



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

ปริญญา

วิศวกรรมอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง จลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ในผัก
โดยการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Kinetics of the Reduction of Pesticide Residues and Microorganisms in Vegetables by
Ultrasonic Cleaning

نامผู้วิจัย นางสาวติกร บัวคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุดสาย ตริวานิช, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ชุดิมา เอี่ยมโชติชวลิต, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

จลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ในผักโดยการล้างด้วย
คลื่นเสียงความถี่สูง

Kinetics of the Reduction of Pesticide Residues and Microorganisms in Vegetables by Ultrasonic
Cleaning

โดย

นางสาวตติกร บัวคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

พ.ศ. 2554

รศ.ดร. บัณฑิต 2554: จลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ในผัก
โดยการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง วิทยาลัยวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร) สาขา
วิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์ธีรชัย ส่งเสริมพงษ์, Ph.D. 95 หน้า

สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักถือเป็นปัญหาใหญ่ในด้านความปลอดภัย
อาหารสำหรับผู้บริโภคภายในประเทศและการส่งออกต่างประเทศ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการล้างผัก
ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ และเปรียบเทียบกับการล้างด้วย
การแช่น้ำ สภาวะในการล้างที่อุณหภูมิ 20 25 และ 30 °C เป็นระยะเวลา 0 3 7 และ 10 นาที การตรวจวิเคราะห์
สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างใช้เทคนิคการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลิโนเอสเตอเรส จากการศึกษาแสดงให้เห็น
เห็นว่า สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงมากที่สุดที่อุณหภูมิในการล้าง 25 °C เวลา 10 นาที สำหรับการล้างด้วย
คลื่นเสียงความถี่สูง ค่า D (Decimal reduction time) ที่ 25 °C สำหรับผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า คือ
22.32 22.80 16.07 และ 17.84 นาที ตามลำดับ ส่วนค่า k (Reaction rate constant) ที่ 25 °C คือ 1.53×10^{-3} 2.33×10^{-3}
 1.62×10^{-3} และ 2.17×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ และค่า E_a (Activation energy of the reduction) คือ 2.46×10^3
 3.44×10^3 1.32×10^3 และ 5.02×10^3 cal/mole ตามลำดับ ในขณะที่การล้างด้วยการแช่น้ำลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืช
ตกค้างมากที่สุดที่สภาวะในการล้าง 30 °C เวลา 10 นาที สำหรับผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้ามีค่า D คือ
70.20 66.17 32.37 และ 21.91 นาที ตามลำดับ ส่วนค่า k คือ 4.83×10^{-4} 5.50×10^{-4} 1.30×10^{-3} และ 1.80×10^{-3} วินาที⁻¹
ตามลำดับ และค่า E_a คือ 1.05×10^4 2.29×10^4 1.69×10^4 และ 0.71×10^4 cal/mole ตามลำดับ นอกจากนี้ การศึกษา
ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยสภาวะในการล้างที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 0 3 7 และ 10 นาที พบว่า การล้าง
ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นเวลา 10 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และ
พริกชี้ฟ้าได้มากที่สุด และมีค่า D คือ 17.30 11.79 8.48 และ 9.93 นาที ตามลำดับ ค่า k คือ 1.98×10^{-3} 2.03×10^{-3}
 2.23×10^{-3} และ 3.51×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ ส่วนการล้างด้วยการแช่น้ำ พบว่า ค่า D ในการล้างผักชี ผักคะน้า
ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าเป็น 24.39 22.71 11.48 และ 13.47 นาที ตามลำดับ และค่า k คือ 1.29×10^{-3} 1.72×10^{-3}
 1.76×10^{-3} และ 2.14×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถ
ลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ดีกว่าการล้างด้วยการแช่น้ำ

Ratikorn Buakham 2011: Kinetics of the Reduction of Pesticide Residues and Microorganisms in Vegetables by Ultrasonic Cleaning. Master of Science (Food Engineering), Major Field: Food Engineering, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Mr. Sirichai Songsermpong, Ph.D. 95 pages.

The pesticide residues and microorganisms in vegetables have caused big problem for both Thai's consumers and Thai's exporters. In this research the new method of vegetables cleaning using ultrasonic waves is introduced to alleviate these problems. The four kinds of vegetables including coriander, kale, yard long bean, and red chili has been studied. The comparisons of the cleaning efficiency between method of ultrasonic cleaning and soaking in tap water were carried out. The cleaning was done at 20, 25 and 30 °C for 0, 3, 7 and 10 minutes for pesticide residues. The determinations of the reduction of pesticide residues in vegetables were performed using the cholinesterase inhibition technique. It was found that ultrasonic cleaning at 25 °C was the best to reduce the pesticide residues. The D values (Decimal reduction time) at 25 °C of coriander, kale, yard long bean and red chili were 22.32, 22.80, 16.07 and 17.84 min respectively. The k values (Reaction rate constant) at 25 °C of coriander, kale, yard long bean and red chili were 1.53×10^{-3} , 2.33×10^{-3} , 1.62×10^{-3} and $2.17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ respectively and E_a values (Activation energy of the reduction) were 2.46×10^3 , 3.44×10^3 , 1.32×10^3 and $5.02 \times 10^3 \text{ cal/mole}$ respectively. Soaking coriander, kale, yard long bean and red chili in tap water at 30 °C was studied to reduce the pesticide residues. For soaking at 30 °C, the D values were 70.20, 66.17, 32.37 and 21.91 min respectively and the k values were 4.83×10^{-4} , 5.50×10^{-4} , 1.30×10^{-3} and $1.80 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ respectively. The E_a values were 1.05×10^4 , 2.29×10^4 , 1.69×10^4 and $0.71 \times 10^4 \text{ cal/mole}$ respectively. In addition, the ultrasonic cleaning was done at 25 °C for 0, 3, 7 and 10 minutes for microorganisms. The determinations of the microorganisms in vegetables were done by the aerobic plate counts. The D value of ultrasonic cleaning at 25 °C for coriander, kale, yard long bean, and red chili were 17.30, 11.79, 8.48 and 9.93 min respectively and the k values were 1.98×10^{-3} , 2.03×10^{-3} , 2.23×10^{-3} and $3.51 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ respectively. Soaking coriander, kale, yard long bean, and red chili in tap water have the D value of 24.39, 22.71, 11.48 and 13.47 respectively and the k values of 1.29×10^{-3} , 1.72×10^{-3} , 1.76×10^{-3} and $2.14 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ respectively. In conclusions, ultrasonic cleaning was a better method in reducing the pesticide residue and microorganism than soaking in tap water tremendously.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีมาโดยตลอด ตลอดจนการตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุดสาย ศรีวานิช และอาจารย์ชุตินา เอี่ยมโชติชวลิต ผู้อำนวยการฝ่ายนวัตกรรมการวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้เครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ให้คำปรึกษาแนะนำและให้ทุนวิจัยในโครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอกระหว่างสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยกับสถาบันการศึกษา ในการทำวิทยานิพนธ์ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สายพิน ทานัฒมาสัย ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อย

ขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนให้แก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด เพื่อให้ข้าพเจ้าเป็นบุคลากรที่ดี มีความรู้ สามารถรับใช้สังคมและประเทศชาติต่อไป

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารและสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในสาขาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำที่ดี และให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มที่ อีกทั้งมิตรภาพที่ดีเสมอมา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณตา คุณยาย คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงญาติผู้ใหญ่ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้คำชี้แนะที่ดีมาโดยตลอด และน้องสาวที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจกันเสมอมา

รติกร บัวคำ

กรกฎาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	24
อุปกรณ์	24
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	34
สรุปและข้อเสนอแนะ	56
สรุป	56
ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	58
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก รูปวัสดุ-อุปกรณ์ การทดลองและผลการทดลอง	65
ภาคผนวก ข ข้อมูลประกอบผลการทดลองสำหรับการลด	
สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง	69
ภาคผนวก ค ข้อมูลประกอบผลการทดลองสำหรับการลด	
ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด	81
ภาคผนวก ง ตารางวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	95

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 วิธีการล้างผักแบบต่างๆ ที่ช่วยลดปริมาณสารพิษ	8
2 ขั้นตอนการเติมสารในชุดตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง	27
3 ขั้นตอนการเติมสารในชุดตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างสำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน	28
4 ผลของการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) Decimal reduction time (D) และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a) สำหรับการลดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง	42
5 ผลของการล้างผักด้วยการแช่น้ำต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) Decimal reduction time (D) และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a) สำหรับการลดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง	46
6 ค่า D (Decimal reduction time) และ k (Reaction rate constant) จากการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	53
7 ค่า D (Decimal reduction time) และ k (Reaction rate constant) จากการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ด้วยการแช่น้ำ	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักชี ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	70
ข2 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักคะน้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	70
ข3 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างถั่วฝักยาว ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	71
ข4 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างพริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	72
ข5 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักชี ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	73
ข6 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักคะน้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	73
ข7 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างถั่วฝักยาว ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	74
ข8 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างพริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	74
ข9 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักชี ด้วยการแช่น้ำ	75
ข10 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักคะน้า ด้วยการแช่น้ำ	76
ข11 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างถั่วฝักยาว ด้วยการแช่น้ำ	77
ข12 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างพริกชี้ฟ้า ด้วยการแช่น้ำ	78
ข13 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักชีด้วยการแช่น้ำ	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข14 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักคะน้าด้วยการแช่น้ำ	79
ข15 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างถั้วผักยาวด้วยการแช่น้ำ	80
ข16 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ	80
ค1 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั้วผักยาว และพริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	82
ค2 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั้วผักยาว และพริกชี้ฟ้า ด้วยการแช่น้ำ	83
ค3 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างผักชี ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	84
ค4 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างผักคะน้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	84
ค5 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างถั้วผักยาว ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	85
ค6 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	85
ค7 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	86
ค8 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักคะน้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	86
ค9 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างถั้วผักยาว ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	87
ค10 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างพริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ง1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	89
ง2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	89
ง3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	90
ง4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	90
ง5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักชีด้วยการแช่น้ำ	91
ง6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักคะน้าด้วยการแช่น้ำ	91
ง7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างถั่วฝักยาวด้วยการแช่น้ำ	92
ง8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ	92
ง9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับผักชี	93
ง10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับผักคะน้า	93
ง11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับถั่วฝักยาว	94
ง12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับพริกชี้ฟ้า	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปรากฏการณ์ Cavitation	10
2	(a) สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำได้; (b) การล้างสิ่งสกปรกที่ละลายน้ำด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	11
3	(a) สิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ; (b) การล้างสิ่งสกปรกไม่ละลายน้ำด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	12
4	การล้างด้วยแปรง	12
5	(a) เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic generator); (b) เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	13
6	เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิก	14
7	เครื่องล้างอัลตราโซนิกส์	14
8	ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา (a) ที่ลำดับปฏิกิริยาลำดับ 0; (b) ที่ลำดับปฏิกิริยาลำดับ 1; (c) ที่ลำดับปฏิกิริยาลำดับ 2	22
9	กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรกับร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (n=5)	29
10	การหาค่า D (Decimal reduction time)	30
11	การเจือจางเชื้อจุลินทรีย์จากหลอดตัวอย่าง	32
12	ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	35
13	อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	35
14	ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	36
15	อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	38
17	อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	38
18	ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	39
19	จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งของการลดลงสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	41
20	ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ	44
21	จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งของการลดลงสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ	45
22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (□) และการแช่น้ำ (■)	50
23	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของจลนพลศาสตร์ของการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (■) และการแช่น้ำ (●)	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 เครื่องล้างอัลตราโซนิกสัขนาด 2 ลิตร ที่ใช้ในการทดลอง	66
ก2 ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ที่ใช้ในการล้าง	66
ก3 ชุดตรวจหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืช “จีที”	67
ก4 ความเข้มข้นของตัวอย่างผักที่ผ่านการตรวจหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างด้วยชุดตรวจ “จีที”	67
ก5 ความเข้มข้นของร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ระดับ 0 10 30 50 80 และ 100 จากการสร้างกราฟมาตรฐานด้วยชุดตรวจ “จีที”	68
ก6 การล้างผักและการเก็บตัวอย่างกระทำในตู้ปลอดเชื้อ สำหรับการทดสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C	=	Concentration
C_0	=	Initial concentration
CFU	=	Colony Forming Unit
CTSP	=	Colimated trisodium phosphate
D	=	Decimal reduction time
E_a	=	Activation energy of the reaction
g	=	Gram
HC	=	Sodium hypochlorite
k	=	Reaction rate constant
k_0	=	Initial reaction rate (the y-intercept)
K	=	Kelvin
ln	=	Natural logarithm
log	=	Logarithm
ml	=	Milliliter
n	=	Order of reaction
ppm	=	Part per million
R	=	Gas constant (1.987 cal/mol.deg)
R^2	=	Coefficient of determination
rpm	=	Revolutions per minute
t	=	Time
T	=	Temperature
μ l	=	Microliter

จลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ในผักโดยการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Kinetics of the Reduction of Pesticide Residues and Microorganisms in Vegetables by Ultrasonic Cleaning

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการส่งออกและแปรรูปพืชผลทางการเกษตรจำนวนมาก โดยปี 2552 ถึง 2553 มีมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรร้อยละ 16.5 ของมูลค่าการส่งออกทั้งหมด ในจำนวนนี้พบว่าผัก ผลไม้สด แช่แข็งและกระป๋องมีมูลค่าการส่งออกถึงร้อยละ 8.5 ของมูลค่าสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรทั้งหมด (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์, 2553) แต่บ่อยครั้งที่การจำหน่ายไปยังต่างประเทศมักจะถูกปฏิเสธ เนื่องจากการตรวจพบเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคและสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง (กรมวิชาการเกษตร, 2552) ซึ่งพบปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Escherichia coli* และ *Salmonella* จากผักสดของไทยในการนำเข้าสู่ประเทศต่างๆ (กรมวิชาการเกษตร, 2552; บ้านเมือง, 2553) จึงทำให้ประเทศนอร์เวย์ มีการสั่งห้ามนำเข้าผักสดของไทย (กรมวิชาการเกษตร, 2548) และมีการเปรียบเทียบการนำเข้าผัก ผลไม้สดที่เข้มงวดมาก เกี่ยวกับปริมาณสูงสุดของสารตกค้าง (Directive 90/624/EEC) (สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงลอนดอน, 2552) ครอบคลุมทั่วไปเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหาร (food safety) ข้อกำหนดด้านมาตรฐาน (food standards requirements) และด้านสุขลักษณะภายใต้กฎหมายอาหารของสหราชอาณาจักรและสหภาพยุโรป ก่อนปล่อยออกสู่ท้องตลาด ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการส่งออกผัก ผลไม้สดจากประเทศไทย

ปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนและสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างมาจากขั้นตอนการเพาะปลูกตลอดจนถึงกระบวนการล้างทำความสะอาดวัตถุดิบที่ไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งการล้างที่ดีจะช่วยลดสิ่งสกปรกได้ จึงมีแนวคิดในการนำคลื่นเสียงความถี่สูงมาประยุกต์ใช้ในการล้างผัก ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถจัดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และสิ่งสกปรกได้ดีกว่าวิธีการอื่น เช่น การล้างแบบสเปรย์ การใช้แปรง การใช้น้ำและอากาศที่ปั่นป่วน เป็นต้น เนื่องจาก คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้เกิดปรากฏการณ์ Cavitation ที่เป็นการจัดของฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากบนพื้นผิวผักที่สามารถเข้าถึงทุกซอก

มุมที่ซับซ้อนได้ (Fuchs, 2002) โดยศึกษาจนพบศาสตร์เพื่อใช้อธิบายอัตราเร็วในการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ทำให้ทราบอุณหภูมิและเวลาการล้างที่เหมาะสมและทำนายการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างหรือเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยพบว่า ผักชี ผักคะน้า และพริก อยู่ในอันดับต้นจากสิบอันดับผักที่พบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างมากที่สุดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร (กองบรรณธิการ, 2553) และถั่วฝักยาว มีปัญหาการตรวจพบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างจากการส่งออก (กรมวิชาการเกษตร, 2552; Vassiliou, 2009) จึงนำผักทั้งสี่ชนิดในการศึกษานานวิจัยนี้

ความปลอดภัยของอาหารเป็นสิ่งสำคัญต่อผู้บริโภคอย่างมาก ดังนั้น คลื่นเสียงความถี่สูงที่นำมาประยุกต์ในการล้างผักจึงเป็นแนวทางใหม่ที่จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคมากขึ้น การเล็งเห็นถึงปัญหาเหล่านี้จึงนำมาซึ่งการศึกษาว่าการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงว่าดีกว่าการล้างผักที่ไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงอย่างไรจากการศึกษาจนพบศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ในการล้างผักที่ยังไม่เคยมีผู้ศึกษามาก่อน เพื่อนำความรู้ดังกล่าวมาช่วยเพิ่มความปลอดภัยให้ผู้บริโภค สักยภาพและความสามารถในการส่งออกผักของไทยไปยังประเทศต่างๆ ให้เป็นที่ยอมรับทั่วโลก

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผัก (ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า) จากการล้างด้วยน้ำร่วมกับคลื่นเสียงความถี่สูงและเปรียบเทียบกับ การล้างด้วยน้ำอย่างเดียว โดยการหาค่า D (Decimal reduction time) k (reaction rate constant) และค่า E_a (activation energy of the reaction)

2. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผัก (ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า) ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและเปรียบเทียบกับ การล้างด้วยน้ำอย่างเดียว โดยการหาค่า D (Decimal reduction time) และ k (reaction rate constant) ณ อุณหภูมิเดี่ยวที่เหมาะสม

การตรวจเอกสาร

1. สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและวัตถุอันตรายทางการเกษตร

1.1. ความหมาย

คำว่า “สารพิษตกค้าง” ในความหมายของพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ออกตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 288 (กระทรวงสาธารณสุข, 2548) หมายถึง “วัตถุอันตรายทางการเกษตร รวมทั้งกลุ่มอนุพันธ์ของสารดังกล่าว ได้แก่ สารในกระบวนการเปลี่ยนแปลง (conversion products) สารในกระบวนการสร้างและสลาย (metabolites) สารที่เกิดจากปฏิกิริยา (reaction products) หรือสิ่งปลอมปนในวัตถุอันตรายทางการเกษตรที่มีความเป็นพิษซึ่งปนเปื้อนหรือตกค้างในอาหาร”

วัตถุอันตรายทางการเกษตร หมายความว่า สารที่มีจุดมุ่งหมายใช้เพื่อป้องกัน ทำลาย ดึงดูด ขัดได้ หรือควบคุมศัตรูพืชและสัตว์ หรือพืชและสัตว์ที่ไม่พึงประสงค์ ไม่ว่าจะเป็นการใช้ระหว่างการเพาะปลูก การเก็บรักษา การขนส่ง การจำหน่าย หรือใช้ในระหว่างกระบวนการผลิตอาหาร หรือเป็นสารที่อาจใช้กับสัตว์เพื่อควบคุมปรสิตนอก (ectoparasites) และให้หมายความรวมถึงสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช สารทำให้ใบร่วง สารทำให้ผลร่วง สารยับยั้งการแตกยอดอ่อน และสารที่ใช้กับพืชผลก่อนหรือหลังการเก็บเกี่ยวเพื่อป้องกันการเสื่อมเสียระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง แต่ไม่รวมถึงปุ๋ย สารอาหารของพืชและสัตว์ วัตถุเจือปนอาหาร และยาสำหรับสัตว์

1.2. ประเภท

สารเคมีกำจัดศัตรูพืช (pesticides) สามารถแบ่งออกได้หลายประเภท เช่น แบ่งตามลักษณะการออกฤทธิ์ของสารเป็น สารเคมีกำจัดแมลง สารเคมีกำจัดเชื้อรา สารเคมีกำจัดวัชพืช สารเคมีกำจัดหนอนพยาธิ สารรมควัน สารกำจัดไร เป็นต้น หรือแบ่งตามชนิดและคุณสมบัติ แบ่งได้เป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช (chemical pesticides) สารชีวอินทรีย์กำจัดศัตรูพืช (biopesticides) เป็นต้น จึงขอแบ่งกลุ่มสารสังเคราะห์ตามคุณสมบัติทางเคมี ดังนี้ (ฝ่ายสารวัตรเกษตร กองควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร, ม.ป.ป.)

1.2.1. กลุ่มออร์แกนโนคลอรีน

สารเคมีกลุ่มนี้มีฤทธิ์ฆ่าแมลงค่อนข้างช้า แต่มีฤทธิ์ในการฆ่าหรือป้องกันกำจัดแมลงได้นานและคงอยู่ในสภาพเดิมในธรรมชาติได้นานมาก ตัวยามีสมบัติละลายน้ำได้น้อยแต่ละลายในไขมันได้ดีการออกฤทธิ์ทำให้แมลงตายโดยตัวสารออกฤทธิ์จะรวมตัวกับไขมันในเซลล์ประสาท แมลงจะเป็นอัมพาตและตายในที่สุด สารเคมีกลุ่มนี้ได้แก่ เอ็นโดซัลเฟน เมทโทกซิคลอร์ และไดโคโฟล เป็นต้น

1.2.2. กลุ่มออร์แกนโนฟอสเฟต

สารเคมีกลุ่มนี้ใช้กำจัดแมลงมากที่สุด เนื่องจากมีพิษสูงต่อแมลงแต่มีพิษตกค้างสั้นกว่ากลุ่มแรก จึงต้องใช้ระมัดระวังเป็นพิเศษ การออกฤทธิ์ทำให้แมลงตายโดยรวมตัวกับน้ำย่อยโคลีนเอสเตอเรส ทำให้การถ่ายทอดความรู้สึกจากประสาทไปกล้ามเนื้อไม่ทำงานกล้ามเนื้อกระตุกตลอดเวลา แมลงเป็นอัมพาตและตายในที่สุด สารเคมีกลุ่มนี้ได้แก่ โมโนโครโตฟอส มาลาไอออน ไดอะซีโนน คลอไพริฟอส เป็นต้น

1.2.3. กลุ่มคาร์บาเมต

สารเคมีกลุ่มนี้คล้ายกลุ่มออร์แกนโนฟอสเฟต มีพิษต่อแมลงค่อนข้างสูงและออกฤทธิ์ทำให้แมลงตาย สารกลุ่มนี้บางชนิดใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา ไล่เดือนฝอย และวัชพืช มีผลต่อสัตว์เลือดอุ่นน้อยกว่ากลุ่มออร์แกนโนฟอสเฟต สารเคมีกลุ่มนี้ได้แก่ คาร์บาริล เมทโทมิล คาร์โบฟูแรน และได้อ็อกซาคาร์ป เป็นต้น

1.2.4. กลุ่มสารยับยั้งการเจริญเติบโต

สารกลุ่มนี้ทำลายแมลงแตกต่างจาก 3 กลุ่มที่กล่าวมาแล้ว สารกลุ่มนี้ไม่ฆ่าแมลงทันทีแต่ทำให้การเจริญเติบโตของแมลงผิดปกติ ตัวอ่อนไม่สามารถลอกคราบหรือเจริญเติบโตได้ตามปกติ แต่ตัวอ่อนจะลอกคราบเป็นตัวอ่อนเรื่อยไปและตายในที่สุดหรือทำให้ตัวอ่อนเป็นตัวแก่เร็วกว่ากำหนด และไม่สามารถขยายพันธุ์ได้ เป็นต้น ดังนั้นต้องเลือกระยะเวลาที่ใช้ให้ถูกต้องด้วย

การออกฤทธิ์ทำลายหนอนจะเกิดขึ้นเมื่อหนอนกินสารเคมีเข้าไปแล้วและมีผลช่วงที่หนอนลอกคราบ สารเคมีกลุ่มนี้ได้แก่ คลอฟูอะซุรอน ไคฟูเบนซุรอน เป็นต้น

1.2.5. กลุ่มสารชีวอินทรีย์

สารกลุ่มนี้แตกต่างจากทุกกลุ่มที่กล่าวมา กลุ่มนี้ใช้ประโยชน์จากเชื้อชีวอินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อแมลงใช้เพื่อกำจัดแมลง ออกฤทธิ์ทำลายแมลงได้ก็ต่อเมื่อแมลงกินเข้าไป สารชีวอินทรีย์ที่มีจำหน่ายแล้วได้แก่ *Bacillus thuringiensis* นอกจากนี้ยังมีการศึกษาใช้เชื้อไวรัสกำจัดหนอนในพืชหลายชนิดได้ผลมาแล้ว

1.2.6. กลุ่มสารรมควันพิษ

สารเคมีกลุ่มนี้ในสภาพปกติสามารถระเหยเป็นแก๊ส และกระจายตัวได้ดีตามซอกมุมของโรงเก็บหรือกองผลผลิตพืช สารเคมีกลุ่มนี้มีวิธีใช้ 2 ลักษณะคือ ใช้รมดิน เพื่อฆ่าแมลงโรค วัชพืชและไส้เดือนฝอย และใช้ตามโรงเก็บเมล็ดพืช เพื่อฆ่าแมลง สารเคมีกลุ่มนี้อยู่ในรูปเม็ดและของเหลว ได้แก่ เอทริโคโบรไมด์ เมทรีนโบรไมด์ อะลูมิเนียมฟอสไฟด์คลอโรฟอสคาร์บอนไดซัลไฟด์ เป็นต้น

ผลของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชที่มีต่อผู้บริโภคเกิดจากการบริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่มีสารเคมีปนเปื้อนหรือตกค้างอยู่ แม้จะได้รับในปริมาณน้อย แต่การได้รับเป็นประจำ สารพิษจะสะสมเป็นปัญหาเรื้อรัง ส่งผลกระทบต่อระบบการทำงานต่างๆในร่างกาย เช่น ผลกระทบต่อระบบประสาทและสมอง เมื่อมีการสะสมระยะยาวก่อให้เกิดปัญหาด้านความจำเสื่อม สมาธิสั้น เป็นต้น ผลกระทบต่ออวัยวะภายในร่างกายอย่างตับและไตที่มีหน้าที่ในการกำจัดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างหากร่างกายได้รับสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างเป็นประจำอวัยวะเหล่านี้จะทำงานหนัก และก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา ผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ซึ่งสารเคมีกำจัดศัตรูพืชบางชนิดรบกวนการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย ทำให้ร่างกายอ่อนแอ ง่ายต่อการติดเชื้อต่างๆได้ ผลกระทบต่อระบบสมดุลของฮอร์โมนในร่างกาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อต่อมไร้ท่อที่ทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมน ทำให้ต่อมไร้ท่อทำงานผิดปกติ เช่น การเป็นหมัน การผลิตสpermatozoa ลดลง เป็นต้น ผลกระทบต่อเซลล์ในร่างกาย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในระดับเซลล์ของร่างกาย เป็นสาเหตุให้ร่างกายอ่อนแอ เจ็บป่วย และโรคมะเร็งต่างๆ สารเคมีกำจัดศัตรูพืชบางชนิด

อาจทำให้เกิดการกลายพันธุ์ ทารกในครรภ์เกิดความผิดปกติหรือพิการ เป็นต้น ทั้งนี้ ความรุนแรงของผลกระทบต่างๆ ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณและสุขภาพของผู้รับสารเคมีดังกล่าวด้วย

1.3. ข้อกำหนดปริมาณสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างสูงสุด

การกำหนดค่าสารเคมีทางการเกษตรตกค้าง มักมีกฎหมายที่ได้กำหนดไว้สำหรับแต่ละประเทศ เพื่อความปลอดภัยด้านอาหาร โดยเฉพาะความปลอดภัยของสินค้าเกษตรและอาหารนำเข้า อาทิเช่น ประเทศไทย กำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ เรื่อง ปริมาณสารพิษตกค้างสูงสุด (Maximum Residue Limits: MRL) ครอบคลุมสารพิษตกค้างจากวัตถุอันตรายทางการเกษตร 40 ชนิด เป็นบัญชีแนบท้าย 2 ลักษณะ คือ บัญชีที่ 1 เรียงลำดับตามชนิดวัตถุอันตรายทางการเกษตร และบัญชีที่ 2 เรียงลำดับตามชนิดสินค้าเพื่อสะดวกในการใช้งาน (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2551) สาธารณรัฐเกาหลีได้ กำหนดค่า MRL สินค้าเกษตรและอาหารของสาธารณรัฐเกาหลีได้เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากพืชและปศุสัตว์ (กองนโยบายมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหาร สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2548) และสหภาพยุโรป กำหนดกฎหมายในการควบคุมการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช และกฎหมายควบคุมปริมาณสารตกค้างในสินค้าพืชผักผลไม้ (Pesticide EU-MRLs Regulation (EC) 396/2005) (DG Sanco, 2008)

1.4. การตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง (กอบทอง, 2550)

การตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ในอาหารนั้นจะใช้วิธีการมาตรฐาน เช่น แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC) ลิควิดโครมาโตกราฟี (Liquid Chromatography, LC) แก๊สโครมาโตกราฟีร่วมกับ Mass Spectrometry (GC-MS) เป็นต้น แม้ว่าวิธีการเหล่านี้จะมีความแม่นยำ และได้รับการยอมรับโดยทั่วไป แต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน มีต้นทุนในการตรวจสอบที่สูง และต้องการผู้ปฏิบัติงานที่มีความชำนาญในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ซึ่งผลิตภัณฑ์การเกษตรส่วนมากเป็นผักผลไม้สดที่จะมีการเน่าเสียเร็ว การตรวจสอบหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างจึงต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วบนพื้นฐานทางวิชาการที่ถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการมาตรฐาน ดังนั้น การตรวจสอบเพื่อคัดกรองตัวอย่างด้วยชุดตรวจหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง “จีที” ซึ่งเป็นวิธีการตรวจวิเคราะห์อย่างง่ายและรวดเร็ว โดยใช้หลักการตรวจหาสารพิษด้วยวิธีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส (Acetyl cholinesterase Inhibition Technique) อาศัยทฤษฎีที่ว่า สารเคมีในกลุ่มออร์แกนโนฟอสเฟต กลุ่มคาร์บาเมตและกลุ่มสารเคมีอื่นๆที่เป็นโคลีน

เอสเตอเรสอินฮิบิเตอร์ มีคุณสมบัติเด่นในด้านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลินเอสเตอเรส ที่มีอยู่ในชุดตรวจ “จีที” เอนไซม์นี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายอะซิติลโคลีนให้เป็นโคลีนกับกรดอะซิติค ถ้าตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์มีสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ สารพิษจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลินเอสเตอเรส ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถย่อยสลายอะซิติลโคลีนได้ โดยปริมาณของอะซิติลโคลีนที่เหลืออยู่จะเป็นตัวกำหนดความเข้มของสีในชุดตรวจ ยิ่งถ้าตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีค่าความเป็นพิษสูง เอนไซม์โคลินเอสเตอเรสจะถูกยับยั้งการทำงานมากขึ้นตาม ทำให้มีอะซิติลโคลีนเหลืออยู่ในปริมาณมากเช่นกัน สีที่ได้จากการทดสอบก็จะเข้มมากตาม และสามารถอ่านผลจากความเข้มสีออกมาเป็นร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์จากภาพที่ 9 หน้า 29 จากการพบปัญหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักบ่อยครั้ง สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) จึงได้แนะนำกระบวนการล้างผักก่อนรับประทานดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการล้างผักแบบต่างๆ ที่ช่วยลดปริมาณสารพิษ

วิธีการล้าง	ร้อยละปริมาณสารพิษที่ลดลง
1. ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต(ผงฟู) 1 ช้อนโต๊ะผสมน้ำอุ่น 1 กระละมัง (20 ลิตร) แช่นาน 15 นาที แล้วนำไปล้างน้ำอีก หลายๆ ครั้ง	90-95
2. ใช้น้ำส้มสายชู (ร้อยละ 5) 1 ช้อนโต๊ะผสมน้ำ 1 กระละมัง (20 ลิตร) แช่นาน 10-15 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	60-84
3. ล้างผักโดยให้น้ำไหลผ่าน โดยเด็ดผักเป็นใบๆ ใส่ตะแกรงโปร่ง เปิดน้ำให้แรงพอประมาณ ใช้มือช่วยคลี่ใบผัก นาน 2 นาที	54-63
4. ลอกหรือปอกเปลือกชั้นนอก ของผักออกทิ้ง เด็ดผักเป็นใบๆ แล้วแช่น้ำสะอาดนาน 10-15 นาที	27-72
5. ต้มหรือลวก ผักด้วยน้ำร้อน	48-50
6. ใช้ด่างทับทิม 20-30 เกล็ด ผสมน้ำ 1 กระละมัง แช่นาน 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	35-43
7. ใช้เกลือป่น 1 ช้อนโต๊ะ ผสมน้ำ 1 กระละมัง แช่นาน 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด	29-38

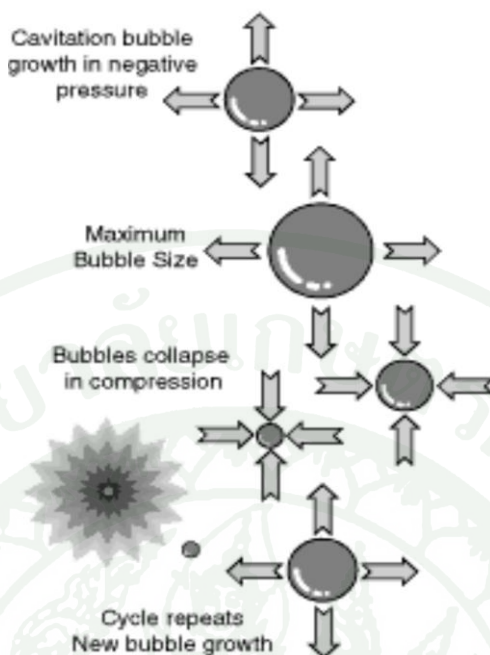
ที่มา: กองพัฒนาสุขภาพผู้บริโภค (2544)

2. คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound)

คลื่นเสียงความถี่สูง คือ คลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่เหนือการได้ยินของมนุษย์หรือมากกว่า 16 กิโลเฮิร์ตซ์ คลื่นเสียงความถี่สูงแบ่งเป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ เช่น คลื่นเสียงความถี่สูงชนิดกำลัง มีความถี่อยู่ในช่วง 20 ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ และคลื่นเสียงความถี่สูงชนิดที่ใช้ในอุปกรณ์การแพทย์ มีความถี่อยู่ในช่วง 1 ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ (Sivakumar and Rao, 2001; Sivakumar *et al.*, 2009) นอกจากนี้ เทคโนโลยีคลื่นเสียงความถี่สูงยังมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำความสะอาดเครื่องมือทางการแพทย์ (Huang *et al.*, 2006) และอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ในกระบวนการล้าง โฮโมจิไนเซชัน การทำให้เกิดอิมัลชัน การกรอง การตกผลึก การสกัดสาร การไล่แก๊ส และการตัดผลึกภัณฑ์ (Sivakumar and Rao, 2001; Bhaskaracharya *et al.*, 2009) นอกจากนี้ยังใช้วัดลักษณะเนื้อสัมผัส ความหนืด ความเข้มข้น ปริมาณของแข็งหรือของเหลวในอาหาร วัดความหนาของผลิตภัณฑ์ การวัดระดับการไหลและอุณหภูมิในการตรวจสอบและการควบคุมกระบวนการหลายประการ (Valero *et al.*, 2007) และการตรวจสอบแบบไม่ทำลายผลิตภัณฑ์ เช่น ผลไม้ พืชผัก เปลือกไข่ และบรรจุภัณฑ์อาหาร เป็นต้น (Mizrach, 2007) สำหรับการล้างหรือการขจัดสิ่งสกปรกออกจากด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลดังนี้

2.1. ปรากฏการณ์ Cavitation

ปรากฏการณ์ Cavitation (ภาพที่ 1) เป็นปรากฏการณ์ทางกายภาพที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็ก มีการขยายขนาด และแตกออกอย่างรุนแรงของฟองอากาศในตัวกลาง อย่างเช่นน้ำหรือของเหลวส่วนใหญ่ภายใต้ความดัน โดยการเกิดฟองอากาศ (cavitation bubble) ในช่วงความดันต่ำของคลื่นเสียง และฟองอากาศเพิ่มขึ้นที่ผิวหน้าของคลื่น มีการรวมตัวกันทำให้ฟองอากาศเหล่านี้โตขึ้นเป็นฟองขนาดใหญ่ที่ไม่เสถียร และสุดท้ายฟองอากาศจะแตกออกอย่างรุนแรงในช่วงความดันสูง จากนั้นฟองอากาศเล็กๆ ที่แตกออกเหล่านั้นจะโตขึ้นมาใหม่และแตกออกอีกครั้ง ต่อเนื่องไปตลอดภายใต้การกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง โดยการเกิดปรากฏการณ์ Cavitation มักเกิดตรงรอยต่อของอนุภาคเจือปนบนผิวผัก



ภาพที่ 1 ปรากฏการณ์ Cavitation

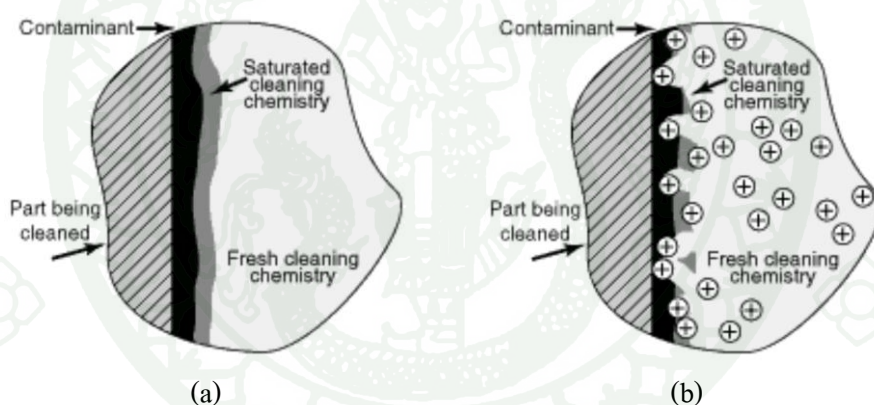
ที่มา: Fuchs (2002)

2.2. การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic cleaning)

การส่งคลื่นเสียงความถี่สูงผ่านไปของเหลว ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กๆ จำนวนมากภายในของเหลว และฟองอากาศเหล่านี้จะเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขยายตัวและแตกออกอย่างสม่ำเสมอ การแตกของฟองอากาศเหล่านี้ทำให้เกิดพลังงานกลในรูป microjets หรือ shockwaves นอกจากนี้อนุภาคของเหลวที่คลื่นเสียงความถี่สูงส่งผ่านอาจเกิดการผสมกัน (micromixing) ทำให้มีความร้อน มีการถ่ายเทมวลและการกระจายตัวได้ทั่วถึงทุกจุดที่ของเหลวเข้าถึงได้แม้ในรูเล็กๆ ของของแข็ง ทำให้มีผลต่อการล้างพื้นผิวที่ขรุขระได้ (Seymour *et al.*, 2002; Sivakumar and Rao, 2001) ของเหลวจะไหลไปพร้อมกับการแตกออกของฟองอากาศใกล้พื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ของเหลวไหลพุ่งอย่างแรงบนผิววัสดุจึงสามารถขจัดสิ่งสกปรกและแบคทีเรียออกได้ (Mason *et al.*, 1996) โดยเฉพาะขณะที่เกิดการสั่นอย่างต่อเนื่องบริเวณรอยต่อระหว่างผิววัสดุกับสิ่งสกปรก ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกและเกิดฟองอากาศเล็กขึ้นใหม่ต่อเนื่องกันไป ลักษณะการแตกตัวของฟองอากาศจำนวนมากนี้จึงเปรียบเสมือนขนแปรงขจัดสิ่งสกปรกบนผิววัสดุให้

หลุดออกไปได้ เครื่องล้างคลื่นเสียงความถี่สูง จึงสามารถใช้สำหรับล้างวัตถุต่างๆ ที่มีรูปร่าง ซับซ้อนหรือเปราะบางที่ไม่สามารถล้างได้ด้วยมือหรือแปรงขัด สามารถล้างได้ทุกซอกทุกมุมที่น้ำ หรือสารละลายสามารถเข้าถึงได้ จากข้อมูลดังกล่าวทำให้เครื่องล้างคลื่นเสียงความถี่สูงมี ประสิทธิภาพในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผัก ผลไม้และจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ (Fuchs, 2002)

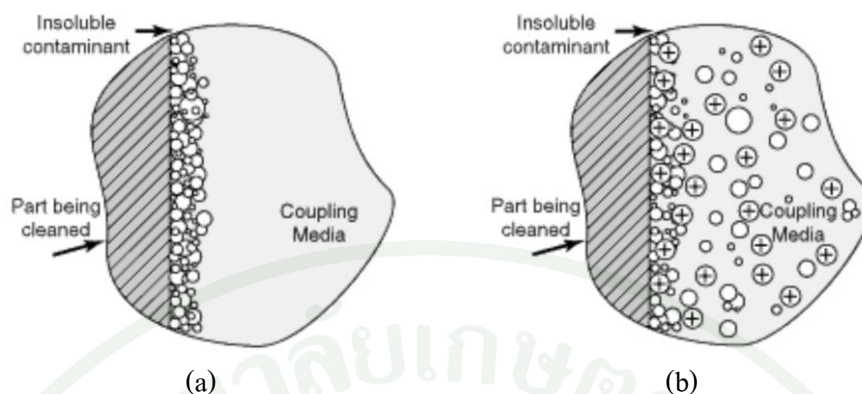
สำหรับสิ่งสกปรกที่ละลายน้ำได้ น้ำยาทำความสะอาดจะทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว เข้าไปล้อมรอบสิ่งสกปรกและจับสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิว แต่เมื่อน้ำยาทำความสะอาดจับสิ่ง สกปรกจนอิ่มตัว ทำให้น้ำยาทำความสะอาดไม่สามารถเข้าไปจับกับสิ่งสกปรกได้อีก (ภาพที่ 2(a)) แต่เมื่อใช้คลื่นเสียงความถี่สูงฟองอากาศจะเข้าไปแทรกซึมสิ่งสกปรก ทำให้น้ำยาทำความสะอาด สามารถเข้าไปกำจัดสิ่งสกปรกออกมาได้ (ภาพที่ 2(b))



ภาพที่ 2 (a) สิ่งสกปรกที่ละลายน้ำได้; (b) การล้างสิ่งสกปรกที่ละลายน้ำด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

ที่มา: Fuchs (2002)

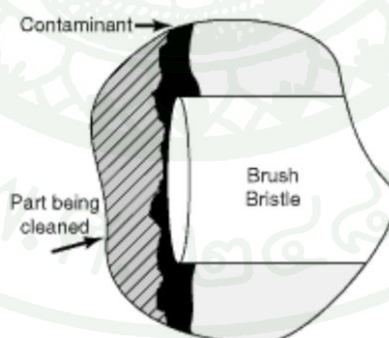
สำหรับสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ สิ่งสกปรกเหล่านี้จะยึดเกาะกันด้วยแรงยึดเกาะ (cohesive forces) ดังภาพที่ 3(a) สิ่งสกปรกนี้จะถูกกำจัดออกด้วยการทำลายแรงดึงดูด (attractive forces) อย่างเพียงพอ เมื่อใช้คลื่นเสียงความถี่สูงฟองอากาศที่ไม่มีหัวจะเข้าไปแทนที่และจับกับสิ่ง สกปรกที่เป็นสารไม่มีหัว ทำให้กำจัดสิ่งสกปรกออกจากพื้นผิวได้ (ภาพที่ 3(b))



ภาพที่ 3 (a) สิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ; (b) การล้างสิ่งสกปรกไม่ละลายน้ำด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

ที่มา: Fuchs (2002)

จากภาพที่ 2-3 แสดงให้เห็นว่าเป็นพื้นผิวเรียบ แต่ในความเป็นจริง พื้นผิวของวัตถุส่วนใหญ่ไม่ค่อยเรียบ มีลักษณะขรุขระ ซึ่งการทำความสะอาดด้วยแปรงไม่สามารถเข้าไปทำความสะอาดบริเวณร่องขรุขระได้เนื่องจากขนแปรงมีขนาดใหญ่ (ภาพที่ 4) แต่เมื่อใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ฟองอากาศขนาดเล็กสามารถแทรกซึมเข้าไปในบริเวณร่องขรุขระ สามารถทำความสะอาดพื้นผิวภายในที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าวิธีการล้างอื่น (Fuchs, 2002)



ภาพที่ 4 การล้างด้วยแปรง

ที่มา: Fuchs (2002)

2.3. เครื่องล้างอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonic cleaner)

Fuchs (2002) ได้จำแนกอุปกรณ์กำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง 2 ชนิด ได้แก่

2.3.1. เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic generator) ดังภาพที่ 5(a) ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าสลับ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์ ส่งผ่านเข้าทรานสดิวเซอร์

2.3.2. ทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic transducers) ดังภาพที่ 5(b) เป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลที่สั่นสะเทือนโดยตรงทรานสดิวเซอร์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ แมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) แปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าในขดลวดกับตำแหน่งความยาวของแกนเหล็กที่สวมขดลวดนั้นอยู่ และเพียโซอิเล็กทริก (Piezo-electric Transducer) แปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานทางกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่อยู่มากหนึ่ง (นิยมใช้มากที่สุด)

ทรานสดิวเซอร์แบบเพียโซอิเล็กทริก ประกอบด้วยผลึกเซรามิก (ภาพที่ 6) ซึ่งมีผิวโลหะเงินฉาบอยู่ทั้ง 2 หน้า เพื่อให้ต่อสายไฟเป็นขั้วบวกและขั้วลบ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านจะทำให้เกิดการหดและขยายตัวของผลึกเซรามิกด้วยความถี่สูงมากจนเกิดเป็นคลื่นเสียงความถี่สูง



(a)



(b)

ภาพที่ 5 (a) เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic generator); (b) เพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์

ที่มา: ยศพนธ์ และคณะ (2552)



ภาพที่ 6 เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์แบบเซรามิก

ที่มา: Alternative Energy Research (2011)

หลักการทั่วไปของเครื่องล้างอัลตราโซนิกส์ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์ เข้าวงจรไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและความถี่จะถูกแปลงให้เหมาะสมกับหัวทรานสดิวเซอร์ ทำให้หัวทรานสดิวเซอร์เกิดการสั่นคลื่นเสียงความถี่สูง ส่งผ่านมาที่ของเหลวภายในอ่าง

ภาคเอกชนมีหลายบริษัทที่จำหน่ายเครื่องล้างผักและผลไม้ด้วยอัลตราโซนิกส์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องล้างในระดับครัวเรือนอีกทั้งยังนำเข้าและไม่มีผลิตในประเทศไทย อย่างเช่น บริษัท Alibaba ของฮ่องกง (Alibaba, 2010) บริษัท Newlife Technology ประเทศจีน (New life Technology, 2010) บริษัท Juicerthailand นำเข้าเครื่องล้างจากประเทศเกาหลี (Juicerthailand, 2010) บริษัท Jeil Trading ประเทศเกาหลี (Jeil Trading, 2010) เป็นต้น โดยประเทศไทยมีเพียงสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยเท่านั้นที่ได้พัฒนาเครื่องล้างอัลตราโซนิกส์รุ่น UC4401 ขนาด 15×30×10 เซนติเมตร ปริมาณบรรจุ 2 ลิตร ความถี่ของคลื่นเสียง 60 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 140 วัตต์ ซึ่งใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ดังภาพที่ 7 (ชูดิมา, 2547)



ภาพที่ 7 เครื่องล้างอัลตราโซนิกส์

ที่มา: ชูดิมา (2547)

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสิ่งสกปรกด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

สิริชัย (2551) ศึกษาการล้างล้างผักชี ผักคะน้า พริกชี้ฟ้า และองุ่นเขียวราชบุรีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อทดสอบสถานะในการล้างที่เหมาะสม คือ เครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ความถี่ต่างๆ อัลตราส่วนวัตถุคือน้ำ ระยะเวลาในการล้าง และชนิดของน้ำยาทำความสะอาด พบว่า เครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ที่ความถี่ 60 กิโลเฮิร์ตซ์ 140 วัตต์เหมาะสมที่สุด ปริมาณที่เหมาะสมของผักชี ผักคะน้า พริกชี้ฟ้า และองุ่นเขียวราชบุรี คือ 160 220 700 และ 600 กรัม ค่อน้ำ 2 ลิตร ตามลำดับ พิจารณาจากการตรวจวัดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างทั้งก่อนและหลัง เวลาที่เหมาะสมในการล้างผักชีคือ 3 นาที ส่วนผักคะน้า พริกชี้ฟ้า และองุ่นเขียวราชบุรี คือ 7 นาทีที่เหมาะสมที่สุด การล้างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต มีสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างน้อยที่สุดในทุกๆ ตัวอย่าง

สิริชัย (2553) ศึกษาการล้างกะหล่ำปลี และผักกาดเขียวปลีเพื่อลดเชื้อจุลินทรีย์และสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง พบว่า การล้างกะหล่ำปลีด้วยน้ำประปาพร้อมกับเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ 10 นาที เหมาะสมที่สุด สามารถลดปริมาณสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ร้อยละ 29.14 และ 91.17 ตามลำดับ ส่วนผักกาดเขียวปลีสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ร้อยละ 32.20 และเมื่อล้างผักด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ร่วมกับน้ำยาทำความสะอาดพบว่า น้ำยาทำความสะอาดแอมเวย์ให้ผลดีกว่า โซเดียมไบคาร์บอเนตและน้ำส้มสายชู หลังจากนั้นนำผักมาแช่น้ำอเล็กโทรไลต์ชนิดกลาง พบว่า กะหล่ำปลีที่ล้างด้วยสารทำความสะอาดแอมเวย์และแช่ด้วยน้ำอเล็กโทรไลต์ ลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้มากที่สุด และกะหล่ำปลีที่ล้างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและแช่ด้วยน้ำอเล็กโทรไลต์ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้มากที่สุด ส่วนผักกาดเขียวปลีที่ล้างด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนตและแช่ด้วยน้ำอเล็กโทรไลต์ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้มากที่สุด การล้างผักกาดเขียวปลีด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์สามารถประหยัดน้ำได้ร้อยละ 5.71 เมื่อเทียบกับการล้างแบบเดิมของบริษัท เพ็นด้า อิมแพ็ค จำกัด

Niemczewski (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิ ปริมาณแก๊ส และระดับน้ำในเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ต่อความเข้มของ cavitation ในน้ำประปา พบว่า ความเข้มของ cavitation สูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 °ซ และอาจสูงที่สุดอีกครั้งที่อุณหภูมิระหว่าง 20-40 °ซ ขึ้นอยู่กับความสูงของระดับน้ำในอ่างล้างและปริมาณแก๊ส เมื่ออุณหภูมิของเหลวเพิ่มสูงขึ้น ฟองอากาศมีจำนวนมากขึ้น

ควรทำให้ความเข้มของ cavitation มากขึ้น แต่ในทางกลับกันอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของเหลวมีความดันไอสุงขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สในฟองอากาศเพิ่มขึ้นและแรงระเบิดในการแตกของฟองอากาศลดลง จากแนวโน้มทั้งสองที่ตรงข้ามกันชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมอาจเกิดขึ้นที่ความเข้มของ cavitation สูงสุด เนื่องจากประสิทธิผลของการทำความสะอาดยังขึ้นอยู่กับความเข้มของ cavitation ถ้าความเข้มของ cavitation มากขึ้นจะทำให้การทำความสะอาดีขึ้น

Zhao *et al.* (2009) ศึกษาการล้างเห็ด *Thelephora ganbajun* ที่มีสิ่งสกปรกติดแน่นและฝังลึกบริเวณรากปริมาณมากซึ่งทำความสะอาดยากด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการทำความสะอาคือ สารชำระล้างร้อยละ 0.67 อัตราส่วนตัวอย่างต่อน้ำเป็น 1:100 อุณหภูมิ 21.5-25.0 °C เวลาในการล้าง 20 นาที และการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 55.5 เทียบกับการล้างที่ไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

Cao *et al.* (2010) ศึกษาผลของการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่อคุณภาพทางกายภาพและชีวภาพของสตรอเบอรี่หลังการเก็บเกี่ยว โดยใช้ความถี่หลายระดับคือ 25 28 40 หรือ 59 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 10 นาทีและเก็บไว้ที่ 5 °C นาน 8 วัน พบว่า ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถรักษาคุณภาพและลดปริมาณจุลินทรีย์ได้มากที่สุด เนื่องจาก ความถี่คลื่นเสียงแปรผกผันกับขนาดของฟองอากาศ ถ้าความถี่ต่ำขนาดฟองอากาศจะใหญ่ความรุนแรงในการแตกของฟองอากาศจะมากกว่าที่ความถี่สูง ทำให้เกิดความเสียหายที่ผนังเซลล์ของสตรอเบอรี่มากกว่า แต่ถ้าความถี่สูงเกินไป ขนาดฟองอากาศจะเล็กมาก ทำให้ความรุนแรงในการแตกของฟองอากาศต่ำลง จึงทำให้คุณภาพด้อยและปริมาณจุลินทรีย์ลดลงได้น้อยกว่าที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์

3.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Seymour *et al.* (2002) ศึกษาการล้างผักกาดหอมเพื่อลด *Salmonella typhimurium* พบว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับน้ำสามารถลด *S. typhimurium* ได้มากกว่าการล้างด้วยน้ำถึง 1 log และการล้างด้วยน้ำ น้ำคลอรีน คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับน้ำ และคลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับน้ำคลอรีนสามารถลด *S. typhimurium* ได้ 0.7 1.6 1.7 และ 2.7 log ตามลำดับ (การลดลงร้อยละ 81 97 98 และ 99.8 ตามลำดับ) สำหรับการทดลองขนาด 2 ลิตร

Huang *et al.* (2006) ศึกษาการลดลงของ *Salmonella* และ *E. coli* O157:H7 ในการล้างแอปเปิ้ลและผักกาดหอมด้วยคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 5 10 20 และ 40 ppm ทั้งรวมและไม่รวมกับคลื่นเสียงความถี่สูง ความถี่คลื่นเสียง 170 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 3 6 และ 10 นาที ตามลำดับ พบว่า การล้างแอปเปิ้ลด้วยคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 20 และ 40 ppm ในเวลา 3 6 และ 10 นาที ทำให้ *Salmonella* และ *E. coli* O157:H7 ลดลง 3.115 - 4.253 log และ 2.235 - 3.865 log ตามลำดับ เทียบเท่ากับการล้างด้วยคลอรีนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 ppm ในเวลา 6 และ 10 นาที ร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ส่วนการล้างผักกาดหอมด้วยคลอรีนไดออกไซด์ ร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในที่มี *Salmonella* 4.48×10^4 CFU/g และ *E. coli* O157:H7 1.07×10^5 CFU/g พบว่าเชื้อลดลง 2.257- 2.972 และ 1.357- 2.264 log ตามลำดับ

Zhou *et al.* (2009) ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับน้ำยาฆ่าเชื้อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลด *E. coli* O157:H7 ในผักขม โดยจุดเชื้อลงในตัวอย่างที่จะทำการล้างด้วยน้ำ คลอรีน โซเดียมคลอไรท์ชนิดกรด (acidified sodium chlorite, ASC) peroxyacetic acid (POAA) และน้ำอิเล็กโทรไลต์ชนิดกรด (acidic electrolyzed water) ที่มีและไม่มีคลื่นเสียงความถี่สูงแบบ probe ความถี่คลื่นเสียง 21.2 กิโลเฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 2 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ตรวจสอบผลของเวลาในการล้างและความหนาแน่นของพลังงานคลื่นเสียงความถี่สูง (acoustic energy density, AED) ที่คงค่าไว้ 200 วัตต์/ลิตร ที่ ASC ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร การวิเคราะห์ทางจุลินทรีย์พบว่า ASC สามารถลดเชื้อ *E. coli* O157:H7 ได้ 2.2 log มากกว่าการล้างด้วยน้ำ ในขณะที่น้ำยาฆ่าเชื้ออื่นๆ ลดเชื้อได้ประมาณ 1 log คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับน้ำยาฆ่าเชื้อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดจำนวนเซลล์ *E. coli* บนผักขมในทุกวิธีการจาก 0.7 ถึง 1.1 log มากกว่าการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อเพียงอย่างเดียว การเพิ่มความเข้มข้นของ ASC จะเพิ่มประสิทธิภาพร่วมกันระหว่าง ASC และคลื่นเสียงความถี่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความเข้มข้น ASC น้อยกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร การเพิ่มเวลาในการล้างตั้งแต่ 0-4 นาที และ AED จาก 0-500 วัตต์/ลิตร นอกจากนี้ *E. coli* O157:H7 ที่อยู่ด้านล่างของใบผักขม (ด้านหยาบ) จะล้างได้ยากกว่าเชื้อที่อยู่ด้านบนของใบ (ด้านเรียบ)

Scherba *et al.* (1991) ประเมินประสิทธิภาพการทำลายเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงความถี่ 26 กิโลเฮิร์ตซ์ กับเชื้อจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำ ประกอบด้วยแบคทีเรีย (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* และ *Pseudomonas aeruginosa*) เชื้อรา (*Trichophyton mentagrophytes*) และเชื้อไวรัส (Feline herpesvirus type 1 และ Feline calicivirus) สำหรับแบคทีเรีย พบว่า เวลาที่มีผลต่อการทำลายแบคทีเรียทั้ง 4 ชนิดคือ แบคทีเรียถูกทำลายเพิ่มขึ้น

เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น และความเข้มข้นของคลื่นเสียงมีผลต่อแบคทีเรียทั้งหมด ยกเว้น *E. coli* การทำลายเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเข้มคลื่นเสียงเพิ่มขึ้น ซึ่งการทำลายแบคทีเรียขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและอัตราส่วนน้ำที่ใช้ สำหรับเชื้อรา พบว่า การเติบโตของเชื้อราลดลงเมื่อความเข้มของคลื่นเสียงความถี่สูงเพิ่มขึ้น สำหรับเชื้อไวรัส พบว่า ความเข้มของคลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อการลดลงของ Feline herpesvirus อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อ Feline calicivirus จากผลเหล่านี้ จึงให้เห็นว่า คลื่นเสียงความถี่สูงช่วงความถี่ต่ำสามารถหยุดยั้งการทำงานของเชื้อโรคบางชนิดที่อาศัยอยู่ในน้ำ โดยปรากฏการณ์ cavitation จะหยุดยั้งกลไกทางกายภาพ

อรุณศรี และคณะ (2552) ศึกษาการลดปริมาณจุลินทรีย์ในใบโหระพาโดยการล้างด้วยน้ำโอโซน กรดอ่อนและคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่า การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับการใช้โอโซนที่ความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 3 นาที อุณหภูมิ 5 °ซ สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ รา และ *E. coli* ลงได้มากที่สุด ส่วน *Salmonella* ไม่สามารถนับได้แต่ยังพบเชื้ออยู่ คล้ายคลึงกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับกรดแลคติกร้อยละ 1 (10,000 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 30 นาที และวิธีนี้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีที่สุด ผักมีรอยชำที่ขอบใบเล็กน้อย ใบมีสีเขียวและเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับใบโหระพาที่ยังไม่ผ่านการล้างและที่ผ่านการล้างจากโรงงาน

3.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีการล้างอื่น

รังสิณี (2549) ศึกษาผลของวิธีการล้างดอกกะหล่ำและใบกระเพราตัดแต่ง ด้วยสารละลายโอโซนและคลอรีนต่อการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ พบว่า การล้างดอกกะหล่ำตัดแต่งด้วยสารละลายโอโซน 0.31-0.33 ppm เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและ *E. coli* ได้ 1.81 และ 1.88 log CFU/ml ตามลำดับ ส่วนการล้างด้วยคลอรีนที่สถานะเดียวกัน สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและ *E. coli* ได้ 0.60 และ 0.99 log CFU/ml ตามลำดับ และการล้างใบกระเพราตัดแต่งด้วยสารละลายโอโซน 0.33-0.35 ppm เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและ *E. coli* ได้ 0.39 และ 0.66 log CFU/ml ตามลำดับ ส่วนการล้างด้วยคลอรีนที่สถานะเดียวกัน สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและ *E. coli* ได้ 0.23 และ 0.37 log CFU/ml ตามลำดับ สรุปการล้างด้วยโอโซนมีประสิทธิภาพดีกว่าการล้างด้วยคลอรีนที่ความเข้มข้น

และระยะเวลาเท่ากัน โดยการทดสอบประสิทธิภาพสัมพัทธ์ด้านการยอมรับรวมของดอกกะหล่ำตัดแต่งที่ล้างด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีคุณภาพดีกว่าการล้างด้วยคลอรีน และใบกระเพราตัดแต่งที่ล้างด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีคุณภาพใกล้เคียงการล้างด้วยคลอรีน

ธนธิ และคณะ (2545) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการล้างผัก 4 วิธี คือ การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (0.35 ppm) สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (HC 25 ppm) คลอรีนเตตไตรโซเดียมฟอสเฟต (CTSP 25 ppm) และน้ำประปา เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ปนเปื้อนในผักสดทั้งผักใบ (ผักกาดหอม) ผักก้าน (ผักบุ้ง) และผักหัว (แครอท) ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ พบว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ HC และ CTSP เป็นเวลา 15 10 และ 5 นาที ตามลำดับ สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงสาธารณสุขได้ (ไม่เกิน 10^4 CFU/g) โดยสามารถลดปริมาณเชื้อทั้งหมดในแครอท ผักบุ้ง และผักกาดหอม ลงได้ 3 3.2 และ 4.1 log ตามลำดับ และลดเชื้อยีสต์ได้ใกล้เคียงกันคือ 3-3.5 log CFU/g ส่วนน้ำประปาลดเชื้อด้วยการชะล้างได้ไม่มากนัก (1 log CFU/g) หากต้องการกำจัดเชื้อให้หมดไปจากผัก (เชื้อเริ่มต้น 5-8 log CFU/g) จะต้องใช้เวลาการกำจัดเชื้อในผักบุ้งคือ 20 30 และ 20 นาที ตามลำดับ ในผักกาดหอมจะต้องใช้เวลาการกำจัดเชื้อคือ 35 40 และ 20 นาที ตามลำดับ ส่วนแครอทต้องใช้เวลา 20 นาทีเท่ากันทุกวิธี สรุปได้ว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ CTSP มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการกำจัดเชื้อในผักสดและมีประสิทธิภาพสูงกว่า HC ที่เวลาในการฆ่าเชือนานกว่า วิธีการทั้ง 4 ชนิดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การเปลี่ยนสีและรูปร่างของผัก ไม่พบการบวมหรือการเหี่ยวของผักสด การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เปรียบที่ไม่มีสารตกค้างและไม่เป็นอันตรายบำบัดน้ำเสีย

วรารักษ์ และคณะ (2544) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมคลอไรท์ 50 ppm สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ 200 ppm และสารผสมเปอร์ออกซิแอซิดิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (สาร A) 80 ppm เพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและ *E. coli* 4.16-6.32 และ 4.19-5.46 log CFU/ml ตามลำดับ ที่ปนเปื้อนบนผักกาดหอม ผักกาดขาว ผักชี และสะระแหน่ การล้างผักด้วยน้ำประปาผสมสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ปรับพีเอช 4 ด้วยกรดแอซิดิก ที่ $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 0-30 นาที พบว่า สารละลายโซเดียมคลอไรท์ มีประสิทธิภาพในการลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบนผักกาดหอม และผักกาดขาว 4-5 log CFU/ml ได้หมดภายใน 30 นาที สารฆ่าเชื้อนี้มีประสิทธิภาพในการลดจำนวน *E. coli* บนผักกาดหอม ผักชี และสะระแหน่ได้หมดในเวลา 15 นาที สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์สามารถลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบนผักกาดหอม 4.83 log CFU/ml ได้หมดภายใน 15 นาที และ

ทำลายเซลล์ *E. coli* บนผักกาดหอม และสระแหน่ 4.57 log CFU/ml ได้หมดภายใน 15 นาที สาร A สามารถทำลายเซลล์ *E. coli* บนผักกาดหอม ผักชี และสระแหน่ 4.41-5.00 log CFU/ml ได้หมดภายใน 15 นาที แต่ไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์ทั้งหมดให้หมดได้ภายใน 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด พบว่า สารละลายโซเดียมคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนได้ดีที่สุด ไม่ทำให้สีและกลิ่นของผักกาดหอมและผักกาดขาวเปลี่ยน สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์และสาร A ทำให้สีของสระแหน่เปลี่ยนเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อกลิ่นของสระแหน่ และที่ความเข้มข้นเหล่านี้ไม่เหมาะจะใช้ล้างผักชีเพราะทำให้สีผักชีคล้ำ

4. แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (Kinetics model) (Heldman *et al.*, 2007)

จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ หรือปริมาณสารตั้งต้นที่ลดลงต่อเวลา หรือปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาในปฏิกิริยาหนึ่งๆ โดยที่สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์นี้สามารถเป็นคุณภาพทางเคมี จุลินทรีย์ หรือทางกายภาพใดๆ ที่สามารถวัดเป็นปริมาณได้ สมการจลนพลศาสตร์มีสมการเริ่มต้นดังนี้

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณความเข้มข้นของสาร

t คือ เวลา

k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

n คือ ลำดับปฏิกิริยา สามารถมีค่าเท่ากับ 0, 1, 2, ... n ขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยา

ชนิดจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีกำหนดโดยค่าลำดับปฏิกิริยา (n) ที่พบโดยส่วนใหญ่ในอาหารมักเป็นชนิดลำดับที่ 0 ถึง 2 แต่มักเป็นชนิดลำดับที่ 1 มากที่สุด เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของสี การเสื่อมเสียวิตามิน การตายของเชื้อจุลินทรีย์ และการเสื่อมเสียของเนื้อสัมผัสอาหารที่ผ่านความร้อน เป็นต้น รองลงมาคือลำดับที่ 0 เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ คุณภาพโดยรวมของอาหารแช่แข็ง เป็นต้น และชนิดลำดับที่ 2 อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นสารตั้งต้นยกกำลังสอง แสดงว่าตอนเริ่มต้น ความเข้มข้นสารตั้งต้นสูงอยู่ อัตราการลดลงของสารตั้ง

ต้นจะสูงมากแบบยกกำลังสอง แต่เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำลง อัตราการลดลงของสารตั้งต้นจะต่ำลงอย่างมากด้วย สำหรับรูปแบบสมการเมื่อแทนค่า n เป็น 0 1 และ 2 ในสมการที่ (1) จะได้ดังนี้

4.1. สำหรับปฏิกิริยาลำดับศูนย์ ($n = 0$);

เมื่อแทนค่า $n = 0$ ในสมการที่ (1) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้

$$C = C_0 - kt \quad (2)$$

จากสมการ (2) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C กับ t จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน y คือค่า C_0 (ปริมาณความเข้มข้นของสารเริ่มต้น) และความชันคือค่า k มีหน่วยคือ ความเข้มข้นต่อเวลา เช่น โมลต่อวินาที

4.2. สำหรับปฏิกิริยาลำดับหนึ่ง ($n = 1$);

เมื่อแทนค่า $n = 1$ ในสมการที่ (1) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้

$$-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = kt \quad (3)$$

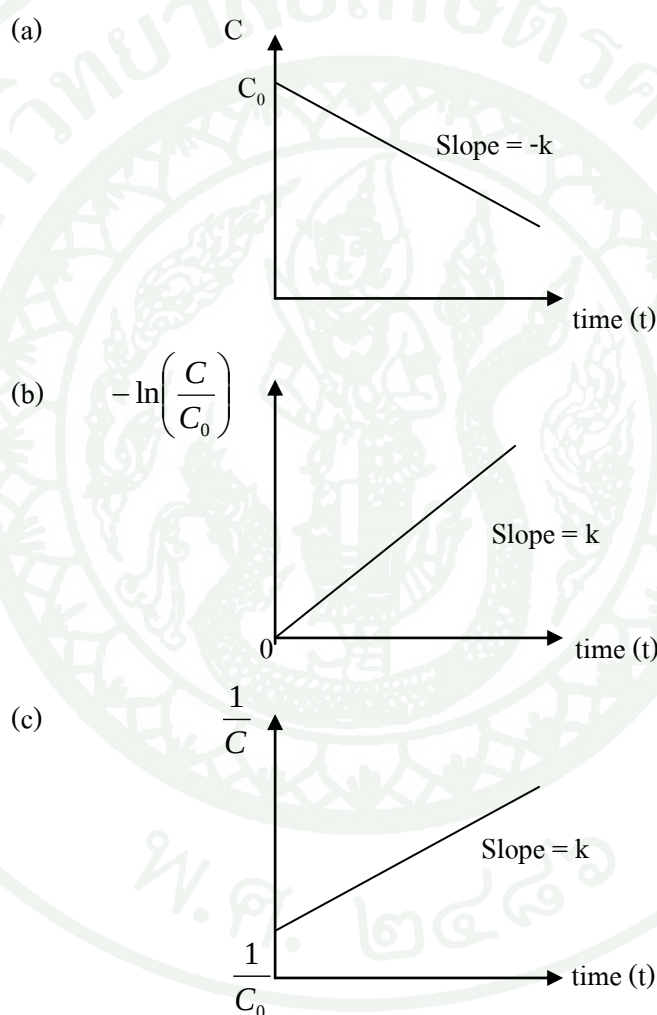
จากสมการ (3) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)$ กับ t จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่ความชันคือค่า k มีหน่วยคือ ส่วนกลับของเวลา เช่น 1/วินาที

4.3. สำหรับปฏิกิริยาลำดับสอง ($n = 2$);

เมื่อแทนค่า $n = 2$ ในสมการที่ (1) แล้วทำการอินทิเกรต จะได้

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (4)$$

จากสมการ (4) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{C}$ กับ t จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน y คือค่า $\frac{1}{C_0}$ และความชันคือค่า k มีหน่วยคือ ส่วนกลับของความเข้มข้น เวลา ซึ่งความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นในลำดับต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา (a) ที่ลำดับปฏิกิริยาลำดับ 0; (b) ที่ลำดับปฏิกิริยาลำดับ 1; (c) ที่ลำดับปฏิกิริยาลำดับ 2

ที่มา: Heldman *et al.* (2007)

สำหรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการสลายที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง สามารถอธิบายได้จากสมการของอาร์เรเนียส (Heldman *et al.*, 2007) ดังนี้

$$k = k_0 e^{-E_a / RT} \quad (5)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยา (sec^{-1})
 k_0 คือ ค่าเริ่มต้นของปฏิกิริยา (จุดตัดแกน y)
 E_a คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
 R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($1.987 \text{ cal/mole.deg}$)
 T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

จากสมการ (5) เมื่อใส่ค่า $\ln$ ทั้ง 2 ข้างของสมการจะได้สมการ (6) ดังนี้

$$\ln k = \left(\frac{-E_a}{R} \right) \left(\frac{1}{T} \right) + \ln k_0 \quad (6)$$

เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $\frac{1}{T}$ จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยที่จุดตัดแกน y คือค่า $\ln k_0$ และความชันคือค่า $-E_a / R$ ซึ่งจะได้ค่า k_0 และ E_a ซึ่งอุณหภูมินั้นมีอิทธิพลต่อ k ดังนั้น จึงมีผลโดยตรงต่อสมการอัตรา สมการอัตราจึงได้ถูกศึกษาวิเคราะห์ครอบคลุมอุณหภูมิตลอดช่วงการทดลอง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

- 1.1. ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ซื้อจากตลาดอมรพันธุ์ ข้างมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
- 1.2. ชุดตรวจหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง “จีที” (ห้างหุ้นส่วน จีที การค้า จำกัด นนทบุรี) ประกอบด้วย
 - 1.2.1. ตัวทำละลาย-1 (ไดคลอโรมีเทน)
 - 1.2.2. ตัวทำละลาย-2 (เอทานอลร้อยละ 5)
 - 1.2.3. จีที-1 (เอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส)
 - 1.2.4. จีที-2 (อะซิติลโคลีนผสมโซเดียมอะซิเตท)
 - 1.2.5. จีที-3 (ไฮดรอกซิลอะลามีนผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์)
 - 1.2.6. จีที-4 (กรดไฮโดรคลอริก)
 - 1.2.7. จีที-5 (สารละลายเฟอริกคลอไรด์)
- 1.3. ถังพลาสติก
- 1.4. สารเคมีกำจัดศัตรูพืช “คาร์โบซัลเฟน” ในกลุ่มคาร์บาเมต (บริษัท ชาร์ฟมูเลเตอร์ จำกัด สมุทรสาคร ประเทศไทย)
- 1.5. จานพลาสติกเลี้ยงเชื้อ
- 1.6. เกลือโซเดียมคลอไรด์ (Merek, Darmstadt, Germany)
- 1.7. อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ Tryptic Soy Agar (Merek, Darmstadt, Germany)
- 1.8. แอลกอฮอล์ 95 ดีกรี (องค์การสุรา กรมสรรพสามิต)

2. เครื่องมือและอุปกรณ์

2.1. เครื่องล้างอัลตราโซนิกส์ (รุ่น UC4401 สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)

2.2. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (G10 (190-1100 nm) Thermo, USA)

2.3. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Z 200A Hermle Labortechnik GmbH, Wehingen, USA)

2.4. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง (GM 1502 Sartorius, Germany)

2.5. บั้มลมขนาดเล็ก (Big Boy 7000, China)

2.6. เครื่องตีปั่น (MIX 2, AES Laboratoire, Combourg, France)

2.7. ทรานเฟอร์ปีเปต 100-1000 μ l (10E24925 Treff Lab, Switzerland)

2.8. ตู้ปลอดเชื้อ (LAB Service Ltd., Part., Bangkok, Thailand)

2.9. หลอดหมุนเหวี่ยง PPCO 50 ml (Nalge Nunc International, USA)

2.10. อ่างน้ำคูลมอุณหภูมิ (D-91126 Schwabach FRG, Germany)

2.11. อุปกรณ์หั่น ตัด คีม หม้อและภาดอลูมิเนียม

2.12. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

2.13. กระบอกตวง

2.14. เทอร์โมมิเตอร์

2.15. นาฬิกาจับเวลา

2.16. ตู้บ่มเชื้อ 37 °ซ

2.17. หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ

3. เครื่องมือที่ใช้คำนวณและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.1. คอมพิวเตอร์

3.2. โปรแกรมคำนวณสถิติสำเร็จรูป SPSS รุ่น 12

วิธีการ

1. การศึกษาจลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

1.1. การเตรียมตัวอย่าง

ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ซื้อมาจากตลาดอมรพันธ์ นำมาจุ่มสารเคมีกำจัดศัตรูพืช “คาร์โบซัลเฟน” ในกลุ่มคาร์บาเมต ในอัตราส่วนสารกำจัดศัตรูพืช 8 มิลลิตรต่อน้ำประปา 6 ลิตร หรือ 267 ppm (ได้จากการทดลอง) แช่ไว้ 20 นาที จากนั้นนำมาผึ่งลมในตู้ดูดควัน ประมาณ 30 นาที

1.2. วิธีการล้างผักด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์และการแช่น้ำ

นำผักชี (ทั้งต้นรวมรากที่ไม่มีดินติด) ผักคะน้า (ขนาดเล็ก ทั้งต้น) ถั่วฝักยาว (หั่นเป็นท่อนๆละ ประมาณ 15 เซนติเมตร) พริกชี้ฟ้า (รวมขั้วพริก) ที่ผ่านการจุ่มสารกำจัดศัตรูพืช มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง โดยใช้ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าประมาณ 160 220 250 และ 600 กรัม ตามลำดับ ซึ่งได้จากการศึกษาอัตราส่วนผักต่อน้ำที่เหมาะสมที่สุดของสิริชัย (2551) จากนั้นล้างผักทั้ง 4 ชนิดนี้ด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ขนาด 2 ลิตร (15×30×10 เซนติเมตร) ความถี่ 60 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 140 วัตต์ ในอัตราส่วนผักต่อน้ำ 2 ลิตร โดยใช้ตะกร้ากดให้ผักอยู่ในน้ำ ศึกษาสภาวะในการล้างที่อุณหภูมิ 20 25 และ 30 °C เป็นเวลา 0 3 7 และ 10 นาที โดยจัดสิ่งทดลองแบบ 3×3 แฟคทอเรียล (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)

เก็บตัวอย่างผักก่อนจุ่มสารกำจัดศัตรูพืช หลังจุ่มสารกำจัดศัตรูพืช (0 นาที) และที่เวลา 3 7 และ 10 นาที ตามลำดับในทุกอุณหภูมิ จากนั้นตรวจสอบสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างด้วยวิธีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส (กอบทอง, 2550) และล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยการแช่น้ำ (ไม่ใช่เครื่องล้างอัลตราโซนิคส์) ที่สภาวะเดียวกันและนำมาเปรียบเทียบกับผลการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

1.3. วิธีการตรวจสอบเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง (กอบทอง, 2550)

นำตัวอย่างผักมาหั่น สับ บดให้ละเอียด 10 กรัม เติมตัวทำละลาย-1 จำนวน 10 มิลลิลิตร เขย่าประมาณ 1 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 10-15 นาที จากนั้นดูดสารละลายขึ้นมา 1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองใหม่แล้วเติมตัวทำละลาย-2 จำนวน 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองเดียวกันจะพบว่าสารละลายแยกชั้นเป็น 2 ชั้น จากนั้นนำไประเหยด้วยปั๊มลมขนาดเล็กให้ตัวทำละลาย-1 ที่อยู่ชั้นล่างหมดไปโดยสารละลายที่เหลือจากขั้นตอนระเหยจะใช้เป็น “สารสกัดตัวอย่าง” ที่ใช้ในการทดสอบ

การตรวจสอบตัวอย่างจะเติม “สารสกัดตัวอย่าง” จำนวน 0.25 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองหลอดใหม่เป็นหลอดตัวอย่าง และเติมตัวทำละลาย-2 จำนวน 0.25 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองอีกหลอดหนึ่งเป็นหลอดควบคุมเสมอ หลังจากนั้นนำทั้งสองหลอดทดลองเติมสารตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการเติมสารในชุดตรวจสอบเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

หลอดตัวอย่างและหลอดควบคุม		
จี้ที-1	0.50 มิลลิลิตร	วางไว้ 5-10 นาที
จี้ที-2	0.25 มิลลิลิตร	วางไว้ 60 นาที
จี้ที-3	1.00 มิลลิลิตร	เขย่า
จี้ที-4	0.50 มิลลิลิตร	เขย่า
จี้ที-5	0.50 มิลลิลิตร	เขย่า

หมายเหตุ ทำในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 34 °ซ

หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้เทใส่หลอดหมุนเหวี่ยงและนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4750 rpm เป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายของเหลวใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าที่วัดได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน (ภาพที่ 9) เพื่อแสดงออกมาเป็นร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

1.4. วิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน

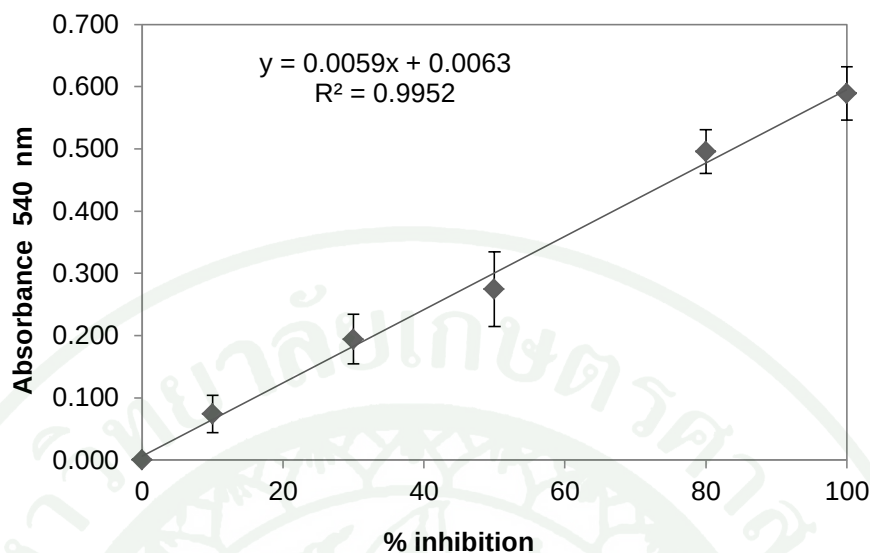
กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีของตัวอย่างในเทอมของค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรกับร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (%inhibition) โดยนำหลอดทดลอง 6 หลอดแสดงระดับการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ร้อยละ 0 10 30 50 80 และ 100 ตามลำดับ เติมน้ำในชุดตรวจ “จีที” ตามตารางที่ 3 (ทำการทดลอง 5 ซ้ำ)

ตารางที่ 3 ขั้นตอนการเติมน้ำในชุดตรวจสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างสำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน

สารเคมี	ร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์						หมายเหตุ
	0	10	30	50	80	100	
ตัวทำละลาย-2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
GT-1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	วางไว้ 5-10 นาที
GT-2	0.25	0.275	0.325	0.375	0.45	0.5	วางไว้ 60 นาที
GT-3	1	1	1	1	1	1	เขย่า
GT-4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	เขย่า
GT-5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	เขย่า

หมายเหตุ หน่วยเป็น มิลลิลิตร

นำสารละลายที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 4750 rpm เป็นเวลา 10 นาที และนำสารละลายของเหลวใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรกับการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ร้อยละ 0 10 30 50 80 และ 100 ตามลำดับ ดังภาพที่ 9

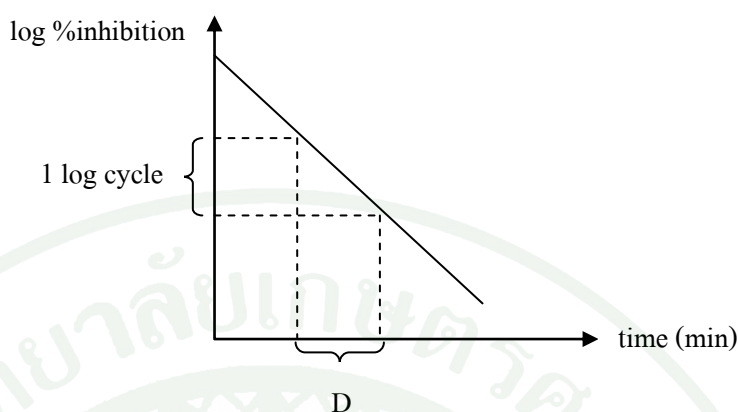


ภาพที่ 9 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 นาโนเมตรกับร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (n=5)

ถ้าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลินเอสเตอเรสต่ำกว่าร้อยละ 50 แสดงว่า ตัวอย่างผักที่นำมาตรวจอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ถ้าการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์มากกว่าร้อยละ 50 แสดงว่า ตัวอย่างผักที่นำมาตรวจอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับไม่ได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าตัวอย่างผักก่อนล้างที่นำมาตรวจมีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ร้อยละ 100 พอตัวอย่างผักหลังล้างมีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ร้อยละ 40 แสดงว่า การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลดลงร้อยละ 60 หรือการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงร้อยละ 60 ซึ่งจะนำไปแสดงร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผลการทดลอง

1.5. การศึกษาจนพบศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

นำค่าร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log ร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (%inhibition) กับเวลา (นาท) เพื่อหาค่า D (Decimal reduction time) จากความชันของเส้นตรงดังภาพที่ 10 โดยค่า D คือ เวลาเป็นนาทที่ log %inhibition ลดลง 1 log cycle



ภาพที่ 10 การหาค่า D (Decimal reduction time)

จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \%inhibition$ กับเวลา (นาทึ) เพื่อหาค่า k (reaction rate constant) จากความชันของเส้นตรง โดยค่า k แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผัก (วินาที⁻¹) และสุดท้ายคือการหาค่า E_a (activation energy of the reaction) คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (cal/mole) โดยการจากสร้างกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ (K⁻¹) ความชันคือค่า $-E_a / R$ (สมการ (6))

2. การศึกษาจลนพลศาสตร์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

2.1. การเตรียมตัวอย่าง

ซื้อผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้ามาจากตลาดอมรพันธุ์ คัดเลือกส่วนเน่าเสียหรือชำทิ้งไป สำหรับผักชี ใช้ทั้งต้นรวมรากที่ไม่มีดินติด ผักคะน้าใช้ขนาดเล็ก ทั้งต้น ถั่วฝักยาวให้หั่นเป็นท่อนๆละ ประมาณ 15 เซนติเมตรและพริกชี้ฟ้าใช้ทั้งเมล็ดรวมขั้วพริกด้วย

2.2. การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

สำหรับอาหารเลี้ยงเชื้อ เตรียม Tryptic Soy Agar (TSA) ในสัดส่วน 40 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร (ตามฉลากระบุข้างขวด) ใส่ขวดแก้ว แล้วเขย่าขวด ส่วน Nomal saline ร้อยละ 0.85 ซึ่งโซเดียมคลอไรด์ในสัดส่วน 8.5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ใส่ขวดแก้วแล้วเขย่าให้เข้ากัน เพื่อใช้ในขั้นตอนการเจือ

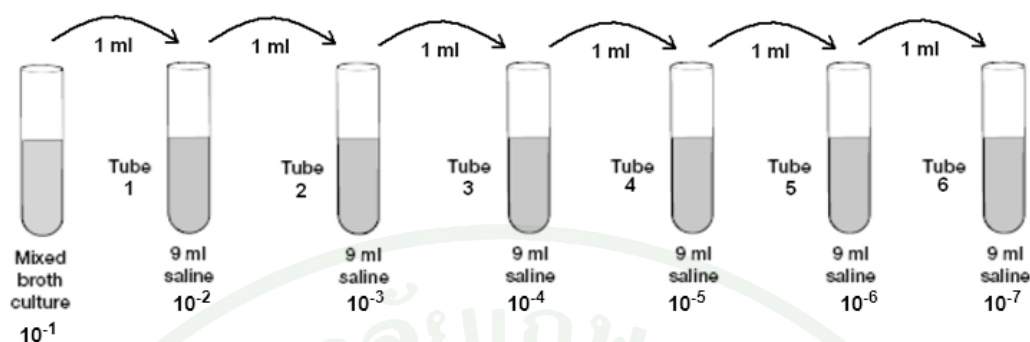
จางเชื้อจุลินทรีย์ นำทั้งหมดมาฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121 °ซ เป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็น

2.3. การเตรียมอุปกรณ์

สำหรับเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ ทำการฆ่าเชื้อ โดยเช็ดตัวเครื่องและภายในอ่างล้างให้ทั่วด้วยแอลกอฮอล์ 95 ดีกรี จากนั้นนำไปวางในตู้ปลอดเชื้อเพื่อฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต 1-2 ชั่วโมง ส่วนอุปกรณ์เครื่องแก้ว คีมคีบผัก น้ำกลั่นสำหรับใช้ล้างผัก นำมาฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121 °ซ เป็นเวลา 15 นาที

2.4. วิธีการล้างผักด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์และการแช่น้ำ

นำผักจากข้อ 2.1 มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง โดยใช้ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าปริมาณ 160 220 250 และ 600 กรัม ตามลำดับต่อน้ำ 2 ลิตร ตามวิธีของ สิริชัย (2551) ที่ศึกษาอัตราส่วนผักต่อน้ำที่เหมาะสมที่สุด จากนั้นล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์และไม่ใช้เครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ด้วยการแช่น้ำ โดยใช้ตะกร้ากดให้ผักอยู่ในน้ำ ศึกษาสถานะในการล้างที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 0 3 7 และ 10 นาที (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ) เก็บตัวอย่างผักก่อนล้าง และหลังล้างที่เวลา 0 3 7 และ 10 นาที สำหรับพริกชี้ฟ้าเก็บตัวอย่าง 25 กรัม เติมนormal saline ร้อยละ 0.85 จำนวน 225 มิลลิลิตร เพื่อทำการเจือจางเชื้อจุลินทรีย์ในสัดส่วนผักต่อ normal saline เป็น 1 ต่อ 10 ส่วน (Cao *et al.*, 2010) ส่วนผักชี ผักคะน้า และถั่วฝักยาวเก็บตัวอย่าง 10 กรัม เติมนormal saline ร้อยละ 0.85 จำนวน 90 มิลลิลิตร เนื่องจากตัวอย่างไม่เพียงพอในการสุ่มเก็บ 25 กรัม นำไปตีปั่นด้วยเครื่องตีปั่น (Stomacher) เป็นเวลา 60 วินาที ดูดของเหลวจากถุงพลาสติกที่ทนการตีปั่น 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มี normal saline ร้อยละ 0.85 จำนวน 9 มิลลิลิตร (เจือจาง 10 เท่า) ทำเช่นเดิม 6 ครั้ง ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การเจือจางเชื้อจุลินทรีย์จากหลอดตัวอย่าง

ดูดของเหลวในแต่ละหลอดมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงจานพลาสติกเลี้ยงเชื้อที่ปลอดเชื้อ จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อ TSA ที่เตรียมไว้ ลงในจานพลาสติกประมาณ 20 มิลลิลิตร แกว่งวนไปมาให้เชื้อผสมเข้ากับอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

นับโคโลนีของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในจานพลาสติกเลี้ยงเชื้อที่มี 25-250 โคโลนี นำค่าที่นับได้มาคำนวณหาปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (U.S. Food and Drug Administration, 2001) ด้วยสมการ ดังนี้

$$\text{ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ (CFU/ml)} = \text{จำนวน โคโลนี} \times \text{Dilution Factor}$$

เช่น นับเชื้อจุลินทรีย์ในจานพลาสติกที่มี Dilution Factor เป็น 10^{-5} ได้ 89 โคโลนี ดังนั้น ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ $89 \times 10^5 = 8.9 \times 10^6$ CFU/ml

2.5. การศึกษาจลนพลศาสตร์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด

การหาค่า D (Decimal reduction time) โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดกับเวลา(นาท) ซึ่งค่า D คือ เวลา (นาท) ที่เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลงไปร้อยละ 90 หรือ 1 log cycle ส่วนค่า k (reaction rate constant) คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดลงของ เชื้อจุลินทรีย์ในการล้างผัก (วินาที⁻¹) หาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln CFU/ml กับ เวลา (นาท) จากความชันของเส้นตรง ส่วนค่า E_a ไม่สามารถหาได้เนื่องจากการทดลองนี้ศึกษาการล้างที่อุณหภูมิเดียวคือ 25 °ซ

3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาล้างผักเพื่อลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ Randomized Complete Block Design (RCBD) จัดการทดลองแบบ 3×3 factorial in RCBD วิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ล้างด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธีของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) ส่วนการศึกษาลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผัก วิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการที่ใช้ล้างผักและเวลาในการล้างด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธีของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS รุ่น 12

ผลและวิจารณ์

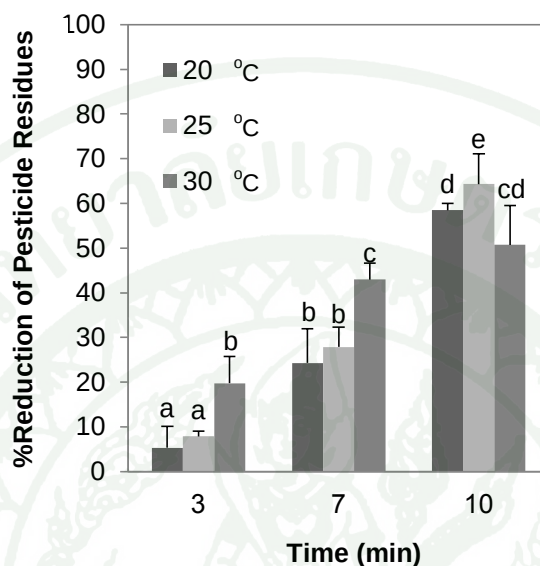
1. จลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผัก

1.1. การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ทำให้สิ่งปนเปื้อนต่างๆ ถูกขจัดออกไปได้ด้วยปรากฏการณ์ Cavitation ซึ่งกล่าวรายละเอียดไว้ในส่วนของบทนำแล้ว และการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักถูกวัดในรูปของร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส ด้วยชุดตรวจสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างของกอบทอง (2550) ซึ่งวิธีการนี้สามารถตรวจพบความเป็นพิษในสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างตัวเดียวหรือหลายตัวรวมกัน โดยอาศัยหลักการว่า สารเคมีในกลุ่มออร์แกนโนฟอสเฟต และกลุ่มคาร์บาเมต มีคุณสมบัติเด่นในด้านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส เอนไซม์นี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายอะซิติลโคลีนให้เป็นโคลีนกับกรดอะซิดิก ถ้าตัวอย่างที่นำมาตรวจวิเคราะห์มีสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ สารพิษจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โคลีนเอสเตอเรส ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถย่อยสลายอะซิติลโคลีนได้ โดยปริมาณของอะซิติลโคลีนที่เหลืออยู่จะเป็นตัวกำหนดความเข้มของสีในชุดตรวจ ยิ่งถ้าตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์มีค่าความเป็นพิษสูง เอนไซม์โคลีนเอสเตอเรสจะถูกยับยั้งการทำงานมากขึ้นตาม ทำให้มีอะซิติลโคลีนเหลืออยู่ในปริมาณมากเช่นกัน สีที่ได้จากการทดสอบก็จะเข้มมากตาม จึงนำสารสกัดจากตัวอย่างผักไปวัดความเข้มสีในเทอมของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แล้วไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน (ภาพที่ 9 หน้า 29) เพื่อให้ทราบร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

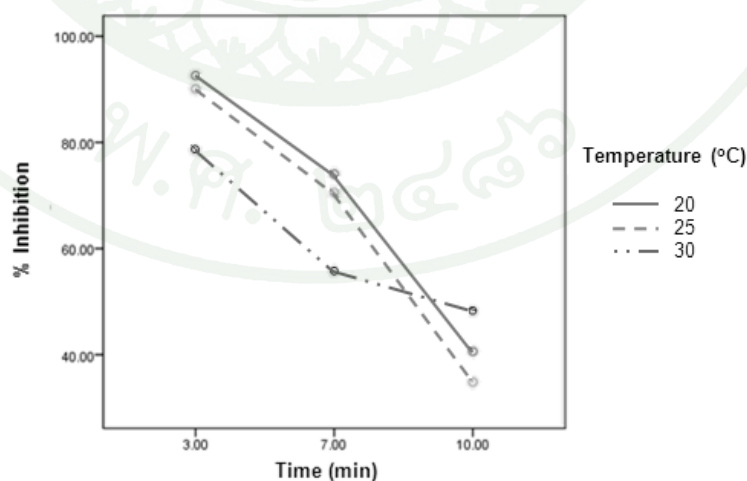
สำหรับผักชีก่อนจุ่มยาฆ่าแมลงพบว่า การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์คือ ร้อยละ 59 ซึ่งถือว่ามีความปลอดภัยสูง เพราะมีสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างปนเปื้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับไม่ได้ และหลังจากจุ่มยาฆ่าแมลงพบว่า การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ร้อยละ 98 เมื่อทำการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เป็นดังภาพที่ 12 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 10 นาที ทำให้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงร้อยละ 64 นอกจากนี้ อุณหภูมิและเวลามีอิทธิพลต่อการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p < 0.05$) ตามภาพที่ 13 ที่แสดงปฏิกิริยสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการล้าง เมื่อเวลาในการล้างเพิ่มมากขึ้นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างยิ่งลดลง



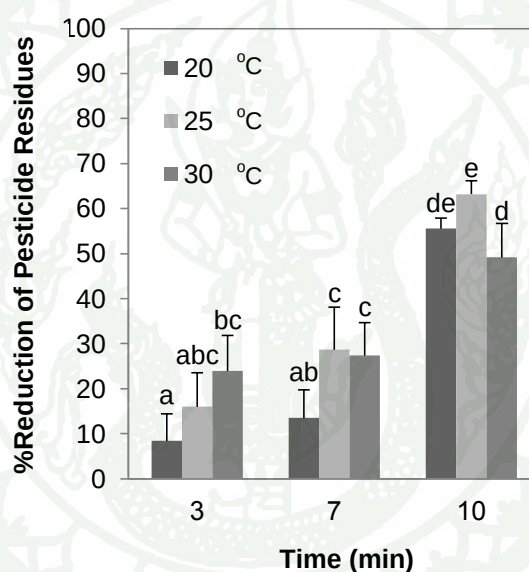
ภาพที่ 12 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

หมายเหตุ a-e คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



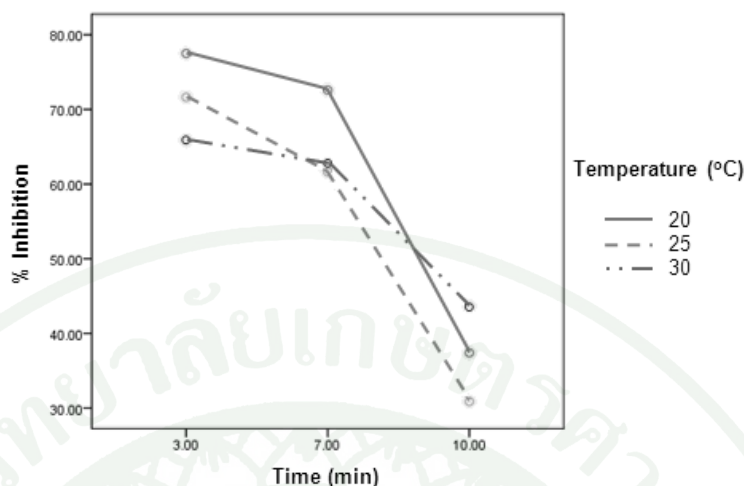
ภาพที่ 13 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

สำหรับผักคะน้าก่อนจุ่มยาฆ่าแมลงพบว่า การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์คือ ร้อยละ 51 ซึ่งถือว่ามีการกำจัดศัตรูพืชตกค้างปนเปื้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับไม่ได้ และหลังจากจุ่มยาฆ่าแมลงพบว่า การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์คือ ร้อยละ 85 เมื่อนำมาล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เป็นดังภาพที่ 14 พบว่า สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงร้อยละ 63 ที่อุณหภูมิ 25 °ซ ระยะเวลา 10 นาที อุณหภูมิและเวลาไม่ส่งผลต่อการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยพบว่า อุณหภูมิมีปฏิกิริยาสัมพันธ์กับเวลาตามภาพที่ 15 คือ ระยะเวลาในการล้างเพิ่มมากขึ้นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างยิ่งลดลง



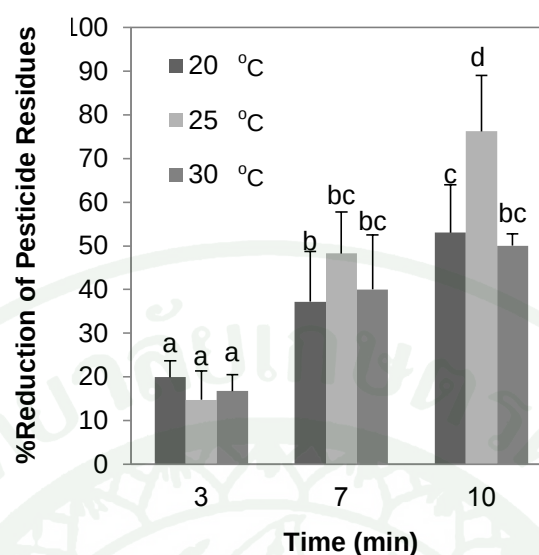
ภาพที่ 14 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

หมายเหตุ a-c คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



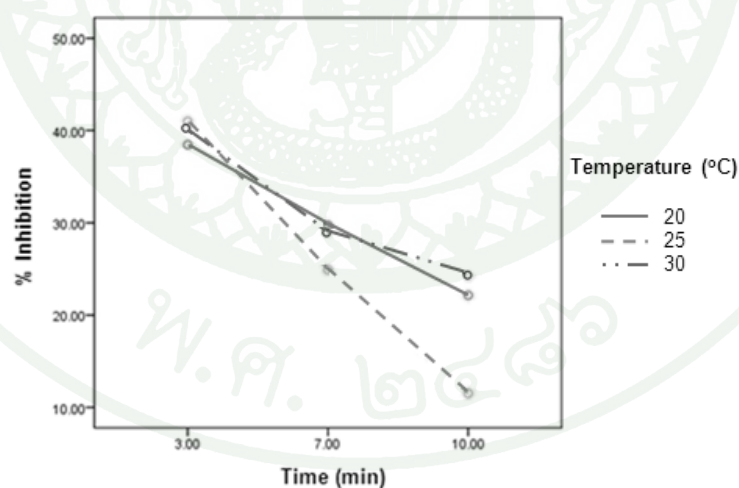
ภาพที่ 15 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

ส่วนตัวผักยาวก่อนจุ่มยาฆ่าแมลงมีการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์คือ ร้อยละ 15 ซึ่งถือว่ามีการกำจัดศัตรูพืชตกค้างปนเปื้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และหลังจากจุ่มยาฆ่าแมลงพบว่า การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์คือ ร้อยละ 48 เมื่อทำการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เป็นดังภาพที่ 16 พบว่า อุณหภูมิ 25 °C ระยะเวลา 10 นาที ทำให้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงร้อยละ 76 อุณหภูมิและเวลามีอิทธิพลต่อการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) พบว่า อุณหภูมิกับเวลามีปฏิกริยาสัมพันธ์ต่อกันตามภาพที่ 17 โดยระยะเวลาในการล้างเพิ่มมากขึ้นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างยิ่งลดลง



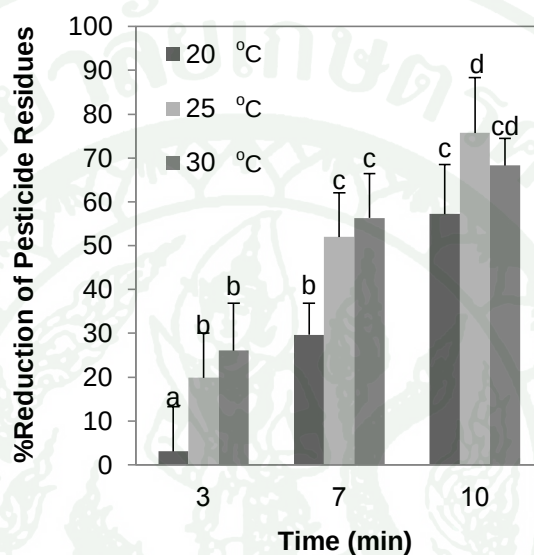
ภาพที่ 16 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

หมายเหตุ a-d คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 17 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

สุดท้ายคือพริกชี้ฟ้าในภาพที่ 18 พบว่า อุณหภูมิและเวลาที่มีอิทธิพลต่อการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ไม่พบปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการล้าง การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างร้อยละ 75 ที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 10 นาที

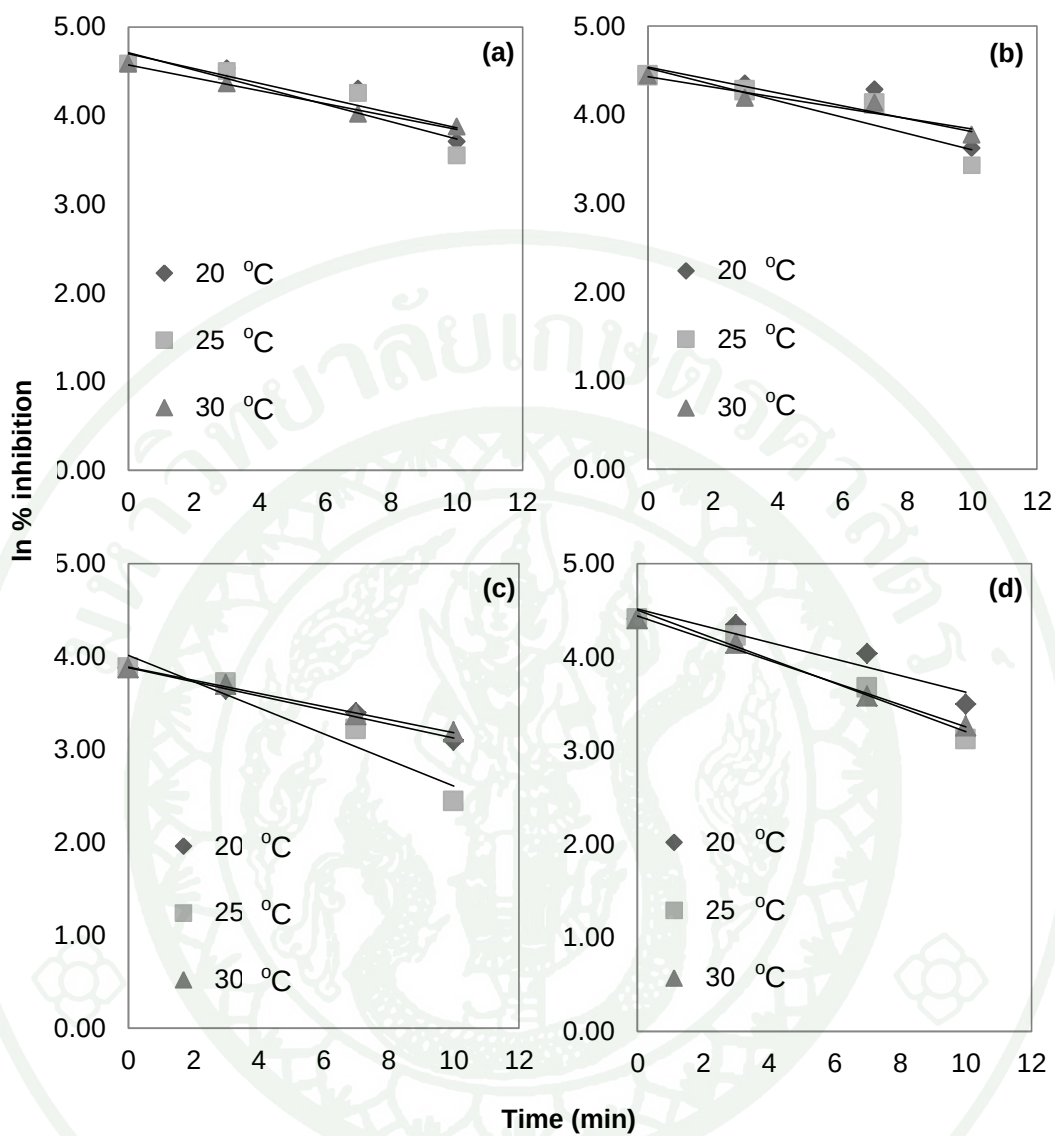


ภาพที่ 18 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

หมายเหตุ a-d คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ 25 °ซ สามารถลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้มากที่สุดในการล้างผักทั้ง 4 ชนิด เนื่องจาก คุณสมบัติต่างๆของน้ำที่มีผลต่อความเข้มของ cavitation ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยพบว่า ความดันไอ แรงตึงผิว และอัตราการกระจายของแก๊สที่ละลายได้ในน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่การละลายของอากาศและแก๊สอื่นในน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นขอบเขตของอุณหภูมิที่เหมาะสมจะมีผลต่อความเข้มของ cavitation (Frederick, 1965; Fuchs, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปัจจัยด้านอุณหภูมิของ Niemczewski (2007) ที่อธิบายว่า เมื่ออุณหภูมิของเหลวเพิ่มสูงขึ้น ฟองอากาศมีจำนวนมากขึ้น ควรทำให้ความเข้มของ cavitation มากขึ้น แต่ในทางกลับกันอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ของเหลวมีความดันไอสูงขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สในฟองอากาศเพิ่มขึ้นและแรงระเบิดในการแตกของฟองอากาศลดลง จากแนวโน้มทั้งสองที่ตรงข้ามกันจึงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมทำให้ความเข้มของ cavitation สูงสุด ดังนั้นแสดงว่า อุณหภูมิ 25 °ซ ในการทดลองนี้เหมาะสมต่อความเข้มของ cavitation สูงสุด

เมื่อนำค่าร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์มาใส่ค่าลอการิทึมธรรมชาติ (ln) และสร้างกราฟ ln % inhibition กับเวลาที่ใช้ในการล้าง (ภาพที่ 19) พบว่า เส้นกราฟเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักทั้ง 4 ชนิดนี้เป็นไปตาม จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (Heldman *et al.*, 2007) ซึ่งการศึกษาจลนพลศาสตร์สามารถบอกได้ว่าการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักรวดเร็วแค่ไหน สามารถบอกอุณหภูมิและเวลาในการล้างที่เหมาะสม นอกจากนี้สามารถอธิบายอัตราการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และทำนายการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาอื่นๆภายใต้สภาวะในการทดลองได้



ภาพที่ 19 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งของการลดลงสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิต่างๆ
ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

หมายเหตุ ค่า R^2 แสดงในภาคผนวก ข

จลนพลศาสตร์การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างสามารถบอกเวลาเป็นนาฬิกาที่สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงไป 1 log หรือร้อยละ 90 จากปริมาณเริ่มต้นด้วยค่า D (Decimal reduction time) โดยค่า D ที่มีค่าน้อยแสดงว่าการล้างมีประสิทธิภาพในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้เร็วกว่าค่า D ที่มีค่ามาก นอกจากนี้ค่า k (reaction rate constant) คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผัก (วินาที⁻¹) โดยค่า k ที่มีค่าสูง แสดงถึงปฏิกิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่มากขึ้น และค่า E_a (activation energy of the reaction) คือ ค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา จากสมการของ Arrhenius (Heldman *et al.*, 2007) ซึ่งค่า E_a มาก นั่นคือค่า $\ln k$ หรือ k จะมีค่ามากด้วย หมายความว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 4 ผลของการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) Decimal reduction time (D) และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a) สำหรับการลดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

Vegetable	D (min)			k x 10 ³ (s ⁻¹)			E_a x 10 ⁻³ (cal/mole)
	20 °C	25 °C	30 °C	20 °C	25 °C	30 °C	
Coriander	26.2	22.3	32.6	1.38	1.62	1.20	2.462
Kale	28.2	22.8	34.6	1.20	1.53	0.98	3.443
Yard long bean	29.6	16.1	33.4	1.27	2.33	1.17	1.322
Red chili	25.2	17.8	20.0	1.48	2.17	1.97	5.021

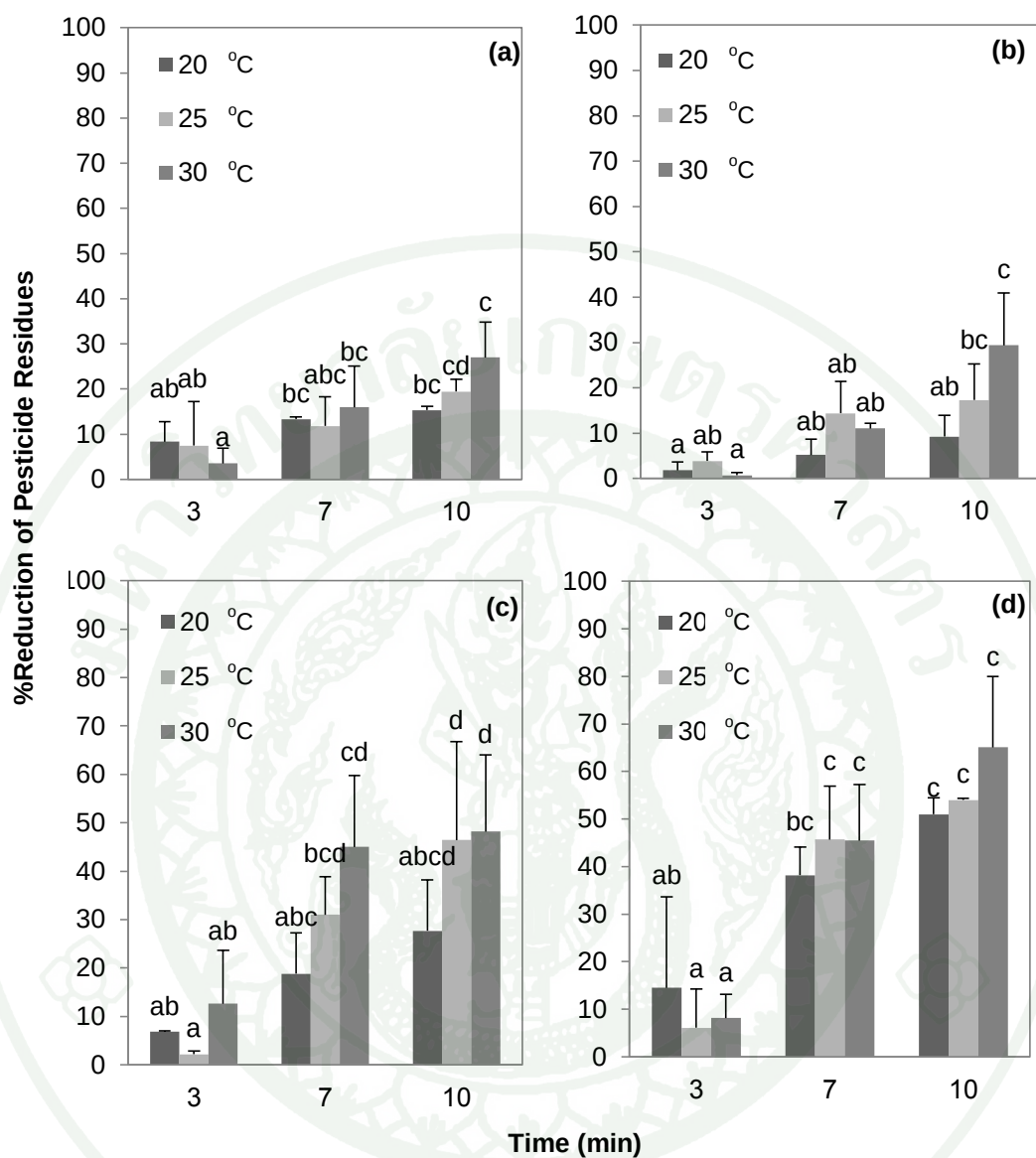
จากตารางที่ 4 แสดงค่า D k และ E_a ของผักทั้ง 4 ชนิด พบว่า อุณหภูมิ 25 °ซ ค่า D มีค่าต่ำที่สุดและสอดคล้องกับค่า k ที่มีค่ามากที่สุดสำหรับทุกผักแสดงว่า อุณหภูมิ 25 °ซ ใช้เวลาน้อยที่สุดในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลงร้อยละ 90 หรือ 1 log cycle จากค่าเริ่มต้น และปฏิกิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างเป็นไปในอัตราเร็วที่สุด ตามลำดับ จากเหตุผลค่า D น้อยและค่า k มากที่อุณหภูมิ 25 °ซ ในผักทั้ง 4 ชนิด จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมินี้เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง และเมื่อเปรียบเทียบผักชนิดต่างๆด้วยค่า D ที่อุณหภูมิ 25 °ซ พบว่า ประสิทธิภาพในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในถั่วฝักยาวเร็วกว่าในพริกชี้ฟ้า ผักชี และผักคะน้า ตามลำดับ เนื่องจากถั่วฝักยาวมีลักษณะแท่งตรง พื้นผิวเรียบ จึงง่ายต่อการทำความสะอาดมากกว่าพริกชี้ฟ้า ผักชีและผักคะน้า ที่มีลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อน และพื้นที่

ผิวในการทำความสะดวกที่มากกว่า อีกทั้งผักชีและผักคะน้ามีทั้งชอกก้าน ชอกใบ จึงทำให้ยากต่อการทำความสะอาดนั่นเอง

เมื่อศึกษาค่า E_a ของการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงพบว่า เส้นตรงที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ (K) มีค่า R^2 ในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า คือ 0.2193 0.1925 0.0098 และ 0.5229 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ นั้นเป็นเพราะการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิ 20 25 และ 30 °ซ มีแนวโน้มไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากที่อุณหภูมิ 25 °ซ ทำให้ค่า $\ln k$ หรือ k มีค่ามากที่สุด ดังนั้น ค่า E_a อาจใช้ทำนายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาอื่นๆ ไม่แม่นยำมากนัก หรืออาจใช้สมการของ Arrhenius อธิบายไม่ได้สำหรับการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงนี้

1.2. การล้างด้วยการแช่น้ำ

สำหรับวิธีการล้างด้วยการแช่น้ำนี้ สิ่งปนเปื้อนจะถูกขจัดออกไปโดยการชะล้างของน้ำตัวกลางเพียงอย่างเดียวแต่ไม่เกิดปรากฏการณ์ Cavitation ขึ้นเหมือนกับการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง สำหรับผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า พบว่า เวลาในการล้างผักมีผลต่อการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงมากขึ้นด้วย สำหรับอุณหภูมิไม่มีผลต่อการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และพบว่า อุณหภูมิ 30 °ซ เวลา 10 นาที สามารถลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า คือ ร้อยละ 27 29 48 และ 65 ตามลำดับ ดังภาพที่ 20

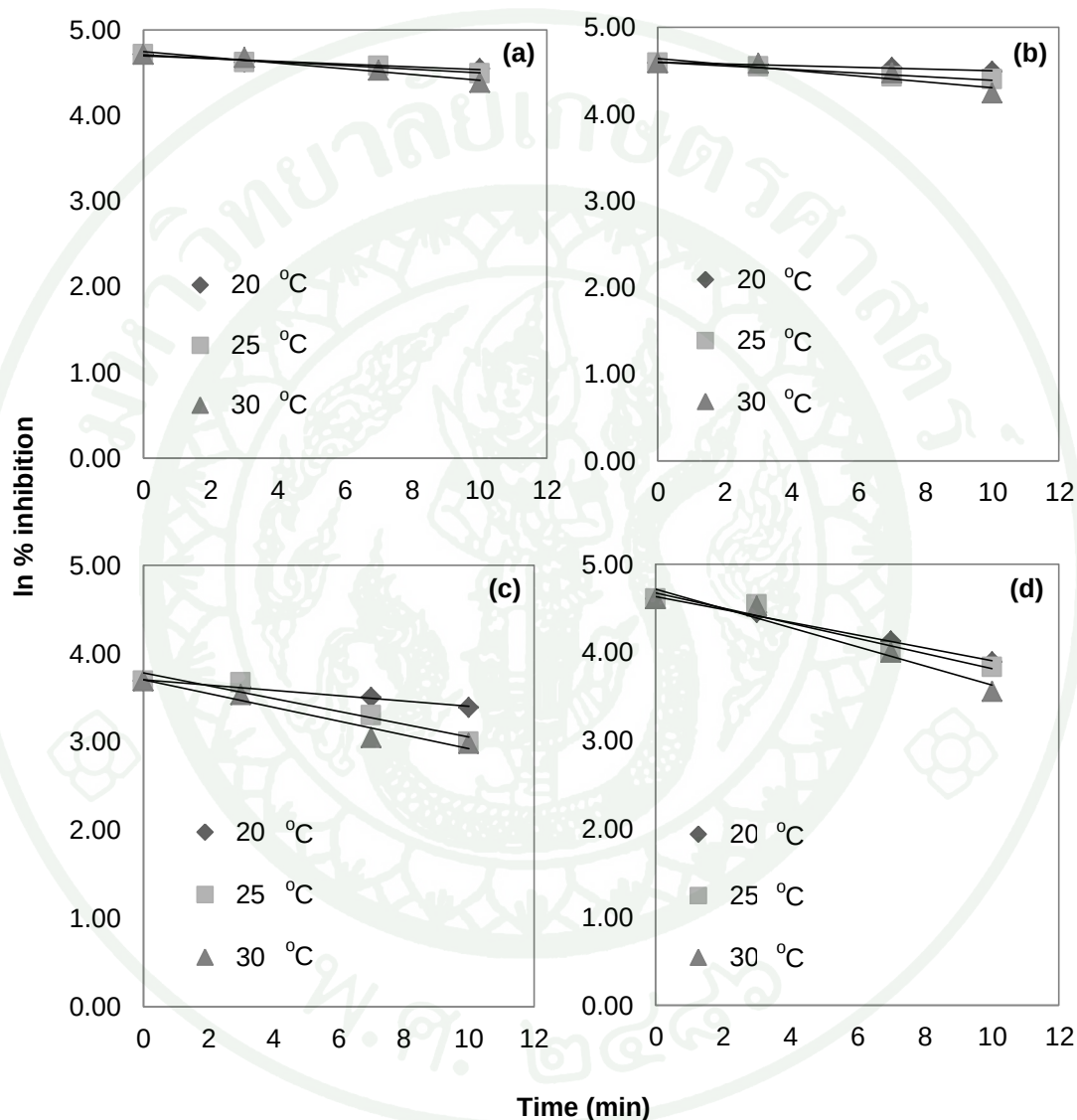


ภาพที่ 20 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ

หมายเหตุ a-d คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

สร้างกราฟระหว่างร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในรูปค่าลอการิทึมธรรมชาติ (ln) กับเวลาที่ใช้ในการล้างดังภาพที่ 21 พบว่า เส้นกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงแสดงว่า การลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างด้วยการแช่น้ำในผักทั้ง 4 ชนิดนี้เป็นไปตาม

จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (Heldman *et al.*, 2007) เช่นเดียวกับการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง แต่ความชันหรือค่า k ของภาพที่ 21 น้อยกว่าภาพที่ 19 แสดงว่า ปฏิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักที่ล้างด้วยการแช่น้ำน้อยกว่าการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง



ภาพที่ 21 จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งของการลดลงสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ

หมายเหตุ ค่า R^2 แสดงในภาคผนวก ข

ตารางที่ 5 ผลของการล้างผักด้วยการแช่น้ำต่อค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k) Decimal reduction time (D) และพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a) สำหรับการลดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

Vegetable	D (min)			k x 10 ³ (s ⁻¹)			E_a x 10 ⁻³ (cal/mole)
	20 °C	25 °C	30 °C	20 °C	25 °C	30 °C	
Coriander	139.3	104.6	70.2	0.27	0.33	0.48	10.473
Kale	237.3	121.2	66.2	0.15	0.33	0.55	22.948
Yard long bean	76.9	33.3	32.4	0.50	1.20	1.30	16.931
Red chili	32.3	29.7	21.9	1.20	1.42	1.80	7.143

ตารางที่ 5 แสดงค่า D k และ E_a ของผักทั้ง 4 ชนิดที่ล้างด้วยการแช่น้ำพบว่า อุณหภูมิ 30 °ซ มีค่า D ต่ำที่สุดและค่า k มากที่สุด แสดงว่า อุณหภูมิ 30 °ซ สารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างลดลงไปร้อยละ 90 หรือ 1 log cycle จากค่าเริ่มต้นใช้เวลาน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆ และปฏิกิริยาการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างเป็นไปในอัตราเร็วที่สุด ตามลำดับ จากค่า D และ k ที่อุณหภูมิ 30 °ซ จึงถือว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการล้างผักด้วยการแช่น้ำ และเมื่อเปรียบเทียบผักชนิดต่างๆด้วยค่า D ของอุณหภูมิ 30 °ซ พบว่า การลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างของพริกชี้ฟ้าเร็วกว่าถั่วฝักยาว ผักคะน้า และผักชี ตามลำดับ เนื่องจากวิธีการล้างด้วยการแช่น้ำ การขจัดสิ่งปนเปื้อนเกิดจากการชะล้างบริเวณพื้นผิวโดยไม่มีผลทางกลของปรากฏการณ์ Cavitation เข้ามาช่วยในการทำความสะดวก พริกชี้ฟ้าที่มีพื้นผิวเรียบจึงสามารถทำความสะอาดได้ง่ายกว่า ถั่วฝักยาว ผักคะน้า และผักชีที่มีลักษณะโครงสร้างสร้างที่ซับซ้อนมากกว่า อีกทั้งยังมีใบและก้านใบ มีซอกมุมที่ยากต่อการชะล้าง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างน้อยกว่าพริกชี้ฟ้า

เมื่อพิจารณาค่า E_a ของการล้างด้วยการแช่น้ำพบว่า เส้นตรงที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ (K) มีค่า R^2 ในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า คือ 0.9768 0.9892 0.8199 และ 0.9871 ตามลำดับ แสดงว่า เส้นกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังนั้น การล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยการแช่น้ำสามารถอธิบายได้ดีตามสมการของ Arrhenius โดยพบว่า ค่า E_a ของผักคะน้ามีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ถั่วฝักยาว ผักชี และพริกชี้ฟ้า ตามลำดับ นั่นคือค่า $\ln k$ หรือ k มีค่ามากด้วย ซึ่งหมายความว่าปฏิกิริยาใดๆที่มีค่าพลังงานกระตุ้น E_a มาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาการ

ลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างนั้นขึ้นกับอุณหภูมิเป็นอย่างมาก นอกจากนี้สามารถนำค่า E_a ทำนายสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่อุณหภูมิและเวลาอื่นๆได้

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า จากการศึกษาการล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยวิธีการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ พบว่า

- การล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้มากกว่าการล้างผักด้วยการแช่น้ำ
- เวลาในการล้างเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการล้างเพิ่มมากขึ้น
- สำหรับการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง อุณหภูมิในการล้าง 25°C เหมาะสมที่สุดในการลดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง
- สำหรับการล้างด้วยการแช่น้ำ อุณหภูมิในการล้าง 30°C เหมาะสมที่สุดในการลดของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง
- ลักษณะทางกายภาพของผักเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง โดยผักที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีก้าน ใบ และพื้นที่ผิวในการทำมาสะอาดมากอย่างผักชีและผักคะน้า จะทำความสะอาดยากกว่าผักที่มีแท่งตรง พื้นที่ผิวน้อยอย่างถั่วฝักยาวและพริกชี้ฟ้า

1.3. การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) กระทรวงสาธารณสุข ได้แนะนำกระบวนการล้างผักก่อนรับประทานอยู่หลากหลายวิธี เพื่อให้ผู้บริโภคปลอดภัยจากสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า วิธีการล้างส่วนใหญ่ที่แนะนำจะใช้สารช่วยลดแรงตึงผิวร่วมกับน้ำสะอาดปริมาณ 20 ลิตรหรือใช้วิธีการเปิดน้ำไหลผ่านตลอด ส่วนผลการทดลองจากการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่า สามารถลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักทั้ง 4 ชนิดได้ร้อยละ 63-76 ในเวลา 10 นาที ต่อการล้างด้วยน้ำ 2 ลิตร ซึ่งเมื่อเทียบกับวิธีการล้างต่างๆในตารางที่ 1 แล้วจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากพอกับการใช้น้ำส้มสายชูที่เป็นสารช่วยล้าง ขณะที่การล้างด้วยวิธีนี้ไม่ได้ใช้สารช่วยล้างใดๆอีกทั้งยังใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่าประมาณ 10 เท่า ทำให้การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงช่วยประหยัดน้ำที่ใช้ในการทำมาสะอาดได้เป็นอย่างมากและยังช่วยลดปริมาณน้ำเสียได้อีกด้วย

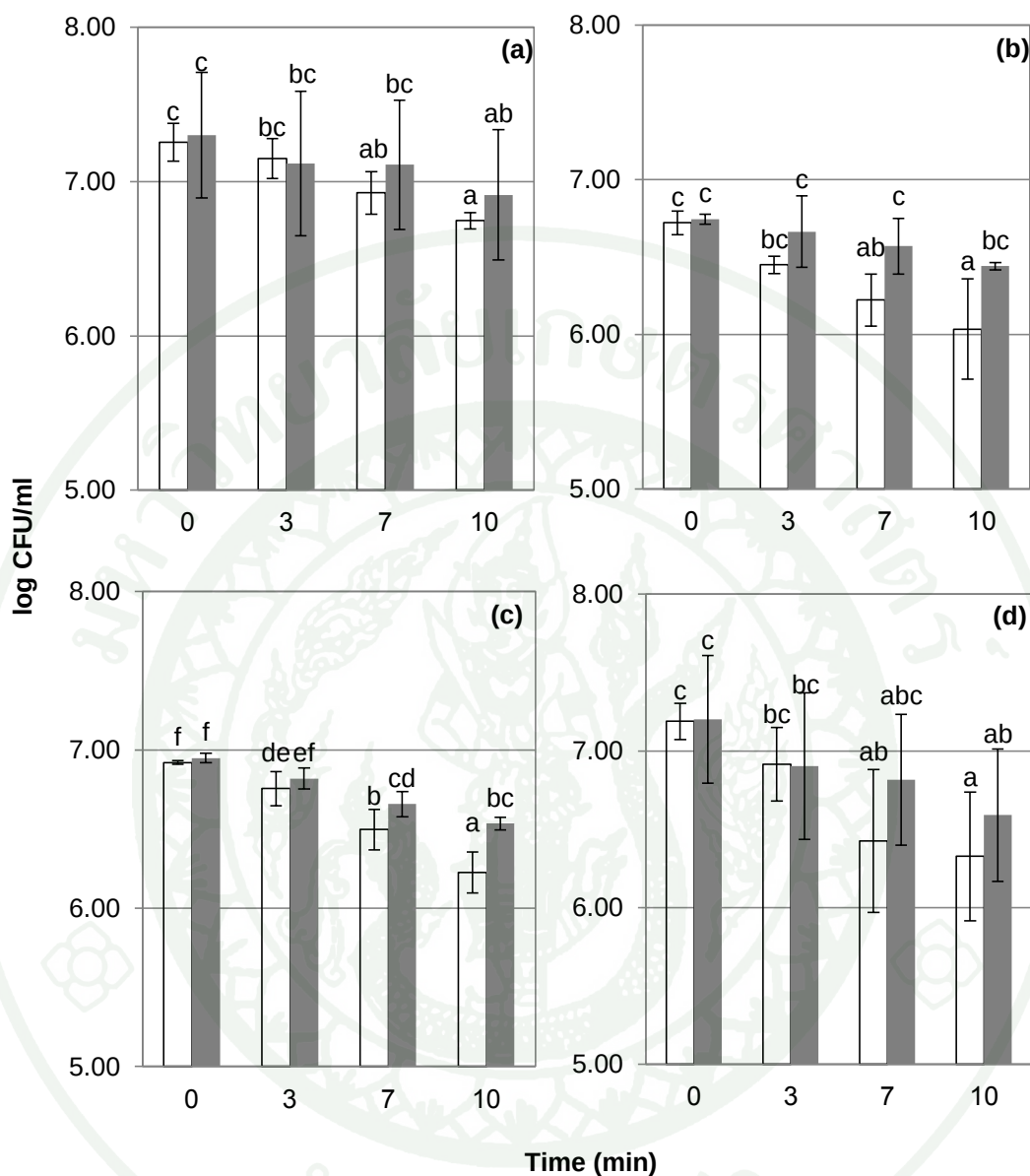
นอกเหนือจากการล้างที่ช่วยลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างที่แนะนำโดยกระทรวงสาธารณสุขแล้ว พบรายงานการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อลดปริมาณดินในเห็ดชนิดหนึ่งของ Zhao *et al.* (2009) ซึ่งใช้เครื่องล้างอัลตราโซนิคส์ที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 180 วัตต์ ล้างสิ่งสกปรกและดินที่ฝังแน่นในเห็ด *Thelephora ganbajun* โดยใช้สภาวะการล้างที่เหมาะสมคือ เวลาในการล้าง 20 นาที ปริมาณสารชำระล้างร้อยละ 0.67 อัตราส่วนตัวอย่างต่อน้ำ 1:100 และอุณหภูมิ 21.5-25.0 °C ทำให้การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 55.5 จากการล้างที่ไม่ใช้เครื่องคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่า ประสิทธิภาพในการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงที่สภาวะที่เหมาะสม สามารถลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการล้างที่ไม่ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Cao *et al.* (2010) ที่รายงานว่า การล้างสตรอเบอรี่ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ กำลังไฟฟ้า 350 วัตต์ สามารถลดการเสื่อมทางกายภาพและเชื้อจุลินทรีย์ลงได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

2. จลนพลศาสตร์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในผัก

สำหรับการทดสอบเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดจากการล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ จึงได้เลือกศึกษาสภาวะในการล้างที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่แล้วคือ อุณหภูมิในการล้าง 25 °C เป็นเวลา 0 3 7 และ 10 นาที ใช้ในการทดลองนี้และพบว่า การล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ดีกว่าการแช่น้ำ (ภาพที่ 22) เนื่องจากคลื่นเสียงความถี่สูงที่ส่งผ่านเข้าไปในน้ำ มีทั้งช่วงอัดและช่วงขยายของคลื่นเสียง ในช่วงขยายของคลื่นที่มีความดันต่ำทำให้อากาศที่มีอยู่แล้วในน้ำก่อตัวเป็นฟองอากาศขึ้น ส่วนช่วงอัดของคลื่นที่มีความดันสูง จะบีบอัดฟองอากาศที่ไม่เสถียรเหล่านั้นให้แตกออกเป็นฟองอากาศเล็กๆอีกครั้ง วนเป็นวัฏจักร การแตกออกของฟองอากาศบริเวณพื้นผิวของผักทำให้มีแรงเฉือน (Zhou *et al.*, 2009) การที่ฟองอากาศเข้าไปแทนที่เซลล์ ทำให้เซลล์คลายตัวจากการเกาะบนพื้นผิวหรือถูกขับด้วยแรงเฉือนจากการจัดของฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากทำให้เชื้อจุลินทรีย์ถูกขจัดออกจากพื้นผิวของผัก (Seymore *et al.*, 2002) นอกจากนี้ Huang *et al.* (2006) กล่าวว่า คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลฆ่าเชื้อจุลินทรีย์โดยทำให้เกิด cavitation ภายในเซลล์ (micromechanical shock) ทำให้โครงสร้างและการทำงานเกี่ยวกับเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์แตกออก ส่วน Cao *et al.* (2010) และ Scherba *et al.* (1991) กล่าวว่า คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลต่อการสลายตัวหรือแตกตัวของเซลล์และมีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ แต่อัตราการทำลายเซลล์นั้นขึ้นอยู่กับสภาวะในการทดลองและชนิดของ

เชื้อจุลินทรีย์ด้วย ดังเช่นการศึกษาของ Zhou *et al.* (2009) พบว่า การทดลองเฉพาะในสภาวะที่มี acoustic energy density 200 วัตต์/ลิตร เป็นเวลา 2 นาที ช่วยขจัดเซลล์ *E.coli* O157:H7 แต่ไม่ได้ฆ่าเซลล์นั้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Scherba *et al.* (1991) ที่ระดับความเข้มของคลื่นเสียงมีผลต่อแบคทีเรียทั้งหมด ยกเว้น *E. coli* จากผลกระทบต่อเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวจึงเป็นผลทำให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลงดังภาพที่ 22





ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆ ในการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้า ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (□) และการแช่น้ำ (■)

หมายเหตุ a-f คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากภาพที่ 22 สำหรับผักชีมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้น 2.16×10^7 CFU/ml เมื่อทำการล้างพบว่า วิธีการที่ใช้ล้างผักไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) คือ การล้าง

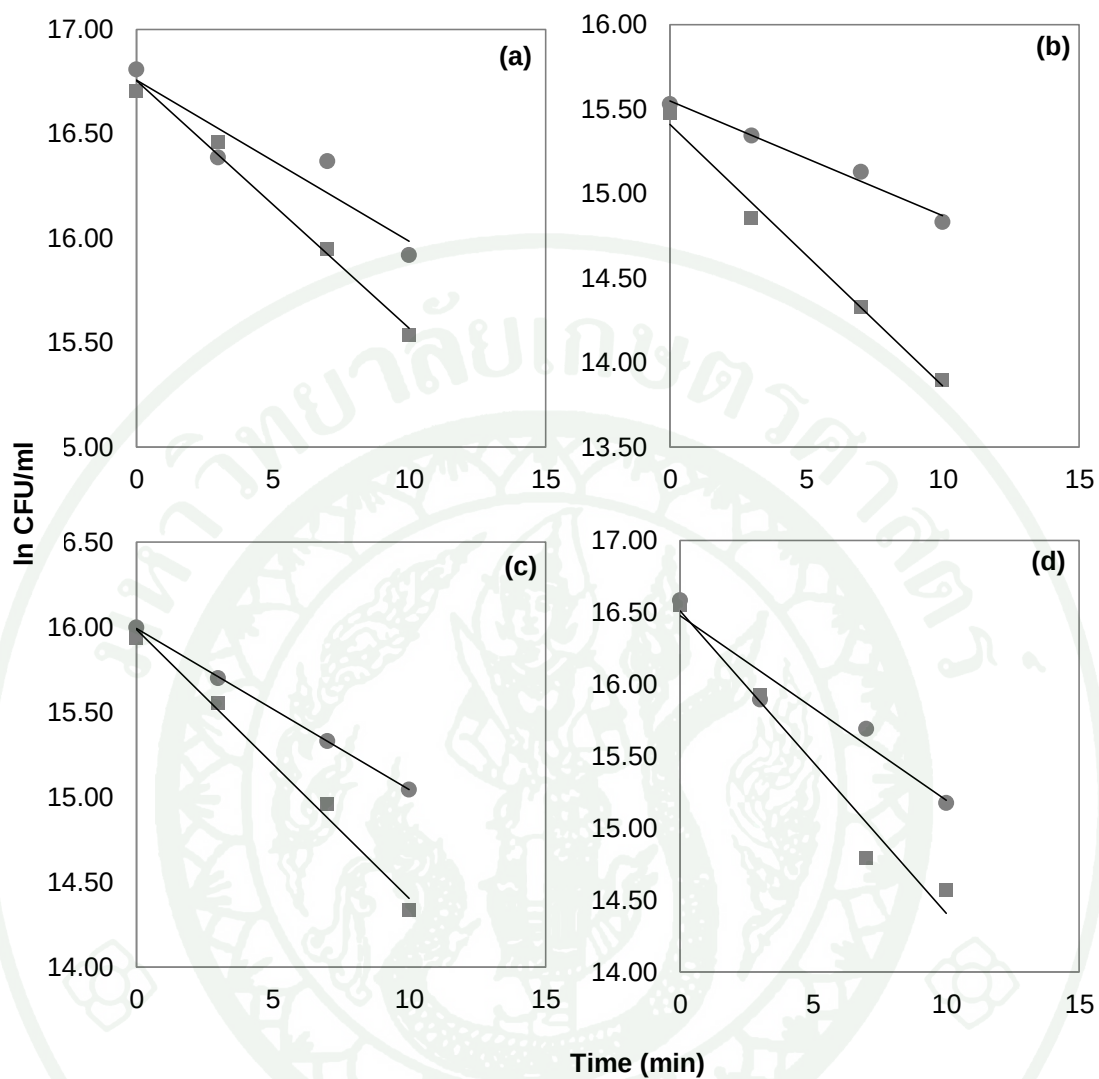
ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำทำให้ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลดลงไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p>0.05$) โดยเมื่อผ่านไป 10 นาที การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด $0.58 \log$ ขณะที่การแช่น้ำลดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด $0.41 \log$ เทียบกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น ส่วนเวลาที่ใช้ล้างมีผลต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อเวลาในการล้างนานขึ้นปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดก็ลดลงมากขึ้น

สำหรับผักคะน้ามีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้น 7.77×10^6 CFU/ml พบว่า การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้มากกว่าการแช่น้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยระยะเวลา 10 นาที การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง $0.85 \log$ ขณะที่การแช่น้ำลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง $0.44 \log$ เทียบกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น ส่วนเวลาในการล้างมีผลต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เช่นกัน คือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมากขึ้น

ถั่วงอกมีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้น 2.90×10^7 CFU/ml การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้มากกว่าการแช่น้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เช่นเดียวกับผักคะน้า เมื่อผ่านไป 10 นาที การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง $1.18 \log$ ขณะที่การแช่น้ำลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง $0.87 \log$ เทียบกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น ส่วนเวลาในการล้างมีอิทธิพลต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลดลงมากด้วย

สุดท้ายคือ พริกชี้ฟ้ามีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเริ่มต้น 3.79×10^7 CFU/ml พบว่า วิธีการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด โดยการล้างพริกชี้ฟ้าภายในเวลา 10 นาที การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง $1.00 \log$ ขณะที่การแช่น้ำลดลง $0.74 \log$ เทียบกับปริมาณเชื้อเริ่มต้น ส่วนเวลาในการล้างมีอิทธิพลต่อการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อเวลาในการล้างเพิ่มขึ้นปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดก็ลดลงมากขึ้น

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln$ CFU/ml กับเวลา ดังภาพที่ 23 ได้กราฟเป็นเส้นตรง สามารถยืนยันได้ว่าการล้างผักเพื่อลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของจลนพลศาสตร์



ภาพที่ 23 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งของจลนพลศาสตร์ของการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดโดยการล้าง (a) ผักชี (b) ผักคะน้า (c) ถั่วฝักยาว และ (d) พริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (■) และการแช่น้ำ (●)

หมายเหตุ ค่า R^2 แสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 6 ค่า D (Decimal reduction time) และ k (Reaction rate constant) จากการลดปริมาณ เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียง ความถี่สูง

Vegetable	D (min)	$k \times 10^3 (s^{-1})$
Coriander	17.30	1.98
Kale	11.79	2.03
Yard long bean	8.48	2.23
Red chili	9.93	3.51

ตารางที่ 7 ค่า D (Decimal reduction time) และ k (Reaction rate constant) จากการลดปริมาณ เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ

Vegetable	D (min)	$k \times 10^3 (s^{-1})$
Coriander	24.39	1.29
Kale	22.71	1.72
Yard long bean	11.48	1.76
Red chili	13.47	2.14

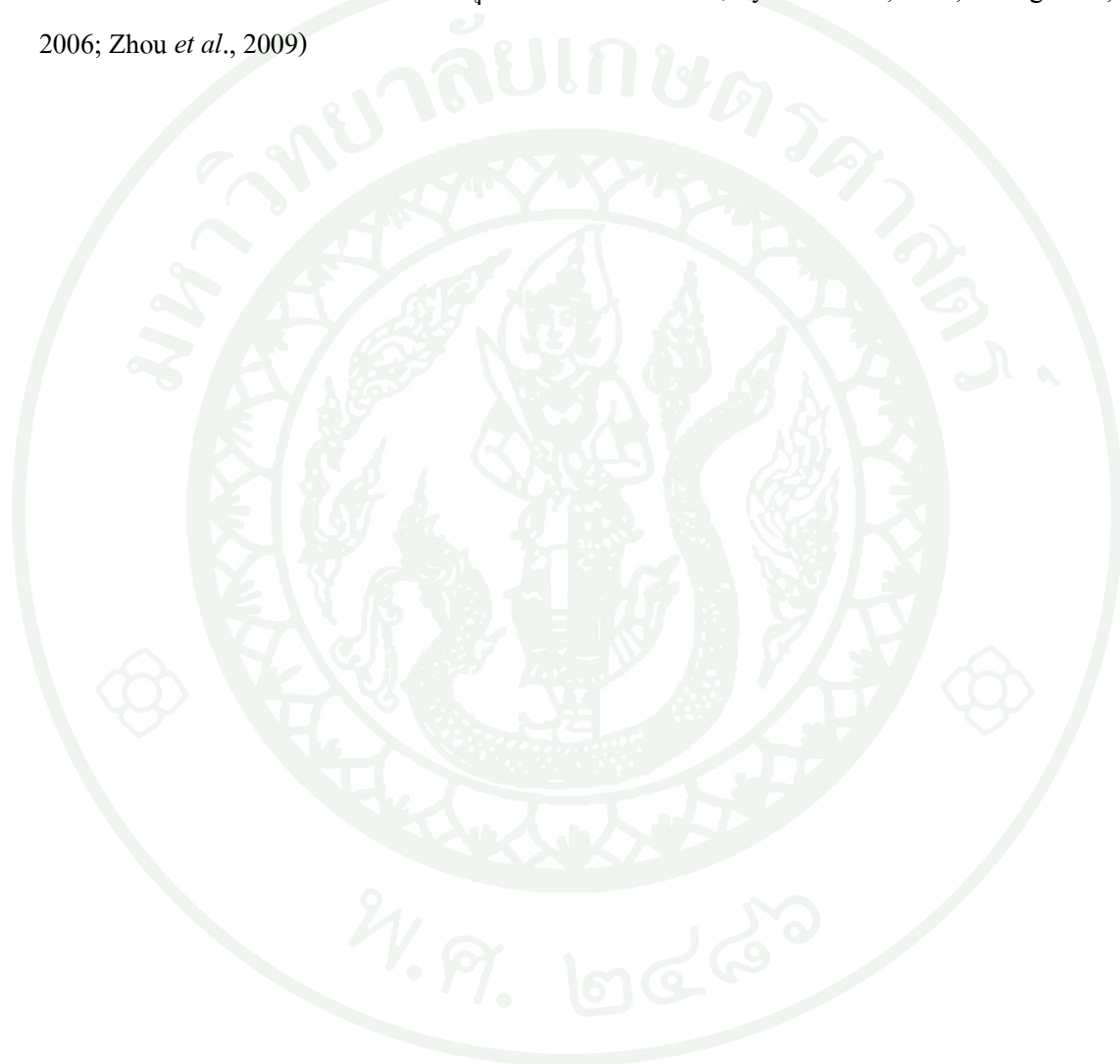
จากตารางที่ 6 และ 7 แสดงค่า D และ k ของผักทั้ง 4 ชนิด โดยค่า D คือ เวลาเป็นนาทีที่สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลงได้ร้อยละ 90 หรือ 1 log cycle จากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น ค่า D ที่มีค่าน้อยแสดงว่า ในการล้างผักชนิดนั้นๆ ใช้เวลาน้อยก็สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ได้ร้อยละ 90 ส่วนค่า k คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผัก (วินาที⁻¹) ค่า k ที่มีค่าสูงบ่งบอกว่าอัตราในการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดนั้นเกิดขึ้นได้รวดเร็ว เช่น การล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่สภาวะนี้สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง 1 log ใช้เวลา 11.79 นาที (ตารางที่ 6) ขณะที่การแช่น้ำใช้เวลา 22.71 นาที (ตารางที่ 7) แสดงว่า การล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงใช้เวลาน้อยกว่าการแช่น้ำประมาณ 2 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับค่า k ของการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีอัตราการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดสูงกว่าการแช่น้ำ

เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง 1 log ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำจากค่า D (ตารางที่ 6 และ 7) พบว่า ถั่วฝักยาวสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้เร็วที่สุด รองลงมาคือ พริกชี้ฟ้า ผักคะน้า และผักชี ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายกับผลการทดลองในการลดปริมาณสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง เป็นผลจากปัจจัยทางกายภาพของผักแต่ละชนิด เนื่องจากถั่วฝักยาวมีลักษณะเป็นฝักตรงยาว ไม่มีชอกหรือมุมที่ซับซ้อนจึงง่ายต่อการทำความสะอาดมากกว่าพริกชี้ฟ้าที่มีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดปนเปื้อนสูงกว่าถั่วฝักยาว ส่วนผักคะน้า และผักชีมีลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อน มีใบ กิ่งก้าน และพื้นที่ผิวในการทำความสะอาดมากกว่าจึงยากต่อการทำความสะอาด นอกจากนี้ประสิทธิภาพการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเกิดขึ้นเร็วกว่าวิธีการแช่น้ำ เมื่อดูจากค่า k ของการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีค่าสูงกว่าค่า k ของการแช่น้ำ เมื่อเทียบกับผักชนิดเดียวกัน

ดังนั้นสรุปได้ว่า การล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดสูงกว่าการแช่น้ำเช่นเดียวกับการศึกษาของ Seymour *et al.* (2002), Huang *et al.* (2006), Zhou *et al.* (2009) และ Scherba *et al.* (1991) และระยะเวลาในการล้างเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ยิ่งใช้เวลานานการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก็ยิ่งเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Scherba *et al.* (1991), Huang *et al.* (2006) และ Zhou *et al.* (2009) นอกจากนี้ ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของผักมีผลต่อการลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เช่นกัน คล้ายกับการศึกษาของ Zhou *et al.* (2009) รายงานว่าลักษณะทางกายภาพของผักขมที่มีความแตกต่างกันบริเวณบนผิวใบและใต้ผิวใบทำให้การลดลงของเชื้อ *E. coli* O157:H7 มีความแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการล้างอื่นของรังสิณี (2549) พบว่า การล้างใบกระเพราตัดแต่งด้วยสารละลายโอโซนและคลอรีน 0.33-0.35 ppm เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้น้อยกว่าการล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ส่วนดอกกะหล่ำตัดแต่งที่ล้างด้วยคลอรีน 0.31-0.33 ppm เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้น้อยกว่าการล้างผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง แต่ดอกกะหล่ำตัดแต่งที่ล้างด้วยสารละลายโอโซนที่สภาวะเดียวกัน ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ดีกว่าการล้างผักทั้ง 4 ชนิดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

นอกจากนี้การล้างผักด้วยสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (วราภา และคณะ, 2544; พรณี และคณะ, 2545) จากสภาวะที่ผู้ทดลองได้ใช้สารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ความเข้มข้นสูงและระยะเวลาในการล้างผักนานนี้เองจึงทำให้มีแนวโน้มในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงจากการทดลองนี้ ดังนั้นจึงแนะนำการใช้สารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ร่วมกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ให้มากยิ่งขึ้น (Seymour *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2009)



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงมีประสิทธิภาพในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างและเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดได้ดีกว่าการแช่น้ำเปล่า
2. การล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 10 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าลงร้อยละ 64 63 76 และ 75 ตามลำดับ
3. การล้างผักด้วยการแช่น้ำอุณหภูมิ 30 °ซ เป็นเวลา 10 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าลงร้อยละ 27 29 48 และ 65 ตามลำดับ
4. การล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 10 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้าลง 0.58 0.85 1.18 และ 1.00 log CFU/ml ตามลำดับ ขณะที่การแช่น้ำที่สภาวะเดียวกันลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดลง 0.41 0.44 0.87 และ 0.74 log CFU/ml ตามลำดับ
5. การลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิ 25 °ซ ในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้ามีค่า D คือ 22.32 22.80 16.07 และ 17.84 นาที ตามลำดับ มีค่า k คือ 1.53×10^{-3} 2.33×10^{-3} 1.62×10^{-3} และ 2.17×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ และมีค่า E_a คือ 2.46×10^3 3.44×10^3 1.32×10^3 และ 5.02×10^3 cal/mole ตามลำดับ
6. การลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างด้วยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 °ซ ในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้ามีค่า D คือ 70.20 66.17 32.37 และ 21.91 นาที ตามลำดับ มีค่า k คือ 4.83×10^{-4} 5.50×10^{-4} 1.30×10^{-3} และ 1.80×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ และมีค่า E_a คือ 1.05×10^4 2.29×10^4 1.69×10^4 และ 0.71×10^4 cal/mole ตามลำดับ

7. การลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้ามีค่า D คือ 17.30 11.79 8.48 และ 9.93 นาที ตามลำดับ และมีค่า k คือ 1.98×10^{-3} 2.03×10^{-3} 2.23×10^{-3} และ 3.51×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ

8. การลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดด้วยการแช่น้ำในผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้ามีค่า D คือ 24.39 22.71 11.48 และ 13.47 นาที ตามลำดับ และมีค่า k คือ และ 1.29×10^{-3} 1.72×10^{-3} 1.76×10^{-3} และ 2.14×10^{-3} วินาที⁻¹ ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. ผักใบที่ซั่วง่ายอย่างผักชี และผักคะน้า แนะนำให้ล้างด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์เพียง 3 นาที และ 7 นาที ตามลำดับ เพื่อให้บริเวณขอบใบของผักไม่เกิดการชำรุดเนื่องจากผลกระทบทางกลของคลื่นเสียง
2. การศึกษาการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ เป็นงานวิจัยที่น่าสนใจสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาเพิ่มเติม
3. การล้างผักด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคส์รุ่นอื่นๆ อาจมีสถานะที่เหมาะสมแตกต่างจากการทดลองนี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียง กำลังไฟฟ้า อัตราส่วนผักกับน้ำ เป็นต้น ดังนั้นแนะนำให้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมก่อน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2548. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ *Escherichia coli* (E.coli) และ *Salmonella* ในผักสด ก่อนการส่งออกไปนอกราชอาณาจักร. 18 สิงหาคม 2548.

_____. 2552. สรุปรายงานปัญหาการนำเข้า/ส่งออกสินค้าเกษตรของไทย. 59 หน้า

กระทรวงสาธารณสุข. 2548. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 288) พ.ศ. 2548 เรื่อง อาหารที่มีสารพิษตกค้าง. 17 มกราคม 2548.

กองนโยบายมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหาร สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2548. ค่า MRLs สินค้าเกษตรและอาหารของสาธารณรัฐเกาหลี (ผลิตภัณฑ์จากพืชและปศุสัตว์). พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

กองบรรณาธิการ นิตยสารชีวจิต. 2553. Hot Issue 10 อันดับผักปนเปื้อนสารเคมี. ชีวจิต ปีที่ 12 (279): 10.

กองพัฒนาศักยภาพผู้บริโภค. 2544. การจัดสารพิษในผักผลไม้. (เอกสารเผยแพร่). สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, นนทบุรี.

กอบทอง ฐปโหม. 2550. Handbook GT-Pesticide test kit Organophosphorous/Carbamate/Cholinesterase inhibitors. พิมพ์ครั้งที่ 5. ม.ป.ท.

ธนฉัตร คัญเต็มวงศ์, ประเวศ คัญเต็มวงศ์, กฤติยา เลี้ยวขวลิต และเสริมสิริ วิจัยวรกิจ. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการล้างผักด้วยสารไตรโซเดียมฟอสเฟต คลอรีนและการใช้โอโซน. ว. วิทย. กษ. 33 (6) (พิเศษ): 225-228.

ชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต. 2547. **คู่มือการใช้งานเครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิคส์ รุ่น UC4410/UC4603**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, ปทุมธานี.

บ้านเมือง. 2553. กรุงเทพฯ: 27 มกราคม 2553. หน้า 9.

ฝ่ายสารวัตรเกษตร กองควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร กรมวิชาการเกษตร. ม.ป.ป. **คู่มือผู้ควบคุมการขายวัตถุดิบทรายทางการเกษตร**. ฝ่ายสารวัตรเกษตร, กรุงเทพฯ.

ยศพนธ์ นัตถจรรัสแสง, ชุมนัตถ์ ปั่นแก้ว, วรรณภา พจนทวิลาส, อรรณพ สุทธิแก้ว, ทรัพย์สิน ทองนพคุณ และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. 2552. การสกัดสารสำคัญจากผลส้มแขกด้วยอัลตราโซนิค, น. 275. ใน นิทรรศการงานแสดงผลงานพัฒนาเทคโนโลยีทุนปริญญาตรี สกว. ครั้งที่ 7 IRPUS 52 "งานวิจัย สร้างปัญญา พัฒนาประเทศ". สำนักงานโครงการ IRPUS, กรุงเทพฯ.

รังสิณี โสธรวิทย์. 2549. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนอุดหนุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน รหัสโครงการ วศ กพส 6/2549 กระบวนการล้างผักเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

วราภา มหากาญจนกุล, ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์ และวชิราภรณ์ เทียมพันธ์. 2544. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในการลดปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและ *Escherichia coli* ในผักใบ, น. 410-416. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์. 2553. **ตัวเลขการส่งออก นำเข้าและดุลการค้าของไทย ในระยะ 8 เดือนแรกของปี 2553**. (Microsoft excel). กรมส่งเสริมการค้าส่งออก.

ศิริชัย ส่งเสริมพงษ์. 2551. การล้างผักและผลไม้ด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง, น. 13-17. ใน การประชุม
วิชาการ ปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีสะอาด ประจำปี 2551
ครั้งที่ 2. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

_____. 2553. การล้างผักตระกูลกะหล่ำ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกส์, น. 18-21. ใน การประชุม
วิชาการ ปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและสิ่งแวดล้อมใน
อุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีสะอาด ประจำปี 2553. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2551. สารพิษตกค้าง: ปริมาณสารพิษตกค้าง
สูงสุด. มกอช. 9002-2551.

สำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงลอนดอน. 2552. ตลาดสินค้าอาหาร ผักและผลไม้
สด ในสหภาพยุโรป และกรณีศึกษาในสหราชอาณาจักร. แหล่งที่มา:
<http://www.depthai.go.th/DEP/DOC/52/52003714.pdf>, 25 มีนาคม 2553.

อรุณศรี ลีจิระจำเริญ, ภาวิดา ปัญญาวัน, พิมพรดา แก้วแสง และอังสนา สุวรรณรัฐภูมิ. 2552.
เปรียบเทียบการลดปริมาณจุลินทรีย์ในใบโหระพาโดยการล้างด้วยน้ำไอโซน กรดอ่อน
และอัลตราโซนิก, น. 440. ใน รวบรวมผลงานโครงการที่ได้รับทุนโครงการ IRPUS
ประจำปี 2552. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรุงเทพฯ.

Alibaba. 2010. **Ultrasonic Fruit Vegetable Cleaner**. Available Source:
http://www.alibaba.com/productfree/12190898/Ultrasonic_Fruit_Vegetable_Cleaner.htm
1, February 18, 2010.

Alternative Energy Research. 2011. **Piezo research for everyone**. Available Source:
<http://globalfreeenergy.info/2010/06/27/piezo-research-for-everyone>, February 18, 2010.

Bhaskaracharya, K.R., S. Kentish and M. Ashokkumar. 2009. Selected applications of ultrasonics in food processing. **Food Engineering Review** (1): 31–49.

Cao, S., Z. Hu, B. Pang, H. Wang, H. Xie and F. Wu. 2010. Effect of ultrasound treatment on fruit decay and quality maintenance in strawberry after harvest. **Food Control** 21: 529–532.

DG Sanco. 2008. **EU Pesticides database**. Available Source:
http://ec.europa.eu/sanco_pesticides/public/index.cfm, June 2, 2011.

Frederick, J.R. 1965. **Ultrasonic Engineering**. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Fuchs, F.J. 2002. **Ultrasonic cleaning: Fundamental theory and application**. New York.

Heldman, D.R., D.B. Lund, R. Villota and J.G. Hawkes. 2007. **Handbook of Food Engineering**. CRC Press, New York.

Huang, T.S., C. Xu, K. Walker, P. West, S. Zhang and J. Weese. 2006. Decontamination efficacy of combined chlorine dioxide with ultrasonication on apples and lettuce. **Journal of Food Science** 71: 134-139.

Jeil Trading. 2010. **Ultrasonic Fruit & Vegetable Cleaner**. Available Source:
<http://tw.commerce.com.tw/modules.php?modules=products&action=detail&ID=C0006630&no=23266&category=0&catid=696>, February 18, 2010.

Juicerthailand. 2010. **Ultrasonic Vegetable Cleaner**. Available Source:
http://www.designparty.com/member/web5116602/vegetable_washer.html, February 18, 2010.

Mason, T.J., L. Paniwnyk and J.P. Lorimer. 1996. The uses of ultrasound in food technology.

Ultrasonics Sonochemistry 3: 253-260.

Mizrach, A. 2007. Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and

vegetables in pre- and postharvest processes. **Postharvest Biology and Technology** (48): 315–330.

New life Technology. 2010. **Product Description**. Available Source: [http://www.made-in-](http://www.made-in-china.com/showroom/china-newlife/product-detailitEQDVxTFrCI/China-Ultrasonic-Sterilizing-Cleaner.html)

[china.com/showroom/china-newlife/product-detailitEQDVxTFrCI/China-Ultrasonic-Sterilizing-Cleaner.html](http://www.made-in-china.com/showroom/china-newlife/product-detailitEQDVxTFrCI/China-Ultrasonic-Sterilizing-Cleaner.html), February 18, 2010.

Niemczewski, B. 2007. Observations of water cavitation intensity under practical ultrasonic

cleaning conditions. **Ultrasonics Sonochemistry** 14: 13–18.

Scherba, G., R.M. Weigel and W.D. O'Brien, JR. 1991. Quantitative assessment of the germicidal

efficacy of ultrasonic energy. **Applied and Environmental Microbiology** 57: 2079-2084.

Seymour, I.J., D. Burfoot, R.L. Smith, L.A. Cox and A.Lockwood. 2002. Ultrasound

decontamination of minimally processed fruits and vegetables. **International Journal Food Science and Technology** 37: 547-557.

Sivakumar, V. and P.G. Rao. 2001. Application of power ultrasound in leather processing: an

ecofriendly approach. **Journal of Cleaner Production** 9: 25–33.

Sivakumar , V., F. Chandrasekaran, G. Swaminathan and P.G. Rao. 2009. Towards cleaner

degreasing method in industries: ultrasound-assisted aqueous degreasing process in leather making. **Journal of Cleaner Production** (17): 101–104.

U.S. Food and Drug Administration. 2001. **Bacteriological Analytical Manual (BAM): Aerobic Plate Count**. Available Source: <http://www.fda.gov/>, January 26, 2011.

Valero, M., N. Recrosio, D. Saura, N. Munoz, N. Marti and V. Lizama. 2007. Effects of ultrasonic treatments in orange juice processing. **Journal of Food Engineering** 80: 509–516.

Vassiliou, A. 2009. Commission regulation (EC) No 669/2009. **Official Journal of the European Union** (194): 11-21.

Zhao, Y., B. Hou, Z. Tang, X. Li and Y. Yang. 2009. Application of ultrasonics to enhance the efficiency of cleaning *Thelephora ganbajun*. **Ultrasonics Sonochemistry** 16: 209-211.

Zhou, B., H. Feng and Y. Luo. 2009. Ultrasound enhanced sanitizer efficacy in reduction of *Escherichia coli* O157:H7 population on spinach leaves. **Journal of Food Science** 74: 308-313.







ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องล้างอัลตราโซนิกสัขนาด 2 ลิตร ที่ใช้ในการทดลอง

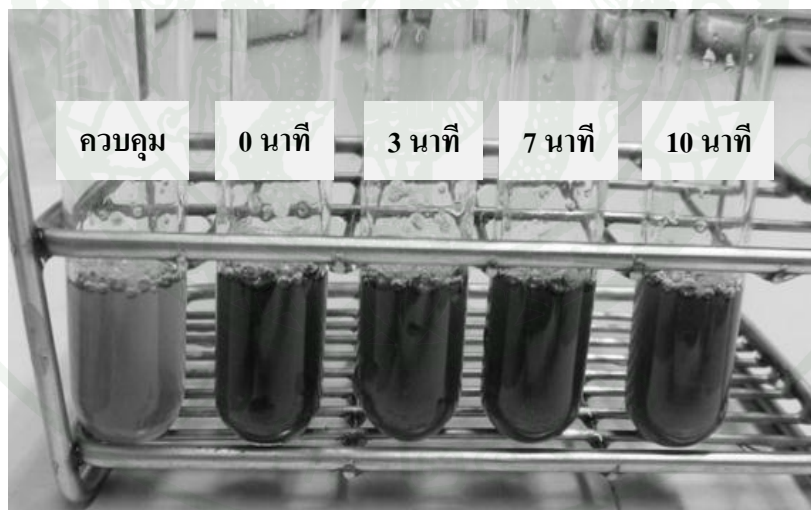


ภาพผนวกที่ ก2 ผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ที่ใช้ในการล้าง



ภาพผนวกที่ ก3 ชุดตรวจหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืช “จีที”

ที่มา: กอบทอง (2550)



ภาพผนวกที่ ก4 ความเข้มสีของตัวอย่างผักที่ผ่านการตรวจหาสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างด้วยชุดตรวจ “จีที”



ภาพผนวกที่ ก5 ความเข้มข้นของร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่ระดับ 0 10 30 50 80 และ 100 จากการสร้างกราฟมาตรฐานด้วยชุดตรวจ “จีที”



ภาพผนวกที่ ก6 การล้างผักและการเก็บตัวอย่างกระทำในตู้ปลอดเชื้อ สำหรับการทดสอบปริมาณเชื้อจุลินทรีย์



ภาคผนวก ข

ข้อมูลประกอบผลการทดลองสำหรับการลดสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง

ตารางผนวกที่ ข1 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	5.30±4.74 ^a	7.87±1.19 ^a	19.75±5.98 ^b	10.97±7.71
7	24.29±7.64 ^b	27.84±4.42 ^b	42.98±3.70 ^c	31.70±9.84
10	58.45±1.56 ^{de}	64.35±6.70 ^c	50.70±8.81 ^{cd}	57.83±8.15
ปัจจัยด้านอุณหภูมิ	29.35±23.77	33.35±25.13	37.81±15.05	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข2 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	8.42±6.01 ^a	15.97±7.51 ^{abc}	23.92±7.95 ^{bc}	16.10±9.17
7	13.48±6.26 ^a	28.67±9.49 ^c	27.38±7.34 ^c	23.18±9.95
10	55.54±2.37 ^{de}	63.22±3.00 ^c	49.17±7.54 ^d	55.98±7.42
ปัจจัยด้านอุณหภูมิ	25.82±22.85	35.96±22.07	33.49±13.56	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข3 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	19.95±3.73 ^a	14.72±6.62 ^a	16.73±3.73 ^a	17.13±4.81
7	37.20±11.52 ^b	48.25±9.57 ^{bc}	40.02±12.50 ^{bc}	47.82±10.95
10	53.07±10.97 ^c	76.23±12.81 ^d	50.06±2.76 ^{bc}	59.83±15.06
ปัจจัยด้านอุณหภูมิ	36.74±16.51	46.40±28.04	35.60±16.24	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-d} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกัน ในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข4 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	3.07±10.17 ^a	19.87±10.22 ^b	26.07±10.76 ^b	16.34±13.68 ^A
7	29.67±7.15 ^b	51.99±10.10 ^c	56.29±10.10 ^c	45.98±14.73 ^B
10	57.24±11.31 ^c	75.70±12.69 ^d	68.29±6.14 ^{cd}	67.08±12.10 ^C
ปัจจัยด้านอุณหภูมิ	29.99±24.92 ^A	49.18±26.09 ^B	50.22±20.46 ^B	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{A-C} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-d} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข5 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		
	20	25	30
0	4.5826	4.5826	4.5826
3	4.5281	4.5006	4.3626
7	4.3044	4.2563	4.0208
10	3.7042	3.5511	3.8754
สมการเส้นตรง*	$y=-0.0834x+4.697$	$y=-0.0973x+4.7094$	$y=-0.0728x+4.5741$
R^2	0.8321	0.8341	0.9907

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข6 $\ln \%inhibition$ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		
	20	25	30
0	4.4398	4.4398	4.4398
3	4.3503	4.2716	4.1873
7	4.2847	4.1212	4.1369
10	3.6217	3.4299	3.7751
สมการเส้นตรง*	$y=-0.0728x+4.538$	$y=-0.0922x+4.5269$	$y=-0.0590x+4.4300$
R^2	0.7333	0.837	0.8979

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข7 $\ln\%$ inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างตัวฟักขาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		
	20	25	30
0	3.8763	3.8763	3.8763
3	3.6495	3.7136	3.6976
7	3.3923	3.2155	3.3702
10	3.0976	2.4438	3.1870
สมการเส้นตรง*	$y=-0.076x+3.8839$	$y=-0.1407x+4.0156$	$y=-0.0707x+3.8863$
R^2	0.9928	0.9234	0.9960

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข8 $\ln\%$ inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		
	20	25	30
0	4.4090	4.4090	4.4090
3	4.3464	4.2237	4.1445
7	4.0354	3.6715	3.5798
10	3.4965	3.1179	3.2594
สมการเส้นตรง*	$y=-0.0894x+4.5187$	$y=-0.1303x+4.5072$	$y=-0.1186x+4.4410$
R^2	0.8888	0.9662	0.9933

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข9 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักชีด้วยการแช่น้ำ

เวลา (นาทีก)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	8.35±4.39 ^{ab}	7.47±9.73 ^{ab}	3.55±3.34 ^a	6.46±5.50 ^A
7	13.32±0.50 ^{bc}	11.84±6.42 ^{abc}	15.95±9.19 ^{bc}	13.70±5.35 ^B
10	15.34±0.85 ^{bc}	19.42±2.71 ^{cd}	27.01±7.86 ^d	20.59±6.48 ^C
ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ^{ns}	12.33±3.79	12.91±7.61	15.50±11.90	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{ns} แสดงว่าปัจจัยหลักไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{A-C} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-d} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข10 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างผักคะน้าด้วยการ
แช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	1.82±1.79 ^a	3.85±2.08 ^{ab}	0.68±0.61 ^a	2.12±1.91 ^A
7	5.22±3.51 ^{ab}	14.36±7.05 ^{ab}	11.02±1.11 ^{ab}	10.20±5.46 ^B
10	9.25±4.70 ^{ab}	17.30±7.98 ^{bc}	29.39±11.53 ^c	18.65±11.22 ^C
ปัจจัยด้าน อุณหภูมิ	5.43±4.31 ^A	11.84±7.97 ^{AB}	13.70±14.00 ^B	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{A-C} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข11 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างถั่วฝักยาวด้วยการ
แช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	6.82±0.13 ^{ab}	2.16±0.65 ^a	12.60±11.09 ^{ab}	7.20±6.82 ^A
7	18.81±8.46 ^{abc}	31.01±7.86 ^{bcd}	45.03±11.68 ^{cd}	31.62±14.40 ^B
10	27.69±10.53 ^{abcd}	46.42±20.37 ^d	48.18±15.89 ^d	40.76±16.09 ^B
ปัจจัยด้าน อุณหภูมิ	17.77±11.15 ^A	26.53±22.34 ^{AB}	35.27±20.70 ^B	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{A-B} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-d} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข12 ร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้างในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยการ
แช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)			ปัจจัยด้านเวลา
	20	25	30	
3	14.50±19.16 ^{ab}	6.09±8.19 ^a	8.13±4.97 ^a	9.57±10.35 ^A
7	38.20±5.88 ^{bc}	45.68±11.22 ^c	45.47±11.82 ^c	43.12±8.64 ^B
10	51.00±3.51 ^c	53.97±0.41 ^c	65.10±14.90 ^c	56.69±9.55 ^B
ปัจจัยด้าน อุณหภูมิ ^{ns}	34.57±18.90	35.24±23.72	39.57±27.34	

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{A-C} ตัวอักษรใหญ่ที่ต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแสดงว่าระดับในแต่ละปัจจัยหลักมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} แสดงว่าปัจจัยหลักไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันในแนวดิ่งหรือแนวนอนแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ข13 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักชีด้วยการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)		
	20	25	30
0	4.7163	4.7163	4.7163
3	4.6233	4.6257	4.6759
7	4.5726	4.5814	4.5291
10	4.5510	4.4962	4.3883
สมการเส้นตรง*	$y=-0.016x+4.6958$	$y=-0.0205x+4.7074$	$y=-0.0333x+4.7441$
R^2	0.9151	0.9670	0.9609

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min⁻¹) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข14 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างผักคะน้าด้วยการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)		
	20	25	30
0	4.5918	4.5918	4.5918
3	4.5734	4.5526	4.5850
7	4.5382	4.4368	4.4751
10	4.4948	4.4018	4.2438
สมการเส้นตรง*	$y=-0.0096x+4.5975$	$y=-0.0204x+4.5976$	$y=-0.0338x+4.6429$
R^2	0.9704	0.9722	0.8364

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min⁻¹) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข15 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างถั่วฝักยาวด้วยการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)		
	20	25	30
0	3.6932	3.6932	3.6932
3	3.6223	3.6725	3.5366
7	3.5025	3.3023	3.0481
10	3.3937	3.0020	2.9819
สมการเส้นตรง*	$y=-0.0300x+3.7027$	$y=-0.0724x+3.7793$	$y=-0.0782x+3.7058$
R^2	0.9931	0.9287	0.9466

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min⁻¹) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข16 ln %inhibition ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)		
	20	25	30
0	4.6084	4.6084	4.6084
3	4.4509	4.5460	4.5234
7	4.1275	3.9973	4.0028
10	3.8954	3.8324	3.5575
สมการเส้นตรง*	$y=-0.0726x+4.6336$	$y=-0.0858x+4.6751$	$y=-0.1086x+4.7158$
R^2	0.9934	0.9404	0.9489

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min⁻¹) ที่อุณหภูมิต่างๆ



ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ด้วย คลื่นเสียงความถี่สูง

เวลาในการล้าง (นาที)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/ml) ^a				ร้อยละการลดลง ^b			
	ผักชี	ผักคะน้า	ถั่วฝักยาว	พริกชี้ฟ้า	ผักชี	ผักคะน้า	ถั่วฝักยาว	พริกชี้ฟ้า
ก่อนล้าง	2.16×10^7	7.77×10^6	2.90×10^7	3.79×10^7	-	-	-	-
0	1.84×10^7	5.32×10^6	8.33×10^6	1.58×10^7	14.5	31.5	71.2	58.3
3	1.45×10^7	2.83×10^6	5.80×10^6	9.10×10^6	32.8	63.6	80.0	76.0
7	8.73×10^6	1.75×10^6	3.23×10^6	3.90×10^6	59.5	77.5	88.8	89.7
10	5.60×10^6	1.29×10^6	1.73×10^6	2.87×10^6	74.0	83.4	94.0	92.4

หมายเหตุ ^a ค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำการทดลอง

^b การเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยก่อนล้าง

ตารางผนวกที่ ค2 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดและร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชี ผักคะน้า ถั่วฝักยาว และพริกชี้ฟ้า ด้วยการแช่น้ำ

เวลาในการล้าง (นาที)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFU/ml) ^a				ร้อยละการลดลง ^b			
	ผักชี	ผักคะน้า	ถั่วฝักยาว	พริกชี้ฟ้า	ผักชี	ผักคะน้า	ถั่วฝักยาว	พริกชี้ฟ้า
ก่อนล้าง	2.16×10^7	7.77×10^6	2.90×10^7	3.79×10^7	-	-	-	-
0	2.04×10^7	5.57×10^6	8.89×10^6	2.10×10^7	5.6	28.3	69.3	47.1
3	1.31×10^7	5.10×10^6	6.63×10^6	1.07×10^7	39.1	34.3	77.1	71.8
7	1.29×10^7	3.95×10^6	4.60×10^6	8.36×10^6	40.3	49.1	84.1	78.0
10	9.07×10^6	2.77×10^6	3.43×10^6	4.99×10^6	58.0	64.4	88.2	86.8

หมายเหตุ ^a ค่าเฉลี่ยจาก 3 ซ้ำการทดลอง

^b การเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยก่อนล้าง

ตารางผนวกที่ ค3 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาที่)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml)	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	7.25±0.12 ^c	7.30±0.11 ^c
3	7.15±0.13 ^{bc}	7.12±0.03 ^{bc}
7	6.93±0.14 ^{ab}	7.11±0.02 ^{bc}
10	6.75±0.05 ^a	6.91±0.25 ^{ab}

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค4 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาที่)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml)	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	6.72±0.08 ^c	6.74±0.03 ^c
3	6.45±0.06 ^{bc}	6.66±0.23 ^c
7	6.22±0.17 ^{ab}	6.57±0.18 ^c
10	6.03±0.32 ^a	6.44±0.02 ^{bc}

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค5 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างถ้วยผักด้วย คลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาทีก)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml)	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	6.92±0.01 ^f	6.95±0.03 ^f
3	6.75±0.11 ^{de}	6.82±0.07 ^{ef}
7	6.50±0.13 ^b	6.66±0.08 ^{cd}
10	6.23±0.13 ^a	6.53±0.04 ^{bc}

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-f} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค6 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml) ที่เวลาต่างๆในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วย คลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาทีก)	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (log CFU/ml)	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	7.19±0.11 ^c	7.20±0.41 ^c
3	6.92±0.23 ^{bc}	6.90±0.47 ^{bc}
7	6.42±0.45 ^{ab}	6.82±0.42 ^{abc}
10	6.33±0.41 ^a	6.59±0.42 ^{ab}

หมายเหตุ ตัวเลข แสดงค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a-c} ตัวอักษรเล็กที่ต่างกันแสดงว่าตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค7 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	ln CFU/ml	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	16.7049	16.8094
3	16.4613	16.3885
7	15.9487	16.3695
10	15.5336	15.9200
สมการเส้นตรง*	$y = -0.1186x + 16.755$	$y = -0.0733x + 16.758$
R^2	0.9901	0.8759

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค8 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	ln CFU/ml	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	15.4761	15.5306
3	14.8498	15.3444
7	14.3276	15.1281
10	13.8940	14.8321
สมการเส้นตรง*	$y = -0.1544x + 15.409$	$y = -0.0677x + 15.547$
R^2	0.9896	0.9825

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค9 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างถ้วยฟักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	ln CFU/ml	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	15.9355	15.9991
3	15.5537	15.6999
7	14.9590	15.3301
10	14.3375	15.0463
สมการเส้นตรง*	$y = -0.1583x + 15.988$	$y = -0.0949x + 15.993$
R^2	0.9896	0.9998

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางผนวกที่ ค10 ln CFU/ml ของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดในการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงและการแช่น้ำ

เวลา (นาที)	ln CFU/ml	
	คลื่นเสียงความถี่สูง	การแช่น้ำ
0	16.5538	16.5846
3	15.9240	15.8937
7	14.7924	15.6927
10	14.5666	15.1755
สมการเส้นตรง*	$y = -0.2103x + 16.511$	$y = -0.1284x + 16.479$
R^2	0.9662	0.9370

หมายเหตุ * ค่าความชันจากสมการเส้นตรงคือค่า k (reaction rate constant, min^{-1}) ที่อุณหภูมิต่างๆ



ตารางผนวกที่ ๑1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักชีด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	322.468	161.234	7.269*	.006
Time (t)	2	9925.682	4962.841	223.756*	.000
T * t	4	906.565	226.641	10.218*	.000
Rep	2	198.009	99.004	4.464*	.029
Error	16	354.875	22.180		
Total	27	42016.130			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๑2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักคะน้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	503.393	251.696	5.376*	.016
Time (t)	2	8147.302	4073.651	87.017*	.000
T * t	4	579.787	144.947	3.096*	.046
Rep	2	72.012	36.006	0.769	.480
Error	16	749.031	46.814		
Total	27	37277.869			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างถั่วฝักยาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	633.152	316.576	5.278*	.017
Time (t)	2	8253.990	4126.995	68.811*	.000
T * t	4	836.173	209.043	3.485*	.031
Rep	2	528.572	264.286	4.407*	.030
Error	16	959.609	59.976		
Total	27	53508.266			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	2334.868	1167.434	12.698*	.000
Time (t)	2	11694.938	5847.469	63.601*	.000
T * t	4	257.616	64.404	.701	.603
Rep	2	340.099	170.049	1.850	.189
Error	16	1471.032	91.940		
Total	27	66330.874			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักซีด้วยการแช่น้ำ

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	34.228	17.114	1.215	.346
Time (t)	2	599.247	299.624	21.277*	.001
T * t	4	149.559	37.390	2.655	.112
Rep	2	208.451	208.451	14.803*	.005
Error	16	112.654	14.082		
Total	27	4425.565			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างผักคะน้าด้วยการแช่น้ำ

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	225.721	112.861	3.322	.089
Time (t)	2	819.474	409.737	12.059*	.004
T * t	4	281.197	70.299	2.069	.177
Rep	2	18.085	18.085	.532	.486
Error	16	271.829	33.979		
Total	27	3534.329			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างถั่วฝักยาวด้วยการแช่น้ำ

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	918.376	459.188	3.792	.069
Time (t)	2	3613.654	1806.827	14.920*	.002
T * t	4	395.388	98.847	.816	.549
Rep	2	281.864	281.864	2.327	.166
Error	16	968.824	121.103		
Total	27	18843.452			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิและเวลาต่อร้อยละการลดลงของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชตกค้าง สำหรับการล้างพริกชี้ฟ้าด้วยการแช่น้ำ

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Temperature (T)	2	88.284	44.142	.358	.710
Time (t)	2	7059.279	3529.640	28.645*	.000
T * t	4	282.326	70.581	.573	.690
Rep	2	8.113	8.113	.066	.804
Error	16	985.759	123.220		
Total	27	32352.208			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๙ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับผักชี

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Method (M)	1	.050	.050	3.081	.098
Time (t)	3	.644	.215	13.312*	.000
Trt * t	3	.047	.016	.971	.431
Error	16	.258	.016		
Total	24	1198.799			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ๑๐ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับผักคะน้า

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Method (M)	1	.370	.370	12.894*	.002
Time (t)	3	.814	.271	9.451*	.001
Trt * t	3	.130	.043	1.513	.249
Error	16	.459	.029		
Total	24	1009.802			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับถั่วฝักยาว

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Method (M)	1	.118	.118	16.200*	.001
Time (t)	3	1.055	.352	48.347*	.000
Trt * t	3	.070	.023	3.225	.051
Error	16	.116	.007		
Total	24	1068.960			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวิธีการล้าง (คลื่นเสียงความถี่สูงกับการแช่น้ำ) และเวลาที่ใช้ล้างต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด สำหรับพริกชี้ฟ้า

Source	Degrees of Freedom (df)	Sum of Squares (ss)	Mean Squares (ms)	F Value	Sig.
Method (M)	1	.161	.161	1.088	.312
Time (t)	3	1.906	.635	4.301*	.021
Trt * t	3	.173	.058	.391	.761
Error	16	2.364	.148		
Total	24	1113.004			

หมายเหตุ * แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวรติกร บัวคำ
เกิดวันที่	7 พฤษภาคม 2530
สถานที่เกิด	ตาก
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิศวกรรมกระบวนการอาหาร) ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	Buakham, R., S. Songsermpong, S. Trevanich and C. Eamchotchawalit. 2010. Kinetics of the reduction of pesticide residues in vegetables by ultrasonic cleaning. The 6 th Thailand-Taiwan Conference on Food and Agricultural Innovation: Going Global', November, 15, 2010, Bangkok, Thailand. (Oral presentation)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนวิจัยในโครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอกระหว่างสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยกับสถาบันการศึกษา 2. ทุนผู้ช่วยสอนประจำภาคต้น ปีการศึกษา 2553