

การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต
คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์
จากถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ธันวาคม 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อน
ที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการ
ของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60”

ของ นางสาวสุตารัตน์ ปาหลวง

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุลีสมาศ บุญไทย อีวาย)

.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร.กณิดา ธนเจริญชนภาส)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไอรส รักชาติ)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชิดศักดิ์ ทัพโพ)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

25 ธ.ค. 2562

ประกาศคุณูปการ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐา ธนเจริญชนภาส ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นทั้งที่ปรึกษา พร้อมทั้งให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไอรศ รักชาติ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

กราบขอขอบคุณ ท่านอธิบดีการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการ
วิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561 ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนที่มีค่าอย่างยิ่งจนสามารถดำเนินงานวิจัยเสร็จสิ้น
สมบูรณ์ และขอขอบพระคุณเป็นพิเศษต่อศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชพืชโลก
จังหวัดพิษณุโลก สำหรับการอนุเคราะห์เมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในการทำการวิจัยครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อข้อมูลในเชิงลึกส่วนหนึ่งที่สามารถใช้ในการประเมินผลกระทบทางเกษตรในอนาคตเพื่อรองรับการเพิ่มมูลค่าทางการเกษตรมากขึ้น และสามารถต่อยอดองค์ความรู้ ให้เป็นประโยชน์ต่อการปรับตัว และการรับมือจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยต่อไปในอนาคตไม่มากก็น้อย

สุดารัตน์ ปาหหลวง

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	ความเป็นมาของปัญหา	1
	จุดมุ่งหมายของการศึกษา	3
	ขอบเขตของงานวิจัย	4
	นิยามศัพท์เฉพาะ	5
	สมมติฐานของการวิจัย	6
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
	การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสภาวะโลกร้อน	7
	ถั่วเหลือง (Soybean)	12
	โปรตีนและกรดอะมิโน	22
	การแปรรูปผลิตภัณฑ์	26
	ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อสรีรวิทยาของพืช	27
	ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อสรีรวิทยาของถั่วเหลือง	29
	ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อผลผลิตในพื้นที่เกษตรกรรมของโลก ..	30
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	39
	พื้นที่ศึกษา	39
	พันธุ์ถั่วเหลืองที่ใช้ในงานวิจัย	39
	การควบคุมระดับอุณหภูมิ ณ พื้นที่วิจัยภาคสนาม	40
	การจัดการการปลูก	45
	ปัจจัยทางกายภาพที่ศึกษาในตู้ทดลอง	47
	พารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ระยะเวลาในการทำวิจัย	49
สถิติการวิจัย	49
 4 ผลการวิจัย	 50
ระดับอุณหภูมิที่ควบคุม	50
ระดับธาตุอาหารในดิน	54
องค์ประกอบของผลผลิต	59
ปริมาณโปรตีนในเมล็ด	64
ปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ด	65
คุณลักษณะของเต้าหู้	68
 5 บทสรุป	 74
สรุปผลการวิจัย	74
อภิปรายผล	76
ข้อเสนอแนะ	82
 บรรณานุกรม	 84
 ภาคผนวก	 94
 ประวัติผู้วิจัย	 115

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ 10 อันดับแรก ปี 2555-2557	14
2 พื้นที่ ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาคปี 2557-2558	15
3 อนุกรมวิธานของถั่วเหลืองจำแนกตามพฤกษศาสตร์	16
4 ระยะการเจริญเติบโตของ V-stage ในถั่วเหลือง.....	19
5 ระยะการเจริญเติบโตของ R-stage	20
6 กรดอะมิโนต่างๆในเมล็ดถั่วเหลือง ในแบ่งถั่วเหลือง ในอาหารชั้น และในส่วนที่แยกเป็นอิสระ เมื่อเทียบกับปริมาณที่องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) กำหนดเป็นมาตรฐานของอาหารที่มีคุณภาพดี	22
7 เวลาและค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการตรวจวัดในตู้ทดลอง	51
8 เวลาและค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิในดินจากการตรวจวัดในตู้ทดลอง	53
9 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของเต้าหู้ในแต่ละสิ่งทดลอง	73

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวโลกที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงเปรียบเทียบระหว่างในปี ฐานปี ค.ศ.1901 กับ ปี ค.ศ.2012	8
2 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิวโลกจากข้อมูลระหว่างปี ค.ศ.1961-1990	9
3 ระดับแนวโน้มของอุณหภูมิที่จะเพิ่มสูงขึ้นภายใต้ภาพฉายอนาคต RCP 2.6 และ RCP 8.0 ในช่วงปี ค.ศ.2000-ค.ศ.2100	12
4 การเจริญเติบโตของถั่วเหลือง	17
5 ดอกของถั่วเหลือง	18
6 โครงสร้างของโปรตีนจตุรภูมิ	24
7 โครงสร้างของกรดอะมิโน	25
8 โครงสร้างของกรดอะมิโน Glycine Lysine และ Methionine	26
9 ระบบตู้ทดลองภาคสนามระบบเปิดระบายอากาศด้านบน (Open Top Chamber)	40
10 การใช้เครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิให้เทียบเท่ากับสภาวะธรรมชาติ	41
11 การติดตั้งหลอดไฟเพื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิในสิ่งทดลอง HT2	42
12 การติดตั้งหลอดไฟเพื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิในสิ่งทดลอง HT3	43
13 การควบคุมระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองโดยใช้ระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติ	44
14 ผังการวาง OTC จำนวน 16 ตู้ ภายใต้แผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) มีสิ่งทดลอง 4 รูปแบบ และมี 4 ซ้ำ	45
15 การเตรียมพื้นที่แปลงปลูก	45
16 การเพาะเมล็ดถั่วเหลืองในภาชนะเพื่อเตรียมคัดต้นอ่อน	46
17 ต้นอ่อนที่มีอัตราการรอดเท่าเทียมกัน	46
18 ระบบการให้น้ำหยดแบบตั้งเวลาอัตโนมัติ	47
19 การควบคุมระดับอุณหภูมิทั้ง 4 สิ่งทดลอง ตามแบบจำลองภาพฉายอนาคต RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 และ RCP8.5	51
20 ค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิอากาศภายในตู้สิ่งทดลองทั้ง 4 ระดับ	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
21 ค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิในดินภายในตู้สิ่งทดลองทั้ง 4 ระดับ	53
22 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	54
23 ปริมาณแอมโมเนียมในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	55
24 ปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	56
25 ปริมาณธาตุอาหารฟอสฟอรัสในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	57
26 ปริมาณธาตุอาหารโพแทสเซียมในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	58
27 จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น (Pods/plant)	59
28 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยนับรวมเมล็ดลีบ	60
29 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยไม่นับรวมเมล็ดลีบ	61
30 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก (Seeds/pod) โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์	62
31 น้ำหนักเมล็ดจำนวน 100 เมล็ด (100-seed weight)	63
32 ปริมาณโปรตีนในเมล็ด (Crude protein)	64
33 ปริมาณกรดอะมิโน Lysine	65
34 ปริมาณกรดอะมิโน Glycine	66
35 ปริมาณกรดอะมิโน Methionine	67
36 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง CT	68
37 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT1	69
38 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT2	70
39 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT3	71
40 ค่าวัดเนื้อสัมผัส (Texture analysis)	72
41 ค่าความชื้น (Moisture)	72

ชื่อเรื่อง	การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60
ผู้วิจัย	สุดารัตน์ ปาหลวง
สถานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.กณิดา ธนเจริญชนนภาส
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โอฬาส์ รักชาติ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2562
คำสำคัญ	ตู้ทดลองระบบเปิดด้านบน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อน ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ภาพฉายอนาคต RCP เต้าหู้แผ่น

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60 ได้ดำเนินการศึกษาวิจัยในพื้นที่มหาวิทยาลัยนเรศวร ในปี พ.ศ. 2560 การทดลองได้มีการใช้ตู้ทดลองระบบเปิดด้านบนจำนวน 16 ตู้ วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (RCBD) ให้มีระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 ระดับ (4 สิ่งทดลอง) ดังนี้ สิ่งทดลอง CT (28.0 ± 2.14 °C), HT1 (30.0 ± 2.13 °C), HT2 (31.6 ± 2.10 °C) และ HT3 (32.8 ± 2.20 °C) ตามลำดับ จากนั้นทำการปลูกถั่วเหลืองในตู้ทดลองระบบเปิดด้านบนเป็นระยะเวลา 105 วัน ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลเชิงลบต่อจำนวนเมล็ดที่สมบูรณ์ต่อฝัก และน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด โดยลดลงประมาณ 7.1 % (ใน HT2) และ 31 % (ใน HT3) ตามลำดับ นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้กรดอะมิโนไลซีนและไกลซีนในเมล็ดถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ประมาณ 4 % และ 2 % ตามลำดับ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อกรดอะมิโนบางชนิดให้เพิ่มขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีน และกรดอะมิโนเมไทโอนีน ซึ่งพบว่าผลกระทบเหล่านี้ส่งผลทำให้ปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนเมไทโอนีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ประมาณ 12 % และ 21 % ตามลำดับ นอกจากนี้อุณหภูมิในบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเต้าหู้เปลี่ยนแปลงเช่นกันเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT

Title ASSESSING THE IMPACTS OF ENHANCED TEMPERATURES UNDER THE TRENDS OF GLOBAL WARMING SITUATION ON YIELD, IMPORTANT NUTRIENTS VALUE AND SOME CHARACTERISTICS PRODUCT OF SOYBEAN (*Glycine max* (L.) Merrill) VARIETY: CHIANG MAI 60.

Author Sudarat Paluang

Advisor Associate Professor Kanita Thanacharoenchanaphas, Ph.D.

Co-advisor Assistant Professor Orose Rugchat, Ph.D.

Academic Paper Thesis M.Sc. in Environment Science, Naresuan University, 2019

Keywords Open Top Chamber, Enhanced Temperatures under the Trends of Global Warming Situation, Soybean variety : Chiang Mai 60, RCP Scenarios, Tofu

ABSTRACT

The study of assessing the impacts of enhanced temperatures under the trends of global warming situation on yield, important nutrients value and some characteristics product of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) variety: Chiang Mai 60 was conducted at Naresuan University research area in 2017. In experiment, sixteen open top chambers were applied in a randomized complete block design (RCBD) with 4 different levels of temperature (4 treatments) as follows: CT (28.0 ± 2.14 °C), HT1 (30.0 ± 2.13 °C), HT2 (31.6 ± 2.10 °C), and HT3 (32.8 ± 2.20 °C) treatment respectively. Then soybean was planted inside open top chambers for 105 days. The negative results under high temperature were shown in decreasing of total complete seed. pod^{-1} and 100-seed weight by approximately 7.1 % (in HT2) and 31 % (in HT3), respectively when compare with CT. In addition, high temperature significantly increased ($P < 0.05$) lysine and glycine amino acids content in soybean seed by approximately 4 % and 2 %, respectively. Although the high temperatures increased some amino acids, these were not associated with results

in crude protein and methionine amino acid. It was found that these effects significantly decrease ($P<0.05$) crude protein and methionine amino acid by approximately 12 % and 21 %, respectively. Increased air temperature also altered texture of tofu when compare with CT.



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

การเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศโลกเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาเป็นระยะเวลายาวนานหลายทศวรรษ พบว่าปัจจัยสำคัญที่เป็นสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างซับซ้อน ทั้งปัจจัยที่เกิดจากธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ (IPCC, 2013) มีรายงานระดับนานาชาติหลายฉบับรวมทั้งประเทศไทยยืนยันตรงกันว่าหนึ่งในตัวชี้วัดที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศคือระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในหลายพื้นที่ของโลก (จงรัก วชิรสินธุรัตน์, 2554; กรชาล ธนสีลังกูร และคณะ, 2559; IPCC, 2013) รวมทั้งข้อมูลจากหน่วยงานคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ได้ยืนยันสถานการณ์ดังกล่าวในรายงานการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศฉบับที่ 5 (AR5: The Fifth Assessment Report) ซึ่งเป็นฉบับล่าสุด รายงานดังกล่าวได้ระบุว่าในช่วงระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา (ระหว่าง ค.ศ. 1951-ค.ศ. 2012) ระดับอุณหภูมิพื้นผิวโลกเฉลี่ยได้เพิ่มขึ้นประมาณ 0.1°C (กนิดา ธนเจริญชนภาส, 2558; IPCC, 2013; IPCC, 2014) ยิ่งกว่านั้นในรายงาน AR5 ของหน่วยงาน IPCC ได้ประเมินสถานการณ์ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกในอนาคตโดยใช้รูปแบบภาพฉายอนาคตแสดงการปล่อยระดับก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้ค่าแรงแผ่รังสี (Radiative forcing) เปลี่ยนแปลงไป เรียกว่า Representative Concentration Pathways (RCPs) ซึ่งภาพฉายอนาคต RCP 8.5 แสดงระดับค่า Radiative forcing ที่จะเพิ่มขึ้นถึง 8.5 W.m^{-2} ภายใต้สถานการณ์การใช้พลังงานจากฟอสซิลเป็นหลัก และมีการพัฒนาเศรษฐกิจพัฒนาประเทศในระดับสูง รวมทั้งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง (IPCC, 2014) คาดการณ์ว่าระดับอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นถึง $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ ภายในปี ค.ศ. 2100 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ค.ศ. 2081-2100 (Clarke et al., 2014) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวส่งผลให้นักวิจัย นักวิชาการ รวมทั้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อระบบนิเวศ ความเสี่ยงการปรับตัวในด้านระบบนิเวศธรรมชาติ พืชพรรณ ทรัพยากรน้ำ ระบบนิเวศมนุษย์ และการปรับตัวทางด้านกระบวนการทางสังคม เศรษฐกิจ รวมทั้งผลกระทบที่สำคัญต่อมนุษย์ คือความมั่นคงทางอาหาร เนื่องจากผลกระทบของสภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกส่งผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศเกษตรเช่นกัน (ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล, 2550; อำนาจ ชิดไธสง และ อัศมน ลิ้มสกุล, 2557; กณิตา ธนเจริญณภาส, 2558)

ด้วยปัญหาดังกล่าวดังนั้นในอนาคตพื้นที่ที่มีเกษตรกรรมทั่วโลกทั้ง อเมริกาเหนือ อเมริกาใต้ แอฟริกา ยุโรป และเอเชีย ที่มีโอกาสเสี่ยงต่อการเผชิญ (exposure) ต่อสภาวะ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ หรือสภาวะโลกร้อนย่อมมีความเป็นไปได้ที่จะประสบกับปัญหาคุณค่า ทางด้านอาหาร และผลผลิตของธัญพืชที่ลดลง (Cure, & Acock, 1986) ทั้งนี้ได้มีการคาดการณ์ว่า อาจมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างผลผลิต ในธัญพืชด้านต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ภาวะการขาดแคลนน้ำ น้ำท่วม การเกิดโรคระบาดของพืช การระบาดของโรคพืชชนิดใหม่ ความเสื่อมโทรมของดิน รวมทั้งผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยตรง จากการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของระดับอุณหภูมิใกล้ผิวใบ หรือในดินที่มีผลต่อกระบวนการ ทางสรีรวิทยาของพืชทำให้สุดท้ายแล้วผลผลิต และคุณภาพของสารอาหารในเมล็ดธัญพืชทางด้าน อาหารลดลง (กณิตา ธนเจริญณภาส และไอรศ รักชาติ, 2552; Jones, 1992; Newton et al., 1994; Wurr et al., 1996; Nijs et al., 1996; Hollister, & Webber, 2000; IPCC, 2006; Thanacharoenchanaphas, & Orose, 2011)

ถั่วเหลืองเป็นธัญพืชที่สำคัญมากของมนุษย์เนื่องจากเป็นแหล่งโปรตีน และสารอาหาร ที่สำคัญของมนุษย์ และยังมีความสำคัญต่อการเป็นพืชเศรษฐกิจของโลกอีกชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามพบว่าถั่วเหลืองเป็นพืชที่อ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ (อภิพรธ พุกภักดี, 2546) ดังนั้นจึงเป็นพืชชนิดที่มีความเสี่ยงภายใต้สภาวะโลกร้อน มีงานวิจัยยืนยัน ผลกระทบดังกล่าวโดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางด้านสรีรวิทยาอย่างรวดเร็ว และชัดเจนเมื่อถั่วเหลืองสัมผัสกับระดับอุณหภูมิที่ผิวใบ หรือระดับอุณหภูมิในดินที่สูงขึ้น เช่น ลดประสิทธิภาพในการดึงธาตุอาหาร การสังเคราะห์แสง การสร้างอาหาร และการลดผลผลิต เมื่อปลูกถั่วเหลืองภายใต้สถานการณ์ระดับอุณหภูมิที่สูง หรือต่ำกว่าสภาวะปกติในฤดูกาลปลูก (กณิตา ธนเจริญณภาส, 2558; Bhattarai et al., 2017) นอกจากนั้นมีงานวิจัยจำนวนมากแสดงผล ที่สอดคล้องกันว่าโปรตีนของผลผลิตพืชหลายชนิดของโลกรวมทั้งถั่วเหลืองที่ปลูกภายใต้สภาวะ อุณหภูมิสูงจะเกิดสภาวะความเครียดจากความร้อน (Heat stress) จะถูกทำลายลงอย่างรวดเร็ว รวมทั้งพบว่าโครงสร้างของกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไปจนนำไปสู่การสูญเสีย กรดอะมิโนชนิดนั้นๆ (He et al., 2005; Bainy et al., 2008)

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อน (tropical zone) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิรายปีเพิ่มขึ้นประมาณ 4-5 °C เมื่อเทียบกับช่วงปลายทศวรรษที่ 20 (ค.ศ.1991-2000) (ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา, 2553) เมื่อพิจารณาพื้นที่เขตร้อนพบว่าเป็นพื้นที่ที่สิ่งมีชีวิตมีความเสี่ยงต่อสภาวะการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิโดยเฉพาะระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากช่วงความทนของระดับอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาอยู่ในช่วงแคบกว่าพื้นที่เขตอื่นๆ ของโลก (Khaliq et al., 2014) และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงทุกๆ 10 ปี ที่ผ่านมานั้นเพิ่มขึ้นเกือบ 1 °C ต่อทศวรรษ โดยมีปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลักๆ คือ การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดิน การเปลี่ยนแปลงจากสภาพพื้นที่ป่าไม้ไปเป็นพื้นที่เกษตร หรือโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นต้น (จงรัก วชิรนทร์รัตน์, 2554; กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) รวมทั้งเมื่อพิจารณาว่าประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในเอเชียซึ่งปลูกถั่วเหลืองจนกลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศนอกจากข้าว และข้าวโพด ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะศึกษาสถานการณ์ภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิบรรยากาศเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพื่อให้ทราบว่าในอนาคตหากประเทศไทยประสบกับสภาวะการเพิ่มระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามภาพฉายอนาคต RCPs จะส่งผลต่อการสูญเสียผลผลิตสารอาหารประเภทโปรตีน และกรดอะมิโนในถั่วเหลืองมากน้อยเพียงใด รวมทั้งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปไปอย่างไร แผนการวิจัย และผลการวิจัยที่จะได้รับความสำเร็จตามเป้าหมายในอนาคตนั้นอันจะเป็นฐานข้อมูลที่สำคัญในการต่อยอดองค์ความรู้เพื่อปรับตัว และการรับมือปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศในประเทศไทยต่อไป และที่สำคัญยิ่ง คือ จะสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 ซึ่งมุ่งเป้าในการวางรากฐานการพัฒนาประเทศไปสู่สังคมที่มีความสุขอย่างมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืนสอดคล้องตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ที่เป็นกรอบการพัฒนาประเทศในระยะยาวต่อไป

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อผลผลิตถั่วเหลือง
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิในฤดูกาลปลูกที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณสารอาหารที่สำคัญ คือ โปรตีน และกรดอะมิโนชนิดสำคัญของเมล็ดถั่วเหลือง

3. เพื่อศึกษาผลกระทบของระดับอุณหภูมิในฤดูกาลปลูกที่เพิ่มขึ้นต่อคุณสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองในรูปแบบเต้าหู้แข็งซึ่งปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ขอบเขตของงานวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา แปลงวิจัยด้านการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

2. พันธุ์ถั่วเหลืองที่ใช้ในงานวิจัย ถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) เพียง 1 สายพันธุ์ คือ พันธุ์เชียงใหม่ 60

3. การควบคุมระดับอุณหภูมิ ณ พื้นที่วิจัยภาคสนาม ควบคุมระดับอุณหภูมิโดยระบบตู้ทดลองเปิดด้านบน (Open Top Chamber)

3.1 รูปแบบของ Open Top Chamber มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อความสะดวกในการครอบแปลงวิจัยที่มีลักษณะเป็นแปลงปลูกแนวยาว Open Top Chamber (OTC) มีขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 1.5 เมตร และสูง 2 เมตร หุ้มด้วยพลาสติกใสทุกด้าน มีช่องเปิดเพื่อระบายอากาศด้านบน รวมทั้งมีประตู และหลังคาประตูปิดด้านบนเพื่อป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จากน้ำฝน และจากความชื้นในช่วงระยะเวลาทำการวิจัยภาคสนาม และใช้ระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

3.2 การควบคุมระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลองให้มีความแตกต่างกัน 4 ระดับตามแนวโน้มการคาดการณ์จากภาพฉายอนาคต RCPs โดยใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับสภาวะธรรมชาติในการควบคุม

4. การวางแผนการทดลอง วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) มีจำนวน 4 สิ่งทดลอง ตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และกำหนดให้มี 4 ซ้ำต่อ 1 สิ่งทดลอง (4 replications / treatment)

5. การศึกษาผลผลิต กำหนดองค์ประกอบผลผลิตทั้งหมด 4 องค์ประกอบ คือ

5.1 จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น (Pods/plant)

5.2 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก (Seeds/pod)

5.3 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant)

5.4 น้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (100 – seed weight)

6. ปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนปลูก วิเคราะห์ธาตุอาหารในดิน คือ

- 6.1 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)
- 6.2 ไนโตรเจนรูปแบบที่มีประโยชน์ คือ NH_4^+ , NO_3^-
- 6.3 ฟอสฟอรัสรูปแบบที่มีประโยชน์ (Monohydrogen Phosphate : HPO_4^{2-})
- 6.4 โพแทสเซียมรูปแบบที่มีประโยชน์ (K^+)

7. การศึกษาสารอาหารสำคัญในเมล็ดถั่วเหลือง

- 7.1 โปรตีน
- 7.2 กรดอะมิโน 3 ชนิด
 - 7.2.1 Lysine acid
 - 7.2.2 Glycine acid
 - 7.2.3 Methionine acid

8. การศึกษาคุณสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ถั่วเหลือง ศึกษาในรูปแบบผลิตภัณฑ์แปรรูป คือ เต้าหู้แข็ง

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ตู้ทดลองระบบเปิดด้านบน (Open Top Chamber) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส หุ้มด้วยพลาสติกใสทั้งสี่ด้าน มีประตู และหลังคา กันน้ำฝน มีช่องระบายอากาศด้านบน ภายใน Open Top Chamber จะใช้ควบคุมระดับอุณหภูมิให้มีความแตกต่างกันโดยใช้ระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558)

2. อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อน ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนในที่นี้ หมายถึงระดับอุณหภูมิที่ได้รับการคาดการณ์จากภาพฉายอนาคต โดยภาพฉายอนาคต Representative Concentration Pathways (RCPs) ที่สะท้อนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันจนทำให้ค่าการแผ่รังสี (RF) และระดับอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่แตกต่างกันไปภายในปี ค.ศ. 2100 ซึ่ง RCPs ได้ถูกแบ่งตามแนวโน้มระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ภายในศตวรรษที่ 21 คือ RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2011 (ตัวเลข 2.6, 4.5, 6.0 และ 8.5 คือ ค่าการเพิ่มระดับ RF ที่ได้รับการคาดการณ์) และการศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มภาพฉายอนาคต RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 (Clarke et al., 2014)

3. ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เป็นพันธุ์ที่ได้จากการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างพันธุ์ Williams กับพันธุ์ สจ.4 และได้มีการรับรองจากกรมวิชาการเกษตร ปี พ.ศ.2530 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีลำต้นแข็งแรง จำนวนฝักต่อต้นมาก เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสม่ำเสมอทั้งฤดูแล้ง และฤดูฝน ทนทานต่อโรคราสนิม และต้านทานปานกลางต่อโรคใบจุดไหม และโรคราน้ำค้าง กรมวิชาการเกษตรจึงพิจารณาให้เป็นพันธุ์รับรอง เมื่อวันที่ 30 กันยายน 2530 (ธีรชัย อารยางกูร, 2541; ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่, 2560)

4. ภาพฉายอนาคต RCPs แบบจำลองสถานการณ์การแผ่ความร้อนของแรงแผ่รังสีความร้อน (RF) ในระดับพื้นผิวโลก เรียกว่า Representative Concentration Pathways (RCPs) ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์ซึ่งเกิดจากฐานรูปแบบการพัฒนาเศรษฐกิจ การใช้เทคโนโลยี และการใช้พลังงาน ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป RCPs สามารถแบ่งได้ 4 ระดับ ดังนี้ RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 (Clarke et al., 2014)

5. เต้าหู้แข็ง

การแปรรูปจากถั่วเหลืองให้มาเป็นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ ซึ่งวิธีการทำเต้าหู้ นั้นจะนำเมล็ดถั่วเหลืองมาล้างด้วยน้ำให้สะอาด แช่ว้ดน้ำทิ้งไว้ประมาณ 5-6 ชั่วโมง จากนั้นนำถั่วเหลืองมาผสมกันแล้วปั่นให้ละเอียด และนำมากรองเอากากของถั่วเหลืองออกจะได้เป็นน้ำเต้าหู้ แล้วนำไปต้มไฟอ่อนๆ จากนั้นเติมสารที่ช่วยในการทำให้ตกตะกอน เช่น กลุ่มซิลเฟต กลุ่มคลอไรด์ และนำตะกอนที่ได้มาใส่ลงไปในแบบพิมพ์ที่เตรียมไว้ ซึ่งรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อให้น้ำออกให้ตะกอนแห้ง และสามารถจับตัวกันมีลักษณะเป็นแผ่นหรือก้อน ขึ้นตอนสุดท้ายจะต้องเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 10 °C (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2546)

สมมติฐานของการวิจัย

การทดลองปลูกถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในระดับของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยตามแนวโน้มการเพิ่มระดับอุณหภูมิจากการคาดการณ์ในอนาคตภายใต้ภาพฉายอนาคต RCPs ที่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อผลผลิต โปรตีน กรดอะมิโนในถั่วเหลือง และคุณสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นตามแนวโน้มอุณหภูมิดังกล่าว

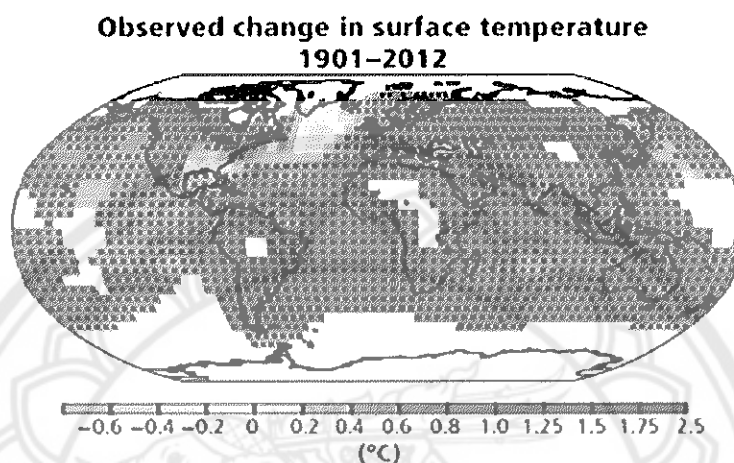
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสภาวะโลกร้อน

การเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศหมายถึง การเปลี่ยนแปลงใดๆ ของภูมิอากาศที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรง และทางอ้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) จากกิจกรรมการใช้พลังงาน เกษตรกรรม อุตสาหกรรม และอื่นๆ ที่ทำให้องค์ประกอบของบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไปที่สำคัญ คือ ระดับอุณหภูมิพื้นผิวโลกที่สูงขึ้นจนเกิดสภาวะโลกร้อน นอกเหนือจากการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติในเวลาเดียวกันในช่วงระยะเวลาต่อเนื่อง และยาวนาน (UNFCCC, 2011; กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) สาเหตุที่การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสภาวะโลกร้อน เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกที่ตกค้างในบรรยากาศมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นรังสีคลื่นยาวที่แผ่ความร้อนออกมาได้ทั้งช่วงคลื่น (สะท้อนจากพื้นผิวโลกเป็นส่วนใหญ่) และเมื่อโมเลกุลของก๊าซเรือนกระจกดูดกลืนรังสีอินฟราเรดระยะหนึ่งจนโมเลกุลสั่นสะเทือน (พบว่าโมเลกุลของก๊าซเรือนกระจกจะสั่นไหวได้โดยอุณหภูมิสูงจากรังสีอินฟราเรด) จะทำให้สะท้อนคลื่นรังสีอินฟราเรดทุกทิศทางกลับออกมาสู่บรรยากาศ ภาคพื้นดิน ภาคพื้นน้ำ รวมทั้งมหาสมุทรอีกครั้งจนอุณหภูมิในบรรยากาศ หรือระดับพื้นผิวโลกมีระดับความร้อน หรือที่เรียกว่าการแผ่รังสี (RF : Radiative forcing) สะสมเพิ่มขึ้น (IPCC, 2007) ซึ่งในระยะเวลากว่าสิบปีที่ผ่านมาพบว่า ค่า RF ในภาพรวมของโลกอันเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เพิ่มขึ้นประมาณ 2.29 W.m^{-2} ในปี ค.ศ. 2011 เมื่อเทียบกับปีฐาน ค.ศ. 1750 (IPCC, 2013) ซึ่งบ่งชี้ว่าการสะสมพลังงานความร้อนในบรรยากาศเพิ่มขึ้น (พีรายุ หงษ์กำเนิด, 2554; กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; อำนาจ ชิดไธสง และอัศมน ลิ้มสกุล, 2557; IPCC, 2013) ปัจจุบันนี้กิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั้งทางตรง และทางอ้อมยังคงส่งผลให้ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลกเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศอย่างต่อเนื่อง ตัวชี้วัดที่สำคัญ คือ ระดับอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้นธารน้ำแข็ง และพื้นที่น้ำแข็งปกคลุมลดลง ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น เป็นต้น (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) ขณะนี้มีรายงานจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภาวะโลกร้อนระบุว่า

ระดับความร้อนพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1850 (ภาพ 1) นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น 0.78°C ของช่วงปี ค.ศ. 1850-1900 และมีแนวโน้มที่อุณหภูมิเกือบทั่วโลกจะสูงมากเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปีฐาน ค.ศ. 1901 กับปี ค.ศ. 2012 (ภาพ 1) (IPCC, 2014)

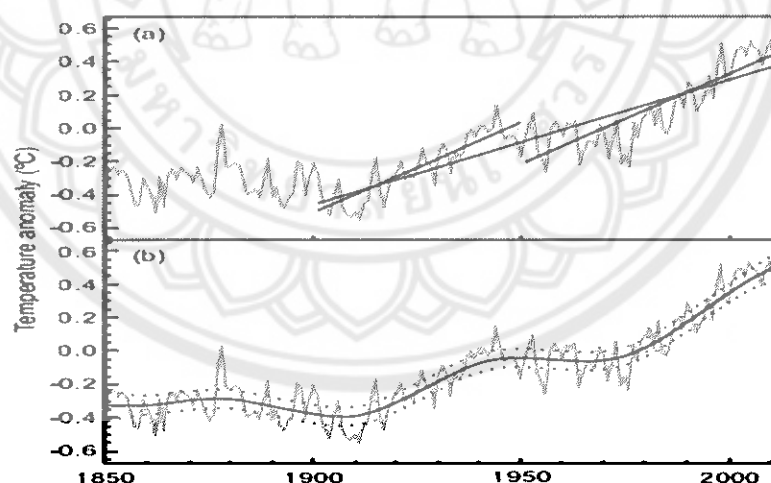


ภาพ 1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิวโลกที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงเปรียบเทียบระหว่างปีฐาน ปี ค.ศ. 1901 กับ ปี ค.ศ. 2012

ที่มา: IPCC, 2014

ประเด็นปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหลายทศวรรษโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโลกของเราได้เข้าสู่ยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรมมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมากขึ้น มีการบุกรุกแผ้วถางป่าเพื่อทำเป็นพื้นที่อุตสาหกรรม พื้นที่เกษตร พื้นที่เลี้ยงสัตว์ และที่อยู่อาศัย เศรษฐกิจมีการเจริญเติบโตมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี เพราะเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรโลก ซึ่งเป็นสาเหตุหลักๆ ที่ทำให้เกิดความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเพิ่มมากขึ้น และในปี ค.ศ. 1986 ที่ผ่านมามีการพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน ส่งผลทำให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น ไฟป่า ภัยแล้ง น้ำท่วม สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น นอกจากนี้การก่อตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่ไม่มีการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดีส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกยังคงสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และทำให้ปัญหาภาวะโลกร้อนนั้นยังคงเป็นปัญหาต่อไปทั้งปัจจุบัน และอนาคต ผลของการศึกษาของ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ซึ่งเผยแพร่ในรายงานการประเมินสถานการณ์

สภาพภูมิอากาศฉบับที่ 5 (AR5: The Fifth Assessment Report) ซึ่งเป็นฉบับล่าสุดในปี ค.ศ. 2013 (ฉบับก่อนหน้า คือ AR4: The Fourth Assessment Report ในปี ค.ศ. 2007) ได้พัฒนาระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความน่าเชื่อถือ และแม่นยำมากขึ้นในการใช้เป็นเครื่องคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เนื้อหาที่สำคัญประการหนึ่ง คือ ได้มีการยืนยันเช่นเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับกรายงานครั้งที่ผ่านมว่า กิจกรรมของมนุษย์ยังคงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงระยะเวลาเกือบ 100 ปีที่ผ่านมา (ภาพ 2) และจากการคาดการณ์ของหน่วยงาน IPCC ยังพบว่าระดับอุณหภูมิบางช่วงในระยะเวลา 10 ปี เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยในระยะยาว (ภาพ 2) ซึ่งเป็นผลมาจากเหตุการณ์ทางอุตุนิยมวิทยา และการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมบางประการ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในภาพรวมแล้วพบว่า ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบนิเวศในหลายภาคส่วน ทั้งระบบนิเวศภาคพื้นดิน ระบบนิเวศภาคพื้นสมุทร ระบบนิเวศน้ำจืด ระบบนิเวศชายฝั่ง รวมทั้งระบบนิเวศของมนุษย์ทำให้เกิดความแปรปรวนหรือความอ่อนแอจนทำให้เกิดความเสียหาย และมีความเสี่ยงหลายประการเพิ่มขึ้นในอนาคตอีกด้วย



ภาพ 2 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิวโลกจากข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 1961-1990

ที่มา: IPCC, 2013

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) เป็นหน่วยงานระหว่างรัฐบาล ที่ว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกก่อตั้งขึ้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1988 โดยได้รับการสนับสนุนจากองค์การสหประชาชาติ (The United Nations: UN) และเป็นหน่วยงานที่มีความสำคัญระดับโลก และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลโดยมีการอ้างอิงข้อมูลทางด้านวิชาการทั่วโลกในประเด็นเนื้อหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้าน และส่งผลกระทบต่อด้านเศรษฐกิจสังคมโลก IPCC จะมีการเผยแพร่ข้อมูลออกมาในทุกกรอบ 4-7 ปี โดยเรียกรายงานนี้ว่า IPCC Assessment Report (AR) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการออกรายงานมาทั้งหมด 5 ฉบับแล้ว และรายงานเล่มปัจจุบัน คือรายงานฉบับที่ 5 หรือ AR5 (The Fifth Assessment Report) เป็นรายงานฉบับล่าสุดซึ่งเผยแพร่ออกมาในปี ค.ศ. 2013-ค.ศ. 2014 ซึ่งในรายงานฉบับนี้ยังคงยืนยันว่ามนุษย์เป็นตัวการสำคัญที่ทำให้สภาพภูมิอากาศของโลกเปลี่ยนแปลงไปจนถึงขั้นวิกฤต (IPCC, 2013) โดยมีการทำนายโดยใช้ภาพฉายอนาคตที่เรียกว่า Representative Concentration Pathways (RCPs) ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นว่าในอนาคตแต่ละประเทศจะมีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่แตกต่างกันส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับที่ต่างกัน และส่งผลต่อค่าแรงแผ่รังสี (RF) ในแต่ละพื้นที่ต่างกันไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภูมิอากาศโลกภายในปี ค.ศ. 2100 ซึ่ง RCPs ได้ถูกแบ่งตามระดับค่าแรงแผ่รังสี และระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งแนวโน้มการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากฐานการพัฒนาประเทศในอนาคตเป็นตัวกำหนด คือ RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2011 ดังนี้ (IPCC, 2013)

RCP 2.6: peak scenario เป็นภาพฉายอนาคตที่พัฒนามาจากทิมวิจย IMAGE modeling องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นการแสดงเส้นทางระดับการปลดปล่อยค่า Radiative forcing ที่ระดับ 2.6 W.m^{-2} ซึ่งเป็นตัวแทนภาพฉายอนาคตในรูปแบบของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในความเข้มข้นระดับต่ำหรือถูกเรียกว่า peak scenario ค่า Radiative forcing เพิ่มขึ้นครั้งแรก และแตะระดับสูงสุดที่ 3.1 W.m^{-2} ภายในทศวรรษ จากนั้นจะลดลงกลับมาที่ระดับ 2.6 W.m^{-2} ภายในปี ค.ศ. 2100 ซึ่งหมายความว่า การเกิดขึ้นของสภาวะเช่นนี้ได้ นั้นจะต้องมีการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมลสารในอากาศอื่นๆ ที่จะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน RCP 2.6 แสดงถึงภาพฉายอนาคตที่มีการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างได้ผล จนส่งผลทำให้ค่า Radiative forcing เพิ่มขึ้นเพียง 2.6 W.m^{-2} ($2.3\text{-}2.9 \text{ W.m}^{-2}$) ในปี ค.ศ. 2100 โดยแสดงค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่ระดับ 430-480 ppm และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.0°C ในช่วงพิสัย 0.3-1.7 (Dettlef et al., 2007)

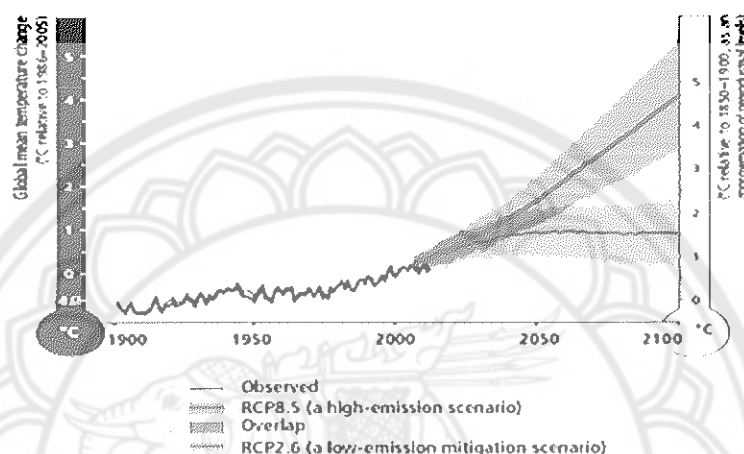
RCP 4.5: stabilization scenario ถูกพัฒนาโดย the MiniCAM modeling team at the Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute (JGCRI) เป็นภาพฉายอนาคตที่เรียกว่า stabilization scenario (ภาพฉายแบบเสถียร) เป็นสถานการณ์ที่รักษาระดับค่า Radiative forcing ให้มีความเสถียรก่อน ค.ศ.2100 โดยไม่เกินที่ระดับ 4.5 W.m^{-2} (ที่ระดับ $3.9\text{-}4.5 \text{ W.m}^{-2} / 4.5\text{-}5.1 \text{ W.m}^{-2}$) และค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 อยู่ที่ระดับ 580-650 ppm / 650-720 ppm เกิดจากการร่วมมือกันเพื่อกิจกรรม/นโยบาย และเทคโนโลยีที่นำไปสู่การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.8°C ในช่วงปี ค.ศ. 1.1-2.6 (Clarke et al., 2007; Wise et al., 2009)

RCP 6.0 stabilization scenario ถูกพัฒนามาจาก AIM modeling team at the National Institute for Environmental Studies (NIES) ประเทศญี่ปุ่น เป็นภาพฉายอนาคตที่เรียกว่า (stabilization scenario) เช่นเดียวกับ RCP 4.5 แต่สภาวะระดับ Radiative forcing จะเสถียรหลังจากปี ค.ศ. 2100 โดยไม่เกินที่ระดับ 6.0 W.m^{-2} ($5.1\text{-}6.8 \text{ W.m}^{-2}$) และค่าความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 อยู่ที่ระดับ 750-1,000 ppm ซึ่งสะท้อนการร่วมมือกันในด้านกิจกรรม/นโยบาย หรือเทคโนโลยีเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.2°C ในช่วงปี ค.ศ. 1.4-3.1 (Fujino et al., 2006; Hijioka et al., 2008; Masui et al., 2011)

RCP 8.5 ถูกพัฒนาโดย the MESSAGE modeling team and the IIASA Integrated Assessment Framework at the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria เป็นภาพฉายในรูปแบบสภาวะที่มีการเพิ่มระดับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้มีระดับก๊าซเรือนกระจกอยู่ในระดับสูง เป็นภาพสะท้อนการพัฒนาประเทศ และการพัฒนาเศรษฐกิจในระดับสูงมาก จนทำให้ค่าแรงแผ่รังสี Radiative forcing เพิ่มขึ้นเป็น 8.5 W.m^{-2} หรือมากกว่า 6.8 W.m^{-2} ขึ้นไป และความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 อยู่ที่ระดับมากกว่า 1,000 ppm และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.7°C ในช่วงปี ค.ศ. 2.6-4.8 (Riahi et al., 2007)

ในภาพ 3 แสดงการคาดการณ์ระดับอุณหภูมิ ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้สถานการณ์ RCP 2.6 และ RCP 8.0 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิจากปีฐานในช่วงปลายศตวรรษที่ 20 ไปจนถึงสิ้นศตวรรษที่ 21 เมื่อประเทศที่มีเทคโนโลยีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก หรือมีการใช้เทคโนโลยีที่สะอาด ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 2°C และเมื่อเปรียบเทียบกับภาพฉายอนาคตของ RCP 8.0 แสดงถึงประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และเทคโนโลยีขั้นสูงแต่ไม่เน้น

การใช้พลังงานทดแทนจากฟอสซิลจึงส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกมาในปริมาณสูง ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกือบ 4 °C ปัจจุบันนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง นักวิชาการ นักวิจัย รวมทั้งหน่วยงาน IPCC ได้ประยุกต์ใช้ภาพฉายอนาคต RCPs เพื่อคาดการณ์ผลกระทบต่อระบบนิเวศ ผลผลิตทางการเกษตร หรือแนวโน้มระดับอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ต่างๆ



ภาพ 3 ระดับแนวโน้มของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นภายใต้ภาพฉายอนาคต RCP 2.6 และ RCP 8.0 ในช่วงปี ค.ศ.2000-ค.ศ.2100

ที่มา: IPCC, 2014

ถั่วเหลือง (Soybean)

1. ข้อมูลทั่วไปของถั่วเหลือง

ถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) เป็นพืชตระกูลถั่วที่จัดว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของโลกรวมถึงประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในพื้นที่เขตอบอุ่น และพื้นที่เขตร้อน นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เนื่องจากว่าถั่วเหลืองเป็นธัญพืชที่เมล็ดสามารถนำมารับประทานได้ และเป็นพืชที่มีปริมาณโปรตีน และปริมาณน้ำมันในเมล็ดค่อนข้างสูง ปริมาณผลผลิตของถั่วเหลืองอยู่ที่ประมาณ 88 ล้านตัน และอยู่ในอันดับที่ 5 ของโลก ซึ่งนิยมปลูกมากกว่าพืชตระกูลถั่วชนิดอื่น นอกจากนี้ยังสามารถนำมาแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์ในแง่ของโภชนาการ หรือนำมาแปรรูปเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ ประเทศที่นิยมแปรรูปผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง และนิยมบริโภคจะอยู่ในแถบเอเชีย ได้แก่ ไทย จีน ไต้หวัน อินเดีย อินโดนีเซีย

และญี่ปุ่น ดังนั้นพืชตระกูลถั่วเหลืองจึงนับได้ว่าเป็นพืชทางเศรษฐกิจของโลก และในอนาคต ข้างหน้าประชากรของโลกจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 3,000 ล้านคน ทั้งนี้จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณอาหารให้เพียงพอกับจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น โปรตีนก็เป็นสารอาหารที่จำเป็นของมนุษย์ที่ควรจะได้รับ แต่ในปัจจุบันมีพื้นที่ในการปลูกถั่วเหลืองน้อยลง ส่งผลให้ทั่วโลกขาดแคลนผลผลิตของถั่วเหลือง รวมไปถึงประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบเช่นกัน (อภิพรพรณ พุกภักดี, 2546)

ถั่วเหลืองนิยมปลูกกันในหลายพื้นที่ของโลก (ตาราง 1) และรวมทั้งโลกนั้นพื้นที่ที่มีการเก็บเกี่ยวมากที่สุด คือ ปี พ.ศ.2557 มีพื้นที่ทั้งหมด 735 ล้านไร่ ส่งผลให้มีผลผลิตมากถึง 308 ล้านตัน และผลผลิตต่อไร่ 419 กิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าผลผลิต และพื้นที่เก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นในทุกปี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2555 สาเหตุนี้แสดงให้เห็นว่าทั่วโลกมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ถั่วเหลืองยังเป็นพืชที่สำคัญมีสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย ดังนั้นในอนาคตอาจทำให้เกษตรกรหันมาปลูกถั่วเหลืองมากขึ้น ทั้งนี้ยังชี้ได้ว่าประเทศสหรัฐอเมริกามีการปลูกถั่วเหลืองมากที่สุด รองลงมา คือ ประเทศบราซิลเนื่องจากมีการเพิ่มจำนวนของประชากร ส่วนประเทศไทยนั้นมีพื้นที่ปลูกถั่วเหลืองน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ.2555-2557 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่เพาะปลูกภายในประเทศไทยพบว่า ภาคเหนือเป็นพื้นที่ที่นิยมปลูกถั่วเหลืองมากที่สุด (ตาราง 2) และรองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558)

ตาราง 1 พื้นที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ 10 อันดับแรก ปี 2555-2557

ประเทศ	พื้นที่เก็บเกี่ยว (1,000 ไร่)			ผลผลิต (1,000 ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)		
	2555	2556	2557	2555	2556	2557	2555	2556	2557
รวมทั่วโลก	658,849	697,886	735,928	241,580	278,092	308,439	367	398	419
สหรัฐอเมริกา	192,868	192,868	210,087	82,791	91,389	108,014	430	474	514
บราซิล	156,095	174,417	189,211	65,849	81,724	86,761	422	469	459
อาร์เจนตินา	109,858	121,368	120,328	40,100	49,306	53,398	365	406	444
จีน	44,820	42,444	42,067	13,011	11,951	12,201	290	282	290
อินเดีย	67,750	76,250	68,175	14,666	11,948	10,528	216	157	154
ปากากัว	18,250	19,250	21,875	4,345	9,086	9,975	238	472	456
แคนาดา	10,494	11,626	13,969	5,086	5,359	6,049	485	461	433
ยูเครน	8,828	8,444	11,206	2,410	2,774	3,882	273	329	346
โบลีเวีย	8,080	8,299	8,492	2,662	2,968	3,275	329	358	386
อุรุกวัย	5,523	6,563	8,259	2,112	2,765	3,163	382	421	383
ไทย	243	193	219	64	53	58	261	274	263
อื่นๆ	36,248	36,164	42,072	8,237	8,629	11,006	227	239	262

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558

ตาราง 2 พื้นที่ ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาคปี 2557-2558

ภาค/จังหวัด	พื้นที่เพาะปลูก (ไร่)		พื้นที่เก็บเกี่ยว (ไร่)		ผลผลิต (ตัน)		ผลผลิตต่อไร่ (กก.)	
	2557	2558	2557	2558	2557	2558	2557	2558
รวมทั้งประเทศ	237,021	217,171	219,174	213,969	57,626	56,963	263	266
เหนือ	173,907	155,276	156,640	152,832	42,342	42,133	270	276
ตะวันออกเฉียงเหนือ	63,114	61,895	62,534	61,137	15,284	14,830	244	243
กลาง	0	0	0	0	0	0	0	0

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558

2. อนุกรมวิธาน ถั่วเหลืองเป็นพืชล้มลุกใบเลี้ยงคู่ จัดอยู่ใน Family Fabaceae ชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Glycine max* (L.) Merrill สามารถจัดจำแนกตามลำดับชั้นของอนุกรมวิธาน (taxonomic rank) ได้ดังนี้

ตาราง 3 อนุกรมวิธานของถั่วเหลืองจำแนกตามพฤกษศาสตร์

Kingdom	Plantae
Division	Spermatophyta
Class	Dicotyledoneae
Order	Polypetalae
Family	Fabaceae
Genus	<i>Glycine</i>
Species	<i>Glycine max</i>

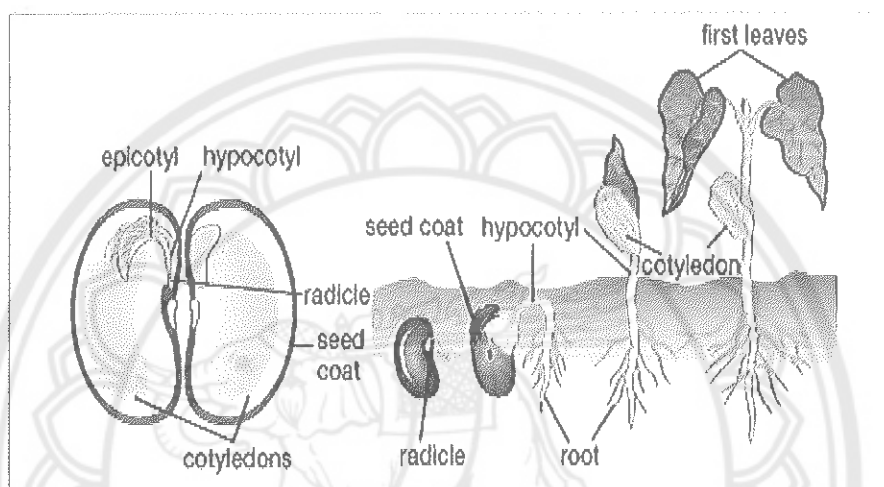
ที่มา: อภิพรรณ พุกภักดี, 2546

3. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของถั่วเหลือง

3.1 ราก เป็นระบบรากแก้ว (tap root system) สามารถหยั่งลึกลงไปใต้ดินได้ถึง 150 เซนติเมตร รากส่วนใหญ่พบว่า อยู่ลึกลงไปใต้ดินประมาณ 60 เซนติเมตร จากผิวดิน และในส่วนของรากแขนงที่แตกออกจากรากแก้วนั้นสามารถเจริญเติบโตในแนวขนานกับผิวดินได้ถึง 150 เซนติเมตร ห่างออกจากรากลำต้น และรากยังทำหน้าที่ดูดซับธาตุอาหาร น้ำ และสามารถสร้างปมของเชื้อไรโซเบียม (*Rhizobium* spp.) เมื่อเจริญเติบโตเต็มทีรากแขนง และรากแก้วจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้รากจะหยุดการเจริญเติบโตในช่วงการเจริญพันธุ์ (reproductive growth) หรือในช่วงที่เมล็ดเริ่มสะสมอาหาร

3.2 ลำต้น มีลักษณะตั้งตรงเป็นพุ่มสูงประมาณ 50-150 เซนติเมตร และแตกแขนงจำนวนมาก ส่วนของลำต้นประกอบด้วย ใบเลี้ยง (cotyledon) ส่วนที่อยู่ใต้ใบเลี้ยง (hypocotyl) ส่วนที่อยู่เหนือใบเลี้ยง (epicotyl) และมีขนอ่อน (trichome หรือ hair) ปกคลุมทั่วไป ยกเว้นใบเลี้ยงและกลีบดอก (ภาพ 4) การเจริญเติบโตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การเจริญเติบโตแบบทอดยอด (Indeterminate type) และการเจริญเติบโตแบบไม่ทอดยอด (Determinate type)

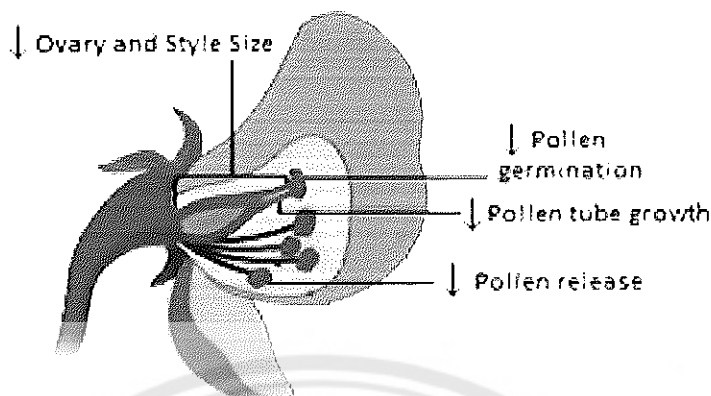
3.3 ใบ ระยะต้นอ่อนจะมีใบเลี้ยงที่โผล่ขึ้นมาเหนือพื้นดินเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง และเจริญเติบโตไปเป็นใบจริง ต่อมาจะกลายเป็นใบประกอบ 3 ใบย่อย (trifoliage compound leaves) คือ มีใบย่อยด้านปลาย 1 ใบ ใบย่อยด้านข้างอีก 2 ใบ ลักษณะของใบเป็นรูปไข่ ส่วนที่โคนของก้านใบประกอบจะมีหูใบ 2 อัน และส่วนที่โคนของก้านใบย่อยมีหูใบย่อย 1 อัน ผิวใบมีขนสีน้ำตาลปกคลุมอยู่ทั่วไป (ภาพ 4)



ภาพ 4 การเจริญเติบโตของตัวเหลือง

ที่มา: John Heslop-Harrison, 2017

3.4 ดอก เกิดเป็นช่อกลีบดอกมีสีม่วง หรือสีขาว ไม่มีขน เมื่อดอกบานเต็มที่จะมีขนาดประมาณ 3-8 เซนติเมตร ส่วนประกอบของดอกจะมีกลีบเลี้ยง (Calyx) 5 กลีบ กลีบดอก (Corolla) 5 กลีบ โดยมีกลีบดอกทางด้านบน 1 กลีบ มีขนาดใหญ่และแผ่ออก เรียก standard (ภาพ 5) กลีบดอก 2 กลีบทางด้านข้าง แผ่ออกคล้ายปีกเรียกว่า wing และกลีบดอก 2 กลีบทางด้านล่าง เชื่อมติดกันเรียกว่า keels ห่อหุ้มเกสรทั้งสองเพศไว้ เกสรเพศผู้ (Stamen) จำนวน 10 อัน และเกสรเพศเมีย (Pistil) จำนวน 1 อัน ภายในมีออวูล (ovule) เรียงเป็นแถวเดียวทางด้านข้าง (marginal placentation)



ภาพ 5 ดอกของถั่วเหลือง

ที่มา: Annie et al., 2019

3.5 ฝักและเมล็ด เปลือกฝักอ่อนมีลักษณะเป็นสีเขียวเมื่อฝักแก่จะมีลักษณะฝักเป็นสีน้ำตาลหรือดำ เมล็ดจะมีรูปร่างกลมรียาวประมาณ 2-7 เซนติเมตร ในฝักหนึ่งจะมีเมล็ด 1-5 เมล็ด ขนาดและน้ำหนักของเมล็ดมักจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ของถั่วเหลืองที่แตกต่างกัน (อภิพรรณ พุกภักดี, 2546; สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุโขทัย, 2560)

4. การเจริญเติบโตทางต้นของถั่วเหลือง มีการเจริญเติบโตอยู่ 2 แบบ ดังนี้

4.1 การเจริญเติบโตแบบทอดยอด (Indeterminate) เป็นการเจริญเติบโตของลำต้นที่ไม่สิ้นสุดในขณะที่ถั่วเหลืองเริ่มเข้าสู่ระยะออกดอก และในขณะที่ถั่วเหลืองเริ่มออกดอกไปจนถึงระยะสิ้นสุดการออกดอก การเจริญเติบโตของลำต้นจะสิ้นสุดลงทันที ซึ่งสามารถสังเกตได้ดังนี้

4.1.1 การออกดอกของถั่วเหลืองในต้นเดียวกันมักจะออกดอกไม่พร้อมกัน โดยดอกแรกจะบานตั้งแต่ข้อล่างๆ และทยอยบานขึ้นด้านบน ในขณะที่ลำต้นมีการเจริญเติบโตและสร้างใบเพิ่มขึ้น

4.1.2 เมื่อดอกถั่วเหลืองบานไปจนถึงยอดด้านบนของลำต้น การเจริญเติบโตทางลำต้นของถั่วเหลืองจะเริ่มหยุดการเจริญเติบโต ถือว่าเป็นการสิ้นสุดการเจริญเติบโตทางลำต้นทันที

4.1.3 เมื่อดอกของต้นถั่วเหลืองบานไม่พร้อมกันการเจริญเติบโตของฝักและเมล็ดก็จะสุก และแก่ไม่พร้อมกัน

4.2 การเจริญเติบโตแบบไม่ทอดยอด (Determinate) เป็นการเจริญเติบโตของลำต้นที่สิ้นสุดลงในขณะที่ถั่วเหลืองเริ่มเข้าสู่ระยะออกดอก และหลังจากที่ถั่วเหลืองเริ่มออกดอกแล้วพืชจะมีการเจริญพันธุ์ทันที เช่น การสร้างเมล็ด ซึ่งสามารถสังเกตได้ดังนี้

4.2.1 ถั่วเหลืองจะออกดอกพร้อมกันทั้ง ต้นจนพัฒนาเป็นช่อใหญ่ ระยะการออกดอกจะใช้เวลา 1-2 วัน ถั่วเหลืองก็จะออกดอกพร้อมกันทั้งต้น

4.2.2 ผลผลิตที่สูงแก่เต็มที่ในเวลาที่จะพร้อมกันจะส่งผลให้สะดวกในการเก็บเกี่ยว

5. ระยะการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง แบ่งได้ 2 ระยะ ดังนี้

5.1 ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative stages) เริ่มนับตั้งแต่ระยะที่พืชโผล่พื้นดิน (VE) และระยะใบเลี้ยง (VC) ในระยะการเจริญเติบโตจะถูกกำหนดโดยข้อ (node) ซึ่งจะเริ่มจากที่ระยะ V_1 ถึงระยะ $V_{(n)}$ ซึ่งระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นได้แสดงไว้ในตาราง 4 ดังนี้

ตาราง 4 ระยะการเจริญเติบโตของ V-stage ในถั่วเหลือง

Growth stage	ระยะการเจริญเติบโต	รายละเอียด
VE	ระยะโผล่พื้นดิน (emergence)	ใบเลี้ยงพอง โผล่และอยู่เหนือผิวดิน
VC	ระยะใบเลี้ยง (cotyledon)	ใบประกอบเริ่มคลี่กางและขอบใบประกอบไม่แตะกัน
V_1	ระยะข้อที่ 1 (first node)	ใบประกอบที่กางเต็มที่ในข้อที่ 1
V_2	ระยะข้อที่ 2 (second node)	ใบจริงที่ 1 (1^{st} trifoliate leaf) คลี่กางออกในข้อที่ 2
V_3	ระยะข้อที่ 3 (third node)	ต้นถั่วเหลืองมีข้อ 3 ข้อ แล้วบนลำต้นและในข้อที่ 3 จะมีใบจริงที่ 2 คลี่กางออก
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$V_{(n)}$	ระยะข้อที่ (n) (n-node)	(n) เท่ากับลำดับข้อบนลำต้นที่มีใบจริงคลี่กางออกเต็มที่

ที่มา: Fehr and Caviness, 1977

5.2 ระยะการเจริญพันธุ์ (Reproductive stage) เริ่มนับตั้งแต่ถั่วเหลืองเข้าสู่ระยะออกดอก ออกฝัก เมล็ดเริ่มมีการพัฒนาไปจนถึงเมล็ดสุกแก่ และในระยะการเจริญเติบโตนี้จะถูกกำหนดด้วยตัวย่อ R แล้วตามด้วยเลข 1, 2, 3, (n) ซึ่งระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นได้แสดงไว้ในตาราง 5 ดังนี้

ตาราง 5 ระยะการเจริญเติบโตของ R-stage

Growth stage	ระยะการเจริญเติบโต	รายละเอียด
R ₁	เริ่มออกดอก (beginning bloom)	มีดอกบานหนึ่งดอกบนข้อใดๆ ก็ตามบนลำต้น
R ₂	ออกดอกเต็มที่ (full bloom)	มีดอกบานที่ข้อใดข้อหนึ่งบนข้อบนสุดสองข้อที่มีใบคลักงเต็มที่
R ₃	เริ่มติดฝัก (beginning pod)	ฝักยาวขนาด 5.0 มม. ปรากฏขึ้นที่ข้อใดข้อหนึ่งบนข้อบนสุด 4 ข้อ
R ₄	ติดฝักเต็มที่ (full pod)	ฝักยาวขนาด 2.0 ซม. ปรากฏขึ้นที่ข้อใดข้อหนึ่งบนข้อบนสุด 4 ข้อ
R ₅	เริ่มติดเมล็ด (beginning seed)	เมล็ดยาวขนาด 3.0 มม. ในฝักที่ติดอยู่ในข้อใดข้อหนึ่งบนข้อบนสุด 4 ข้อ
R ₆	เมล็ดพัฒนาเต็มที่ (full seed)	ฝักซึ่งมีเมล็ดสีเขียวเจริญเติบโตจนเต็มช่องว่างของฝักปรากฏให้เห็นในข้อใดข้อหนึ่ง 4 ข้อบนสุดของลำต้น
R ₇	เริ่มสุกแก่ (beginning maturity)	ฝักใดฝักหนึ่งเริ่มเป็นสีน้ำตาล หรือน้ำตาลไหม้
R ₈	สุกแก่เต็มที่ (full maturity)	95% ของฝักเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล หรือน้ำตาลไหม้

ที่มา: Fehr and Caviness, 1977

6. ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ได้มีการรับรองจากกรมวิชาการเกษตรในปี พ.ศ.2530 แล้วว่าลักษณะของลำต้นแข็งแรงมีการเจริญเติบโตแบบไม่ทอดยอด ดอกเป็นสีขาว เมล็ดมีผิวมัน สีเหลือง และลักษณะของตาเป็นสีน้ำตาล ให้ผลผลิตค่อนข้างสูงประมาณ 246 กิโลกรัม/ไร่ เมล็ดมีปริมาณน้ำมันถึง 20 % และปริมาณโปรตีน 43.8 % ทนต่อโรคราสนิม และใบจุดนูน สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้เร็วจึงส่งผลให้ปลูกได้ทั้งฤดูแล้ง และฤดูฝน ทั้งนี้ต้องระวังในการปลูกในดินที่ค่อนข้างเหนียว เพราะถ้าน้ำขังแล้วเมล็ดจะไม่งอกและเน่า สามารถเก็บเกี่ยวได้ใน 3 เดือน หรือ 90 วัน นอกจากนี้ยังนิยมปลูกนิยมปลูกเป็นอันดับต้นๆ ของชาวเกษตรกรภาคเหนือ (เลียรชัย อารยางกูร, 2541; วัชร ปานพรม, 2557; ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่, 2560)

7. องค์ประกอบเกี่ยวกับโภชนาการของถั่วเหลือง เมล็ดถั่วเหลืองมีปริมาณน้ำมันและโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ โดยทั่วไปถั่วเหลืองจะให้ผลผลิตที่สูง มีปริมาณโปรตีนในเมล็ดประมาณ 40-42 % และมีปริมาณของน้ำมันประมาณ 20-22 % เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันก๊าด นอกจากนี้อโปรตีนในถั่วเหลืองยังนับได้ว่ามีกรดอะมิโน หรือสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายของมนุษย์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (ตาราง 6) จะเห็นได้ว่าการนำพืชถั่วเหลืองมาเป็นส่วนประกอบในการทำอาหารจะทำให้มนุษย์ได้รับโปรตีนที่สมบูรณ์ และได้รับสารอาหารที่เพียงพอต่อร่างกาย ตามเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ นอกจากนี้ในถั่วเหลืองยังมีน้ำมันในปริมาณที่สูง ซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว และเป็นกรดไขมันที่เป็นประโยชน์หรือจำเป็นต่อร่างกาย (essential fatty acid) ได้แก่ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) ที่มีกรดไขมันโอเมก้า 3 และกรดลิโนเลนิกที่เป็นกรดไขมันโอเมก้า 6 ในปริมาณสูง ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการสร้างเสริม และการเจริญเติบโตของเด็กทารก และเด็กในช่วงวัยที่เจริญเติบโต ดังนั้นจึงเป็นน้ำมันที่ดี และมีประโยชน์ต่อสุขภาพ (อภิพรธ พุกภักดี, 2546)

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการค่อนข้างสูงมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมากมาย เช่น โปรตีน ไขมัน วิตามิน แร่ธาตุ คาร์โบไฮเดรตต่างๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับถั่วชนิดอื่นๆ ก็ถือได้ว่าถั่วเหลืองมีคุณค่าทางสารอาหารมากกว่าถั่วชนิดอื่น ปริมาณของโปรตีนอาจจะน้อยกว่าโปรตีนในเนื้อสัตว์ถึงแม้ว่าจะมีกรดอะมิโนที่จำเป็นครบ 8 ชนิด แต่ก็มีในปริมาณที่น้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายมนุษย์ เพราะร่างกายนั้นจะต้องใช้โปรตีนในกระบวนการย่อย และดูดซึม ฉะนั้นมนุษย์จึงต้องหาพืชชนิดอื่นๆ มารับประทานเสริมไปด้วย เช่น ข้าว งาม ข้าวโพด เป็นต้น (สุมาลี ทองแก้ว, 2541)

ตาราง 6 กรดอะมิโนต่างๆ ในเมล็ดถั่วเหลือง แป้งถั่วเหลือง อาหารชั้น และส่วนที่แยก
เป็นอิสระ เมื่อเทียบกับปริมาณที่องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ
(FAO) กำหนดเป็นมาตรฐานของอาหารที่มีคุณภาพดี

กรดอะมิโน (g/100g)	มาตรฐาน FAO (g/100g)	ถั่วเหลือง			แยก ออกเป็น อิสระ (g/100g)
		เมล็ด	แป้ง	อาหารชั้น	
		(g/100g)	(g/100g)	(g/100g)	
Cystine	4.2	1.3	1.6	1.6	1.3
Isoleusine	4.2	4.5	4.7	4.8	4.9
Leusine	4.8	7.8	7.9	7.8	7.8
Lysine	4.2	6.4	6.3	6.3	6.4
Methionine	2.2	1.3	1.4	1.4	1.3
Phenylalanine	2.8	4.9	5.3	5.2	5.4
Theonine	2.8	3.9	3.9	4.2	3.6
Tryptophan	1.4	1.3	1.3	1.5	1.4
Tyrosine	2.8	3.1	3.8	3.9	4.3
Valine	4.2	4.8	5.1	4.9	4.7

ที่มา: Weingartner, 1987

โปรตีนและกรดอะมิโน

1. โปรตีน เป็นสารอินทรีย์ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ และสามารถให้พลังงานได้โดยโปรตีน 1 กรัม จะให้พลังงานทั้งหมด 4 แคลอรี โปรตีนเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญอีกประการหนึ่งของร่างกาย และเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น เอนไซม์ ฮอร์โมน ภูมิคุ้มกันโรค เซลล์เม็ดเลือดแดง และเซลล์เม็ดเลือดขาว ซึ่งในร่างกายของคนเรานั้นจะมีโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบในร่างกายประมาณ 19 % ของน้ำหนักตัว โปรตีนมีหน้าที่ช่วยซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอของร่างกาย และช่วยให้อวัยวะต่างๆ ทำงานเป็นปกติ สำหรับแหล่งโปรตีนที่สำคัญหลักๆ จะมาจากเนื้อสัตว์ต่างๆ และจากพืชตระกูลถั่วต่างๆ เช่น ถั่วเหลืองถือได้ว่าเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญจากพืชอีกชนิดหนึ่ง

และมีความสำคัญทางด้านอาหาร รวมทั้งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของโลก เมื่อรับประทานอาหารประเภทโปรตีนเข้าไปร่างกายจะย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโนที่เป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดเพื่อไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกาย นอกจากนี้โปรตีนยังเป็นสารประกอบพื้นฐานที่สำคัญของวิตามินอีกด้วย โปรตีนมีโครงสร้างทางเคมีโมเลกุลที่มีกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ และสายพอลิเพปไทด์ 1 สาย จะมีโครงสร้างทั้งหมด 4 ระดับ ได้แก่

1.1 โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของการสร้างโปรตีนที่เกิดจากจำนวนของกรดอะมิโนหลายๆ ชนิดเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์แล้วได้สายพอลิเพปไทด์ 1 สาย โดยปลายอีกข้างหนึ่งเป็น amino end และปลายอีกข้างหนึ่งเป็น carboxyl end (ภาพ 6)

1.2 โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากกรดอะมิโนที่อยู่ในสายพอลิเพปไทด์เดียวกันทำปฏิกิริยากันด้วยพันธะไฮโดรเจน จนทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติของโปรตีนขึ้น แบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

1.2.1 แบบเกลียวอัลฟา (alpha helix) มีลักษณะเป็นเกลียวยาวเหมือนสปริง จะเกิดจากการบิดของสายพอลิเพปไทด์หลายแบบ ซึ่งในหนึ่งรอบเกลียวจะมีกรดอะมิโนมากถึง 3.6 ตัว และเกลียวอัลฟานี้ยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานของโปรตีนแบบเส้นใย (fibrous protein) และโปรตีนแบบก้อนกลม (globular protein)

1.2.2 แบบเบต้าชีต (beta sheets) หรือแบบ sheet ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นที่สายพอลิเพปไทด์บิดทับซ้อนกันไปมา (ภาพ 6)

1.3 โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary structure) เป็นโครงสร้างสามมิติของสายพอลิเพปไทด์ที่เกิดหลังจากโครงสร้างทุติยภูมิ เกิดจากพันธะต่างๆ ภายในสายพอลิเพปไทด์ระหว่างหมู่ R (side chain) ของกรดอะมิโนในสายเดียวกัน แบ่งออกเป็น 4 แบบ คือ

1.3.1 แรงอิเล็กโตรสแตติก แบ่งเป็น 3 ประเภท

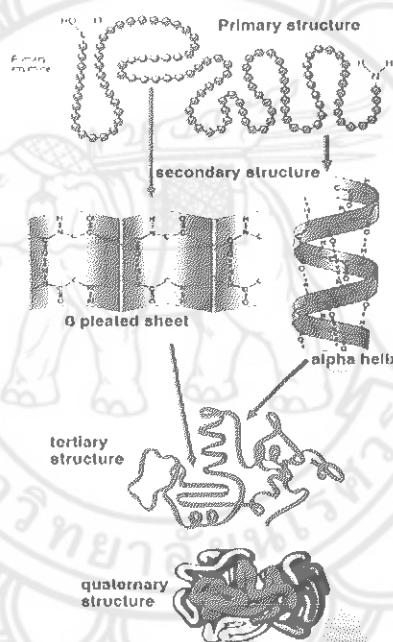
- 1) แรงระหว่างประจุ
- 2) แรงระหว่างประจุกับขั้ว
- 3) แรงระหว่างขั้ว

1.3.2 พันธะไฮโดรเจน เป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ R ในสายเดียวกันที่ไม่ใช่ภายในแกนของสายโปรตีน

1.3.3 แรงไฮโดรโฟบิก เป็นแรงที่ทำให้โครงสร้างสามมิติเสถียร เกิดจากหมู่ R ที่เป็นกรดอะมิโนไม่ชอบน้ำ เมื่อโปรตีนอยู่ในน้ำจะทำให้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำเกิดแรงกระทำระหว่างกัน

1.3.4 แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่เป็นทั้งแรงดูด และแรงผลัก ซึ่งแรงแวนเดอร์วาลส์นี้จะมาจากกรดอะมิโนหมู่ R เป็นหมู่ไฮโดรคาร์บอน เมื่อมีจำนวนที่เพียงพอจะเกิดการคงสภาพภายในโครงสร้างได้ (ภาพ 6)

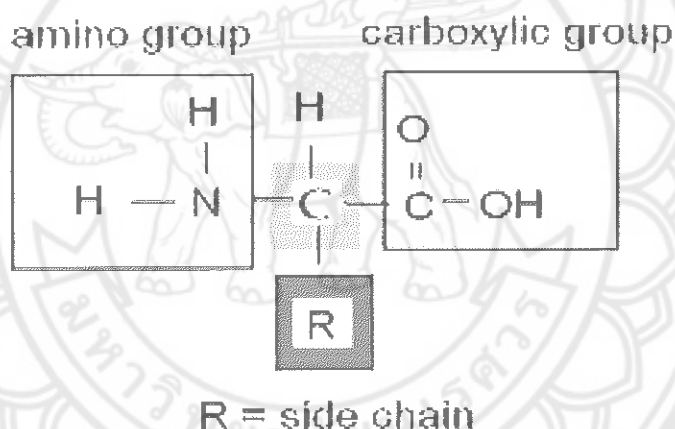
1.4 โครงสร้างจตุรภูมิ (Quaternary structure) เป็นโครงสร้างโปรตีนที่เกิดการรวมตัวของสายพอลิเปปไทด์มากกว่า 1 สาย ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างหมู่ R กับสายพอลิเปปไทด์ที่ยังไม่เกิดพันธะ (ภาพ 6) (สุมาลี ทองแก้ว, 2541; อวยพร อภิรักษ์อร่ามวง, 2549)



ภาพ 6 โครงสร้างของโปรตีนจตุรภูมิ

ที่มา: Campbell, & Reece, 2005

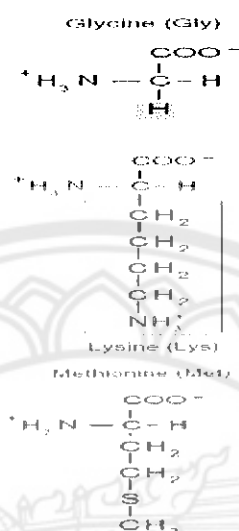
2. กรดอะมิโน เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของโปรตีน (protein) และมีอยู่ในโปรตีนประมาณ 20 ชนิด นอกจากนี้กรดอะมิโนยังมีการต่อเชื่อมกันกลายเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ กรดอะมิโนส่วนใหญ่ได้มาจากการไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) จึงกลายเป็นโปรตีนอย่างสมบูรณ์ และกรดอะมิโนมีโครงสร้างทั้งหมด 7 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่ม aliphatic side chain, กลุ่ม side chain ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล, กลุ่ม side chain ที่มีซัลเฟอร์, กลุ่ม side chain ที่มีหมู่กรด, กลุ่ม side chain ที่มีหมู่เบส, กลุ่ม side chain เป็นวงแหวนอะโรมาติก นอกจากนี้กรดอะมิโนยังถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กรดอะมิโนชนิดที่จำเป็น และกรดอะมิโนชนิดที่ไม่จำเป็น (สันทนา สุธาดำรัตน์, 2536) ในถั่วเหลืองนั้นยังมีกรดอะมิโนที่จำเป็น และไม่จำเป็นรวม 19 ชนิด และนอกจากนี้องค์ประกอบของกรดอะมิโนยังได้ถูกกำหนดตามเกณฑ์ของ The Food and Nutrition Board of the National Research Council หรือ FNB (ภาพ 7) (Francis et al., 1999; อวยพร อภิรักษ์อร่ามวง, 2549)



ภาพ 7 โครงสร้างของกรดอะมิโน

ที่มา: Campbell, & Reece, 2005

กรดอะมิโนในถั่วเหลืองที่ทำการศึกษานในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กรดอะมิโน 3 ชนิด คือ Glycine acid, Lysine acid และ Methionine acid (ภาพ 8)



ภาพ 8 โครงสร้างของกรดอะมิโน Glycine Lysine และ Methionine

ที่มา: Campbell, & Reece, 2005

การแปรรูปผลิตภัณฑ์

1. คุณลักษณะของเต้าหู้ เต้าหู้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากถั่วเหลือง ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนแข็ง หรืออ่อนนุ่ม มีสีขาวอ่อน ตัวของเต้าหู้จะไม่มีรสชาติ และนอกจากนี้เต้าหู้ยังให้พลังงานต่ำ มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และมีสารอาหารประเภทโปรตีนสูงเช่นเดียวกับเนื้อสัตว์ นิยมในการนำมาปรุงอาหารเพื่อสุขภาพอีกด้วย และลักษณะของเต้าหู้สามารถแบ่งตามลักษณะเนื้อสัมผัสได้ 3 ชนิด ดังนี้ (จันทร์ วรากุลเทพ และคณะ, 2546; อุบล ดีสวัสดิ์, 2546)

1.1 เต้าหู้แข็ง (Hard or extra firm tofu) มีลักษณะเป็นเนื้อแข็ง ซึ่งวิธีการทำจะใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือแมกนีเซียมซัลเฟตที่ช่วยให้เกิดการตกตะกอนโปรตีนของน้ำนมถั่วเหลืองที่ผ่านความร้อน และนำมากรองใส่ผ้าขาวบางแล้วใช้ของหนักกดทับน้ำออกจะได้เต้าหู้แข็งสีขาว

1.2 เต้าหู้อ่อน (Soft or firm tofu) มีลักษณะสีขาวนวล วิธีการทำเช่นเดียวกับการทำเต้าหู้แข็งใช้เจียะกอ หรือแคลเซียมซัลเฟตในการตกตะกอนโปรตีน การกดทับจะใช้น้ำหนักที่น้อยกว่าเต้าหู้แข็ง เต้าหู้ที่ได้จะมีลักษณะของเนื้อที่อ่อนนุ่มกว่าเต้าหู้แข็ง

1.3 เต้าหู้หลอด (Bagged or silken tofu) มีลักษณะเนื้อนุ่ม สีขาวนวล ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับเต้าหู้อ่อน วิธีการทำจะนำน้ำนมถั่วเหลืองบรรจุลงไปในหลอดพลาสติกสูญญากาศ พร้อมกับตกตะกอนของโปรตีนด้วยกลูโคโนเดลต้าแลคโตน (glucono-delta-lactone) โดยไม่กดทับน้ำออก ทำให้เต้าหู้มีความชื้น และลื่นกว่าเต้าหู้อ่อน

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของเต้าหู้แข็งเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ และต้องมีลักษณะทั่วไป คือ เป็นแผ่น หรือเป็นก้อนไม่แตกออกจากกันจับตัวเป็นก้อนได้ค่อนข้างดี ลักษณะของสีจะต้องขาวนวล มีกลิ่นรสที่ดีตามส่วนประกอบที่ใช้ ไม่มีกลิ่นบูด รสขม รสเปรี้ยว ลักษณะของเนื้อสัมผัสต้องเนียน ไม่ละเอียด หรือมีฟองอากาศ นอกจากนี้จะต้องไม่มีสิ่งแปลกปลอม เช่น เส้นผม ดิน ทราาย เป็นต้น ปริมาณของโปรตีน และกรดอะมิโนในถั่วเหลืองส่งผลต่อปัจจัยที่สำคัญในการแปรรูปผลิตภัณฑ์เต้าหู้แผ่น โดยถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนมากจะเป็นตัวที่ทำให้น้ำนมถั่วเหลืองที่ได้จากการปั่น และกรองมาเป็นน้ำนมถั่วเหลืองมีลักษณะที่เป็นลิ่ม ซึ่งมาจากการตกตะกอน ดังนั้นปริมาณโปรตีนจึงมีผลต่อการผลิตเต้าหู้ให้แข็งตัว หรือมีลักษณะเป็นเคิร์ด นอกจากนี้ยังมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ที่บ่งบอกได้ว่ามีลักษณะหยาบ หรือละเอียด (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2546)

เต้าหู้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากถั่วเหลืองซึ่งเป็นที่นิยมในประเทศจีน และประเทศแถบเอเชีย นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากถั่วเหลืองยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีน และลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้นั้นจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ (Zuo et al., 2016)

ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อสรีรวิทยาของพืช

1. ผลกระทบต่อสรีรวิทยาทั่วไปของพืช พืชทุกชนิดจะมีการตอบสนองต่อปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายนอกอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแสงก็เป็นปัจจัยหนึ่งของพืชที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อควบคุมให้พืชมีการเจริญเติบโตตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกไปจนถึงระยะออกผล นอกจากแสงแล้วอุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่พืชต้องได้รับ เพื่อกระตุ้นให้พืชมีการเจริญเติบโตในช่วงออกดอก และออกผลเช่นกัน และยังส่งผลให้เมแทบอลิซึมต่างๆ ของพืชทำงานได้อย่างปกติ (ภาคภูมิ พระประเสริฐ, 2550) ทั้งนี้ถ้าพืชได้รับอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง เรียกว่าภาวะความเครียดจากอุณหภูมิ ซึ่งเป็นสภาวะที่ระดับอุณหภูมิสูงเกินระดับช่วงความทนจนส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโต หรือสรีรวิทยาอื่นๆ ที่สำคัญของพืช (Hasanuzzaman et al., 2013)

กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์ โดยคลื่นแสงที่พืชนั้นใช้ คือ คลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) (Wallace, & Hobbs, 2006) ในสภาวะอุณหภูมิปกติ CO_2 จะรวมตัวกับ RuBP (Ribulose-1, 5-bisphosphate) โดยมีอิทธิพลจากเอนไซม์ Rubisco ทำให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คือ 3-PGA ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาลในกระบวนการต่อเนื่อง แต่ในในสภาวะที่พืชเจริญเติบโต ภายใต้ระดับอุณหภูมิสูงจะเกิดผลกระทบต่อการสังเคราะห์แสงของพืช คือ การเกิดกระบวนการหายใจแสงแทนที่การสังเคราะห์แสง (photosynthesis) โดยมี O_2 เป็นตัวยับยั้งจึงทำให้ไม่สามารถเกิดวัฏจักรคัลวิน เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดภาวะที่เอนไซม์ Rubisco มีอิทธิพลต่อการทำให้ O_2 รวมตัวกับ RuBP ได้ดีกว่าจนเข้าไปแทนที่ CO_2 ดังนั้นจึงส่งผลทำให้เกิดกระบวนการหายใจแสง (photorespiration) ดังกล่าวจนทำให้ได้สารประกอบที่มีคาร์บอน 2 อะตอม คือ ฟอสโฟไกลิโคเลต (Phosphoglycolate: PG) และเนื่องจาก PG เป็นพิษต่อพืช ดังนั้นพืชจะมีกลไกในการกำจัด PG ซึ่งกระบวนการกำจัด PG นี้เกิดขึ้นใน Chloroplast ผ่านเข้าสู่ Organelle Peroxisome จนในที่สุดผ่านเข้าสู่ mitochondria ซึ่งเป็นพื้นที่สุดท้ายทำให้มีการเปลี่ยนรูปสาร Glycine (ซึ่งถูกสร้างขึ้นในกระบวนการกำจัด PG) ณ บริเวณนี้จนโครงสร้างโมเลกุลส่วนหนึ่งถูกเปลี่ยนแปลงกลายเป็น CO_2 และปลดปล่อย CO_2 ผ่านทางปากใบทำให้พืชสูญเสีย CO_2 แทนที่พืชจะกักเก็บ CO_2 ไว้ในใบก็จะกลายเป็นการปลดปล่อย CO_2 ออกจากใบแทน ซึ่งพบว่ากระบวนการนี้ทำให้พืชสูญเสีย CO_2 สูงถึง 30-50 % ของปริมาณที่ตรึงได้ส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง และนอกจากนั้นยังพบว่าในกระบวนการกำจัด PG ใน Organelle Peroxisome นั้นทำให้เกิดกระบวนการสร้าง H_2O_2 (Hydrogenperoxide) ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ glycolate และเป็นพิษต่อพืช รวมทั้งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างสารอนุมูลอิสระชนิด OH ในพืชซึ่งจัดเป็นสารออกซิแดนท์ที่มีฤทธิ์รุนแรงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบทางชีวเคมีอย่างต่อเนื่อง และเป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารอาหารของพืช (กณิดา ธนเจริญชฌนาส, 2558; Thomas, 2001; Bonan, 2002)

เมื่อสภาวะอุณหภูมิสูงขึ้นพืชจะปกป้องตัวเองไม่ให้สูญเสียน้ำโดยการปิดปากใบเพื่อทำให้เย็นลง และลดการคายน้ำ ถ้าพืชมีการคายน้ำมากเกินไปจะทำให้ขาดความสมดุล การสังเคราะห์แสงก็จะลดลงตามไปด้วยส่งผลต่อการยับยั้งการดูดน้ำในดิน ราก และลำต้น ทำให้น้ำมีการแพร่เข้าสู่ใบน้อยลง ส่งผลต่อการลดประสิทธิภาพในการดึงธาตุอาหารมาใช้

พลังงานลดลงจนรบกวนกระบวนการขนส่งพลังงาน ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง เกิดผลกระทบต่อสรีรวิทยาของพืช (Hollister, & Webber, 2000)

ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อสรีรวิทยาของธัญพืช

ระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นในบรรยากาศทำให้พืชมีการเปลี่ยนแปลงกระบวนการทางสรีรวิทยาเพื่อปรับตัวตอบสนองในระดับเล็กน้อย หรือในระดับรุนแรงจนกระทั่งมีการทำลายโครงสร้างบางประการของพืช ทั้งนี้ความรุนแรงจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิด สายพันธุ์ ช่วงอายุ พันธุกรรม จากการศึกษาของ (Zhang et al., 2016) ได้ทำการวิจัยในพื้นที่ทางตอนเหนือของจีนพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก่อให้เกิดผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช และรวมทั้งผลผลิต ดังนั้นจึงมีการศึกษามาระยะหนึ่งแล้วในประเด็น ผลกระทบของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อธัญพืชที่สำคัญของโลก อาทิเช่น ข้าวสาลี ข้าวเจ้า และข้าวโพด การศึกษาส่วนใหญ่พบว่าสภาพภูมิอากาศที่มีระดับร้อนขึ้น (กว่าระดับปกติ ในพื้นที่นั้น) อาจส่งผลกระทบต่อการออกดอก การออกผล การสังเคราะห์แสง คุณภาพ และสารอาหารของพืช จากการศึกษาของ (He et al., 2005) ได้ศึกษาในประเทศจีนพบว่า กระบวนการทางสรีรวิทยาต่างๆ ของพืชอาจเสื่อมลงเพราะมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ membrane lipid peroxidation ปริมาณโปรตีน และกรดอะมิโนทั้งหมด protease activity ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของอุณหภูมิที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากการได้รับสัมผัสอุณหภูมิในระยะสั้นไปจนถึงระยะยาว เมื่อพืชได้รับสัมผัส กับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C และ 40 °C (ออกแบบการทดลอง 4 ซ้ำ) ในระยะเวลา 7 วัน ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจะทำให้พืชเกิดภาวะความเครียดจากความร้อน (gradual heat stress: GHS) หรือพืชที่เกิดความเครียดจากความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ในระยะเวลา 28 วัน สำหรับพืชที่ได้รับความเครียดจากความร้อนเป็นระยะเวลายาวนาน (prolonged heat stress: PHS) ในช่วงที่มีการเจริญเติบโตใน chambers ผลการศึกษาพบว่า ถั่วเหลืองที่ปลูกภายใต้สภาวะ GHS ที่ระดับ 30 °C ในช่วงระยะเวลา 7 วัน นั้นปริมาณ MDA (malondialdehyde) เพิ่มขึ้นแต่ปริมาณโปรตีนในมวลชีวภาพเหนือดิน (shoot) และกรดอะมิโนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ระดับ 20 °C ขณะเดียวกันพบว่าภายใต้ระดับอุณหภูมิในรูปแบบ gradual heat stress: GHS กิจกรรมของเอนไซม์โปรตีเอส (Protease Activity) ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์โปรตีน (protein) ซึ่งเป็นพอลิเพปไทด์ หรือพอลิเมอร์ของกรดอะมิโน (amino acid) ได้เป็นพเปปไทด์ที่สายสั้นลงนั้นเพิ่มขึ้นที่ระดับอุณหภูมิ

25 °C แต่กิจกรรมของเอนไซม์โปรตีเอสจะลดลงเมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิไปที่ระดับ 30-40 °C (gradual heat stress: GHS) (He et al., 2005) และพบว่าปริมาณกรดอะมิโนลดลงภายใต้รูปแบบอุณหภูมิ GHS ตั้งแต่ระดับอุณหภูมิ 25 °C นอกจากนี้ผลการศึกษายังบ่งชี้ว่าปัจจัยด้านปริมาณโปรตีน กรดอะมิโน และ Protease Activity มีการตอบสนองต่อรูปแบบอุณหภูมิทั้ง GHS หรือ PHS มากกว่า lipid peroxidation การเปลี่ยนแปลง metabolic ของ Protease Activity ปริมาณโปรตีน กรดอะมิโน และ lipid peroxidation อาจจะทำให้ใบแก่ และมีประสิทธิภาพต่ำในสภาวะความเครียดจากความร้อนที่รุนแรงและยาวนาน (He et al., 2005)

ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อผลผลิตในพื้นที่เกษตรกรรมของโลก

1. ผลกระทบต่อผลผลิตในพื้นที่เกษตรกรรมในภาพรวม ในระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา นักวิชาการ และนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษผลกระทบ และความเสียหายของสภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาวะภูมิอากาศที่มีต่อผลผลิตทางการเกษตรของโลกในพื้นที่สำคัญต่างๆ ถึงแม้ว่าได้มีการประเมินว่าบางพื้นที่ได้รับผลประโยชน์จากสภาวะโลกร้อน หรือการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก อาทิเช่น มีปริมาณฝนตกมากขึ้น อากาศอุ่นขึ้นในระดับที่เหมาะสม หรือปัจจัยอื่นๆ อย่างไรก็ตามพบว่า พื้นที่เกษตรกรรมส่วนใหญ่ของโลกกลับได้รับผลกระทบในรูปแบบของการลดลงของผลผลิตในพื้นที่ปลูกซึ่งหากคำนวณมูลค่าความเสียหายเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่า มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะอย่างยิ่ง พื้นที่เขตร้อนของโลก ซึ่งสภาวะโลกร้อนทำให้ระดับอุณหภูมิที่สูงอยู่แล้วในสภาวะปกติกลับยังมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เข้าสู่ระดับเกินช่วงความทนของสิ่งมีชีวิตทั้งสัตว์และพืช รวมทั้งพืชทางการเกษตร ซึ่งแน่นอนว่าย่อมทำให้พื้นที่เกษตรกรรมในเขตร้อนกลายเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการเปิดรับระดับอุณหภูมิสูงกว่าเขตอื่นๆ ของโลก (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Cline, 2008) ประเทศในเขตร้อนที่คาดการณ์ว่าเป็นพื้นที่เสี่ยงดังกล่าว เช่น กลุ่มประเทศทางอเมริกาใต้ อาทิ บราซิล อาร์เจนตินา และประเทศในเขตทวีปแอฟริกา โดยการคาดการณ์ในปี ค.ศ. 2008 ระบุว่าผลผลิตของประเทศไนจีเรียคาดว่าจะลดลงประมาณ 6-19 % ส่วนประเทศแอฟริกาใต้ และเอธิโอเปียจะประสบกับการสูญเสียมากที่สุด (Cline, 2007; Cline, 2008)

อย่างไรก็ตามพื้นที่โซนเขตอบอุ่น หรือเขตอื่นๆ ก็ได้รับผลกระทบจากสภาวะโลกร้อน หรือการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศเช่นเดียวกัน เช่น ประเทศในเขตอเมริกาเหนือ อาทิ สหรัฐอเมริกา ซึ่งคาดการณ์จากการวิจัยภาคสนามว่าผลผลิตจะลดลงประมาณ 6 % ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง (ไม่เพิ่มระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ และพื้นที่ที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ

เขตตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ ในกรณีคาดการณ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Agronomic model) พบว่าผลผลิตธัญพืชจะลดลง 25 % ในกรณีที่มีระดับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วย และจะลดลงเพิ่มขึ้นถึงระดับ 35 % ในกรณีที่ไม่เพิ่มระดับคาร์บอนไดออกไซด์ และคาดการณ์ว่าประเทศแคนาดาจะประสบปัญหาที่คล้ายคลึงกันกับประเทศสเปน (Cline, 2007)

ในเขตเอเชียพบว่าประเทศอินเดียจะประสบปัญหาการสูญเสียผลผลิตภายใต้สภาวะโลกร้อนในระดับที่สูงถึง 30-40 % โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เกษตรกรรมที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร จะเพิ่มระดับการสูญเสียผลผลิตมากขึ้น ส่วนประเทศจีนถึงแม้ว่าเป็นพื้นที่ที่ตั้งอยู่ในเอเชียเช่นเดียวกัน และกลับพบผลกระทบน้อยกว่าในเขตประเทศอินเดีย เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรมากกว่า (จีนตั้งอยู่ที่ละติจูด 38 องศาเหนือ ส่วนอินเดียตั้งอยู่ในเขตละติจูด 22 องศาเหนือ) ยิ่งกว่านั้นพบว่า จะเกิดผลกระทบ 2 รูปแบบที่ตรงข้ามกัน คือ ผลผลิตบางพื้นที่จะลดลงประมาณ 7 % ขณะเดียวกันผลผลิตจะเพิ่มขึ้นประมาณ 7 % (Cline, 2008)

2. ผลกระทบของสภาวะอุณหภูมิสูงที่มีต่อพืชถั่วเหลือง ปัจจุบันพืชตระกูลถั่วนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายหนึ่งในนั้น คือ ถั่วเหลือง (soybean) เป็นธัญพืชที่มีความสำคัญมากของมนุษย์ เนื่องจากเป็นธัญพืชที่เป็นแหล่งโปรตีน และน้ำมันที่เป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ที่สำคัญ และที่สำคัญความต้องการถั่วเหลืองในอนาคตยังเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปัจจัยการเพิ่มจำนวนของประชากร ถ้าเรามีความเข้าใจต่อการตอบสนองทางด้านสรีรวิทยาจะนำไปสู่ประโยชน์ต่อความมั่นคงทางด้านอาหารของโลกนำไปสู่การรับมือการเปลี่ยนแปลงผลผลิตของถั่วเหลืองในอนาคตภายใต้ climate change และ global warming มีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาเพื่อประเมินปัญหาในประเด็นนี้ โดยมีรูปแบบการศึกษาทั้งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการศึกษาในภาคสนาม (Zhang et al., 2016) เช่นการวิจัยโดยคณะของ (Lobell et al., 2003) ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเมินผลกระทบของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อผลผลิตถั่วเหลือง ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าผลผลิตของถั่วเหลืองจะลดลงตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในฤดูกาลที่ปลูก และได้ประเมินว่าผลผลิตของถั่วเหลืองจะลดลง 17 % เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 °C ส่วนการวิจัยในรูปแบบการศึกษาภาคสนามซึ่งใช้ตู้ทดลองระบบเปิด (Open Top Chambers) หรือในรูปแบบใกล้เคียงกันพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในระดับที่ไม่เกินระดับความทนของถั่วเหลือง (temperature threshold) จะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มผลผลิต อย่างไรก็ตามในทางตรงข้ามพบว่า ถ้าเพิ่มระดับอุณหภูมิเกินกว่าช่วงความทนของถั่วเหลือง (above the temperature threshold level) ผลผลิตจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งกว่านั้นยังมีการศึกษาที่พบว่า ในกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระยะการสร้างเมล็ดในฝักจะส่งผลกระทบต่อผลผลิตอย่างชัดเจน (Dornbos, &

Mullen, 1991; Gibson, & Mullen, 1996) นอกจากนี้จากการศึกษาทางด้านสรีรวิทยาของพืช พบว่า การเพิ่มระดับอุณหภูมิในระดับหนึ่งนั้นอาจส่งผลต่อการลด หรือเพิ่มผลผลิตก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ประการ อาทิเช่น ระยะของชีพวัณของถั่วเหลืองในช่วงที่ได้รับผลกระทบ หรือช่วงระยะการเจริญเติบโต (Growth stages) (ระยะการเจริญเติบโตแต่ละช่วงมีความอ่อนไหวของระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน) และขนาดของใบ หรือส่วนใดส่วนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงของพืชด้วย เช่น ขนาดพื้นที่ใบที่แตกต่างกันส่งผลต่อศักยภาพในการสังเคราะห์แสงของพืช เช่นเดียวกัน (Zhang et al., 2016)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเทศต่างๆ ทั่วโลกและในเอเชีย เช่น สหรัฐอเมริกา จีน มาเลเซีย ญี่ปุ่น อินเดีย รวมทั้งประเทศไทยต่างได้ตระหนัก และให้ความสนใจศึกษาในประเด็นปัญหานี้กันอย่างแพร่หลาย ในระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ซึ่งขอบเขตการศึกษาด้านหนึ่ง คือ การประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิที่มีต่อธัญพืชอาหารสำคัญ คือ ถั่วเหลือง ดังปรากฏอยู่ในบทความทางวิชาการมากมาย อาทิเช่น ประเทศจีนซึ่งถือว่าพืชถั่วเหลืองเป็นธัญพืชที่สำคัญมากของประเทศจีนแต่ยังขาดข้อมูลการวิจัยภาคสนามที่แม่นยำดังนั้น กลุ่มนักวิจัยซึ่งนำโดย (Zhang et al., 2016) และคณะได้ทำการทดลองภาคสนามในปี ค.ศ. 2013 เพื่อให้ทราบถึงลักษณะผลกระทบของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (warming) ที่มีต่อการสังเคราะห์แสง ผลผลิต รวมทั้งลักษณะของการตอบสนองกลไกเชิงสรีรวิทยาที่ส่งผลต่อการลดผลผลิตของถั่วเหลืองภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

ในการศึกษาดังกล่าวใช้พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ณ แปลงวิจัยภาคสนามของมหาวิทยาลัย Heana University จังหวัด Heana ได้วางแผนการทดลองออกเป็น 2 สิ่งทดลอง คือ สิ่งทดลองที่ระดับอุณหภูมิระดับปกติเป็นชุดควบคุม (C) และสิ่งทดลองที่เพิ่มระดับอุณหภูมิในช่วงกลางวัน (W) โดยใช้เครื่องสร้างคลื่นแสงอินฟราเรด (Infrared Radiator) เพื่อให้เกิดการแผ่ความร้อนในระดับ 1600 W ในพื้นที่ 10 m²/1 เครื่อง แต่ละชุดทดลองมีจำนวน 6 ซ้ำ ผลการศึกษาพบว่า ระดับอุณหภูมิในบรรยากาศ และในดินที่เพิ่มขึ้น 0.4 และ 0.7 °C ในสิ่งทดลอง W ตามลำดับ มีผลกระทบต่อบัณฑิตด้านชีพวัณโดยพบว่า ถั่วเหลืองมีการออกดอกในช่วงที่เร็วกว่าปกติ หรือช่วงก่อนออกดอกลดลง 3.84 วัน และช่วงระยะการเจริญเติบโตสั้นลง หรือถั่วเหลืองมีการเติบโตได้เร็วกว่าปกติ 4.5 วัน ลดประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของใบลง 6.6 % และ 10.3 % ที่ระยะออกดอก และระยะสร้างเมล็ด ตามลำดับ พร้อมกับลดปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบในช่วงออกดอก และออกฝักลดลง 5.8 % และ 7.8 % ตามลำดับ ผลการศึกษา

ระดับการเปิด-ปิดปากใบพบว่า การเปิด-ปิดปากใบของถั่วเหลืองในระยะออกดอก และระยะสร้างเมล็ดลดลง 18.8 % และ 18.4 % ตามลำดับ แต่พบว่าอัตราการคายน้ำของใบในระยะการออกดอก ระยะสร้างเมล็ด และระยะออกฝัก มีอัตราการคายน้ำเพิ่มขึ้น 9.4 %, 15.7 % และ 14.1 % ตามลำดับ และที่สำคัญพบว่า ลดผลผลิตในระดับที่ค่อนข้างสูง คือ น้ำหนัก 100 เมล็ดลดลง 20.8 % และลดผลผลิตในภาพรวมลง 45 % (170.78 กรัม/ตารางเมตร) นอกจากงานวิจัยของ (Zhang et al., 2016) ที่มีการศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มระดับอุณหภูมิในบรรยากาศที่มีต่อ ถั่วเหลืองยังได้มีการศึกษาจากนักวิชาการ และมีการตีพิมพ์ออกมาจำนวนหนึ่งทั้งในยุโรปอเมริกา เอเชีย และประเทศไทย ดังเช่นงานวิจัยในพื้นที่ประเทศอเมริกา โดย (Xu et al., 2016) พบว่าพืช ถั่วเหลืองที่ปลูกใน open top chambers มีการควบคุมอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ อุณหภูมิระดับเหมาะสมที่ 28/24 °C อุณหภูมิระดับต่ำที่ 22/18 °C และอุณหภูมิระดับสูงที่ 36/32 °C และควบคุมให้มีระดับ CO₂ ที่ 400 ไมโครโมล/โมล นอกจากนี้ยังเพิ่มสิ่งทดลองอีก 3 รูปแบบ คือ การเพิ่มระดับ CO₂ เพื่อให้พืชได้รับอย่างต่อเนื่องจากระดับ 400 เป็น 800 ไมโครโมล/โมล ใน 3 สิ่งทดลองเดิม (อุณหภูมิระดับต่ำ ระดับเหมาะสม และระดับสูงของ CO₂) และกำหนดให้พืชได้รับ สภาพะดังกล่าวในวันที่ 42, 53, 69 และ 95 หลังจากปลูก (Days After Planting: DAP) และวัด คาร์โบไฮเดรต, organic acids, amino acids, protein, lipid, soluble amino acids ผลการศึกษา พบว่าระดับสารอาหารที่ตรวจวัดในงานวิจัยนี้มีความแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจนภายใต้สภาวะ ความแตกต่างของระดับอุณหภูมิ และระดับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากพบว่าระดับ carbohydrates , amines และ organic acids ในเมล็ดลดลง 80 % ในระยะเก็บเกี่ยวภายใต้ สภาวะอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม pinitol และ oleate ปรับเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง และสุดท้ายพบว่าภายใต้สภาวะการเพิ่ม CO₂ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับ metabolite ในช่วง ระยะการพัฒนาเมล็ด แต่กลับเพิ่มประสิทธิภาพของใบถั่วเหลืองในการสังเคราะห์แสง

Bhattarai et al. (2017) ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Environmental Policy Integrated Climate Model (EPIP) คาดการณ์ผลผลิตในอนาคตของถั่วเหลือง และธัญพืช บางประเภทในอเมริการ่วมกับ Atmosphere Ocean General Circulation Model (AOGCM) สํารวจเส้นทางการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3 สถานการณ์ในปี ค.ศ.2015-2099 ผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยผลผลิต 20 ปี ทั้งธัญพืช และถั่วเหลืองในปี ค.ศ.2080-2099 ที่มีการใช้ แบบจำลอง EPIP และ AOGCM ภายใต้สถานการณ์การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับต่ำ ระดับปานกลาง และระดับสูง พบว่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของผลผลิต 20 ปี ในปี ค.ศ. 2015-2034 และภายใต้สถานการณ์ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงผลผลิตของธัญพืช

และถั่วเหลืองในปี ค.ศ. 2080-2099 จะลดลงเมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2015-2034 โดยเกิดจากปัจจัยด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

การศึกษาวิจัยในประเทศมาเลเซียโดย (Puteh et al., 2013) ดำเนินการศึกษากาสนามณ พื้นที่วิจัย คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัย Putra Malaysia (UPM) ในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคม ค.ศ. 2009 ถึง ตุลาคม ค.ศ. 2010 ใช้ถั่วเหลือง 3 สายพันธุ์ที่มีขนาดแตกต่างกัน ได้แก่ AGS190 (เมล็ดขนาดใหญ่), Willis (เมล็ดขนาดกลาง), Dieng (เมล็ดขนาดเล็ก) และจากนั้นควบคุมระดับอุณหภูมิ 3 ระดับ ให้มีความแตกต่างกัน คือ T1 (Control, ambient temperature) เป็นสิ่งทดลองควบคุม ซึ่งระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับระดับธรรมชาติ, T2 (high temperature, around 30 °C) เป็นสิ่งทดลองที่ควบคุมให้อุณหภูมิมีค่าระดับสูง และ T3 (very high temperature, around 35 °C) เป็นสิ่งทดลองที่ควบคุมให้อุณหภูมิมีระดับสูงมาก จากการศึกษาการรับสัมผัสในระยะยาวของพืชในระยะ R1-R5 (ระยะสืบพันธุ์ช่วงเริ่มออกดอกจนถึงระยะเริ่มติดเมล็ด) ภายใต้อุณหภูมิสูงมาก 35 °C ส่งผลกระทบในด้านลบระดับสูงในปัจจัยด้านองค์ประกอบผลผลิตมากกว่าการรับสัมผัสในระยะสั้นในช่วงระยะ R1-R2 (ระยะสืบพันธุ์ช่วงเริ่มออกดอกจนถึงระยะดอกสมบูรณ์) และที่อุณหภูมิประมาณ 30 °C องค์ประกอบผลผลิตไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุด control (25 °C) แต่พบผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในองค์ประกอบผลผลิตภายใต้ระดับอุณหภูมิสูงมากที่ระดับ 35 °C ทั้ง 2 ระยะ (R1-R5 และ R1-R2) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสายพันธุ์ พบว่าสายพันธุ์ที่มีเมล็ดขนาดเล็ก (Dieng) มีความอ่อนไหวน้อยกว่าเมื่อสัมผัสระดับอุณหภูมิสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดขนาดใหญ่ (AGS190) ซึ่งหมายความว่าพันธุ์ AGS190 มีความอ่อนไหวต่อระดับอุณหภูมิมากกว่า

การศึกษผลกระทบของสภาวะภูมิอากาศแปรปรวนที่มีต่อผลผลิตถั่วเหลืองในประเทศอินเดียโดย (Lal et al., 1999) ในพื้นที่ภาคกลาง และพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำคงคา โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ CROPGRO เพื่อศึกษาปัจจัยแปรปรวนของระดับอุณหภูมิ และความชื้นในระดับวิกฤต ผลการศึกษาระบุว่าผลผลิตถั่วเหลืองในเขตพื้นที่เกษตรกรรมตอนกลางของประเทศอินเดียจะลดลง และเมื่อพิจารณาปัจจัยการปลูกถั่วเหลืองภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน ต่อเนื่องทั้งฤดูกาลปลูกพบว่า ผลกระทบรุนแรงกว่าการสัมผัสในระยะสั้นไม่ต่อเนื่อง และเมื่อพิจารณาจากปัจจัยร่วมระหว่างการเพิ่มระดับ CO₂ และระดับอุณหภูมิพบว่า ในกรณีการเพิ่มระดับ CO₂ เพียงปัจจัยเดียวทำให้ผลผลิตถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นถึง 50 % แต่ในกรณีการปลูกภายใต้ปัจจัยร่วมระหว่างการเพิ่ม CO₂ และเพิ่มระดับอุณหภูมิขึ้นไปอีก 3 °C กลับยับยั้งการเพิ่มผลผลิตถั่วเหลืองเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยร่วมอื่นๆ เช่น การเพิ่มจำนวนประชากรซึ่งคาดการณ์ว่าจะเพิ่มเป็น

1.6 พันล้าน ภายในปี ค.ศ.2050 ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรน้ำ ระดับอุณหภูมิสูงขึ้น ระดับ CO₂ ในบรรยากาศสูงขึ้น และความแปรปรวนของปัจจัยภูมิอากาศต่างๆ ปัจจัยเหล่านี้ จะยิ่งทำให้ปัญหาการขาดแคลนอาหารรุนแรงขึ้นในแถบที่ราบลุ่ม แม่น้ำคงคงทั้งในปัจจุบัน และอนาคต (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558)

การศึกษาวิจัยในประเทศญี่ปุ่นได้ผลการศึกษาที่แตกต่างกันกับประเทศต่างๆ ดังที่ได้กล่าวถึงมาแล้วโดย (Kumagai and Sameshima, 2014) ดำเนินการวิจัยในพื้นที่ภาคสนาม เช่นกันโดยทำการปลูกในช่วงเดือนมิถุนายน ถึง เดือนกันยายน ในระยะเวลาต่อเนื่อง 3 ปี คือ ปี ค.ศ.2011, ค.ศ.2012 และค.ศ.2013 ใช้ถั่วเหลือง 3 สายพันธุ์ คือ สายพันธุ์ Enrei สายพันธุ์ Ryuhou และสายพันธุ์ Yukihomeare ซึ่งนิยมปลูกในพื้นที่ภาคเหนือของญี่ปุ่น กำหนดสิ่งทดลอง ภายใต้ระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ T1 (ambient) สิ่งทดลองที่ระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับระดับธรรมชาติ, T2 (อุณหภูมิสูงกว่า ambient 1.8-3.6 °C) สิ่งทดลองที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับธรรมชาติ 1.8-3.6 °C, T3 (อุณหภูมิสูงกว่า ambient 4.8-5.7 °C) สิ่งทดลองที่ระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับธรรมชาติ 4.8-5.7 °C ปลูกในตู้ทดลองภาคสนามซึ่งมีพลาสติกคลุม จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระดับอุณหภูมิในการวิจัยครั้งนี้กลับส่งผลทำให้อัตราการสังเคราะห์แสง และประสิทธิภาพของการใช้ PSII (การสังเคราะห์แสงในระบบแสง 2) และอัตราผลผลิตในภาพรวมเพิ่มขึ้น รวมทั้งเพิ่มขนาดใบ จำนวนดอก จำนวนฝัก และจำนวนเมล็ด ในสิ่งทดลอง T2 และ T3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้ง 3 สายพันธุ์ อย่างไรก็ตามพบว่า ระดับอุณหภูมิสูงส่งผลต่อชีพลักษณะบางประการโดยพบว่า ระยะเวลาระหว่างช่วงเริ่มปลูกจนถึงระยะเริ่มออกดอก (R1) ลดลงทั้ง 3 สายพันธุ์ แต่กลับเพิ่มระยะเวลาตั้งแต่ R1 จึงถึงช่วงเริ่มสร้างฝัก ให้ยาวนานขึ้น ผลการศึกษานี้คณะผู้วิจัยได้มีความคิดเห็นว่าเขตพื้นที่ซึ่งมีระดับอุณหภูมิต่ำในประเทศญี่ปุ่นจะได้รับประโยชน์จากเหตุการณ์การคาดการณ์ระดับอุณหภูมิที่จะเพิ่มขึ้น ในศตวรรษที่ 21

จากการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในบรรยากาศที่สูงขึ้นต่อองค์ประกอบผลผลิต และคุณภาพสารอาหารในถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 (นเรศ ขำเจริญ, 2555) มีการปลูกถั่วเหลือง ในสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งทำการปลูกภายในตู้ทดลองแบบเปิด (Open Top Chamber) ดังนี้ ความคุมระดับอุณหภูมิให้ต่ำกว่าสภาวะธรรมชาติภายนอก ตู้ทดลอง (LT) ระดับอุณหภูมิอยู่ที่ 30-33 °C ควบคุมระดับอุณหภูมิให้ใกล้เคียง หรือเทียบเท่ากับ สภาวะธรรมชาติภายนอกตู้ทดลอง (AT) 33-36 °C ควบคุมระดับอุณหภูมิให้สูงกว่าสภาวะธรรมชาติภายนอกตู้ทดลอง (HT) 37-40 °C ผลของการศึกษาดังแต่ระยะ V1 ถึง R8 พบว่า

ความสูงของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 มีการตอบสนองในสภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงกว่าสภาวะธรรมชาติในทิศทางบวก โดยระยะ V3, R1 และ R3 ในตุ้ทดลอง (HT) มีอัตราในการเพิ่มขึ้นของความสูงลำต้นเมื่อเทียบกับตุ้ทดลอง (AT และ LT) และองค์ประกอบของผลผลิตนั้นก็ไม่ได้รับผลกระทบต่อสภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงกว่าสภาวะธรรมชาติมาก สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการศึกษานี้กระตุ้นให้พืชมีความสูงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ยังไม่ได้วิเคราะห์ในด้านสารอาหารแต่อย่างใด

การศึกษาผลกระทบของการเพิ่มระดับอุณหภูมิร่วมกับปัจจัยการเปลี่ยนแปลงความชื้นบรรยากาศที่มีต่อถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 โดย (Thanacharoenchanaphas, & Rugchati, 2015) ในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก ในปี ค.ศ. 2013 พบว่าปัจจัยเดียว คือ ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ระดับ 36°C เพียงปัจจัยเดียวทำให้ผลผลิตถั่วเหลืองลดลง 40 % และน้ำหนัก 100 เมล็ด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่พบว่าถ้ามีปัจจัยร่วมระหว่างระดับอุณหภูมิสูงร่วมกับความชื้นสูงกว่าระดับธรรมชาติ (80 %) ในระยะต่อเนื่องทำให้ผลผลิตรวมลดลง 47 % แต่ไม่ส่งผลต่อน้ำหนัก 100 เมล็ดแต่อย่างใด และเมื่อวิเคราะห์สารอาหารพบว่าอุณหภูมิระดับสูงเพียงปัจจัยเดียวส่งผลต่อการลดลงของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวรวม (Total mono-unsaturated fatty acids) 1.2 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกและการเกิดภาวะโลกร้อน มีการศึกษามากมายที่พบว่า ส่งผลกระทบต่อพื้นที่แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า ประเทศลาว เวียดนาม ไทย พม่า อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ บรูไน มาเลเซีย เป็นพื้นที่ที่ได้รับสภาวะโลกร้อน และเป็นพื้นที่อ่อนไหวอย่างเห็นได้ชัดเจน ถึงแม้ว่าประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเพียง 1045.95 ล้านตัน เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศอเมริกา หรือประเทศจีนมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมามากถึง 5975.10 ล้านตัน และ 6103.49 ล้านตัน (Lee et al., 2013) อย่างไรก็ตามในอนาคตแนวโน้มของพื้นที่แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทุกประเทศรวมทั้งประเทศไทย (กนิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่าสภาวะการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต และย่อมจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่เกษตรกรรม ซึ่งประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีพื้นที่เกษตรกรรม และจะประสบปัญหาต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศขั้นรุนแรงทำให้มนุษย์ได้รับความเสี่ยงต่อความมั่นคงทางด้านอาหาร ฉะนั้นจึงต้องมีการหาแนวทางรับมือเพื่อปรับตัวต่อปัญหาดังกล่าว

การวิเคราะห์เชิงปริมาณขององค์ประกอบอะมิโนในเมล็ดถั่วเหลืองที่มีผลกระทบมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสรีรวิทยาของพืชในระหว่างการสร้างเมล็ด (beginning seed: R5-full maturity: R8) จากการศึกษากรดอะมิโนที่ทำการศึกษาวิเคราะห์จากเมล็ดถั่วเหลืองที่ปลูกทั้งหมด 31 ตัวอย่าง ในการทดลองภาคสนามที่สภาวะแตกต่างกัน ดำเนินการในประเทศไทย อาร์เจนตินา ผลการศึกษาพบว่า กรดอะมิโนรวมมีปริมาณทั้งหมด 31.69-49.14 % กรดอะมิโนชนิดที่จำเป็น และกรดอะมิโนชนิดที่ไม่จำเป็นมีความแตกต่างกัน 12.83-19.02 % และ 18.86-31.15 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสภาวะภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อระดับกรดอะมิโน ดังนั้นปริมาณกรดอะมิโนจึงมีความสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วงการสร้างเมล็ด โดยเฉพาะกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (sulfur amino acids) ได้แก่ methionine, cysteine มีปริมาณลดลง เนื่องจากเป็นกรดอะมิโนชนิดที่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Constanza et al., 2011) ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งถั่วเหลืองจะได้รับความเครียดจากความร้อนเพิ่มมากขึ้นส่งผลกระทบทางตรงต่อองค์ประกอบผลผลิตและปริมาณสารอาหารในถั่วเหลือง

จากการศึกษาของ (Bainy et al., 2008) มุ่งเน้นไปที่การประเมินผลของการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนจากความร้อน ซึ่งส่งผลต่อการสร้างเจลโปรตีนของถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นจากความร้อน ซึ่งถั่วเหลืองเป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะโปรตีน น้ำมัน และกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว นอกจากนี้ยังมีโปรตีนชนิด β -conglycinin (7S) และ glycinin (11S) พบมากที่สุด ในเมล็ดถั่วเหลือง และการสูญเสียสภาพโปรตีนจะเกิดขึ้นในกระบวนการที่สกัดโปรตีนออกจากนมถั่วเหลือง (soy protein isolation: SPI) มีการทดสอบโดย differential scanning calorimetry (DSC) พบว่าระดับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C จะส่งผลให้โปรตีนชนิด 7S มีการเสียสภาพ และสกัดโปรตีนจากนมถั่วเหลืองได้ในปริมาณมาก แต่ในทางกลับกันส่งผลให้โปรตีนชนิด 11S มีการเสียสภาพธรรมชาติลดลง เพราะโปรตีนชนิดนี้จะต้องผ่านความร้อนที่อุณหภูมิระดับสูงประมาณ 80 °C จึงจะสามารถสกัดโปรตีนจากนมถั่วเหลืองได้ในปริมาณมาก และนอกจากนี้โปรตีนชนิด 11S ยังทนต่อความร้อนได้มากกว่าโปรตีนชนิด 7S โดยโปรตีนทั้ง 2 ชนิดนี้ มีความแตกต่างกันในการสร้างเจล ซึ่งโปรตีนชนิด 11S จะมีปริมาณกรดอะมิโน methionine และ cysteine ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (sulfur containing amino acid) มากกว่าโปรตีนชนิด 7S ประมาณ 3-4 เท่า ดังนั้นโปรตีนชนิด 11S จึงเป็นตัวช่วยในการเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างเจลให้มีความแข็ง มีความแน่น และมีความยืดหยุ่น โดยมีพันธะไดซัลไฟด์เป็นตัวเชื่อมจึงทำให้เต้าหู้มีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน

และถั่วเหลืองคุณภาพที่ดีต้องมีลักษณะของเมล็ดขนาดใหญ่ มีหัวเมล็ด (hilum) ที่ชัดเจน และมีอัตราส่วนของโปรตีนชนิด 11S และ 7S ในปริมาณที่เพียงพอจึงจะได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์เต้าหู้

เต้าหู้เป็นที่นิยมมากในประเทศแถบเอเชียใต้ ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของเต้าหู้ คือ ปริมาณโปรตีน และกรดอะมิโนในถั่วเหลือง เพราะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมาก นอกจากนี้ ถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนสูง มีเมล็ดขนาดใหญ่ และมีหัวเมล็ด (hilum) ชัดเจนจะส่งผลให้เต้าหู้มีคุณภาพ และผลผลิตที่ดี ยิ่งไปกว่านั้นในถั่วเหลืองจะพบโปรตีนชนิด 11S และ 7S มากที่สุด ซึ่งมีอิทธิพลต่อเนื้อสัมผัส การแข็งตัวของเต้าหู้ เมื่อเกิดสภาวะระดับอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณโปรตีนทั้ง 2 ชนิดนี้ลดลง และส่งผลให้ A_2 subunit ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของโปรตีนชนิด 11S ลดลงตามไปด้วยจึงส่งผลกระทบต่อเชิงลบต่อเต้าหู้ เพราะ A_2 subunit เป็นตัวช่วยในการเพิ่มความแข็ง และความแน่นของเต้าหู้ และขนาดของเมล็ดก็ถือได้ว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของถั่วเหลืองอีกประการหนึ่งในการค้าเชิงพาณิชย์ เนื่องจากว่าเมล็ดที่มีขนาดเล็กจะไม่สามารถได้รับความนิยมจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารโดยเฉพาะเต้าหู้ (Shi Meng et al., 2016) ดังนั้นในอนาคตจึงต้องให้ความสำคัญต่อระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ส่งผลต่อถั่วเหลืองเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพอาหารในอนาคตต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

พื้นที่ศึกษา

1. พื้นที่วิจัยภาคสนาม ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ใช้พื้นที่ปลูกถั่วเหลืองในแปลงวิจัยด้านการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ซึ่งตั้งอยู่ที่ละติจูด 16 องศาเหนือ 44.003 ลิปดา และลองจิจูด 100 องศาตะวันออก 11.810 ลิปดา สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 48 เมตร

2. การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ในการศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการดังนี้

2.1 การวิเคราะห์สารอาหาร โปรตีน กรดอะมิโน รวมทั้งการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารจากถั่วเหลือง ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

2.2 การวิเคราะห์ธาตุอาหารในดิน และวิเคราะห์ผลผลิต ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

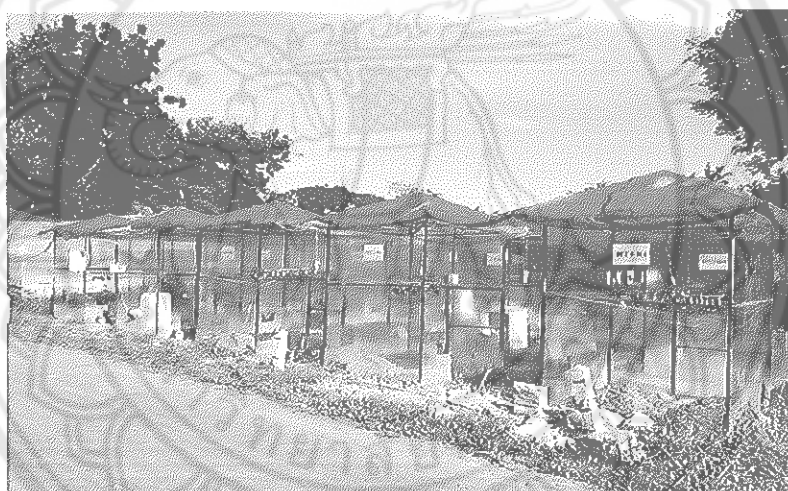
พันธุ์ถั่วเหลืองที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาเลือกถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เนื่องจากมีลักษณะที่โดดเด่น คือ เป็นพันธุ์ที่ได้รับการรับรองให้เป็นถั่วเหลืองสายพันธุ์ดีเด่นของประเทศไทย ในปี พ.ศ.2530 เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสม่ำเสมอทั้งฤดูแล้ง และฤดูฝนปรับตัวได้ดีทุกแหล่งปลูกทั่วประเทศ ทนทานต่อโรคราสนิม และต้านทานปานกลางต่อโรคใบจุดนูน และโรคราน้ำค้าง เป็นพืชไร่ที่เลือกใช้สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เพราะเป็นพืชตระกูลถั่วที่ให้คุณค่าทางด้านอาหารสูง และใช้ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 พันธุ์เดียวสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ เพราะนิยมปลูกในภาคเหนือตอนล่างมากที่สุด โดยเฉพาะจังหวัดพิษณุโลก และเป็นพันธุ์ที่มีโปรตีนสูง 43.8 % น้ำมัน 20 % ให้ผลผลิตที่สูงเฉลี่ย 280-350 กิโลกรัม/ไร่

การควบคุมระดับอุณหภูมิ ณ พื้นที่วิจัยภาคสนาม

การควบคุมระดับอุณหภูมิในการวิจัยภาคสนาม ณ แปลงวิจัยคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ดำเนินการโดยใช้ระบบตู้ทดลองเปิดด้านบน (Open Top Chamber) (ภาพ 9) จำนวน 16 ตู้ทดลอง ซึ่งรูปแบบของตู้ทดลองมีลักษณะดังนี้

1. รูปแบบของ Open Top Chamber มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อความสะดวกในการครอบแปลงวิจัยที่มีลักษณะเป็นแปลงปลูกแนวยาว Open Top Chamber (OTC) มีขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 1.5 เมตร และสูง 2 เมตร หุ้มด้วยพลาสติกใสทุกด้าน มีช่องเปิดเพื่อระบายอากาศด้านบน รวมทั้งมีประตู และหลังคาพับจั่วปิดด้านบนเพื่อป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากน้ำฝน และจากความชื้นในช่วงระยะเวลาทำการวิจัยภาคสนาม นอกจากนี้ยังใช้ระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

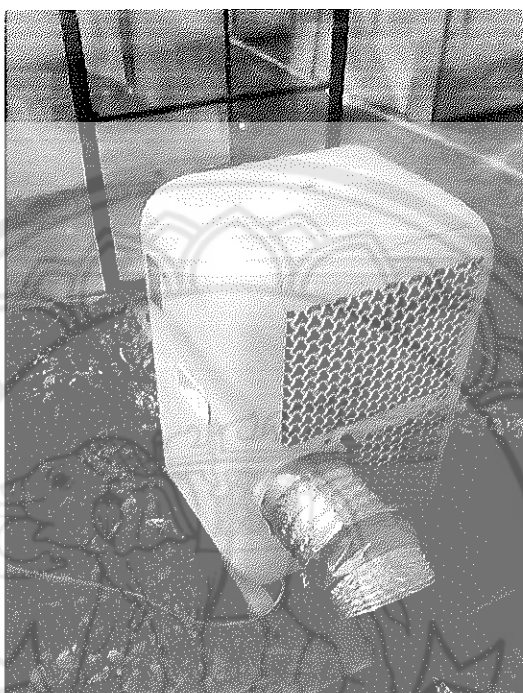


ภาพ 9 ระบบตู้ทดลองภาคสนามระบบเปิดระบายอากาศด้านบน (Open Top Chamber)

2. การควบคุมระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลองให้มีความแตกต่างกัน 4 ระดับ โดยใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับสภาวะธรรมชาติในการควบคุมตามระดับอุณหภูมิที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการคาดการณ์ภาพฉายอนาคต RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 และ RCP 8.5 ตามลำดับ

2.1 ระดับที่ 1 เป็นสภาวะระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองซึ่งถูกควบคุมให้มีระดับใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับอุณหภูมิตามธรรมชาติในฤดูกาลปลูก การควบคุมดังกล่าวจัดการโดยใช้เครื่องปรับอากาศระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองให้ต่ำกว่าระดับอุณหภูมิภายนอก (ambient level)

ประมาณ 2-3 °C (เนื่องจากระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลอง OTC ในพื้นที่วิจัย จะสูงกว่าระดับอุณหภูมิภายนอกประมาณ 2-3 °C แม้ไม่ได้รับการเพิ่มระดับอุณหภูมิจากระบบอิเล็กทรอนิกส์ใดๆ) กำหนด ชื่อสิ่งทดลองนี้ว่า Control Treatment : CT (เป็นชุดควบคุม) (ภาพ 10)

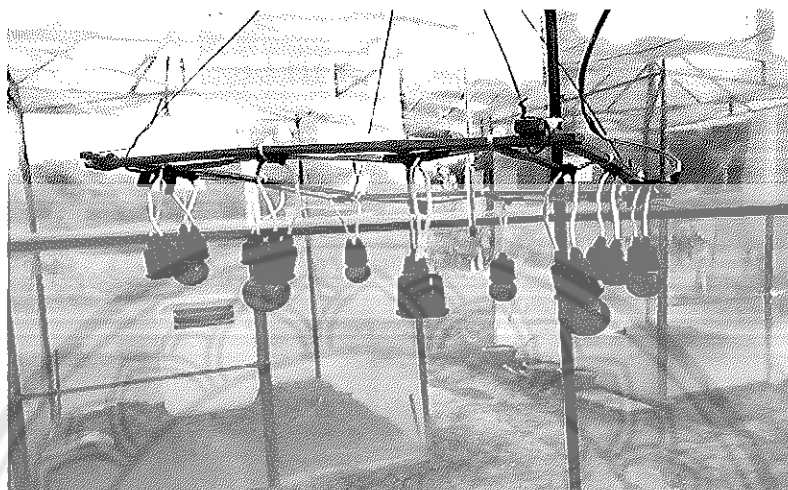


ภาพ 10 การใช้เครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิให้เทียบเท่ากับสภาวะธรรมชาติ

2.2 ระดับที่ 2 เป็นสภาวะระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองซึ่งถูกควบคุมให้มีระดับสูงกว่าสิ่งทดลอง CT ในฤดูกาลปลูก การควบคุมดังกล่าวจัดการโดยการครอบด้วย OTC ซึ่งจะทำให้ระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับภายนอก (ambient level) ในช่วงประมาณ 2-3 °C แม้ไม่ได้รับการเพิ่มระดับอุณหภูมิจากระบบอิเล็กทรอนิกส์ใดๆ) กำหนด ชื่อสิ่งทดลองนี้ว่า High Temperature : 1st Level (HT1)

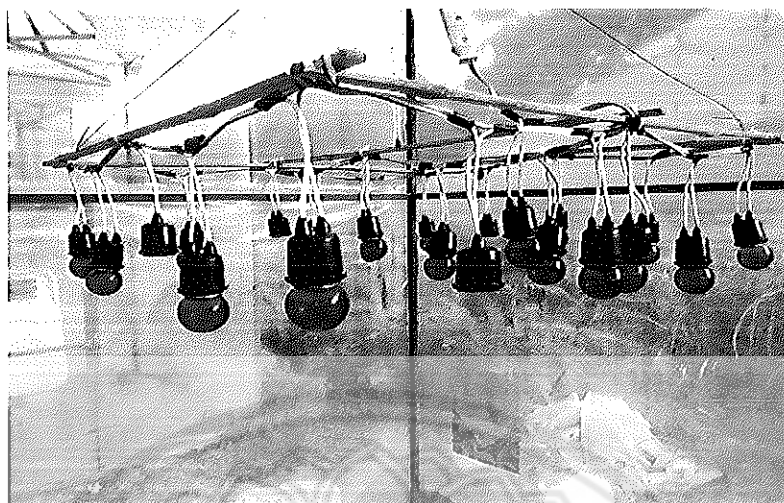
2.3 ระดับที่ 3 เป็นสภาวะระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองซึ่งถูกควบคุมให้มีระดับสูงกว่าสิ่งทดลอง HT1 ในฤดูกาลปลูก การควบคุมดังกล่าวจัดการโดยการครอบด้วย OTC และติดตั้งระบบไฟแสงสีเขียวนาฬิกาจำนวน 9 หลอด ติดตั้งโดยรอบภายในตู้ทดลอง ณ พื้นที่บริเวณเพดานของ OTC ซึ่งหลอดไฟดังกล่าวจะแผ่ระดับความร้อนออกมาประมาณ 1 °C ซึ่งจะทำให้

ระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับภายนอก (ambient level) ในช่วงประมาณ 3-4 °C กำหนดชื่อสิ่งทดลองว่า High Temperature : 2nd Level (HT2) (ภาพ 11)



ภาพ 11 การติดตั้งหลอดไฟเพื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิในสิ่งทดลอง HT2

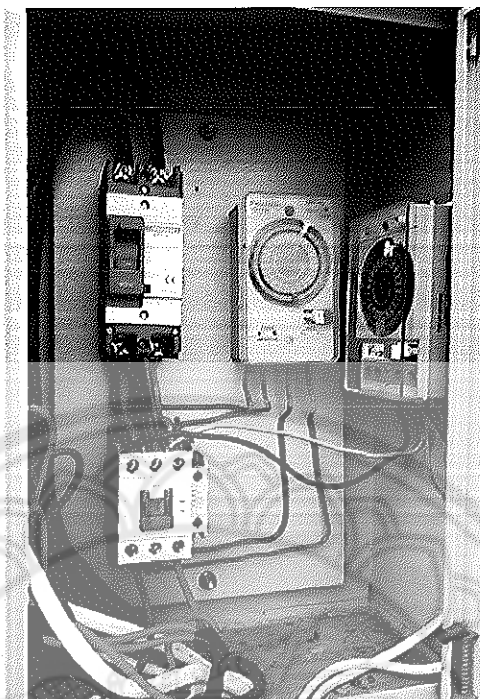
2.4 ระดับที่ 4 เป็นสภาวะระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองซึ่งถูกควบคุมให้มีระดับสูงกว่าสิ่งทดลอง HT2 ในฤดูกาลปลูก การควบคุมดังกล่าวจัดการโดยการครอบด้วย OTC และติดตั้งระบบไฟแสงสีเขียวนาฬิกาจำนวน 21 หลอด ติดตั้งโดยรอบ ณ พื้นที่บริเวณเพดานของ OTC ซึ่งหลอดไฟดังกล่าวจะแผ่ระดับความร้อนออกมาประมาณ 2-3 °C ซึ่งจะทำให้ระดับอุณหภูมิสูงกว่าระดับภายนอก (ambient level) ในช่วงประมาณ 4-6 °C กำหนดชื่อสิ่งทดลองนี้ว่า High Temperature : 3rd Level (HT3) (ภาพ 12)



ภาพ 12 การติดตั้งหลอดไฟเพื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิในสิ่งทดลอง HT3

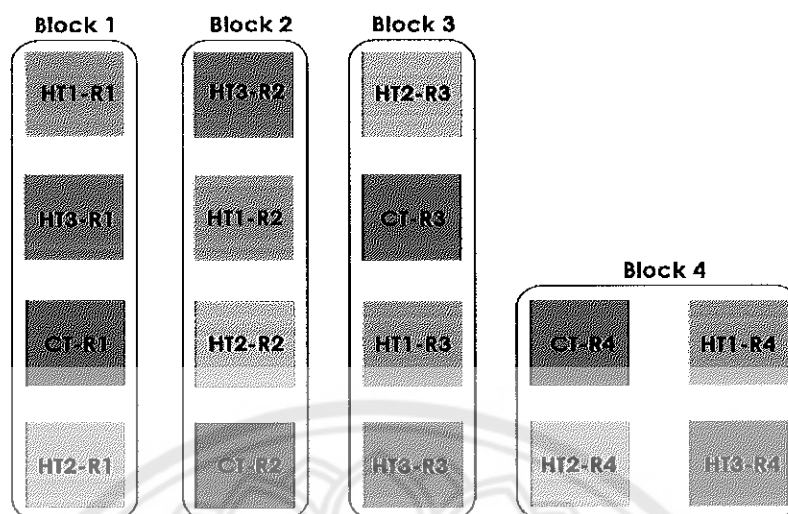
ดังนั้นในการวิจัยกำหนดให้มีสิ่งทดลอง (treatment) ทั้งหมด 4 สิ่งทดลอง (CT, HT1, HT2 และ HT3)

3. ระยะเวลาของการควบคุมระดับอุณหภูมิ เพื่อการควบคุมระดับอุณหภูมิ ในตู้ทดลองทั้ง 16 ตู้ ใช้ระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติเพื่อควบคุมระบบเปิด และปิดการทำงานของไฟฟ้าในช่วงระยะเวลา 07.00 น. ถึง 17.00 น. (10 ชั่วโมง) ซึ่งเป็นช่วงของการสังเคราะห์แสง ที่มีประสิทธิภาพของพืชทุกวัน ตั้งแต่ระยะถั่วเหลืองเข้าระยะ V1 จนกระทั่งถึงระยะเก็บเกี่ยว R8 (ภาพ 13)



ภาพ 13 การควบคุมระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองโดยใช้ระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติ

4. การวางแผนการทดลอง วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) มีจำนวนสิ่งทดลอง (treatment) 4 สิ่งทดลองตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาพฉายอนาคต RCPs และกำหนดให้มี 4 ซ้ำ ต่อ 1 สิ่งทดลอง (4 replications/treatment) ดังนั้นในการวิจัยจึงกำหนดให้มี 4 สิ่งทดลอง และแต่ละสิ่งทดลองมี 4 ซ้ำ จะมีจำนวนตู้ทดลองควบคุมอุณหภูมิทั้งหมด 16 ตู้ทดลอง (ภาพ 14)



ภาพ 14 ผังการวาง OTC จำนวน 16 คู่ ภายใต้แผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) มีสิ่งทดลอง 4 รูปแบบ และมี 4 ซ้ำ

การจัดการการปลูก

1. เริ่มปลูกถั่วเหลืองในช่วงต้นเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560
2. ควบคุมดินที่ใช้ปลูกให้เป็นลักษณะเดียวกัน และคำนวณการใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ในพื้นที่แต่ละคู่ทดลองให้เท่ากันในปริมาณ 3 กรัม/พื้นที่ 1 แปลง (คำนวณจากปริมาณ 25 กิโลกรัม/ไร่)
3. เตรียมแปลงปลูกในแต่ละคู่จำนวน 2 แปลง/คู่ โดยแต่ละแปลงให้มีพื้นที่กว้าง x ยาว เท่ากับ 20 cm x 120 cm (ภาพ 15)



ภาพ 15 การเตรียมพื้นที่แปลงปลูก

4. เตรียมเพาะเมล็ดถั่วในภาชนะเพื่อเตรียมคัดต้นอ่อนที่มีอัตราการรอด และลักษณะการเจริญเท่าเทียมกัน (อายุประมาณ 3 วัน หลังจากการงอก: 3 Days of after Emergence : 3 DAE) (ภาพ 16 และ 17)



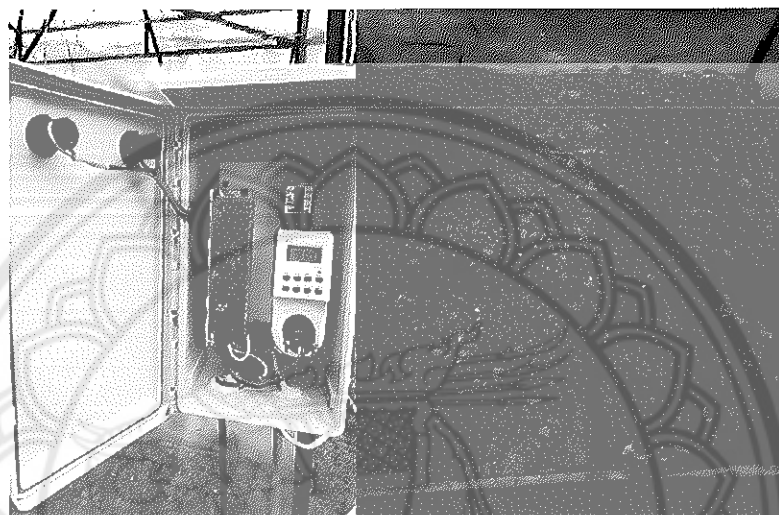
ภาพ 16 การเพาะเมล็ดถั่วเหลืองในภาชนะเพื่อเตรียมคัดต้นอ่อน



ภาพ 17 ต้นอ่อนที่มีอัตราการรอดเท่าเทียมกัน

5. จัดการย้ายปลุกใน OTC โดยกำหนดให้มีจำนวน 3 หลุม/แปลง และปลุกจำนวน 4 ต้น/หลุม

6. ควบคุมระดับการรดน้ำให้เท่าเทียมกันโดยใช้ระบบการให้น้ำแบบหยดแบบตั้งเวลาอัตโนมัติ และควบคุมการให้น้ำในปริมาณ และเวลาที่เท่ากัน (ภาพ 18)



ภาพ 18 ระบบการให้น้ำหยดแบบตั้งเวลาอัตโนมัติ

ปัจจัยทางกายภาพที่ศึกษาในตู้ทดลอง

1. ตรวจวัดระดับอุณหภูมิอากาศภายใน OTC 4 ช่วงเวลา ตั้งแต่เริ่มปลูกจนกระทั่งถึงช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยว
2. ตรวจวัดระดับอุณหภูมิในดิน 4 ช่วงเวลา

พารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา

1. ตรวจวัดปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนทำการปลูก

ทำการตรวจวัดธาตุอาหารในดินก่อนการปลูกแล้วเพื่อทดสอบ และยืนยันว่ามีสภาวะที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกตู้ทดลอง ปริมาณธาตุอาหารหลักในดิน ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด, ไนโตรเจนในรูปแบบที่มีประโยชน์, ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่มีประโยชน์ และโพแทสเซียมในรูปแบบที่มีประโยชน์ ซึ่งการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังนี้

- 1.1 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) โดยใช้วิธีการของ Kjeldahl method

1.2 ไนโตรเจนในรูปแบบที่มีประโยชน์ คือ NH_4^+ , NO_3^- โดยใช้วิธีการของ Steam distillation method

1.3 ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่มีประโยชน์ (Monohydrogen Phosphate : HPO_4^{2-}) โดยใช้วิธีใช้น้ำยาสกัดของ Bray II และวัดค่าด้วยเครื่อง Spectrophotometer

1.4 โพแทสเซียมในรูปแบบที่มีประโยชน์ (K^+) โดยวัดค่าด้วยเครื่อง Spectrophotometer

2. องค์ประกอบของผลผลิต (Yield Components)

ทำการเก็บเกี่ยวเมล็ดหลังระยะ R8 และวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิต และคุณภาพผลผลิตที่สำคัญดังนี้ (Liu et al., 2010)

2.1 จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น (Pods/plant) โดยนับเฉพาะฝักที่มีเมล็ด (ไม่นับฝักลีบแบน)

2.2 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก (Seeds/pod) โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์

2.3 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์

2.4 น้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (100 – seed weight)

3. สารอาหารสำคัญ

นำเมล็ดที่สมบูรณ์ของแต่ละสิ่งทดลองทั้ง 4 ซ้ำ ทำการวิเคราะห์คุณภาพสารอาหารในห้องปฏิบัติการดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนรวม (Crude Protein, CP) โดยวิธีของ AOAC 40.1.06, 1995

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณกรดอะมิโน (Amino Acids) โดยวิธีของ AOAC 4.1.13, 1995

วิเคราะห์กรดอะมิโนที่เป็นพารามิเตอร์สำคัญ 3 ชนิด คือ

3.2.1 Lysine

3.2.2 Glycine

3.2.3 Methionine

4. การแปรรูปถั่วเหลืองเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร โดยวิธีของ สำนักงานมาตรฐาน
อุตสาหกรรม, 2546)

เมื่อทำการเก็บเกี่ยวหลังระยะ R8 นำเมล็ดถั่วเหลืองทั้ง 4 สิ่งทดลอง มาแปรรูป
เป็นผลิตภัณฑ์เต้าหู้แข็ง เพื่อดูลักษณะของผลิตภัณฑ์ และคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการบริโภค
ซึ่งขั้นตอนของการแปรรูปเต้าหู้จากถั่วเหลืองมีดังนี้ นำเมล็ดถั่วเหลืองมาล้างด้วยน้ำให้สะอาด
แช่น้ำ 5-6 ชั่วโมง จากนั้นนำถั่วเหลืองมาปั่นให้ละเอียดกรองเอากากถั่วเหลืองออก นำน้ำเต้าหู้ที่ได้
ไปต้มไฟอ่อนๆ และเติมสารที่ช่วยในการทำให้ออกตะกอนแล้วนำตะกอนที่ได้ใส่ลงแบบพิมพ์ที่รอง
ด้วยผ้าขาวบางเพื่อทับน้ำออก จากนั้นจะได้เต้าหู้ที่มีลักษณะเป็นแผ่นหรือก้อน

ระยะเวลาในการทำวิจัย

ทำการวิจัยตั้งแต่ระยะการเตรียมพื้นที่ปลูก จัดทำระบบตู้ทดลองภาคสนามเพื่อควบคุม
อุณหภูมิ และทำการปลูกจนกระทั่งระยะเก็บเกี่ยว และวิเคราะห์คุณภาพสารอาหาร รวมทั้งการ
แปรรูปเต้าหู้ กระบวนการทั้งหมดเริ่มตั้งแต่เดือนกรกฎาคม-ตุลาคม พ.ศ. 2560

สถิติการวิจัย

ในการศึกษาผู้วิจัยวางแผนการทดลองโดยกำหนดให้มีความแตกต่างระหว่าง 4
สิ่งทดลอง มี 1 ตัวแปร ดังนั้นเลือกการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี F-Test และเลือกการวิเคราะห์แบบ
One Way ANOVA และเลือกวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ทดสอบเปรียบเทียบ
ความสัมพัทธ์ระหว่าง 4 สิ่งทดลอง

บทที่ 4

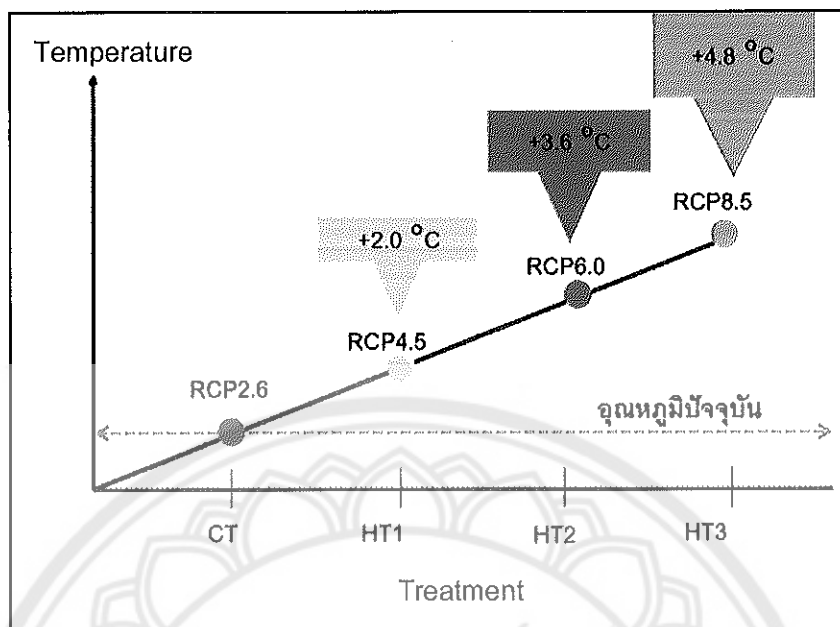
ผลการวิจัย

การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ผลของการวิจัยมีดังต่อไปนี้

ระดับอุณหภูมิที่ควบคุม

1. ระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลอง

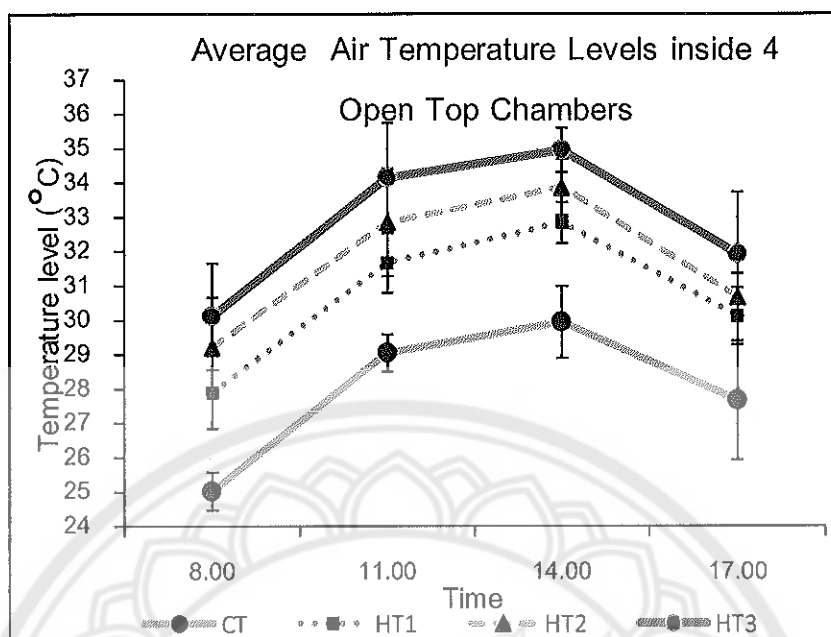
จากการควบคุมระดับอุณหภูมิให้เพิ่มสูงขึ้นในระดับที่แตกต่างกันตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อน ซึ่งได้ควบคุมระดับอุณหภูมิตามภาพฉายอนาคต Representative Concentration Pathways (RCPs) ที่มีผลต่อผลผลิต และคุณภาพสารอาหารที่สำคัญในถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 โดยมีการควบคุมระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลองให้มีความแตกต่างกัน 4 ระดับ โดยใช้ระบบ อิเลคทรอนิกส์ร่วมกับสภาวะธรรมชาติใน 4 สิ่งทดลอง (4 ซ้ำ) จำนวน 16 ตู้ และในการควบคุมระดับอุณหภูมิในตู้ทดลองทั้งหมด 16 ตู้ จะมีการใช้ระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติเพื่อควบคุมระบบเปิด และปิดการทำงานของไฟฟ้าในช่วงระยะเวลา 07.00 น. ถึง 17.00 น. (10 ชั่วโมง) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่พืชมีการสังเคราะห์แสงที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้ระยะเวลาตั้งแต่ถั่วเหลือง เข้าระยะที่ V1 จนกระทั่งถึงระยะเก็บเกี่ยว R8 (ภาพ 19) นอกจากนี้ได้ทำการจดบันทึกผลของระดับอุณหภูมิอากาศภายในตู้ทดลอง และอุณหภูมิในดินภายในตู้ทดลอง 4 ช่วงเวลาใน 1 วัน ดังนี้ 08.00 น., 11.00 น., 14.00 น. และ 17.00 น. จากการศึกษาพบว่าสามารถควบคุมระดับของอุณหภูมิให้มีความแตกต่างกันในแต่ละสิ่งทดลองตลอดระยะเวลาการทดลองโดยพบว่าคุณค่าเฉลี่ยในการควบคุมอุณหภูมิทั้ง 4 สิ่งทดลอง นั้นมีระดับอุณหภูมิเป็นไปตามแบบจำลองภาพฉายอนาคต RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 และ RCP8.5 ตามรายงานของ IPCC (ตาราง 7 และ ภาพ 20)



ภาพ 19 การควบคุมระดับอุณหภูมิทั้ง 4 สิ่งทดลอง ตามแบบจำลอง
ภาพขนาด RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 และ RCP8.5

ตาราง 7 เวลาและค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการตรวจวัดในตู้ทดลอง

สิ่งทดลอง	เวลา และระดับอุณหภูมิ (°C)				ค่าเฉลี่ย ทั้งวัน
	08.00 น.	11.00 น.	14.00 น.	17.00 น.	
CT	25.02±0.56	29.04±0.54	29.94±1.05	27.67±1.74	28±2.14
HT1	27.90±1.07	31.67±0.87	32.83±0.59	30.11±0.83	30±2.13
HT2	29.21±1.46	32.84±1.57	33.87±0.81	30.67±0.70	31.6±2.10
HT3	30.10±1.54	34.14±1.61	34.95±0.64	31.92±1.81	32.8±2.20



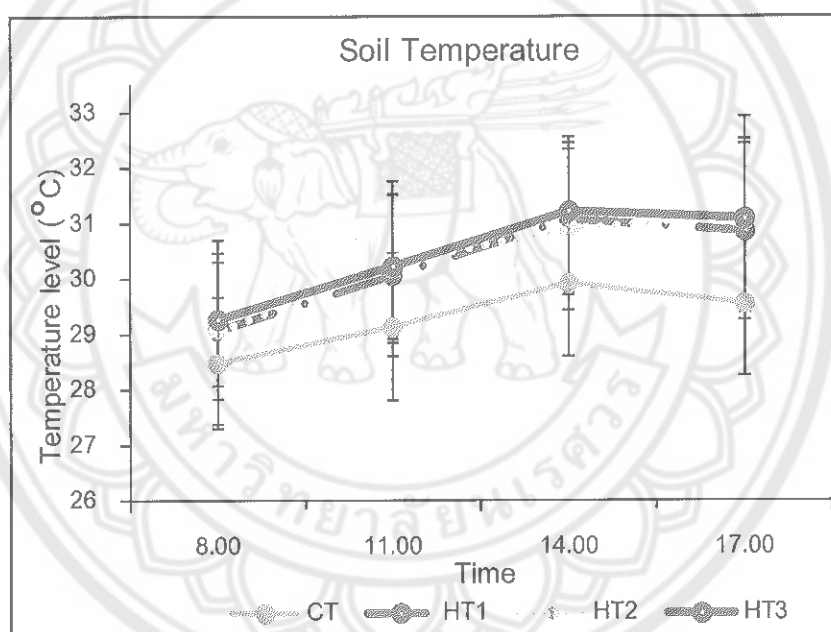
ภาพ 20 ค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิอากาศภายในตู้สิ่งทดลองทั้ง 4 ระดับ

2. อุณหภูมิดินภายในตู้ทดลอง

จากการตรวจวัดระดับอุณหภูมิในดินภายในตู้ทดลอง โดยมีการควบคุมระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลองให้มีความแตกต่างกัน 4 ระดับ โดยจะมีการใช้ระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติเพื่อควบคุมระบบเปิด และปิดการทำงานของไฟฟ้าในช่วงระยะเวลา 07.00 น. ถึง 17.00 น. (10 ชั่วโมง) และได้ทำการจดบันทึกผลของระดับอุณหภูมิ 4 ช่วงเวลาใน 1 วัน ดังนี้ 08.00 น., 11.00 น., 14.00 น. และ 17.00 น. จากการศึกษาพบว่าระดับอุณหภูมิภายในดิน ค่าเฉลี่ยใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ตาราง 8 และภาพ 21)

ตาราง 8 เวลาและค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิในดินจากการตรวจวัดในตู้ทดลอง

สิ่งทดลอง	เวลา และระดับอุณหภูมิในดิน ($^{\circ}\text{C}$)				ค่าเฉลี่ย ทั้งวัน
	08.00 น.	11.00 น.	14.00 น.	17.00 น.	
CT	28.0 $\pm$ 1.2	28.6 $\pm$ 1.3	29.4 $\pm$ 1.3	29.1 $\pm$ 1.3	28.8 $\pm$ 0.5
HT1	28.6 $\pm$ 1.2	29.6 $\pm$ 1.5	30.6 $\pm$ 1.4	30.4 $\pm$ 1.6	29.8 $\pm$ 0.8
HT2	28.5 $\pm$ 1.7	29.8 $\pm$ 1.5	30.4 $\pm$ 1.4	30.7 $\pm$ 1.8	29.8 $\pm$ 0.8
HT3	28.8 $\pm$ 1.2	29.7 $\pm$ 1.3	30.7 $\pm$ 1.3	30.6 $\pm$ 1.4	29.9 $\pm$ 0.8



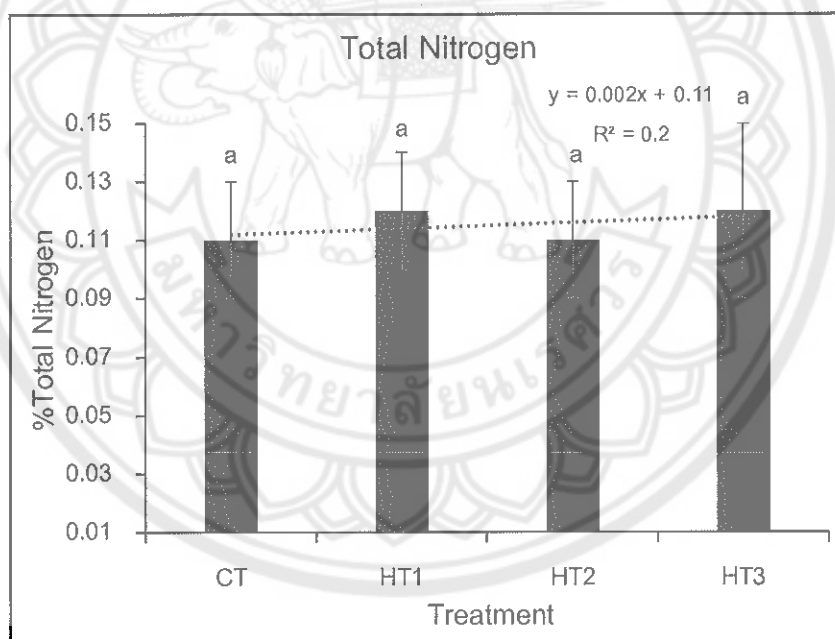
ภาพ 21 ค่าเฉลี่ยของระดับอุณหภูมิในดินภายในตู้สิ่งทดลองทั้ง 4 ระดับ

ระดับธาตุอาหารในดิน

1. ปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนปลูก

ทำการตรวจวัดปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนปลูกเพื่อทดสอบ และยืนยันว่าสภาพของดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกจุดทดลอง และปริมาณธาตุอาหารในดินที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ไนโตรเจนทั้งหมด, ไนโตรเจนในรูปแบบที่มีประโยชน์, ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่มีประโยชน์ และโพแทสเซียมในรูปแบบที่มีประโยชน์

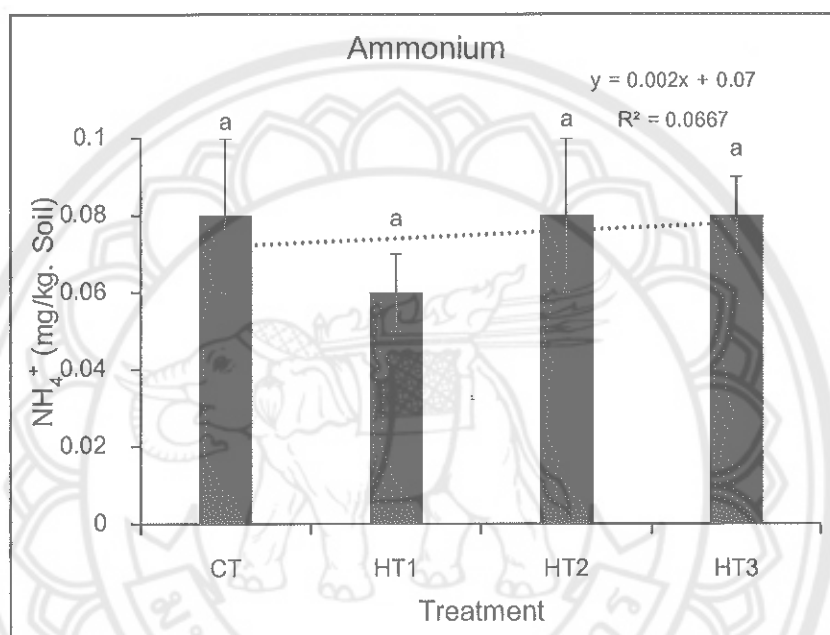
1.1 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) จากการศึกษาก่อนการปลูกพบว่ามีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนปลูก พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ยใน 4 สิ่งทดลอง เท่ากับ 0.108 ± 0.022 , 0.117 ± 0.016 , 0.109 ± 0.015 และ 0.124 ± 0.031 %T-N ในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ (ภาพ 22)



ภาพ 22 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

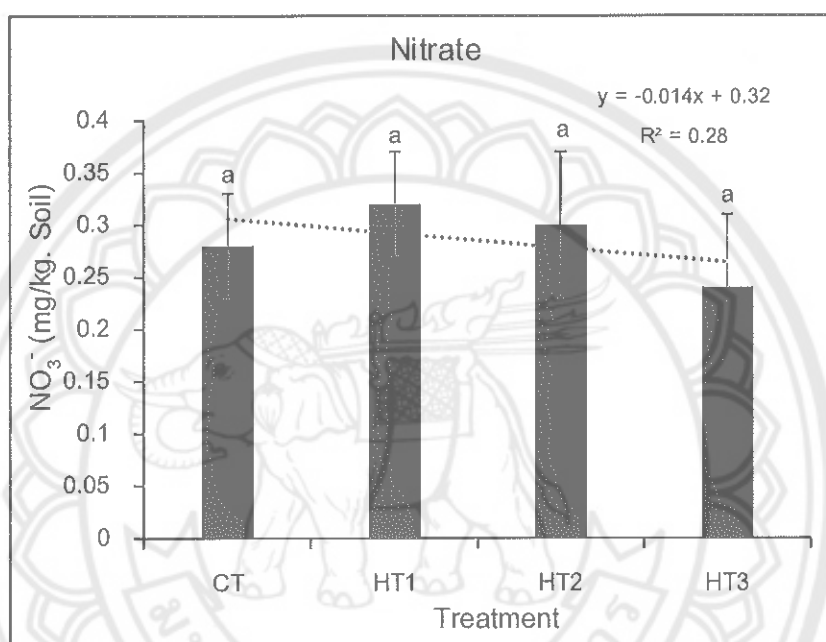
1.2 ปริมาณไนโตรเจนในรูปแบบที่มีประโยชน์ในรูปของแอมโมเนียม (Ammonium: NH_4^+) จากการศึกษาปริมาณของแอมโมเนียมในดินก่อนปลูก พบว่าปริมาณแอมโมเนียมในดิน 'ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)' ซึ่งมีปริมาณโดยเฉลี่ยใน 4 สิ่งทดลอง เท่ากับ 0.085 ± 0.018 , 0.058 ± 0.010 , 0.082 ± 0.021 และ 0.085 ± 0.011 mg/kg. Soil ในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ (ภาพ 23)



ภาพ 23 ปริมาณแอมโมเนียมในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

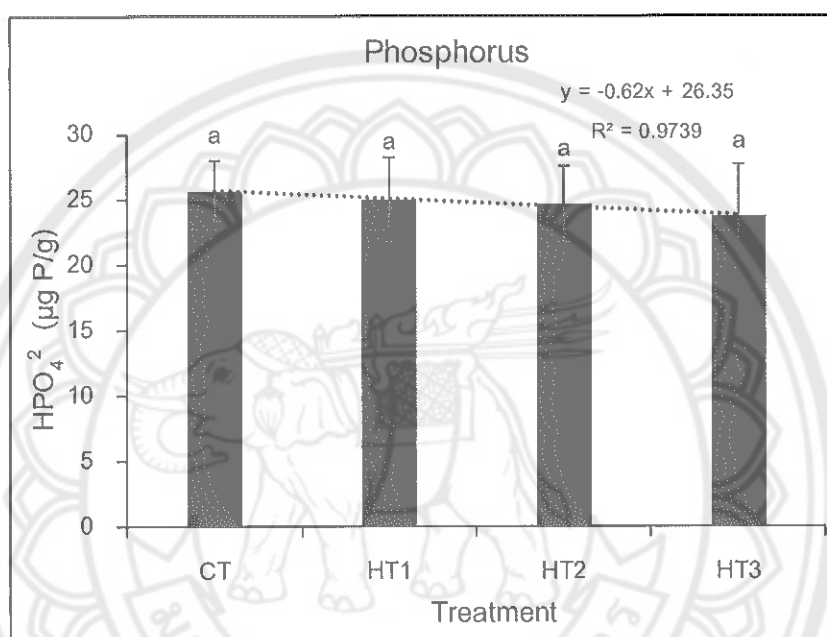
1.3 ปริมาณไนโตรเจนในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ในรูปของไนเตรท (Nitrate: NO_3^-) จากการศึกษ ปริมาณไนเตรทในดินก่อนปลูก พบว่าปริมาณของไนเตรทในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) มีปริมาณโดยเฉลี่ยใน 4 สิ่งทดลอง เท่ากับ 0.277 ± 0.053 , 0.315 ± 0.049 , 0.303 ± 0.069 และ 0.236 ± 0.069 mg/kg. Soil ในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ (ภาพ 24)



ภาพ 24 ปริมาณธาตุอาหารไนเตรทในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

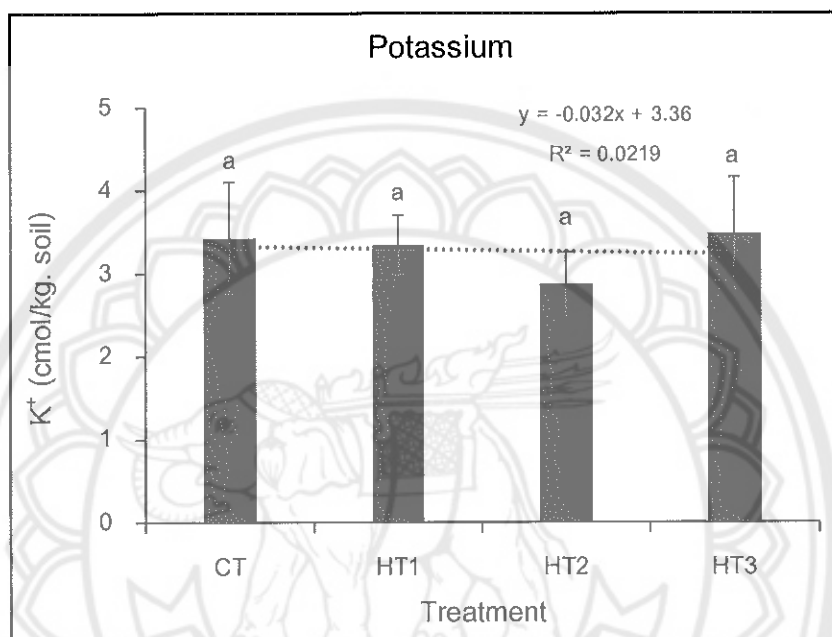
1.4 ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่มีประโยชน์ (Monohydrogen Phosphate : HPO_4^{2-}) จากการศึกษาฟอสฟอรัสในดินก่อนปลูก พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสในดินที่เป็นประโยชน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) มีปริมาณโดยเฉลี่ยใน 4 สิ่งทดลอง เท่ากับ 25.70 ± 2.30 , 25.06 ± 3.22 , 24.68 ± 2.91 และ 23.76 ± 3.97 $\mu\text{g P/g}$ ในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ (ภาพ 25)



ภาพ 25 ปริมาณธาตุอาหารฟอสฟอรัสในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

1.5 โพแทสเซียมในรูปแบบที่มีประโยชน์ (K^+) จากการศึกษาก่อนปลูกพบว่าปริมาณโพแทสเซียมในดินไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) มีปริมาณโดยเฉลี่ยใน 4 สิ่งทดลอง เท่ากับ 3.430 ± 0.671 , 3.343 ± 0.356 , 2.868 ± 0.394 และ 3.481 ± 0.679 cmol/kg. soil ในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ (ภาพ 26)



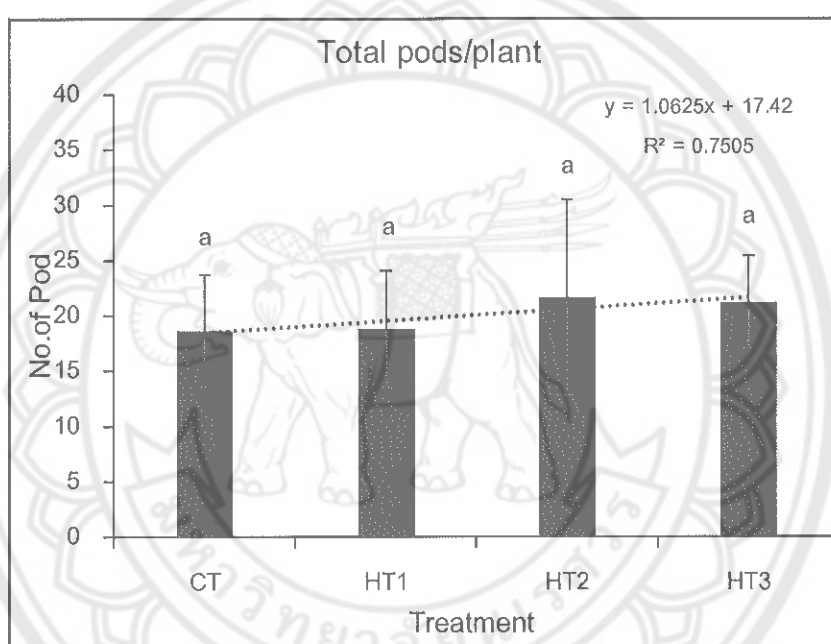
ภาพ 26 ปริมาณธาตุอาหารโพแทสเซียมในดินก่อนปลูกในระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

องค์ประกอบของผลผลิต

1. จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น (Pods/plant)

จากผลการศึกษานี้จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น พบว่าลักษณะของฝักถั่วเหลืองที่ทำการปลูก ภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ซึ่งมีจำนวนเท่ากับ 18.63 ± 5.08 , 18.79 ± 5.26 , 21.65 ± 8.88 และ 21.22 ± 4.15 ฝัก/ต้น ตามลำดับ (ภาพ 27) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 พบว่ามีลักษณะของฝักลีบแบนอย่างชัดเจน

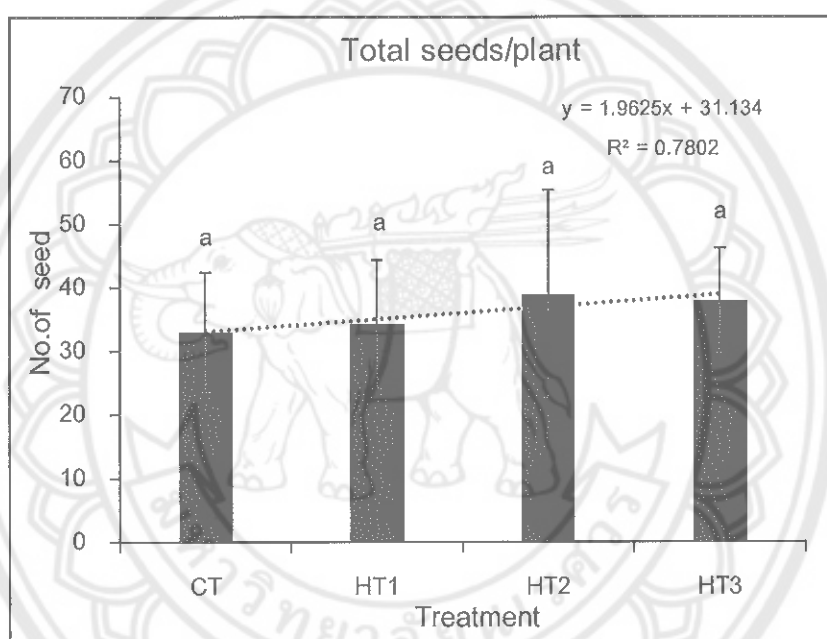


ภาพ 27 จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น (Pods/plant)

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

2. จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยนับรวมเมล็ดลีบ

จากผลการศึกษาจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น โดยนับรวมเมล็ดลีบ พบว่าลักษณะของเมล็ดถั่วเหลืองที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีจำนวนเท่ากับ 32.97 ± 9.45 , 34.28 ± 10.11 , 38.96 ± 16.33 และ 37.96 ± 8.24 เมล็ด/ต้น ตามลำดับ (ภาพ 28) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 แม้ว่าจะมีจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ลักษณะของเมล็ดลีบแบนอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT และ HT1

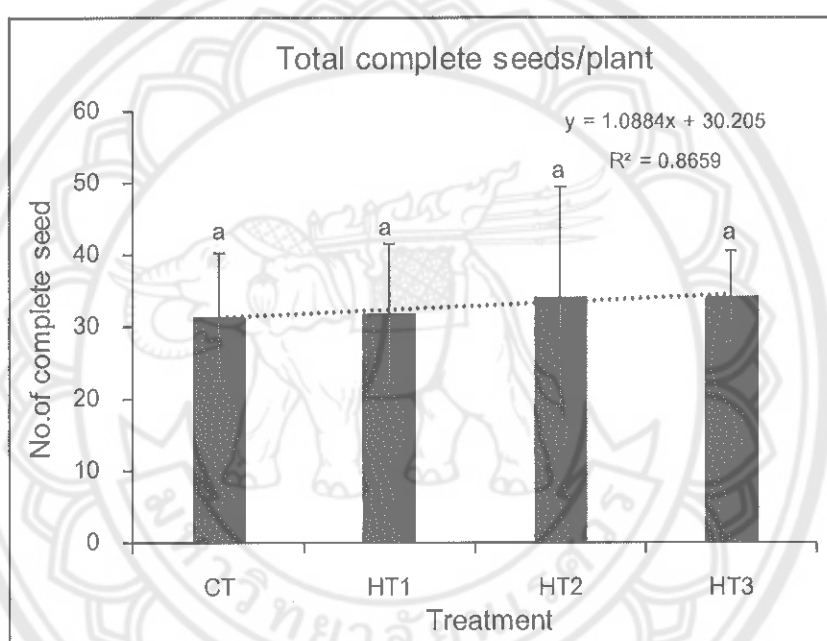


ภาพ 28 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยนับรวมเมล็ดลีบ

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

3. จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยไม่นับรวมเมล็ดลีบ

จากผลการศึกษาด้านจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น โดยไม่นับรวมเมล็ดลีบ พบว่าลักษณะของเมล็ดถั่วเหลืองที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีจำนวนเท่ากับ 31.39 ± 8.88 , 31.87 ± 9.72 , 34.21 ± 15.28 และ 34.24 ± 6.33 เมล็ด/ต้น ตามลำดับ (ภาพ 29) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 แม้ว่าจะมีจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น ในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ลักษณะของเมล็ดมีขนาดเล็กอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT และ HT1

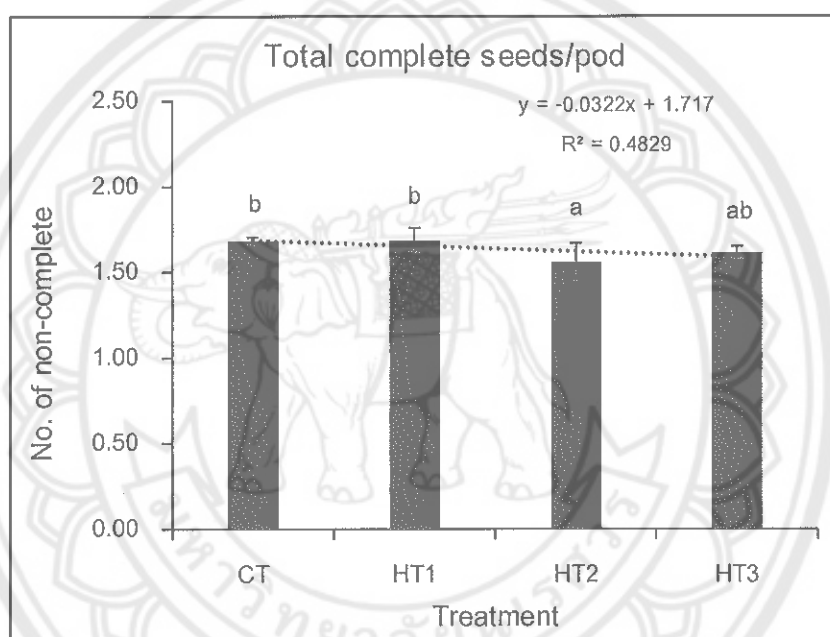


ภาพ 29 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยไม่นับรวมเมล็ดลีบ

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P>0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

4. จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก (Seeds/pod) โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์

จากผลการศึกษาจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์ พบว่าลักษณะของเมล็ดถั่วเหลืองที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีจำนวนเท่ากับ 1.68 ± 0.02 , 1.69 ± 0.07 , 1.56 ± 0.11 และ 1.62 ± 0.03 เมล็ด/ฝัก ตามลำดับ (ภาพ 30) และในสิ่งทดลอง CT, HT1 และ HT3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 มีจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก ลดลง 7.1 % และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT

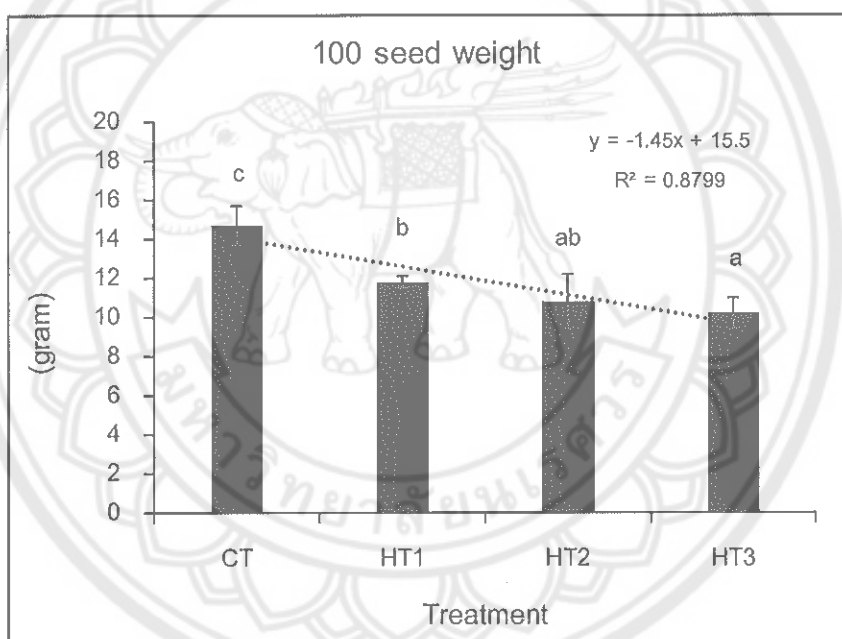


ภาพ 30 จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก (Seeds/pod) โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P > 0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

5. น้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (100 – seed weight)

จากผลการศึกษารวบรวมวิเคราะห์น้ำหนัก 100 เมล็ด (100 – seed weight) พบว่าลักษณะของเมล็ดถั่วเหลืองที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 ทั้ง 4 สิ่งทดลองมีน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด เท่ากับ 14.70 ± 1.00 , 11.80 ± 0.30 , 10.80 ± 1.40 และ 10.20 ± 0.80 กรัมตามลำดับ (ภาพ 31) เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ในสิ่งทดลอง HT3 พบว่ามีขนาดของเมล็ดลดลงมากที่สุด 31 % และในสิ่งทดลอง HT1 และ HT2 มีขนาดของเมล็ดลดลงรองลงมา 20 % และ 27 % เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT ตามลำดับ ซึ่งแปรผันตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาพฉายอนาคต RCPs เมื่อทดสอบด้วยค่า R^2 พบว่ามีระดับสูงถึง 0.8

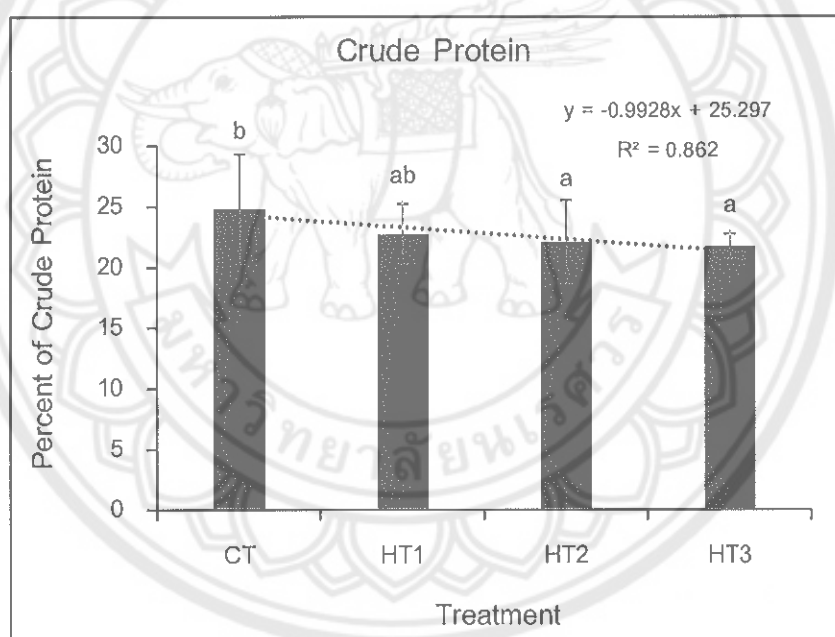


ภาพ 31 น้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (100-seed weight)

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

ปริมาณโปรตีนในเมล็ด

จากผลการศึกษาปริมาณโปรตีนในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่าในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีปริมาณโปรตีนในเมล็ดเท่ากับ 24.79 ± 4.52 , 22.72 ± 2.49 , 22.05 ± 3.46 และ $21.70 \pm 1.02\%$ (ภาพ 32) และในสิ่งทดลอง HT1 เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยปริมาณโปรตีนในเมล็ดลดลง 11 % และ 12 % เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ตามลำดับ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าถั่วเหลืองที่ปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในเมล็ดลดลง ซึ่งแปรผันตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาพฉายขนาด RCPs เมื่อทดสอบด้วยค่า R^2 พบว่ามีค่าสูงถึง 0.8



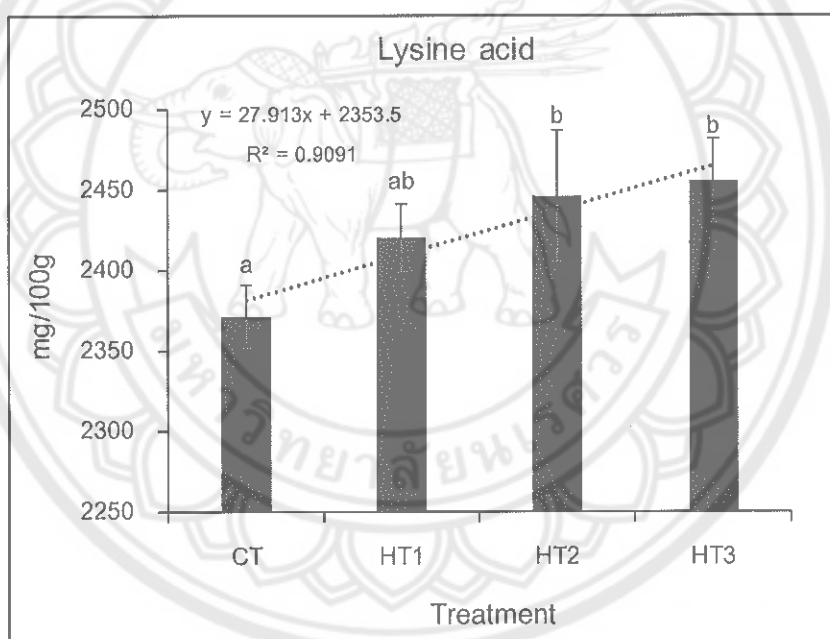
ภาพ 32 ปริมาณโปรตีนในเมล็ด (Crude protein)

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$
ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

ปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ด

1. Lysine acid

จากผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโน Lysine ในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่าในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีปริมาณเท่ากับ 2371.30 ± 19.56 , 2420.04 ± 21.13 , 2446.25 ± 40.50 และ 2455.60 ± 26.22 mg/100g ตามลำดับ (ภาพ 33) และในสิ่งทดลอง HT1 เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยมีปริมาณกรดอะมิโน Lysine ในเมล็ดเพิ่มขึ้น 3 % และ 4 % เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ตามลำดับ ซึ่งแปรผันตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาพฉายอนาคต RCPs เมื่อทดสอบด้วยค่า R^2 พบว่ามีค่าสูงถึง 0.9

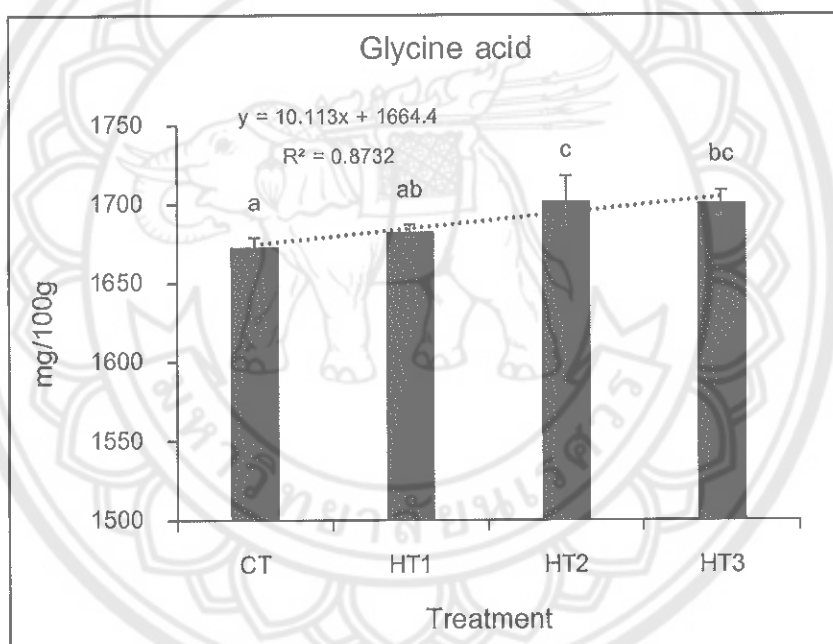


ภาพ 33 ปริมาณกรดอะมิโน Lysine

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

2. Glycine acid

จากผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโน Glycine ในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่าในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีปริมาณเท่ากับ 1673.27 ± 5.65 , 1682.90 ± 4.10 , 1701.95 ± 16.10 และ 1700.63 ± 8.19 mg/100g ตามลำดับ (ภาพ 34) และในสิ่งทดลอง HT1 เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยมีปริมาณกรดอะมิโน Glycine ในเมล็ดเพิ่มขึ้น 2 % ทั้ง 2 treatment เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ซึ่งแปรผันตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาพฉายอนาคต RCPs เมื่อทดสอบด้วยค่า R^2 พบว่ามีค่าสูงถึง 0.8

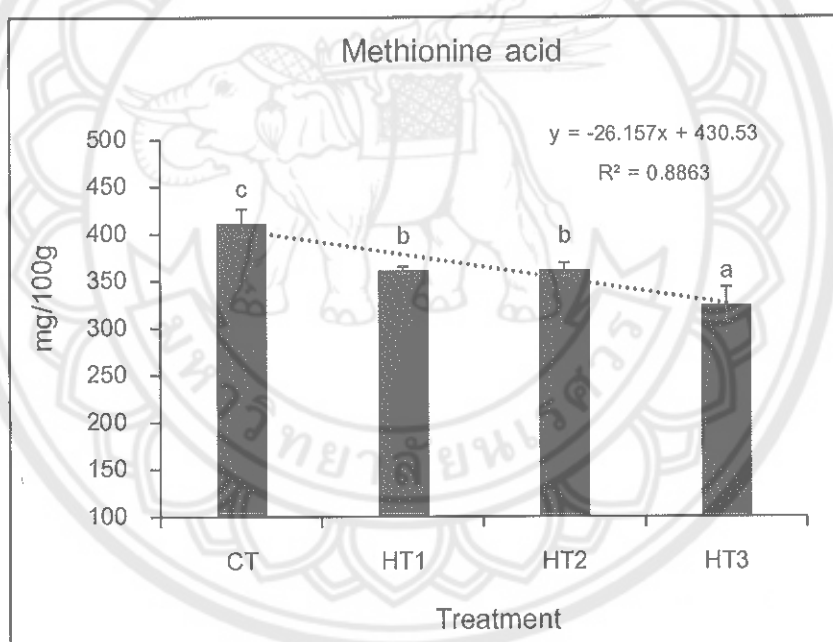


ภาพ 34 ปริมาณกรดอะมิโน Glycine

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$
ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

3. Methionine acid

จากผลการศึกษาปริมาณกรดอะมิโน Methionine ในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่าในสิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีปริมาณเท่ากับ 412.06 ± 14.62 , 361.61 ± 3.63 , 362.19 ± 7.19 และ 324.67 ± 18.82 mg/100g ตามลำดับ (ภาพ 35) ซึ่งมีผลตรงข้ามกับกรดอะมิโนทั้ง 2 ชนิด ดังที่กล่าวมาข้างต้น เพราะกรดอะมิโน Methionine เป็นกรดอะมิโนชนิดเดียวที่ลดลงภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น และใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมีปริมาณกรดอะมิโน Methionine ในเมล็ดลดลง 12 %, 12 % และ 21 % เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลอง CT ตามลำดับ ซึ่งแปรผันตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามภาพฉายอนาคต RCPs เมื่อทดสอบด้วยค่า R^2 พบว่ามีค่าสูงถึง 0.8



ภาพ 35 ปริมาณกรดอะมิโน Methionine

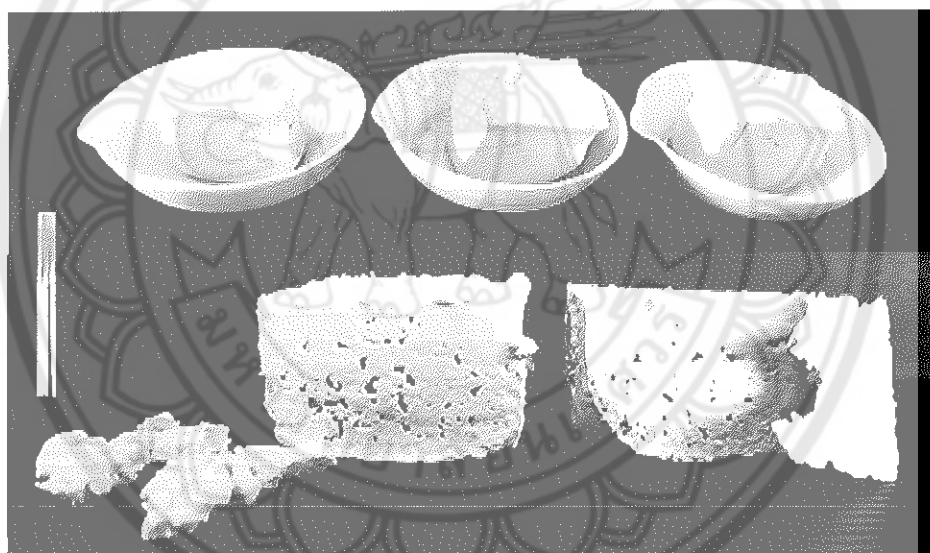
หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$ ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

คุณลักษณะของเต้าหู้

ลักษณะของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ที่แปรรูปจากถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระดับที่แตกต่างกันได้ผลการศึกษาดังนี้

1. ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง CT

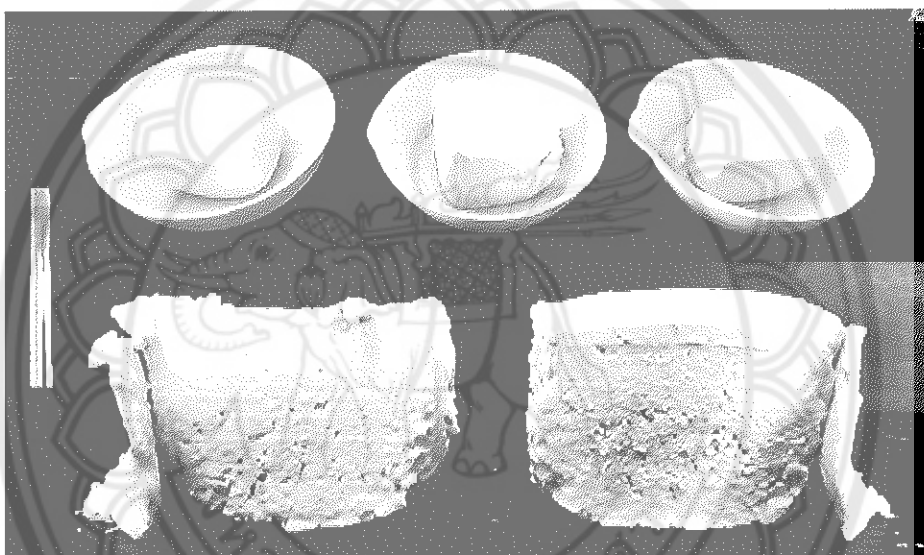
จากผลการศึกษาเต้าหู้มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง ไม่แตกออกจากกัน มีฟองอากาศ สีของเต้าหู้มีสีขาวนวล ลักษณะเนื้อของเต้าหู้เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความแน่น ค่าความเป็นกรดต่างของเต้าหู้เท่ากับ pH 6-7 ค่าการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis) เท่ากับ 88.00 ± 2.65 (ภาพ 40) ค่าความชื้น (Moisture) เท่ากับ 71.00 ± 0.62 (ภาพ 41) และค่า Water Activity (Aw) เท่ากับ 0.848 ± 0.006 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของอาหารประเภทกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) ที่มีค่า Aw อยู่ในช่วง 0.6-0.85 (ตาราง 9 และภาพ 36)



ภาพ 36 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง CT

2. ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT1

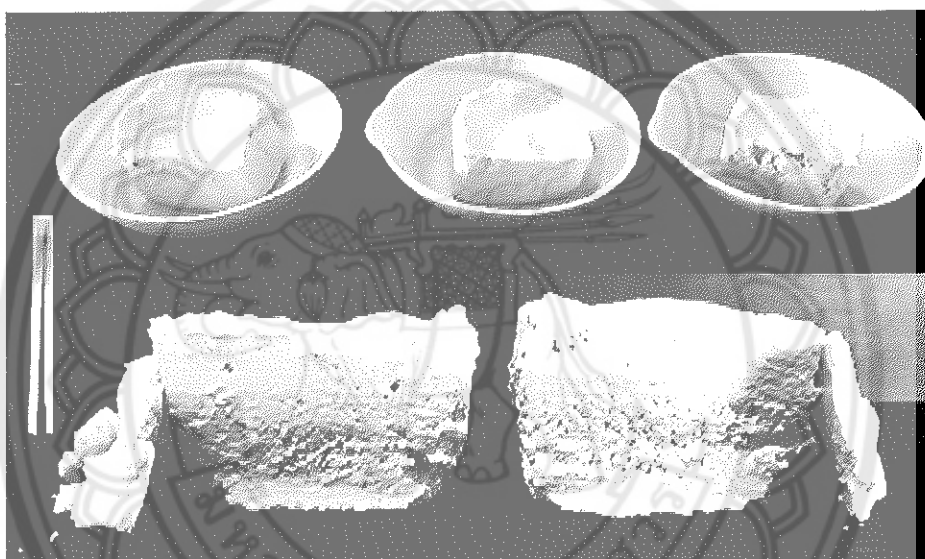
จากผลการศึกษาเต้าหู้มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก ไม่มีฟองอากาศ สีของเต้าหู้มีสีขาวนวล ลักษณะเนื้อของเต้าหู้เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันแต่ค่อนข้างละเอียด ค่าความเป็นกรดต่างของเต้าหู้เท่ากับ pH 6-7 ค่าการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis) เท่ากับ 67.33 ± 2.89 (ภาพ 40) ค่าความชื้น (Moisture) เท่ากับ 72.49 ± 0.07 (ภาพ 41) และค่า Water Activity (Aw) เท่ากับ 0.848 ± 0.005 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของอาหารประเภทกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) ที่มีค่า Aw อยู่ในช่วง 0.6-0.85 (ตาราง 9 และภาพ 37)



ภาพ 37 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT1

3. ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT2

จากผลการศึกษาเต้าหู้มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก ไม่มีฟองอากาศ สีของเต้าหู้มีสีขาวนวล ลักษณะเนื้อของเต้าหู้เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันแต่ค่อนข้างละเอียด ค่าความเป็นกรดต่างของเต้าหู้เท่ากับ pH 6-7 ค่าการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis) เท่ากับ 54.67 ± 3.79 (ภาพ 40) ค่าความชื้น (Moisture) เท่ากับ 77.50 ± 0.55 (ภาพ 41) และค่า Water Activity (A_w) เท่ากับ 0.847 ± 0.009 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของอาหารประเภทกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) ที่มีค่า A_w อยู่ในช่วง 0.6-0.85 (ตาราง 9 และภาพ 38)



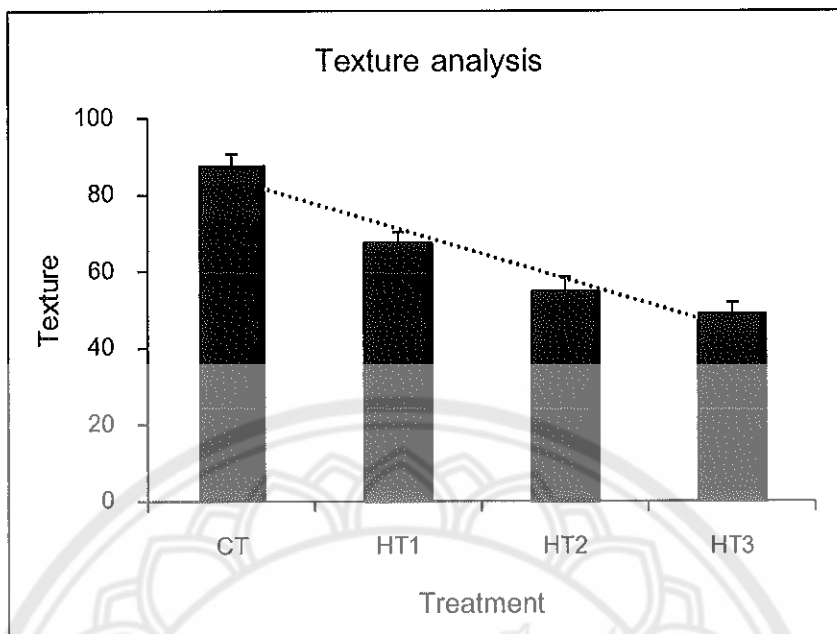
ภาพ 38 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT2

4. ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT3

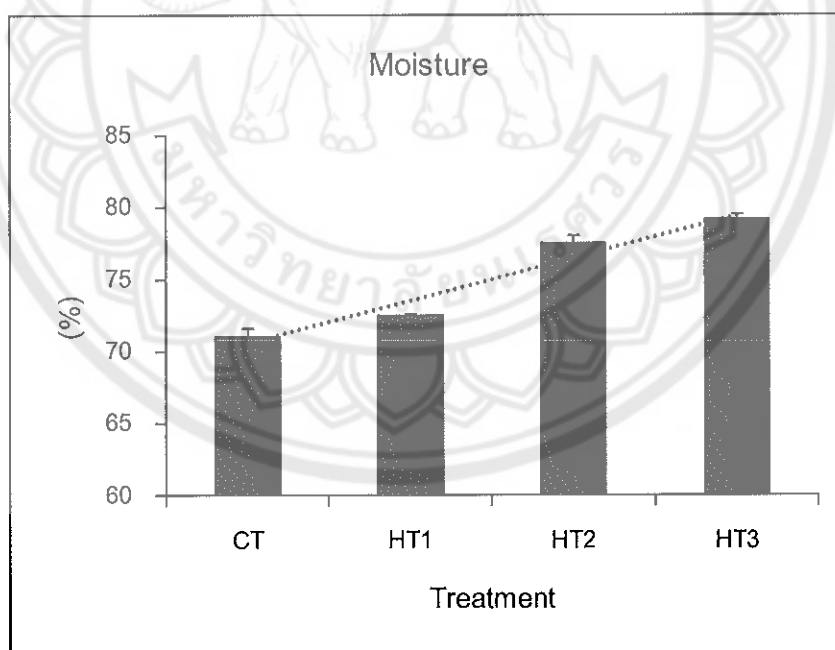
จากผลการศึกษาเต้าหู้มีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก ไม่มีฟองอากาศ สีของเต้าหู้มีสีขาวนวล ลักษณะเนื้อของเต้าหู้เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันแต่ค่อนข้างละเอียด ค่าความเป็นกรดต่างของเต้าหู้เท่ากับ pH 6-7 ค่าการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis) เท่ากับ 48.67 ± 3.21 (ภาพ 40) ค่าความชื้น (Moisture) เท่ากับ 79.18 ± 0.36 (ภาพ 41) และค่า Water Activity (A_w) เท่ากับ 0.845 ± 0.009 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของอาหารประเภทกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) ที่มีค่า A_w อยู่ในช่วง 0.6 - 0.85 (ตาราง 9 และภาพ 39)



ภาพ 39 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT3



ภาพ 40 ค่าวัดเนื้อสัมผัส (Texture analysis)



ภาพ 41 ค่าความชื้น (Moisture)

ตาราง 9 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของเต้าหู้ในแต่ละสิ่งทดลอง

Treatment	ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture structure)	pH	ค่าวัดเนื้อสัมผัส (Texture analysis)	ค่าความชื้น (Moisture) %	แอดคิวิตีของน้ำ (Water activity: a_w)	การจำแนกตามค่าแอดคิวิตี ของน้ำ (Water activity: a_w)
CT	เต้าหู้จับกันเป็นก้อนแข็ง ไม่แตกออก					
	จากกัน สีขาวนวล เนื้อเนียนแน่น ไม่แตก มีฟองอากาศ	6 - 7	88.00±2.65	71.00±0.62	0.848±0.006	
HT1	เต้าหู้จับกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก					
	สีขาวนวล เนื้อเนียนค่อนข้างและ ไม่มีฟองอากาศ	6 - 7	67.33±2.89	72.49±0.07	0.848±0.005	อาหารกึ่งแห้ง (intermediate moisture food)
HT2	เต้าหู้จับกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก					
	สีขาวนวล เนื้อเนียนค่อนข้างและ ไม่มีฟองอากาศ	6 - 7	54.67±3.79	77.50±0.55	0.847±0.009	0.6< a_w <0.85
HT3	เต้าหู้จับกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก					
	สีขาวนวล เนื้อเนียนค่อนข้างและ ไม่มีฟองอากาศ	6 - 7	48.67±3.21	79.18±0.36	0.845±0.009	

บทที่ 5

บทสรุป

การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 สามารถสรุปได้ดังนี้

สรุปผลการวิจัย

การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60 ซึ่งได้ทำการควบคุมระดับอุณหภูมิให้เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาพอากาศ Representative Concentration Pathways (RCPs) โดยควบคุมระดับอุณหภูมิให้มีความแตกต่างกันทั้งหมด 4 ระดับ ได้แก่ CT (เป็นชุดควบคุม) ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิตามธรรมชาติในปัจจุบัน (RCP 2.6), HT1 ควบคุมตามแนวโน้มสภาพอากาศ RCP 4.5, HT2 ควบคุมตามแนวโน้มสภาพอากาศ RCP 6.0 และ HT3 ควบคุมตามแนวโน้มสภาพอากาศ RCP 8.5 โดยใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับสภาวะธรรมชาติโดยควบคุมระดับอุณหภูมิทั้งหมด 16 ตู้ (4 ชั้น) และจัดบันทึกผลของระดับอุณหภูมิ 4 ช่วงเวลาใน 1 วัน ดังนี้ 08.00 น., 11.00 น., 14.00 น. และ 17.00 น. จากการศึกษาผลกระทบของผลผลิต คุณภาพสารอาหาร และคุณลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากถั่วเหลือง ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนปลูกถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen), ไนโตรเจนในรูปแบบที่มีประโยชน์ เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+), ไนเตรต (NO_3^-), ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่มีประโยชน์ (Monohydrogen Phosphate : HPO_4^{2-}) และโพแทสเซียมในรูปแบบที่มีประโยชน์ (K^+) ในดินระยะก่อนปลูก ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ใน 4 สิ่งทดลอง CT, HT1, HT2 และ HT3

2. ผลการศึกษาร้อยประกอบของผลผลิตของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ปลูกภายใต้ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 จากผลการศึกษาคู่ประกอบผลผลิตของถั่วเหลืองสามารถสรุปได้ว่า จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น (Pods/plant), จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยนับรวมเมล็ดลีบ และจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ต้น (Seeds/plant) โดยไม่นับรวมเมล็ดลีบ ที่ปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่ามีลักษณะของฝักและเมล็ดลีบแบน ถึงแม้ว่าเมล็ดจะมีจำนวนมาก แต่ลักษณะของเมล็ดมีขนาดเล็ก และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

2.2 จากผลการศึกษาคู่ประกอบผลผลิตของถั่วเหลืองสามารถสรุปได้ว่า จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก (Seeds/pod) โดยนับเฉพาะเมล็ดสมบูรณ์, และน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (100-seed weight) ที่ปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่าเมล็ดมีขนาดเล็ก และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

3. ผลการวิเคราะห์สารอาหารที่สำคัญในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ปลูกภายใต้ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

3.1 ปริมาณโปรตีนในเมล็ด พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อระดับโปรตีนในเมล็ดลดลง ในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ

3.2 ปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

3.2.1 ปริมาณกรดอะมิโนที่ทำการศึกษ ได้แก่ กรดอะมิโน Lysine และ Glycine มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) พบว่าปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วเหลืองมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลมาจากระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ

3.2.2 ปริมาณกรดอะมิโนที่ทำการศึกษา ได้แก่ กรดอะมิโน Methionine มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) พบว่าปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วเหลืองมีปริมาณลดลง ซึ่งมีผลมาจากระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ

4. คุณลักษณะของเต้าหู้จากเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ทำการปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

4.1 ลักษณะเนื้อสัมผัสเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง CT พบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้จับตัวกันเป็นก้อนแข็ง ไม่แตกออกจากกัน สีขาวนวล เนื้อเนียนแน่น ไม่แตก

มีฟองอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในสิ่งทดลอง CT ถั่วเหลืองมีคุณภาพดีนำไปสู่การผลิตเต้าหู้ที่มีคุณภาพดีอีกด้วย

4.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสเต้าหู้จากการแปรรูปถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 พบว่าเต้าหู้จับกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก สีขาวนวล เนื้อเนียนค่อนข้างละเอียด ไม่มีฟองอากาศ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถั่วเหลืองในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 ที่ปลูกภายใต้สภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีการสูญเสียโปรตีน และกรดอะมิโนบางชนิดส่งผลให้การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เต้าหู้มีลักษณะโครงสร้างไม่ยึดติดกัน

จากผลการศึกษาการประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60 พบว่าระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อองค์ประกอบผลผลิต ส่งผลให้ฝักถั่วเหลืองดิบแบน และเมล็ดมีขนาดเล็กลงรวมไปถึงปริมาณโปรตีน และกรดอะมิโน Methionine ในเมล็ดลดลงด้วย แต่ยกเว้นกรดอะมิโน Lysine และ Glycine ที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้คุณลักษณะของเต้าหู้ยังมีลักษณะที่ไม่จับตัวกันเป็นก้อน เนื้อเนียนค่อนข้างละเอียด และไม่มีฟองอากาศ ในส่วนของค่าความชื้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าวัดเนื้อสัมผัส โดยพบว่าความชื้นน้อยจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเต้าหู้เพิ่มขึ้น แต่ค่าความชื้นสูงจะส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเต้าหู้ลดลงตามลำดับ ซึ่งทั้งนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในเมล็ดถั่วเหลืองที่ได้รับอุณหภูมิในระดับที่สูงขึ้น

อภิปรายผล

ผลการศึกษาการประเมินผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อนที่มีต่อผลผลิต คุณภาพสารอาหารที่สำคัญและคุณลักษณะที่สำคัญบางประการของผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60 โดยมีการกำหนดควบคุมระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลองให้มีความแตกต่างกัน 4 ระดับ ใน 4 สิ่งทดลอง (4ซ้ำ) ดำเนินการโดยใช้ระบบตู้ทดลองเปิดด้านบน (Open Top Chamber) จำนวน 16 ตู้ มีการใช้ระบบควบคุมเวลาอัตโนมัติในช่วงระยะเวลา 07.00 น. ถึง 17.00 น. (10 ชั่วโมง) ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2560 โดยสร้างสภาวะอุณหภูมิจำลองตามภาพฉายอนาคต RCPs (Representative concentration pathways) ที่เกิดขึ้นในพื้นที่เพาะปลูก ซึ่ง RCPs แต่ละระดับจะเป็นตัวกำหนดสิ่งทดลองในการทดลองดังนี้ RCP 2.6 จะเป็นชุดควบคุม (CT) โดยเปรียบเทียบกับได้ว่าเป็นสถานการณ์ปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับต่ำส่งผลให้ระดับอุณหภูมิเทียบเท่ากับปัจจุบัน และในส่วนของ RCP 4.5

RCP 6.0 และ RCP 8.5 จะหมายถึงการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูงจึงส่งผลให้ระดับอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก

ผลการทดลองพบว่าการควบคุมระดับอุณหภูมิภายในตู้ทดลองในสถานะที่แตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของผลผลิตที่ไม่สมบูรณ์อย่างเห็นได้ชัดเจดังนี้ จำนวนฝักทั้งหมด/ต้น และจำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก โดยนับรวมเมล็ดลีบ ในสิ่งทดลอง HT2 และ HT3 มีลักษณะของฝักที่ลีบแบน และมีเมล็ดจำนวนมากแต่เมล็ดก็มีลักษณะลีบแบน เช่นเดียวกัน ตามลำดับ และเมื่อไม่นับรวมเมล็ดลีบถึงแม้ว่าเมล็ดจะมีจำนวนมากแต่ก็ยังมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังส่งผลให้จำนวนเมล็ดทั้งหมด/ฝัก โดยนับเฉพาะเมล็ดที่สมบูรณ์ มีลักษณะเมล็ดเล็ก และลีบเช่นเดียวกัน การวิเคราะห์ขนาดเมล็ดทางอ้อม โดยการชั่งน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (100-seed weight) พบว่าในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 มีน้ำหนักของเมล็ดลดลง เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT จากผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการปลูกถั่วเหลืองภายใต้สภาวะระดับที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของผลผลิต และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการปลูกถั่วเหลืองในพื้นที่ทั่วไปพบว่า ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อองค์ประกอบของผลผลิตซึ่งได้แก่ จำนวนฝัก/ต้น จำนวนเมล็ด/ฝัก และน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด (ขนาดของเมล็ด) ซึ่งองค์ประกอบของผลผลิตเหล่านี้ได้รับอิทธิพลมาจากแสง และอุณหภูมิที่ช่วยในการเจริญเติบโตทางด้านสรีรวิทยาของพืช รวมทั้งควบคุมการทำงานของ (Metabolism) ของพืชให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนอกจากนี้จำนวน และปริมาณของผลผลิตยังสามารถเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญ คือ ผลผลิตจะเพิ่มขึ้น หรือลดลงจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในช่วงฤดูกาลปลูก (ภาคภูมิ พระประเสริฐ, 2550; อภิพรณ พุกภักดี, 2546) นอกจากนี้ยังพบว่าผลผลิต และจำนวนฝักทั้งหมด/ต้น จะมีการเปลี่ยนแปลงหรืออ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมมากที่สุด ถั่วเหลืองจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วง 25-30 °C ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการออกดอก การงอกของเมล็ด และการออกฝักที่สมบูรณ์ ปัจจุบันยังมีความกังวลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกที่จะส่งผลต่อการลดลงของผลผลิตถั่วเหลืองในอนาคต (Johnson, 1969; Saryoko et al., 2017) นอกจากนี้จากผลการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Custodio et al., (2013) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 2-3 °C พบว่าไม่มีผลกระทบต่อระยะการออกดอก (Reproductive-stage) R1 แต่มีผลกระทบต่อระยะ R1-R7 คือ มีจำนวนวันในระยะเริ่มออกดอก (Beginning bloom) ไปจนถึงระยะเริ่มติดเมล็ด (Beginning seed) และไปจนถึงระยะเมล็ดเริ่มสุกแก่ (Beginning maturity) น้อยลง นอกจากนี้ในระยะ R1-R5 ได้รับผลกระทบมากกว่าระยะ VE-R1 และ R5-R7 ในสถานะของระดับอุณหภูมิ

ที่เพิ่มสูงขึ้น ถ้าถั่วเหลืองได้รับสัมผัสอุณหภูมิที่เกินจุดความทนประมาณ 36°C จะส่งผลต่อระยะการเจริญเติบโต เช่น การสร้างอาหาร การสร้างเมล็ด เป็นต้น (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Reddy, & Hodges, 2000) ระดับของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นระหว่างที่กำลังสร้างเมล็ดนั้นส่งผลต่อการเร่งอัตราเร็วในการสร้างเมล็ด ถึงแม้ว่าระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มอัตราเร็วในการสร้างเมล็ดก็จริง แต่อัตราเร็ว หรือระยะเวลาที่เร็วขึ้นนี้ไม่เพียงพอต่อการสร้างเมล็ดให้สมบูรณ์ รวมไปถึงส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักเมล็ด และขนาดของเมล็ดด้วย แต่ถ้าอุณหภูมิในฤดูกาลปลูกอยู่ในช่วงที่เหมาะสม อัตราเร็วในการเร่งการสร้างเมล็ดก็จะเพิ่มขึ้นแต่ระยะเวลาในการสร้างเมล็ดให้สมบูรณ์ก็จะลดลง (Kobata, & Uemuki, 2004) นอกจากนี้ความอ่อนไหวต่อระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงของการเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่าองค์ประกอบผลผลิต เช่น จำนวนฝัก จำนวนเมล็ด ขนาดของเมล็ด และผลรวมของเมล็ดทั้งหมด มีปริมาณลดลง และคุณภาพในเมล็ดถั่วเหลืองก็ลดลงด้วย ซึ่งปัจจัยทางภูมิอากาศที่แปรปรวนนั้นส่งผลกระทบต่อผลผลิตของพืช (Custodio et al., 2013) นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการประเมินพื้นที่เกษตรกรรมพบว่าได้รับผลกระทบในเรื่องของผลผลิตลดลงในพื้นที่ที่ปลูกถั่วเหลือง ซึ่งได้คำนวณมูลค่าความเสียหายเชิงเศรษฐศาสตร์แล้วพบว่าในอนาคตมีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่เขตร้อน ซึ่งเป็นพื้นที่เสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบมากที่สุด โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเพิ่มสูงขึ้น ประมาณ 6-19 % (Cline, 2007; Cline, 2008)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อพืชในการกำหนดการเจริญเติบโตตั้งแต่ระยะแรกไปจนถึงการพัฒนาเป็นดอก และออกผล (Nxaw et al., 2010) ซึ่งในระยะการเจริญเติบโตของพืชจะต้องได้รับอุณหภูมิในสภาวะที่เหมาะสม ทั้งนี้ถ้าพืชได้รับอุณหภูมิสูงกว่าสภาพแวดล้อมปกติหรือที่เรียกว่า สภาวะความเครียดจากความร้อน (Heat stress) เป็นสภาวะที่พืชได้รับความร้อนเกินช่วงความทน อุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เช่น กระบวนการ Metabolism การดูดซึมอาหาร การสร้างคลอโรฟิลล์ การสังเคราะห์แสง และส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Summerfield et al., 1989; Wahid et al., 2007) นอกจากนี้พืชจำเป็นต้องใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งต้องใช้ช่วงคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) มีความยาวช่วงคลื่นประมาณ 400-700 นาโนเมตร และมีความถี่ประมาณ 4.41×10^{14} ถึง 7.31×10^{14} ในสภาวะอุณหภูมิปกติที่พืชสามารถสังเคราะห์แสงจะเกิดขึ้นโดย CO_2 จะแพร่เข้าสู่ปากใบรวมตัวกับ RuBP (Ribulose-1, 5-bisphosphate) โดยมีเอนไซม์ที่ชื่อว่า Rubisco เป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอน 3 อะตอม คือ (3-Phosphoglyceric acid: 3-PGA) จึงเรียกว่าพืช C3 จากนั้นพืชจะนำพลังงานที่ได้มาเก็บสะสมในรูปน้ำตาล

เมื่อเกิดสภาวะความเครียดจากความร้อน (Heat stress) หรือสภาวะอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดกระบวนการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) และเปลี่ยนไปเป็นกระบวนการหายใจแสง (Photorespiration) (Wallace, & Hobbs, 2006; กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558) โดยมี O_2 เข้ามาแทนที่ CO_2 และเป็นตัวยับยั้งที่ทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ใช้แสง (Dark reaction) หรือวัฏจักรคัลวิน เมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น O_2 จะไปรวมตัวกับ RuBP (Ribulose-1, 5-bisphosphate) ได้ดีกว่า CO_2 โดยมีเอนไซม์ Rubisco เป็นตัวยึดเกาะให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดสารประกอบที่มีคาร์บอน 2 อะตอม คือ (Phosphoglycolate: PG) ทำให้เกิดกระบวนการหายใจแสง (photorespiration) ซึ่งฟอสโฟไกลโคลเลต (PG) เป็นสารประกอบที่พืชไม่ต้องการ และเป็นอันตรายต่อพืช ดังนั้นพืชจะมีกลไกในการกำจัด PG ให้กลับไปเป็น PGA ซึ่งในกระบวนการกำจัด PG นี้เกิดขึ้นใน Chloroplast, Peroxisome และ mitochondria โดยกระบวนการกำจัด PG นั้นจะเริ่มต้นที่ Chloroplast โดยสารประกอบ PG จะใช้พลังงาน ATP เปลี่ยนรูปให้เป็นไกลโคลเลต (Glycolate) ในกระบวนการนี้จะเกิดการสร้าง ROS (Reactive oxygen species) หรือสารที่มีชื่อว่า H_2O_2 (Hydrogenperoxide) ซึ่งไปทำลาย Cell โดยตรงที่ Peroxisome ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิด OH ในพืชถือว่าเป็นสารออกซิแดนท์ที่รุนแรงมาก ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสารอาหารของพืช จากนั้นจะส่งไกลโคลเลต (Glycolate) ไปยัง Peroxisome และเกิดปฏิกิริยา Decarboxylation จนสร้างไกลซีน (Glycine) แล้วส่งต่อไปยัง Mitochondrion จากนั้นเกิดกระบวนการตรึง CO_2 ออกจาก ไกลซีน (Glycine) แล้วปลดปล่อย CO_2 โดยแพร่ผ่านทางปากใบออกสู่อากาศ ในกระบวนการนี้พืชจะสูญเสีย CO_2 ในปริมาณมากมีการปลดปล่อยออกมา มากกว่าการกักเก็บ นอกจากนี้ยังเป็นการยับยั้งโปรตีนทางอ้อมอีกด้วย (กณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; Thomas, 2001)

ระดับของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบในเชิงลบต่อคุณค่าทางด้านสารอาหารของถั่วเหลืองโดยเฉพาะปริมาณโปรตีน และกรดอะมิโน ซึ่งจากการศึกษาของคัพระกอบของเมล็ดถั่วเหลือง พบว่าปริมาณโปรตีนในเมล็ดลดลงในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 เมื่อเทียบกับสิ่งทดลอง CT ซึ่งผลกระทบของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะนำไปสู่การเกิดสภาวะความเครียดออกซิเดชัน (Oxidation stress) ทำให้พืชสร้างสารกลุ่ม ROS (Reactive Oxygen Species) ที่มีความเป็นพิษสูงเข้าไปทำลายเนื้อเยื่อภายในเซลล์ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่าง lipid peroxidation กับไขมันเพิ่มขึ้น (He et al., 2005) และยังส่งผลกระทบการทำลายโปรตีน และกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วเหลืองให้มีปริมาณลดลง โดยในช่วงระยะเริ่มติดเมล็ด (Beginning seed: R5) เป็นระยะที่เริ่มสะสมองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดถั่วเหลือง ซึ่งถั่วเหลืองมีความสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดอะมิโน Methionine และ Cysteine เนื่องจากว่าเป็นกรดอะมิโนชนิดที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (Sulfur amino acid) และเป็นกรดอะมิโนที่อ่อนไหวต่อสภาวะระดับอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีบทบาทที่สำคัญในการช่วยควบคุม metabolites รวมทั้งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโปรตีน และเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อมนุษย์ เนื่องจากว่าเป็นกรดอะมิโนที่มนุษย์ไม่สามารถสังเคราะห์เองได้จึงต้องได้รับมาจากการบริโภคอาหารที่มีโปรตีน และกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบ (Krishnan, & Jez, 2018) นอกจากนี้ผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นยังส่งผลต่อคุณภาพ และองค์ประกอบทางโภชนาการของโปรตีนในเมล็ดถั่วเหลืองอีกด้วย (Constanza et al., 2011; ภณิตา ธนเจริญชนภาส, 2558; สุดารัตน์ ปาหलग และคณะ, 2561) โดยข้อมูลทั่วไปของปริมาณกรดอะมิโนในถั่วเหลืองที่ทำการศึกษากันทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Lysine Glycine และ Methionine จะต้องมีปริมาณกรดอะมิโนเท่ากับ 2700, 1800 และ 500 mg/100g ตามลำดับ (อาวูธ ณ ลำปาง, 2538) และนอกจากนี้กรดอะมิโน Lysine ยังพบในปริมาณมากที่สุด ในถั่วเหลือง Glycine จะบ่งบอกถึงความเป็นถั่วเหลือง ซึ่งในถั่วเหลืองนั้นจะต้องพบกรดอะมิโน Glycine อยู่ในเมล็ด และ Methionine จะพบในปริมาณน้อยที่สุดในถั่วเหลือง (สมชาย ประภาวัต, 2534) ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับข้อมูลทางวิชาการที่กล่าวมาในเบื้องต้นเนื่องจากพบว่าปริมาณกรดอะมิโนชนิด Methionine ลดลง แต่ปริมาณกรดอะมิโน Lysine และ Glycine เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าปริมาณกรดอะมิโนทั้ง 2 ชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังมีปริมาณที่น้อยกว่าเกณฑ์ของ FAO/WHO แนะนำ นอกจากนี้ยังสามารถบ่งบอกได้ว่าสภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของการทดลองนี้ยังไม่เพียงพอต่อการเข้าไปทำลายโครงสร้างของกรดอะมิโน Lysine และ Glycine จึงส่งผลต่อการกระตุ้นให้มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น

ปัจจุบันมีแนวโน้มที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงพืชจะมีโอกาสได้รับสัมผัสความร้อน และความเครียดจากการขาดน้ำ (Water stress) เพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อคุณภาพของโปรตีน และกรดอะมิโนให้มีปริมาณลดลงดังที่กล่าวข้างต้น นอกจากนี้การนำถั่วเหลืองไปใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ก็ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เพราะถั่วเหลืองมีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะโปรตีน จากงานวิจัยจำนวนมากพบว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของโปรตีน และกรดอะมิโน (Bainy et al., 2008) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อคุณภาพของถั่วเหลืองที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเต้าหู้ โดยทั่วไปแล้วคุณลักษณะของเต้าหู้ในเชิงการค้าจะต้องมีลักษณะเป็นแผ่น หรือก้อน สีขาวนวลตามธรรมชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัสจะต้องเรียบเนียน แน่น ไม่แตกหรือละ และมีฟองอากาศ (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2546) และจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่าการปลูกถั่วเหลือง

ภายใต้ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้เกิดการลดผลผลิต และคุณภาพเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เต้าหู้โดยพบว่า เต้าหู้ที่ผลิตจากถั่วเหลืองที่ปลูกภายใต้ระดับอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีลักษณะจับตัวกันเป็นก้อนไม่แข็งมาก สีขาวนวล เนื้อเนียนค่อนข้างและ และไม่มีฟองอากาศในสิ่งทดลอง HT1, HT2 และ HT3 ตามลำดับ นอกจากนี้ในกระบวนการการผลิตเต้าหู้จะต้องนำนมถั่วเหลืองดิบมาผ่านความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80-100 °C เป็นระยะเวลา 10-20 นาที เพื่อลดกลิ่นถั่ว และหยุดการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme) โดยเฉพาะ trypsin inhibitor ที่พบในถั่วเหลืองดิบเป็นสารยับยั้ง หรือลดคุณค่าทางสารอาหารในน้ำนมถั่วเหลืองโดยเฉพาะโปรตีนชนิด 11S (glycinin) และ 7S (β -conglycinin) ซึ่งเป็นสารที่พบในถั่วเหลืองมากที่สุด และพบว่า มีประโยชน์ต่อมนุษย์ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2548) ถ้าให้ความร้อนแก่น้ำนมถั่วเหลืองเป็นเวลานาน 30 นาทีจะเกิดกระบวนการทำลายกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (sulfur-containing amino acid) ได้แก่ กรดอะมิโน Methionine และ Cysteine ส่งผลให้ลดลงถึง 30 % (เพลินใจ ดังตระกูล, 2545) การให้ความร้อนในน้ำนมถั่วเหลืองจะทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ (Denaturation) นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนชนิด 11S มีปริมาณกรดอะมิโน Methionine และ Cysteine สูงกว่าโปรตีน 7S ประมาณ 3-4 เท่า และโปรตีนชนิด 11S ยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าโปรตีนชนิด 7S ในส่วนของโปรตีนชนิด 11S จะมีการเชื่อมต่อกันระหว่าง Sulfhydryl group (SH-group) กับพันธะไดซัลไฟด์ เมื่อน้ำนมถั่วเหลืองได้รับความร้อนโปรตีนชนิด 11S จะเพิ่มจำนวนหมู่ซัลฟ์ไฮดริล (SH-group) ส่งผลให้มีความสามารถในการเกาะกัน เกิดความแข็ง และความยืดหยุ่นของเนื้อเต้าหู้เพิ่มขึ้น โปรตีนชนิด 7S จะมีจำนวน Sulfhydryl group (SH-group) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันแต่ไม่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของเต้าหู้ และโปรตีนทั้งสองชนิดนี้มีความแตกต่างกันในการทำให้เกิดเคิร์ดหรือเจล การทนต่อความร้อน และอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) นอกจากนี้ยังพบว่าโปรตีนชนิด 11S จะต้องนำไปให้ความร้อนเท่านั้นจึงจะสามารถทำให้เกิดโครงสร้างเจลที่เกิดจากการตกตะกอนโปรตีน ส่วนโปรตีน 7S ไม่จำเป็นต้องผ่านความร้อนก็เกิดโครงสร้างเจลได้แต่จะมีลักษณะไม่แข็ง ซึ่งเกิดจากการไม่แตกตัวของโปรตีน และโปรตีนทั้งสองชนิดนี้มีการเสียสภาพธรรมชาติในอุณหภูมิที่ต่างกัน โดยโปรตีนชนิด 11S จะเสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 85-95 °C ส่วนโปรตีนชนิด 7S จะเสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 65-75 °C (Hou et al., 1997; Liu et al., 2004; ศิริพร ดลภักนิยมกุล, 2552) และถ้านำนาน้ำนมถั่วเหลืองมาผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 70-100 °C เป็นเวลา 10-15 นาที จะเกิดการจับตัวของปริมาณโปรตีนในถั่วเหลืองได้ดีขึ้น (เพ็ญศรี เพ็ญธิสาร, 2544) ในการให้ความร้อนนั้นจะส่งผลให้ลักษณะของโมเลกุลโปรตีนส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ออกมาอยู่ด้านนอก และจับกับ

โมเลกุลของโปรตีนด้วยกันทำให้เกิดประจุลบพร้อมที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอนโปรตีน ในส่วนของการกวนน้ำนมถั่วเหลืองหลังจากที่เติมสารตกตะกอนเข้าไปแล้วจะช่วยให้การลดความชื้นในเนื้อเต้าหู้ แต่ถ้าไม่มีการกวนหลังจากเติมสารตกตะกอนจะมีความชื้นอยู่ในเนื้อเต้าหู้ถึง 7 % การตกตะกอนจะนิยมใช้ธาตุโลหะอัลคาไลเอิร์ธ (ธาตุหมู่ที่ 2) เช่น แคลเซียมซัลเฟต แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งมีประจุเป็นบวกทำให้โมเลกุลของโปรตีนที่เสียดสภาพธรรมชาติจากความร้อนเข้ามาจับกับสารที่ตกตะกอน และสร้างพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมต่อกัน จากนั้นโปรตีนจะสร้างพันธะใหม่แยกชั้นออกมาส่งผลให้เกิดการตกตะกอนของโปรตีนเป็นลิ่มเต้าหู้ หรือโครงสร้างเจล จากนั้นนำลิ่มเต้าหู้ (Tofu curd) ที่ได้มากดทับเพื่อไล่น้ำออกเป็นเวลา 30 นาที จะได้เต้าหู้แข็งสามารถนำมาปรุงอาหารได้ (กุลยา จันทรอรุณ, 2533)

จากผลการศึกษาสถานการณ์ภายใต้สภาวะการเพิ่มระดับของอุณหภูมิในบรรยากาศสามารถนำมาประยุกต์เพื่อปรับใช้ต่อการรับมือการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในประเทศไทยได้ เนื่องจากผลของปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลผลิต สารอาหารประเภทโปรตีน และกรดอะมิโนในถั่วเหลือง นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ ในประเด็นผลการศึกษาวิจัยนี้สามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ในด้านการนำข้อมูลมาปรับใช้เป็น Data base ซึ่งจะเป็นฐานข้อมูลเบื้องต้น และนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นการทำนายสถานการณ์ในอนาคต และจะได้เป็นแนวทางในการวางแผนเพื่อรับมือกับคุณค่าทางสารอาหารของถั่วเหลืองที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลต่อความเสี่ยงความมั่นคงทางด้านอาหารของประเทศ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปปรับใช้กับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 และสอดคล้องตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาประเทศต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ผลการศึกษาควรได้รับการต่อยอดองค์ความรู้ในอนาคตโดยการวิจัยในขอบเขตขยายพื้นที่ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น จะต้องทำการปลูกถั่วเหลืองในแปลงวิจัยอย่างน้อย 1 ไร่ เพื่อเป็นการคาดการณ์การประเมินผลผลิตของถั่วเหลืองที่ปลูกในสภาวะโลกร้อนในอนาคตให้มีความแม่นยำมากขึ้น และนอกจากนี้ยังเป็นการต่อยอดองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อภาคเกษตรกรรมในอนาคต เพราะในปัจจุบันเกิดปัญหาการลดลงของพื้นที่เกษตรกรรม การขาดแคลนน้ำ รวมไปถึงปัญหาดินเสื่อมโทรมที่เกิดจากระดับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ปริมาณการผลิตถั่วเหลืองลดลง และคุณภาพของสารอาหารในเมล็ดถั่วเหลืองลดลงด้วย ซึ่งส่งผลในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่เกิดวิกฤต

ผลกระทบทางด้านความไม่มั่นคงของอาหาร ทำให้ผลผลิตที่ได้ไม่เพียงพอต่อจำนวนประชากร ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อให้เป็นข้อมูลในเชิงลึกส่วนหนึ่งที่สามารถใช้คำนวณทางด้านการเกษตร เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าทางการเกษตรมากขึ้น

2. ผลการศึกษาควรจะมีความร่วมมือเชิงวิชาการกับหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในอนาคต เพื่อเป็นฐานข้อมูลที่สำคัญ และสามารถต่อยอดองค์ความรู้ให้เป็นประโยชน์ต่อการปรับตัว และรวมไปถึงการรับมือจากปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยต่อไป ในอนาคต และจากการศึกษาในครั้งนี้เป็นการแจ้งเตือนให้ทราบว่าในอนาคตสภาพอากาศอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ดังนั้นอาจจะประสบกับปัญหาการลดลงของผลผลิต อาจจะต้องมีการเปลี่ยนพื้นที่เพาะปลูก หรือฤดูกาลปลูกให้เหมาะสมต่อไป และที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งคือ จะต้องสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 ซึ่งมุ่งเป้าในการวางรากฐานการพัฒนาประเทศไปสู่สังคมที่มีความสุขอย่างมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน สอดคล้องตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ที่เป็นกรอบการพัฒนาประเทศในระยะยาวต่อไป





บรรณานุกรม

- กณิตา ธนเจริญชนภาส และ โอธ รักษ์ชาติ. (2552). ผลกระทบของสภาวะภูมิอากาศที่เพิ่มขึ้น
ในฤดูกาลปลูกที่มีต่อผลผลิตและอนุภาคเม็ดแป้งต่อข้าวหอมไทย (*Oryza sativa* L.)
พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. ใน การประชุมวิชาการครั้งที่ 47 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เล่มที่ 9 สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (น. 282-290). กรุงเทพฯ:
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- กณิตา ธนเจริญชนภาส. (2558). การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลก : ผลกระทบและการตอบสนอง
ของสรีรวิทยาระบบนิเวศ. พิษณุโลก: โรงพิมพ์ร้านพิษณุโลก ดอท คอม.
- กุลยา จันทอรุณ. (2533). เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: หน่วยงานพิเศษ กรมการฝึกหัดครู.
- กรชาล ธนสีลังกูร, สิทธิคุณ เมธาสิริปกรณ์, สมพงษ์ จันทรแก้ว, จิรวัดน์ สนิทชน และ Tatsuhiko
Shiwaiwa. (2559). ผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อความสูงและคุณภาพเมล็ดของถั่วเหลือง
จำนวน 26 สายพันธุ์. เกษตร, 44(1), 302-308.
- จงรัก วชิรรัตนรัตน์. (2554). ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศโลกกับการพัฒนาและการ
ใช้ประโยชน์ไม้ยืนต้น. เกษตร, 39(2), 27-30.
- จันทร วรากุลเทพ, อัจฉรา กสิบงาม, วชิระ การไกล, จัตรแก้ว เกลั้วรัตน์, ประทุมรัตน์ บัวแย้ม และ
วันทา ยิ้มสุข. (2546). เค้าอาหารเพื่อสุขภาพ. กรุงเทพฯ: เพชรกระรัตตดิโว.
- ธนวัฒน์ จารุพงษ์สกุล. (2550). โลกร้อนสุดขั้ววิกฤตในอนาคตประเทศไทย, เรื่องโลกร้อนผลกระทบ
ต่อชาวมข้าวของประเทศไทยในอนาคต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ฐานการพิมพ์.
- เจียรชัย อารยางกูร. (2541). ทางเลือก : ลดต้นทุนการผลิตถั่วเหลือง. ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่
สถานีวิจัยพืชไร่: กรมวิชาการเกษตร.
- นเรศ ขำเจริญ. (2555). ผลกระทบของอุณหภูมิในบรรยากาศที่สูงขึ้นต่อองค์ประกอบผลผลิตและ
คุณภาพสารอาหารในถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) พันธุ์เชียงใหม่ 60.
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- พิรายุ หงษ์กำเนิด. (2554). โลกร้อนโรคภัยที่ต้องเฝ้าระวัง. วารสารGREEN Research ศูนย์วิจัย
และฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม, 8(19), 12-13.
- เพ็ญศรี เพ็ญธิสาร. (2544). ผลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการจับกักของโปรตีนในน้ำนมถั่วเหลือง.
(วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เพลินใจ ดังตระกูล. (2545). ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถั่ว. วารสารอาหาร, 32(2), 92-97.

- ภาคภูมิ พระประเสริฐ. (2550). สรีรวิทยาของพืช. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- วรศรา ปานพรม และ วิสาคร วงษ์พิมพ์. (2557). ผลของระดับอุณหภูมิในบรรยากาศที่แตกต่างกันที่มีปริมาณธาตุอาหารในดินและองค์ประกอบผลผลิตของถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill.) (วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ศิริพร ดลภักนิยมกุล. (2552). การพัฒนาผลิตภัณฑ์เต้าหู้อ่อนจากกากงาขาวและธัญพืช. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา. (2553). ความผันแปรและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของประเทศไทยและการคาดการณ์ในอนาคต. กรุงเทพฯ: กรมอุตุนิยมวิทยา, กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม.
- ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่ กรมวิชาการเกษตร. (2560). ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60. สืบค้น 10 มิถุนายน 2560, จาก http://www.doa.go.th/fcrc/chiangmai/index.php?option=com_content&view=article&id=65:chiangmai-soybean60&catid=39:soybean-seed&Itemid=103#.
- สันทนา สุธารัตน์. (2536). อาหารและโภชนาการ 1 Food and Nutrition 1 HC 243 (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วท.). (2548). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร 2. กรุงเทพฯ: เซเว่น พรินต์ติ้ง กรุ๊ป.
- สุธารัตน์ ปาหลวง, โอฬาร รักชาติ และกนิษฐา ธนเจริญชนภาส. (2561). ผลกระทบของระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศตามแนวโน้มสภาวะโลกร้อน ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต องค์ประกอบผลผลิต และกรดอะมิโน 2 ชนิด ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60. วิทยาศาสตร์เกษตร. 49, 8-14.
- สุมาลี ทองแก้ว และ วลัยทิพย์ สาขลวิจารณ์. (2541). ถั่วเหลืองพืชหมัศจรรย์ของแผ่นดิน. กรุงเทพฯ: หมอชาวบ้าน.
- สมชาย ประภาวต์. (2534). การทำเนื้อเทียมจากถั่วเหลือง. อาหาร, 21(3), 161-171.
- สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุโขทัย. (2560). ถั่วเหลืองข้อมูลเพื่อวางแผนสินค้าเกษตรจังหวัดสุโขทัย. สืบค้น 28 มิถุนายน 2562, จาก <https://www.opsmoac.go.th/sukhothai-dwl-files-401891791927>.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. (2546). เต้าหู้แผ่น. สืบค้น 10 มิถุนายน 2560, จาก http://www.srayaisomwittaya.ac.th/nectec/slamculture/otop-tis/tcps461_47.pdf.

- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2558). สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558. สืบค้น 5 มิถุนายน 2560, จาก http://www.oae.go.th/download/download_journal/2559/yearbook58.pdf.
- อาวุธ ณ ลำปาง. (2538). ชนิดของพืชน้ำมันที่เพาะปลูกในประเทศไทย. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ (เล่มที่ 19). กรุงเทพฯ: ด้านสุทธาการพิมพ์.
- อภิพรณ พุกภักดี. (2546). ถั่วเหลือง : พืชทองของไทย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุบล ดีสวัสดิ์. (2546). เต้าหู้เมนูอร่อยเพื่อสุขภาพ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แม่บ้าน.
- อวยพร อภิรักษ์อร่ามวง. (2549). กรดอะมิโนและโปรตีน. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อำนาจ ชิดไธสง และ อัศมน ลิ้มสกุล. (2557). สรุปสาระสำคัญรายงานการสังเคราะห์และประเมินความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศครั้งที่ 5 ภายใต้. ใน *Global Warming Forum ปีที่ 4 ครั้งที่ 3*, (น. 1-56). กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- Annie Warren, Neroli Graham, Rosy Raman, & Kristy Hobson. (2019). The physiology and genetics of cold temperatures in chickpeas - what do we know and where is the research heading? In *Warra GRDC Grains Research Update*. Warra Memorial Hall: Monument Australia.
- AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis*. Vol.2 (16th ed). Association of Official Analytical Chemists: Washington, D.C.
- Bainy, E.M., Tosh, S.M., Corredig, M., Woodrow, L., & Poysa, V. (2008). Protein Subunit Composition Effects on the Thermal Denaturation at Different Stages During the Soy Protein Isolate Processing and Gelation Profiles of Soy Protein Isolate. *Journal American Oil Chemists Society*, 85, 581-590.
- Bhattarai, M.D., Secchi, S., & Schoof, J. (2017). Projecting corn and soybeans yields under climate change in a Corn Belt watershed. *Agriculture Systems*, 152, 90-99.
- Bonan, G. (2002). *Ecological Climatology*. Retrieve 1 June 2017, from <http://www.cgd.ucar.edu/tss/aboutus/staff/bonan/ecoclim/index-2002.htm>.
- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2004). *Biology* (7th ed.). San Francisco: Benjamin Cummings.

- Constanza Soledad Crrera, Cora Marcela Reynoso, Gustavo Javier Funes, Maria Jose Martinez, Julio Dardanelli, & Silvia Liliana Resnik. (2011). Amino acid composition of soybean seeds as affected by climate variables. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(12), 1579-1587.
- Custodio R.P. TacarinduaaTat, suhiko Shiraiwa, Koki Homm, Etsushi Kumagai, & Ryoji Sameshima. (2013). The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. *Field Crops Research*, 154, 74-81.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., & Richels, R. (2007). *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1 A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*. Washington, 7 DC., USA: Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research.
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, Fisher-Vanden, G., ... Van Vuuren, D.P. (2014). *Assessing transformation pathways. In: Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- Cline, W. R. (2007). *Global Warming and Agriculture: Impact Estimates by Country*. Washington, D.C: Peterson institute.
- Cline, W.R. (2008). Global Warming and Agriculture. *Finance & Development*, March 2008, 1-5.
- Cure, J.D., & Acock, B. (1986). Crop responses to carbon dioxide doubling-a literature survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38, 127-145.
- Detlef P. van Vuuren, Michel G. J. den Elzen, Paul L. Lucas, Bas Eickhout, Bart J. Strengers, Bas van Ruijven, Steven Wonink, & Roy van Houdt. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81, 119-159.

- Dornbos, D.L., & Mullen R.E. (1991). Influence of stress during soybean seed fill on seed weight, germination, and seedling growth rate. *Canadian journal of plant science*, 71, 373-383.
- Fehr, W.R., & Caviness, C.E. (1977). Stages of soybean development. *Iowa States A.E.S. Specical Report*, 87, 1-12.
- Francis, F.J., & Rugchati, O. (1999). Soybeans and Soybean Processing. *Wiley Encyclopedia of Food Science and Technology*, 4, 2185-2190.
- Fujino, J., R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, & Y. Matsuoka. (2006). Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *Multigas Mitigation and Climate Policy, The Energy Journal Special Issue*, 3, 343-354.
- Gibson, L.R., & Mullen, R.E. (1996). Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Science*, 36, 98-194.
- Hasanuzzaman Mirza, Nahar Kamrun, Mahabub Alam Md., Rajib Roychowdhury, & Masayuki Fujita. (2013). Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms of Heat Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5), 9643-9684.
- He, Y., Liu, X., & Huang, B. (2005). Changes in Protein Content, Protease Activity, and Amino Acid Content Associated with Heat Injury in Creeping Bentgrass. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 130(6), 842-847.
- Hijioka, Y., Y. Matsuoka, H. Nishimoto, M. Masui, & M. Kainuma. (2008). Global GHG emissions scenarios under GHG concentration stabilization targets. *Journal of Global Environmental Engineering*, 13, 97-108.
- Hollister, R.D., & Webber, P.J. (2000). Biotic validation of small open top chamber in tundra ecosystem. *Global Change Biology*, 6(7), 835- 842.
- Hou, H.J., Chang, K.C., & Shih, M.C. (1997). Yield and textural properties of soft tofu as affected by coagulation method. *Food Science*, 62(4), 824-827.

- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories ; Volume 1: General Guidance and Reporting*. Kanagawa, Japan: Intitute for Global Environmental Strategies.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 418-429.
- IPCC. (2013). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Combridge, United Kingdom and New York, USA: Combridge University Press.
- IPCC. (2014). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impact, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- John Heslop-Harrison. (2017). *Plant development, Encyclopædia Britannica, inc.* Retrieve 26 October 2019, from <https://www.britannica.com/science/plant-development>.
- Johnson, T.J. (1969). Effect of row spacing and supplemental light on yield and yield components of soybeans. *Crop Sci*, 9, 577-581.
- Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate : Aquantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge, United Kingdom and New York, US: Cambridge University Press.
- Khaliq, I. Hof, C., Prinzing, R., Bohning-Gaese, K., & Pfenningger, M. (2014). Global variation in thermal tolerances and vulnerability of endotherms to climate change. *Biological Sciences*, 281 (1789), DOI: 10. 1098/rspb.2014.1097.
- Kobata Tohru, & Uemuki Naoya. (2004). High Temperatures during the Grain-Filling Period Do Not Reduce the Potential Grain Dry Matter Increase of Rice. *Agronomy Journal*, 96, 406-414.

- Krishnan Hari B., & Jez Joseph M. (2018). Review: The promise and limits for enhancing sulfur-containing amino acid content of soybean seed. *Plant Science*, 272, 14-21.
- Kumagai, E., & Sameshima, T.R. (2014). Genotypic differences in soybean yield responses to increasing temperature in a cool climate are related to maturity group. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 265-272.
- Lal, M., Singh, K.K., Srinivasan, G., Rathore, L.S., Naidu, D., & Tripathi, C.N. (1999). Growth and yield responses of soybean in Madhya Pradesh, India to climate variability and change. *Agriculture and Forest Meteorology*, 93, 53-70.
- Lee, Z.H., Sethupathi, S., Lee, K.T., Bhatia, S., & Mohamed. A.R. (2013). An overview on global warming in Southeast Asia: CO₂ emission status, efforts done, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 28, 71-81.
- Liu, Z.S., Chang, S.K.C., Li, L.T., & Tatsumi, E. (2004). Effect of selective thermal denaturation of soybean proteins on soymilk viscosity and tofu's physical properties. *Food Research International*, 37, 815-822.
- Liu B., Liu X.B., Wang C., Jin J., & Herbert S.J. (2010). Endogenous hormones in seed, leaf, and pod wall and their relationship to seed filling in soybeans. *Crop & Pasture Sci.*, 61(2010), 103-110.
- Lobell, D.B., & Asner, G.P. (2003). Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yield. *Science*, 299, 1032.
- Masui T, Matsumoto K, Hijoka Y, Kinoshita T, Nozawa T, Ishiwatari S, Kato E, Shukla PR, Yamagata Y, & Kainuma M (2011). An emission pathway to stabilize at 6 W/m² of radiative forcing. *Climatic Change*, 109(1-2), 59-76.
- Newton, P.D.C., Clark, H., Bell, C.C., Glasgow, E.M., & Campbell, B.D. (1994). Effects of elevated CO₂ and simulated seasonal changes in temperature on the species composition and growth rates of pasture turves. *Annual Botany*, 73, 53-59.
- Nijs, I., Teughels, H., Blum, H., Hendrey, G., & Impens, I. (1996). Simulation of Climate Change with Infrared Heaters Reduces The Productivity of Lolium Perenne L. in Summer. *Environmental Experimental Botany*, 36, 271-280.

- Nxawe S., Ndakidemi P. A., & Laubscher C. P. (2010). Possible effects of regulating hydroponic water temperature on plant growth, accumulation of nutrients and other metabolites. *African Journal of Biotechnology*, 9(54), 9128-9134.
- Puteh, A. B., ThuZar, M., Alam Mondal, M.M., Abdullah, N. A. P. B., & Halim, M.R. (2013). Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] seed yield response to high temperature stress during reproductive growth stages. *Australian Journal of Crop Science*, 10, 1472-1479.
- Reddy, K., & Hodges, H. (2000). *Climate change and global crop productivity*. Wallingford, Oxon, UK: CAB International 2000.
- Riahi, K. Gruebler, A., & Nakicenovic N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887-935.
- Saryoko Andy, Homma Koki, Lubis Iskandar, & Shiraiwa Tatsuhiko. (2017). Plant development and yield components under a tropical environment in soybean cultivars with temperate and tropical origins. *Plant Production Science*, 20(4), 375-383.
- Shi Meng, Sam Chang, Anne M. Gillen, & Yan Zhang. (2016). Protein and quality analyses of accessions from the USDA soybean germplasm collection for tofu production. *Food Chemistry*, 213, 31-39.
- Summerfield RJ, Muehlbauer FJ, & Short RW. (1989). Controlled environments as an adjunct to field research on Lentils (*Lens culinaris*). IV. Cultivar responses to above- and below-average temperatures during vegetative growth. *Experimental Agriculture*, 25, 119-134.
- Thanacharoenchanaphas, K., & Rugchati, O. (2011). Simulation of Climate Variability for Assessing Impacts on Yield and Genetic Change of Thai Soybean. World Academy of Science. *Engineering and Technology*, 59, 1484-1488.
- Thanacharoenchanaphas, & Rugchati. (2015). Impacts of Atmospheric Temperature – Humidity Changes on Yield Quality of Thai Soybean Cultivar. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 6(2), 115-120.

- Thomas D Sharkey. (2001). *Photorespiration*. In Access Science. McGraw-Hill Education. Retrieve 10 October 2018, from doi.org/10.1036/1097-8542.511500.
- UNFCCC. (2011). *Report of the Global Environment Facility to the Conference of the Parties and guidance to the Global Environment Facility*. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Wahid A., Gelani S., Ashraf M., & Foolad MR. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61, 199-223.
- Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric science* (2nd ed.). Amsterdam, Netherlands: Elsevier Academic Press.
- Weingartner, K.E. (1987). Propcessing, nutrition and utilization of soybean In Singh, S.R. Rachie, K.O., & Dashiell, K.E. (Eds.) *Soybean of the Tropics: research, production and utilization* (pp. 149-178). Chichester, U.K: Wiley-Interscience .
- Wise Marshall, Katherine Calvin, Allison Thomson, Leon Clarke, Benjamin Bond-Lamberty, Ronald Sands, Steven J. Smith, & James Edmonds. (2009). Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy. *Science*, 324(5931), 1183-1186.
- Wurr, D.C.E., Fellows, J.R., & Phelps, K. (1996). Investigating trends in vegetable crop response to increasing temperature associated with climate change. *Scientia Horticulturae*, 66, 255-263.
- Xu, G., Singh, S., Barnaby, J., & Buyer, J. (2016). Effects of growth temperature and carbon dioxide enrichment on soybean seed components at different stages of development. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108, 313-322.
- Zhang, L., Zhu, L., Yu, M., & Zhong, M. (2016). Warming decreases photosynthates and yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in the North China Plain. *The crop Journal*, 6, 139-146.
- Zuo Feng, Chen Zhenjia, Shi Xiaodi, Wang Ruican, & Guo Shuntang. (2016). Yield and textural properties of tofu as affected by soymilk coagulation prepared by a high-temperature pressure cooking process. *Food Chemistry*, 213, 561-566.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก พื้นที่วิจัยภาคสนาม และการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง



ภาพผนวก 1 พื้นที่วิจัยภาคสนาม และรูปแบบของ Open Top Chamber



ภาพผนวก 2 ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบของถั่วเหลือง



ภาพผนวก 3 ระยะการเจริญเติบโตทางต้นและใบของถั่วเหลืองโตเต็มที่



ภาพผนวก 4 ระยะการเจริญเติบโตทางดอกของถั่วเหลือง



ภาพผนวก 5 ระยะการเจริญเติบโตทางฝักของถั่วเหลือง



ภาพผนวก 6 เก็บผลผลิตของฝักถั่วเหลืองในระยะสุกแก่เต็มที่

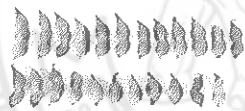
ภาคผนวก ข องค์ประกอบผลผลิต



ภาพผนวก 7 นับองค์ประกอบผลผลิตทั้งหมด

CT

HT1

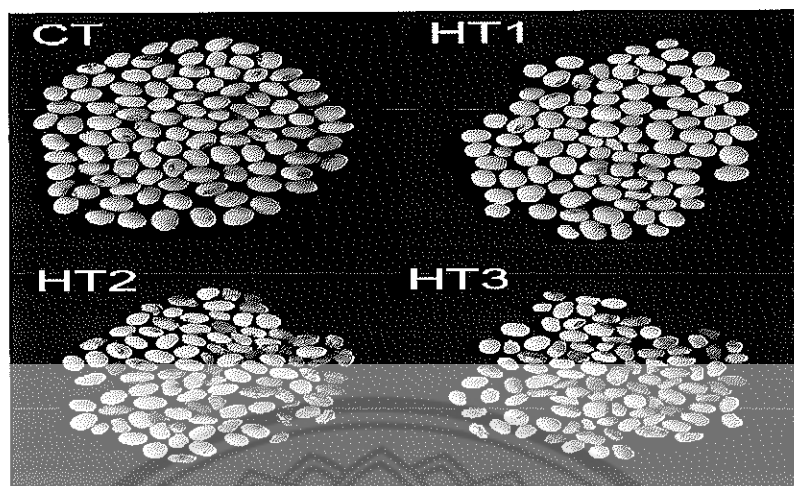


HT2

HT3



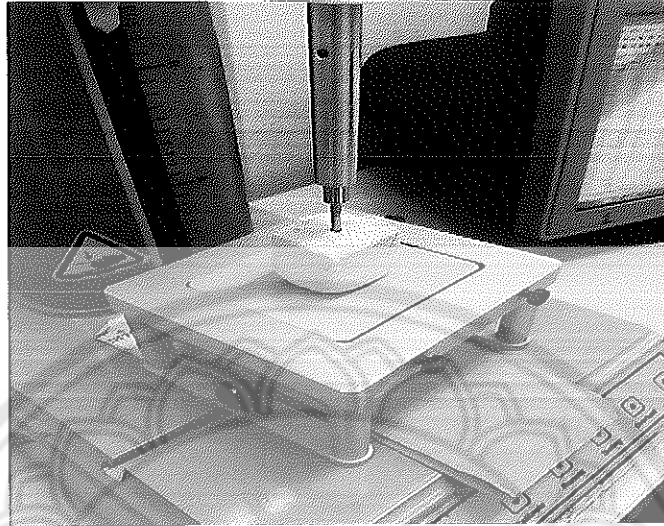
ภาพผนวก 8 จำนวนผักถั่วเหลืองทั้ง 4 สิ่งทดลอง



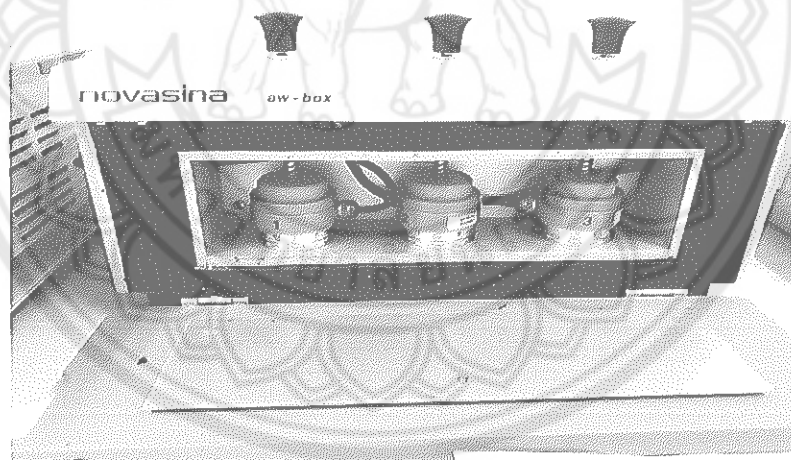
ภาพผนวก 9 จำนวนเมล็ดถั่วเหลือง 100 เมล็ด ทั้ง 4 สิ่งทดลอง



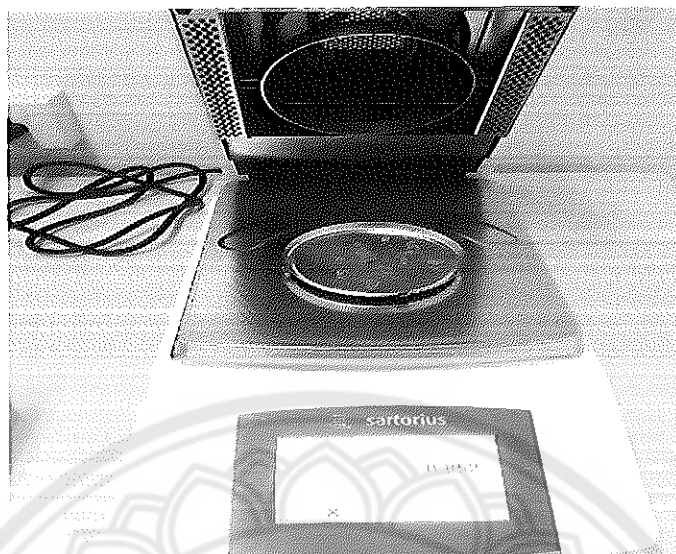
ภาคผนวก ค ผลผลิตเต้าหู้



ภาพผนวก 10 การวัดเนื้อสัมผัสของเต้าหู้



ภาพผนวก 11 การวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity)



ภาพผนวก 12 การวัดค่าความชื้นของเต้าหู้



ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (Total Nitrogen) โดยใช้วิธี
Kjeldahl method

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้ดูดควัน (Hood)
3. เครื่องกลั่น (Kjeldahl distillation apparatus)
4. หลอดแก้ว Distillation tube ขนาด 250 ml
5. Erlenmeyer flask ขนาด 125 ml และ 250 ml
6. Volumetric flask ขนาด 100 และ 1000 ml
7. Hot plate
8. pipet ขนาด 10 ml
9. Buret ขนาด 50 ml
10. ขวดเก็บสารละลาย

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Commercial grade NaOH) อัตราส่วน 1:1 โดยชั่ง NaOH 1 kg ละลายในน้ำกลั่น 1 L หรือ NaOH 40 % โดยชั่ง NaOH 400 g ละลายในน้ำกลั่น 1 L
3. Boric acid 3 % เตรียมจาก Boric acid 300 g ละลายในน้ำกลั่น 10 L
4. สารเร่งปฏิกิริยา (mixed catalyst) เตรียมโดยผสม K_2SO_4 100 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 10 g และ Se 1 g (อัตราส่วน 100:10:1) ผสมให้เข้ากัน
5. Mixed indicator ซึ่งสาร bromocresol green 0.22 g และ methyl red 0.075 g ละลายใน 95 % ethyl alcohol 96 ml เติม NaOH 0.1 M ปริมาตร 3.5 ml ผสมให้เข้ากัน
6. Standard sulfuric acid 0.02N ($0.02\text{N H}_2\text{SO}_4$) โดยปิเปตกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 1N (เตรียมจาก ampoule) 20 ml ลงใน Volumetric flask ขนาด 1000 ml เติมน้ำกลั่น แล้วเขย่าให้เข้ากันแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 ml

วิธีการ

1. ชั่งดินที่อบและบดละเอียดแล้ว 0.5-1.00 g (อบที่ 65-70 °C) ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 125 ml
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยา (mixed catalyst) 1 g
3. เติม cone. H_2SO_4 20 ml
4. ทำ Blank โดยวิธีเดียวกัน
5. นำไปย่อยบน Hot plate ที่ T 100-400 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนสารละลายสีน้ำตาลเข้มเปลี่ยนเป็นสีเขียวใส จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น
6. ปรับปริมาตรใน Volumetric flask ขนาด 100 ml ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากันแล้วนำสารละลายเทใส่ขวดเก็บสาร
7. นำไปกลั่นด้วยเครื่อง distillation unit โดยเติมสารละลายที่ย่อยแล้วลงไปในขวดย่อยเจดาร์ล 10 ml จากนั้นเติม NaOH 40 % 50 ml และเติม Boric acid 5 ml ใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 ml หยด Mixed indicator 4-5 หยด นำไปวางรองรับ condenser จากเครื่องกลั่นโดยให้หลอดจุ่มอยู่ใน Boric acid
8. ไตรเตรทส่วนที่กลั่นด้วย Standard sulfuric acid 0.02N จนกระทั่งสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง คือจุดยุติ (end point)

สูตรคำนวณ

$$\%T-N = \frac{(A-B) \times C \times 1.401}{G}$$

A = ml ของ standard H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

B = ml ของ standard H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง blank

C = ความเข้มข้นของ Standard H_2SO_4 ที่ใช้ (molar)

G = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (g)

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนในดินในรูปแบบที่มีประโยชน์ (NH_4^+ , NO_3^-) โดยใช้วิธี Steam distillation method

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องกลั่น (Kjeldahl distillation apparatus)
3. Erlenmeyer flask ขนาด 125 ml และ 250 ml

4. Volumetric flask ขนาด 200, 500 และ 1000 ml

5. Volumetric pipet ขนาด 20/25 ml

6. เครื่องกลั่น (Kjeldahl distillation apparatus)

7. หลอดแก้ว Distillation tube ขนาด 250 ml

8. ตู้ดูดควัน (Hood)

9. Hot plate

10. Buret ขนาด 50 ml

11. Cylinder ขนาด 10 ml

12. Funnel

13. เครื่องเขย่า

14. กระดาษกรองเบอร์ 1 หรือ 5

15. ขวดเก็บสารละลาย

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. Magnesium oxide (MgO)

2. Devarda alloy

3. Potassium chloride 2N (2N KCl) ชั่ง 149.12 g ในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตร 1 L

4. Boric acid 3 %

5. Standard sulfuric acid 0.005N ($0.005N H_2SO_4$) โดยเปิดสารละลาย 0.1N H_2SO_4 50 ml ลงใน Volumetric flask ขนาด 1000 ml เติมน้ำกลั่น แล้วเขย่าให้เข้ากันแล้วปรับปริมาตร เป็น 1000 ml

วิธีการ

1. ชั่งดินจำนวน 10 g ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 250 ml

2. เติมน้ำยาสกัด 2N KCl 100 ml ปิดจุกยางให้แน่นแล้วนำไปเขย่า 60 นาที จากนั้น กรองใส่ขวดเก็บสารละลาย

3. ทำ Blank โดยวิธีเดียวกัน

4. การกลั่นหา NH_4^+ นำไปกลั่นด้วยเครื่อง distillation unit โดยเติมสารละลายที่ย่อยแล้ว ลงไปในขวดย่อยเจดาร์ล 20 ml จากนั้นเติม MgO 0.2 g และเติม Boric acid 5 ml ใน Erlenmeyer flask ขนาด 50 ml หยด Mixed indicator 4-5 หยด นำไปวางรองรับ condenser จากเครื่องกลั่นโดยให้หลอดจุ่มอยู่ใน Boric acid กลั่นจนสารละลายสีม่วงแดงเปลี่ยนเป็นสีเขียวได้ ประมาณ 35 ml

5. การกลั่นหา NO_3^- นำไปกลั่นด้วยเครื่อง distillation unit โดยเติม Devarda alloy 0.2 g ลงใน Erlenmeyer flask เดิมที่กลั่นหา NH_4^+ ซึ่ง Devarda alloy จะทำปฏิกิริยาเปลี่ยน NO_3^- เป็น NH_4^+ และเติม Boric acid 5 ml ใน Erlenmeyer flask ขนาด 50 ml หยด Mixed indicator 4-5 หยด นำไปวางรองรับ condenser จากเครื่องกลั่นโดยให้หลอดจุ่มอยู่ใน Boric acid กลั่นจนสารละลายสีม่วงแดงเปลี่ยนเป็นสีเขียวได้ประมาณ 35 ml

6. ไตเตรทส่วนที่กลั่นด้วย Standard sulfuric acid 0.005N จนกระทั่งสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง คือจุดยุติ (end point)

สูตรคำนวณ

$$\text{NH}_4^+ \text{ หรือ } \text{NO}_3^- = \frac{(A-B) \times C \times 14 \times 1000}{\text{Aliquot (ml)} \times \text{Oven soil (g)}}$$

A = ml ของ standard H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

B = ml ของ standard H_2SO_4 ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง blank

C = ความเข้มข้นของ Standard H_2SO_4

14 = น้ำหนักสมมูล (equivalent weight) ของไนโตรเจน

การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในดินในรูปแบบที่มีประโยชน์ (HPO_4^{2-}) โดยวิธีใช้น้ำยาสกัดของ Bray II

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. เครื่อง Spectrophotometer
3. Erlenmeyer flask ขนาด 50 ml
4. หลอดแก้ว (test tube)
5. กระดาษกรองเบอร์ 5
6. Pipette
7. สารละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F)
8. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
9. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$
10. สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมตาร์เตรท ($\text{KSbO}_3 \cdot \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$)
11. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (cone. H_2SO_4)
12. น้ำยา develop

13. Ascorbic acid

14. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. น้ำยาสกัด Bray II ($0.03\text{N NH}_4\text{F}$, 0.1N HCl) ซึ่งแอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F) 11.10 g ในน้ำกลั่น 8 L เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (conc. HCl) 86 ml ปรับปริมาตรให้เป็น 10 L และปรับ pH. ให้อยู่ระหว่าง 1.5-1.6

2. Stock solution (Reagent A : Sulfuric-molybdate-tartrate) ซึ่งแอมโมเนียมโมลิบเดต $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ 50 g ใส่ปิกเกอร์ขนาด 2 L เติมน้ำกลั่น 200 ml คนให้ละลาย แล้วชั่งแอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เตรต ($\text{KSbO}\cdot\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$) 1.213 g เติมน้ำกลั่น 50 ml คนให้ละลาย เทรวมกันแล้วคนให้เข้ากัน ค่อยๆเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 700 ml ทิ้งไว้ให้เย็น เทใส่ Volumetric pipet ขนาด 1000 ml แล้วปรับปริมาตร จากนั้นเทใส่ขวดสีชาเก็บไว้ในที่ไม่มีแสง

3. น้ำยา Develop สี (Working solution, Reagent B) ซึ่ง Ascorbic acid 1.76 g ในน้ำกลั่น 1600 ml จากนั้นเติม Stock solution (ในข้อ 2) ลงไป 40 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 2 L ทิ้งไว้ให้เย็น

4. สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 50 mg/kg. P ซึ่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) 0.2195 g ในน้ำกลั่น จากนั้นปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดซัลฟูริก 1-2 หยด แล้วปรับปริมาตร 1 L

5. นำสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสมาทำ standard set ให้มีความเข้มข้น 0, 2, 4, 6, 8, 10 และ 15 mg/kg. P ด้วยน้ำยาสกัด

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างดิน 1.0 g ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 50 ml

2. เติมน้ำยาสกัด Bray II 10 ml เขย่า 1 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5

3. ปิเปตสารละลายที่สกัดได้ในข้อ (2) อัตราส่วน 1 ส่วนต่อ working solution 16 ส่วน ลงในหลอดแก้วทิ้งไว้ครึ่งชั่วโมง นำไปอ่านค่าความเข้มข้น ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงคลื่น 882 นาโนเมตร

สูตรคำนวณ

$$\text{ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P)} = \frac{B \times \text{DF}(\text{sample}) \times X}{A \times \text{DF}(\text{standard})} \quad \text{mg/kg}$$

A = น้ำหนักของตัวอย่างดิน (g)

B = น้ำยาสกัด (ml)

X = ค่าที่อ่านได้เมื่อวัดค่าเทียบกับ standard set

DF = อัตราส่วนการเจือจาง (dilution factor)

ดังนั้น ถ้าไม่มีการเจือจาง

$$\text{ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P)} = \frac{B \times X}{A} \quad \text{mg/kg}$$

การวิเคราะห์โพแทสเซียมในดินในรูปแบบที่มีประโยชน์ คือ K^+
เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Volumetric flask ขนาด 100 ml
2. Erlenmeyer flask ขนาด 50 ml
3. Pipette ขนาด 1, 2, 5 และ 10 ml
4. กระดาษกรองเบอร์ 1
5. กรวยกรอง
6. dispenser ขนาด 25 ml
7. เครื่อง Spectrophotometer
8. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
9. เครื่องเขย่า (Shaker)
10. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตด (NH_4OAc) 1 M pH7.0
11. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 1000 $mg L^{-1}$
12. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 0, 2, 4, 6 และ 8 $mg L^{-1}$

สารเคมีและวิธีเตรียม

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตด (NH_4OAc) 1 M pH7.0 ปิเปต Glacial acetic acid (99.5 %) 1140 ml ในน้ำกลั่น 16 L เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc. NH_4OH) 1380 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้สารละลาย 19 L ผสมให้เข้ากันแล้วปรับ pH ให้เท่ากับ 7 ด้วย NH_4OH หรือ Glacial acetic acid จากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ 20 L
2. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 1000 $mg L^{-1}$ ซึ่งสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) 1.9067 g ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 L
3. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 0, 2, 4, 6 และ 8 $mg L^{-1}$ ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 1000 $mg L^{-1}$ 10 ml ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 ml ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 100 $mg L^{-1}$ จากนั้นปิเปตสารละลายนี้ 0, 2, 4, 6

และ 8 ml ใส่ Volumetric flask ขนาด 100 ml ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมเข้มข้น 0, 2, 4, 6 และ 8 mg L⁻¹ ตามลำดับ

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างดิน 2.5 g ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 50 ml
2. เติม 1 M NH₄OAc pH 7.0 25 ml เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที
3. กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และเก็บสารละลาย
4. วิเคราะห์ K ด้วยเครื่อง Spectrophotometer โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

สูตรคำนวณ

โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน, mg kg⁻¹ = 10K x df

K = ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือ, mg kg⁻¹

df = dilution factor

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนรวม (Crude Protein, CP) โดยวิธีของ AOAC, 1995 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (Kjeldatherm digestion unit และ distillation unit)
2. ตู้ดูดควัน (Hood)
3. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. ข้อนัดกสาร
5. กระดาษสำหรับชั่งตัวอย่าง
6. flask ขนาด 125 ml, 250 ml
7. Volumetric flask 1000 ml
8. กรวยแก้ว
9. ปีกเกอร์
10. Hot plate
11. บีเปต 10 ml, 100 ml
12. ขวดใส่ indicator
13. บิวเรต
14. กระบอกตวง 100 ml
15. ลูกแก้วกันเดือด

สารเคมี

1. selenium mixture
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (cone. H_2SO_4)
3. สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32% (NaOH)
4. สารละลายบอริกเข้มข้น 2% (H_3BO_3)

วิธีการ

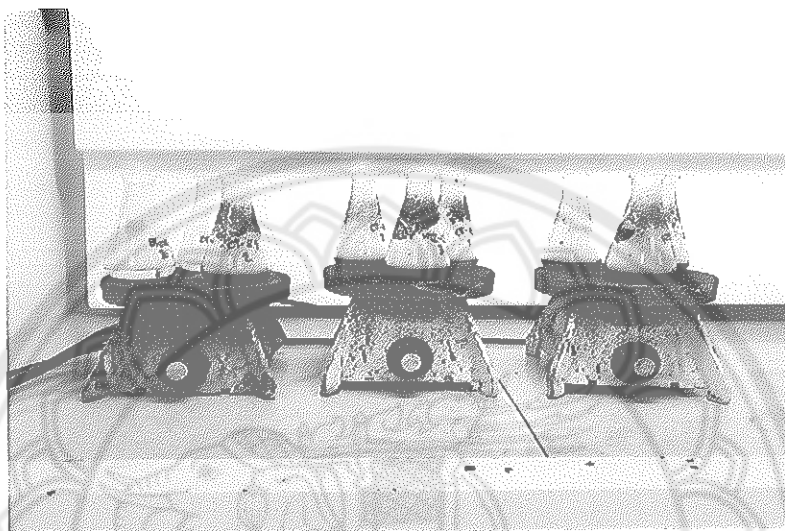
1. ชั่งตัวอย่าง 1 g ใส่ในขวด flask ขนาด 125 ml และเติม selenium mixture 3 g



2. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4 cone.) 25 ml



3. นำไปย่อยด้วยเครื่อง Kjeldatherm หรือย่อยบน Hot plate ในตู้ดูดควันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง หรือจนกว่าสารละลายเป็นสีเขียวใสหรือสีฟ้า จากนั้นทิ้งสารละลายในเย็นที่อุณหภูมิห้อง



4. นำตัวอย่างมากลั่นด้วยเครื่อง distillation unit โดยเติมสารที่ย่อยแล้วลงไปในช่วงย่อยเจดาร์ล และเติมน้ำกลั่น 100 ml และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH conc. 32%) 90 ml



5. เตรียม flask ขนาด 250 ml ใส่สารละลายบอริกเข้มข้น 2 % 60 ml และหยด indicator 2-3 หยด

6. ไทเตรทส่วนที่กลั่นได้ด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 0.1 N จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้ม หรือสีเขียวเป็นสีชมพูม่วงซึ่งเป็นจุดยุติ บันทึกปริมาณที่ไทเตรทได้

สูตรคำนวณ

$$\text{ปริมาณโปรตีน} = \frac{(A-B) \times C \times 6.25 \times 1400}{D}$$

D

A = ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ไทเตรทตัวอย่าง

B = ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้ไทเตรท blank

C = Normality ของกรดซัลฟูริกที่ใช้ไทเตรท (0.1 N)

D = น้ำหนักของตัวอย่าง (mg)

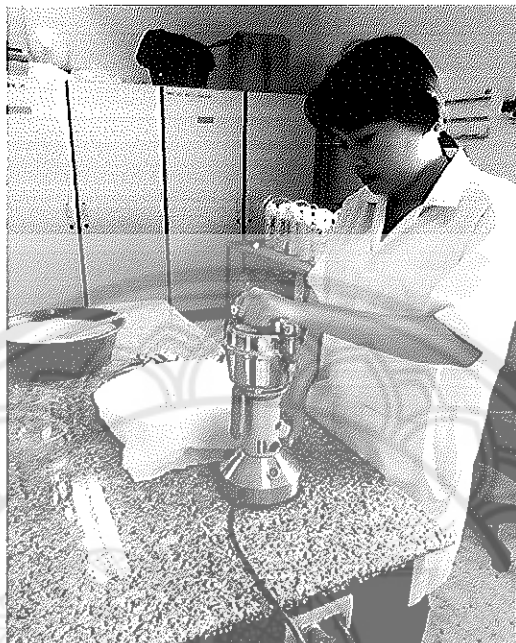
การแปรรูปถั่วเหลืองเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร โดยวิธีของสำนักมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2546.

วิธีการ

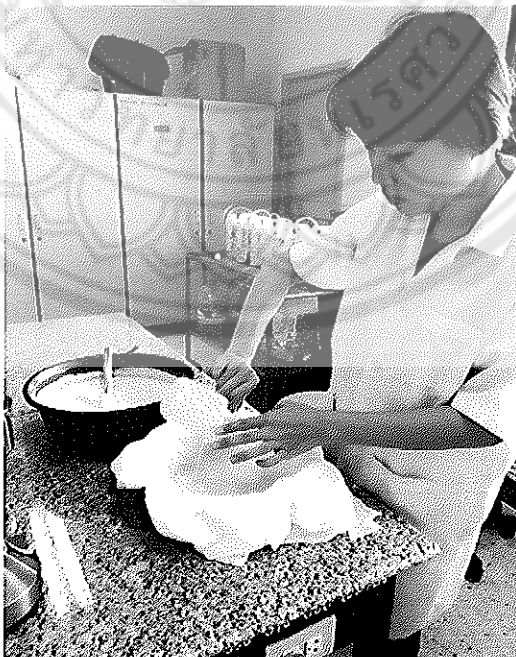
1. นำถั่วเหลืองมาล้างน้ำให้สะอาด และแช่น้ำ 6-8 ชั่วโมง



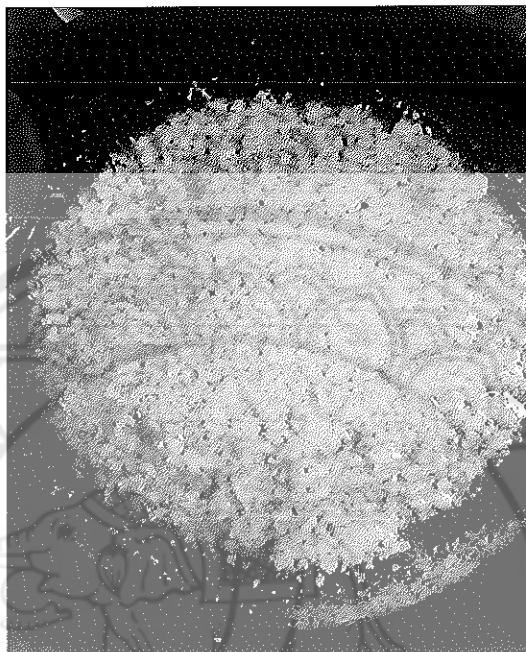
2. ปั่นถั่วเหลืองกับน้ำให้เข้ากัน



3. กรองกากตะกอนด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกนมถั่วเหลืองออกจากกากถั่วเหลือง



4. นำนมถั่วเหลืองที่ได้ไปต้มให้เดือดแล้วยกลงพักไว้สักครู่ จากนั้นเติมสารเคมีแคลเซียมซัลเฟตที่ละลายน้ำแล้ว สำหรับการตกตะกอนโปรตีนของนมถั่วเหลืองให้จับตัวเป็นก้อน



5. ตักตะกอนโปรตีนของนมถั่วเหลืองใส่พิมพ์ที่รองด้วยผ้าขาวบางจนเต็มพิมพ์ แล้วพับผ้าขาวบางหุ้มตะกอนโปรตีนของนมถั่วเหลือง นำของแข็งมากดทับน้ำออก ประมาณ 30 นาที จะได้เต้าหู้แข็ง สีขาว



6. สังเกตการตกตะกอนของโปรตีน ลักษณะการขึ้นรูป และลักษณะเนื้อสัมผัสของเต้าหู้
ระหว่าง 4 สิ่งทดลอง

