุณสมบัติในการละลาย (solubility)
2. ความหนืด (viscosity)
3. คุณสมบัติในการดูดกลืนแสง (absorbtion spectra)
4. น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)
5. อัตราการตกตะกอน (sedimentation rate)
6. คุณสมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้า (electrophoretic)

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารประกอบเหล่านี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้ทำหน้าที่ผิดไปจากเดิม การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบเหล่านี้อาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุ 2 ประการ ดังนี้ (Casarett, 1968)

1. Degradation คือ การที่โมเลกุลใหญ่แตกออกเป็นหน่วยเล็กๆ สำหรับโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยหน่วยที่เหมือนกันหลายหน่วยมาต่อกัน เมื่อเกิดการแตกหักก็จะเกิดขึ้นตรงแขนที่เหมือนกัน ดังนั้น ถึงแม้ว่ารังสีจะถูกดูดกลืน ณ จุดใดก็ตามจะมีการถ่ายเทพลังงานมายังจุดที่เกิดการแตกหักง่าย

2. Crosslinking โมเลกุลที่มีโครงสร้างยาวสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้โดยการเชื่อมต่อกันเองภายในโมเลกุลเดียวกัน (intramolecular crosslinking) เมื่อมีจุดที่ไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นบนเส้นโมเลกุลนั้นและส่วนนี้เป็นส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยาอื่น เช่นเดียวกับการเกิด intramolecular crosslinking อาจเกิดการต่อกันระหว่างโมเลกุลได้ (intermolecular crosslinking) ถ้าเกิดการ crosslinking มากไม่เพียงแต่โมเลกุลจะไม่สามารถทำหน้าที่ต่อไปได้และอาจจะไม่สามารถละลายอยู่ในระบบนั้นๆ ได้ ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดเจล (gel) เป็นต้น

ผลของรังสีต่อโปรตีน

โปรตีนเป็นสารอินทรีย์ซึ่งพบได้ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด มีโครงสร้างซับซ้อนและมีมวลโมเลกุลมาก โปรตีนมีหน่วยย่อย คือ กรดอะมิโน เรียงตัวกันด้วยพันธะเปปไทด์ โปรตีนมีหน้าที่สำคัญต่อโครงสร้างและกิจกรรมภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด โปรตีนในอาหารจึงเป็นแหล่งของกรดอะมิโนให้แก่สิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนเหล่านั้นได้เอง (Maton *et al.*, 1993)

โปรตีนเป็นหนึ่งในมหโมเลกุล เช่นเดียวกับกับโพลีแซคคาไรด์ (คาร์โบไฮเดรต) และกรดนิวคลีอิก (สารพันธุกรรม) ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตโดยมีโปรตีนหลายชนิดที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์ เป็นเอนไซม์ เป็นฮอร์โมนบางชนิดเพื่อควบคุมการทำงานของระบบอวัยวะต่างๆ ในร่างกาย โมเลกุลของโปรตีนประกอบด้วยสายของกรดอะมิโน อาจอยู่ในรูปร่างที่เป็นเส้นหรือเป็นก้อนกลม เมื่อโปรตีนได้รับรังสีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเกิด polymerization การเกิด cross-linking ของโมเลกุลโปรตีนการขาดของสายโพลีเปปไทด์ การหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันของกรดอะมิโน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจทำให้ความเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติของโปรตีนเปลี่ยนไปด้วย เช่น น้ำหนักของโมเลกุล ความสามารถในการละลายน้ำ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างและหน้าที่ของโปรตีน (Maton *et al.*, 1993)

ผลของรังสีต่อคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตหรือแซคคาไรด์ (saccharides) คือ สารประกอบที่ประกอบด้วย แอลดีไฮด์ (aldehyde) หรือคีโตน (ketone) ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) คาร์โบไฮเดรตมีทั้งชนิดที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 หรือ 6 ตัว เรียกว่า โมโนแซคคาไรด์ เช่น กลูโคส และฟรุกโตส หรือโมโนแซคคาไรด์ 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกัน เรียกว่า ไดแซคคาไรด์ หรือหลายๆ โมเลกุลมาเชื่อมต่อกัน เรียกอีกอย่างว่า โพลีแซคคาไรด์ ซึ่งบทบาทและหน้าที่จะต่างกัน เช่น ไกลโคเจน และแป้ง เป็นตัวสะสมอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตทำหน้าที่เป็นโครงสร้างเซลล์ ซึ่งผลของรังสีต่อโพลีแซคคาไรด์อาจทำให้เกิดการสลายพันธะ การแตกตัวของสายโซ่ หรือการเกิด depolymerization (Casarett, 1968) โพลีแซคคาไรด์บางชนิด เช่น glycogen จะทำหน้าที่สะสมอาหารพวกคาร์โบไฮเดรต และเซลลูโลสจะเป็นโครงสร้างของเซลล์พืชรังสีอาจทำให้เกิดปฏิกิริยา delignification และ decomposition ในเส้นใยของพืช เป็นต้น (Sandev and Karaiyanov, 1977)

ผลของรังสีต่อไขมัน

ไขมันหรือลิปิด เป็นสารชีวโมเลกุลที่ไม่ละลายในน้ำ หรือสารประกอบไม่มีขั้วที่ละลายน้ำน้อยตลอดจนละลายน้ำมาก พวกที่ละลายน้ำมากจะเป็นสารประกอบจำพวกมีขั้วลิปิด ประกอบด้วย เอสเทอร์ ของกรดไขมัน และแอลกอฮอล์สำหรับกรดไขมันนั้น มีทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว และส่วนที่ไวต่อรังสีของลิปิด คือ ส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ ตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป เช่น กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) ที่อยู่ในสภาพสลายเรดิคอลละจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรด

ลิโนเลอิก ตรงส่วนของคาร์บอนที่อยู่ระหว่างพันธะคู่ มีการดึงเอาไฮโดรเจนออกไป (dehydrogenase) และได้เป็น organic free radical ($R^{\cdot}$) ซึ่งอาจทำให้เกิดกระบวนการ lipid peroxidation ทำปฏิกิริยาร่วมกับ O_2 ได้เป็น peroxy radical และทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ต่อไป (Casarett, 1968)

การย่อยสลายโปรตีน

โปรตีน ประกอบด้วยสาย peptide ของกรดอะมิโนชนิดต่างๆ เรียงต่อกัน โปรตีนบางประเภท ประกอบด้วยสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มาเชื่อมต่ออยู่ด้วยกัน เช่น นิวคลีโอโปรตีน ลิโปโปรตีน ไกลโคโปรตีน เป็นต้น

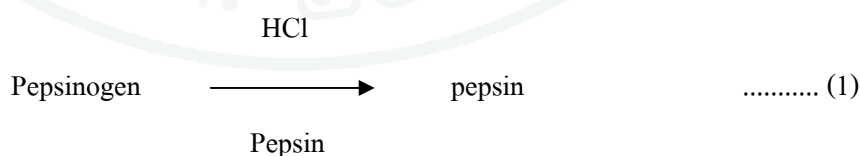
โปรตีนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการทางชีวเคมีทุกชนิด โครงสร้างของโปรตีนเป็นสาย polypeptide คือ เป็นเส้นยาวไม่ย่อยสลายน้ำและมักทำหน้าที่เป็นโปรตีนโครงสร้าง เพราะความแข็งแรงยืดหยุ่นสูง เช่น โปรตีนคอลลาเจนในเส้นเอ็นและกระดูกทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแคลเซียมฟอสเฟตมาเกาะ โปรตีนเคราติน และโปรตีนไฟโบรอิน อีกส่วนหนึ่ง คือ โปรตีนทรงกลม (globular protein) ซึ่งมีโครงสร้างของสาย polypeptide ขดไปขดมาและอัดแน่นเป็นทรงกลมมีคุณสมบัติในการละลายน้ำ และทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ภายในเซลล์ เช่น โปรตีนที่ทำหน้าที่เอนไซม์เพื่อเร่งปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิต เช่น เอนไซม์ amylase และเอนไซม์ protease เป็นต้น เพื่อใช้ในการย่อยอาหาร (พจน์ และคณะ, 2540)

การย่อยอาหาร คือ กระบวนการแปรสภาพอาหารโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงเพื่อการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ สารอาหารพวกคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน เท่านั้นที่ต้องผ่านกระบวนการย่อยเสียก่อน กลีเซอรอล วิตามิน และน้ำ สามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ขั้นตอนการย่อยอาหารแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ (พจน์ และคณะ, 2540)

ขั้นตอนที่ 1 การย่อยเชิงกล (Mechanical digestion) อาหารโมเลกุลใหญ่ถูกทำให้ชิ้นเล็กลงโดยการบดเคี้ยวด้วยฟัน และทำให้อาหารคลุกเคล้ากันด้วยน้ำลายหรือการบีบตัวของทางเดินอาหาร (McDonald *et al.*, 1988)

ขั้นตอนที่ 2 การย่อยทางเคมี (Chemical digestion) โมเลกุลของสารอาหารโมเลกุลใหญ่ถูกเปลี่ยนสภาพให้มีโมเลกุลเล็กลงโดยใช้เอนไซม์ (enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์ คือ อินทรีย์สารพวกโปรตีน เพื่อทำหน้าที่กระตุ้นในปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในสิ่งมีชีวิตนั้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะต้องมีน้ำเข้ามาช่วยในกระบวนการแตกสลาย สารอาหารโมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลง เราเรียกกระบวนการแตกสลายสารอาหารโมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลง โดยอาศัยน้ำ เรียกว่า ไฮโดรลิซิส (ปราณี, 2547)

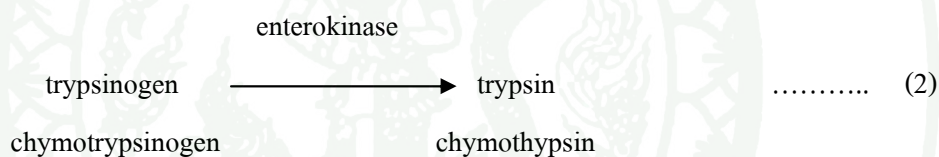
อาหารโปรตีนจะถูกย่อยที่กระเพาะอาหาร โดยเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่กระเพาะอาหาร โปรตีนจะกระตุ้นเซลล์ของกระเพาะอาหารในส่วนของแอนทรม์ ให้หลั่งฮิสทามีนแกสตริน ซึ่งจะออกฤทธิ์ที่กระเพาะอาหาร ทำให้เซลล์บุผนังกระเพาะอาหาร (parietal cell) หลั่งกรดไฮโดรคลอริก และทำให้ชีพเซลล์ (chief cell) หลั่งเอนไซม์เปปซิโนเจน (ทั้ง parietal cell และ chief cell จัดเป็นต่อมกระเพาะอาหารหรือ gastric gland) สารคัดหลั่ง (secretion) จากต่อมกระเพาะอาหารดังกล่าวเรียกรวมๆว่าน้ำย่อยในกระเพาะ (gastric juice) ซึ่งมีค่า pH ต่ำมากประมาณ 2.5 ซึ่งเป็นผลมาจากการดไฮโดรคลอริก ในกระเพาะอาหารความเป็นกรดของน้ำย่อยในกระเพาะอาหารนี้ทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารระงับเชื้อ คือ สามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียของสัตว์เซลล์เดียวบางชนิดที่ปนมากับอาหาร นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวทำลายสภาพธรรมชาติของสารชีวโมเลกุล ทำให้อาหารโปรตีนในกระเพาะเสียสภาพและถูกย่อยง่ายขึ้นด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหาร เอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีน (proteolytic enzyme) ในกระเพาะอาหาร คือ เปปซิน ซึ่งถูกสังเคราะห์และหลั่งออกมาในรูปที่ยังไม่สามารถใช้งานได้ เรียกว่า เปปซิโนเจน จากนั้นจะถูก กระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกในกระเพาะอาหารและเปลี่ยนเป็นเอนไซม์ เปปซิน ซึ่งเป็นรูปที่ทำงานได้ เอนไซม์นี้จะไปกระตุ้นให้เปปซิโนเจนโมเลกุลอื่นๆ เปลี่ยนเป็นเอนไซม์เปปซินได้อีก เราเรียกกระบวนการย่อยตัวเองแบบนี้ว่า การเร่งสลายตัวเอง (autocatalysis) ดังสมการที่ 1



เอนไซม์ย่อยสลายโปรตีนหลายๆ ชนิดในทางเดินอาหารมักถูกสังเคราะห์และหลั่งออกมาในรูปของเอนไซม์ที่ยังใช้งานไม่ได้ และจะถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูปทำงานได้โดยการเกิดการเร่งสลายตัวเอง ดังนี้ (พจน์ และคณะ, 2540)

อาหารในกระเพาะอาหารซึ่งขณะนี้มีฤทธิ์เป็นกรดจะเคลื่อนตัวไปยังลำไส้เล็ก ความเป็นกรดนี้จะกระตุ้นให้มีการหลั่งฮอร์โมนซีครีตินจากเซลล์เยื่อบุผนังของลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ซีครีตินจะกระตุ้นให้ตับอ่อนหลั่งสารละลายไบคาร์บอเนต ลงสู่ลำไส้เล็กเพื่อทำให้อาหารมีฤทธิ์เป็นกลาง (pH 7-8) และการย่อยโปรตีนในลำไส้เล็กสามารถดำเนินการต่อไป กรดอะมิโนบางส่วนที่ได้จากการย่อยโปรตีนในกระเพาะอาหาร เมื่อเข้ามาสู่ลำไส้เล็กจะไปกระตุ้นการหลั่งเอนไซม์ย่อยสลายโปรตีนหลายชนิดจากตับอ่อน โดยเอนไซม์เหล่านี้ทำงานได้ดีที่ pH ประมาณ 7-8

เอนไซม์ย่อยสลายโปรตีนที่หลั่งจากต่อมเอ็กโซไครน์ (exocrine gland) ในตับอ่อนเมื่อลงมาสู่ลำไส้เล็กจะอยู่ในรูปที่ยังทำงานไม่ได้หรือโซโมเจนทั้งสิ้น ได้แก่ ทริปซินโนเจน ไคโมทริปซินโนเจนและโพรคาร์บอกซิเปปติเคส จะถูกกระตุ้นโดยเอนไซม์อีกชนิดหนึ่งเรียกว่า เอนเทอโรไคเนส ทำให้ทริปซินโนเจนเปลี่ยนเป็นทริปซินและไคโมทริปซิน ซึ่งอยู่ในสภาพที่สามารถย่อยโปรตีนได้ ดังสมการที่ 2



เอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีนดังกล่าวแล้วข้างต้น มีความจำเพาะเจาะจงในการตัดหรือทำลายพันธะเปปไทด์ในโปรตีนที่ตำแหน่งแตกต่างกัน

เอนไซม์เปปซินตัดพันธะเปปไทด์ตรงตำแหน่งที่เป็นกรดอะมิโนชนิดแอโรแมติก ได้แก่ ไทโรซีน (Tyr) ทริปโทเฟน (Trp) และฟีนิลอะลานีน (Phe) รวมทั้ง ลิวซีน (leucine, Leu)

เอนไซม์ทริปซินตัดพันธะเปปไทด์ทางด้านหมู่ $-\text{COOH}$ ของกรดอะมิโนไลซีน (Lys) และอาร์จินีน (Arg)

เอนไซม์ไคโมทริปซิน ตัดพันธะเปปไทด์ที่มีกรดอะมิโนชนิดแอมโรแมติก ได้แก่ Tyr, Trp และ Phe หลังจากเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวได้ทำการตัดหรือการย่อยโปรตีนที่ตำแหน่งที่จำเพาะเจาะจงแตกต่างกันแล้ว จะได้โมเลกุลโปรตีนขนาดเล็กลงและมีสายเปปไทด์สั้นๆ มากมาย ซึ่งจะถูกละเอียดจนสมบูรณ์ได้เป็นกรดอะมิโนอิสระ โดยเอนไซม์อีก 2 ชนิดคือ คาร์บอกซีเปปติเดส และอะมิโนเปปติเดส โดยมีการตัดกรดอะมิโนออกทีละตัวจากปลายคาร์บอกซิล และปลายอะมิโนตามลำดับ ในที่สุดจะได้เป็นกรดอะมิโนอิสระ เอนไซม์คาร์บอกซีเปปติเดสนี้จะสังเคราะห์และหลังจากดับอ่อนลงสู่ลำไส้เล็กในรูปที่ยังทำงานไม่ได้ คือ โปรคารบอกซีเปปติเดส ส่วนอะมิโนเปปติเดสจะถูกสังเคราะห์และหลังจากเซลล์ของลำไส้เล็กเอง กรดอะมิโนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซึมผ่านเซลล์เยื่อของลำไส้เข้าสู่กระแสเลือด และขนส่งไปยังตับเพื่อส่งต่อไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของร่างกาย

อาหารโปรตีนส่วนใหญ่จะถูกย่อยเป็นกรดอะมิโนอิสระก่อน จึงจะถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) นอกจากนี้ยังมีการดูดซึมในรูปของไดเปปไทด์ ซึ่งจะถูกละเอียดจนสมบูรณ์เป็นกรดอะมิโนอิสระที่เซลล์เยื่อผนังลำไส้เล็ก กรดอะมิโนอิสระจะถูกขนส่งผ่านทางผนังลำไส้เล็กเข้าสู่เลือดและเพื่อนำไปดับอีกทีหนึ่ง กรดอะมิโนจะถูกขนส่งผ่านชั้นเซลล์เยื่อบุลำไส้เล็กไปยังเยื่อเลื่อม (serosa) โดยมีวิตามินบี 6 (pyridoxyl phosphate) ช่วยในการขนส่ง กระบวนการขนส่งนี้ต้องการพลังงานในรูป ATP โดย กรดอะมิโน หรือโซเดียม จะช่วยพากรดอะมิโนหรือไดเปปไทด์จับกับโปรตีนขนส่งจำเพาะ (specific transport protein) ซึ่งต้องการโซเดียม จากนั้นโซเดียมจะช่วยพากรดอะมิโนหรือไดเปปไทด์เข้าไปในเซลล์อีกทีหนึ่ง เราเรียกกลไกการขนส่งนี้ว่า “sodium co-transport mechanism” หรือ secondary active transport อย่างไรก็ตามกรดอะมิโนบางตัวไม่ได้ใช้กลไกนี้ขนส่งหรือดูดซึม แต่ใช้โปรตีนขนส่งตัวอื่นที่ไม่ต้องการโซเดียม เราอาจจำแนกระบบขนส่งกรดอะมิโนได้เป็น 4 ระบบ คือ ระบบขนส่งสำหรับกรดอะมิโนชนิดแอมโรแมติกและเป็นกลาง ระบบขนส่งสำหรับกรดอะมิโนซิสเตอีน และกรดอะมิโนชนิดที่เป็นเบสคือ Arg, Lys และ His ระบบขนส่งสำหรับกรดอะมิโนไกลซีน, โพรลีน และระบบขนส่งกรดอะมิโนชนิดเป็นกรด คือ กรดกลูตามิก และกรดแอสพาดิก (พจน์ และคณะ, 2540)

การประเมินค่าโภชนาการที่ย่อยได้ในอาหารสัตว์

การประเมินค่าโภชนาการของอาหารโดยการวัดองค์ประกอบทางโภชนาการที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น ไม่สามารถดูได้จากลักษณะคุณภาพของอาหาร เนื่องจากว่าปฏิภณระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของอาหารกับระบบการย่อยและทางเดินอาหารของสัตว์แตกต่างกันในสัตว์

กระเพาะเคี้ยวและสัตว์เคี้ยวเอื้อง นั้นมีอิทธิพลต่อการประเมินโภชนะในอาหาร เป็นต้น (Gordon, 2008) ระบบทางเดินอาหารของสัตว์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไป เช่น สัตว์กระเพาะเคี้ยว ต้องเคี้ยวอาหารให้ละเอียดก่อนที่จะกลืนอาหารลงกระเพาะ สัตว์บางชนิดอย่างสัตว์ปีกซึ่งไม่มีฟัน จะกลืนอาหารเป็นชิ้นลงกระเพาะแต่จะมีอวัยวะพิเศษสำหรับบดย่อยอาหาร ในสัตว์เคี้ยวเอื้องจะเคี้ยวอาหารอย่างหยาบๆ กลืนลงกระเพาะปล่อยให้ย่อยและจุลินทรีย์ในกระเพาะทำการหมักให้อาหารอ่อนตัวก่อนที่จะขบออกอาหารออกมาเคี้ยวให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง (Herren, 1998; Mcdonal *et al.*, 1988) การประเมินค่าการย่อยได้ของโภชนะสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. วิธี *In vivo*

เป็นวิธีการและขั้นตอนในการหาการย่อยได้โดยให้สัตว์กินอาหารและเก็บตัวอย่างอาหารจากมูลที่สัตว์ขับถ่ายออกมาเพื่อวิเคราะห์หาค่าโภชนะที่ย่อยได้ของวัตถุแห้ง โดยแสดงเป็นค่าร้อยละของการย่อย หรือค่าสหสัมพันธ์ (coefficient) ยกตัวอย่างเช่น ถ้าวัวกินหญ้าแห้ง 9 กิโลกรัม ที่ประกอบด้วยวัตถุแห้ง 8 กิโลกรัม จากนั้นขับถ่ายออกมา 3 กิโลกรัมของวัตถุแห้งในมูล ดังนั้น การย่อยได้ของวัตถุแห้งในหญ้าแห้ง มีค่าเท่ากับ

$$\frac{8-3}{8} = 0.625 \quad \text{หรือ} \quad \frac{8-3}{8} \times 100 = 62.5 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ซึ่งค่าที่คำนวณได้นั้น บอกให้ทราบถึงวัตถุแห้งที่สัตว์ย่อยและถูกดูดซึมและส่วนอาหารที่ไม่ถูกย่อยจะขับถ่ายออกมาในรูปของมูล ซึ่งการประเมินด้วยวิธีนี้จะต้องใช้สัตว์ทดลองจำนวนมาก และต้องคัดเลือกสายพันธุ์ อายุ เพศ ให้มีความใกล้เคียงกันเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในการประเมินค่าการย่อยของโภชนะที่วัดได้จากสัตว์ที่ทำการทดลอง (Mcdonal *et al.*, 1988)

2. วิธี *In sacco* และ *In vitro*

เนื่องจากการหาการย่อยได้ของโภชนะด้วยวิธี *In vivo* เสียค่าใช้จ่ายสูงใช้แรงงานและเวลามาก แต่อย่างไรก็ตามยังมีวิธีการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (*In vitro*) หลายวิธี ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวก และประหยัดกว่า สามารถใช้ทำนายค่า *In vivo* ได้ ดังนั้น *In sacco* และ *In vitro* เป็นการจำลองปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดจากการทดสอบโดยวิธี *In vivo* โดยทำการทดลองการประเมิน

ค่าโภชนะที่ย่อยได้ในห้องปฏิบัติการ (Gordon, 2008) เช่น การศึกษาการหมักย่อยของโภชนะชนิดหนึ่งชนิดใดในวัตถุดิบอาหารสัตว์สามารถทำได้โดยวิธี *In sacco* หรือ *In situ* ทำได้โดยอาศัยสัตว์ที่ผ่านการเจาะกระเพาะรูเมน โดยชั่งตัวอย่างอาหารประมาณ 3 กรัม ใส่ในถุงที่ทำมาจากไนลอนหรือ terylene โดยนำตัวอย่างอาหารบ่มในสัตว์ที่ผ่านการเจาะกระเพาะที่ต้องการศึกษาการย่อยได้ นาน 48 หรือมากกว่า 120 ชั่วโมง อิทธิพลที่มีผลต่อการประเมินคุณค่าโภชนะที่ย่อยได้ด้วยวิธีนี้ คือ ประเภทของอาหารที่ทดลอง ประเภทของสัตว์เคี้ยวเอื้องที่เจาะกระเพาะ ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างวัตถุดิบอาหาร และการนำเอาถุงไนลอนออกจากกระเพาะรูเมนมาล้างทำความสะอาดจากเศษอาหารที่ติดภายนอกถุงด้วย (Mehrez and Ørskov, 1977)

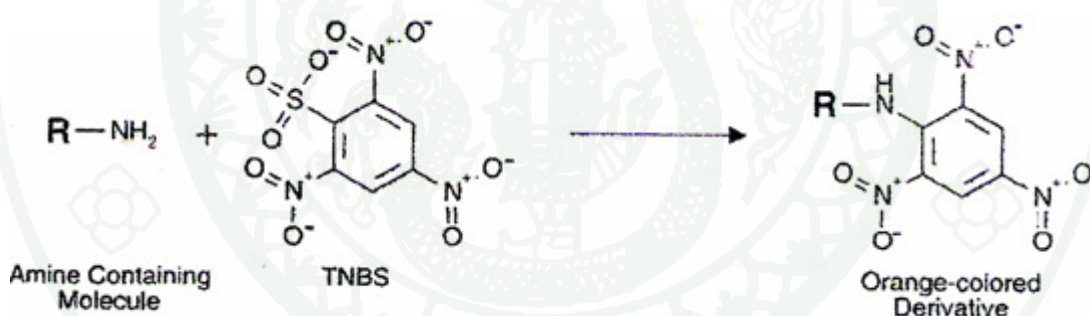
วิธี *In vitro* โดยการวิเคราะห์ปริมาณการย่อยได้ของพืชอาหารสัตว์จากการหมักย่อยของจุลินทรีย์จากกระเพาะรูเมนในหลอดทดลอง แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. First stage โดยการหมักย่อยด้วยจุลินทรีย์จากกระเพาะรูเมนขั้นตอนเดียว
2. Two stage เป็นขั้นตอนที่เพิ่มเติมจาก First stage โดยหลังจากการบ่มในหลอดทดลองเป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้ว ทำการย่อยต่ออีก 48 ชั่วโมงด้วยเอนไซม์เปปซินเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทั้งนี้ เนื่องจากการวิเคราะห์การย่อยได้ในขั้นตอน First stage ขั้นตอนเดียวมีความสัมพันธ์ไม่ใกล้เคียงกับการย่อยโดยวิธี *In vivo* ทั้งนี้ เพื่อจำลองการย่อยในระบบทางเดินอาหารของสัตว์นั่นเอง (McDonald et al., 1988)

นอกจากนี้ ยังมีการใช้เอนไซม์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน โดยใช้เอนไซม์ที่มีคุณสมบัติสามารถย่อยสลายโปรตีน (proteolytic enzyme) เช่น เอนไซม์ทริปซิน ไคโมทริปซิน และเปปติเดส ผสมลงในตัวอย่างที่ต้องการศึกษา แล้วดูการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่เกิดขึ้นในระยะเวลาที่กำหนด แล้วจึงนำมาคำนวณโดยใช้สมการ วิธีการนี้เรียกว่า multienzyme digestibility (Bodwel et al., 1980; Hsu et al., 1997) เช่น Adeyeye (1996) ศึกษาผลของความร้อนต่อประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของ African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa*) 6 สายพันธุ์ โดยวิธี *In-vitro* multienzyme digestibility โดยใช้เอนไซม์สามชนิด คือ เอนไซม์ทริปซิน ไคโมทริปซิน และเปปติเดส พบว่าตัวอย่างที่ผ่านขบวนการให้ความร้อน จะมีความสามารถในการย่อยโปรตีนสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านขบวนการให้ความร้อน และ Hania and Niely (2007) ได้ทำการศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วลิ้นเตา โดยวิธี *In vitro* digestibility โดยใช้

เอนไซม์ย่อยโปรตีนคือ เอนไซม์ทริปซิน ไคโมทริปซิน และเปปติเดส พบว่า รังสีแกมมาที่ปริมาณตั้งแต่ 0, 5.0, 7.5 และ 10 กิโลเกรย์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในถั่วลันเตาได้ตั้งแต่ร้อยละ 74.10, 75.37, 76.37, 78.03 ตามลำดับ

นอกจากจะมีการศึกษาความสามารถในการย่อยได้ของโปรตีนด้วยค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงในระยะเวลาที่กำหนดแล้วยังมีวิธีการหาการย่อยได้ของโปรตีน คือ วิธีการหาปริมาณแอลฟา-อะมิโนด้วย 2, 4, 6-Trinitrobenzene-1-sulfonic acid (TNBS) เป็นการหาปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ โดยใช้แอล-ลิวซีนเป็นสารมาตรฐาน หลักการของวิธีนี้คือ primary amines ทำปฏิกิริยากับสาร TNBS ได้ผลิตภัณฑ์ที่ให้สีเหลืองและสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4 ซึ่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ในสภาวะเป็นด่างอ่อนๆ (phosphate buffer pH 8.2) และจะหยุดปฏิกิริยาได้โดยการใช้สภาวะที่เป็นกรดด้วยกรดกลีโคลิกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล หากตัวอย่างมีสภาวะเป็นกรดมากๆ จะทำให้ไม่สามารถหาค่าแอลฟา-อะมิโนได้ (Adler-Nissen, 1979)



ภาพที่ 4 การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TNBS กับ Primary amines

ที่มา: Pierce Chemical company (1999)

จากวิธีการดังกล่าวได้มีการนำมาหาค่าความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนในเนื้อปลา โดย Hoyle and Merritt (1994) ศึกษาการย่อยสลายโปรตีนในเนื้อปลาแฮร์ริงด้วยเอนไซม์ Alcalase 2.4 L ที่ pH 8.0-8.5 อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส และเอนไซม์ปาเปน ย่อยสลายที่ pH 6.0-7.0 อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส พบว่า เอนไซม์ Alcalase 2.4 L สามารถย่อยสลายโปรตีนในเนื้อปลาแฮร์ริงได้

ดีกว่าเอนไซม์ปาเปน โดยเมื่อย่อยสลายเป็นเวลา 60 นาที มีระดับการย่อยสลาย (Degree of hydrolysis) สูงสุดเท่ากับ 44.7 และ 43.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ Kristinsson and Rusco (2000) ยังได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนจากเนื้อปลาแซลมอน โดยใช้ซีรีนโปรติเอสที่สกัดจากกล้ามเนื้อปลาแซลมอน เปรียบเทียบกับ alkaline protease ทางการค้า 4 ชนิด คือ Alcalase 2.4 L, Flavourzyme 1000 L, Corolase PN-L และ Corolase 7089 โดยใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส pH 7.5 เป็นเวลา 180 นาที พบว่า Corolase 7089 มีระดับการย่อยสลาย สูงสุดเท่ากับ 14.4 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ โปรติเอสที่สกัดได้จากปลาแซลมอน, Flavourzyme 1000 L, Corolase PN-L และ Alcalase 2.4 L โดยมีระดับการย่อยสลายเท่ากับ 14.1, 7.5 และ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Prangtip *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของอะไมเลสและโปรตีนของหอยมุกน้ำจืด *Hyriopsis (Hyriopsis) bialatus* ช่วงอายุต่างๆ ในการย่อยสาหร่ายเซลล์เดียว 10 ชนิด โดยวิธี *in vitro* digestibility เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาสูตรอาหารที่เหมาะสมสำหรับหอยในแต่ละช่วงอายุ พบว่า หอยตัวเต็มวัยสามารถย่อยสาหร่ายชนิด *Chlorella* sp.2 อายุ 3 วัน, *Monoraphidium* sp. อายุ 7 วัน และ *Coccomyxa* sp. อายุ 7 วัน ได้ดีที่สุด

Jutamas *et al.* (2009) ศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนในวัตถุดิบอาหารของปลานิล ตัวเต็มวัยหลายประเภทที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณ 60 กิโลเกรย์ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีด้วยเทคนิค *in vitro* digestibility โดยใช้เอนไซม์จากลำไส้ ทดลองย่อยวัตถุดิบอาหาร พบว่าการฉายรังสีในวัตถุดิบอาหารมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนดีขึ้นกว่าวัตถุดิบอาหารที่ไม่ผ่านการฉายรังสี โดยเฉพาะวัตถุดิบอาหารที่เป็นแหล่งโปรตีนได้จากสัตว์และพืช เช่น ปลาป่นและกากถั่วเหลือง รวมทั้งวัตถุดิบอาหารที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตได้จากพืชทั้งหมด และสามารถนำวัตถุดิบเหล่านี้มาผลิตสูตรอาหารสำหรับใช้เลี้ยงปลานิล ซึ่งการศึกษาดังกล่าวมีประสิทธิภาพการย่อยอาหารและกิจกรรมของเอนไซม์สามารถใช้ในการประเมินคุณภาพและโภชนะของอาหารสัตว์ (Lemieux *et al.*, 1999; Rungruangsak *et al.*, 2002; Balal, 2005; Rungruangsak, 2007) และความสามารถในการย่อยอาหารของเอนไซม์โปรติเอสที่สกัดจากระบบทางเดินอาหารของปลาแอตแลนติกแซลมอน *Salmo salar* L. สามารถใช้เป็นดัชนีวัดคุณภาพอาหารและการเจริญเติบโตของปลาได้ โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินต่อไคโมทริปซิน เป็นต้น (Rungruangsak *et al.*, 1998, Rungruangsak and male 2000; Sunde *et al.*, 2001)

ดังนั้น งานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลของรังสีแกมมาที่มีต่อองค์ประกอบทางโภชนาในเมล็ดสบู่ดำ และศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำโดยวิธี *in vitro* ด้วยวิธีการหาปริมาณแอลฟา-อะมิโนด้วย 2, 4, 6-Trinitrobenzene-1-sulfonic acid (TNBS) ซึ่งเป็นการหาปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ โดยใช้แอล-อะลานีนเป็นสารมาตรฐาน และนำความสามารถในการย่อยโปรตีนด้วยเทคนิคดังกล่าวเปรียบเทียบกับผลของรังสีแกมมาต่อกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินจากการทดลองของ สรายุทธ (2551) ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้อาจใช้เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีน เพื่อช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกากเมล็ดสบู่ดำและสนับสนุนให้มีการใช้ประโยชน์จากสบู่ดำอย่างครบวงจร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องฉายรังสีแกมมาต้นกำเนิดโคบอลต์-60 ของบริษัทไอโซตรอน (ประเทศไทย)
จำกัด
2. เครื่องชั่งละเอียด
3. ตู้อบ
4. เตาเผา
5. เครื่องแก้วและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ได้แก่ หลอด
ย่อยโปรตีน filter glass crucible, crucible, thimble, soxhlet extraction chamber และ โถดูดความชื้น
6. เครื่องสกัดไขมัน พร้อมอุปกรณ์ในการสกัดไขมัน เช่น soxhlet tube, extraction flask
7. เครื่องย่อยและกลั่นโปรตีน
8. เครื่องหีบน้ำมันแบบเกลียวอัด (screw press)
9. เครื่องบดตัวอย่าง
10. เครื่องทำให้แห้งด้วยการแช่เยือกแข็ง (freeze dry)
11. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
12. อ่างน้ำเย็น

13. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง

14. เครื่องกวนสารละลายแบบ vortex

15. Autopipet ขนาด 10-1000 ไมโครลิตร

16. นาฬิกาจับเวลา

17. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)

18. สารเคมีที่ใช้ในการหาค่าประกอบพื้นฐานทางเคมี

18.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน

- Petroleum ether

18.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน

- Catalyst mixture (ประกอบด้วย K_2SO_4 และ $CuSO_4$)

- Conc. H_2SO_4

- 25% NaOH

- 0.1 N H_2SO_4

- Mix indicator (ประกอบด้วย Methyl red และ 95% Ethyl alcohol)

- Boric acid

18.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณเยื่อใย

- 1.25% H_2SO_4

- 1.25% NaOH

19. เอนไซม์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยโปรตีน Multienzyme solution ประกอบด้วยเอนไซม์จากบริษัท Sigma Chemical 3 ชนิด คือ

- Porcine pancreatic trypsin (Type IX), 14190 BAEE Unites per mg protein
- Bovine pancreatic chymotrypsin (Type II), 60 units per mg powder
- Porcine intestinal peptidase (Grade III), 40 units per g powder

20. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยโปรตีน

- 50 mM phosphate buffer pH 8
- 0.2 M phosphate buffer pH 8
- Chloramphenical
- TNBS (Trinitrobenzene sulphonic acid)
- 1 M HCl
- BAPNA (N- α -benzoyl-DL-arginine-*p*-nitroanilide)
- SAPNA (succinyl ((Ala)₂-pro-Phe-*p*-nitroanilide)
- Dimethyl sulfoxide (DMSO)
- L-Alanine
- *p*-nitroaniline
- Acetic acid

วิธีการ

การเตรียมตัวอย่างเมล็ดสับด้า

ตัวอย่างเมล็ดสับด้าที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 5 สายพันธุ์ ซึ่งได้จากการพัฒนาและวิจัยโดยศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ สถาบันอินทรีย์จันทรสถิตย์เพื่อการค้นคว้าและพัฒนาพืชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นำไปฉายรังสีแกมมาแบบเฉียบพลันที่ปริมาณรังสีตั้งแต่ 0 (กลุ่มควบคุม), 10, 20, 30, 60 และ 100 กิโลเกรย์ ด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ของบริษัท ไอโซตรอน (ประเทศไทย) จำกัด ดังนี้

1. KU BP-16
2. KU BP-20
3. KU BP-27
4. KU BP 78-9
5. KU BP 80-3

แบ่งตัวอย่างเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มแรก นำเมล็ดสับดูดำที่ปริมาณรังสี 0, 60 และ 100 กิโลเกรย์ วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดสับดูดำโดยวิธี proximate analysis ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เยื่อใย เถ้า และโปรตีน

กลุ่มที่สอง นำเมล็ดสับดูดำที่ปริมาณรังสี 0, 10, 20, 30, 60 และ 100 กิโลเกรย์ มาผ่านขบวนการหีบน้ำมันด้วยเครื่องหีบน้ำมันแบบเกลียวอัด (screw press) ที่สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรมกรมวิชาการเกษตร นำกากเมล็ดสับดูดำมาบดด้วยเครื่องบดตัวอย่าง เก็บในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำ

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดสับดูดำ

วิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการในเมล็ดสับดูดำได้แก่ ความชื้น ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเยื่อใย โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) โดยนำเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0, 60 และ 100 กิโลเกรย์ มาศึกษาองค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี ตามวิธีของ AOAC (2000) ดังนี้

การวิเคราะห์ความชื้น AOAC (2000)

1. หาน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยหาความชื้น โดยนำถ้วยหาความชื้นที่สะอาดเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น 30 นาที จดบันทึกน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในถ้วยหาความชื้น

3. นำถ้วยหาความชื้นเข้าอบในตู้อบ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 4-6 ชั่วโมง
4. นำถ้วยหาความชื้นพร้อมตัวอย่างออกจากตู้อบทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้นชั่งและบันทึกน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{W + X - Y}{W} \times 100$$

โดย W คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

X คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้น (กรัม)

Y คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้นและตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

การวิเคราะห์ไขมัน AOAC (2000)

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ลงในกระดาศกรอง (ห่อกระดาศกรองให้แน่นเพื่อไม่ให้ตัวอย่างหลุดออกมาในขณะที่ทำการสกัดไขมัน) นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 4-5 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น หลังจากนั้นนำมาชั่งและจดบันทึกน้ำหนัก
2. นำห่อตัวอย่างใส่ใน soxhlet tube แล้วต่อกับ condenser และ extraction flask
3. เติม Petroleum ether 50 มิลลิลิตร
4. นำเข้าเครื่องสกัดไขมัน หลังจากสกัดเสร็จ นำห่อตัวอย่างออกจาก soxhlet tube แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
5. ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น ชั่งและจดบันทึกน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไขมัน} = \frac{(X - Y)}{W} \times 100$$

โดย W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังอบนาน 4-5 ชั่วโมง)

Y คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังสกัดไขมัน)

การวิเคราะห์เยื่อใย AOAC (2000)

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการสกัดไขมันแล้วประมาณ 1 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 60 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำละลายกรดซัลฟริกความเข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ นำไปต้มให้เดือดนาน 30 นาที ล้างกรดด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มแล้ว
3. เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.25 เปอร์เซ็นต์ ต้มให้เดือดนาน 30 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการล้างแล้วใส่ใน Filter glass crucible แล้วล้างด้วยแอลกอฮอล์อีกครั้ง
4. อบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 6-8 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วจดบันทึกน้ำหนัก
5. นำตัวอย่างไปเผาเพื่อไล่ควันในตู้ดูดควันด้วยไฟอ่อนจนควันหมดจากตัวอย่าง
6. นำตัวอย่างที่ผ่านการเผาไล่ควันแล้วเข้าไปเผาในตู้เผาอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เชื้อใย} = \frac{(X - Y)}{W} \times 100$$

โดย W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างหลังต้มและอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Y คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์เถ้า AOAC (2000)

1. หาน้ำหนักที่แน่นอนของ crucible โดยล้างด้วยเผาให้สะอาดและนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและจดบันทึกน้ำหนัก
2. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ใส่ใน crucible บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
3. นำไปเผาในตู้อบด้วยไฟอ่อนจนหมดควันแล้วนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง
4. นำออกจากเตาเผาแล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งและจดบันทึกน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์เถ้า} = \frac{B - A}{W} \times 100$$

โดย A คือ น้ำหนักถ้วย crucible เป่า

B คือ น้ำหนักถ้วย crucible และตัวอย่างหลังเผา

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

การวิเคราะห์โปรตีน AOAC (2000)

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัมลงในหลอดย่อยโปรตีน เติม Catalyst mixture 8 กรัม แล้วเติม conc. H_2SO_4 ปริมาตร 12 มิลลิลิตร นำเข้าป้อนย่อยโปรตีนนาน 45 นาที จนตัวอย่างมีสีฟ้าใส

2. ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3. เติมกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร หยด Mix indicator 8 หยด ลงใน flask ขนาด 250 มิลลิลิตร

4. นำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยแล้ว ในข้อที่ 3 มากั่นด้วยเครื่องกลั่นระบบอัตโนมัติ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์ 50 มิลลิลิตร นาน 4 นาที

5. นำตัวอย่างที่ผ่านการกลั่น มาไตเตรทด้วย 0.1 N Std. H_2SO_4 คำนวณหาปริมาณโปรตีน

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน (\%N)} = \frac{(V_2 - V_1) \times N \times 1.4}{W}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์โปรตีน} = \%N \times 6.25$$

โดย N คือ ความเข้มข้นของ Std. $H_2SO_4 = 0.1 N$

V_1 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรท blank

V_2 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส

ศึกษากิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสได้แก่ เอนไซม์ทริปซินโดยใช้ BAPNA ตามวิธีการของ Rungruangsak *et al.* (2006)

1. การเตรียม multienzyme (Hsu *et al.*, 1977)

ละลายเอนไซม์ย่อยโปรตีนแต่ละชนิดใน 50 mM phosphate buffer pH 8 โดยให้ความเข้มข้นของ trypsin, chymotrypsin และ peptidase เท่ากับ 1.6, 3.1 และ 1.3 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ

2. การเตรียมกราฟมาตรฐาน *p*-nitroaniline (Sunde *et al.*, 2001)

เตรียมสารละลายมาตรฐาน *p*-nitroaniline ความเข้มข้น 0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร ที่มีสารละลาย 5% DMSO ผสมกับสารละลาย 0.2 M phosphate buffer pH 8 ทำการเจือจางให้มีความเข้มข้น 0.03-0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐาน *p*-nitroaniline ความเข้มข้น 0.03-0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.7 มิลลิลิตร เติม 30% acetic acid ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่า A_{410} บนแกน Y และความเข้มข้นของ *p*-nitroaniline (ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร) บนแกน X และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ *p*-nitroaniline

3. วิธีวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน

เตรียมสารละลายซับสเตรท คือ สารละลาย BAPNA ความเข้มข้น 1.25 mM ที่มี 5% DMSO ละลายใน 0.2 M phosphate buffer pH 8 ผสม multienzyme ปริมาตร 100 ไมโครลิตร กับ ซับสเตรทปริมาตร 0.7 มิลลิลิตรให้เข้ากัน นำไป incubate ที่ 37 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที เติม 30% acetic acid ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ *p*-nitroaniline จากนั้นคำนวณกิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินใน หน่วย $\mu\text{mol } p\text{-nitroaniline produced per hour}$ จากสมการที่ 3

$$\text{กิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน} = \frac{A_{410} \times \text{dilution factor (DF)}}{X} \quad \dots (3)$$

โดย X คือ ค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *p*-nitroaniline

ศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำ

การศึกษาศักยภาพในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำทำตามวิธีของ Rungruangsak *et al.* (2002) และ Hsu *et al.* (1977) โดยใช้ multienzyme technique ซึ่งมีเอนไซม์ย่อยโปรตีน 3 ชนิด คือ trypsin, chymotrypsin และ peptidase

1. การเตรียมตัวอย่าง (Rungruangsak *et al.*, 2002)

นำตัวอย่างเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการฉายรังสีและหีบน้ำมันมาบดละเอียดแล้วนำไป ทำแห้งด้วยเครื่อง freeze dry นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปไว้ในโถดูดความชื้น นำเมล็ดสบู่ดำที่ได้มา ชั่งน้ำหนัก 20 มิลลิกรัม จดบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติม 50 mM phosphate buffer pH 8 ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixture เติม 0.5% chloramphenical ปริมาตร 200 ไมโครลิตร นำไป incubate ใน shaking incubator ที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่าง 500 ไมโครลิตรเป็นตัวอย่างควบคุม (control) นำไปต้มในน้ำเดือด 10 นาทีแล้วนำไปแช่แข็งที่ -80 องศาเซลเซียส ตัวอย่างที่หลีกเลี่ยงการเก็บไว้เป็นตัวอย่างควบคุมจะเติม multienzyme

ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixture นำไป incubate ที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่าง 1000 ไมโครลิตร นำไปต้มในน้ำเดือดและแช่แข็งทันทีที่ -80 องศาเซลเซียส

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine (Rungruangsak *et al.*, 2002)

เตรียมสารละลายมาตรฐาน *L*-Alanine ความเข้มข้น 3.0 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร ผสมกับสารละลาย 50 mM phosphate buffer pH 8 แล้วทำการเจือจางให้มีความเข้มข้น 0.3-3.0 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐาน *L*-Alanine ความเข้มข้น 0.3-3.0 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เติม 50 mM phosphate buffer pH 8 และ 0.1 % TNBS ปริมาตร 2 และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน นำไป incubate ในที่มืด อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที หลังจากนั้นเติม 1 M HCl แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่า A_{410} บนแกน Y และความเข้มข้นของ *L*-Alanine (ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร) บนแกน X

3. การศึกษาการย่อยโปรตีน

ศึกษาการย่อยโปรตีนในตัวอย่าง (หาปริมาณหมู่อะมิโนอิสระ (Free Amino Group) โดยวิธี TNBS (Trinitrobenzene sulphonic acid) ตามวิธีของ Rungruangsak *et al.* (2002) ดังนี้

นำตัวอย่างที่ต้องการศึกษาและกลุ่มควบคุม ที่ละลายแล้วปริมาตร 200 ไมโครลิตร เติม 50 mM phosphate buffer pH 8 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 0.1 % TNBS ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไป incubate ในที่มืด อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เติม 1 M HCl ปลอຍให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตร โดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine จากนั้นคำนวณค่า *in vitro* digestibility ของโปรตีนในหน่วย $\mu\text{mol L-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity}$ จากสมการที่ 4

$$in vitro \text{ digestibility} = \frac{A_{420}}{Y} \times \frac{8,000}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}} \quad \dots\dots (4)$$

โดย Y คือ ค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine

4. ศึกษาผลของรังสีปริมาณดูดกลืนต่อความสามารถในการย่อยโปรตีน

คำนวณค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ โดยแสดงค่า *in vitro* digestibility ของโปรตีนในหน่วยของ $\mu\text{mol } L\text{-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity}$ จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีดูดกลืนกับค่า *in vitro* digestibility เพื่อศึกษาแนวโน้มของปริมาณรังสีที่เหมาะสมต่อความสามารถในการย่อยโปรตีน

การเปรียบเทียบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนกับกิจกรรมสารยับยั้งทริปซิน

นำข้อมูลผลของรังสีแกมมาที่ปริมาณตั้งแต่ 0, 10, 20, 30 และ 60 กิโลเกรย์ ที่มีต่อกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในกากเมล็ดสับดูดำสายพันธุ์ KU BP-16 และ 20 ที่ได้จากการทดลองของศรายุทธ (2550) มาเปรียบเทียบกับผลของรังสีแกมมาที่มีต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำสายพันธุ์ KU BP-16 และ 20

การวิเคราะห์ข้อมูล

การทดลองจะใช้ตัวอย่างของเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ฉายรังสีปริมาณตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 60 และ 100 กิโลเกรย์ แล้วนำมาหีบน้ำมันและทำการทดลองอย่างน้อย 3 ซ้ำ ในแต่ละการทดลองนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลและวิจารณ์

ผล

การเตรียมตัวอย่างเมล็ดสับดำ

เตรียมตัวอย่างเมล็ดสับดำที่ผ่านการฉายรังสี 0 (กลุ่มควบคุมที่ไม่ฉายรังสี), 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทั้ง 5 สายพันธุ์ได้แก่ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 บดตัวอย่างทั้งเมล็ดเพื่อศึกษาองค์ประกอบทางโภชนา ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เยื่อใย และเถ้า และ สับดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีตั้งแต่ 0 (กลุ่มควบคุมที่ไม่ฉายรังสี) 10, 20, 30, 60 และ 100 กิโลเกรย์ นำมาหีบน้ำมันแบบเกลียวอัด (screw press) จากนั้นบดกากเมล็ดสับดำให้ละเอียดแล้วนำไปศึกษาการย่อยโปรตีนด้วยวิธี *In vitro* (ภาพที่ 5)



(ก) เมล็ดสับดำที่ผ่านการหีบน้ำมันแบบเกลียวอัด



(ข) กากเมล็ดสับดำที่ผ่านการบด

ภาพที่ 5 เมล็ดสับดำที่ผ่านการหีบน้ำมันแบบเกลียวอัดและกากเมล็ดสับดำที่ผ่านการบด

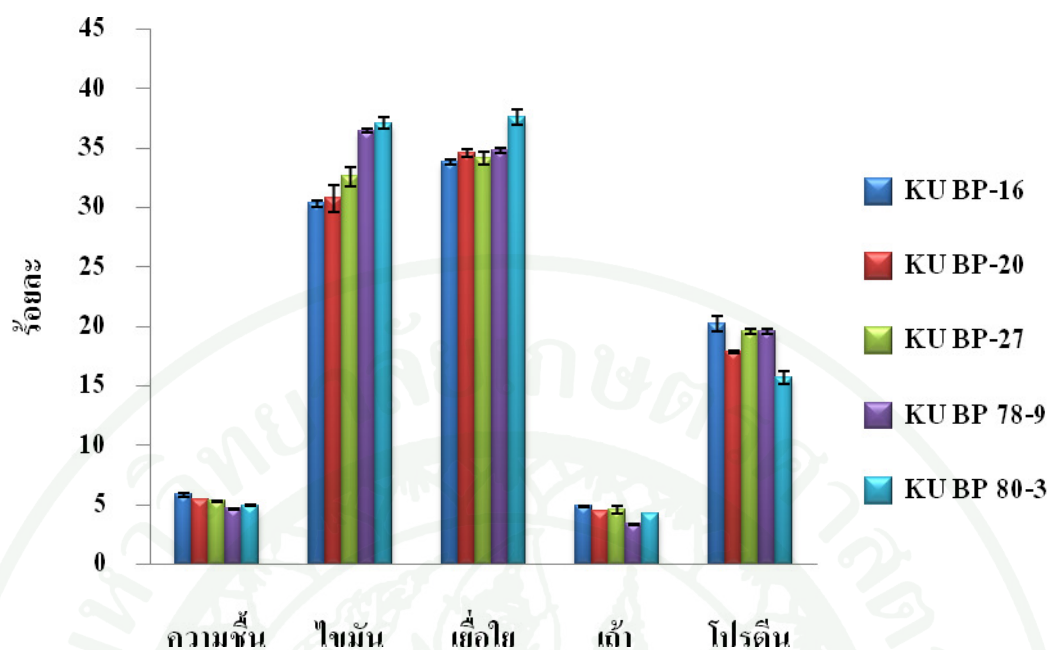
องค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสับด้า

1. องค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสับด้าที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

จากการศึกษาองค์ประกอบทางโภชนาประกอบด้วย ความชื้น ไขมัน เยื่อใย เถ้า และโปรตีนของเมล็ดสับด้าที่ไม่ผ่านการฉายรังสีหรือกลุ่มควบคุม ในเมล็ดสับด้าทั้ง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 พบว่าองค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสับด้ามีค่าร้อยละของ ความชื้น ไขมัน เยื่อใย เถ้า และโปรตีน ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 6

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางโภชนาในเมล็ดสับด้าทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

พันธุ์	ร้อยละ $\pm$ SE, n=3				
	ความชื้น	ไขมัน	เยื่อใย	เถ้า	โปรตีน
KU BP-16	5.85 $\pm$ 0.17	30.34 $\pm$ 0.24	33.83 $\pm$ 0.19	4.49 $\pm$ 0.02	20.16 $\pm$ 0.61
KU BP-20	5.48 $\pm$ 0.01	30.77 $\pm$ 1.12	34.58 $\pm$ 0.27	4.89 $\pm$ 0.03	17.89 $\pm$ 0.11
KU BP-27	5.30 $\pm$ 0.05	32.63 $\pm$ 0.82	34.18 $\pm$ 0.52	4.58 $\pm$ 0.34	19.45 $\pm$ 0.29
KU BP 78-9	4.67 $\pm$ 0.06	36.44 $\pm$ 0.15	34.80 $\pm$ 0.24	3.37 $\pm$ 0.03	19.60 $\pm$ 0.18
KU BP 80-3	4.97 $\pm$ 0.02	37.10 $\pm$ 0.51	35.66 $\pm$ 1.61	4.29 $\pm$ 0.02	15.72 $\pm$ 0.52



ภาพที่ 6 องค์ประกอบทางโภชนาการในเมล็ดสับปะรดทั้ง 5 สายพันธุ์

2. องค์ประกอบทางโภชนาการของเมล็ดสับปะรดฉายรังสี

จากการศึกษาองค์ประกอบทางโภชนาการในเมล็ดสับปะรดทั้ง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ พบว่า ปริมาณร้อยละความชื้น ไขมัน เถ้า และโปรตีน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในทุกสายพันธุ์เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ตารางที่ 2, 3, 5 และ 6) นอกจากนี้ พบว่า ปริมาณร้อยละของเยื่อใยที่ผ่านการฉายรังสี 60 และ 100 กิโลเกรย์ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ผ่านการฉายรังสี (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์
ทั้ง 5 สายพันธุ์

พันธุ์	ร้อยละความชื้น $\pm$ SE*		
	กลุ่มควบคุม	60 กิโลเกรย์	100 กิโลเกรย์
KU BP-16	5.85 $\pm$ 0.17 ^a	4.64 $\pm$ 0.25 ^b	5.16 $\pm$ 0.10 ^b
KU BP-20	5.48 $\pm$ 0.01 ^a	4.31 $\pm$ 0.04 ^c	4.80 $\pm$ 0.02 ^b
KU BP-27	5.30 $\pm$ 0.05 ^a	3.69 $\pm$ 0.10 ^b	5.13 $\pm$ 0.04 ^a
KU BP 78-9	4.67 $\pm$ 0.06 ^a	4.03 $\pm$ 0.06 ^b	4.68 $\pm$ 0.03 ^a
KU BP 80-3	4.97 $\pm$ 0.02 ^a	4.41 $\pm$ 0.09 ^b	4.62 $\pm$ 0.04 ^a

วิเคราะห์ตัวอย่างที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จำนวน 3 ซ้ำ

* ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 3 ปริมาณไขมันระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์
ทั้ง 5 สายพันธุ์

พันธุ์	ร้อยละไขมัน $\pm$ SE*		
	กลุ่มควบคุม	60 กิโลเกรย์	100 กิโลเกรย์
KU BP-16	30.34 $\pm$ 0.24 ^b	30.56 $\pm$ 0.20 ^b	33.08 $\pm$ 0.66 ^a
KU BP-20	30.77 $\pm$ 1.12 ^b	36.20 $\pm$ 0.45 ^a	35.95 $\pm$ 0.15 ^a
KU BP-27	32.63 $\pm$ 0.82 ^a	32.19 $\pm$ 1.20 ^a	33.23 $\pm$ 0.27 ^a
KU BP 78-9	36.44 $\pm$ 0.15 ^a	34.75 $\pm$ 0.27 ^a	35.99 $\pm$ 0.42 ^a
KU BP 80-3	37.10 $\pm$ 0.51 ^a	35.90 $\pm$ 0.36 ^a	37.07 $\pm$ 0.97 ^a

วิเคราะห์ตัวอย่างที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จำนวน 3 ซ้ำ

* ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 4 ปริมาณเชื้อไยระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์
ทั้ง 5 สายพันธุ์

พันธุ์	ร้อยละเชื้อไย $\pm$ SE*		
	กลุ่มควบคุม	60 กิโลเกรย์	100 กิโลเกรย์
KU BP-16	33.83 $\pm$ 0.19 ^a	30.95 $\pm$ 0.58 ^b	28.06 $\pm$ 1.17 ^c
KU BP-20	34.58 $\pm$ 0.27 ^a	30.40 $\pm$ 0.28 ^b	30.05 $\pm$ 0.03 ^b
KU BP-27	34.18 $\pm$ 0.52 ^a	31.37 $\pm$ 0.39 ^b	30.53 $\pm$ 0.67 ^b
KU BP 78-9	34.80 $\pm$ 0.24 ^a	30.77 $\pm$ 0.58 ^b	30.54 $\pm$ 0.15 ^b
KU BP 80-3	37.65 $\pm$ 0.64 ^a	33.75 $\pm$ 1.50 ^b	32.97 $\pm$ 0.18 ^b

วิเคราะห์ตัวอย่างที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จำนวน 3 ซ้ำ

* ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 5 ปริมาณเถ้าระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์
ทั้ง 5 สายพันธุ์

พันธุ์	ร้อยละเถ้า $\pm$ SE*		
	กลุ่มควบคุม	60 กิโลเกรย์	100 กิโลเกรย์
KU BP-16	4.89 $\pm$ 0.02 ^a	4.83 $\pm$ 0.04 ^a	4.82 $\pm$ 0.02 ^a
KU BP-20	4.49 $\pm$ 0.03 ^a	4.48 $\pm$ 0.02 ^a	4.57 $\pm$ 0.01 ^a
KU BP-27	4.58 $\pm$ 0.34 ^a	4.19 $\pm$ 0.02 ^a	4.46 $\pm$ 0.03 ^a
KU BP 78-9	3.37 $\pm$ 0.03 ^a	3.80 $\pm$ 0.02 ^a	3.97 $\pm$ 0.02 ^a
KU BP 80-3	4.29 $\pm$ 0.02 ^b	4.36 $\pm$ 0.01 ^{a,b}	4.46 $\pm$ 0.05 ^a

วิเคราะห์ตัวอย่างที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จำนวน 3 ซ้ำ

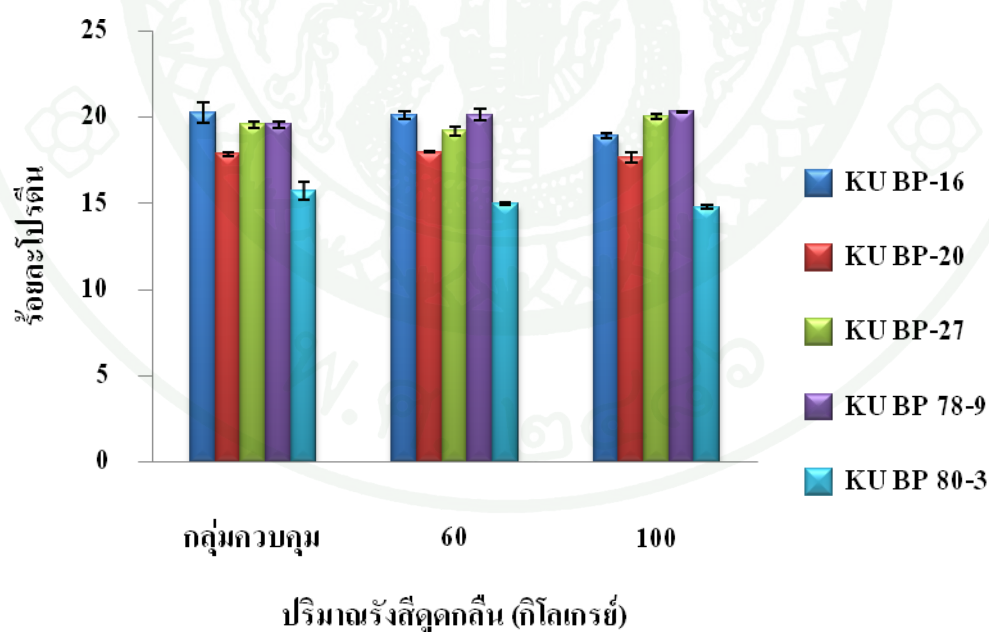
* ค่าเฉลี่ยในแถวอนเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 6 ปริมาณโปรตีนระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์
ทั้ง 5 สายพันธุ์

พันธุ์	ร้อยละโปรตีน $\pm$ SE*		
	กลุ่มควบคุม	60 กิโลเกรย์	100 กิโลเกรย์
KU BP-16	20.16 $\pm$ 0.61 ^a	20.12 $\pm$ 0.19 ^a	18.91 $\pm$ 0.15 ^a
KU BP-20	17.89 $\pm$ 0.11 ^a	17.99 $\pm$ 0.33 ^a	17.68 $\pm$ 0.26 ^a
KU BP-27	19.45 $\pm$ 0.29 ^a	18.99 $\pm$ 0.28 ^a	20.04 $\pm$ 0.14 ^a
KU BP 78-9	19.60 $\pm$ 0.18 ^a	20.16 $\pm$ 0.30 ^a	20.31 $\pm$ 0.05 ^a
KU BP 80-3	15.72 $\pm$ 0.52 ^a	14.99 $\pm$ 0.09 ^a	14.81 $\pm$ 0.13 ^a

วิเคราะห์ตัวอย่างที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จำนวน 3 ซ้ำ

* ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



ภาพที่ 7 ปริมาณโปรตีนในเมล็ดสับดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ เทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

การศึกษากิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส

1. การเตรียมกราฟมาตรฐานของ *p*-nitroaniline

จากการเตรียมกราฟมาตรฐานของ *p*-nitroaniline โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ *p*-nitroaniline ซึ่งมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.03-0.21 (ตารางที่ 7) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ *p*-nitroaniline เป็นไปตามสมการ $y = 4.224x$ ซึ่งกราฟดังกล่าวมีความชันเท่ากับ 4.224 (ภาพผนวกที่ 1)

ตารางที่ 7 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ *p*-nitroaniline ตั้งแต่ 0.03-0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร

ความเข้มข้นของ <i>p</i> -nitroaniline (ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร)	A_{410} (นาโนเมตร)
0	0.00
0.03	0.128
0.06	0.255
0.09	0.383
0.12	0.501
0.15	0.629
0.18	0.764
0.21	0.888

2. การวิเคราะห์กิจกรรมเอนไซม์ทริปซิน

จากการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน ซึ่งเป็นเอนไซม์โปรติเอสด้วยการใช้สารละลาย BAPNA เป็นสับสเตรท พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เท่ากับ 0.522 และค่า dilution factor เท่ากับ 100 เมื่อนำไปคำนวณตามสมการที่ 3 พบว่า มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ในกิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน จากการคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินใน multienzyme

A_{410} (นาโนเมตร)	ค่าความชันจากกราฟ มาตรฐานของ <i>p</i> -nitroaniline	DF*	กิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน ($\mu\text{mol } p\text{-nitroaniline produced h}^{-1}$)	เฉลี่ย
0.523	4.224	100	12.381	
0.519	4.224	100	12.286	12.35
0.523	4.224	100	12.381	

* dilution factor (DF) จากสมการที่ 3

ศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสนุ่นดำ

1. การเตรียมกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine

จากการเตรียมกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ *L*-Alanine ซึ่งมีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.3-3.0 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร (ตารางที่ 9) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ *L*-Alanine เป็นไปตามสมการ $y = 0.266x$ ซึ่งกราฟดังกล่าวมีความชันเท่ากับ 0.266 (ภาพผนวกที่ 2)

ตารางที่ 9 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ *L*-Alanine ตั้งแต่ 0.3-3 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร

ความเข้มข้นของ <i>L</i> -Alanine (ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร)	A ₄₁₀ (นาโนเมตร)
0	0
0.3	0.097
0.6	0.182
0.9	0.256
1.2	0.333
1.5	0.413
1.8	0.485
2.1	0.567
2.4	0.635
2.7	0.722
3	0.770

2. การวิเคราะห์การย่อยโปรตีน

การวิเคราะห์ความสามารถการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0, 10, 20, 30, 60 และ 100 กิโลเกรย์ ทำได้โดยนำค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตรของตัวอย่างที่ถูกย่อยด้วย multienzyme และค่าความชันของ *L*-Alanine ที่ได้จากการเตรียมกราฟมาตรฐานในข้อ 4.1 มาคำนวณหาค่าการย่อยได้ของโปรตีนจากสมการที่ 4 จะได้ค่าการย่อยโปรตีนในหน่วยของ $\mu\text{mol } L\text{-Alanine equivalent per g feed}$ จากนั้นนำค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินที่คำนวณได้จากข้อ 3.2 มาคำนวณหาค่า *In vitro* digestibility ของโปรตีนในหน่วยของ $\mu\text{mol } L\text{-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity}$ ซึ่งแสดงตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และผ่านการฉายรังสี 60 กิโลเกรย์ ในตารางที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสับดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.118	5.4	657.19	53.21
	0.124	5.2	717.17	58.07
	0.121	5.1	713.54	57.77
KU BP-20	0.088	5.3	499.36	40.43
	0.098	5.2	566.80	45.89
	0.094	5.0	565.41	45.78
KU BP-27	0.146	5.3	828.48	67.08
	0.130	5.3	737.69	59.73
	0.148	5.1	872.77	70.66
KU BP 78-9	0.145	5.3	822.81	66.62
	0.154	5.4	857.69	69.44
	0.132	5.4	735.17	59.52
KU BP 80-3	0.104	5.1	613.29	49.65
	0.087	5.1	513.04	41.54
	0.099	5.2	572.58	46.36

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266

ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol

p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

ตารางที่ 11 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสับดูดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.164	5.2	930.62	75.35
	0.165	5.3	954.30	77.27
	0.153	5.2	868.20	70.29
KU BP-20	0.119	5.4	662.76	53.66
	0.112	5.2	705.61	57.13
	0.126	5.0	757.89	61.36
KU BP-27	0.157	5.1	925.84	74.96
	0.162	5.2	936.95	75.86
	0.165	5.2	954.30	77.27
KU BP 78-9	0.180	5.0	1082.70	87.66
	0.186	5.2	1075.76	87.10
	0.183	5.0	1100.75	89.12
KU BP 80-3	0.209	5.4	1164.02	94.25
	0.192	5.4	1069.34	86.58
	0.184	5.3	1044.12	84.54

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

3. ผลของปริมาณรังสีดูดกลืนต่อความสามารถในการย่อยโปรตีน

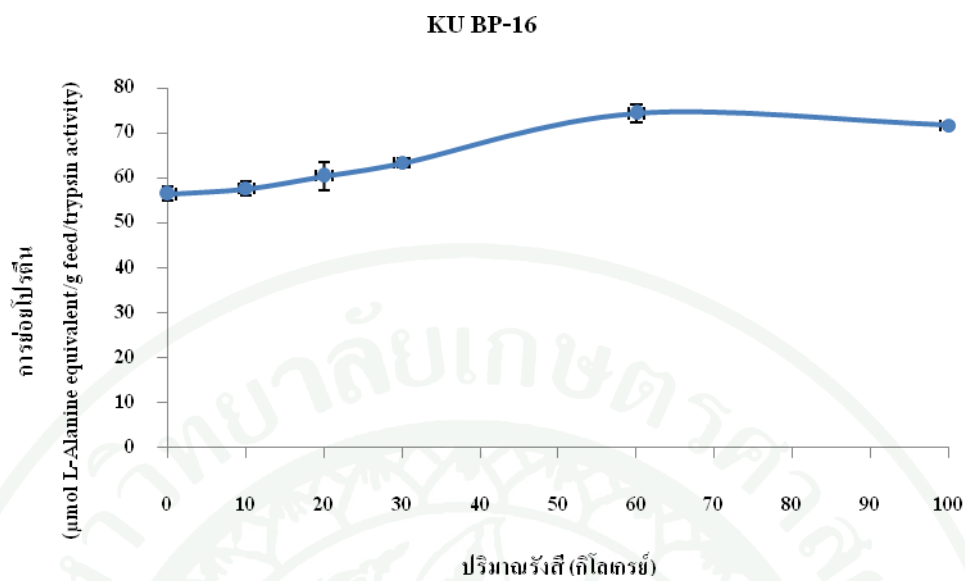
ผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ แสดงในตารางที่ 12 และความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำแต่ละสายพันธุ์แสดงในภาพที่ 6 ถึง 10 ซึ่งพบว่าความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 60 กิโลเกรย์ แต่ในกากเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการฉายรังสีต่ำกว่า 60 กิโลเกรย์ ได้แก่ ปริมาณรังสี 10, 20 และ 30 กิโลเกรย์ ในการศึกษารังสีนี้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของการย่อยโปรตีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี และพบว่า การฉายรังสีแกมมาปริมาณ 100 กิโลเกรย์ ไม่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนแต่อย่างใด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์

ตารางที่ 12 ผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์

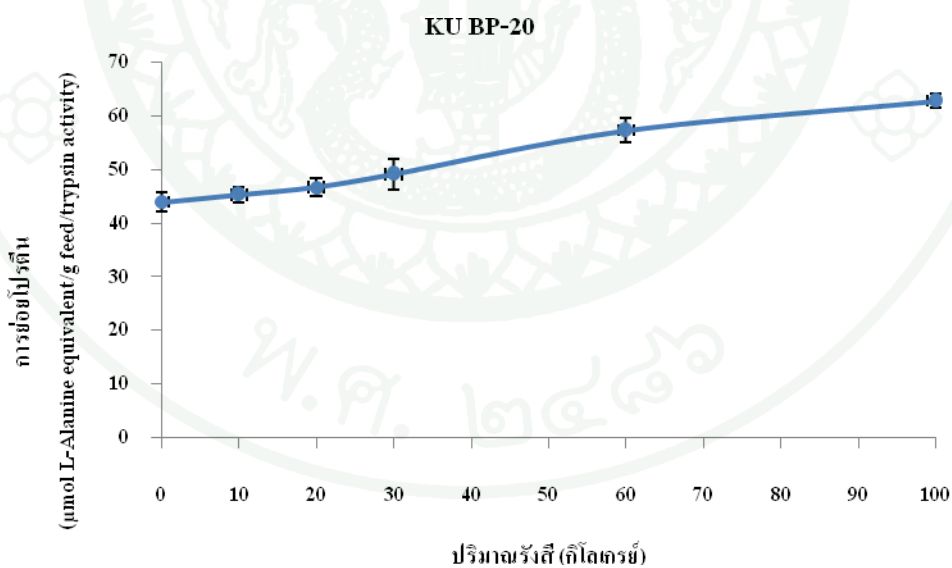
ความสามารถในการย่อยโปรตีน ($\mu\text{mol L-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity}$) $\pm$ SE*						
พันธุ์	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)					
	กลุ่มควบคุม	10	20	30	60	100
KU BP-16	56.35 $\pm$ 1.57 ^c	57.59 $\pm$ 1.56 ^{b,c}	60.40 $\pm$ 3.19 ^{b,c}	63.29 $\pm$ 0.88 ^b	74.30 $\pm$ 2.07 ^a	71.63 $\pm$ 0.71 ^a
KU BP-20	44.03 $\pm$ 1.80 ^b	45.38 $\pm$ 1.46 ^b	46.78 $\pm$ 1.74 ^b	49.20 $\pm$ 2.84 ^b	57.38 $\pm$ 2.22 ^a	62.91 $\pm$ 1.28 ^a
KU BP-27	65.82 $\pm$.62 ^b	68.90 $\pm$ 2.21 ^b	69.33 $\pm$ 1.73 ^b	69.59 $\pm$ 0.46 ^b	76.03 $\pm$ 0.54 ^a	78.11 $\pm$ 0.78 ^a
KU BP 78-9	65.20 $\pm$ 2.40 ^c	70.32 $\pm$ 1.05 ^{b,c}	70.81 $\pm$ 2.04 ^{b,c}	71.72 $\pm$ 0.90 ^b	87.96 $\pm$ 0.46 ^a	84.74 $\pm$ 0.97 ^a
KU BP 80-3	45.85 $\pm$ 2.35 ^c	45.42 $\pm$ 3.11 ^c	48.38 $\pm$ 1.27 ^{b,c}	53.98 $\pm$ 3.25 ^b	88.46 $\pm$ 2.95 ^a	87.63 $\pm$ 1.85 ^a

วิเคราะห์ตัวอย่างที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P < 0.05$) จำนวน 3 ซ้ำ

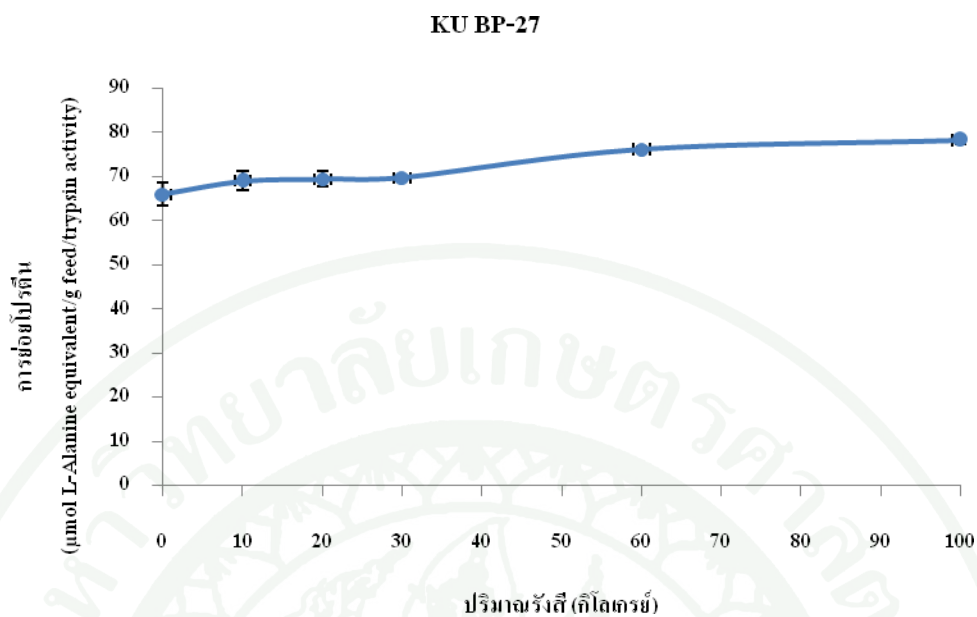
* ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันที่กำกับด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



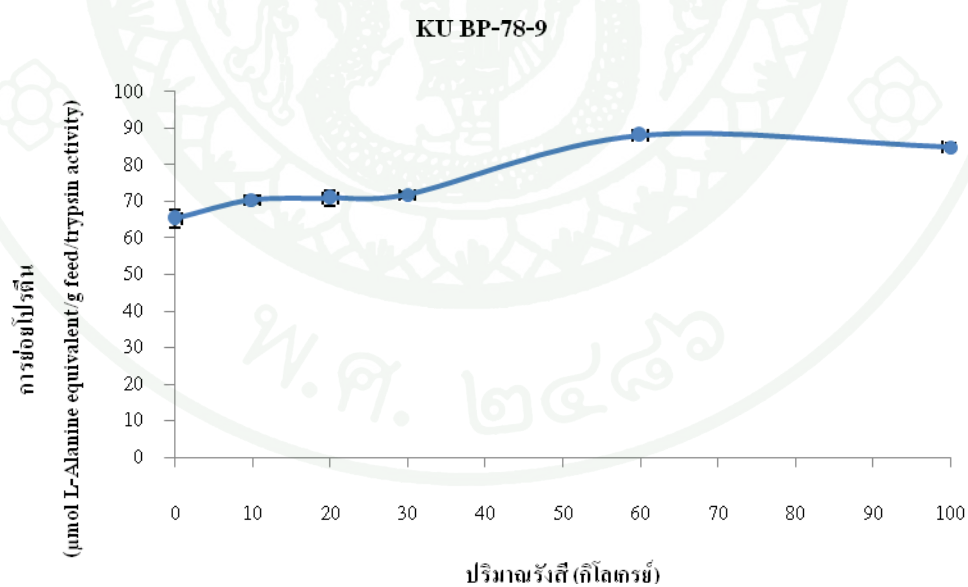
ภาพที่ 8 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดาของสายพันธุ์ KU BP-16 ที่ผ่านการฉายรังสี



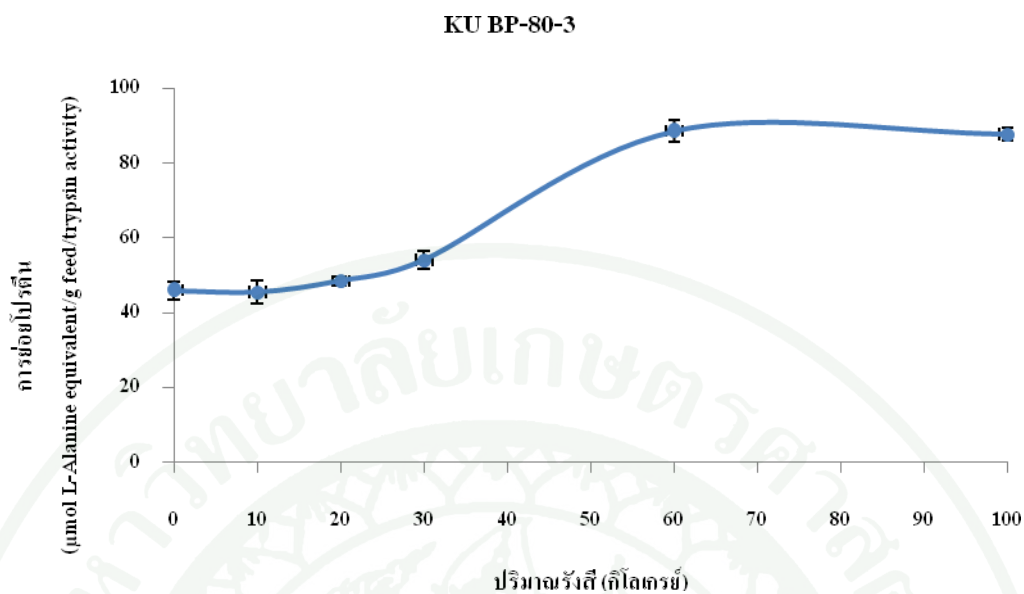
ภาพที่ 9 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดาของสายพันธุ์ KU BP-20 ที่ผ่านการฉายรังสี



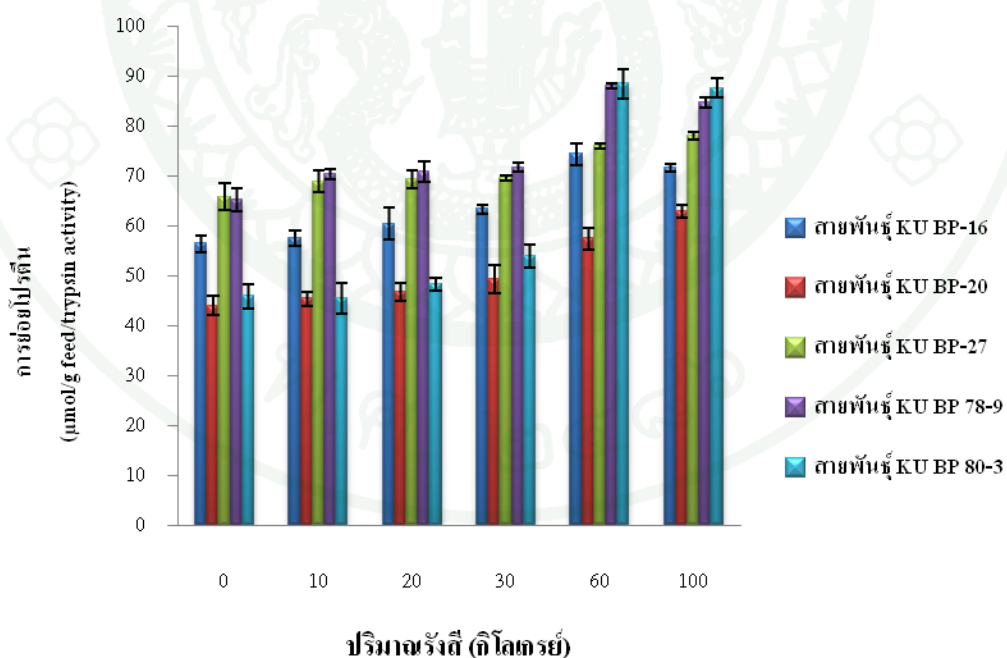
ภาพที่ 10 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำของสายพันธุ์ KU BP-27 ที่ผ่านการฉายรังสี



ภาพที่ 11 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำของสายพันธุ์ KU BP 78-9 ที่ผ่านการฉายรังสี



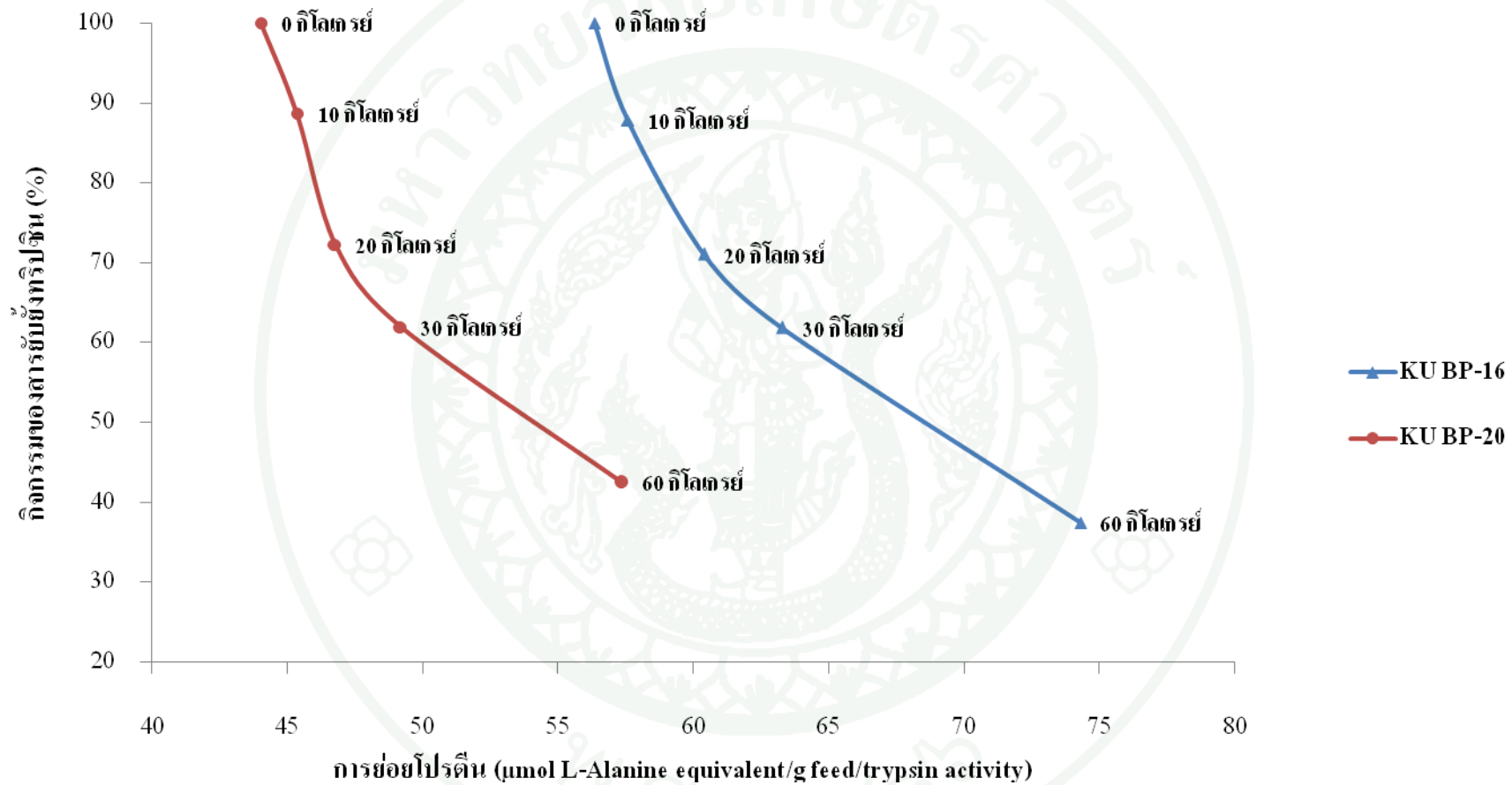
ภาพที่ 12 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำของสายพันธุ์ KU BP 80-3 ที่ผ่านการฉายรังสี



ภาพที่ 13 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ปริมาณรังสีต่างๆ

การเปรียบเทียบผลของรังสีแกมมาที่มีต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนกับกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซิน

ผลของรังสีแกมมาที่ปริมาณตั้งแต่ 0, 10, 20, 30 และ 60 กิโลเกรย์ ที่มีต่อกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในกากเมล็ดสนุ่นดำสายพันธุ์ KU BP-16 และ 20 ที่ได้จากการทดลองของ สรายุทธ (2551) พบว่ากากเมล็ดสนุ่นดำสายพันธุ์ KU BP-16 มีค่าร้อยละของกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีเท่ากับ $100, 87.80 \pm 3.40, 71.05 \pm 2.34, 61.84 \pm 2.13$ และ 37.40 ± 2.99 ตามลำดับ ส่วนสายพันธุ์ KU BP-20 มีค่าร้อยละกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินเท่ากับ $100, 88.64 \pm 2.47, 72.27 \pm 1.10, 61.92 \pm 1.21$ และ 42.48 ± 1.14 ตามลำดับ และค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนด้วยวิธี *In vitro* ในกากเมล็ดสนุ่นดำที่ฉายรังสีปริมาณ 0 (กลุ่มควบคุมไม่ผ่านการฉายรังสี) 10, 20, 30 และ 60 กิโลเกรย์ ดังตารางที่ 12 เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการย่อยโปรตีนกับกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินพบว่า ความสามารถในการย่อยโปรตีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินมีค่าลดลงตามปริมาณรังสีที่กากเมล็ดสนุ่นดำได้รับตั้งแต่ 0 (กลุ่มควบคุมไม่ผ่านการฉายรังสี) -60 กิโลเกรย์ (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการย่อยโปรตีนและกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินของกากเมล็ดสนุ่นดำสายพันธุ์ KU BP-16 และ KU BP-20 ที่ฉายรังสีปริมาณ 0-60 กิโลเกรย์

วิจารณ์

องค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสนุ่นดำ

1. องค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสนุ่นดำที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

การศึกษาองค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสนุ่นดำรวมเปลือกทั้ง 5 สายพันธุ์ มีค่าร้อยละของโปรตีนในช่วง 15.72-20.61 ซึ่งต่ำกว่าเมล็ดสนุ่นดำที่นำเปลือกออกทั้ง 5 สายพันธุ์ จากการทดลองของ ศราวุธ (2551) ร้อยละ 27.79-29.26 และจาก Quintana Roo state (ร้อยละ 27-30) ในประเทศเม็กซิโก (Makkar *et al.*, 1998) และเนื้อในเมล็ดสนุ่นดำที่มาจากแถบประเทศแอฟริกาเหนือและใต้ ประเทศแถบอเมริกากลางและเหนือ และเอเชีย (ร้อยละ 19-31) รวม 16 แหล่งพันธุ์ (Makkar *et al.*, 1997) ส่วนค่าร้อยละไขมันในเมล็ดสนุ่นดำรวมเปลือกทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ทำการศึกษา (ร้อยละ 30.34-37.10) มีค่าน้อยกว่าเมล็ดสนุ่นดำจากการทดลองของ ศราวุธ (2551) ทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย (44.83-49.67) และเนื้อในเมล็ดสนุ่นดำที่มาจากแถบประเทศแอฟริกาเหนือและใต้ ประเทศแถบอเมริกากลางและเหนือ และเอเชีย (ร้อยละ 43-59) รวม 18 แหล่งพันธุ์ (Makkar *et al.*, 1997)

นอกจากนี้ ปริมาณเยื่อใยของเมล็ดสนุ่นดำรวมเปลือกทั้ง 5 สายพันธุ์จากการศึกษาในครั้งนี้ (ร้อยละ 33.83-35.66) มีค่าสูงกว่าเนื้อในเมล็ดสนุ่นดำที่ไม่รวมเปลือกทั้ง 5 แหล่งพันธุ์ (ร้อยละ 4.70-9.30) ที่ปลูกในประเทศไทยจากการทดลองของ ศราวุธ (2551) และเนื้อในเมล็ดสนุ่นดำทั้ง 4 สายพันธุ์ไม่รวมเปลือก (ร้อยละ 2.8-3.4) จากประเทศเม็กซิโก และปริมาณเถ้าในการศึกษาครั้งนี้ (ร้อยละ 3.37-4.89) มีค่าใกล้เคียงกับเมล็ดสนุ่นดำทั้ง 4 สายพันธุ์ (ร้อยละ 3.8-5.1) จากประเทศเม็กซิโก (Martinez *et al.*, 2006) และเนื้อในเมล็ดสนุ่นดำที่มาจากแถบประเทศแอฟริกาเหนือและใต้ ประเทศแถบอเมริกากลางและเหนือ และเอเชีย (ร้อยละ 3.4-5.0) รวม 18 แหล่งพันธุ์ (Makkar *et al.*, 1997)

ความชื้นของเมล็ดสับดูดำรวมเปลือกทั้ง 5 สายพันธุ์จากการศึกษาครั้งนี้ (ร้อยละ 4.67-5.85) มีค่าสูงกว่าเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ไม่รวมเปลือกทั้ง 5 แหล่งพันธุ์ (ร้อยละ 0.57-0.83) ที่ปลูกในประเทศไทยจากการทดลองของ สรายุทธ (2551) และมีค่าใกล้เคียงกับเมล็ดสับดูดำที่ไม่รวมเปลือกทั้ง 4 สายพันธุ์ (ร้อยละ 4.7-5.5) จากประเทศเม็กซิโก (Martinez *et al.*, 2006) ทั้งนี้ปริมาณความชื้นยังขึ้นอยู่กับปริมาณของคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความยาว ความกว้าง ความหนา และมวลน้ำหนักของเมล็ดสับดูดำ 1000 เมล็ด 18.6 มิลลิเมตร 11.34 มิลลิเมตร 8.91 มิลลิเมตร และ 741.1 กรัม ตามลำดับ จะมีร้อยละของความชื้นที่ 4.75 เป็นต้น (Garnayak *et al.*, 2008)

2. องค์ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการฉายรังสี

องค์ประกอบทางโภชนา ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เถ้า และโปรตีน ในเมล็ดสับดูดำรวมเปลือกทั้ง 5 สายพันธุ์ ที่ฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ผ่านการฉายรังสีโดยเฉพาะโปรตีน ซึ่งเป็นสารอาหารที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งในการศึกษาครั้งนี้ไม่เปลี่ยนแปลง (ตารางที่ 6) เช่นเดียวกับการทดลองของ สรายุทธ (2551) ที่ศึกษาองค์ประกอบทางโภชนาของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ไม่รวมเปลือก ฉายรังสีตั้งแต่ 10, 20, 30 และ 60 กิโลเกรย์ พบว่าปริมาณโปรตีน (ร้อยละ 27.08-28.11) ยกเว้นปริมาณเยื่อใยของกลุ่มควบคุมในทุกสายพันธุ์ลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ (ตารางที่ 4) เป็นเพราะรังสีจะไปทำให้องค์ประกอบของผนังเซลล์พืชลดลง (Masri and Zarkawi, 1994) โดย lignocelluloses เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์เกิดการแตกหัก นอกจากนี้รังสียังทำให้องค์ประกอบของผนังเซลล์ (เฮมิเซลลูโลส (ADF และ NDF) และ เซลลูโลส (ADF และ ADL) เกิดปฏิกิริยา delignification, depolymerization และ deconstruction ของโครงสร้างผลึกเซลลูโลส อันเนื่องมาจากรังสี (Lowton, 1952) นอกจากนี้การฉายรังสีปริมาณ 200 กิโลเกรย์ ให้กับกากเมล็ดคั่วทำให้องค์ประกอบของผนังเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย NDF (neutral detergent fiber), ADF (acid detergent fiber) และ ADL (acid detergent lignin) ลดลงร้อยละ 5-21, 3-14 และ 6-16 ตามลำดับ (Masri and Guenther, 1999)

ผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำ

การศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 ที่ผ่านการฉายรังสี 10, 20 และ 30 กิโลเกรย์ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองในตัวอย่างข้าวฟ่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0, 10 และ 50 กิโลเกรย์ พบว่าความสามารถในการย่อยโปรตีนของข้าวฟ่างมีค่าร้อยละ 70.5, 71.0 และ 70.3 ตามลำดับ (Fombang *et al.*, 2005) นอกจากนี้ Martinez-Herrera *et al.* (2006) ศึกษาการฉายรังสีกากเมล็ดสับดูดำ จำนวน 4 สายพันธุ์จากประเทศเม็กซิโก ได้แก่ Castillo de Teayo, Pueblillo, Coatzacoalcas และ Yautepec ที่ปริมาณรังสี 10 กิโลเกรย์ พบว่า มีค่าร้อยละการย่อยได้ของโปรตีนในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 80.6-80.9, 79.6-80.4, 78.6-79.6 และ 79.6-79.5 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติจากตัวอย่างกากเมล็ดสับดูดำที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าระดับกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในเมล็ดสับดูดำยังคงมีระดับที่สูงอยู่เป็นผล ทำให้มีอัตราการย่อยได้ของโปรตีนในตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม (Martinez-Herrera *et al.*, 2006)

จากผลดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่า การนำเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการฉายรังสีแล้วมาหีบน้ำมันด้วยระบบเกลียวอัดนั้น อาจมีความร้อนเกิดขึ้นในขั้นตอนของการหีบน้ำมันทำให้มีการเชื่อมหรือรวมพันธะบางพันธะ ซึ่งอาจสามารถขัดขวางประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีนในกากเมล็ดสับดูดำอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความสามารถในการย่อยของโปรตีนที่ปริมาณรังสี 10, 20, 30 และกลุ่มควบคุมนั้นไม่แตกต่างกัน และจากการศึกษาผลของรังสีแกมมากับเมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่ความชื้นต่างกันพบว่า เมื่อฉายรังสีแกมมาให้กับเมล็ดข้าวบาร์เลย์ที่ลดความชื้นในสภาพ air dry condition คือ มีความชื้นประมาณ ร้อยละ 10-15 เมล็ด จะมีความไวต่อรังสีต่ำที่สุด แต่ถ้าความชื้นในเมล็ดสูงกว่านี้จะไปเพิ่มความไวต่อรังสี และในพืชบางชนิดแม้ว่าความชื้นในเมล็ดจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงร้อยละ 0.2-0.3 ก็จะมีผลกับความไวต่อรังสีของพืชมาก (Conger *et al.*, 1966)

นอกจากนี้ มีการศึกษาการใช้รังสีแกมมาในการย่อยโปรตีนของข้าวบาร์เลย์ที่ปริมาณ 0, 10 และ 50 กิโลเกรย์ ในสภาพที่แห้ง เปียก และเหลว พบว่า ปริมาณรังสีที่ 10 และ 50 กิโลเกรย์ ในสภาพแห้งและเปียก ซึ่งมีความชื้นประมาณร้อยละ 8-10 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนในสภาพเหลว พบว่า การย่อยโปรตีนที่ปริมาณรังสี 10 และ 50 กิโลเกรย์ มีค่าเฉลี่ย 70.2 และ 62.8 ตามลำดับ และในกลุ่มควบคุมมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 58.2 ซึ่งปริมาณรังสีที่ 10 กิโลเกรย์มีค่าการย่อยได้ของโปรตีนสูงกว่าและแตกต่างกันทางสถิติกับกลุ่มควบคุมและสูงกว่าที่ปริมาณรังสี 50 กิโลเกรย์ (Fombang *et al.*, 2005) สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่ารังสีแกมมาไม่มีผลต่อความชื้นเนื่องจากความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในตัวอย่างนั้น ไม่ได้เกิดจากรังสีแกมมา แต่อาจเกิดจากการเก็บเมล็ดในช่วงเวลาและฤดูกาลที่ต่างกันรวมไปถึงความชื้นในตัวเมล็ดเองด้วย

สำหรับการฉายรังสีให้กับเมล็ดสับดูต้าทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ปริมาณรังสี 60 และ 100 กิโลเกรย์ เพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสับดูต้าในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่า *in vitro* digestibility ของโปรตีนที่ปริมาณรังสี 60 และ 100 กิโลเกรย์ ของทุกสายพันธุ์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับปริมาณรังสี 10, 20, 30 กิโลเกรย์ และกลุ่มควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Masri (1998) ที่ได้ศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนในวัตถุดิบอาหารของไก่เนื้อที่ปริมาณรังสี 0, 10, 50, 100 และ 150 กิโลเกรย์ พบว่า ปริมาณรังสีระหว่าง 100 และ 150 กิโลเกรย์ ความสามารถในการย่อยโปรตีนไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ความสามารถในการย่อยได้ของพลังงานเพิ่มขึ้นในปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์ และการย่อยได้ของพลังงานก็ไม่มี ความแตกต่างทางสถิติสำหรับปริมาณรังสีระหว่าง 100 และ 150 กิโลเกรย์เช่นกัน นอกจากนี้การฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 50-1000 กิโลเกรย์ ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อระดับโปรตีน คุณภาพของโปรตีนและกรดอะมิโนในอาหารของหนูทดลอง (Ford, 1976) และอาหารของลูกไก่กระทาง (Masri and Zarkawi, 1996)

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับดูต้าสายพันธุ์ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 ฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์ กับกลุ่มควบคุม พบว่าสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนได้ร้อยละ 31, 30, 15, 34 และ 92 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าในสายพันธุ์ KU BP 80-3 สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนได้สูงถึงร้อยละ 92 ในขณะที่สายพันธุ์ KU BP -27 มีความสามารถในการย่อยโปรตีนเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 15 ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น กากเมล็ดสับดูต้ามีปริมาณเยื่อใยลดลงในขณะที่ฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์ และการที่มีระดับเยื่อใยต่างกันหลังจากหีบน้ำมันก็อาจส่งผลให้ค่าการย่อยได้

ของโปรตีนตลอดจนวัตถุแห้งและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้มีความแตกต่างกัน (อุทัย, 2529) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Feltwell *et al.* (1978) ที่พบว่า เมื่อระดับเยื่อใยในอาหารต่างกันมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยได้ของโภชนะ และการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงานในอาหารมีแนวโน้มที่ต่างกัน โดย Partridge (1978) อธิบายว่าเยื่อใยในอาหารมีคุณสมบัติในการจับตัวกับน้ำทำให้น้ำหนักเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ของมูลในลำไส้ใหญ่ และ Emire and Sudip (2005) ได้ศึกษาปัจจัยของสารต้านโภชนะ เช่น สารยับยั้งทริปซิน ฟูลิคแอซิด แทนนิน โอลิโกแซคคาไรด์ และราฟฟิโนส กับการย่อยโปรตีนในห้องปฏิบัติการของถั่วแฮริคอต 8 สายพันธุ์ในเอธิโอเปีย พบว่าสายพันธุ์มีอิทธิพลต่อปัจจัยของสารต้านโภชนะและการย่อยโปรตีนโดยสายพันธุ์ที่มีสารต้านโภชนะต่ำจะมีความสามารถในการย่อยโปรตีนได้สูง และการศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ด *karanja* ที่มีไขมันเหลือร้อยละ 5 และ 15 หลังจากหีบน้ำมันพบว่าตัวอย่างทั้งสองมีค่าการย่อยได้ร้อยละ 43 และ 39 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าร้อยละของไขมันที่เหลืออยู่อาจจะขัดขวางความสามารถของการย่อยได้ ทำให้ความสามารถในการย่อยได้แตกต่างกัน (Rabab and Madhurima, 1997)

นอกจากนี้ สาเหตุของการที่กากเมล็ดสบู่ดำแต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการย่อยโปรตีนแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจาก maillard reaction ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางเคมีทำให้เกิด nonenzymetic browning ซึ่งพบในอาหารทั้งในขั้นตอนระหว่างการผลิตหรือขั้นตอนการเก็บรักษา โดยที่ reduction sugar เช่น กลูโคส หรือฟรุคโตส ทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนของโปรตีน และเกิดสารประกอบ glucose-amine compound ที่มีคุณสมบัติเป็นสารสีน้ำตาลและสามารถทำให้สูญเสียกรดอะมิโนและอาจมีผลต่อการดูดซึมและการสลาย (metabolism) ของสารอาหารบางชนิด (อมรรัตน์, 2545) ทั้งนี้ ในขั้นตอนระหว่างการหีบน้ำมันอาจเกิดปรากฏการณ์ทางเคมีดังกล่าวกับกากเมล็ดสบู่ดำที่ผ่านการหีบน้ำมันได้ส่งผลให้ในขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนโดยวิธีการหาปริมาณแอลฟา-อะมิโนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ด้วย TNBS จึงมีค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนที่ต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินกับค่าความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำสายพันธุ์ KU BP-16 และ KU BP-20 พบว่า ที่ปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ มีค่าร้อยละกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินต่ำที่สุด และมีค่า *In vitro* digestibility ของโปรตีนสูงที่สุด เนื่องจากสารยับยั้งทริปซินสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ทริปซินทำให้การย่อยของโปรตีนไม่สมบูรณ์ (จารุรัตน์, 2528) ซึ่งสอดคล้องกับผลของการฉายรังสีปริมาณ 0, 1, 5, 10 และ 50 กิโลเกรย์ เพื่อศึกษาสารยับยั้งการย่อยโปรตีนและความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ด *karanja* พบว่าค่ากิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินลดลงเท่ากับ 43.50 ± 1.55 , 41.64 ± 2.65 , 30.35 ± 1.65 , 18.25 ± 1.55 และ 7.10 ± 2.87 Units/mg protein ตามลำดับ และค่าการย่อยได้ของโปรตีนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 39.0 ± 0.85 , 41.33 ± 1.28 , 48.50 ± 1.35 , 50.60 ± 2.65 และ 58.33 ± 1.44 g/100g protein ตามลำดับ (Rabab and Madhurima, 1997)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของเมล็ดสบู่ดำ รวมถึงความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำทั้งก่อนและหลังฉายรังสีสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. รังสีแกมมาที่ปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ ไม่มีผลต่อองค์ประกอบทางโภชนาการ ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เถ้า และโปรตีนของเมล็ดสบู่ดำสายพันธุ์ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 แต่มีผลทำให้ปริมาณเชื้อราลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. รังสีแกมมาปริมาณ 60 และ 100 กิโลเกรย์ สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำให้สูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตาม ปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์ ไม่สามารถเพิ่มการย่อยโปรตีนให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ ดังนั้นปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์ จึงเป็นปริมาณรังสีที่เหมาะสมต่อการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำ
3. การฉายรังสีแกมมาให้กับเมล็ดสบู่ดำสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนให้สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินที่ลดลง ดังนั้นการฉายรังสีแกมมาจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ปรับปรุงคุณภาพของกากเมล็ดสบู่ดำ เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งโปรตีนสำหรับอาหารสัตว์ได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ KU BP-16, KU BP-20, KU BP-27, KU BP 78-9 และ KU BP 80-3 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ทำการทดลองปรับปรุงจนได้สายพันธุ์ดังกล่าว โดยการศึกษาในครั้งนี้เป็นการนำเอาเมล็ดสบู่ดำที่ฉายรังสีแกมมาแล้วมาหีบน้ำมัน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจากการหีบอาจจะส่งผลต่อความสามารถในการย่อยโปรตีน ทำให้ปริมาณรังสีต่ำ ได้แก่ 10, 20 และ 30 กิโลเกรย์ ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนให้สูงขึ้นได้ ดังนั้นควรทำการศึกษาเปรียบเทียบผลกับตัวอย่างกากเมล็ดสบู่ดำที่ฉายรังสีภายหลังจากการหีบน้ำมันแล้ว
2. เนื่องจากเมล็ดสบู่ดำประกอบด้วยสารพิษและสารต้านโภชนาอื่นๆ นอกเหนือจากสารยับยั้งทริปซิน เช่น ซาโปนิน ไฟเตท และเลคติน ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อสารเหล่านั้นด้วย
3. การศึกษาความสามารถในการย่อยโปรตีนของกากเมล็ดสบู่ดำในครั้งนี้ใช้เอนไซม์ที่สังเคราะห์ขึ้น ไม่ได้ใช้เอนไซม์ที่สกัดจากตัวสัตว์เอง จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเอนไซม์ที่สกัดจากตัวสัตว์ด้วย เนื่องจากในตัวสัตว์มีเอนไซม์ย่อยอาหารในกลุ่ม อะไมเลส และไลเปส นอกเหนือจากกลุ่มโปรติเอสที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เพื่อใช้ทำนายผลที่จะปรากฏขึ้นในขั้นตอนของการศึกษาในตัวสัตว์ต่อไป
4. ในการนำกากเมล็ดสบู่ดำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ ควรมีการศึกษาวิธีการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนด้วยการฉายรังสีแกมมาร่วมกับวิธีอื่นด้วย เช่น การใช้ความร้อน และการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมี เพื่อหาวิธีการเพิ่มความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำให้สูงขึ้น ขณะเดียวกันก็สามารถลดความเป็นพิษในกากเมล็ดสบู่ดำลงได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน ซึ่งอาจทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณรังสีแกมมาที่สูงถึง 60 กิโลเกรย์ และช่วยลดต้นทุนการฉายรังสีลงได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548. **สบูดำ**. กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตร ส่วนส่งเสริมและเผยแพร่, กรุงเทพฯ.

จารุรัตน์ เศรษฐภักดี. 2528. **อาหารสัตว์เศรษฐกิจ**. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

พจน์ ศรีบุญชัย, โสพิศ วงศ์คำ, พชร บุญศิริ และ ประสงค์ คณานุวัฒน์ชัยเดช. 2540. **ตำราชีวเคมี**. ภาควิชาเคมี คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น

ปราณี อ่านเปรื่อง. 2547. **เอนไซม์ทางอาหาร**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ศรายุทธ ขัดคำ. 2551. **ผลของรังสีแกมมาต่อกิจกรรมของสารยับยั้งทริปซินในเมล็ดสบูดำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อมรรัตน์ จงสวัสดิ์วรกุล. 2545. Evidence-based Maillard reaction: focusing on parenteral nutrition. **วารสารโภชนาบำบัด** 13(1): 2-4.

อุทัย คั่นโ. 2529. **อาหารและการผลิตอาหารเลี้ยงดูและสัตว์ปีก**. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Abdel Gadir, W.S., T.O. Onsa, W.E.M. Ali, S.M.A. El Badwi and S.E.I. Adam. 2003. Comparative toxicity of *Croton macrostachys*, *Jatropha curcas* and *Piper abyssinica* seeds in Nubian goats. **Small Rumin. Res.** 48: 61-67.

Aderibrigde, A.O., C.O.L.E. Johnson., H.P.S. Makkar., K. Becker and N. Foidl. 1997. Chemical composition and effect of heat on organic matter- and nitrogen-degradability and some antinutritional components of *Jatropha* meal. **Anim. Feed Sci. Technol.** 67: 223-243.

- Adeyeye, E. I. 1996. The effect of heat treatment on the in-vitro multienzyme digestibility of protein of six varieties of African yam bean (*Sphenostylis stenocarpa*) flour. **Food Chem.** 97: 509-512.
- Adler-Nissen, J. 1979. Determination of the degree of hydrolysis of food protein by Trinitrobenzenesulfonic acid. **J. Agric. Food Chem.** 27(6): 1256-1262.
- Adolf, W., Opferkuch, J. and Hecker, E. 1984. Irritant phorbol derivatives from four *Jatropha* species. **Phytochemistry** 23(1): 129-132.
- Akintayo, E.T. 2004. Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. **Bioresour. Technol.** 92: 307-310.
- AOAC. 2000. **Official method of analysis**. 16th. Association of official analytical chemists, Washington DC., USA.
- Aregheore, E.M., Becker, K and H.P.S. Makkar. 2003. Detoxification of a toxic variety of *Jatropha curcas* using heat and chemical treatments and preliminary nutritional evaluation with rats. **S.Pac.J.Nat.Sci.** 21: 50-56
- Belal, I.E. 2005. A review of some fish nutrition methodologies. **Biores. Technol.** 96: 395-402.
- Bodwel, C.E. Satterlee, L.D. and Hakler, L.R. 1980. Protein Digestibility by Human and Rat Assays and by In Vitro Enzymic Digestion Methods. **Am. J. Clin. Nutr.** 33: 677-686.
- Casarett A.P. 1968. **Radiation Biology**. Prentice-Hall, New Jersey.
- Clarke, E. and J. Wiseman. 2005. Effect of variability in trypsin inhibitor content of soya bean meals on true and apparent ileal digestibility of amino acids and pancreas size in broiler Chicks. **Anim. Feed Sci. Technol.** 121:125-138.

- Chivandi, E., J.S. Read and S.M. Makuza. 2004. Effect of Processing Method on Phorbol Esters Concentration, Total Phenolics, Trypsin Inhibitor Activity and the Proximate Composition of the Zimbabwean *Jatropha curcas* Provenance: A Potential Live Stock Feed. **Pak. J. Biol. Sci.** 7(6): 1001-1005
- Conger, BV., R.A. Nilan, C.F. Kanzak and S. Metler. 1996. The influence of seed water content on the oxygen effect in irradiated barley seeds. **Radiation Botany** 6: 129-144.
- Dianika, L, W. Mulderb and J. Sandersa. 2010. Improving *Jatropha curcas* seed protein recovery by using counter current multistage extraction. **J. Biochem Eng.**
- Duffus, C.M. and J.H. Duffus. 1991. In: D'Mello, F.J.P., Duffus, C.M., Duffus, J.H. (Eds.), Toxic Substances in Crop Plants. The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, **Science Park**, Cambridge CB4 4WF, Cambridge, pp. 1-21.
- Emire, A.S. and S.K. Rakshit. 2005. Antinutritional factors and *in vitro* protein digestibility of improved haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties grown in Ethiopia. **Int J Food Sci Nutr.** 56: 377-387.
- Fenwick, G.R., K.R. Price, C. Tsukamoto and K. Okubo. 1991. Saponins. In: D'Mello, F.J.P., Duffus, C.M., Duffus, J.H. (Eds.), Toxic Substances in Crop Plants. The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, **Science Park**, Cambridge CB4 4WF, Cambridge, pp. 285-327.
- Feltwell , R. and S. Fox. 1978. **Practical poultry feeding.** Fiber and fiber, London & Boston.
- Fifield, C.C., C. Golumbia and J.L. Pearson. 1967. Effect of radiation on the biochemical Storage on alpha-glucosidase by *Adhatoda vasica* Nees. **Food Chem.** 108: 965-972.

- Fombang E.N., J.R.N. Taylor, C.M.F. Mbofung and A. Minnaar A. 2005. Use of gamma irradiation to alleviate the poor protein digestibility of sorghum porridge. **Food Chem.** 91: 695-703.
- Ford, D.J. 1976. The effect of methods of sterilization on the nutritive value of protein in commercial rat diet. **Brit. J. Nutr.** 35: 267.
- Ganayak, D.K., R.C. Pradhan, S.N. Naik and N. Bhatnagar. 2008. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). **Indus. Crop. Prod.** 27: 123-129.
- Gordon, M.D. 2008. **Animal nutrition science**. Cambridge University, Cambridge.
- Grant, G. 1991. Lectins. In: D'Mello, F.J.P., Duffus, C.M., Duffus, J.H. (Eds.), **Toxic Substances in Crop Plants. The Royal Society of Chemistry**, Thomas Graham House, Science Park, Cambridge CB4 4WF, Cambridge, pp. 49-67.
- Gubitz, G.M., M. Mittelbach and M. Trabi. 1999. Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. **Bioresource Technology**. 67: 73-82.
- Hall, E.J., D. Phil., D.Sc. and F.A.C.R. 1994. **Radiation for the radiologist**. 4th ed. J.B. Lippincott Company, Philadelphia.
- Hania F.G. and El-Niely. 2007. Effect of radiation processing on antinutrients, in-vitro protein digestibility and protein efficiency ratio bioassay of legume seeds. **Radiat. Phys. Chem.** 76: 1050-1057.
- Herren, R.V. 1998. **The science of animal agriculture**. 2nd ed. Deimar, New York.
- Hickman, J.R., D.L.A. Mclean and F.J. Ley. 1964. Rat feeding studies on wheat treated with Gamma irradiation 1 Reproduction. **Food Cos. Toxicol.** 2: 15-20.

- Hoyle, T.N. and H.J. Merritt. 1994. Quality of fish protein hydrolysates from herring (*Clupea Hurengus*). **J. Food Sci.** 59: 76-79.
- Hsu, H.W., D.L. Vavak, L.D. Satterlee and G.A. Miller. 1977. A multienzyme Technique for estimating protein digestibility. **J. Food Sci.** 42(5): 1269-1272.
- Jutamas, S., E. Arunee, K. Uthaiwan, P. Pannee and C. Kiattawee. 2009. **Development of Radiation Feed for Commercial Product of Adult Nile Tilapia, *Oreochromis Niloticus***. 35th Congress on Science and Technology of Thailand.
- Kristinsson, H.G. and B.A. Rasco. 2000. Biochemical and functional properties of Atlantic Salmon (*Salmo salar*) muscle proteins hydrolyzed with various alkaline proteases. **J Agric. Food Chem.** 48: 657-666.
- Lemieux, H., P. Blier and J.D. Dutil. 1999. Do digestive enzymes set a physiological limit on growth rate and food conversion efficiency in the Atlantic cod (*Gadus morhua*). **Fish Physiol Biochem.** 20: 293-303.
- Liberalino, A.A.A., E.A. Bambiia, T. Moraes-Santos and E.C. Viera. 1988. *Jatropha curcas* L. seeds: Chemical analysis and toxicity. **Arq. Biol. Technol.** 31: 539-550.
- Lin, J., F. Yan, L. Tang and F. Chen. 2003. Antitumor effects of curcin from seeds of *Jatropha curcas*, **Acta Pharmacol. Sin.** 24: 241-246.
- Lowton, J.E. 1952. Effect of high-energy cathode rays on cellulose. **Indust. Chem.** 44: 2848.
- Macdonal, P., R.A. Edward and J.F.D. Greenhalgh. 1988. **Animal nutrition**. 4th ed. Longman Scientific, Hong Kong.

- Martinez J., P. Siddhuraju., G. Francis., G. Davila-Ortiz. and K. Becker. 2006. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. **J Food Sci.** 96: 80-89.
- Masri-AL, M.R. 1998. Changes is contents and *in vitro* digestibility of laying-hens excreta used as feedstuffs due to drying and gamma irradiation. **Appl. Radiat Isot.** 49: 767-771.
- Masri, M.R. and K.D. Guenther. 1999. Changes in digestibility and cell-wall constituents of some agricultural by-products due to gamma irradiation and urea treatments. **Radiat. Phys. Chem.** 55: 323-329.
- Masri, M.R. and M. Zarkawi. 1994. Effects of gamma irradiation on cell-wall constituents of some agricultural residues. **Radiat. Phys. Chem.** 44: 661.
- Masri-AL, M.R. and M. Zarkawi. 1996. **Chemical changes of some nutritive components in poultry litter under the influence of gamma irradiation.** Unpublished.
- Makkar, H.P.S. 1993. **Antinutritional factors in foods for livestock.** In: Gill, M., Owen, E., Pollot, G.E., Lawrence, T.L.J. (Eds) ., Animal Production in Developing Countries. Occasional publication No.16. British Society of Animal Production, p. 69-85.
- _____ and K. Becker. 1998. **Jatropha curcas toxicity: identification of toxic principle (s), in: Toxic Plants Other Nat. Toxicants** [5th Proc. Int. Symp. Poisonous Plants]. p. 554-558.
- _____. 1999. Nutritional studies on rats and fish (carp, *Cyprinus carpio*). fed diets containing unheated and heated *Jatropha curcas* meal of a non-toxic provenance. **Plant Foods Hum. Nutr.** 53: 183-192.

- Makkar, H.P.S., K. Becker, F. Sporer and M. Wink. 1997. Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas*. **J. Arg. Food. Chem.** 45: 3152-3157.
- Mehrez, A.Z. and E.R. Ørskov. 1977. A study on the artificial fiber bag technique for determining the digestibility of feeds in the rumen. **J. Arg. Sci.** 88: 645-650.
- Odusote, O.M., A.O. Abioye and M.O. Rotib. 2002. *Jatropha curcas* seed oil Linn (Euphorbiaceae) contraceptive activity and on oral formulation. Nig. Quart. **J. Hosp. Med.** 12 (1-4): 44-47.
- Openshaw, K. 2000. A review of *Jatropha curcas*: An oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy.** 19: 1-15.
- Partridge, I.C. 1978. Studies on digestion and absorption in the intestinal of growing pigs. **Br. J. Nutri.** 39: 539-545.
- Pierce Chemical Company. 1999. **Instructions TNBS** (online). <http://www.piercenet.com/>, January 16, 2009.
- Prangtip S, P. Teerayut, A. Teerasak, K. Satit, K. Uthaiwan and E. Arunee. 2005. **Amylase and Proteinase in Freshwater Pearl Mussel, *Hyriopsis (Hyriopsis) bialatus* Simpson, 1900. II. In Vitro Algal Digestibility.** 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology.
- Rabab Rattansi and Madhurima Dikshit. 1997. Protease inhibitor and in vitro digestibility of karanja (*Pongamia glabra*) oil seed residue. A compare study of various treatments. **JAOCs.** 74: 1161-1164.

- Richardson, N.L., D.A. Higgs, R.M. Beames and J.R. McBride. 1985. Influence of dietary calcium, phosphorous, zinc and sodium phytate level on cataract incidence, growth and histopathology in juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). **J. Nutr.** 115: 553-567.
- Rungruangsak-Torrissen, K. 2007. Digestive efficiency, growth and qualities of muscle and oocyte in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed on diets with krill meal as an alternative protein source. **J. Food Biochem.** 31: 509-540.
- _____, E. Lied and M. Espe. 1998. Differences in digestion and absorption of dietary protein in Atlantic salmon (*Salmo salar*) with genetically different trypsin isozymes. **J. Fish Biol.** 45: 1087-1104.
- _____, K. and R. Male. 2000. **Trypsin isozymes: development, digestion and structure**, In **N.F. Haard and B.K. Simpson, ed.** Seafood Enzymes, Utilization and Influence on Postharvest Seafood Quality. Marcel Dekker, Inc., New York.
- _____, A. Rustad, J. Sunde, S. Eiane, H.B. Jensen, J. Opstvedt, E. Nygård, T.A. Samuelsen, H. Mundheim, U. Luzzana and G. Venturini. 2002. In vitro digestibility based on fish crude enzyme extract for prediction of feed quality in growth trials. **J. Sci. Food Agric.** 82: 644-654.
- _____, R. Moss, L.H. Anderson, A. Berg and R. Waagbo. 2006. Different Expressions of trypsin and chymotrypsin in relation to growth in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). **Fish Pphysiol. Biochem.** 19: 247-255
- Sandev, S. and I. Karaivanov. 1977. The composition and digestibility of irradiated roughage: treatment with gamma irradiation. **Tierernahr.Fuetter.** 10: 238-242.

- Siddhuraju, P., H.P.S. Makkar and K. Becker. 2002a. The effect of ionizing radiation on antinutritional factors and the nutritional value of plant materials with reference to Human and animal food. **Food Chem.** 78: 187-205.
- _____, H.P.S. Makkar and K. Becker. 2002b. effect of soaking and ionizing radiation on various antinutritional factors of seeds from different species of an unconventional legume, *Sebania* and a common legume, green gram (*Vigna radiate*). **Food Chem.** 79: 272-281
- Shimoyamada, M., S. Ikeda, R. Ootsubo and K. Watanabe. 1998. Effects of soybean saponins on chymotrypsin hydrolyses of soybean proteins. **J. Agric. Food Chem.** 46(12): 4793-4797.
- Sunde, J., G.L. Taranger and K. Rungruangsak-Torrissen. 2001. Digestive protease activities and free amino acid in white muscle as indicators for feed conversion efficiency and growth rate in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). **Fish Physiol. Biochem.** 25: 335-345.
- Thayer, D.W. 1990. Food irradiation: benefits and concerns. **Journal of food quality.** 13:147-169.
- Veljkovic, V.B., S.H. Lakicevic, O.S. Stamenkovic, Z.B. Todorovic and K.L. Lazic. 2006. Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana glauca* L.) seed oil with a high content of free fatty acids. **Fuel.** 85: 2671-2675
- Wee, K.L. and S.W. Shu. 1989. The nutritive value of boiled full-fat soybean in pelleted feed for Nile tilapia. **Aquaculture.** 81: 303-314.
- Wilhelm Haas and Martin Mittelbach. 2000. Detoxification experiments with the seed oil from *Jatropha curcas* L. **Indus. Crop. Prod.** 12: 111-118.



ผลการศึกษาคู่ประกอบทางโภชนาของเมล็ดสับดูดำ

ความชื้น

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์ความชื้นในเมล็ดสับดูดำของตัวควบคุม (Control)

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	ความชื้น (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	2.0026	12.6020	14.4874	5.85	5.85 $\pm$ 0.17
	2	2.0336	12.5690	14.4775	6.15	
	3	2.0386	12.3536	14.2788	5.56	
KU 20	1	2.0259	12.0731	13.9878	5.48	5.48 $\pm$ 0.01
	2	2.0194	12.1744	14.0835	5.46	
	3	2.0275	12.4221	14.3359	5.52	
KU 27	1	2.0508	12.4960	14.4397	5.22	5.30 $\pm$ 0.05
	2	2.0352	12.8137	14.7388	5.40	
	3	2.0702	14.3474	16.3080	5.29	
KU 78-9	1	2.0224	12.7691	14.6944	4.80	4.67 $\pm$ 0.06
	2	2.0231	13.8172	15.7467	4.62	
	3	2.0490	12.0796	14.0340	4.61	
KU 80-3	1	2.0569	13.3527	15.3080	4.93	4.97 $\pm$ 0.02
	2	2.0799	12.9548	14.9307	5.00	
	3	2.0625	12.0681	14.0275	4.99	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

X คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้น (กรัม)

Y คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้นและตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความชื้นในเมล็ดสับปะรดปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	ความชื้น (%)	เฉลี่ย (%) (mean ±S.E.)
KU 16	1	2.0317	11.8886	13.8313	4.38	4.64±0.25
	2	2.0289	14.0831	16.1715	5.15	
	3	2.0304	14.2310	16.1720	4.40	
KU 20	1	2.0820	12.8532	14.8456	4.30	4.31±0.04
	2	2.0835	14.2831	16.2782	4.24	
	3	2.0835	12.1928	14.1844	4.41	
KU 27	1	2.0290	12.4163	14.3662	3.89	3.69±0.10
	2	2.0269	12.2255	14.1808	3.53	
	3	2.0420	12.7256	14.6931	3.66	
KU 78-9	1	2.0215	12.0438	13.9813	4.06	4.03±0.06
	2	2.0361	11.7035	13.6555	4.13	
	3	2.0208	12.2176	14.1590	3.92	
KU 80-3	1	2.0387	14.3993	16.3483	4.39	4.41±0.09
	2	2.0331	14.2294	16.1690	4.59	
	3	2.0330	13.0661	15.0124	4.26	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

X คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้น (กรัม)

Y คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้นและตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความชื้นในเมล็ดสับปะรดดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	ความชื้น (%)	เฉลี่ย (%) (mean ±S.E.)
KU 16	1	2.0556	12.1917	14.1373	5.35	5.16±0.10
	2	2.0432	12.7245	14.6691	5.17	
	3	2.0604	14.3990	16.3603	4.97	
KU 20	1	2.0898	14.2299	16.2194	4.79	4.80±0.02
	2	2.0904	12.8139	14.8028	4.85	
	3	2.0885	12.4208	14.4094	4.78	
KU 27	1	2.0396	11.9485	13.8833	5.13	5.13±0.04
	2	2.0540	14.2837	16.2335	5.07	
	3	2.0789	12.2174	14.1878	5.21	
KU 78-9	1	2.0600	14.2286	16.1930	4.64	4.68±0.03
	2	2.0603	11.7031	13.6657	4.74	
	3	2.0545	12.2256	14.1843	4.66	
KU 80-3	1	2.0817	12.3363	14.3165	4.87	4.62±0.04
	2	2.0735	12.4152	14.3856	4.97	
	3	2.0775	12.8534	14.8304	4.83	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

X คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้น (กรัม)

Y คือ น้ำหนักถ้วยหาความชื้นและตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

ไขมัน

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์ไขมันในเมล็ดสบู่ดำของตัวควบคุม (Control)

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	ไขมัน (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	2.0758	2.4338	3.0648	30.39	30.34 $\pm$ 0.24
	2	2.0852	2.4395	3.0804	30.73	
	3	2.0632	2.4573	3.0742	29.90	
KU 20	1	2.0886	2.4259	3.0727	30.96	30.77 $\pm$ 1.12
	2	2.0830	2.5004	3.0946	28.74	
	3	2.0675	2.4075	3.0822	32.63	
KU 27	1	2.0864	2.4455	3.0921	30.99	32.63 $\pm$ 0.82
	2	2.0885	2.3944	3.0918	33.39	
	3	2.0723	2.3517	3.0465	33.52	
KU 78-9	1	2.0664	2.3319	3.0884	36.60	36.44 $\pm$ 0.15
	2	2.0488	2.3034	3.0439	36.14	
	3	2.0608	2.3035	3.0593	36.58	
KU 80-3	1	2.0522	2.2986	3.0609	37.14	37.10 $\pm$ 0.51
	2	2.0473	2.9638	3.0414	37.98	
	3	2.0410	2.9912	3.0302	36.20	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังสกัดไขมัน)

Y คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังอบ 4-5 ชั่วโมง)

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์ไขมันในเมล็ดสบู่ดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	ไขมัน (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	2.0879	2.4215	3.0638	30.76	30.56 $\pm$ 0.20
	2	2.0801	2.4332	3.0735	30.78	
	3	2.0809	2.4439	3.0713	30.15	
KU 20	1	2.0445	2.2950	3.0179	35.35	36.20 $\pm$ 0.45
	2	2.0461	2.3083	3.0526	36.37	
	3	2.0430	2.2705	3.0245	36.90	
KU 27	1	2.0646	2.4330	3.0529	30.02	32.19 $\pm$ 1.20
	2	2.0563	2.3535	3.0576	34.19	
	3	2.0527	2.3767	3.0603	32.36	
KU 78-9	1	2.0530	2.3232	3.0410	34.96	34.75 $\pm$ 0.27
	2	2.0657	2.3595	3.0663	34.21	
	3	2.0533	2.3211	3.0420	35.10	
KU 80-3	1	2.0752	2.3361	3.0680	35.26	35.90 $\pm$ 0.36
	2	2.0705	2.3154	3.0598	35.95	
	3	2.0700	2.2981	3.0539	36.51	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังสกัดไขมัน)

Y คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังอบ 4-5 ชั่วโมง)

ตารางผนวกที่ 6 ผลการวิเคราะห์ไขมันในเมล็ดสบู่ดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	ไขมัน (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	2.0711	2.3672	3.0669	33.78	33.08 $\pm$ 0.66
	2	2.0726	2.3832	3.0419	31.75	
	3	2.0573	2.3650	3.0590	33.73	
KU 20	1	2.0607	2.2939	3.0303	35.73	35.95 $\pm$ 0.15
	2	2.0546	2.2886	3.0257	35.87	
	3	2.0684	2.2885	3.3038	36.25	
KU 27	1	2.0695	2.3695	3.0678	33.74	33.23 $\pm$ 0.27
	2	2.0537	2.2855	2.9669	33.16	
	3	2.0697	2.3684	3.0514	32.80	
KU 78-9	1	2.0818	2.3583	3.0934	35.31	35.99 $\pm$ 0.42
	2	2.0840	2.3211	3.0693	35.90	
	3	2.0846	2.2875	3.00543	36.78	
KU 80-3	1	2.0543	2.2736	3.0752	39.02	37.07 $\pm$ 0.97
	2	2.0675	2.3192	3.0638	36.01	
	3	2.0740	2.2874	3.0379	36.18	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังสกัดไขมัน)

Y คือ น้ำหนักกระดวยกรองและตัวอย่าง (หลังอบ 4-5 ชั่วโมง)

เยื่อใย

ตารางผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยในเมล็ดสนุ่นดำของตัวควบคุม (Control)

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	เยื่อใย (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	1.1455	33.1539	32.7700	33.51	
	2	1.1445	30.5515	30.1645	33.81	33.83 $\pm$ 0.19
	3	1.1498	30.8968	30.5036	34.19	
KU 20	1	1.1830	30.8961	30.4833	34.89	
	2	1.1827	30.7099	30.3074	34.03	34.58 $\pm$ 0.27
	3	1.1824	30.7216	30.3142	34.83	
KU 27	1	1.1552	30.6952	30.2954	34.60	
	2	1.1533	33.2002	32.7988	34.80	34.18 $\pm$ 0.52
	3	1.1554	30.5066	30.1236	33.14	
KU 78-9	1	1.1672	32.8822	32.4714	35.19	
	2	1.1664	30.5519	30.1456	34.87	34.80 $\pm$ 0.24
	3	1.1632	32.8430	32.4435	34.34	
KU 80-3	1	1.1615	31.0086	30.5573	38.85	
	2	1.1600	33.1654	32.7655	37.44	37.65 $\pm$ 0.64
	3	1.1618	31.3728	30.9817	36.66	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างหลังต้มและอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Y คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตารางผนวกที่ 8 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยในเมล็ดสบู่ดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	เยื่อใย (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	1.1716	31.1208	30.7628	30.55	
	2	1.1733	33.1838	32.8070	32.11	30.95 $\pm$ 0.58
	3	1.1719	30.4566	30.1028	30.19	
KU 20	1	1.1472	32.1071	31.7573	30.46	
	2	1.1475	32.8641	32.5108	30.86	30.40 $\pm$ 0.28
	3	1.1487	30.3830	30.0389	29.87	
KU 27	1	1.1440	33.5381	33.1771	31.55	
	2	1.1432	30.3344	29.9843	30.62	31.37 $\pm$ 0.39
	3	1.1464	32.9785	32.6120	31.96	
KU 78-9	1	1.1591	30.4268	30.0666	31.07	
	2	1.1599	30.5244	30.1805	29.64	30.77 $\pm$ 0.58
	3	1.1597	30.3387	29.9721	31.61	
KU 80-3	1	1.1586	30.5089	30.0934	35.86	
	2	1.1590	30.8541	30.4507	34.57	33.75 $\pm$ 1.50
	3	1.1593	30.5038	30.1463	30.83	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างหลังต้มและอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Y คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตารางผนวกที่ 9 ผลการวิเคราะห์เยื่อใยในเมล็ดสบู่ดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	X	Y	เยื่อใย (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	1.1818	30.9640	30.6306	28.21	
	2	1.1813	30.2622	29.9075	30.02	28.06 $\pm$ 1.17
	3	1.1819	30.7905	30.4836	25.96	
KU 20	1	1.1677	30.6688	30.3186	29.99	
	2	1.1687	30.5626	30.2109	30.09	30.05 $\pm$ 0.03
	3	1.1698	30.4349	30.0830	30.08	
KU 27	1	1.1698	30.6373	30.2663	31.71	
	2	1.1713	30.4401	30.0826	30.52	30.53 $\pm$ 0.67
	3	1.1681	30.2682	29.9252	29.36	
KU 78-9	1	1.1841	30.8019	30.4403	30.53	
	2	1.1848	30.3402	29.9814	30.28	30.54 $\pm$ 0.15
	3	1.1862	30.4737	30.1079	30.83	
KU 80-3	1	1.1788	31.9594	31.5713	32.92	
	2	1.1764	31.3625	30.9706	33.31	32.97 $\pm$ 0.18
	3	1.1771	33.0128	32.6281	32.68	

หมายเหตุ W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

X คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างหลังต้มและอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Y คือ น้ำหนักของ Filter glass crucible ที่มีตัวอย่างและเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เถา

ตารางผนวกที่ 10 ผลการวิเคราะห์เถาในเมล็ดสนุ่นดำของตัวควบคุม (Control)

พันธุ์	ซ้ำ	A	B	W	เถา (%)	เฉลี่ย (%) (mean ±S.E.)
KU 16	1	22.5706	22.6725	2.0814	4.89	
	2	23.6005	23.7020	2.0888	4.85	4.89±0.02
	3	22.5130	22.6124	2.0087	4.94	
KU 20	1	24.5476	24.6487	2.0735	4.47	
	2	23.4353	23.5377	2.0683	4.55	4.49±0.03
	3	22.3867	22.4879	2.0789	4.45	
KU 27	1	22.2072	22.2946	2.0726	4.21	
	2	24.0343	24.1228	2.0758	4.26	4.58±0.34
	3	23.1594	23.0498	2.0735	5.28	
KU 78-9	1	21.1802	21.2561	2.0699	3.66	
	2	23.0871	23.1645	2.0693	3.78	3.37±0.03
	3	22.5332	22.6114	2.0748	3.76	
KU 80-3	1	22.5426	22.6313	2.0832	4.25	
	2	22.5348	22.6240	2.0687	4.31	4.29±0.02
	3	22.6176	22.7071	2.0741	4.31	

หมายเหตุ A คือ น้ำหนักถ้วย crucible เป่า

B คือ น้ำหนักถ้วย crucible และ ตัวอย่างหลังเผา

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 11 ผลการวิเคราะห์เถ้าในเมล็ดสับปะรดปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	A	B	W	เถ้า (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	26.2267	26.3280	2.0844	4.85	4.83 $\pm$ 0.04
	2	33.6997	33.8016	2.0820	4.89	
	3	32.1991	32.2980	2.0809	4.75	
KU 20	1	33.5300	33.6241	2.0811	4.52	4.48 $\pm$ 0.02
	2	40.5789	40.6720	2.0713	4.49	
	3	31.2929	31.3852	2.0787	4.44	
KU 27	1	39.6355	39.7200	2.0816	4.15	4.19 $\pm$ 0.02
	2	31.4034	31.4913	2.0793	4.22	
	3	36.5182	36.6063	2.0833	4.22	
KU 78-9	1	37.8877	37.9656	2.0737	3.75	3.80 $\pm$ 0.02
	2	44.1339	44.2143	2.0838	3.85	
	3	34.4597	34.5394	2.0838	3.82	
KU 80-3	1	39.6465	39.7366	2.0719	4.34	4.36 $\pm$ 0.01
	2	36.0026	36.0935	2.0726	4.38	
	3	36.7337	36.8246	2.0768	4.37	

หมายเหตุ A คือ น้ำหนักถ้วย crucible เปล่า

B คือ น้ำหนักถ้วย crucible และ ตัวอย่างหลังเผา

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 12 ผลการวิเคราะห์เถ้าในเมล็ดสับดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	A	B	W	เถ้า (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	22.5914	22.6901	2.0397	4.83	4.82 $\pm$ 0.02
	2	23.1731	23.2717	2.0661	4.77	
	3	21.9237	22.0237	2.0549	4.86	
KU 20	1	21.5414	21.6363	2.0749	4.57	4.57 $\pm$ 0.01
	2	22.4470	22.5428	2.0853	4.59	
	3	23.2679	23.3632	2.0926	4.55	
KU 27	1	22.4777	22.5681	2.0428	4.42	4.46 $\pm$ 0.03
	2	22.7882	22.8794	2.0554	4.43	
	3	16.6310	16.7237	2.0460	4.53	
KU 78-9	1	18.0794	18.1622	2.0961	3.95	3.97 $\pm$ 0.02
	2	17.2240	17.3068	2.0754	3.98	
	3	17.9394	18.0226	2.0828	3.99	
KU 80-3	1	22.0628	22.1535	2.0613	4.56	4.46 $\pm$ 0.05
	2	17.3660	17.4605	2.0717	4.40	
	3	22.0646	22.1561	2.0701	4.42	

หมายเหตุ A คือ น้ำหนักถ้วย crucible เปล่า

B คือ น้ำหนักถ้วย crucible และ ตัวอย่างหลังเผา

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

โปรตีน

ตารางผนวกที่ 13 ผลการวิเคราะห์โปรตีนในเมล็ดสนุ่นดำของตัวควบคุม (Control)

พันธุ์	ซ้ำ	W	V1	V2	ไนโตรเจน (%)	โปรตีน (%)	เฉลี่ย (%) (mean $\pm$ S.E.)
KU 16	1	0.5820	0.2	13.0	3.07	19.18	
	2	0.5858	0.2	13.6	3.20	20.30	20.16 $\pm$ 0.61
	3	0.5849	0.2	13.3	3.34	21.31	
KU 20	1	0.5660	0.2	11.7	2.84	17.75	17.89 $\pm$ 0.11
	2	0.5684	0.2	12.0	2.90	18.12	
	3	0.5641	0.2	11.7	2.85	17.81	
KU 27	1	0.5838	0.2	12.8	3.02	18.87	19.45 $\pm$ 0.29
	2	0.5830	0.2	13.4	3.16	19.75	
	3	0.5833	0.2	13.4	3.16	19.75	
KU 78-9	1	0.5922	0.2	13.7	3.19	19.93	19.60 $\pm$ 0.18
	2	0.5962	0.2	13.4	3.09	19.31	
	3	0.5933	0.2	13.5	3.13	19.56	
KU 80-3	1	0.5801	0.2	11.3	2.67	16.68	15.72 $\pm$ 0.52
	2	0.5817	0.2	10.1	2.38	14.87	
	3	0.5821	0.2	10.6	2.50	15.62	

หมายเหตุ N คือ ความเข้มข้นของ Std. $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0.1 \text{ N}$

V1 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรท blank

V2 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 14 ผลการวิเคราะห์โปรตีนในเมล็ดสบู่ดำปริมาณรังสี 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	V1	V2	ไนโตรเจน (%)	โปรตีน (%)	เฉลี่ย (%) (mean ±S.E.)
KU 16	1	0.5882	0.2	14.0	3.28	20.50	
	2	0.5895	0.2	13.7	3.20	20.00	20.12±0.19
	3	0.5940	0.2	13.7	3.18	19.87	
KU 20	1	0.5413	0.2	11.4	2.89	18.06	
	2	0.5446	0.2	11.4	2.87	17.93	17.99±0.03
	3	0.5435	0.2	11.4	2.88	18.00	
KU 27	1	0.5524	0.2	11.7	2.91	18.81	
	2	0.5625	0.2	12.9	3.16	19.75	18.99±0.28
	3	0.5630	0.2	12.5	3.05	19.06	
KU 78-9	1	0.5531	0.2	13.3	3.31	20.68	
	2	0.5445	0.2	12.8	3.23	20.18	20.16±0.30
	3	0.5439	0.2	12.4	3.14	19.62	
KU 80-3	1	0.5579	0.2	9.7	2.38	14.87	
	2	0.5553	0.2	9.7	2.39	14.93	14.99±0.09
	3	0.5566	0.2	9.9	2.43	15.18	

หมายเหตุ N คือ ความเข้มข้นของ Std. $H_2SO_4 = 0.1\text{ N}$

V1 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรท blank

V2 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 15 ผลการวิเคราะห์โปรตีนในเมล็ดสบู่ดำปริมาณรังสี 100 กิโลเกรย์

พันธุ์	ซ้ำ	W	V1	V2	ไนโตรเจน (%)	โปรตีน (%)	เฉลี่ย (%) (mean ±S.E.)
KU 16	1	0.5662	0.2	12.6	3.06	19.12	18.91±0.15
	2	0.5623	0.2	12.2	2.98	18.62	
	3	0.5653	0.2	12.5	3.04	19.00	
KU 20	1	0.5867	0.2	11.9	2.79	17.44	17.68±0.26
	2	0.5862	0.2	12.4	2.91	18.21	
	3	0.5835	0.2	11.8	2.78	17.39	
KU 27	1	0.5687	0.2	13.1	3.17	19.81	20.04±0.14
	2	0.5680	0.2	13.2	3.20	20.00	
	3	0.5684	0.2	13.4	3.25	20.31	
KU 78-9	1	0.5420	0.2	12.7	3.22	20.21	20.31±0.05
	2	0.5402	0.2	12.8	3.26	20.37	
	3	0.5400	0.2	12.8	3.26	20.37	
KU 80-3	1	0.5439	0.2	9.6	2.41	15.06	14.81±0.13
	2	0.5444	0.2	9.3	2.34	14.62	
	3	0.5442	0.2	9.4	2.36	14.75	

หมายเหตุ N คือ ความเข้มข้นของ Std. $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0.1 \text{ N}$

V1 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรท blank

V2 คือ ปริมาตรของ Std. H_2SO_4 ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ตารางผนวกที่ 16 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของ *p*-nitroaniline ตั้งแต่ 0.03-0.21 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร

ความเข้มข้นของ <i>p</i> -nitroaniline (ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร)	A ₄₁₀ (นาโนเมตร)	เฉลี่ย
0	0.000	0.000
	0.000	
	0.000	
0.03	0.131	0.128
	0.128	
	0.127	
0.06	0.253	0.255
	0.254	
	0.258	
0.09	0.378	0.383
	0.389	
	0.382	
0.12	0.503	0.501
	0.497	
	0.504	
0.15	0.630	0.629
	0.632	
	0.625	
0.18	0.755	0.764
	0.777	
	0.762	
0.21	0.890	0.888
	0.887	
	0.888	

ตารางผนวกที่ 17 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ในกิจกรรมของเอนไซม์
ทริปซินจากการคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินใน multienzyme

A_{410} (นาโนเมตร)	ค่าความชันจากกราฟ มาตรฐานของ <i>p</i> -nitroaniline	DF*	กิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน ($\mu\text{mol } p\text{-nitroaniline produced h-1}$)	เฉลี่ย
0.523	4.224	100	12.381	
0.519	4.224	100	12.286	12.350
0.523	4.224	100	12.381	

* dilution factor (DF) จากสมการที่ 3

ตารางผนวกที่ 18 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสบู่ดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.188	5.4	657.19	53.21
	0.124	5.2	717.17	58.07
	0.122	5.1	713.54	57.77
KU BP-20	0.088	5.3	499.36	40.43
	0.098	5.2	566.80	45.89
	0.094	5.0	565.41	45.78
KU BP-27	0.146	5.3	828.48	67.08
	0.130	5.3	737.69	59.73
	0.148	5.1	872.77	70.66
KU BP 78-9	0.145	5.3	822.81	66.62
	0.154	5.4	857.69	69.44
	0.132	5.4	735.17	59.52
KU BP 80-3	0.104	5.1	613.29	49.65
	0.087	5.1	513.04	41.54
	0.099	5.2	572.58	46.36

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

ตารางผนวกที่ 19 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสบู่ดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.121	5.4	673.90	54.56
	0.135	5.5	738.20	59.77
	0.132	5.5	721.80	58.44
KU BP-20	0.101	5.2	584.15	47.29
	0.099	5.2	572.58	46.36
	0.096	5.5	524.94	42.50
KU BP-27	0.155	5.1	914.04	74.01
	0.141	5.3	800.11	64.78
	0.145	5.2	838.63	67.90
KU BP 78-9	0.149	5.0	896.24	72.56
	0.153	5.3	868.20	70.29
	0.151	5.4	840.99	68.09
KU BP 80-3	0.101	5.2	584.15	47.29
	0.084	5.2	485.83	39.33
	0.106	5.2	613.07	49.64

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

ตารางผนวกที่ 20 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 20 กิโลเกรย์

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสบู่ดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.122	5.3	692.29	56.05
	0.125	5.2	722.96	58.53
	0.145	5.3	822.81	66.62
KU BP-20	0.102	5.2	589.93	47.767
	0.103	5.1	607.40	49.18
	0.098	5.5	535.88	43.39
KU BP-27	0.145	5.1	855.07	69.23
	0.143	5.3	811.46	65.70
	0.15	5	902.25	73.05
KU BP 78-9	0.147	5.4	818.71	66.29
	0.155	5.3	879.55	71.21
	0.16	5.2	925.39	74.93
KU BP 80-3	0.105	5.2	607.28	49.17
	0.109	5.3	618.52	50.08
	0.098	5.2	566.80	45.89

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

ตารางผนวกที่ 21 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสบู่ดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 30 กิโลเกรย์

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสบู่ดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.134	5.3	760.39	61.56
	0.139	5.3	788.76	63.86
	0.135	5.1	796.10	64.46
KU BP-20	0.103	5.3	584.48	47.32
	0.117	5.2	676.69	54.79
	0.099	5.3	561.78	45.48
KU BP-27	0.147	5.1	866.87	70.19
	0.144	5	866.16	70.13
	0.149	5.3	845.51	68.46
KU BP 78-9	0.156	5.2	902.25	73.05
	0.158	5.3	896.58	72.59
	0.157	5.5	858.50	69.51
KU BP 80-3	0.105	5.1	619.19	50.136
	0.122	5.1	719.44	58.25
	0.11	5	661.65	53.57

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

ตารางผนวกที่ 22 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับุดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสับุดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.164	5.3	930.62	75.35
	0.165	5.2	954.30	77.27
	0.153	5.3	868.20	70.29
KU BP-20	0.119	5.4	662.76	53.66
	0.122	5.2	705.61	57.13
	0.126	5	757.89	61.36
KU BP-27	0.157	5.1	925.84	74.96
	0.162	5.2	936.95	75.86
	0.165	5.2	954.30	77.27
KU BP 78-9	0.18	5	1082.70	87.66
	0.186	5.2	1075.76	87.10
	0.183	5	1100.75	89.12
KU BP 80-3	0.209	5.4	1164.02	94.25
	0.192	5.4	1069.34	86.58
	0.184	5.3	1044.12	84.54

* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity

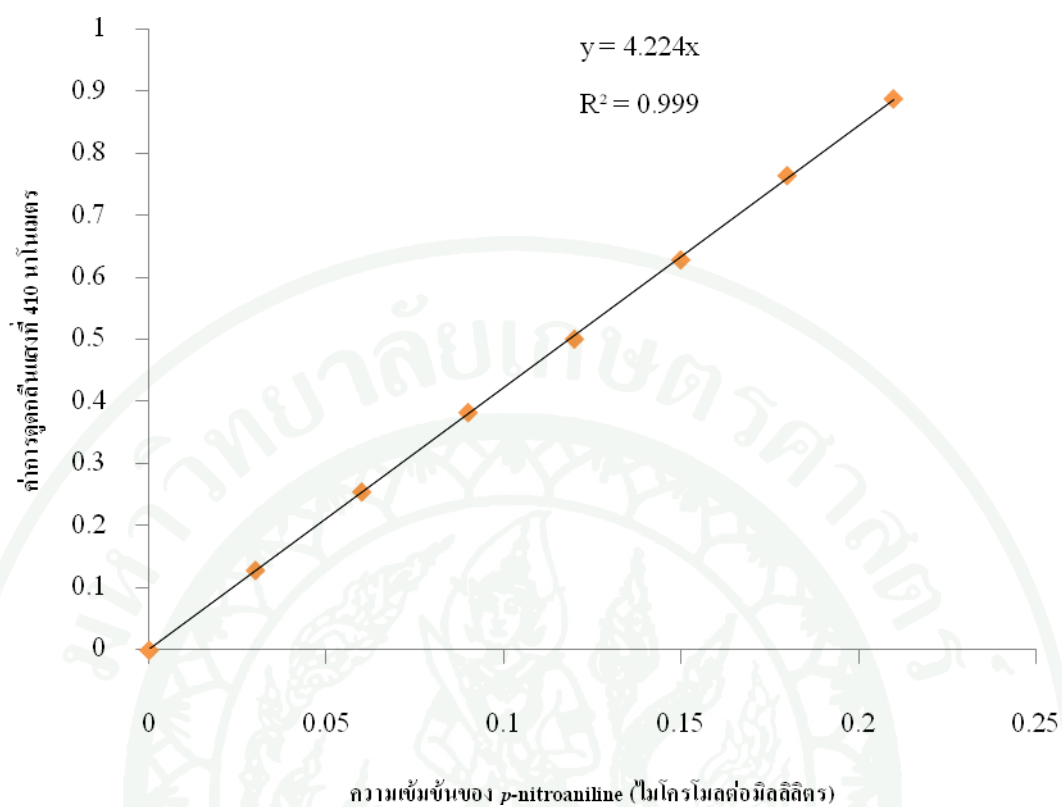
ตารางผนวกที่ 23 ความสามารถในการย่อยโปรตีนในกากเมล็ดสับุดำทั้ง 5 สายพันธุ์ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 100 กิโลเกรย์

พันธุ์	A ₄₂₀ (นาโนเมตร)	น้ำหนักของกากเมล็ดสับุดำ (มิลลิกรัม)	การย่อยโปรตีน* n = 3	
			**	***
KU BP-16	0.151	5.2	873.33	70.71
	0.149	5.1	878.66	71.14
	0.153	5.1	902.25	73.05
KU BP-20	0.138	5.4	768.58	62.23
	0.145	5.4	807.57	65.39
	0.133	5.3	754.71	61.11
KU BP-27	0.167	5.3	947.65	76.73
	0.174	5.3	987.37	79.94
	0.169	5.3	959.00	77.65
KU BP 78-9	0.186	5.5	1017.08	82.35
	0.187	5.3	1061.14	85.92
	0.180	5.1	1061.47	85.94
KU BP 80-3	0.186	5.3	1055.46	85.46
	0.191	5.4	1063.77	86.13
	0.195	5.2	1127.82	91.32

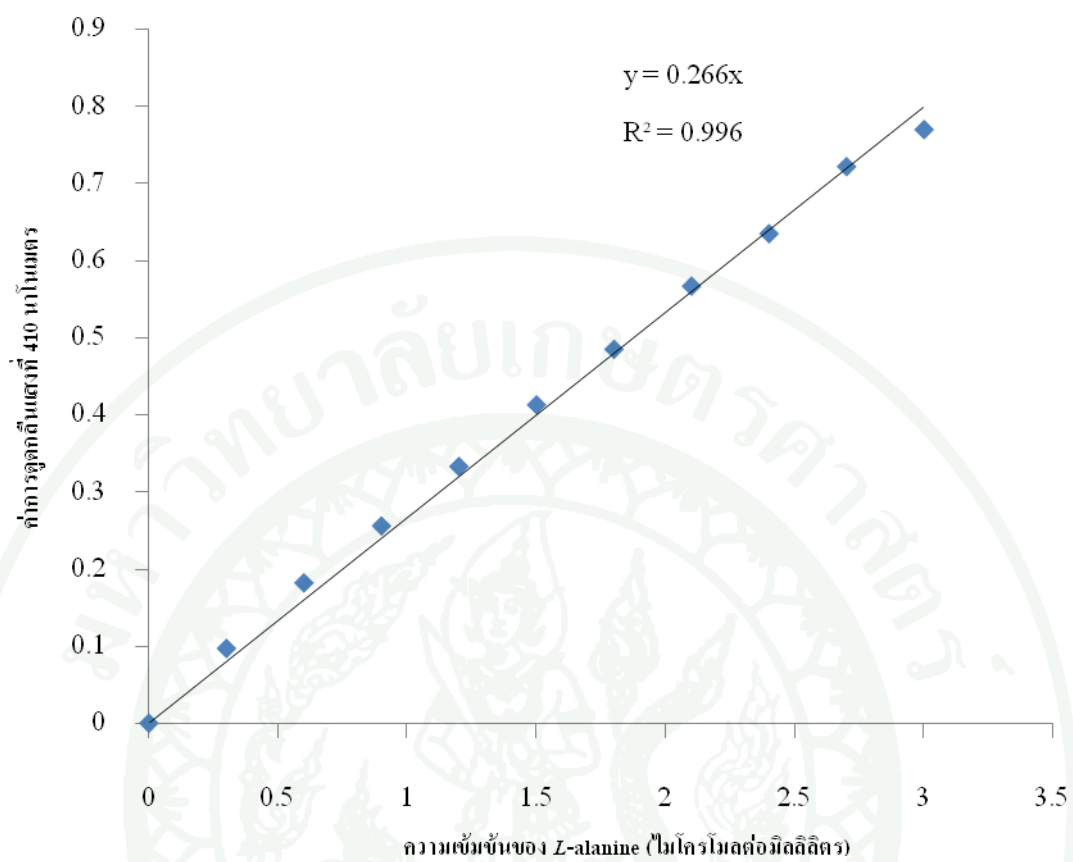
* คำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยค่าความชันจากกราฟมาตรฐานของ *L*-Alanine มีค่าเท่ากับ 0.266
ค่า dilution factor เท่ากับ 8,000 และค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซิน เท่ากับ 12.35 μmol
p-nitroaniline produced per hour

** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed

*** หน่วย μmol *L*-Alanine equivalent per g feed per trypsin activity



ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน *p*-nitroaniline (ไมโครโมลต่อมิลลิตร)



ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 นาโนเมตร กับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน L-alanine (ไมโครโมลต่อมิลลิตร)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล

นายพิพัฒน์พงษ์ จันทร์แดง

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 15 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2527

สถานที่เกิด

จังหวัดนครพนม

ประวัติการศึกษา

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสัตวศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิทยาเขตพิษณุโลก

