



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การคัดแยกเมล็ดพันธุ์ป่นในถั่วเขียว โดยการวิเคราะห์ภาพ Separation the Mingling Varieties of the Mungbean Seeds by Image Analysis
นามผู้วิจัย	นายอนล ไพศาล
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D.)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยอดเยี่ยม ทิพย์สุวรรณ, Ph.D.)
หัวหน้าภาควิชา	(รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การคัดแยกเมล็ดพันธุ์ป่นในถั่วเขียวโดยการวิเคราะห์ภาพ

Separation the Mingling Varieties of the Mungbean Seeds by Image Analysis

โดย

นายอนล ไพศาล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนล ไพศาล 2555: การคัดแยกเมล็ดพันธุ์ปนในถั่วเขียวโดยการวิเคราะห์ภาพ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม, Ph.D. 77 หน้า

ปัญหาการปนของเมล็ดพันธุ์ต่างสายพันธุ์เป็นปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นจากทุกขั้นตอนของ
การผลิต การเก็บเกี่ยว การเก็บรักษา การแปรรูป และการจำหน่าย แต่การคัดแยกเมล็ดพันธุ์ที่ปนกัน
นั้นเป็นไปได้ยาก จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะที่มีราคาสูง หรือบุคคลากรผู้เชี่ยวชาญที่มีจำนวน
จำกัด หรือส่งไปวิเคราะห์ผ่านห้องปฏิบัติการต้องใช้เวลาาน ในการจำแนกเมล็ดพันธุ์ การแก้ไข
ปัญหาในการคัดแยกการปนของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่สะดวกและรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

การคัดแยกเมล็ดพันธุ์โดยการวิเคราะห์ภาพเมล็ดจากลักษณะของเมล็ดโดยค่าสัมบูรณ์
โมเมนต์อินเวเรียนต์และซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนสมการพหุนามดีกรี 3 ในการจำแนกภาพเมล็ด
ถั่วเขียวสายพันธุ์ชัชนาท 72สายพันธุ์อุ๋ทอง 1 สายพันธุ์มทส. 1 และสายพันธุ์กำแพงแสน 2 พันธุ์ละ
50เมล็ดเพื่อเรียนรู้ลักษณะ และอีกพันธุ์ละ 50 เมล็ด เพื่อทดสอบระบบ สามารถจำแนกคัดแยกภาพ
เมล็ดพันธุ์ในงานวิจัยนี้ทั้งระบบได้ 92.88 เปอร์เซ็นต์แยกตามสายพันธุ์โดยความแม่นยำทางด้าน
ผู้ผลิต สายพันธุ์ชัชนาท 72 ได้ 92.04 เปอร์เซ็นต์ สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ได้ 94.16 เปอร์เซ็นต์ สาย
พันธุ์อุ๋ทอง 1 ได้ 93.42 เปอร์เซ็นต์ และสายพันธุ์ มทส. 1 ได้ 91.9 เปอร์เซ็นต์ ความแม่นยำทางด้าน
ผู้ใช้ สายพันธุ์ชัชนาท 72 ได้ 90.46 เปอร์เซ็นต์ สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ได้ 96.89 เปอร์เซ็นต์ สาย
พันธุ์อุ๋ทอง 1 ได้ 91.31 เปอร์เซ็นต์ และสายพันธุ์ มทส. 1 ได้ 93.03 เปอร์เซ็นต์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Anol Paisal 2012: Separation the Mingling Varieties of the Mungbean Seeds by Image Analysis. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Teerasit Kasetkasem, Ph.D. 77 pages.

The amount of seed of different species is likely to occur in all stages of productions, namely harvesting, storage, processing and distribution while the separation of mingling seeds is difficult. In general, the specialized tools at the high-tech laboratory or specialists are needed. The laboratory work is often time-consuming and expensive and the number of specialists is very limited. As a result, the quick and easy method to separate mungbean seed is in high demand.

The Separation of mungbeen seeds by using image processing techniques is one of the answers. In this work, the HU absolute orthogonal moment and the support vector machine are selected as the feature selection and classification tools, respectively. The Hu moment is known to be invariant to the size and orientation of the mungbean seed. We examined our proposed techniques with 4 different strains of mungbean, namely, Chainat-72 (CN72), Kamphangsarn-2 (KPS2), Authong-1 (AUT1), and SUT-1 (MST1). Our experiment has shown that our proposed technique is very accurate since 92.88 percent was successfully separated with the producer accuracies of 92.04%, 94.16%, 93.42% and 91.9%, and the user accuracies of 90.46%, 96.89%, 91.31% and 93.03% for CN72, KPS2, AUT1, MST1, respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษมประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ยอดเยี่ยม ทิพย์สุวรรณ กรรมการที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาในการเรียนการ
ค้นคว้าวิจัยตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รศ.ดร.วุฒิพงษ์ อารีกุล
ผู้ให้ความรู้ด้านการจดจำรับรูรูปแบบ กราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมหญิง ไทยนิมิต ประธานสอบ
และ ผศ.ดร.สุรีย์ พุ่มรินทร์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไข
วิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบ
ความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปขอขอบคุณสุวิมล ถนอมทรัพย์
นักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ จากสถาบันวิจัยพืชไร่ เอื้อเพื่อเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว ข้อมูล
เศรษฐกิจทางการเกษตรเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและบัณฑิตวิทยาลัยทุกท่านที่ได้ให้ความ
ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดเรื่อยมา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่คุณพ่อคุณแม่ที่ได้
อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

อนล ไพศาล
กุมภาพันธ์ 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	34
ผล	34
วิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	48
สรุป	48
ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	50
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก สถิติการเกษตรประเทศไทยพืชอาหาร : ถั่วเขียว ปี 2550	54
ภาคผนวก ข คำสัมภาษณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากจากภาพจำลอง	58
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ช่วงความยาวคลื่นและความถี่ของแสง	9
2	คอนฟิวชันเมทริกซ์ของกลุ่มทดสอบ (SVM, C = 10, Iteration = 100) ด้วยสมการเชิงเส้นนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %	40
3	คอนฟิวชันเมทริกซ์ของกลุ่มทดสอบ (SVM, C = 10, Iteration = 100) ด้วยสมการพหุนามดีกรี 3 นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %	43
ตารางผนวกที่		
ก1	เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2548-2550	55
ก2	ถั่วเขียว : เนื้อที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ ราคา และมูลค่าของผลผลิต ตามราคาที่เกษตรกรขายได้ ปี 2541-2550	56
ก3	เนื้อที่ ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาค ปี 2548-2550	57

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ต้นถั่วเขียวทั่วไป	5
2 แอปพลิเคชัน HIS	11
3 ตัวกรองมีขยฐานขนาด 3 x 3	12
4 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ C ระหว่าง C=100 และ C=10	23
5 ระยะห่างสูงสุดของแนวเส้นแบ่งระนาบเกินจากตัวอย่างสองกลุ่ม และซอฟต์แวร์เวกเตอร์ จากตัวอย่างที่อยู่บนแนวเส้น	24
6 SVM แบบฟังก์ชันเคอร์เนลแบบไม่เชิงเส้น	25
7 โครงไม้พร้อมติดตั้งอุปกรณ์	26
8 ภาพจำลองรูปจุดภาพที่เพิ่มขึ้น	27
9 ภาพจำลองรูปเส้นตรง	27
10 ภาพจำลองรูปวงกลม	27
11 ภาพจำลองรูปวงรี	28
12 ภาพจำลองรูปสี่เหลี่ยม	28
13 ภาพจำลองรูปหลายเหลี่ยม	28
14 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ ชัยนาท 72	29
15 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ กำแพงแสน 2	30
16 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ อุทอง 1	30
17 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ มทส. 1	31
18 กระบวนการจัดภาพพื้นหลัง	34
19 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับแรกของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	35
20 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่สองของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	35
21 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่สามของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	36
22 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่สี่ของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	36
23 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่ห้าของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	37
24 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่หกของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	37
25 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่เจ็ดของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยสี่ และค่าความแปรปรวนสี่ของเมล็ดถั่วเขียวทั้งสี่สายพันธุ์	38
27	การกระจายตัวของขนาดเมล็ดถั่วเขียวทั้งสี่สายพันธุ์	39
28	ค่าอัตราส่วนพีชเชอร์คิสคริมิแนนต์	39
29	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์ชัชนาท 72 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น	41
30	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น	41
31	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์อุทอง 1 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น	42
32	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์มทส. 1 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น	42
33	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์ชัชนาท 72 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3	43
34	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3	44
35	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์อุทอง 1 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3	44
36	ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์มทส. 1 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3	45
ภาพผนวกที่		
ข1	ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น	59
ข2	ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น	59
ข3	ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น	60
ข4	ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น	60

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข28	ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี	70
ข29	ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	71
ข30	ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	71
ข31	ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	71
ข32	ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	72
ข33	ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	72
ข34	ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	72
ข35	ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม	73
ข36	ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	74
ข37	ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	74
ข38	ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	74
ข39	ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	75
ข40	ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	75
ข41	ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	75
ข42	ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม	76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

%pac	=	Producer's Accuracy Percentage
%uac	=	User's Accuracy Percentage
AUT1	=	Authong-1
CN72	=	Chainat-72
FDR	=	Fisher's Discriminant Ratio
HSI	=	Hue Saturation Intensity
Hu1	=	First order of orthogonal moment invariant
Hu2	=	Second order of orthogonal moment invariant
Hu3	=	Third order of orthogonal moment invariant
Hu4	=	Forth order of orthogonal moment invariant
Hu5	=	Fifth order of orthogonal moment invariant
Hu6	=	Sixth order of orthogonal moment invariant
Hu7	=	Seventh order of orthogonal moment invariant
ISSR	=	Inter Simple Sequence Repeat
KPN2	=	Kamphangsan-2
MST1	=	SUT-1
RGB	=	Red Green Blue
ROC	=	The Receiver Operation Characteristics
SVM	=	Support Vector Machines
Var	=	Variant
YUV	=	Luma and Chrominance

การคัดแยกเมล็ดพันธุ์ป่นในถั่วเขียวโดยการวิเคราะห์ภาพ

Separation the Mingling Varieties of the Mungbean Seeds

by Image Analysis

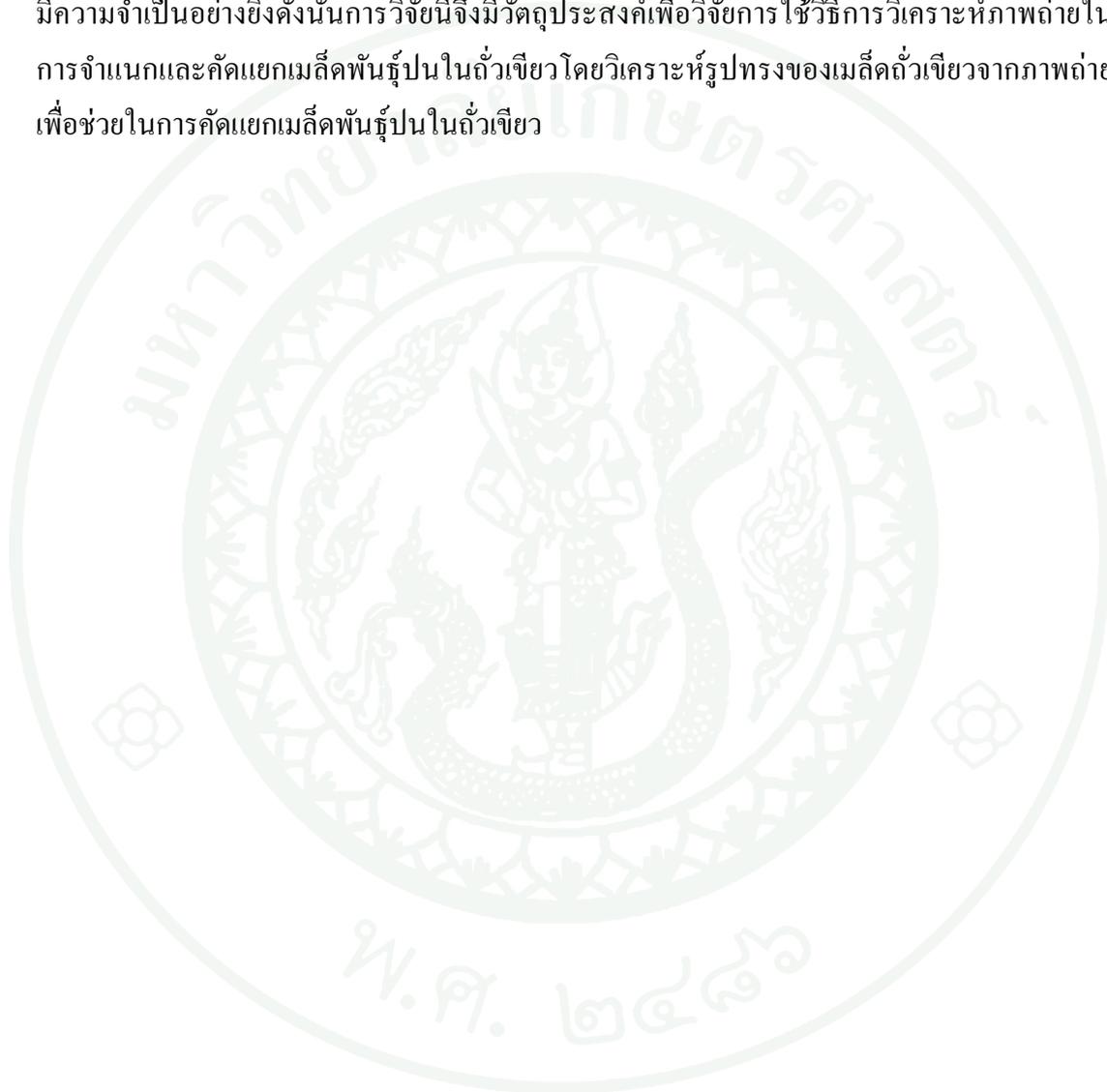
คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรมประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมด้วยเช่นกันปัจจุบันกรมวิชาการเกษตรได้แนะนำและสนับสนุนให้เกษตรกรปลูกพืชบำรุงดินสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตและทำรายได้หลังจากฤดูเก็บเกี่ยวข้าวนาปีถั่วเขียวเป็นพืชบำรุงดินและเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่หน่วยงานของรัฐสนับสนุนให้เกษตรกรปลูกหลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวนาปีเพราะถั่วเขียวเป็นพืชที่ใช้น้ำน้อยกว่าพืชชนิดอื่นที่ภาครัฐสนับสนุนเหมาะกับพื้นที่ที่แหล่งน้ำเข้าถึงไม่สะดวกและเป็นพืชที่ไม่จำเป็นต้องดูแลมาก (กรมวิชาการเกษตร, 2552; สมชาย, 2554)

ด้านเศรษฐกิจถั่วเขียวเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการบริโภคภายในประเทศเป็นหลักใช้เพาะถั่วงอกทำวุ้นเส้นขนมหวานแปรรูปเป็นแป้งใช้ในการประกอบอาหารเป็นต้นการจำแนกชนิดของพันธุ์เมล็ดถั่วที่แตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของแต่ละผลิตภัณฑ์ปัจจุบันพื้นที่เพาะปลูกถั่วเขียวมีแนวโน้มลดลงทุกปีแต่ปริมาณในการบริโภคถั่วเขียวยังคงเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากรซึ่งกำลังการผลิตในระดับโลกในประเทศต่างๆดังตารางผนวกที่ 1 องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (2553) ประเทศไทยจัดอยู่ในลำดับที่ 24 ของโลกในการผลิตและใช้บริโภคภายในประเทศไทยเป็นหลักในการผลิตถั่วเขียวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2550 ดังแสดงในตารางผนวกที่ 2 องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (2553) แสดงถึงเนื้อที่เพาะปลูกที่ลดลงอย่างต่อเนื่องและราคาถั่วเขียวที่ขยับตัวสูงขึ้น ภายในประเทศไทยแบ่งตามภูมิภาคแสดงในตารางผนวกที่ 3 สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2553) จำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตต่อไร่ให้มากขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อการบริโภคภายในประเทศ ทำให้เกิดการใช้เมล็ดพันธุ์ที่ไม่ได้คุณภาพปะปนในการเพิ่มผลผลิต ทำให้จำนวนผลผลิตเมล็ดพันธุ์บริสุทธิ์ต่ำลงและมีราคาสูงขึ้นเนื่องจากขาดการใช้เมล็ดพันธุ์และเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการใช้งาน กรมวิชาการเกษตร (2552) และจากคามผิดพลาดในขั้นตอนการผลิตการเก็บเกี่ยวการเก็บรักษาการแปรรูปและการจำหน่ายทำให้เกิดการปนของถั่วเขียวต่างสายพันธุ์ขึ้นจึงเป็นปัญหาในการรับซื้อคืนเมล็ดพันธุ์บริสุทธิ์จากเกษตรกร

เนื่องจากไม่มีมาตรฐานการคัดเกรดคุณภาพ และในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพลดลงจากเมล็ดต่างสายพันธุ์ที่นำไปใช้ในการผลิต

ดังนั้นการแก้ไขปัญหาในการคัดแยกการปนของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่สะอาดและรวดเร็วจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยการใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่ายในการจำแนกและคัดแยกเมล็ดพันธุ์ปนในถั่วเขียวโดยวิเคราะห์รูปทรงของเมล็ดถั่วเขียวจากภาพถ่ายเพื่อช่วยในการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ปนในถั่วเขียว



วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์รวม เพื่อนำความรู้ด้าน การวิเคราะห์ภาพ และ การจดจำรับรู้รูปแบบมาช่วย แก้ไขปัญหาทางการเกษตรในการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว

วัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ที่ปะปนกัน โดยจำแนกเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวโดยใช้ขบวนการทางภาพโดยระบุสายพันธุ์ชัชนาท 72 สายพันธุ์กำแพงแสน 2 สายพันธุ์อุทอง 1 และสายพันธุ์มทส. 1 เพื่อลดปัญหาในการปะปนของเมล็ดต่างสายพันธุ์ปน จากกระบวนการเก็บเกี่ยว ในขั้นตอนการจำหน่ายหรือรับซื้อคืนจากเกษตรกรของหน่วยงานรัฐฯ

การตรวจเอกสาร

การวิเคราะห์ภาพ และการจดจำรับรู้อุปแบบในปัจจุบันเป็นที่นิยมมาก ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เรียนรู้และรับรู้อุปแบบข้อมูลที่เกิดขึ้นที่มากพอเพื่อตัดสินใจและประเมินค่าในการแก้ปัญหาเฉพาะทางในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันไปยกตัวอย่าง Igathinathane (2009) ในงานวิจัยการวัดค่ามิติสำคัญเชิงตั้งฉากของเมล็ดพืชที่ใช้เป็นอาหาร เช่น ถั่วเหลือง ถั่วแดง ถั่วลิมาเป็นต้น โดยกระบวนการพิกเซลมาร์ช (pixel march) คือศึกษาจากจุดศูนย์กลางของเมล็ด ความยาวตามแนวแกนหลักและความกว้างตามแนวแกนรอง เพื่อหาขอบเขตและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากรูปวงรีอ้างอิงของมิติเชิงตั้งฉากในเมล็ดพืชต่างชนิด ให้ผลได้แม่นยำมากกว่า 96.6 เปอร์เซ็นต์สำหรับงานวิจัยฉบับนี้สนใจเกี่ยวกับถั่วเขียวสายพันธุ์ชัชนาท 72 สายพันธุ์กำแพงแสน 2 สายพันธุ์อุทอง 1 และสายพันธุ์มทส. 1 ที่ได้พัฒนาขึ้นและการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ผสมกันดังต่อไปนี้

1. สายพันธุ์เมล็ดถั่วเขียว
2. งานวิจัยการคัดแยกถั่วเขียวปนที่ผ่านมา
3. ลักษณะสี
4. การปรับปรุงคุณภาพและขจัดสัญญาณรบกวนของภาพ
5. ลักษณะโมเมนต์ของภาพถ่ายจากรูปทรงของเมล็ดถั่วเขียว

1. สายพันธุ์เมล็ดถั่วเขียว

เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ประกอบด้วยสายพันธุ์ชัชนาท 72 พันธุ์กำแพงแสน 2 พันธุ์อุทอง 1 และพันธุ์มทส.1 ซึ่งได้รับมาจากสถาบันวิจัยพืชไร่กรุงเทพฯจำนวนพันธุ์ละ 100 เมล็ดรวมเป็น 400 เมล็ดภาพที่ 1 แสดงลักษณะต้นถั่วเขียวทั่วไปเหตุผลที่เลือกจำแนก 4 สายพันธุ์นี้เนื่องจากสายพันธุ์อุทอง 1 เป็นสายพันธุ์ดั้งเดิม ที่มีขีดจำกัดด้านความต้านทานโรคต่ำ จึงมีการพัฒนาพันธุ์กำแพงแสน 2 ที่ทนต่อโรคและแนวโน้มให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์อุทอง 1 ส่วนพันธุ์มทส. 1 พัฒนาขึ้นให้มีลักษณะตรงตามลักษณะที่กำหนดตามรายละเอียดด้านล่างและชัชนาท 72 พัฒนาขึ้นเพื่อสามารถปลูกได้ทุกฤดูและทุกภาคในประเทศไทย ลักษณะทั่วไปของต้นถั่วเขียวแสดงในภาพที่ 1 สำหรับสายพันธุ์ที่พัฒนาทั้ง 4 สายพันธุ์ยังถูกให้นำมาใช้เป็นสายพันธุ์บริสุทธิ์และจำหน่ายที่กรมวิชาการเกษตรสำหรับสนับสนุนให้ปลูกหลังจากฤดูเกี่ยวกับข้าวนาปีอยู่ในปัจจุบัน แต่ละสายพันธุ์มีลักษณะเด่นต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 1 ต้นถั่วเขียวทั่วไป

1.1 พันธุ์ชัชนาท 72 ประเภทพันธุ์เป็น พันธุ์รับรอง ขึ้นทะเบียนรับรองในวันที่ 24 เมษายน 2543 จากกรมวิชาการเกษตร

1.1.1 ลักษณะทางการเกษตร

- ก. ความสูงต้นเฉลี่ย 66 ซม.
- ข. อายุเก็บเกี่ยว 63 วัน
- ค. จำนวนฝักต่อต้น 15 ฝัก
- ง. น้ำหนัก 1,000 เมล็ดหนัก 66 กรัม
- จ. ปลูกได้ในทุกฤดูและในทุกภาคของประเทศไทย

1.1.2 ลักษณะดีเด่น

- ก. ให้ผลผลิตเฉลี่ย 212 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนในฤดูแล้ง ต้นฤดูฝนและปลายฤดูฝนให้ผลผลิต 222, 240 และ 187 กิโลกรัมต่อไร่
- ข. มีความต้านทานปานกลางต่อหนอนแมลงวันเจาะลำต้น (ในสภาพธรรมชาติ) โดยให้ผลผลิต 135 กิโลกรัมต่อไร่
- ค. เสถียรภาพในลักษณะผลผลิต อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แต่มีเสถียรภาพของลักษณะ น้ำหนัก 1000 เมล็ด และมีความสามารถที่จะปลูกได้ในทุกสภาพแวดล้อม

1.2 พันธุ์กำแพงแสน 2 ประเภทพันธุ์เป็นพันธุ์รับรองขึ้นทะเบียนรับรองวันที่ 11 เมษายน 2529

1.2.1 ลักษณะทางการเกษตร

ก. มีข้อฝักอยู่เหนือทรงพุ่ม

ข. ต้านทานต่อโรคใบจุดสีน้ำตาลและต้านทานปานกลางต่อโรคราแป้งแต่อ่อนแอต่อดินค้าง

ค. อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 67 วัน

ง. ผลผลิตเฉลี่ย 193 กิโลกรัมต่อไร่

จ. น้ำหนัก 1,000 เมล็ด 59 กรัม

1.2.2 ลักษณะดีเด่น

ก. ทรงต้นเตี้ย พุ่มใบเล็กกว่าพันธุ์อุทอง 1 ทำให้การล้มน้อยกว่าฝักชูขึ้นเหนือใบ ทำให้เก็บเกี่ยวได้ง่าย

ข. ผลผลิตต่อไร่สูงกว่าพันธุ์อุทอง 1 ร้อยละ 32 ผลผลิตโดยเฉลี่ย 193.9 กิโลกรัม ต่อไร่ แนวโน้มผลผลิตเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มอัตราปลูก ส่วนอายุเก็บเกี่ยว น้ำหนักเมล็ดและองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดมีค่าใกล้เคียงกับพันธุ์อุทอง 1

ค. สามารถต้านทานโรคราแป้งและใบจุดได้ดีกว่าพันธุ์อุทอง 1

ง. ปลูกได้ทั้งต้นฝน ปลายฝน และฤดูแล้งปลูกได้ทุกภาคในประเทศไทย

จ. แนวโน้มถั่วเขียวพันธุ์นี้จะให้น้ำหนักถั่วงอกมากกว่าพันธุ์อุทอง 1 เมื่อเพาะจากเมล็ดหนักเท่า ๆ กัน

1.3 พันธุ์ มทส.1ประเภทพันธุ์เป็นพันธุ์แนะนำขึ้นทะเบียนรับรองในวันที่ 16 มิถุนายน 2542

1.3.1 ลักษณะดีเด่น

ก. มีลักษณะตรงตามรูปแบบที่กำหนด (ideotype) คือเป็นพันธุ์ที่มีฝักส่วนใหญ่หรือทั้งหมดอยู่เหนือทรงพุ่มฝักสุกพร้อมกันทั้งชุด มีข้อใหญ่ (จำนวนฝักต่อข้อสูง)

ข. มีเปลือกฝักเหนียวไม่แตกง่าย เปลือกของพันธุ์ มีลักษณะละเอียด เหนียว เมื่อมีฝนระยาะเก็บเกี่ยวก็สามารถป้องกันน้ำซึมผ่านเข้าไปในฝักได้ และฝักไม่แตกจึงสามารถรอเก็บเกี่ยวได้ดีกว่า

ค. มีเมล็ดโต มีขนาดโตเฉลี่ยกว่า 7 กรัมต่อ 100 เมล็ด จากผลการทดลองพบว่า มีขนาด 7.33 กรัมต่อ 100 เมล็ด ในขณะที่พันธุ์กำแพงแสน 1 ให้ผลผลิต 6.44 กรัมต่อ 100 เมล็ดซึ่งยังผลให้อัตราถั่วงอกสูงและมีความสวยงามดีกว่าพันธุ์อื่นๆ

ง. ผลผลิตสูงผลผลิตโดยเฉลี่ยสูงอยู่ในระดับเดียวกับพันธุ์กำแพงแสน 1 และสูงกว่า พันธุ์กำแพงแสน 2 มอ. 1 และชัณนาท 60

จ. ต้านทานโรค พบว่าต้านทานต่อโรคใบจุดและโรคราแป้งดีกว่าพันธุ์ส่งเสริมอื่น ๆ ทุก พันธุ์ คือเป็นโรคบ้างแต่ไม่ถึงขั้นรุนแรงเหมือนพันธุ์อื่น ๆ

1.3.2 ข้อจำกัดพันธุ์ดังกล่าวนี้มีต้นเตี้ยกว่าพันธุ์อื่น ๆ การเก็บเกี่ยวโดยการปลิดฝักอาจไม่สะดวก

1.4 พันธุ์อุทอง 1 ประเภทพันธุ์เป็นพันธุ์รับรองขึ้นทะเบียนรับรองในวันที่ 6 ธันวาคม 2519

1.4.1 ลักษณะเด่น

ก. เมล็ดขนาดใหญ่ก่อนข้างสม่ำเสมอและผิวมันซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด ออกดอกและติดฝักชุดแรกภายในเวลาเกือบพร้อมกันและออกดอกเป็นจำนวนมาก (ประมาณ 80 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ของทั้งต้น)จึงทำให้ฝักแก่พร้อมที่จะเก็บเกี่ยวได้ในเวลาเดียวกัน

ข. อายุเก็บเกี่ยวสั้น (ประมาณ 65 ถึง 70 วัน) นอกจากนี้ ฝักที่แก่แล้วยังเหนียวไม่แตกง่ายจึงทำให้เก็บเกี่ยวฝักทั้งหมดได้ไม่เกิน 2 ครั้ง (ส่วนพันธุ์พื้นเมืองต้องเก็บเกี่ยว 6 ถึง 7 ครั้ง)

ค. การเก็บเกี่ยวโดยตัดทั้งต้นมาตากแดดและนวดเช่นเดียวกันกับถั่วเหลืองได้สามารถทุ่มแรงงานในการเก็บเกี่ยว

ง. ให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์พื้นเมืองเล็กน้อยมีความต้านทานต่อโรคและแมลงศัตรูพืชเช่นเดียวกับถั่วเขียวพันธุ์พื้นเมืองแต่ทนทานต่อความแห้งแล้งได้ดี

1.4.2 ลักษณะทางการเกษตร

ก. ผลผลิต 150 ถึง 200 กิโลกรัมต่อไร่

ข. โคนต้นมีสีม่วง ทรงต้นเป็นพุ่ม แตกกิ่งก้านสาขาดี

ค. ใบค่อนข้างใหญ่ มีสีเขียวเข้ม

ง. ก้านใบมีสีม่วง

จ. ดอกแรกบานเมื่ออายุประมาณ 35 วัน ออกดอกเป็นชุด ชุดแรกจะติดฝักภายในเวลา 5 ถึง 7 วันดอกชุดที่ 2 จะเริ่ม เมื่อฝักแรกเริ่มแก่

ฉ. จำนวนฝัก 15 ถึง 25 ฝักต่อต้น

ช. เมล็ด 8 ถึง 18 เมล็ดต่อฝัก น้ำหนัก 1,000 เมล็ดหนัก 60 ถึง 65 กรัม

1.4.3 ผลผลิต ประมาณ 150 ถึง 120 กก.ต่อไร่

1.4.4 ความต้านทานโรคไม่ต้านทานต่อโรคใบจุด

2. งานวิจัยการคัดแยกถั่วเขียวปนที่ผ่านมา

สมนึก (2531) พัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดถั่วเขียวที่ปรับปรุงนำเอาตะแกรงโยกร่วมกับการกะเทาะไว้ในเครื่องเดียวกันและใช้แผ่นยางประกั้นแผ่นเดียวในแต่ละจานกะเทาะ จารุวัฒน์ (2531) ได้พัฒนาเครื่องกะเทาะเมล็ดถั่วเขียวฝัมนั้ที่ดัดแปลงจากเครื่องกะเทาะข้าวโพดโดยทำให้มีความทนทานมากขึ้น Satake *et. al.* (2002) ผลิตอุปกรณ์คัดแยกเมล็ดพืชโดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากการส่องแสงผ่านเมล็ดทั้งสองด้านเพื่อหาคุณภาพของเมล็ดพืชและสามารถค้นพบรอยร้าวบนเมล็ดได้ Maejima (2004) พัฒนาเครื่องตรวจสอบเมล็ดพืชหุ้มด้วยวุ้นโดยมีจำนวนที่แน่นอนเรียงเมล็ดเป็นแถวเดียววิเคราะห์พื้นที่เงาของภาพเพื่อเปรียบเทียบค่าพื้นที่เงามาตรฐานและคัดเมล็ดที่สมบูรณ์ตามมาตรฐาน ยอดชัยและคณะ (2548) เครื่องคัดแยกเมล็ดถั่วเขียวเพาะจากการมุดตกกระทบที่สามารถคัดแยกเมล็ดดิบเมล็ดแตกและเมล็ดคловงและเมล็ดที่ไม่งอกออกจากเมล็ดที่สามารถนำไปเพาะได้ Tantasawat *et al.* (2010) ศึกษาเกี่ยวกับการระบุความหลากหลายและความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของถั่วเขียวและถั่วเขียวฝัมนั้ในประเทศไทยบนลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการวิเคราะห์ ISSR (Inter Simple Sequence Repeat) เป็นการวิเคราะห์ลำดับทวบซ้ำลักษณะร่วมกันในระดับดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งจำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะหรือการนำตัวอย่างส่งไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการซึ่งใช้เวลานานในการตรวจสอบ

3. ลักษณะสี

สีของแสงตามธรรมชาติที่มนุษย์สามารถสัมผัสมองเห็นได้ ได้แก่ สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินสีเหล่านี้สามารถนำไปสร้างสีในรูปแบบของค้ประกอบเชิงเส้นและรูปแบบของค้ประกอบไม่เชิงเส้นรูปแบบการแทนค่าสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ RGB, YUV และ HSI เป็นต้น

3.1 RGB เป็นองค์ประกอบสีแสงตามธรรมชาติที่สามารถแสดงให้เห็นจากค่าความสว่างที่ถูกแยกโดยผ่านการกรองสีของแสงดังสมการที่ 1

$$\begin{aligned} R &= \int_{\lambda} E(\lambda)S_R(\lambda) d\lambda, \\ G &= \int_{\lambda} E(\lambda)S_G(\lambda) d\lambda, \\ B &= \int_{\lambda} E(\lambda)S_B(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$, $S_B(\lambda)$ คือ ตัวกรองแสงในความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไป
 $E(\lambda)$ คือ ค่าความสว่าง
 λ คือ ค่าความยาวคลื่นแสงดังแสดงในตารางที่ 1

ซึ่งในภาพถั่วเขียวมีส่วนประกอบของเม็ดสีเขียวมากกว่าในบรรดาเม็ดสีอื่นๆ แต่ละสายพันธุ์น่าจะมีลักษณะเม็ดสีที่ต่างกัน

ตารางที่ 1 ช่วงความยาวคลื่นและความถี่ของแสง

Color	Wavelength interval	Frequency interval
Violet	~ 430 to 380 nm	~ 700 to 790 THz
Blue	~ 500 to 430 nm	~ 600 to 700 THz
Cyan	~ 520 to 500 nm	~ 580 to 600 THz
Green	~ 565 to 520 nm	~ 530 to 580 THz
Yellow	~ 590 to 565 nm	~ 510 to 530 THz
Orange	~ 625 to 590 nm	~ 480 to 510 THz
Red	~ 740 to 625 nm	~ 405 to 480 THz

3.2 YUV เป็นองค์ประกอบสีเชิงเส้น แสดงในระบบยูโรเปียนทีวี (European TV System) ได้รับจากรูปแบบ RGB ดังสมการที่ 2

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ $0 \leq R \leq 1, 0 \leq G \leq 1, 0 \leq B \leq 1$

YUV เป็นองค์ประกอบสีที่ได้จากเซนเซอร์กล้องถ่ายภาพก่อนนำมาแสดงในรูปแบบ RGB โดยแต่ละส่วนแสดงถึง

Y คือค่า Luma หรือค่าความสว่าง (Brightness)

U และ V หรือ Cb และ Cr คือค่า Chrominance ที่ได้จากแสงสี B และ R โดยตรงตามลำดับ

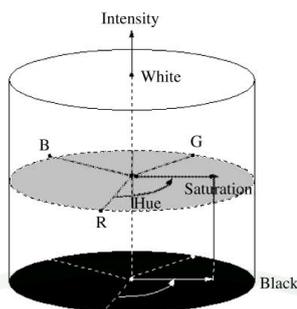
3.3 HSI เป็นองค์ประกอบสีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ภาพถ่าย ซึ่งง่ายต่อการมองของมนุษย์ ระบบ HSI เป็นการแยกข้อมูลของสีออกจากค่าความเข้มแสง ข้อมูลของสีจะถูกแสดงอยู่ในรูปของค่าสีสันและค่าความอิ่มตัวสีดังภาพที่ 1

$$\begin{aligned} H &= \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(G - B)}{(R - G) + (R - B)} \right) \\ S &= 1 - \frac{\min(R, G, B)}{I} \\ I &= \frac{(R + G + B)}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

Hue (H) คือค่าสีสันแสดงถึงค่าพื้นฐานของสี ซึ่งตอบสนองต่อกระจายตัวของสเปกตรัมในความยาวคลื่นของแสงโดยตรง สามารถบอกถึงตำแหน่งค่าสูงสุดในการกระจายตัวของสเปกตรัม

Saturate (S) คือค่าความอิ่มตัวสีเป็นค่าวัดความบริสุทธิ์ของสี และบอกค่าของแสงสีขาวที่ผสมอยู่ในค่าสีสันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวของสเปกตรัม

Intensity (I) คือส่วนความเข้มของแสงจะถูกแสดงอยู่ในค่าความเข้มสีของภาพ



ภาพที่ 2 แลบสี HIS

ที่มา: Cheng (2001)

Cheng (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแยกส่วนภาพด้วยองค์ประกอบสีของภาพเป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญมากในการวิเคราะห์ภาพถ่ายและการจดจำรูปแบบกล่าวถึงคุณสมบัติที่แตกต่างของสีแต่ละประเภทปัญหาในการนำกระบวนการทางสีไปใช้ในการแยกภาพและจุดเด่นจุดด้อยของแลบสีในรูปแบบต่างๆซึ่งนำมาเลือกใช้ภายใต้สภาพแวดล้อมปิด สภาวะแสงจากหลอด หลอดฟลูออเรสเซนต์

4. การปรับปรุงคุณภาพและขจัดสัญญาณรบกวนของภาพ

4.1 ตัวกรองมัธยฐาน (Median Filter) พิจารณาแต่ละจุดภาพรอบจุดภาพศูนย์กลางภายในกรอบภาพขนาดเมทริกซ์ (Matrix) 3×3 , 5×5 หรือ 7×7 นำค่าของจุดภาพทั้งหมดนำมาจัดเรียงลำดับจากน้อยไปหามากตามจำนวนจุดภาพ แล้วหาค่าที่ลำดับ $n/2$ แทนที่ค่าที่ลำดับ $n/2$ ที่จุดภาพศูนย์กลาง

1	8	15	22	29	36	43
2	9	16	23	30	37	44
3	10	17	24	31	38	45
4	11	18	25	32	39	46
5	12	19	26	33	40	47
6	13	20	27	34	41	48
7	14	21	28	35	42	49

ค่าใกล้เคียงเรียงโดยรอบ
17, 18, 19, 24, 25, 26, 31, 32 และ 33
ตัวกรองมัลติฐานขนาด 3 x 3
เท่ากับ 25

ภาพที่ 3 ตัวกรองมัลติฐานขนาด 3 x 3

5. โมเมนต์ (Moment) ของภาพจากรูปทรงของเมล็ดถั่วเขียว

ด้วยเมล็ดถั่วเขียวมีลักษณะที่มีรูปทรงตันและผิวที่บิดเบี้ยวการใช้โมเมนต์ในการวิเคราะห์เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยให้วิเคราะห์จำแนกลักษณะประเภทของวัตถุจากภาพถ่ายได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถวัดความแตกต่างในรูปทรงคือการนำค่าโมเมนต์มาใช้ โดยค่าโมเมนต์มีนิยามหลายแบบ

นิยามพื้นฐานของโมเมนต์ในพื้นที่ 2 มิติจากลำดับโมเมนต์ลำดับที่ $(p + q)^{\text{th}}$ ในฟังก์ชันต่อเนื่อง (Continuous Integral) การกระจายตัวของความหนาแน่น (Density Distribution) ดังสมการที่ 4

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q \rho(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

เมื่อ $\rho(x, y)$ เป็น ค่าความหนาแน่นในตำแหน่ง (x, y) โมเมนต์นี้มีค่าต่างไปเมื่อภาพที่ปรากฏถูกเลื่อนหรือขยาย ดังนั้นจึงมีการโมเมนต์โมเมนต์แบบใหม่ คือ

โมเมนต์ศูนย์กลาง (Central Moment) เป็นค่าที่เกิดขึ้นจากระยะห่างจะจุดศูนย์กลางโดยรอบของวัตถุถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบ ดังสมการที่ 5

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q \rho(x, y) d(x - \bar{x}) d(y - \bar{y}) \quad (5)$$

เมื่อ

$$\bar{x} = m_{10}/m_{00}, \bar{y} = m_{01}/m_{00} \quad (6)$$

สมการที่ 6 คือตำแหน่งศูนย์กลางของวัตถุภายใต้การเคลื่อนที่ของวัตถุในระนาบ 2 มิติ

$$\begin{aligned} x' &= x - \alpha, \\ y' &= y - \beta, \end{aligned} \quad \alpha, \beta - \text{ค่าคงที่} \quad (7)$$

ภายใต้การเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติตั้งสมการที่ 7 สามารถสรุปได้ว่าโมเมนต์ศูนย์กลางเป็นค่าที่ไม่แปรปรวนตามการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติในสมการที่ 5 สามารถเขียนในรูปโมเมนต์ทั่วไป 4 ลำดับแรกได้ตั้งสมการที่ 8

$$\begin{aligned} \mu_{00} &= m_{00} \equiv \mu, \mu_{10} = \mu_{01} \equiv 0, \\ \mu_{20} &= m_{20} - \mu\bar{x}^2, \mu_{11} = m_{11} - \mu\bar{x}\bar{y}, \mu_{02} = m_{02} - \mu\bar{y}^2, \\ \mu_{30} &= m_{30} - 3m_{20}\bar{x} + 2\mu\bar{x}^3, \\ \mu_{21} &= m_{21} - m_{20}\bar{y} - 2m_{11}\bar{x} + 2\mu\bar{x}^2\bar{y}, \\ \mu_{12} &= m_{12} - m_{02}\bar{x} - 2m_{11}\bar{y} + 2\mu\bar{x}\bar{y}^2, \\ \mu_{03} &= m_{03} - 3m_{02}\bar{y} + 2\mu\bar{y}^3 \end{aligned} \quad (8)$$

ตามทฤษฎีพื้นฐานรูปแบบพีชคณิตและอินแวเรียนต์ (Algebraic Forms and Invariants) นำมาประยุกต์ใช้กับโมเมนต์เพื่อกำหนดโมเมนต์อินแวเรียนต์โดยเอกพันธ์พหุนาม (Homogeneous Polynomial) ของ 2 ตัวแปร u และ v แสดงในสมการที่ 9 เรียกว่ารูปแบบพีชคณิตฐานสอง (binary algebraic form) หรือเรียกอีกอย่างว่ารูปแบบทวิภาค (binary form) ของลำดับที่ p ถูกริเริ่มโดย Cayley (1854) และกล่าวถึงใน Crilly (1986)

$$f = a_{p0}u^p + \binom{p}{1}a_{p-1,1}u^{p-1}v + \binom{p}{2}a_{p-2,2}u^{p-2}v^2 + \dots + \binom{p}{2}a_{1,p-1}uv^{p-1} + a_{0p}v^p \quad (9)$$

สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายตั้งสมการที่ 10

$$f \equiv (a_{p0}; a_{p-1,1}; \dots; a_{1,p-1}; a_{0p})(u, v)^p \quad (10)$$

เอกพันธ์พหุนาม $I(a)$ ของ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficiency) ที่ a_{p0}, \dots, a_{0p} เป็นพีชคณิตอินแวเรียนต์ (algebraic invariants) ของค่าน้ำหนัก (weight; w) ถ้า

$$I(a'_{p0}, \dots, a'_{0p}) = \Delta^w I(a_{p0}, \dots, a_{0p}) \quad (11)$$

เมื่อ a'_{p0}, \dots, a'_{0p} คือค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ที่ได้จากการแทนค่าตามการเปลี่ยนรูปแบบเชิงเส้นทั่วไป และ w เป็นจำนวนเต็มใดๆในสมการที่ 11

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix}, \text{ เมื่อ } \Delta = \begin{vmatrix} \alpha & \gamma \\ \beta & \delta \end{vmatrix} \neq 0 \quad (12)$$

ถ้า $w = 0$ ค่าอินแวเรียนต์นี้จะถูกเรียกว่า ค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์ (absolute invariant) ถ้า $w \neq 0$ ค่าอินแวเรียนต์นี้จะถูกเรียกว่า ค่าสัมพัทธ์อินแวเรียนต์ (relative invariant) และ Δ อาจไม่ถูกจำกัดให้เป็นปัจจัยของการเปลี่ยนแปลง โดยการขจัด Δ ระหว่างค่าสัมพัทธ์อินแวเรียนต์ทั้งสอง ทำให้ค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์สามารถปรากฏค่าตลอด

ในการศึกษาเกี่ยวกับค่าอินแวเรียนต์ สามารถช่วยได้มากในการเริ่มต้นในกลุ่มของตัวแปร x และ y อื่นๆดังสมการที่ 13

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบในสมการที่ 13 จะถูกเรียกเป็นการเปลี่ยนรูปแบบโคเกรเดียนต์ (cogradient transformation) และสมการที่ 12 เป็นการเปลี่ยนรูปแบบคอนทราเกรเดียนต์ (contragradient transformation) ตัวแปร x, y เป็นตัวแปรโคแวเรียนต์ (covariant variable) และ u, v เป็นตัวแปรคอนทราแวเรียนต์ (contragradient variable) ตอบสนองต่อความสัมพันธ์ของค่าอินแวเรียนต์ดังสมการที่ 14

$$ux + vy = u'x' + v'y' \quad (14)$$

ทฤษฎีพื้นฐานของโมเมนต์อินแวเรียนต์ (Moment Invariants) จากฟังก์ชันกำเนิดโมเมนต์ (Moment generating function) ด้วยแฟกเตอร์เอ็กซ์โพเนนเชียล (exponential factor) จัดอยู่ในรูปแบบลำดับตั้งสมการที่ 15

$$M(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{p!} (ux + vy)^p \rho(x, y) dx dy \quad (15)$$

จัดอยู่ในรูปผลบวกได้ตั้งสมการที่ 16

$$M(u, v) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{p!} (u_{p0}, \dots, u_{0p})(u, v)^p \quad (16)$$

โดยประยุกต์การเปลี่ยนแปลงรูปแบบในสมการที่ 13 ถึง 15 และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของ x' และ y' ในแฟกเตอร์การเปลี่ยนแปลงรูปแบบ $ux + vy$ โดย u' และ v' หรือเท่ากันโดยประยุกต์สมการที่ 12 และสมการที่ 13 ทั้งคู่ในสมการที่ 15 ทำให้ได้ผลลัพธ์ตั้งสมการที่ 17

$$M_1(u', v') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{p!} (u'x' + v'y')^p \rho'(x', y') \frac{1}{|J|} dx' dy' \quad (17)$$

เมื่อ $\rho'(x', y') \equiv \rho(x, y)$, $|J|$ คือค่าสัมบูรณ์ของจาโคเบียน (Jacobian) ของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบในสมการที่ 15 และ $M_1(u', v')$ คือ ฟังก์ชันกำเนิดโมเมนต์หลังจากผ่านการเปลี่ยนแปลงรูปแบบจัดให้อยู่ในรูปผลบวกตามสมการที่ 18

$$M_1(u', v') = \frac{1}{|J|} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{p!} (u'_{p0}, \dots, u'_{0p})(u', v')^p \quad (18)$$

การประยุกต์โมเมนต์อินแวเรียนต์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของเปลี่ยนแปลงขนาดบนระนาบ 2 มิติ (Similitude Moment Invariants) สมการที่ 19 แสดงถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนขนาดบนระนาบ 2 มิติ

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \alpha - \text{ค่าคงที่} \quad (19)$$

ตามสมการที่ 9 แต่ละค่าสัมประสิทธิ์ของรูปแบบพีชคณิตใดๆเป็นค่าอินแวเรียนต์

$$a'_{pq} = \alpha^{p+q} a_{pq} \quad (20)$$

เมื่อ α ไม่เป็นดีเทอร์มิแนนต์ (Determinant) สำหรับ โมเมนต์อินแวเรียนต์จะเท่ากับสมการที่ 21

$$\mu'_{pq} = \alpha^{p+q+2} \mu_{pq} \quad (21)$$

โดยจัด α ระหว่างความสัมพันธ์ของโมเมนต์ที่ลำดับศูนย์ในสมการที่ 8 ทำให้ได้ตามสมการที่ 22

$$\mu' = \alpha^2 \mu \quad (22)$$

จะได้ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงขนาดตั้งสมการที่ 23

$$\frac{\mu'_{pq}}{(\mu')^{(p+q)/2+1}} = \frac{\mu_{pq}}{(\mu)^{(p+q)/2+1}}, \quad p + q = 2, 3, \dots \quad (23)$$

$$\text{และ } \mu'_{10} = \mu'_{01} \equiv 0$$

ทฤษฎีพื้นฐาน โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากภายใต้การเปลี่ยนรูปแบบเชิงตั้งฉากหรือการหมุน (rotation) ตามการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการหมุนบนระนาบ 2 มิติ (Orthogonal Moment Invariants) ดังสมการที่ 24

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (24)$$

เมื่อกำหนดให้

$$J = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} = +1 \quad (25)$$

ฉะนั้นโมเมนต์อินแวเรียนต์จะแสดงค่าเช่นเดียวกับในค่าพีชคณิตอินแวเรียนต์ ถ้าจัดให้โมเมนต์ตามรูปแบบสมการที่ 10 จะได้ดังสมการที่ 26

$$(u_{p0}, \dots, u_{0p})(u, v)^p \quad (26)$$

ภายใต้การเปลี่ยนรูปแบบคอนทราแกรเดียนต์ดังสมการที่ 27

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} \quad (27)$$

จัดรูปสมการของโมเมนต์อินแวเรียนต์ตามกระบวนการพีชคณิตทั้ง u, v และ u', v' ตามการเปลี่ยนแบบรูปแบบ

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} U' \\ V' \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} \quad (28)$$

จากนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเชิงตั้งฉากจัดอยู่ในรูปความสัมพันธ์อย่างง่ายดังสมการที่ 29

$$U' = Ue^{-i\theta}, V' = Ve^{i\theta} \quad (29)$$

แทนที่สมการที่ 28 และสมการที่ 29 ในสมการที่ 26 จะได้เอกลักษณ์ดังสมการที่ 30

$$\begin{aligned} (I_{p0}, \dots, I_{0p})(U, V)^p &\equiv (\mu_{p0}, \dots, \mu_{0p})(u, v)^p \equiv (\mu'_{p0}, \dots, \mu'_{0p})(u', v')^p \\ &\equiv (I'_{p0}, \dots, I'_{0p})(Ue^{-i\theta}, Ve^{i\theta})^p \end{aligned} \quad (30)$$

เมื่อ I_{p0}, \dots, I_{0p} และ I'_{p0}, \dots, I'_{0p} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่สมนัย (Corresponding coefficients) หลังจากการแทนค่าจากเอกลักษณ์ใน U และ V ค่าสัมประสิทธิ์ของเอกนาม $U^{p-r}V^r$ ทั้งสองด้านจะต้องเหมือนกัน ฉะนั้น

$$\begin{aligned} I'_{p0} &= e^{ip\theta} I_{p0}; \quad I'_{p-1,1} = e^{i(p-2)\theta} I_{p-1,1}; \quad \dots; \\ I'_{1,p-1} &= e^{-i(p-2)\theta} I_{1,p-1}; \quad I'_{0p} = e^{-ip\theta} I_{0p} \end{aligned} \quad (31)$$

สมการที่ 31 เหล่านี้เป็นโมเมนต์อินแวเรียนต์อิสระเชิงเส้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปแบบเชิงตั้งฉาก และ $\Delta = e^{i\theta}$ ที่ไม่เป็นดิเทอร์มิแนนท์ของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบ

จากเอกลักษณ์สองพจน์แรกในสมการที่ 31 สามารถแสดงได้ว่า $I_{r,p-r}$ เป็นค่าสังยุคซับซ้อน (Complex conjugate) ของ $I_{p-r,r}$ ดังสมการที่ 32

$$\begin{aligned}
 I_{p0} &= \mu_{p0} - i \binom{p}{1} \mu_{p-1,1} - \binom{p}{2} \mu_{p-2,2} + i \binom{p}{3} \mu_{p-3,3} \\
 &\quad + \cdots + (-i)^p \mu_{0p}, \\
 I_{p-1,1} &= (\mu_{p0} + \mu_{p-2,2}) - i(p-2)(\mu_{p-1,1} + \mu_{p-3,3}) \\
 &\quad + \cdots + (-i)^{p-2} (\mu_{2,p-2} + \mu_{0p}), \\
 I_{p-2,2} &= (\mu_{p0} + 2\mu_{p-2,2} + \mu_{p-4,4}) - i(p-4)(\mu_{p-1,1} + 2\mu_{p-3,3} + \mu_{p-5,5}) \\
 &\quad + \cdots + (-i)^{p-4} (\mu_{4,p-4} + 2\mu_{2,p-2} + \mu_{0p}), \\
 I_{p-r,r} &= [(\mu_{p0}; \mu_{p-2,2}; \dots; \mu_{p-2r,2r})(1,1)^r; \\
 &\quad (\mu_{p-1,1}; \mu_{p-3,3}; \dots; \mu_{p-2r-1,2r+1})(1,1)^r; \dots; \\
 &\quad (\mu_{2r,p-2r}; \mu_{2r+2,p-2r-2}; \dots; \mu_{0p})(1,1)^r] (1, -i)^{p-2r}, \quad p-2r > 0 \\
 I_{p/2,p/2} &= \mu_{p0} + \binom{p/2}{1} \mu_{p-2,2} + \binom{p/2}{2} \mu_{p-4,4} + \cdots + \mu_{0p}, \quad p = \text{จำนวนคู่}
 \end{aligned} \tag{32}$$

อาจจะระบุได้ว่า I เป็นฟังก์ชันเส้นตรงอิสระเชิงเส้นของ μ และในทำนองเดียวกันสำหรับการเปลี่ยนแปลงไม่เชิงตั้งฉากเช่นในการหมุนของภาพสะท้อน ดังสมการที่ 33

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{vmatrix} = -1 \tag{33}$$

จะได้

$$U' = V e^{i\theta}, \quad V' = U e^{-i\theta} \tag{34}$$

และ

$$\begin{aligned}
 I'_{p0} &= e^{-ip\theta} I_{p0}; \quad I'_{p-1,1} = e^{-i(p-2)\theta} I_{p-1,1}; \dots; \\
 I'_{1,p-1} &= e^{i(p-2)\theta} I_{1,p-1}; \quad I'_{0p} = e^{ip\theta} I_{0p}
 \end{aligned} \tag{35}$$

เมื่อ I_{p0}, \dots, I_{0p} และ I'_{p0}, \dots, I'_{0p} เป็นดังเช่นสมการที่ 31

สำหรับการศึกษาคั้งแรกเกี่ยวกับค่าอินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากโดย G. Boole และให้สมการดังกล่าวกับ J. J. Sylvester กล่าวใน Elliott (1913)

จากสมการที่ 31 และ 35 สามารถพิสูจน์ได้ตามระบบของโมเมนต์อินแวเรียนต์โดยจัดแฟกเตอร์ $e^{i\theta}$ สำหรับลำดับที่สองของโมเมนต์ จะได้สองค่าอินแวเรียนต์อิสระ (Independent Invariants) ดังสมการที่ 36

$$I_{11}, \quad I_{20}I_{02} \quad (36)$$

สำหรับลำดับที่สาม โมเมนต์ จะได้สามค่าอินแวเรียนต์อิสระดังสมการที่ 37

$$I_{30}I_{03}, \quad I_{21}I_{12}, \quad (I_{30}I_{12}^2 + I_{21}^2I_{03}) \quad (37)$$

ในลำดับที่สี่เท่านั้นที่ยังคงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ในลำดับที่สามดังสมการที่ 38

$$\frac{1}{i}(I_{30}I_{12}^2 - I_{21}^2I_{03}) \quad (38)$$

ความสัมพันธ์ทางพีชคณิตที่มีอยู่ระหว่างสี่ค่าอินแวเรียนต์ในสมการที่ 37 และสมการที่ 38 จากสามค่าแรกในสมการที่ 37 คือค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์สำหรับการหมุนที่เหมาะสมและไม่เหมาะสม แต่ในค่าสุดท้ายในสมการที่ 38 เป็นค่าอินแวเรียนต์ภายใต้การหมุนที่เหมาะสมเท่านั้นและเปลี่ยนสัญญาณภายใต้การหมุนที่ไม่เหมาะสม สิ่งนี้เรียกว่าเป็นค่าอินแวเรียนต์บิดเบี้ยว ฉะนั้นจะช่วยให้มากสำหรับภาพสะท้อน และอีกหนึ่งค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์อิสระจะได้จากลำดับที่สองและลำดับที่สามของโมเมนต์ดังสมการที่ 39

$$(I_{20}I_{12}^2 - I_{21}^2I_{02}) \quad (39)$$

สำหรับโมเมนต์ลำดับที่ p^{th} เมื่อ $p \geq 4$ จะเท่ากับ $[p/2]$ เมื่ออินทิกรัลในส่วนของ $p/2$ ค่าอินแวเรียนต์จะได้ดังสมการที่ 40

$$I_{p0}I_{0p}; \quad I_{p-1,1}I_{1,p-1}; \quad \dots; \quad I_{p-r,r}I_{r,p-r}; \quad \dots \quad (40)$$

ถ้า p เป็นจำนวนคู่จะได้ดังสมการที่ 41 เช่นกัน

$$I_{p/2}I_{p/2}; \quad (41)$$

และเมื่อรวมกับลำดับที่ $(p-2)^{\text{th}}$ ของโมเมนต์จะได้ ค่าอินแวเรียนต์ $[p/2-1]$ เช่นกันดังสมการที่ 42

$$\begin{aligned} & (I_{p-1,1}I_{0,p-2} + I_{1,p-1}I_{p-2,0}), \\ & (I_{p-2,2}I_{1,p-3} + I_{2,p-2}I_{p-3,1}), \\ & (I_{p-r,r}I_{r-1,p-r+1} + I_{r,p-r}I_{p-r+1,r-1}), p-2r > 0 \end{aligned} \quad (42)$$

รวมกับค่าโมเมนต์ลำดับที่สองอื่นๆ ถ้า p เป็นจำนวนคี่จะได้ดังสมการที่ 43

$$(I_{[p/2],[p/2]+1}^2 I_{20} + I_{[p/2]+1,[p/2]}^2 I_{02}) \quad (43)$$

และถ้า p เป็นจำนวนคู่จะได้ดังสมการที่ 44

$$(I_{[p/2]-1,[p/2]+1}^2 I_{20} + I_{[p/2]+1,[p/2]-1}^2 I_{02}) \quad (44)$$

ด้วยเหตุนี้จะได้ค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์อิสระที่ $(p+1)$ เสมอ

ยกตัวอย่างในสมการที่ 31 และ 32 กำหนดให้ $p=2$ จะได้โมเมนต์อินแวเรียนต์ดังสมการที่ 45

$$\begin{aligned} (\mu'_{20} - \mu'_{02}) - i2\mu'_{11} &= e^{i2\theta}[(\mu_{20} - \mu_{02}) - i2\mu_{11}], \\ (\mu'_{20} - \mu'_{02}) + i2\mu'_{11} &= e^{-i2\theta}[(\mu_{20} - \mu_{02}) + i2\mu_{11}], \\ \mu'_{20} - \mu'_{02} &= \mu_{20} + \mu_{02} \end{aligned} \quad (45)$$

ถ้ามุม θ ถูกกำหนดจากสมการแรกในสมการที่ 45 ก็จะทำให้ $\mu'_{11} = 0$ แล้วจึงได้ตามสมการที่ 46

$$\tan 2\theta = \frac{+2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \quad (46)$$

แกน x' และ y' ที่กำหนดโดยค่าใดๆ ของ θ ที่เฉพาะเจาะจงอย่างเหมาะสมเรียกว่าเป็นแกนหลักของรูปแบบ ด้วยการเพิ่มข้อจำกัด อย่างเช่น $\mu'_{20} > \mu'_{02}$ และ $\mu'_{30} > 0$ ทำให้มุม θ สามารถกำหนดได้อย่างมีเอกลักษณ์ได้

การเลือกคุณสมบัติของรูปแบบที่เพิ่มขึ้น ถ้าโมเมนต์ในระดัที่ที่สูงขึ้นโดยสมการที่ 31 และสมการที่ 32 สำหรับ $p = 3$ จะได้โมเมนต์อินแวเรียนต์ดังสมการที่ 47

$$\begin{aligned}(\mu'_{30} - 3\mu'_{12}) - i(3\mu'_{21} - \mu'_{03}) &= e^{i3\theta}[(\mu_{30} - 3\mu_{12}) - i(3\mu_{21} - \mu_{03})], \\ (\mu'_{30} + \mu'_{12}) - i(\mu'_{21} + \mu'_{03}) &= e^{i\theta}[(\mu_{30} + \mu_{12}) - i(\mu_{21} + \mu_{03})]\end{aligned}\quad (47)$$

ความสัมพันธ์ของสมการทั้งสองที่เหลืออยู่ ถ้ามุม θ และ โมเมนต์ลำดับที่ 3 ทั้งสี่ค่า ที่ทราบค่าอยู่แล้ว ก็จะเหมือนโมเมนต์อื่นๆตามแกนหลักที่สามารถคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ข้างต้น

ในกระบวนการข้างต้น เนื่องจากองค์ประกอบการจัดวางตัวอย่างอิสระเป็นที่ชัดเจนว่าตัวเลข 6 และ 9 ไม่สามารถแยกความโดดเด่นได้ ถ้ากระบวนการนี้แก้ไขเล็กน้อยตามดังต่อไปนี้จะสามารถหาความแตกต่างระหว่างตัวเลข 6 จากตัวเลข 9 ได้ขณะที่ยังคงคุณสมบัติความเป็นอิสระของการจัดวางที่มีขอบเขตจำกัด โดยค่ามุม θ ยังคงกำหนดโดยสมการที่ 46 แต่ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเมื่อ $|\theta| < 45$ องศาการใช้ของโมเมนต์ลำดับที่สามในกรณีนี้ยังเป็นสิ่งจำเป็น

ถ้ารูปแบบมีลักษณะ เช่น วงกลมสมมาตร (circular symmetry) หรือ รูปแบบ n ส่วนทบสมมาตรแบบหมุน (n - fold rotation symmetry) มุม θ ที่กำหนดในสมการที่ 46 ไม่สามารถใช้ได้รูปแบบนี้จะแสดงค่าเท่ากับศูนย์สำหรับทุกรูปแบบเช่นนี้ ยกตัวอย่าง รูปแบบ 3 ส่วนทบสมมาตรแบบหมุน ถ้ารูปแบบนี้ถูกหมุนไปรัศมี $2\pi/3$ รอบจุดศูนย์กลาง จะได้ค่าเอกลักษณ์เหมือนกับต้นแบบสมการแรกในสมการที่ 45 มีสองค่าเท่านั้นที่เป็นไปได้สำหรับมุม θ ที่ทำให้ส่วนจินตภาพของ I'_{20} เท่ากับศูนย์ได้นั้นคือทำให้ μ'_{11} เท่ากับศูนย์ ภายใต้ความต้องการสมมาตรนี้จึงมากกว่าสองค่าที่เป็นไปได้ที่ทำให้ส่วนจินตภาพของ I'_{20} เท่ากับศูนย์ ดังนั้น ความเป็นไปได้อย่างเดียวคือจะมี $I'_{20} \equiv 0$ และ $I_{20} \equiv 0$ ในกรณีรูปแบบ 3 ส่วนทบสมมาตรแบบหมุนนี้สมการแรกในสมการที่ 47 สามารถใช้กำหนดมุม θ และแกนหลักได้โดยทำให้ $3\mu'_{21} - \mu'_{03}$ เท่ากับศูนย์

ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉาก (Absolute Orthogonal Moment Invariants) ที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นสามารถประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับการจัดวางรูปแบบของการระบุรูปแบบที่เป็นอิสระ ถ้าค่าอินแวเรียนต์เหล่านี้รวมกับค่าอินแวเรียนต์ของโมเมนต์ศูนย์กลางแล้ว การระบุรูปแบบสามารถเป็นอิสระจากการเคลื่อนตำแหน่งที่ตั้ง ขนาดของวัตถุที่เปลี่ยนแปลง และการจัดวางรูปแบบต่างๆ ได้สำหรับลำดับที่สองและสามของโมเมนต์จะปรากฏค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉาก 6 ค่า ดังสมการที่ 48

$$\begin{aligned}
 & \mu_{20} + \mu_{02}, \\
 & (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2, \\
 & (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2, \\
 & (\mu_{30} - \mu_{12})^2 + (\mu_{21} - \mu_{03})^2, \\
 & (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12})((\mu_{30} - \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} - \mu_{03})^2) + (3\mu_{21} - \\
 & \quad \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03})(3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2), \\
 & (\mu_{20} - \mu_{02})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2) + 4\eta_{11}(\mu_{30} - \mu_{12})(\mu_{21} - \mu_{03})
 \end{aligned} \tag{48}$$

และค่าสัมบูรณ์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากที่ทนต่อภาพที่บิดเบี้ยวดังสมการที่ 49

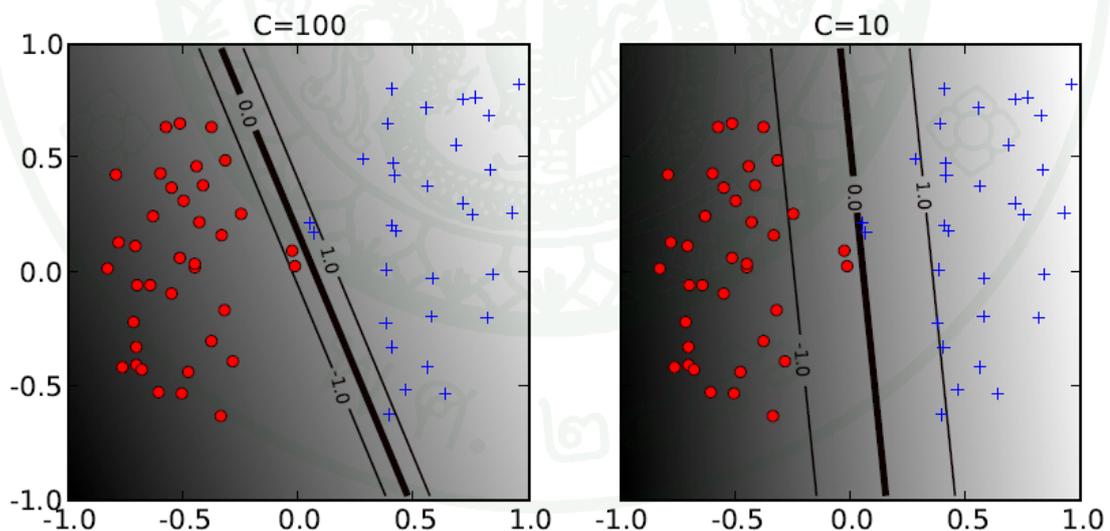
$$\begin{aligned}
 & (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12})((\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2) \\
 & \quad - (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03})(3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2)
 \end{aligned} \tag{49}$$

Hu (1962) ได้ศึกษาการนำโมเมนต์อินแวเรียนต์มาใช้ในการกับการจดจำรับรู้รูปแบบของตัวอักษรจนได้ลำดับโมเมนต์อินแวเรียนต์ทั้ง 7 ลำดับโดยวิเคราะห์จากสามลำดับแรกของโมเมนต์ศูนย์กลางในภาพระนาบ 2 มิติซึ่งเป็นอิสระในเรื่องของตำแหน่งที่ตั้งขนาดของวัตถุและการวางตัวบนระนาบในองศาที่แตกต่างกันบนภาพถ่ายได้ Flusser and Suk (1994) ได้คิดค้นเครื่องมือใหม่ที่เรียกว่าค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าโมเมนต์ของ Hu ในลำดับที่ 1 ถึง 4 มาใช้ในการจดจำตัวอักษร Sivaramakrishna (1997) ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของ Hu โมเมนต์อินแวเรียนต์ภายใต้การบิดเบี้ยวลาดเอียงและมอมุมที่เปลี่ยนไปของวัตถุและอธิบายลักษณะโมเมนต์ของ Hu สามารถใช้กับการเข้ากันได้ของวัตถุที่บิดเบี้ยวลาดเอียงและมอมุมที่เปลี่ยนไป Flusser (2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับโมเมนต์อินแวเรียนต์บนการการหมุนอย่างอิสระโดยพิจารณาโมเมนต์ซับซ้อนและพบว่าระบบของ Hu ยังไม่เป็นอิสระและไม่สมบูรณ์ Flusser and Suk (2006)

ศึกษาการหมุนตัวของโมเมนต์อินเวเรียนต์สำหรับการรับรู้รูปแบบของวัตถุที่สมมาตรไม่สามารถใช้ได้เพราะ โมเมนต์ส่วนมากของวัตถุที่สมมาตรไม่ปรากฏค่าใดๆ

6. การคัดแยกและการจำแนก

ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector machine; SVM) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ง่ายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำแนกหรือคัดแยกวัตถุหลายประเภทออกจากกันตามลักษณะแต่ละประเภทโดยสร้างแนวเส้นแบ่ง (Hyperplan) จากฟังก์ชันเคอร์เนล $K(x, y)$ ในรูปแบบเชิงเส้นและรูปแบบไม่เชิงเส้น สำหรับในกรณีไม่สามารถแยกคลาสออกจากกันได้ (non-separable) เราสามารถกำหนดพารามิเตอร์ C (Error Cost parameter) เพื่อใช้ในการควบคุมสิ่งเกิดขึ้นระหว่างข้อมูลผิดพลาดจากการเรียนรู้และระยะห่างจากซัพพอร์ตเวกเตอร์กับแนวเส้นแบ่งและสร้างระยะห่างขึ้นที่เรียกว่าซอฟท์มาร์จิ้น (Soft Margin) เพื่ออนุญาตให้มีข้อมูลที่ผิดพลาดเกิดขึ้นได้บ้าง กรณีเพิ่มค่าพารามิเตอร์ C สูงไปทำให้เกิดการโอเวอร์ฟิต (overfit) ขึ้น หรือน้อยเกินไปทำให้เกิดอันเดอร์ฟิตติ้ง (underfitting) ขึ้นจนเกินไปดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ C ระหว่าง $C=100$ และ $C=10$

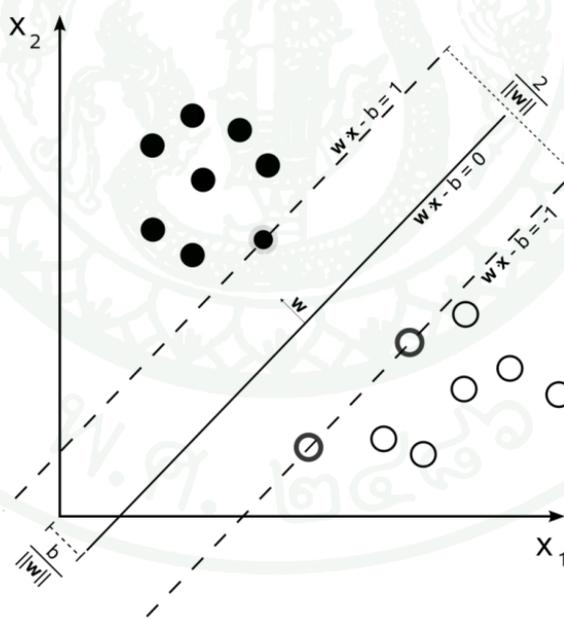
ที่มา: Ben-Hur (2008)

6.1 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมกซิมัมแมจิ้น (Linear Support Vector Machines) เป็นการแบ่งแยกโดยแนวเส้นแบ่งที่แยกข้อมูลแต่ละประเภทออกจากกัน ดังภาพที่ 5 โดยให้เซตของข้อมูลเท่ากับ $\{x_i, y_i\}, x_i \in R^d, y_i \in \{-1, 1\}, i = 0, 1, 2, \dots, n$ มีสมการเส้นตรง (linear equation) ดังสมการที่ 44

$$g(x) = wx_i + b = 0, i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (44)$$

เมื่อ w คือนอร์มอลเวกเตอร์ (normal vector) จากแนวเส้นแบ่งระนาบเกิน ระยะห่างจากระนาบเกินถึงจุดกำเนิดเท่ากับ $\frac{|b|}{\|w\|}$ และ $\|w\|$ คือยูคลิดิเดียนนอร์มและมีระยะห่างจากสองแนวเส้นแบ่งของข้อมูลแต่ละประเภทเท่ากับ $\frac{2}{\|w\|}$ จาก $wx_i + b \geq 1$ สำหรับ x_i ของข้อมูลประเภทแรกและ $wx_i + b \leq -1$ สำหรับ x_i ของข้อมูลประเภทที่สองสามารถจัดรูปได้ดังสมการที่ 45

$$y_i(wx_i + b) - 1 \geq 0, i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (45)$$



ภาพที่ 5 ระยะห่างสูงสุดของแนวเส้นแบ่งระนาบเกินจากตัวอย่างสองกลุ่ม และซัพพอร์ตเวกเตอร์จากตัวอย่างที่อยู่บนแนวเส้น

6.2 ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมกซิมัมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Support Vector Machines) เป็นการแบ่งข้อมูลแต่ละประเภทโดยใช้สมการไม่เชิงเส้นเป็นฟังก์ชันเคอร์เนลให้กับ SVM ที่ใช้ทั่วไป ในภาพที่ 6 แสดงถึงการแบ่งประเภทจากการสร้างเส้นแบ่งโดยสมการไม่เชิงเส้น ยกตัวอย่างฟังก์ชันเคอร์เนลที่นิยมใช้ได้แก่

พหุนามเอกพันธ์ (Homogeneous Polynomial)

$$K(x, y) = (x \cdot y)^d \quad (46)$$

พหุนามไม่เอกพันธ์ (Inhomogeneous Polynomial)

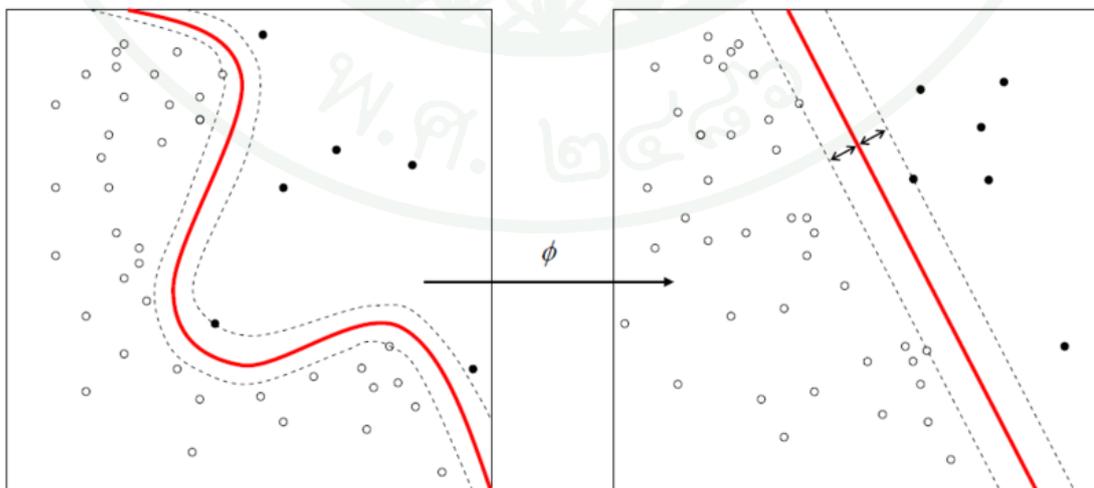
$$K(x, y) = (x \cdot y + 1)^d \quad (47)$$

ฟังก์ชันเกาส์เซียนรัศมีฐานหลัก (Gaussian radial basis function)

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^d), \gamma > 0, \gamma = 1/2\sigma^2 \quad (48)$$

ไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic Tangent)

$$K(x, y) = \tanh(kx \cdot y + c), \gamma > 0, \gamma = 1/2\sigma^2 \quad (49)$$



ภาพที่ 6 SVM แบบฟังก์ชันเคอร์เนลแบบไม่เชิงเส้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้เก็บภาพเมล็ดพันธุ์
 - 1.1 คอมพิวเตอร์พกพาLenovo Y430 จำนวน 1 เครื่อง
 - 1.2 กล้องLogitech Quick Pro จำนวน 1 ตัว
 - 1.3 หลอดตะเกียบขนาด 790 ลูกเมน จำนวน 2 หลอด
 - 1.4 โครงไม้ติดตั้งอุปกรณ์ 1 ชุด
2. ซอฟต์แวร์
 - 2.1 Ubuntu (Lucid Lynx) Version 10.04
 - 2.2 Eclipse IDE (Galileo) Version 3.5
 - 2.3 Python Version 2.6
 - 2.4 OpenCV Version 2.1
 - 2.5 PyML Version 0.7.9

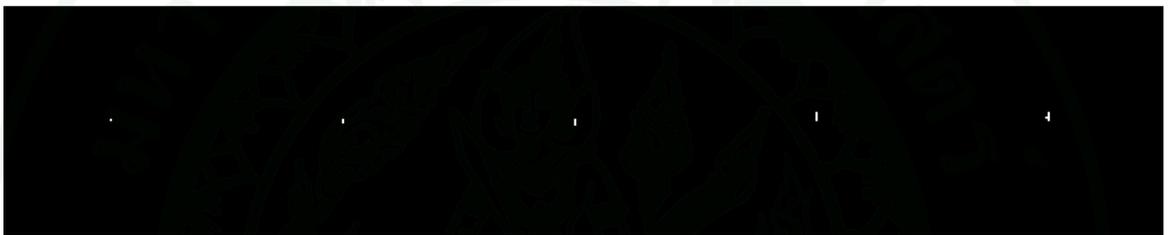


ภาพที่ 7 โครงไม้พร้อมติดตั้งอุปกรณ์

วิธีการ

1. ภาพและการวิเคราะห์ภาพ

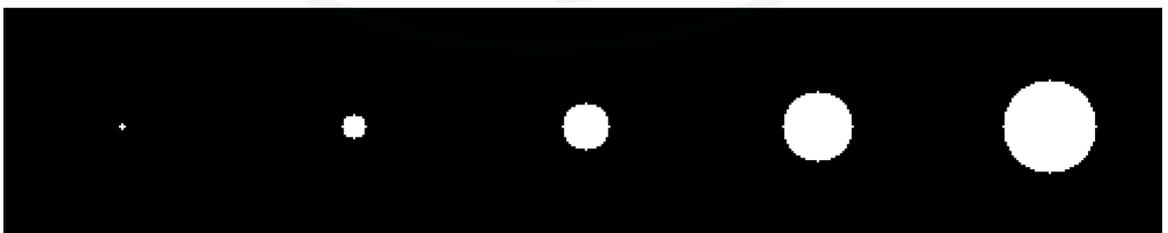
นำภาพจำลองภาพฉายวัตถุบนระนาบสองมิติในรูปจุดภาพที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 8 รูปเส้นตรงดังภาพที่ 9 รูปวงกลมดังภาพที่ 10 รูปวงรีดังภาพที่ 11 รูปสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 12 และรูปหลายเหลี่ยมนำมาทดสอบดังภาพที่ 13 กับค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากทั้ง 7 ลำดับ แสดงในภาคผนวก ข.



ภาพที่ 8 ภาพจำลองรูปจุดภาพที่เพิ่มขึ้น



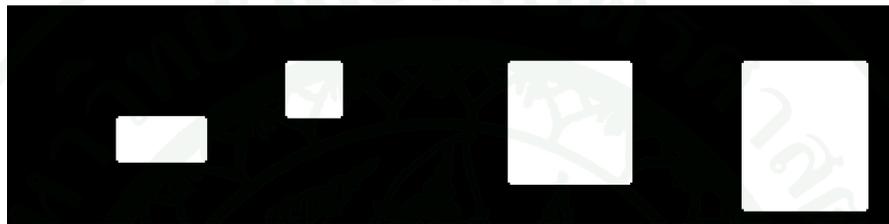
ภาพที่ 9 ภาพจำลองรูปเส้นตรง



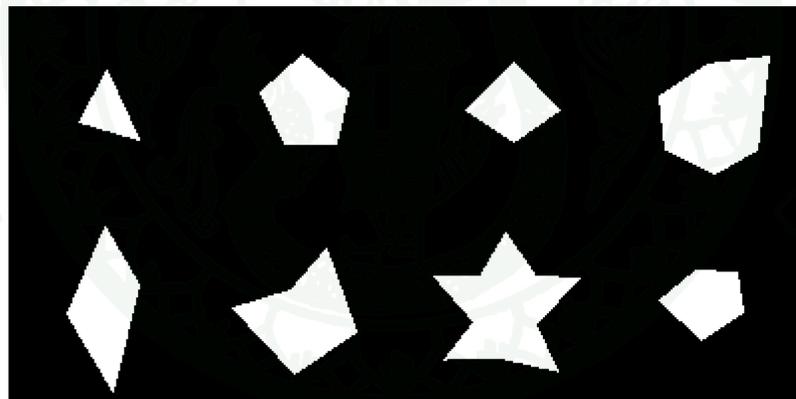
ภาพที่ 10 ภาพจำลองรูปวงกลม



ภาพที่ 11 ภาพจำลองรูปร่างวงรี



ภาพที่ 12 ภาพจำลองรูปสี่เหลี่ยม



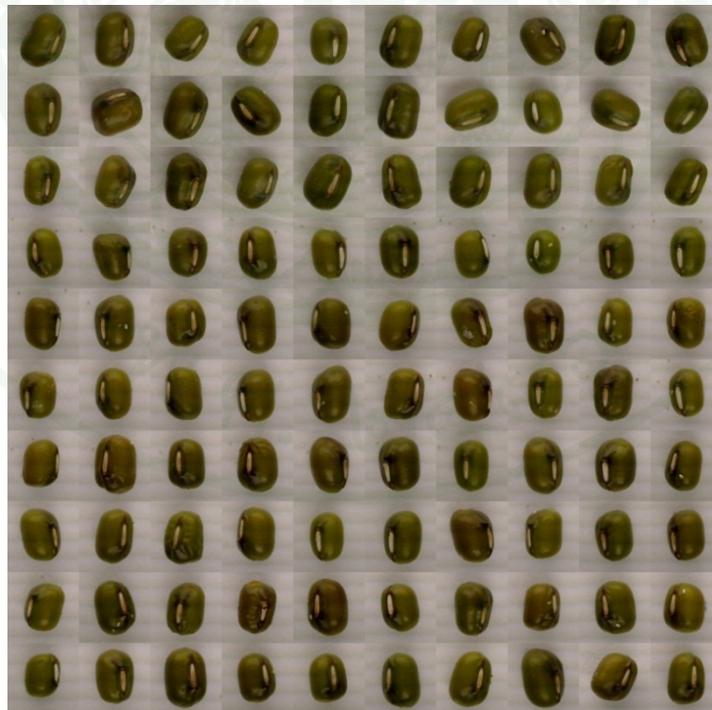
ภาพที่ 13 ภาพจำลองรูปหลายเหลี่ยม

ภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวใช้กล้องควิซิกโปรของลอจitechขนาดภาพเท่ากับ 3264 x 2448 จุดภาพถ่ายภาพถั่วเขียวแต่ละเมล็ดลักษณะการวางตัวแบบไฮลัม (Hilum) ของถั่วเขียว ตั้งเข้าหากล้อง ระยะถ่ายภาพ 48 มิลลิเมตร ตัดภาพเฉพาะเมล็ดเดี่ยวขนาด 500 x 500 จุดภาพ ทั้งสี่สายพันธุ์สายพันธุ์ชยันนาท 72 ดังภาพที่ 14 สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ดังภาพที่ 15 สายพันธุ์อุ้มทอง 1 ดังภาพที่ 16 และสายพันธุ์มทส. 1 ดังภาพที่ 17 นำภาพแต่ละเมล็ดมาแยกพื้นหลังออกจากตัวเมล็ด โดยเปลี่ยนภาพ RGB ที่มีขนาดแถบสีละ 8 บิตต่อจุดภาพเป็นภาพ HSI เพื่อแยกภาพเมล็ดถั่วเขียวออกจากพื้นหลัง

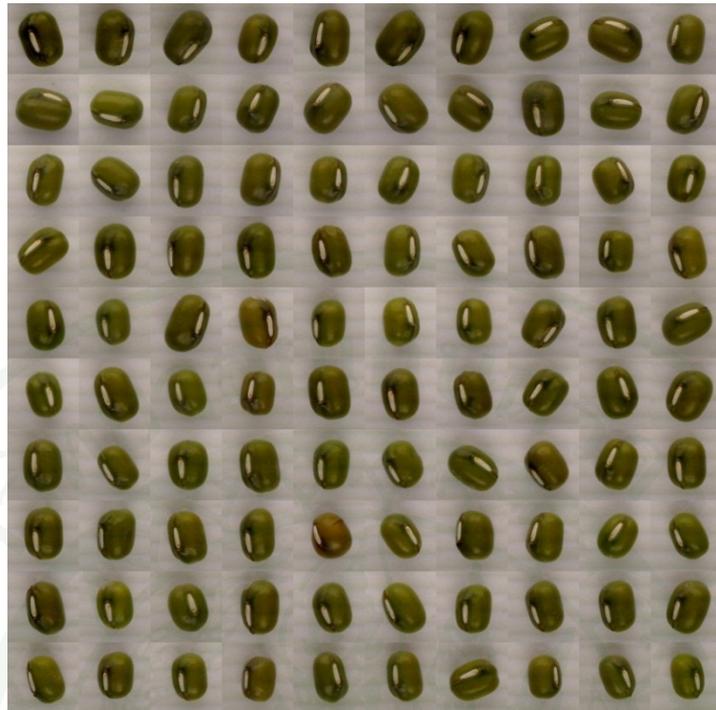
นำภาพส่วนค่าความอึมตัวสีที่ทำให้เมล็ดมีความโดดเด่นกว่าพื้นหลัง ใช้ตัวกรองมัลติสแกนขนาด 3 x 3 จุดภาพเพื่อปรับปรุงภาพและจัดกรองส่วนภาพสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการออก Arias-Castro (2009) ทำให้ส่วนที่เป็นขอบของเมล็ดเด่นชัดขึ้น ตัดส่วนจุดภาพที่มีค่าจุดภาพที่ค่าขีดแบ่งสูงกว่าค่า 100 เพื่อเอาภาพพื้นหลังออก ส่วนที่เหลือปรับให้เป็นค่าสูงสุดเท่ากับ 255 ดังสมการที่ 50

$$dst(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{if } src(x,y) > \text{threshold} \\ \text{max value,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (50)$$

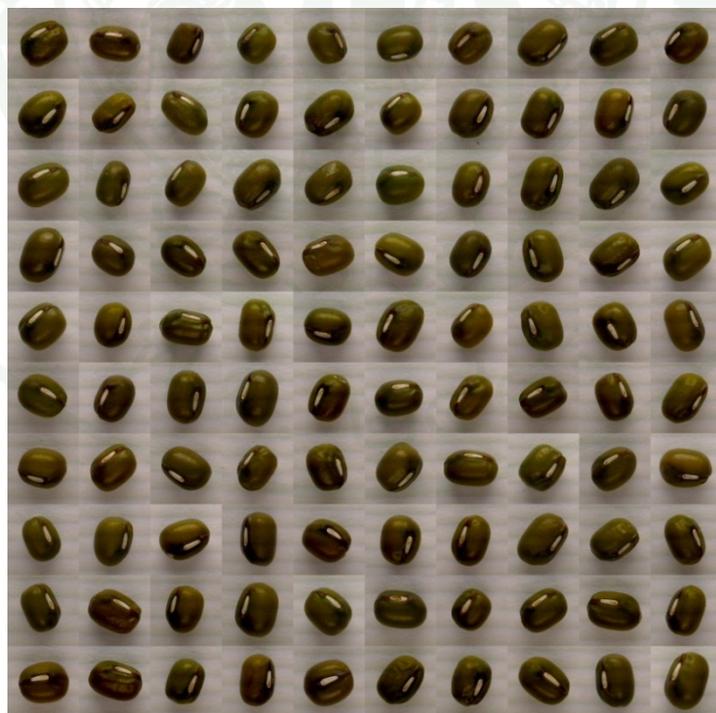
วิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยสีเมล็ด ค่าความแปรปรวนของสีเมล็ด ค่าขนาดพื้นที่ในระนาบสองมิติของเมล็ด และค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวรีลเชิงตั้งฉากทั้ง 7 ลำดับดังสมการที่ 48 และ 49 ของเมล็ดถั่วเขียว พันธุ์ชัชวาท 72 พันธุ์กำแพงแสน 2 พันธุ์อุทอง 1 และพันธุ์มสท.1 ปรับข้อมูลที่ได้มาทั้งหมดให้มีหน่วยวัดที่เท่ากันโดยทำให้เป็นบรรทัดฐานตามค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวรีลเชิงตั้งฉากทั้ง 7 ลำดับอยู่ในช่วงระหว่างค่า -1 ถึง 1 เพื่อใช้ในการคัดเลือกลักษณะเด่นถัดไป



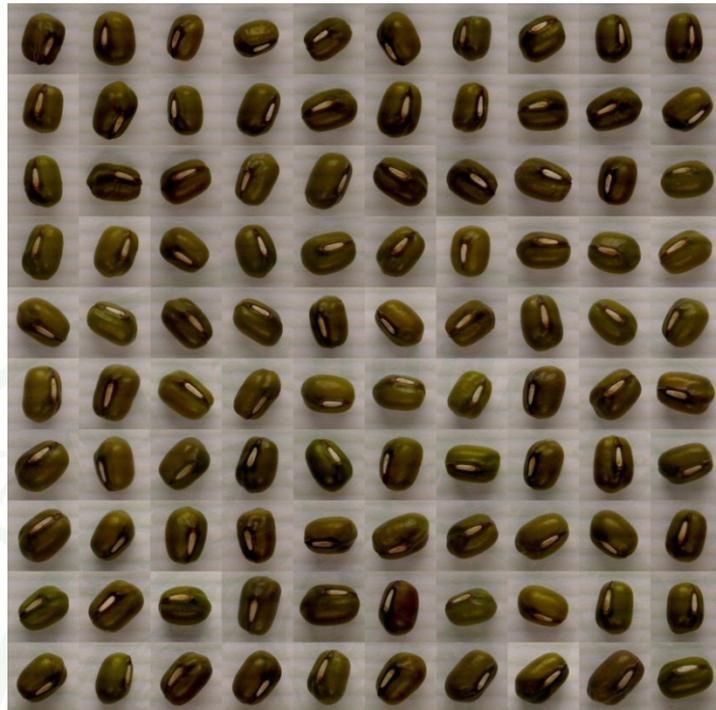
ภาพที่ 14 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ ชัชวาท 72



ภาพที่ 15 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ กำแพงแสน 2



ภาพที่ 16 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ อุ้มทอง 1



ภาพที่ 17 เมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ มทส. 1

2. วิธีคัดเลือกลักษณะเด่นโดยอัตราส่วนฟิชเชอร์ดิสคริมิแนนต์ (Fisher's Discriminant Ratio)

อัตราส่วนของฟิชเชอร์ดิสคริมิแนนต์เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสำหรับลดขนาดของมิติในการรู้จำแบบ สมมติว่ามีตัวอย่างสองชนิดที่มีจุดจำนวนมากกระจายตัวอยู่ในหลายมิติบนสเปซ (space) และต้องการที่จะหาเส้นแบ่งบนสเปซ เช่น จุดบางจุดที่ฉายลงบนเส้นของตัวอย่างที่สามารถแยกตัวอย่างของทั้งสองชนิดออกจากกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ จากเมทริกซ์การกระจายตัวของตัวอย่างภายใน (Within-class scatter matrix) ดังสมการที่ 51

$$S_w = \sum_{i=1}^M P_i \Sigma_i \quad (51)$$

เมื่อ Σ_i เป็นเมทริกซ์แปรปรวนรวมเกี่ยวสำหรับคลาส ω_i และ μ_i เป็นค่าเฉลี่ยสำหรับคลาส ω_i

$$\Sigma_i = E[(x - \mu_i)(x - \mu_i)^T] \quad (52)$$

และ P_i เป็น priori probability ของคลาส ω_i จะมีค่าประมาณ n_i/N เมื่อ n_i เป็นจำนวนของตัวอย่างของคลาส ω_i และ N คือจำนวนทั้งหมดของตัวอย่าง สำหรับเมทริกซ์การกระจายตัวระหว่างคลาส (Between-class scatter matrix) แสดงในสมการที่ 53

$$S_b = \sum_{i=1}^M P_i (\mu_i - \mu_0) (\mu_i - \mu_0)^T \quad (51)$$

เมื่อ μ_0 เป็นเวกเตอร์ค่าเฉลี่ยครอบคลุม (Global mean vector)

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^M P_i \mu_i \quad (52)$$

ในกรณีนี้สำหรับคลาสที่มีความน่าจะเป็นเท่าเทียมกัน $|S_w|$ จะมีสัดส่วนเท่ากับ $\sigma_i^2 + \sigma_j^2$ และ $|S_b|$ จะมีสัดส่วนเท่ากับ $(\mu_i - \mu_j)^2$ โดยรวม S_w และ S_b เข้าด้วยกันสิ่งนี้เรียกว่าอัตราส่วนของพิชเชอร์ดิสคริมิแนนต์ สำหรับกรณีมัลติคลาสรูปแบบค่าเฉลี่ยของ FDR แสดงดังสมการที่ 53

$$FDR_1 = \sum_i^M \sum_{j \neq i}^M \frac{(\mu_i - \mu_j)^2}{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad (52)$$

โดยเป็นการหาอัตราส่วนของระยะห่างโดยค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนในแต่ละลำดับของค่าโมเมนต์อินแวเรียนต์ เพื่อนำค่า FDR ที่มีค่ามากพอนำมาใช้ในการตัดสินใจประเภทของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว นั้นจาก Suge (2009) โดยกำหนดให้เกณฑ์ในการเลือกมีค่ามากกว่า 10 ขึ้นไป

3. การสอนเครื่องจักรเรียนรู้ (Machine Learning) และการแยกประเภท (Classification)

แยกข้อมูลของเมล็ดออกเป็น 2 กลุ่มเท่าๆกัน กลุ่มแรกที่ใช้สอนเครื่องจักรจำนวน 200 รูปแบบเป็นสายพันธุ์ชยันนาท 72 จำนวน 50 รูปแบบ สายพันธุ์กำแพงแสน 2 จำนวน 50 รูปแบบสายพันธุ์อุ้มทอง 1 จำนวน 50 รูปแบบและสายพันธุ์มทส. 1 จำนวน 50 รูปแบบทำการแบ่งประเภทสายพันธุ์อย่างชัดเจน โดยใช้คอร์เนลแบบสมการเชิงเส้น และสมการพหุนามดีกรีสาม นำมาหาซัพพอร์ตเวกเตอร์ของแต่ละลักษณะของแต่ละสายพันธุ์เพื่อสร้างแนวเส้นแบ่งให้กับซัพพอร์ตเวกเตอร์

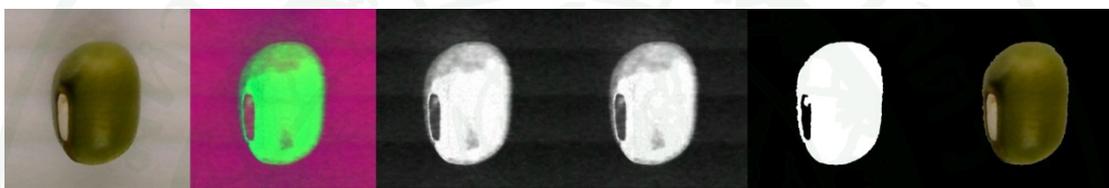
แมกซีนซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในการแบ่งประเภทของวัตถุ (Ben-Hur, 2008; Elisseeff *et al.* 2011) กำหนดค่าพารามิเตอร์ C เท่ากับ 10 และทำทวนซ้ำ (repeating) จำนวน 100 รอบ

กลุ่มที่สองเป็นกลุ่มไว้ทดสอบจำนวน 200 รูปแบบปนกัน เป็นสายพันธุ์ชยันต 72 จำนวน 50 รูปแบบ สายพันธุ์กำแพงแสน 2 จำนวน 50 รูปแบบ สายพันธุ์อุ้มทอง 1 จำนวน 50 รูปแบบ และสายพันธุ์มทส. 1 จำนวน 50 รูปแบบ ปนกันมาแยกเมล็ดพันธุ์ระหว่างพันธุ์ชยันต 72 พันธุ์กำแพงแสน 2 พันธุ์อุ้มทอง 1 และ พันธุ์มทส.1 หลังจากผ่านการคัดเลือกลักษณะโดยใช้เครื่องมือซอฟต์แวร์เตอร์แมกซีนช่วยในการจำแนกเมล็ดพันธุ์ทั้งสี่

ผลและวิจารณ์

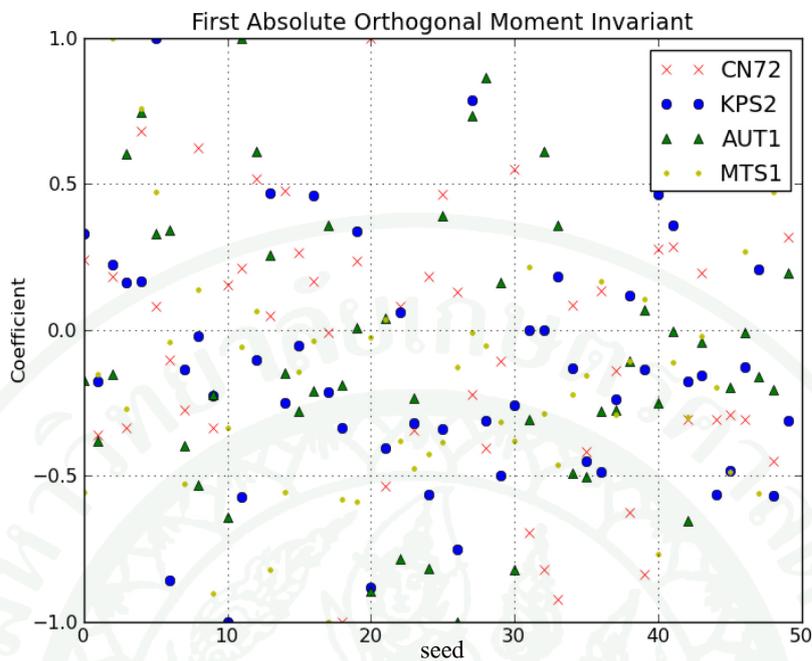
ผล

1. ผลการแยกรูปเมล็ดถั่วเขียวจากพื้นหลังแสดงดังภาพที่ 18 ด้านซ้ายแสดงถึงภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวก่อนเริ่มกระบวนการจากนั้นปรับเปลี่ยนให้อยู่ในแถบสี HSI ก่อนจะนำภาพในส่วนของความเข้มตัวสี มาผ่านตัวกรองมัชชฐาน และกรองภาพส่วนที่มีค่ามากกว่า 100 ให้เป็นภาพไบนารี ก่อนนำไปใช้กับภาพต้นฉบับเพื่อดึงภาพเมล็ดออกจากภาพพื้นหลัง

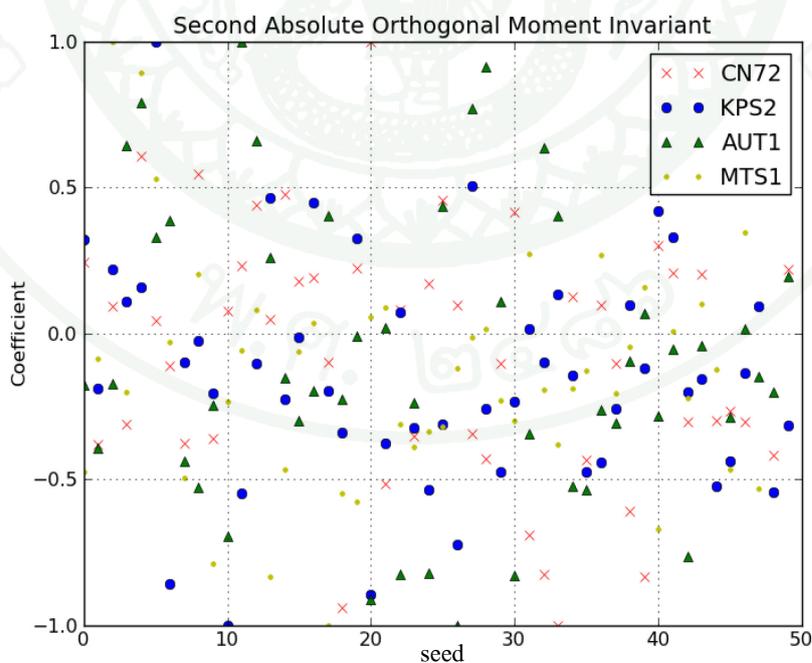


ภาพที่ 18 กระบวนการจัดภาพพื้นหลัง

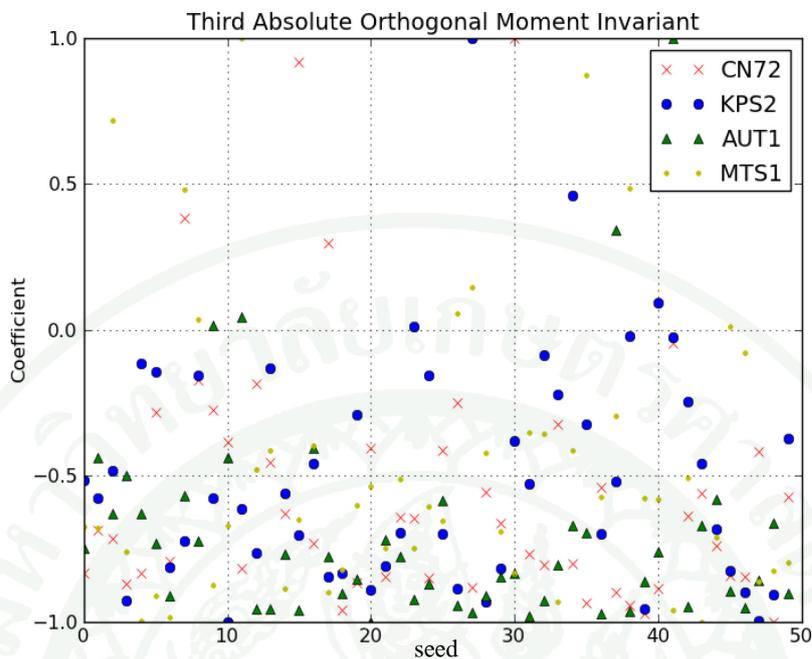
2. ผลการทดลองค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากทั้ง 7 ลำดับจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวพันธุ์ชยันต 72 พันธุ์กำแพงแสน 2 พันธุ์อุ้มทอง 1 และพันธุ์มทส. 1 ภาพที่ 19 ถึง ภาพที่ 25 แสดงเซตของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากทั้ง 7 ลำดับจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวในส่วนที่ใช้สำหรับเรียนรู้จำนวนทั้งหมด 200 เมล็ด แสดงในระนาบแนวนอนสายพันธุ์ละ 50 เมล็ดจากเมล็ดพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์ตามลำดับระนาบแนวดังแสดงถึงเซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 19 เซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 20 เซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 21 เซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 22 เซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 23 เซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 24 และเซตค่าสัมประสิทธิ์ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากดังภาพที่ 25 ในแต่ละเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่นำมาทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉาก เป็นช่วงที่ผ่านการทำให้เป็นบรรทัดฐานด้วยค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ของแต่ละสายพันธุ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งแต่ละสายพันธุ์แสดงค่าที่แตกต่างกันออกไปตามรูปทรงของแต่ละสายพันธุ์



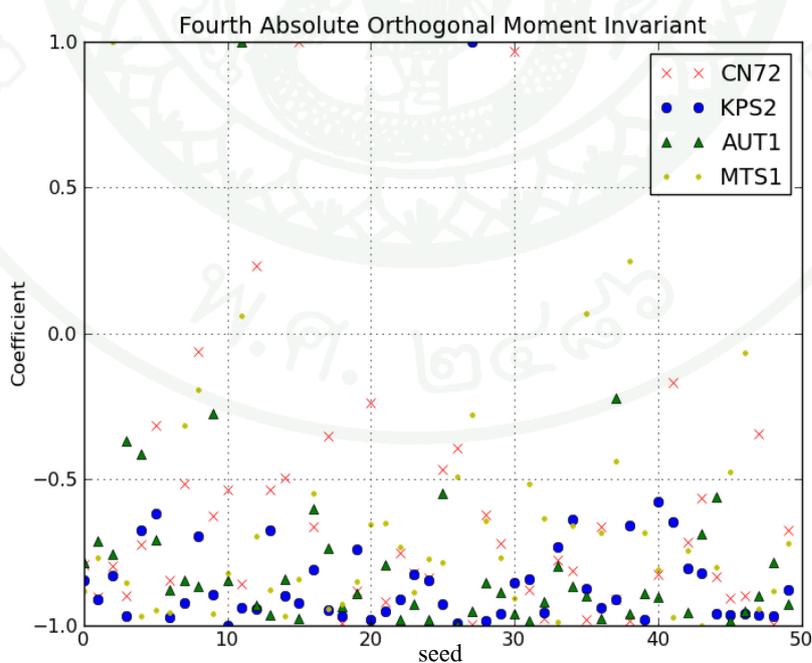
ภาพที่ 19 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งจากลำดับแรกของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์



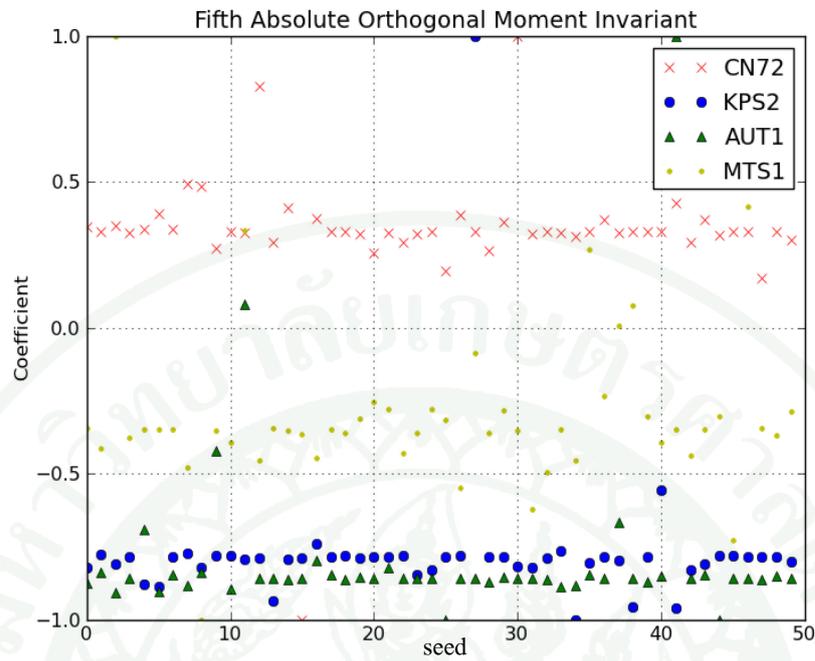
ภาพที่ 20 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งจากลำดับที่สองของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์



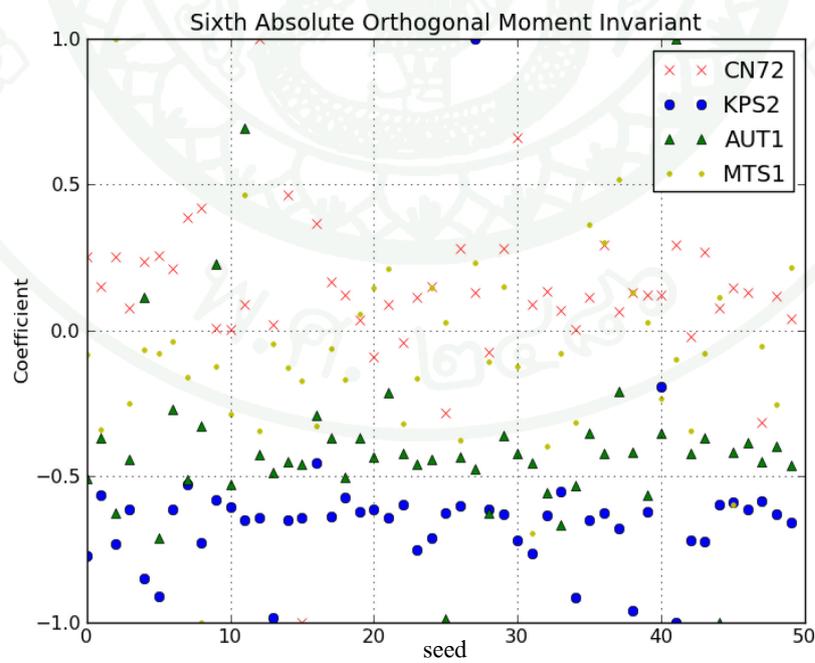
ภาพที่ 21 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งจากลำดับที่สามของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์



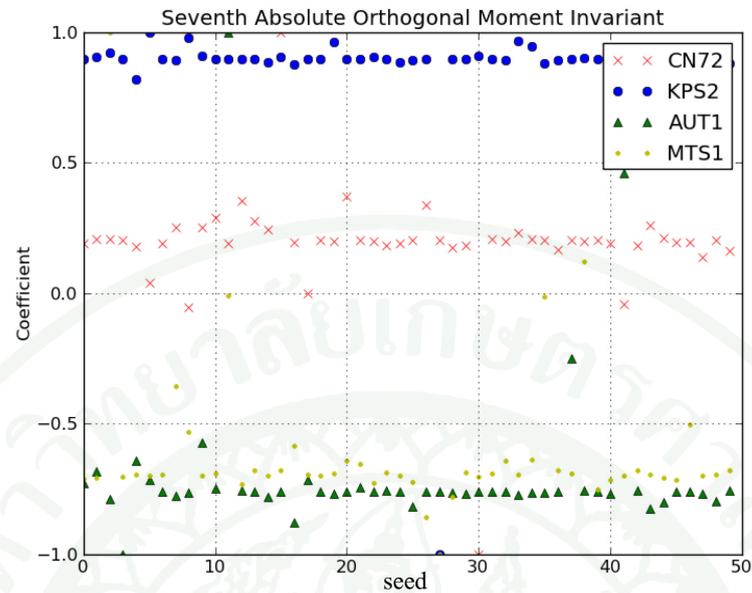
ภาพที่ 22 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งจากลำดับที่สี่ของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์



ภาพที่ 23 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งจากลำดับที่ห้าของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์

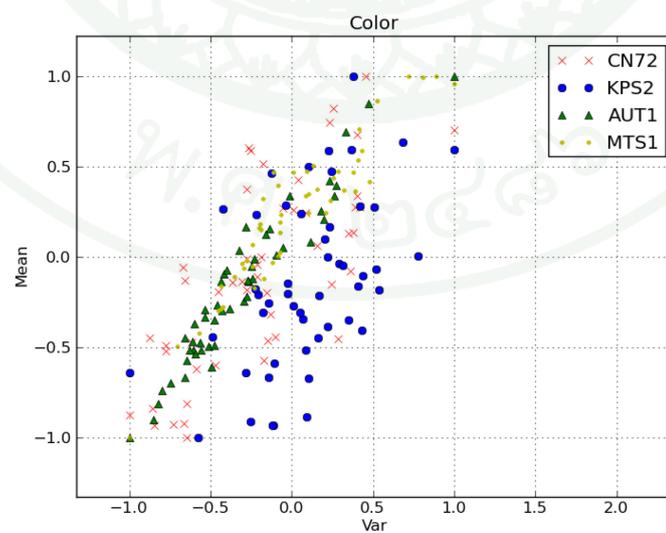


ภาพที่ 24 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งจากลำดับที่หกของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์



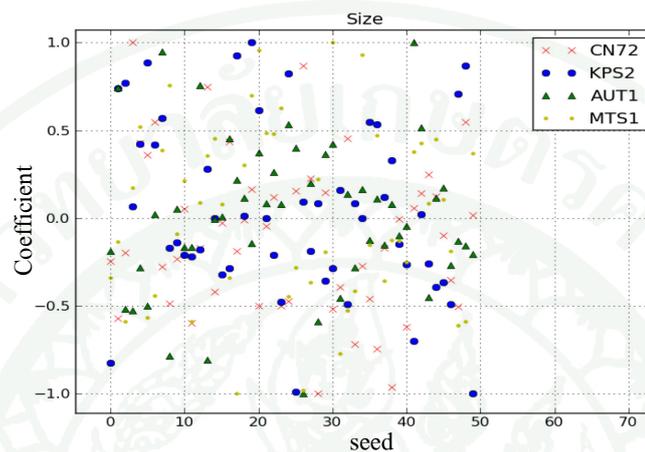
ภาพที่ 25 ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่เจ็ดของสายพันธุ์ทั้งสี่สายพันธุ์

3. ผลการทดลองค่าเฉลี่ยสีของเมล็ดและความแปรปรวนสีของเมล็ดแสดงในภาพที่ 26 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยสีและความแปรปรวนของสีเมล็ดของแต่ละสายพันธุ์มีความใกล้เคียงกันจนไม่สามารถจำแนกคัดแยกแต่ละสายพันธุ์ออกจากกันได้



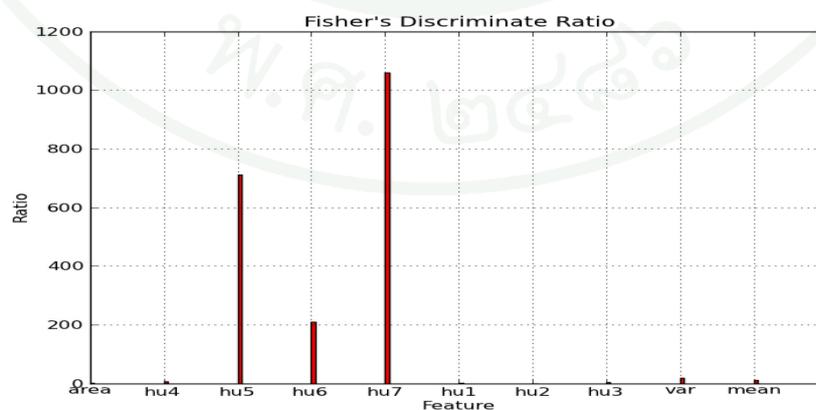
ภาพที่ 26 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยสี และความแปรปรวนสีของเมล็ดั่วเขียวทั้งสี่สายพันธุ์

4. ผลการทดลองค่าขนาดพื้นที่ของเมล็ดที่ขยลงบนระนาบสองมิติ เป็นแจกเช่นค่าเฉลี่ยสี่ขนาดพื้นที่ของเมล็ดของแต่ละสายพันธุ์มีขนาดที่ใกล้เคียงจนไม่สามารถแยกแต่ละสายพันธุ์ออกจากกันได้ดังแสดงผลในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การกระจายตัวของขนาดเมล็ดถั่วเขียวทั้งสี่สายพันธุ์

5. ผลการเปรียบเทียบ FDR จากลักษณะเด่นค่าเฉลี่ยสี่ ค่าความแปรปรวน ค่าขนาดพื้นที่บนระนาบสองมิติ และค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากทั้ง 7 เลือกลักษณะที่อัตราที่มากกว่า 10 จะได้เวกเตอร์ทั้งหมดสี่ตัวได้แก่ ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากลำดับที่ 5, 6 และลำดับที่ 7 ดังแสดงในภาพที่ 28

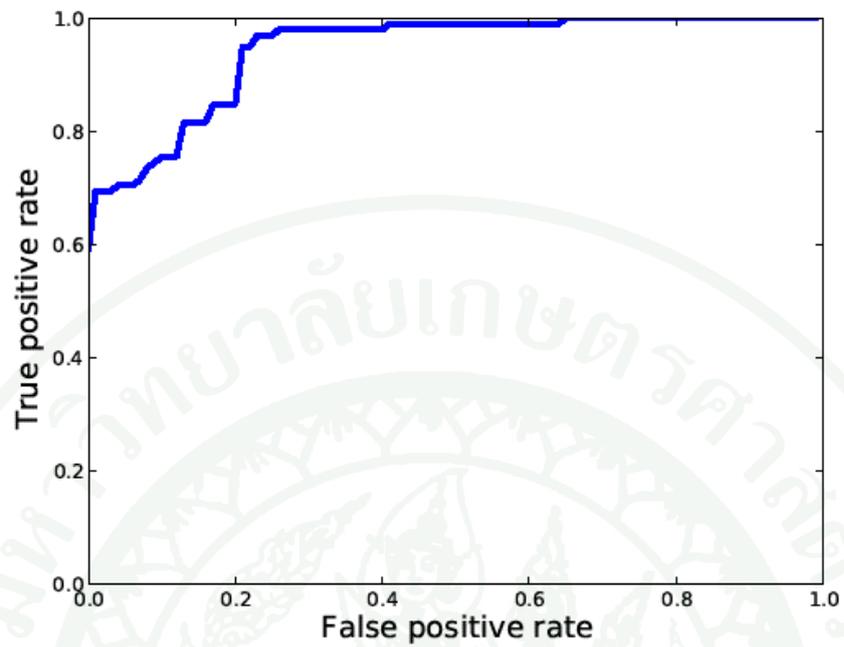


ภาพที่ 28 ค่าอัตราส่วนฟิชเชอร์ดิคริมิแนนต์

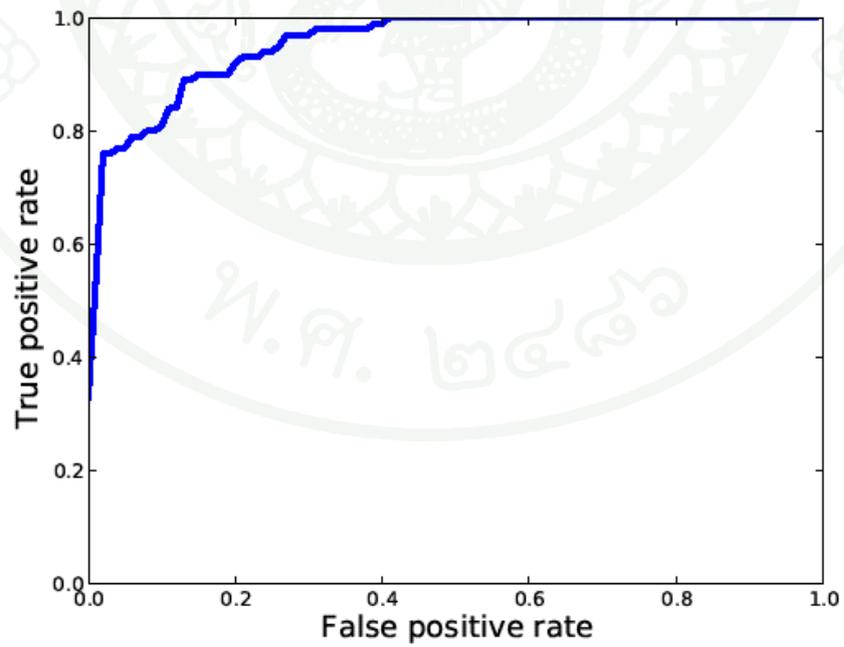
6. การคัดแยกหรือจำแนกเมล็ดพันธุ์สามารถแยกได้จากรูปทรงที่แตกต่างระหว่างเมล็ด 4 สายพันธุ์จากลักษณะค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากแสดงค่าและมีผลตอบสนองต่อรูปแบบการวางตัวที่ส่วนไฮลัมหันเข้าหากล้องของรูปทรงที่บิดเบี้ยวของถั่วเขียวแสดงดังภาพที่ 19 ภาพที่ 20 ภาพที่ 21 และภาพที่ 22 ตามลำดับ ตารางที่ 2 แสดงคอนฟิวชันเมทริกซ์ (Confusion Matrix) จำนวนภาพที่จำแนกได้ระหว่างสี่สายพันธุ์ที่ปนกันนำมาทดสอบโดยใช้เคอร์เนลสมการเชิงเส้นนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถจำแนกได้สายพันธุ์ชัชนาท 72 จำนวน 46.28 เมล็ดสายพันธุ์กำแพงแสน 2 จำนวน 47.95 เมล็ดสายพันธุ์อุ้งทอง 1 จำนวน 46.06 เมล็ด และสายพันธุ์มทส. 1 จำนวน 42.11 เมล็ดจากทั้งหมด 200 เมล็ดและทดสอบโดยใช้เคอร์เนลสมการพหุนามดีกรีสามนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %สามารถจำแนกได้สายพันธุ์ชัชนาท 72 จำนวน 46.02 เมล็ดสายพันธุ์กำแพงแสน 2 จำนวน 47.08 เมล็ดสายพันธุ์อุ้งทอง 1 จำนวน 46.71 เมล็ด และสายพันธุ์มทส. 1 จำนวน 45.95 เมล็ดจากทั้งหมด 200 เมล็ดภาพที่ 29 ถึงภาพที่ 32 แสดงการประเมินค่าประสิทธิภาพของ SVM ในการคัดแยกด้วยสมการเชิงเส้นตรงสายพันธุ์ชัชนาท กำแพงแสน อุ้งทอง และมทส. ตามลำดับภาพที่ 33 ถึงภาพที่ 36 แสดงการประเมินค่าประสิทธิภาพของ SVM ในการคัดแยกด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3 สายพันธุ์ชัชนาท กำแพงแสน อุ้งทอง และมทส. ตามลำดับ

ตารางที่ 2 คอนฟิวชันเมทริกซ์ของกลุ่มทดสอบ (SVM, C = 10, Iteration = 100) ด้วยสมการเชิงเส้นนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

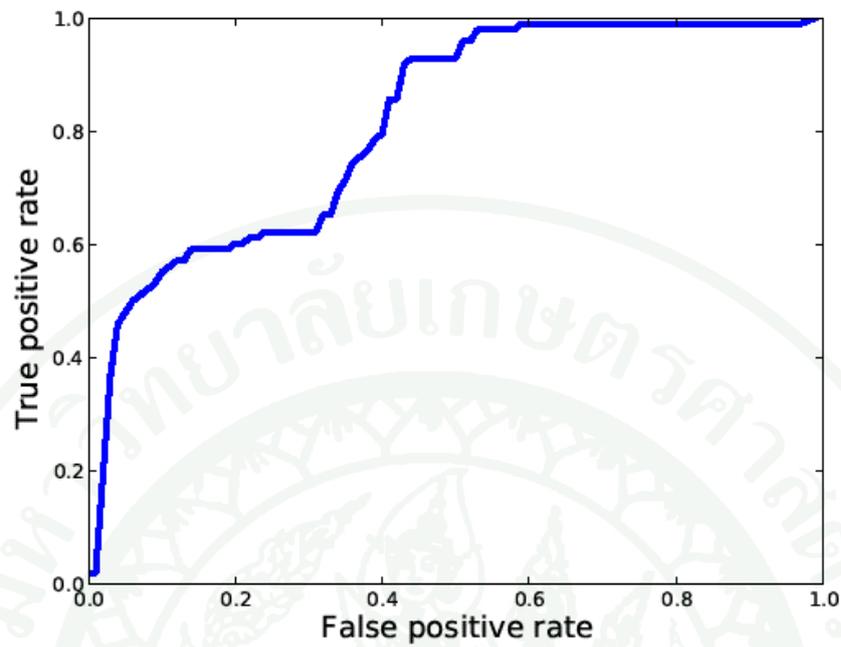
	CN72	KPN2	AUT1	MST1	Total	%uac
CN72	46.28±0.08	1	1.58±0.11	2.08±0.1	54±0.29	90.85±0.54
KPN2	0	47.95±0.05	0.07±0.05	0.79±0.09	48±0.19	98.23±0.4
AUT1	2	0	46.06±1.2	5.02±0.11	54±1.31	86.77±2.43
MST1	1.72±0.08	1.05±0.05	2.29±0.18	42.11±0.14	44±0.45	89.27±1.02
Total	50±0.16	50±0.1	50±1.54	50±0.44	200±1.47	
%pac	92.56±0.32	95.9±0.2	92.12±3.08	84.22±0.88		91.2±0.74



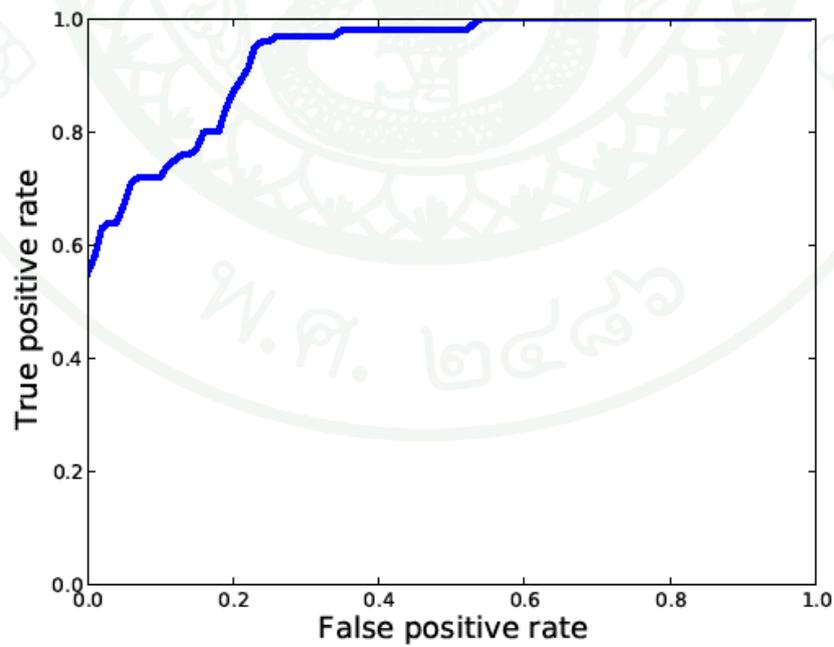
ภาพที่ 29 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์ชัชนาท 72 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น



ภาพที่ 30 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์ก้ามแวงแสน 2 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น



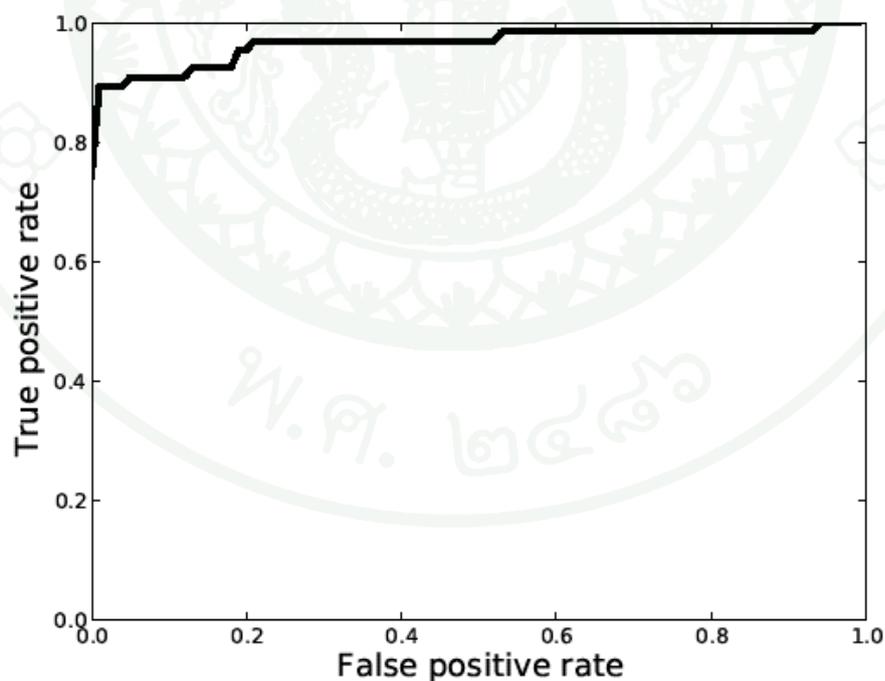
ภาพที่ 31 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันรู้ต่อของ 1 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น



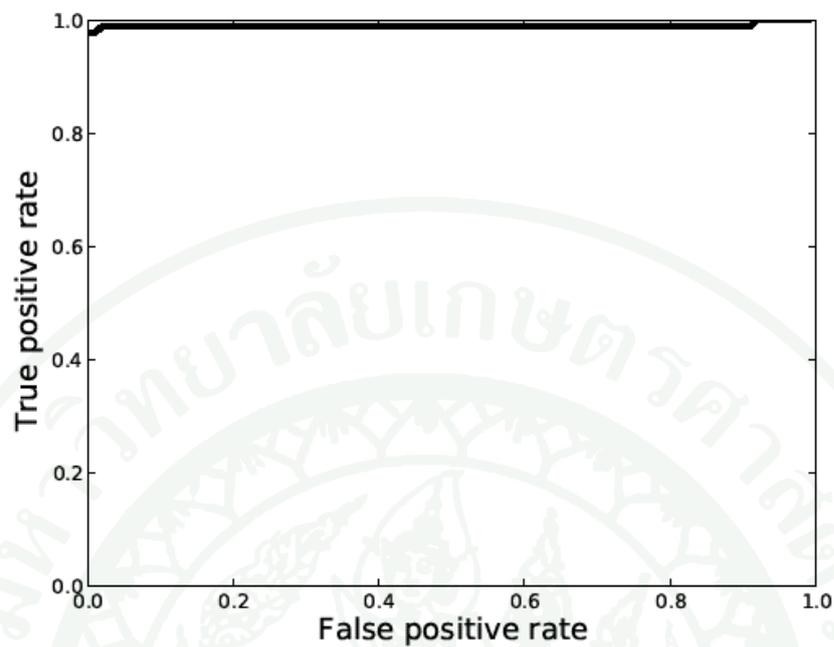
ภาพที่ 32 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันรู้มทส. 1 ของ SVM ด้วยสมการเชิงเส้น

ตารางที่ 3 คอนฟิวก์นเมตริกซ์ของกลุ่มทดสอบ (SVM, C = 10, Iteration = 100) ด้วยสมการพหุนามดีกรี 3 นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

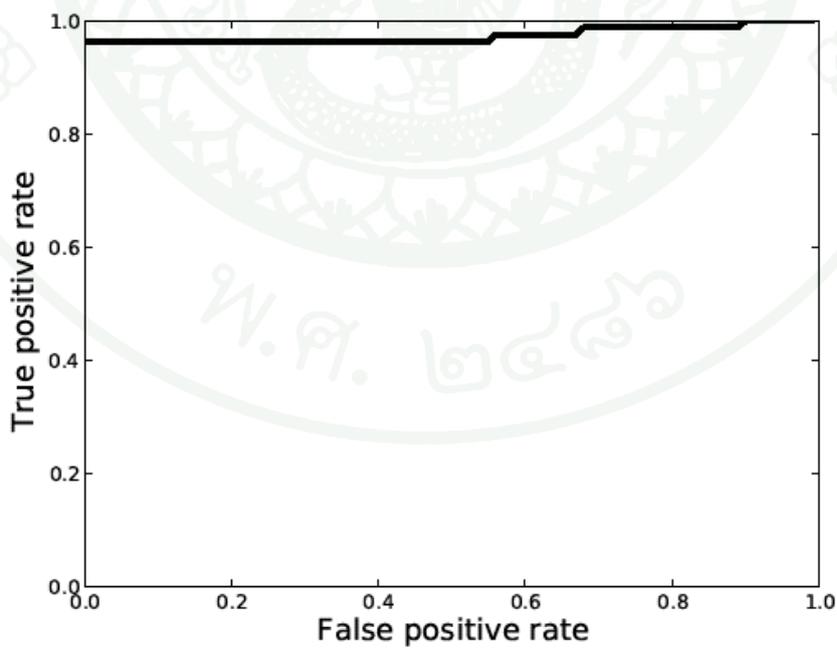
	CN72	KPN2	AUT1	MST1	Total	%uac
CN72	46.02±0.03	1.54±0.12	0.97±0.17	2.34±0.15	50.87±0.57	90.46±1.12
KPN2	0.4±0.1	47.08±0.05	0.86±0.1	0.25±0.08	48.59±0.24	96.89±0.5
AUT1	2.11±0.09	0.87±0.09	46.71±0.17	1.46±0.1	51.15±0.45	91.31±0.88
MST1	1.47±0.13	0.51±0.11	1.46±0.16	45.95±0.15	49.39±0.55	93.03±1.11
Total	50±0.35	50±0.37	50±0.6	50±0.48	200±0.4	
%pac	92.04±0.7	94.16±0.74	93.42±1.2	91.9±0.96		92.88±0.2



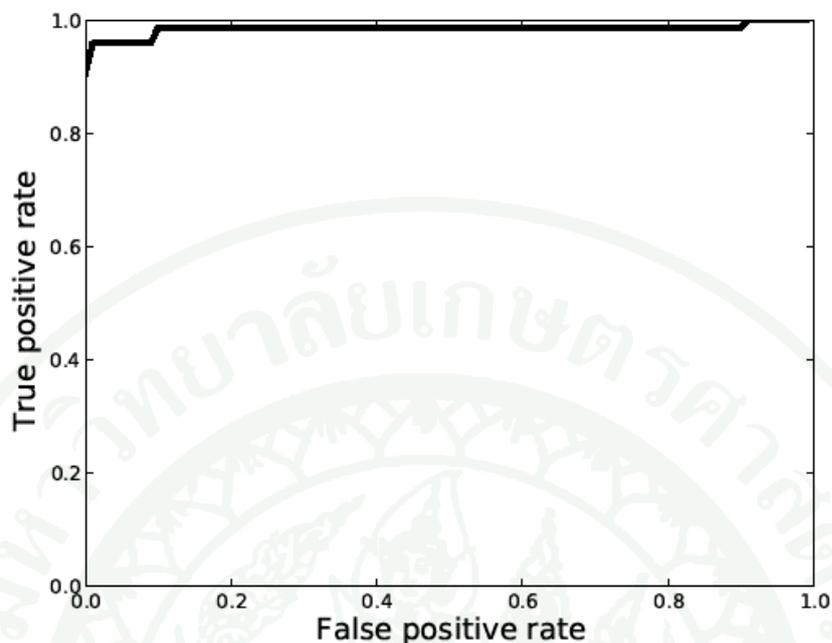
ภาพที่ 33 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์ชั้นนาท 72 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3



ภาพที่ 34 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3



ภาพที่ 35 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์อุทอง 1 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3



ภาพที่ 36 ค่าเฉลี่ย ROC สายพันธุ์มทส. 1 ของ SVM ด้วยสมการไม่เชิงเส้นพหุนามดีกรี 3

วิจารณ์

จากผลการทดลองที่ได้ ในส่วนการแยกสัญญาณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวออกจากสัญญาณภาพพื้นหลังได้ผลค่อนข้างดีในพื้นที่สีขาวมากกว่าพื้นหลังสีดำ เนื่องจากเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวมีเมล็ดสีเขียวที่มีโทนสีออกไปทางด้านสีดำ หรือมีค่าความสว่างที่ต่ำ และสีเขียวค่อนข้างเด่นชัด จึงเลือกใช้แสงสีขาวจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีความถี่ในการให้กำเนิดแสงให้กับวัตถุสะท้อนผ่านเซนเซอร์ภายในกล้องเว็บแคม สัญญาณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวที่ได้จะปรากฏคลื่นภายในสัญญาณภาพจากความถี่ของแหล่งกำเนิดแสง เหตุนี้จึงเลือกใช้แถบสี HSI ซึ่งเป็นแถบสีที่ทนต่อแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงของระดับแสง และในแถบความถี่สีในสัญญาณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวมีความโดดเด่นของเมล็ดเด่นชัดมากกว่าสัญญาณภาพพื้นหลัง

ส่วนการปรับปรุงสัญญาณภาพได้เลือกใช้ตัวกรองมัธยฐาน เพื่อให้ส่วนขอบของเมล็ดเด่นชัดขึ้น ผลที่ได้จากการใช้ตัวกรองมัธยฐานนี้ในสัญญาณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวส่วนใหญ่ยังไม่เห็นผลชัดเจนนัก ซึ่งเกิดจากบริเวณขอบของเมล็ดมีค่าอยู่ระหว่างค่าในสัญญาณภาพพื้นหลังกับสัญญาณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว ขั้นตอนนี้อาจไม่จำเป็นสำหรับสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นจาก

แหล่งกำเนิดชนิดนี้ จากนั้นนำสัญญาณภาพผ่านการคัดกรองระดับค่าที่ต่ำกว่าค่า 200 ซึ่งเป็นระดับค่าขอบเขตของสัญญาณภาพพื้นหลัง ทำให้เหลือในส่วนสัญญาณภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวเท่านั้น นำส่วนนี้เป็นแผ่นแบบในการใช้แยกสัญญาณของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวออกจากสัญญาณภาพพื้นหลัง

จากสมมติฐานที่ตั้งไว้ เมล็ดพันธุ์ที่สายพันธุ์แตกต่างกัน ถึงจะเป็นชนิดเดียวกัน ย่อมมีรูปร่างและรูปทรงที่เป็นเอกลักษณ์ในแต่ละสายพันธุ์ จึงนำโมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากมาใช้ในการหองค์ประกอบจากสัญญาณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวในรูปแบบการจัดวางตัวของเมล็ดถั่วเขียว ในลักษณะไฮลัมของเมล็ดถั่วเขียวหันเข้ากล้อง ซึ่งส่วนนี้ยังไม่ครอบคลุมส่วนของเมล็ดทั้งหมด แต่ก็สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์เดียวกัน ได้

การทดลองใช้โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากนี้ ด้วยความสามารถบอกเอกลักษณ์ของวัตถุทรงตันที่ฉายภาพลงบนระนาบสองมิติ ซึ่งมีความสัมพันธ์ของภาพระหว่างจุดศูนย์กลางกับพื้นที่ของสัญญาณภาพในตัวเอง มีค่าเฉพาะในแต่ละรูปแบบ ซึ่งสามารถทนต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุบนระนาบสองมิติในการจัดว่าตัวแบบคงที่ภายใต้ขอบเขตของสัญญาณภาพได้ ถึงแม้วัตถุเคลื่อนที่ไป ณ ตำแหน่งใดๆ ในสเปซ ผลที่ได้ยังคงให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการวางตัวในตำแหน่งเริ่มต้นของสัญญาณภาพเมล็ด อีกความสามารถหนึ่งคือสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดในรูปแบบใหญ่ขึ้นหรือเล็กลงภายใต้การจัดวางตัวในรูปแบบคงที่ ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับขนาดภาพเริ่มต้น แต่ยังคงมีความคาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากข้อมูลหรือขนาดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในสัญญาณภาพแบบวิเวค ความสามารถสุดท้ายคือทนต่อการหมุนตัวรอบจุดศูนย์กลางของวัตถุภายใต้การจัดวางตัวคงที่ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดสำหรับบางกรณีอย่างเช่นตัวเลข 6 กับตัวเลข 9 สามารถบ่งบอกได้เมื่ออยู่ภายใต้การหมุนที่มุมต้องหมุนไปไม่มากกว่าหรือน้อยกว่า ± 45 องศา เมื่อศึกษาต่อในการใช้งานความสามารถร่วมกันในรูปแบบภาพทัศนมิติ (Perspective view) ซึ่งภาพจะบิดเบี้ยวไปจากภาพเริ่มต้น โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากยังสามารถให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นจนกระทั่งรูปร่างของวัตถุมีรูปทรงเปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิง

การเรียนรู้เพื่อคัดแยกเราเลือกใช้ซอฟต์แวร์แมชชีน เพราะเป็นเครื่องมือ ใช้งานได้ง่าย สามารถเรียนรู้ลักษณะของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวในแต่ละสายพันธุ์ได้เป็นอย่างดี ในงานวิจัยฉบับนี้ ใช้ เคอร์เนลสองประเภทในการทำวิจัย ได้แก่ สมการเส้นตรง และ สมการพหุนามดีกรี 3

ผลในการใช้เคอร์เนลสมการพหุนามดีกรี 3 ให้ผลที่แม่นยำกว่าเคอร์เนลที่ใช้สมการเส้นตรงเป็นเส้นแบ่งเพราะข้อมูลที่มีหลายมิติและการกระจายตัวของข้อมูลแตกต่างกัน ทำให้เคอร์เนลสมการพหุนามดีกรี 3 สร้างเส้นแบ่งที่สามารถแยกข้อมูลแต่ละสายพันธุ์ได้ดีกว่าเคอร์เนลสมการเส้นตรง

ผลการทดลองในการใช้โมเมนต์อินแวเรียนต์เป็นไปตามสมมติฐานสำหรับการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวทั้งสี่สายพันธุ์โดยใช้ลักษณะรูปทรงเพื่อวิเคราะห์ลักษณะจากค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากในการจำแนกเมล็ดสายพันธุ์บริสุทธิ์ทั้งสี่สายพันธุ์ออกจากกันได้ ส่วนในการจำแนกโดยใช้สียังคงไม่สามารถจำแนกแยกสายพันธุ์ได้ เพราะแต่ละสายพันธุ์ยังมีค่าเฉลี่ยสีของเมล็ดใกล้เคียงกัน อาจเกิดจากระยะเวลาเก็บรักษาและความชื้นของเมล็ดทำให้สีออกมาใกล้เคียงกัน ส่วนในการจำแนกโดยใช้ขนาดพื้นที่ของเมล็ดถั่วเขียวฉายลงบนระนาบสองมิติยังไม่สามารถจำแนกสายพันธุ์ได้ เพราะขนาดของภาพเมล็ดทั้งสี่สายพันธุ์มีความใกล้เคียงด้วยเช่นกัน

เมล็ดที่จำแนกผิดพลาดนั้นอาจเกิดจากเมล็ดที่นำมาใช้ในการทดสอบเพื่อให้เครื่องมือเรียนรู้รูปแบบนั้นเป็นเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์หรืออาจปะปนกันมาโดยไม่เจตนาทำให้ยังมีการจำแนกที่ผิดพลาดเกิดขึ้นบางส่วน

สิ่งที่ต้องศึกษาต่อในรูปแบบการวางตัวของเมล็ดในรูปแบบอื่นๆและในจำนวนที่มากขึ้นการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ที่ไม่สมบูรณ์ออกก่อนนำมาวิเคราะห์การวิเคราะห์แยกเมล็ดที่มีลักษณะที่วางขอบติดกันหรือทับซ้อนกันด้วยวิธีการของ Mebatsion and Paliwal (2011) โดยนำภาพที่มีลักษณะของเมล็ดติดกันมาวิเคราะห์ขอบของเมล็ดว่ามีลักษณะเป็นเส้นโค้งหรือขอบมุมที่เมล็ดติดหรือซ้อนทับกันอย่างไรเพื่อให้แน่ใจว่าเป็นเมล็ดเดี่ยวในการนำมาทดสอบและรวมไปถึงในการคัดแยกเมล็ดสายพันธุ์อื่น ๆ นอกเหนือจากสี่สายพันธุ์ที่นำมาทดลองจนนำไปสู่การพัฒนาเครื่องคัดแยกต้นแบบในอนาคต

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

วิธีการคัดแยกหรือจำแนกเมล็ดพันธุ์ป่นในถั่วเขียวระหว่างสายพันธุ์ชัชนาท 72 สายพันธุ์ กำแพงแสน 2 สายพันธุ์อุ้มทอง 1 และสายพันธุ์ มทส. 1 ด้วยตาเปล่าเป็นไปได้ยากจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเครื่องมือคัดแยกเฉพาะ และขั้นตอนในการดำเนินการต้องใช้เวลาานาน

สำหรับงานวิจัยนี้สามารถแบ่งแยกภาพของเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียวสายพันธุ์ชัชนาท 72 สายพันธุ์ กำแพงแสน 2 สายพันธุ์อุ้มทอง 1 และสายพันธุ์ มทส. 1 จำนวนสายพันธุ์ละ 50 เมล็ดสำหรับเรียนรู้ ลักษณะรูปแบบโมเมนต์อินแวเรียนต์ของเมล็ดพันธุ์ และอีกจำนวนสายพันธุ์ละ 50 เมล็ดที่ปะปน กันอยู่สำหรับใช้ในการทดสอบระบบโดยซอฟต์แวร์เทคเตอร์แมกซีนเคอร์เนลสมการพหุนามดีกรี 3 ในการเรียนรู้ภาพของรูปแบบเมล็ดพันธุ์แต่ละสายพันธุ์ จนสามารถแยกภาพเมล็ดสายพันธุ์ต่างๆ ออกจากกันได้ตามสายพันธุ์ต่างๆ ดังนี้

1. สายพันธุ์ชัชนาท 72 ได้ 92.04 เปอร์เซ็นต์ สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ได้ 94.16 เปอร์เซ็นต์ สายพันธุ์อุ้มทอง 1 ได้ 93.42 เปอร์เซ็นต์และสายพันธุ์ มทส. 1 ได้ 91.9 เปอร์เซ็นต์สำหรับการ ตรวจสอบความแม่นยำทางด้านผู้ผลิต
2. สายพันธุ์ชัชนาท 72 ได้ 90.46 เปอร์เซ็นต์ สายพันธุ์กำแพงแสน 2 ได้ 96.89 เปอร์เซ็นต์ สายพันธุ์อุ้มทอง 1 ได้ 91.31 เปอร์เซ็นต์และสายพันธุ์ มทส. 1 ได้ 93.03 เปอร์เซ็นต์สำหรับการ ตรวจสอบความแม่นยำทางด้านผู้ใช้งาน
3. ทั้งระบบในการวิจัยนี้สามารถจำแนกคัดแยกได้ 92.88 เปอร์เซ็นต์

แต่ยังไม่เพียงพอกับเกณฑ์ที่ทางกรมวิชาการเกษตรกำหนดการปนเปื้อนไว้ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ในกลุ่มเมล็ดพันธุ์บริสุทธิ์ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนที่จำแนกภาพเมล็ดพันธุ์ที่ ผิดพลาด ปัจจัยที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดอาจเกิดจากเมล็ดที่กลายพันธุ์หรือมีการปะปนระหว่าง ขบวนการก่อนนำมาทดสอบหรือยังมีข้อผิดพลาดในตัวเอง

การคัดแยกหรือจำแนกเมล็ดพันธุ์ของถั่วเขียวสามารถใช้ลักษณะของรูปทรงที่ฉายลงบนระนาบ 2 มิติอย่างเช่นภาพในการคัดแยกเมล็ดพันธุ์ป่นในถั่วเขียวด้วยค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของ Hu ซึ่งเป็นอิสระจากการเคลื่อนที่, ขนาด และการหมุนของเมล็ดในการจัดวางตัวแบบไฮลัมตั้งเข้ามากล้องในระนาบ 2 มิติบนภาพถ่ายและสามารถหาลักษณะเฉพาะของเมล็ดในแต่ละสายพันธุ์ เพื่อนำมาใช้ในการจำแนกคัดแยกเมล็ดพันธุ์ได้

ข้อเสนอแนะ

เพิ่มการทดสอบลักษณะไฮลัมของเมล็ดถั่วเขียวโดยตรง และลักษณะการจัดวางตัวในรูปแบบอื่นการแยกเมล็ดที่วางตัวติดหรือทับซ้อนกัน ก่อนนำไปใช้ประยุกต์ในการคัดแยกกับเมล็ดพันธุ์และสายพันธุ์อื่นๆ เช่น เมล็ดข้าว เมล็ดถั่วเหลือง เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2552. ถั่วเขียว. คลังข้อมูลกรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
แหล่งที่มา: <http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=33>, 25 กรกฎาคม 2553.

จารุวัฒน์ มงคลชนทรศ. 2531. การพัฒนาเครื่องกะเทาะถั่วเขียวผิวมัน. การประชุมสัมมนาทาง
วิชาการเรื่องเครื่องมือและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม. น. 77-87. เชียงใหม่.
แหล่งที่มา: http://www.phtnet.org/research/view-abstract.asp?research_id=wf092,
25 กรกฎาคม 2553.

ยอดชัย รักถนอม, เอ็นดู ตังคโนภาส และอนุพันธ์ เทอดวงศัรกุล. 2548. เครื่องคัดแยกเมล็ดถั่ว
เขียวเพาะ. รวบรวมผลงานโครงการที่ได้รับทุน IRPUS ประจำปี 2548 มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, น. 126-127. สำนักงานโครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการ
อุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี, กรุงเทพฯ.

สมชาย บุญประดับ. 2554. การตัดสินใจปลูกพืชไร้หลังนา. กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตร
และสหกรณ์. แหล่งที่มา: <http://m.doa.go.th/fcri/files/filed-rice.pdf>, 25 กรกฎาคม 2553.

สมนึก สุวรรณประดิษฐ์. 2531. การปรับปรุงเครื่องกะเทาะเมล็ดพันธุ์ถั่วเขียว. โครงการวิศวกรรม
เกษตรศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
แหล่งที่มา: http://www.phtnet.org/research/view-abstract.asp?research_id=wf004,
25 กรกฎาคม 2553.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2553. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตรปี 2553. เอกสารสถิติ
การเกษตรเลขที่ 416. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/download/download_journal/fundamation-2553.PDF,
25 กรกฎาคม 2553.

Arias-Castro, E. and D.L. Donoho. 2009. Does median filtering truly preserve edges better than
linear filtering?. *Annals of Statistics*. 37: 1172.

Ben-Hur, A. and Weston J. 2008. A User's Guide to Support Vector Machines. **Department of Computer Science, Colorado State University, US.**

Cayley, A. 1854. An Introductory Memoir on Quantics. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London.** 144: 244-258.

Crilly, A.J. 1986. The Rise of Cayley's Invariant Theory (1841-1862). **Hist. Math.** 13: 241-254.

Cheng, H. D. 2001. Color image segmentation: advances and prospects. **Pattern Recognition.** 34: 2259-2281.

Elisseeff, A., Bernhard S. and Fernando P. 2011. Support Vector Machine – Recursive Feature Elimination (SVM-RFE). **Health Discovery Corporations, Savannah, GA (US).**

Elliott, E. B. 1913. Algebra of Quantics. **Oxford Univ. Press.** 2nd ed. New York.

Mebatsion, H. K. and J. Paliwal. 2011. A Fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images. **Biosystems Engineering.** 108: 66-74.

Flusser, J. and T. Suk. 1994. Affine moment invariants: A new tool for character recognition. **Pattern Recognition.** 15: 433-436.

Flusser, J. 2000. On the independence of rotation moment invariants. **Pattern Recognition.** 33: 1405-1410.

Flusser, J. and T. Suk. 2006. Rotation moment invariants for recognition of Symmetric objects. **IEEE Trans. Image Process.** 15: 3784-3790.

Hu, M. K. 1962. Visual pattern recognition by moment invariants. **IRE Trans. Inf. Theory.** 8: 179-187.

Igathinathane, C., Pordesimo L.O., Batchelor W.D. 2009. Major Orthogonal dimensions measurement of food grains by machine vision using ImageJ. **Food Research International**. 42: 76–84.

Maejima, T. 2004. Apparatus for inspecting gel covering seed. **US Patent**. 6,683,266.

Mebatsion, H. K. and J. Paliwal. 2011. A Fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images. **Biosystems Engineering**. 108: 66-74.

Tantasawat, P., Juthamas T., Thongchai P., Thanawit T. Chutamas P., Worapa S. and Thitiporn M. 2010. Variety identification and genetic relationships of mungbean and blackgram in Thailand and based on morphological characters and ISSR analysis. **African Journal of Biotechnology**. 9: 4452-4464.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2548-2550

ประเทศ	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (1,000 ไร่)			ผลผลิต (1,000 ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		
	2548	2549	2550	2548	2549	2550	2548	2549	2550
รวมทั้งโลก	157,537	169,930	168,279	17,974	19,353	19,290	114	114	115
บราซิล	23,429	25,215	24,422	30,22	3,458	3,330	129	137	136
อินเดีย	50,294	57,000	56,250	2,631	2,926	3,000	52	51	53
จีน	7,523	7,500	7,813	1,805	1,778	1,950	240	237	250
พม่า	10,750	11,063	11,125	1,700	1,750	1,765	158	158	159
เม็กซิโก	7,883	10,770	10,813	827	1,386	1,390	105	129	129
สหรัฐอเมริกา	3,879	3,889	3,740	1,235	1,100	1,151	318	283	308
เคนยา	6,465	6,221	6,250	382	532	535	59	86	86
ยูกันดา	5,175	5,306	5,438	478	424	435	92	80	80
อาร์เจนตินา	892	1,469	1,570	169	323	328	189	220	209
อินโดนีเซีย	1,933	1,957	1,938	321	327	320	166	167	165
ไทย	955	907	966	112	113	122	117	124	126
อื่นๆ	38,359	38,633	37,954	5,292	5,236	4,964	138	136	131

หมายเหตุ ถั่วเขียว จากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ประเทศไทยลำดับที่ 24 ของโลก

ที่มา: องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (2553)

ตารางผนวกที่ ก2 ถั่วเขียว : เนื้อที่ ผลิตผลผลิตต่อไร่ ราคา และมูลค่าของผลผลิต ตามราคา
เกษตรกรขายได้ ปี 2541-2550

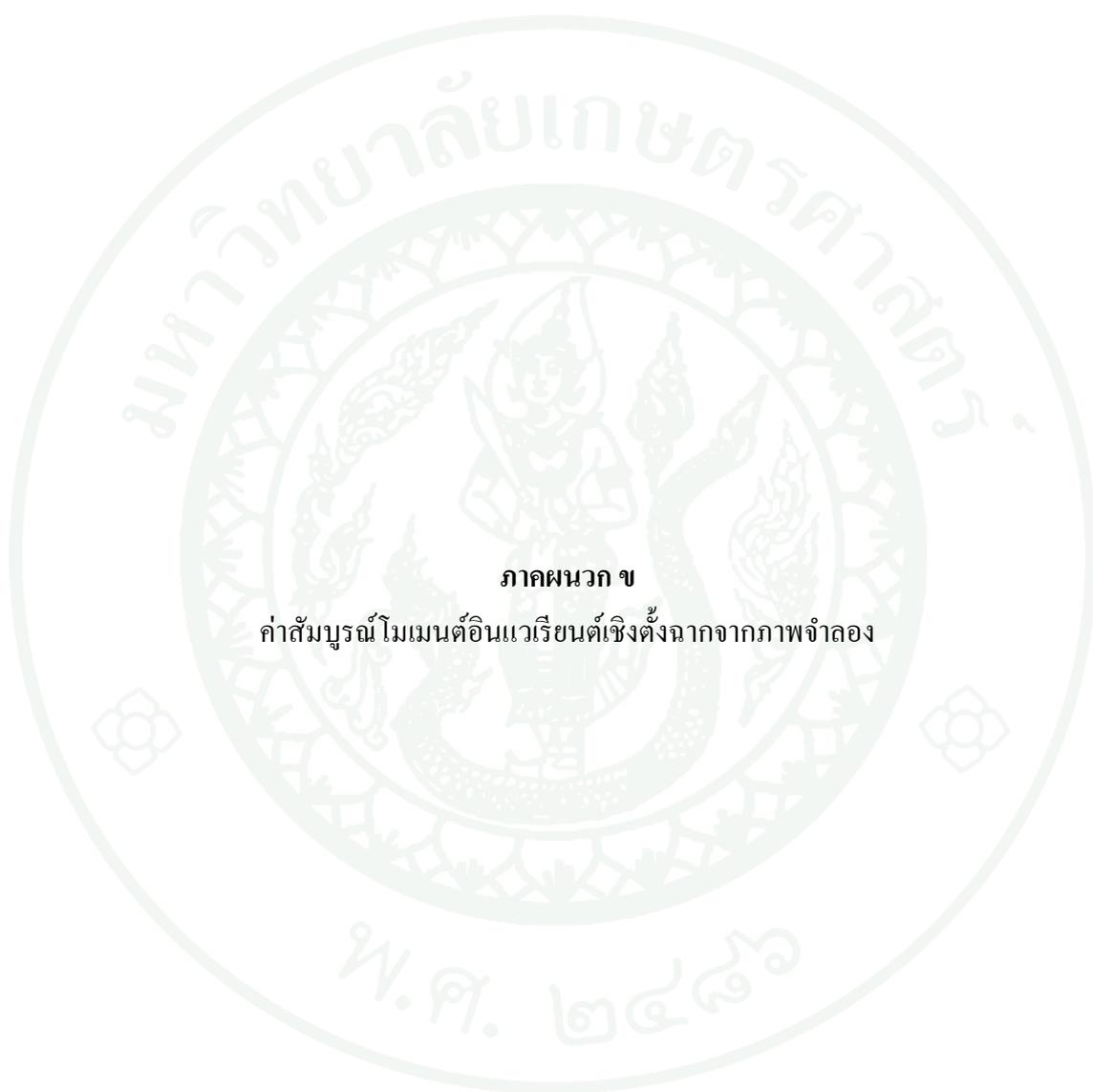
ปี	เนื้อที่	เนื้อที่เก็บ	ผลผลิต	ผลผลิต	ราคาที่	มูลค่าของ
	เพาะปลูก	เกี่ยว			เกษตรกรขาย	ผลผลิตตาม
	(1,000 ไร่)	(1,000 ไร่)	(1,000 ตัน)	(กก.)	ได้	ราคา ที่ เกษตรกรขาย ได้
2541	1,892	1,805	226	125	13.57	3,066
2542	2,012	1,925	249	130	10.32	2,573
2543	1,845	1,750	226	129	14.06	3,176
2544	1,892	1,846	238	129	15.51	3,686
2545	1,831	1,709	216	127	11.86	2,565
2546	1,520	1,448	178	123	12.38	2,206
2547	1,170	1,111	135	121	14.45	1,949
2548	1,015	955	112	117	17.81	1,992
2549	954	907	113	124	18.25	2,057
2550	1,021	966	122	126	19.29	2,344

ที่มา: องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (2553)

ตารางผนวกที่ ก3 เนื้อที่ ผลผลิต ผลผลิตต่อไร่ เป็นรายภาค ปี 2548-2550

ภาค/จังหวัด	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)			เนื้อที่เก็บเกี่ยว (ไร่)			ผลผลิต (ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		
	2548	2549	2550	2548	2549	2550	2548	2549	2550	2548	2549	2550
รวมทั้งประเทศ	1,015,144	954,006	1,021,267	955,265	907,251	966,488	111,857	112,708	121,531	117	124	126
เหนือ	919,219	861,830	927,095	867,372	821,804	876,554	103,197	104,595	112,017	119	127	128
ตะวันออกเฉียงเหนือ	49,504	45,634	43,940	45,965	42,056	41,114	4,531	3,950	4,462	99	94	109
กลาง	44,189	44,759	48,330	40,199	41,693	47,020	3,955	3,989	4,857	98	96	103
ใต้	1,832	1,783	1,902	1,729	1,698	1,800	174	174	195	101	102	108

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2553)

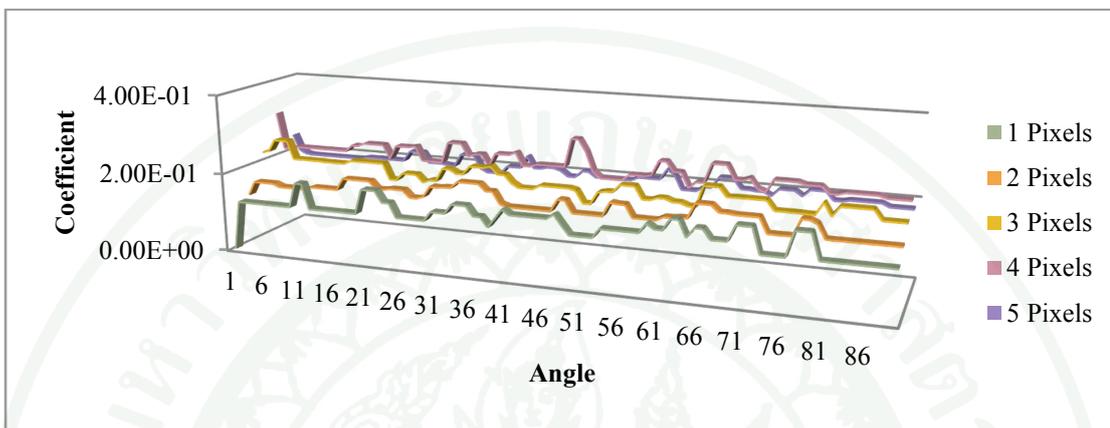


ภาคผนวก ข

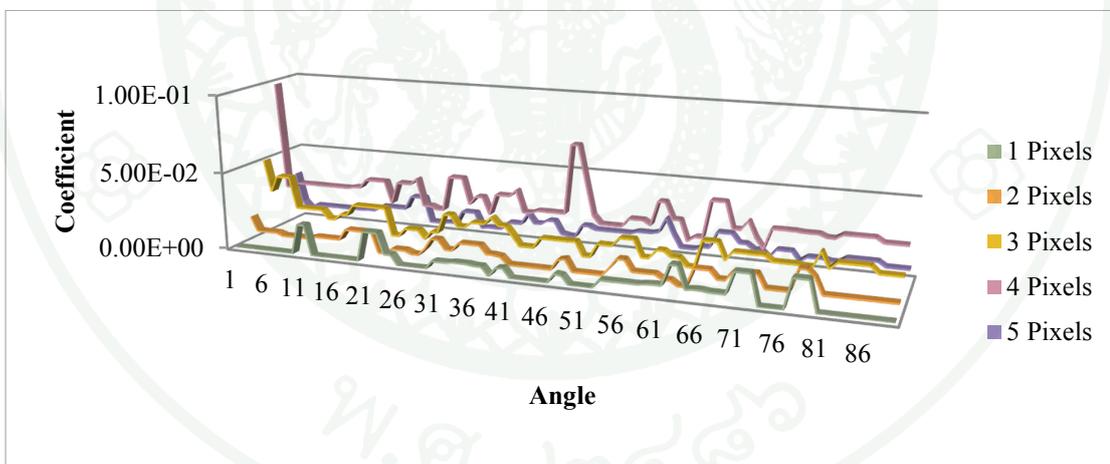
ค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากจากภาพจำลอง

ผลการทดสอบค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากจากภาพจำลองระนาบ 2 มิติ

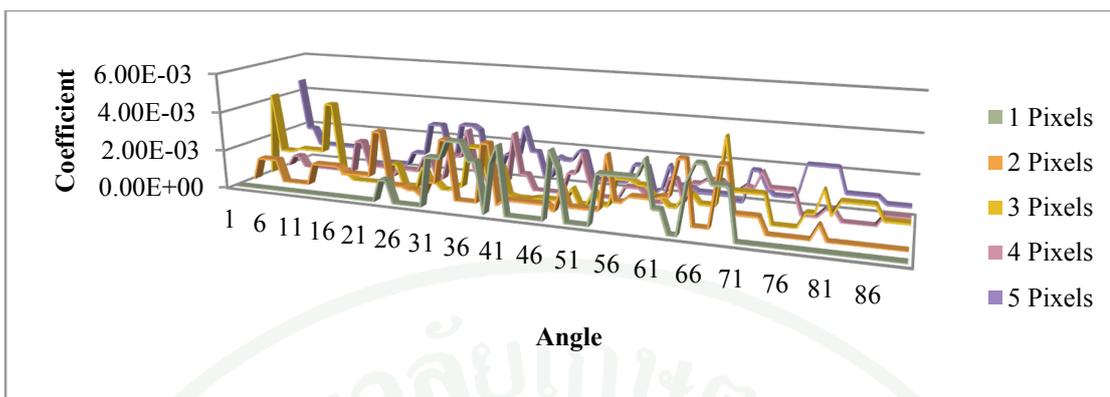
1. รูปแบบการเพิ่มขึ้นของจุดภาพ



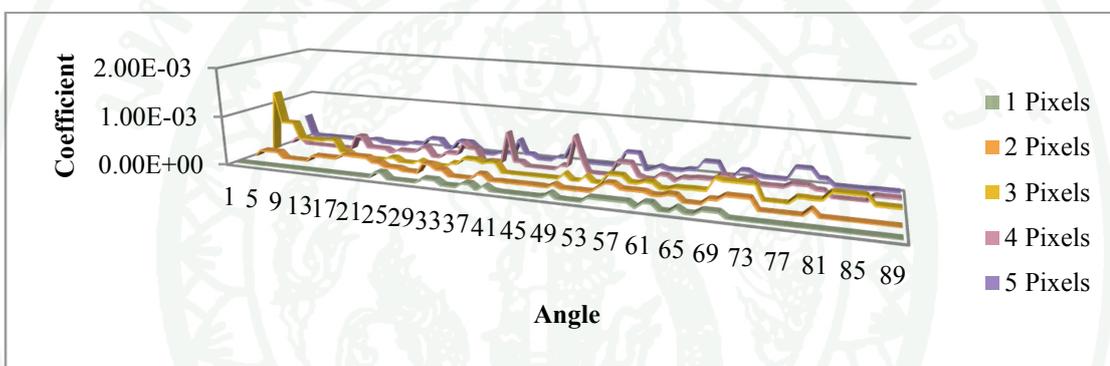
ภาพผนวกที่ ข1 ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น



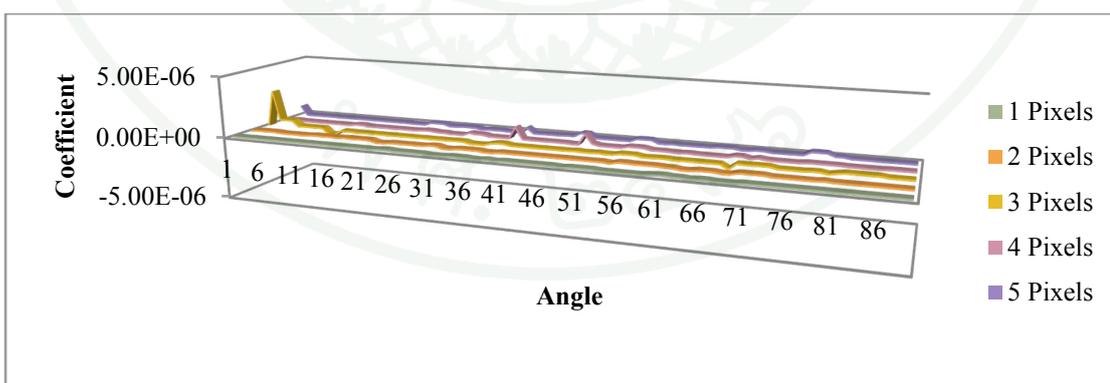
ภาพผนวกที่ ข2 ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น



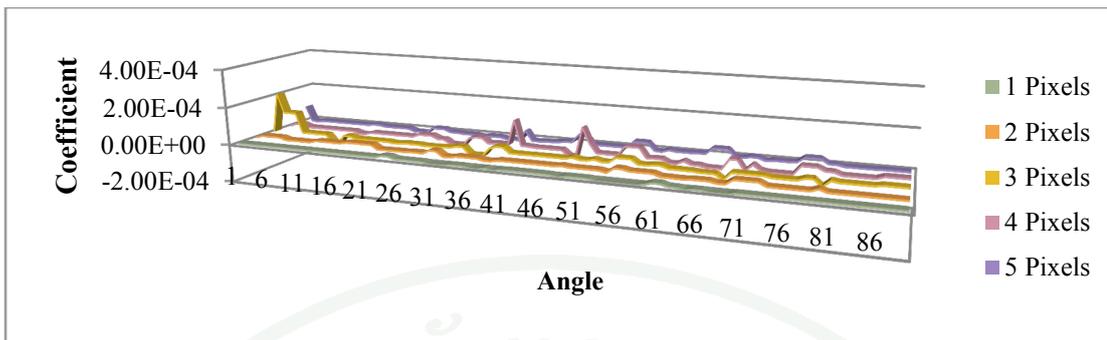
ภาพผนวกที่ ข3 ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น



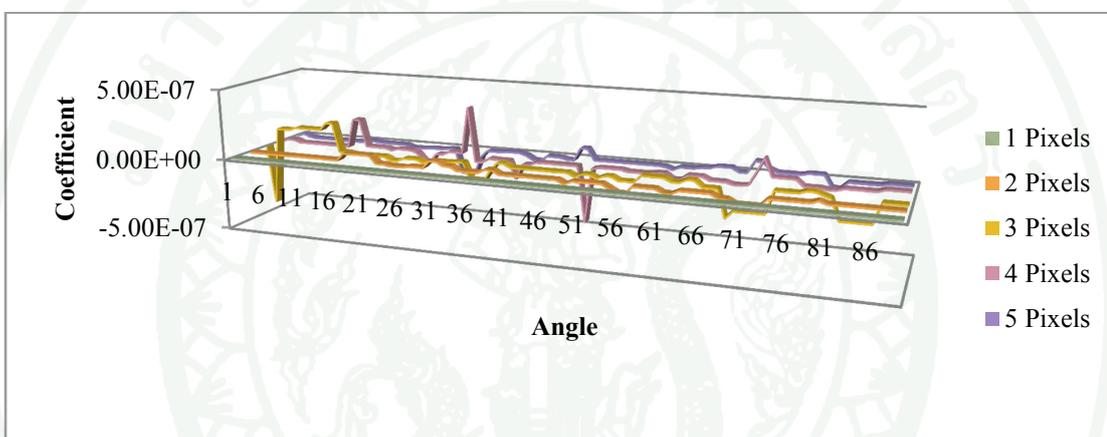
ภาพผนวกที่ ข4 ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น



ภาพผนวกที่ ข5 ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น

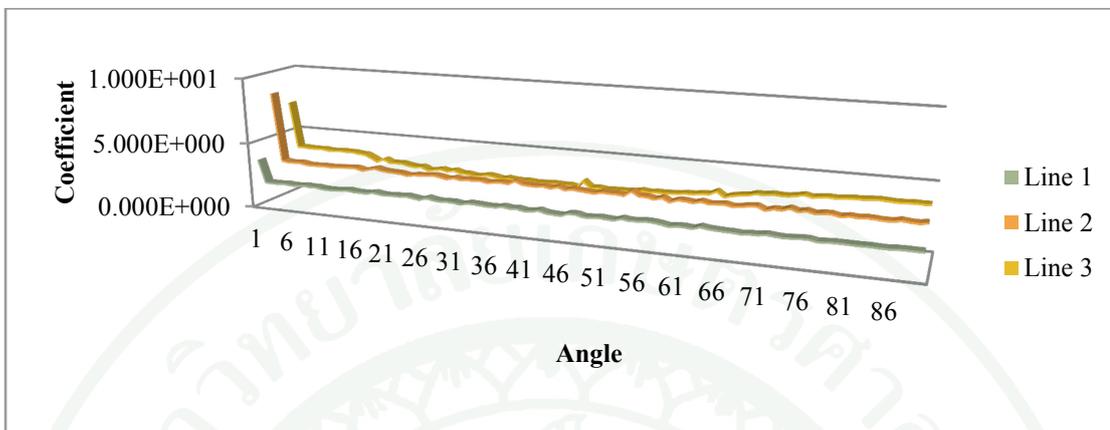


ภาพผนวกที่ ข6 ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น

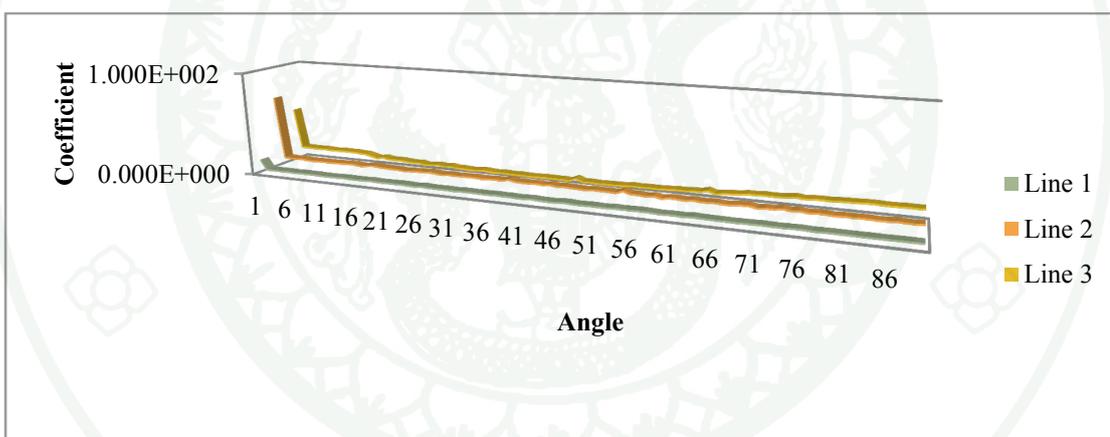


ภาพผนวกที่ ข7 ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพจุดภาพเพิ่มขึ้น

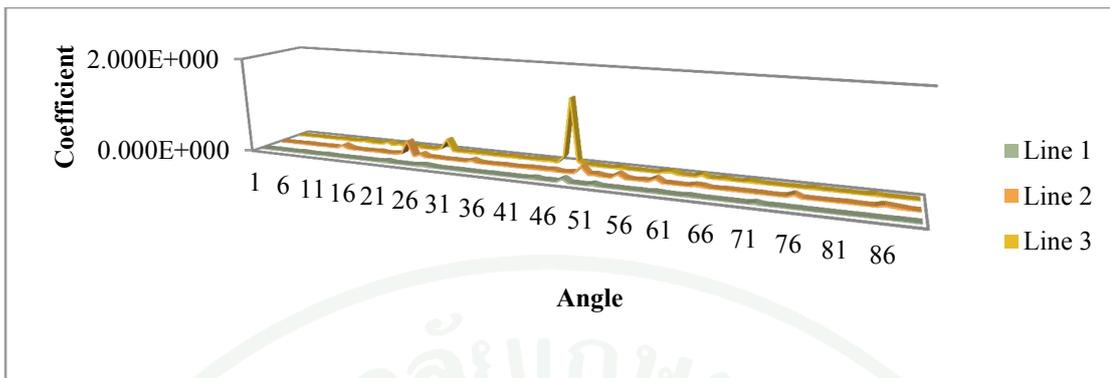
2. รูปแบบเส้นตรง



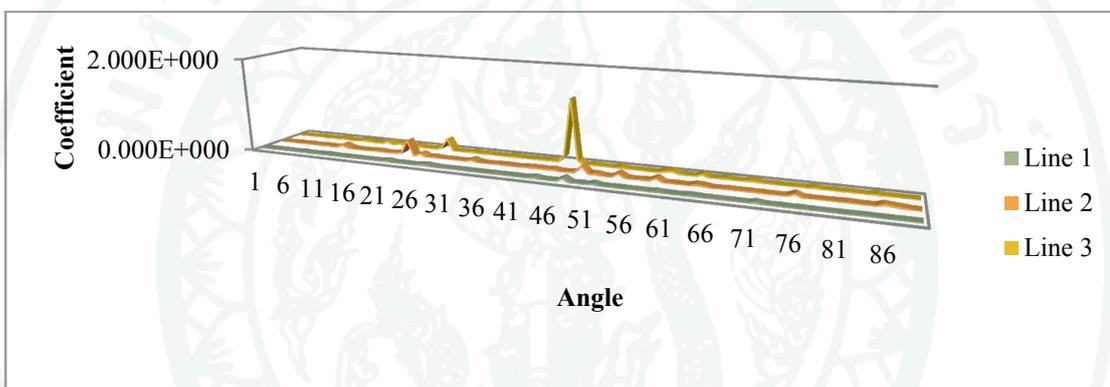
ภาพผนวกที่ ข8 ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง



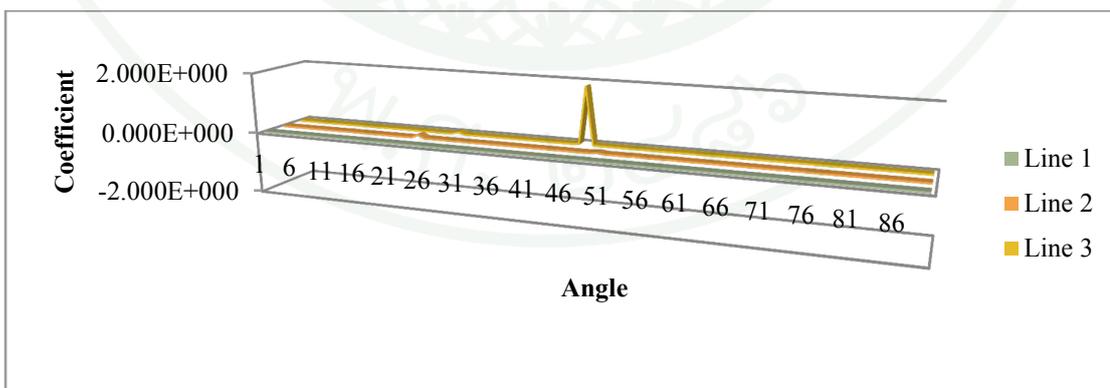
ภาพผนวกที่ ข9 ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง



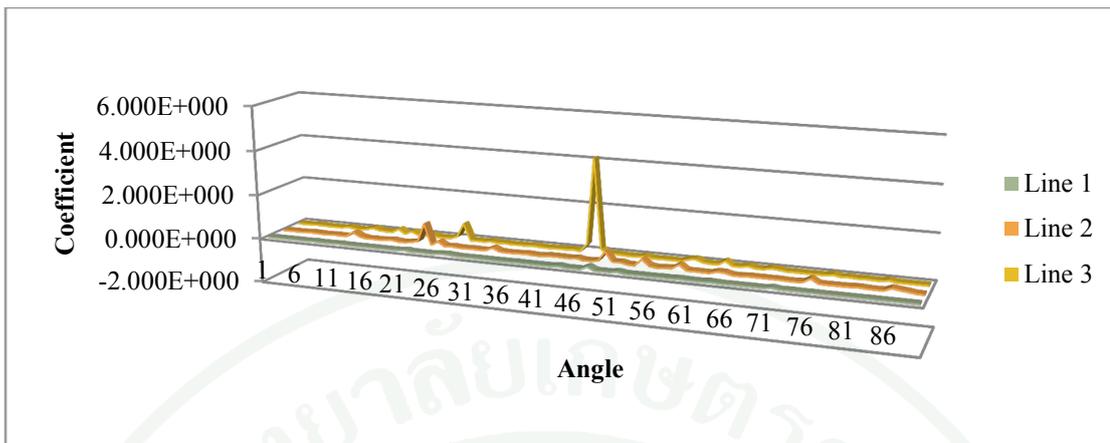
ภาพผนวกที่ ข10 ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง



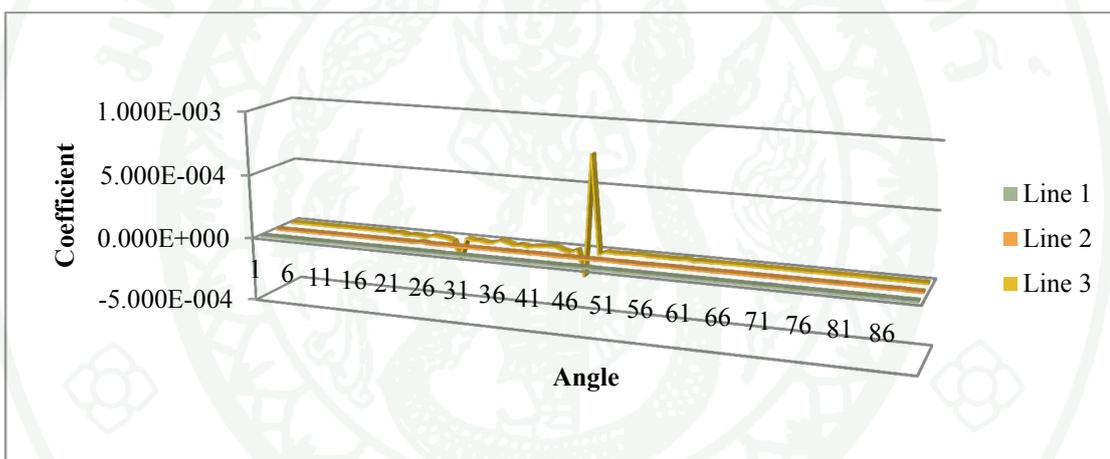
ภาพผนวกที่ ข11 ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง



ภาพผนวกที่ ข12 ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง

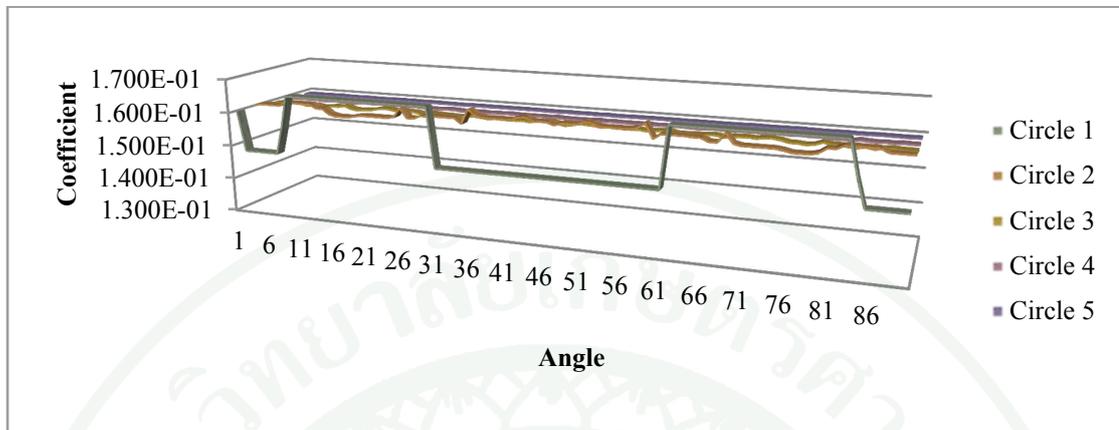


ภาพผนวกที่ ข13 ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง

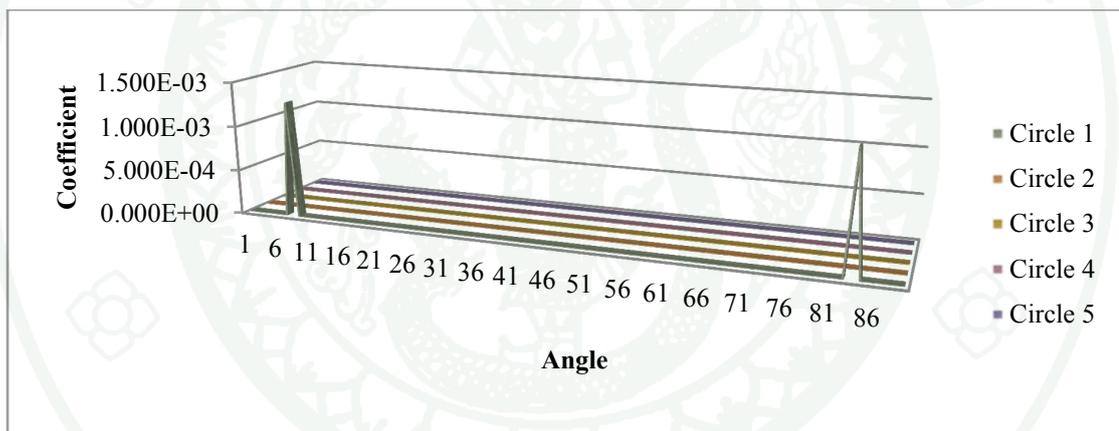


ภาพผนวกที่ ข14 ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพเส้นตรง

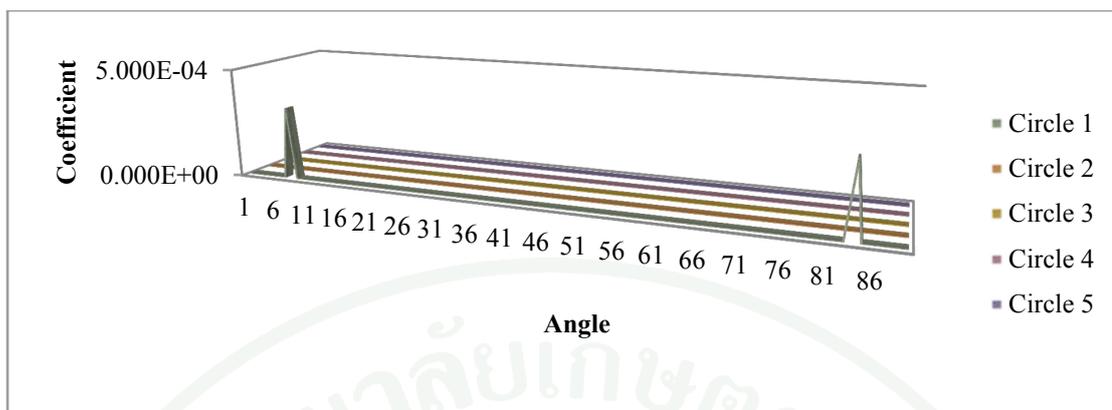
3. รูปแบบวงกลม



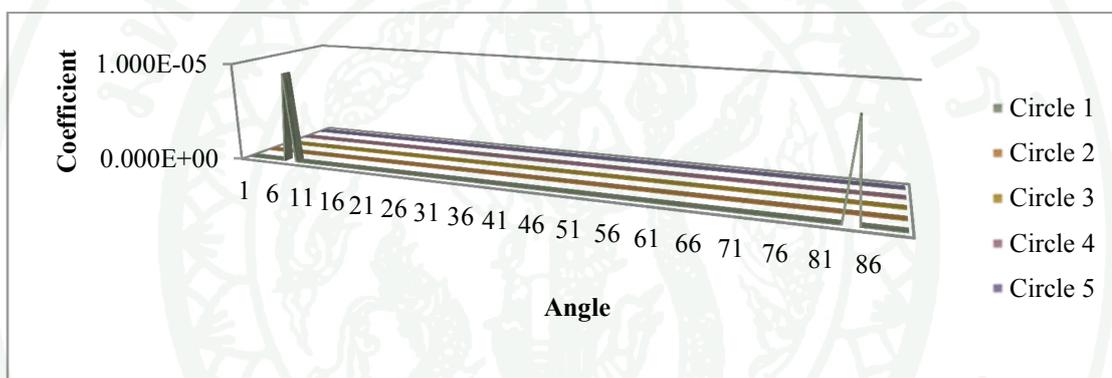
ภาพผนวกที่ ข15 ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม



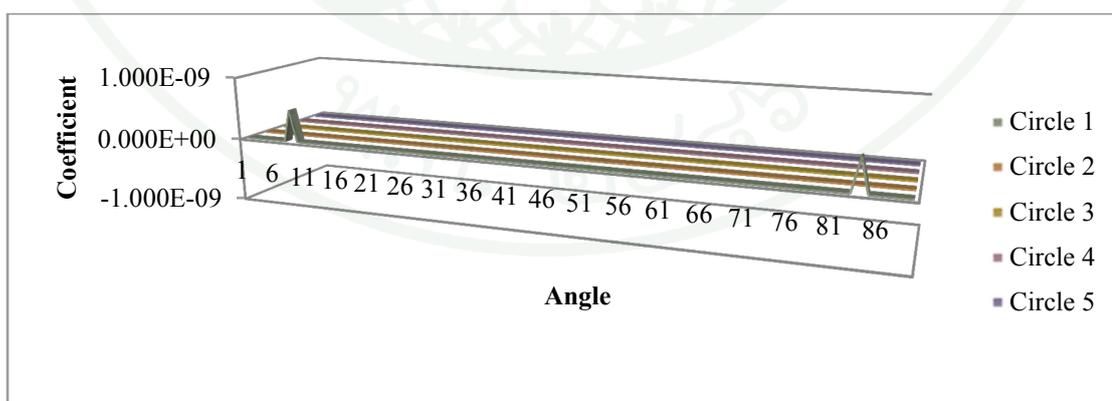
ภาพผนวกที่ ข16 ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม



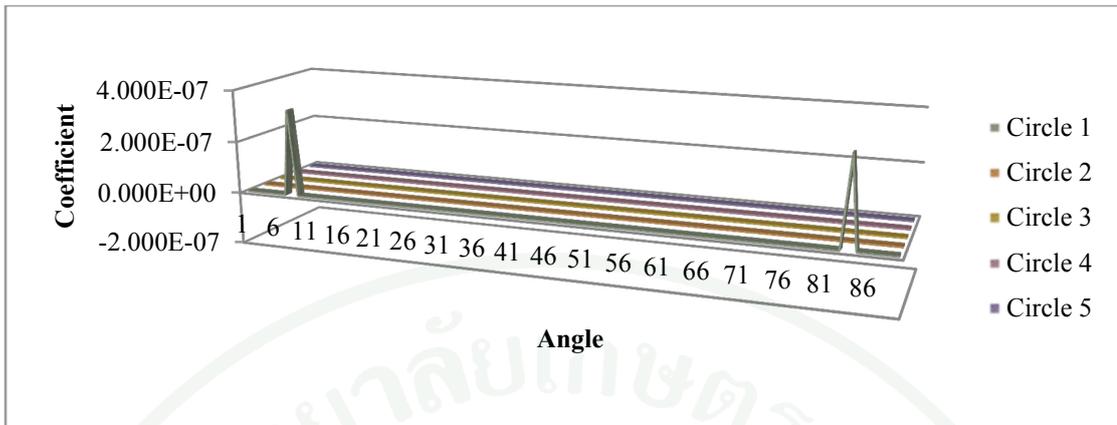
ภาพผนวกที่ ข17 ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม



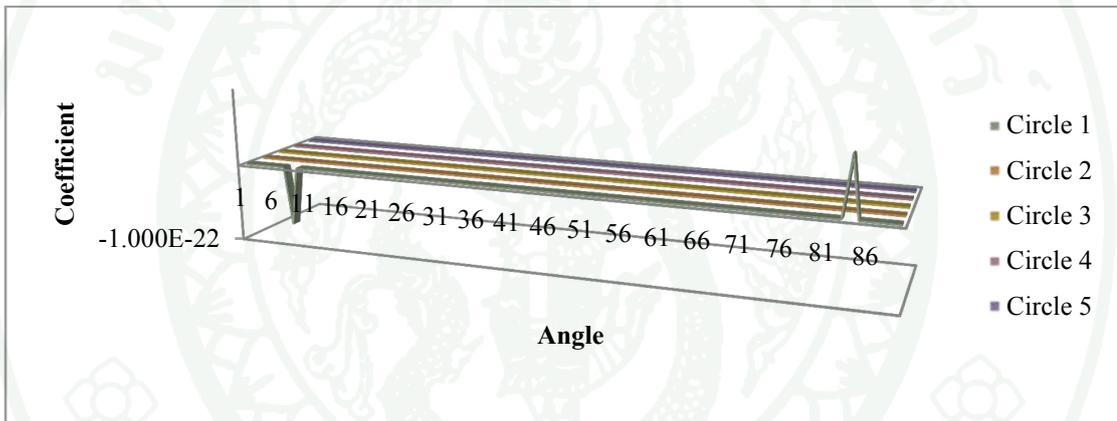
ภาพผนวกที่ ข18 ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม



ภาพผนวกที่ ข19 ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม

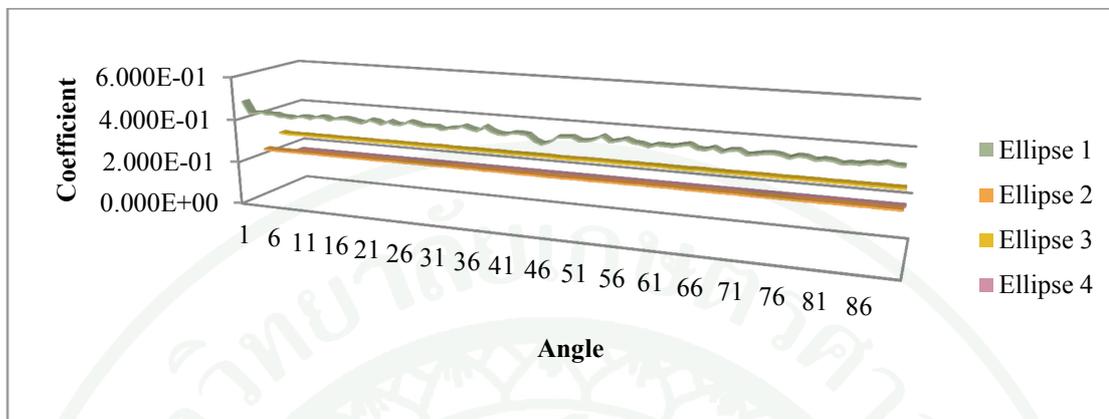


ภาพผนวกที่ ข20 ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม

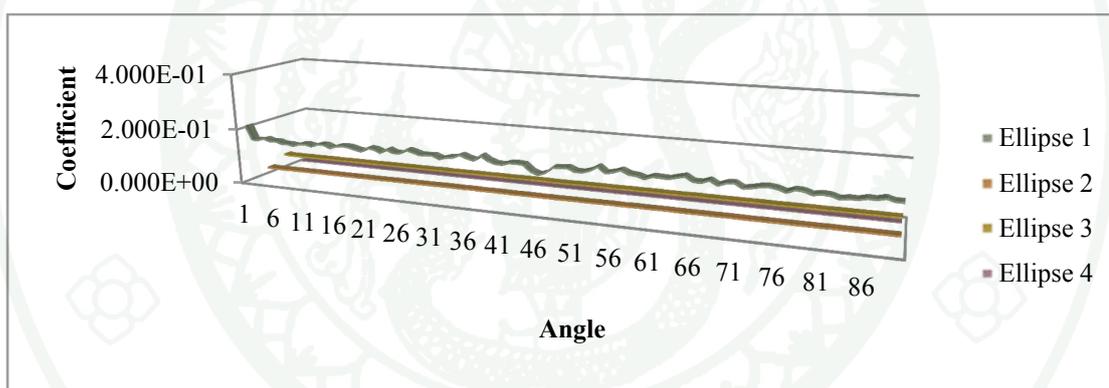


ภาพผนวกที่ ข21 ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงกลม

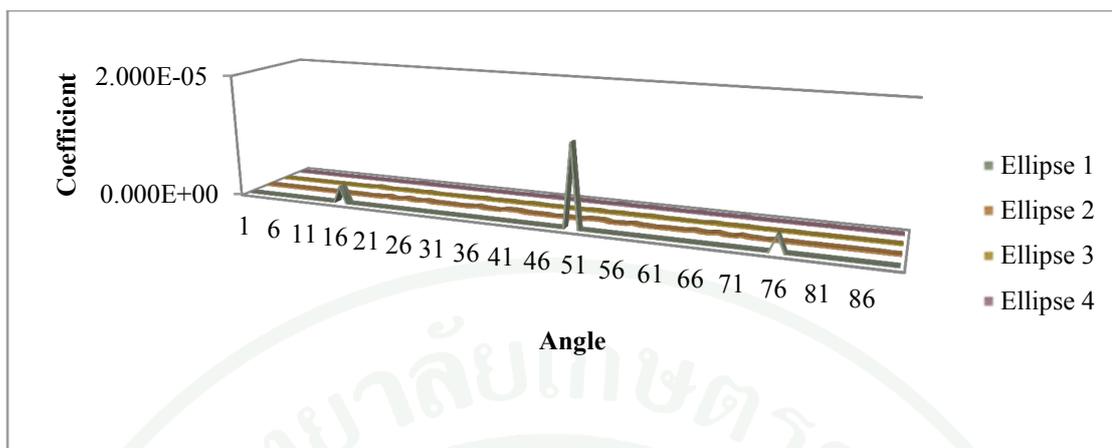
4. รูปแบบวงรี



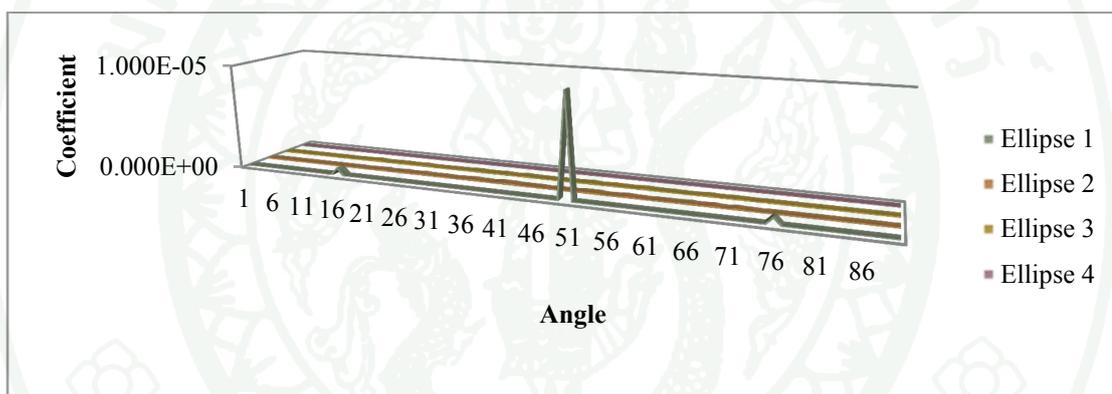
ภาพผนวกที่ ข22 ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี



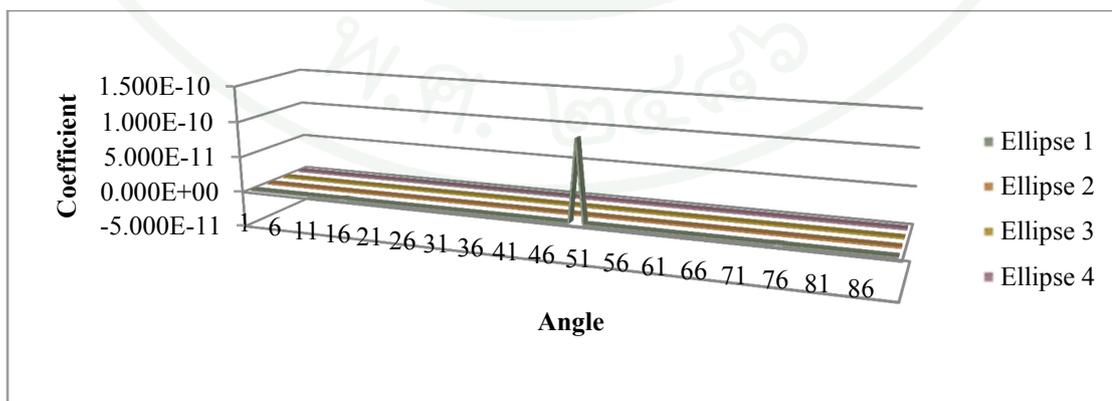
ภาพผนวกที่ ข23 ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี



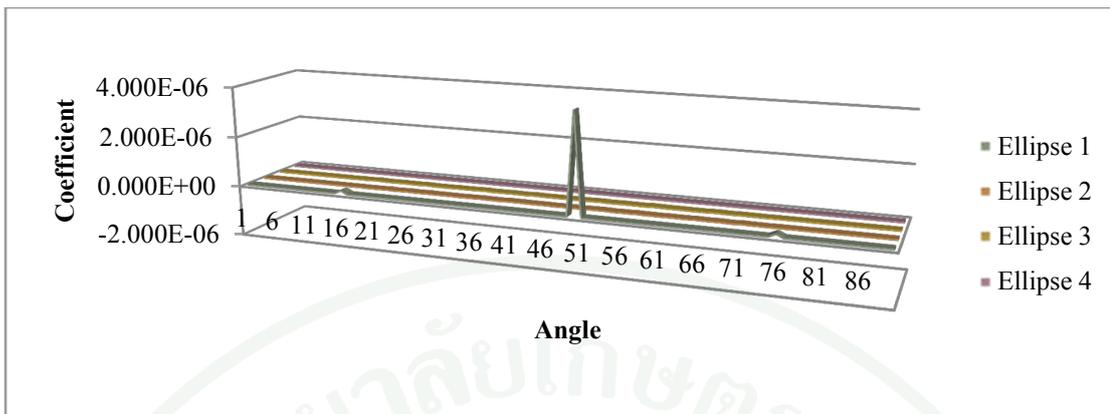
ภาพผนวกที่ ข24 ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี



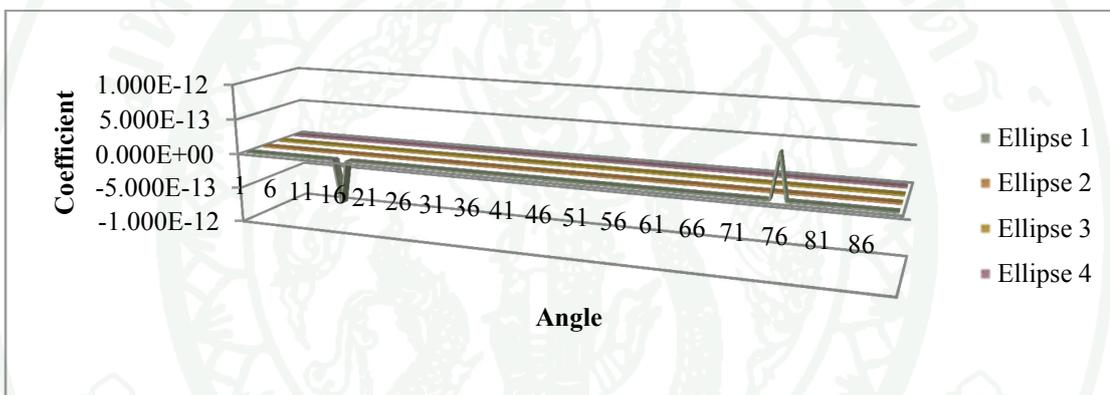
ภาพผนวกที่ ข25 ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี



ภาพผนวกที่ ข26 ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี

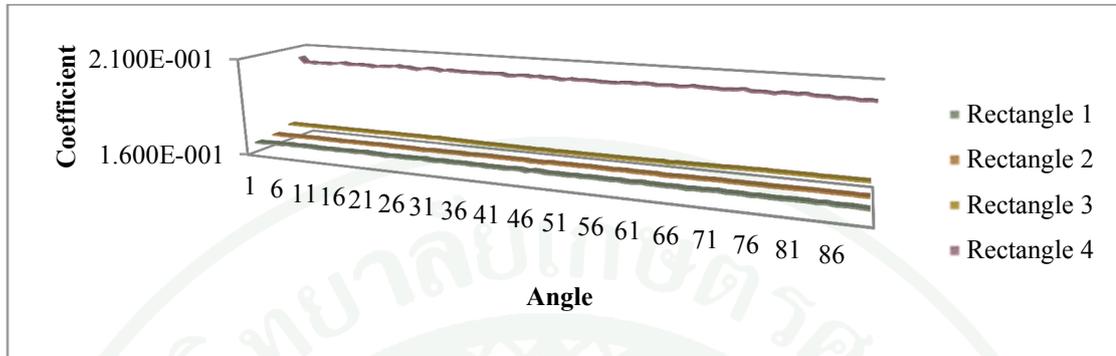


ภาพผนวกที่ ข27 ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี

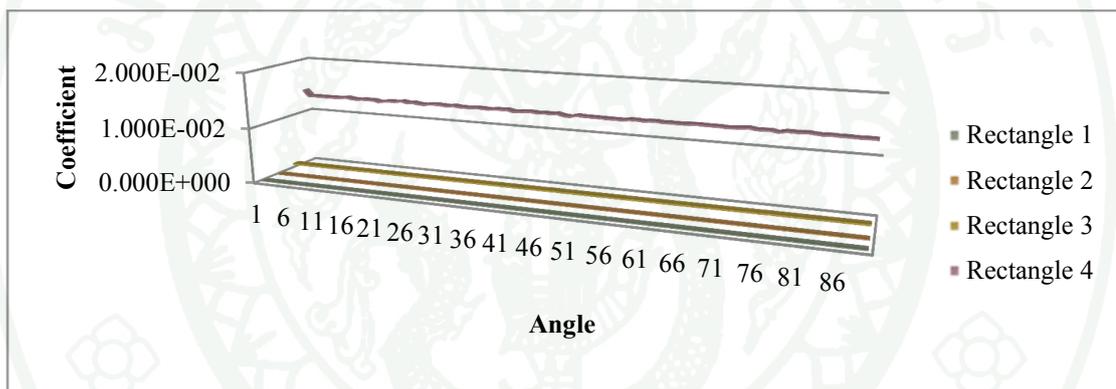


ภาพผนวกที่ ข28 ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพวงรี

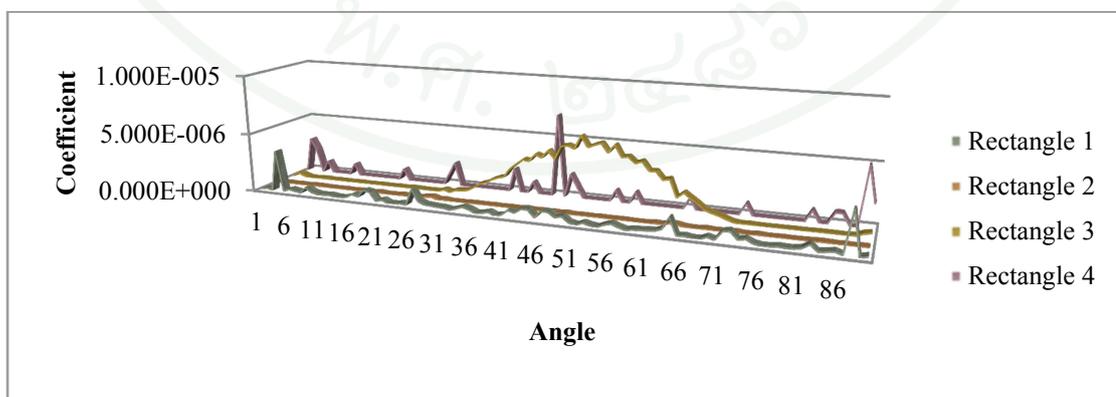
5. รูปแบบรูปสี่เหลี่ยม



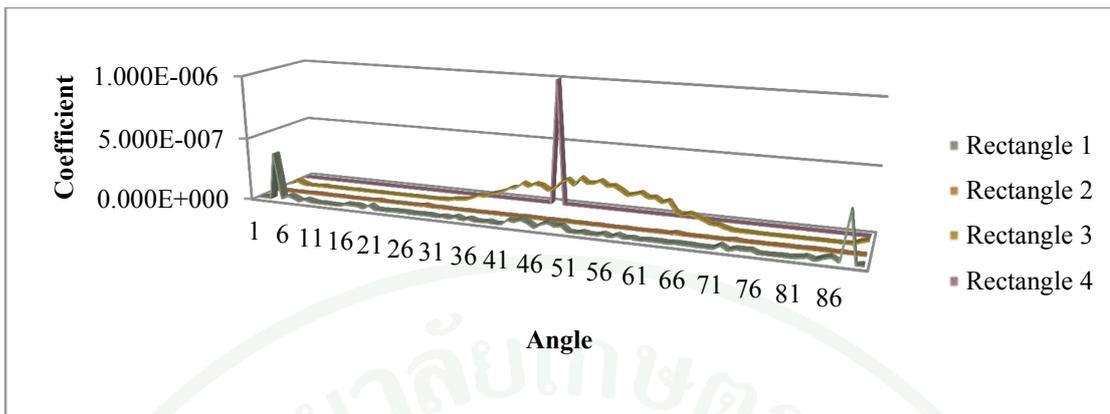
ภาพผนวกที่ ข29 ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม



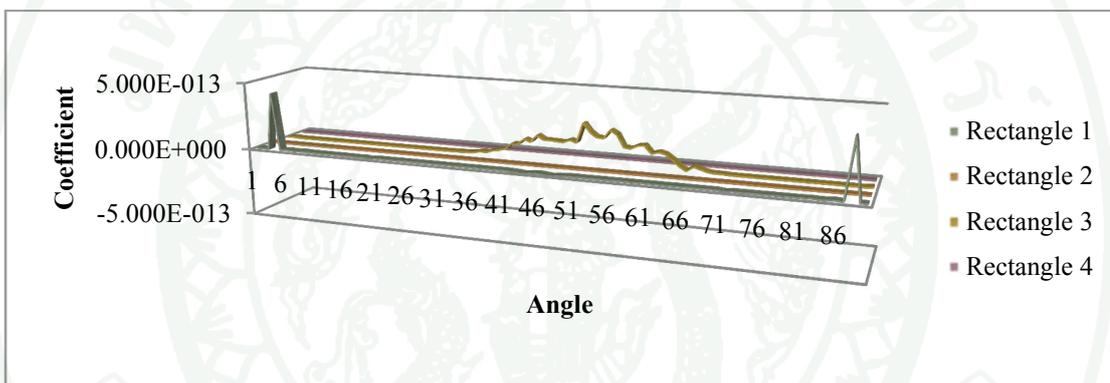
ภาพผนวกที่ ข30 ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม



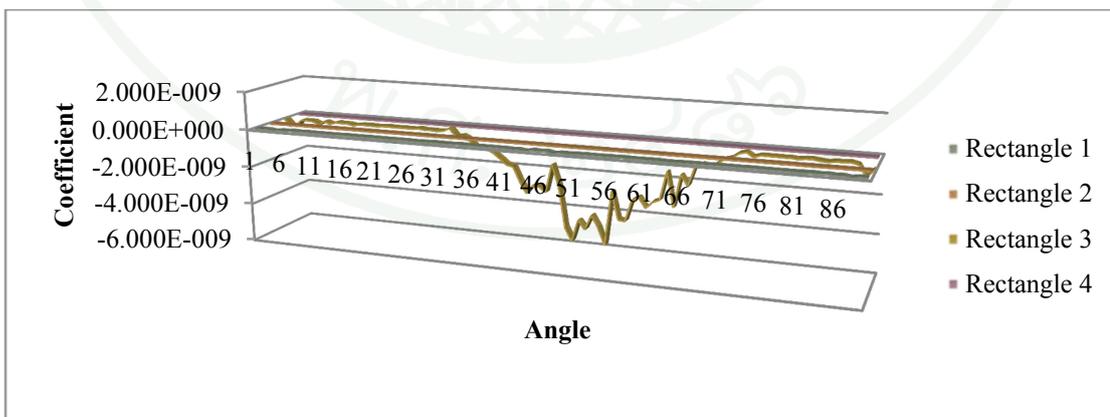
ภาพผนวกที่ ข31 ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม



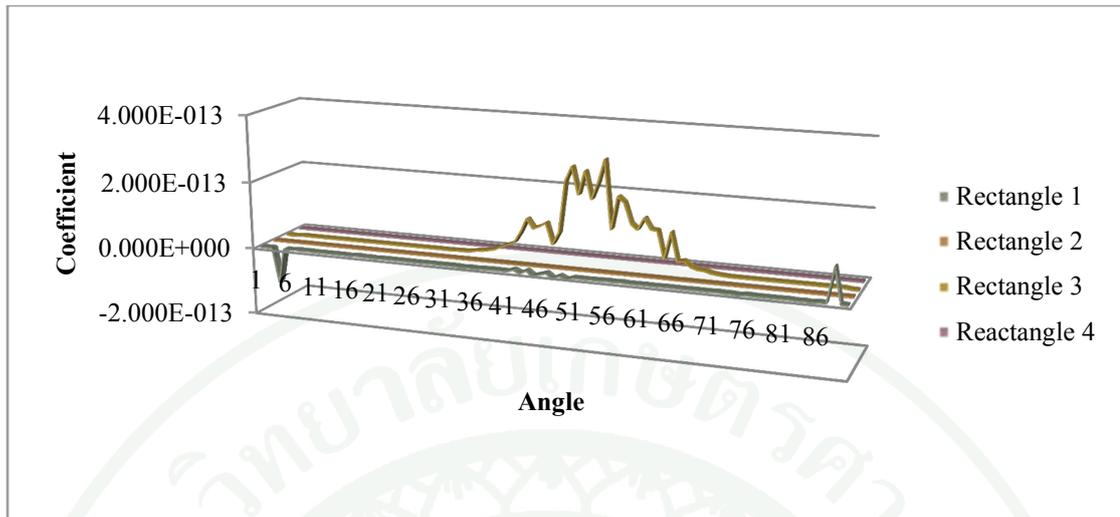
ภาพผนวกที่ ข32 ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม



ภาพผนวกที่ ข33 ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม

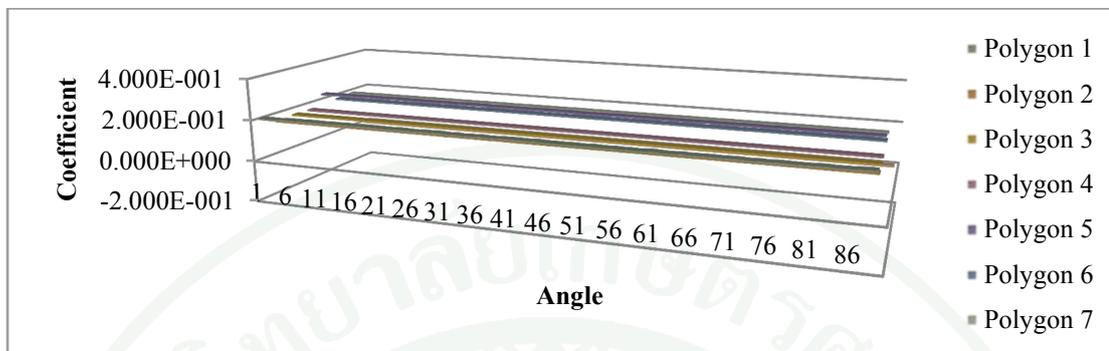


ภาพผนวกที่ ข34 ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม

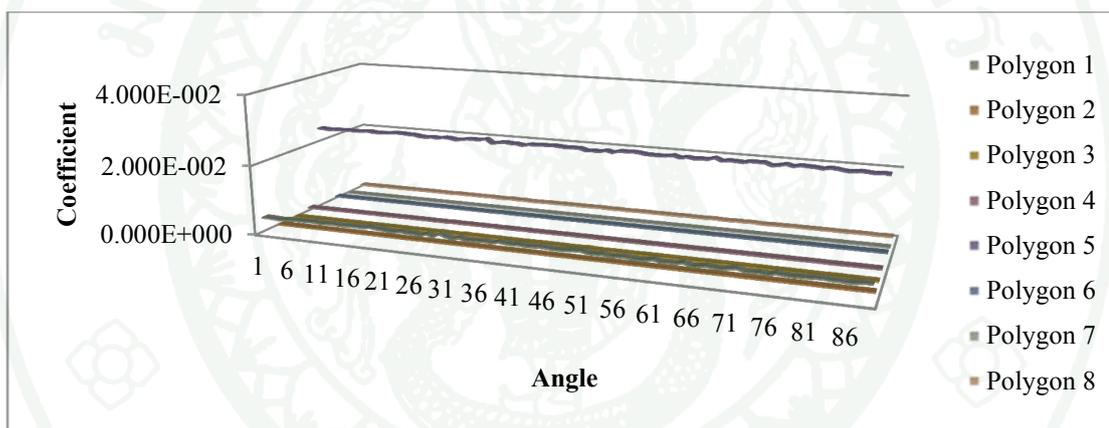


ภาพผนวกที่ ข35 ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพสี่เหลี่ยม

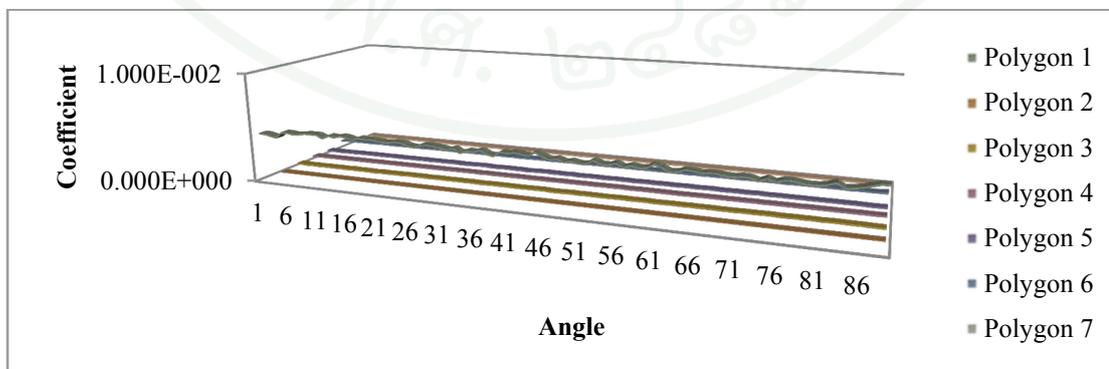
6. รูปแบบรูปหลายเหลี่ยม



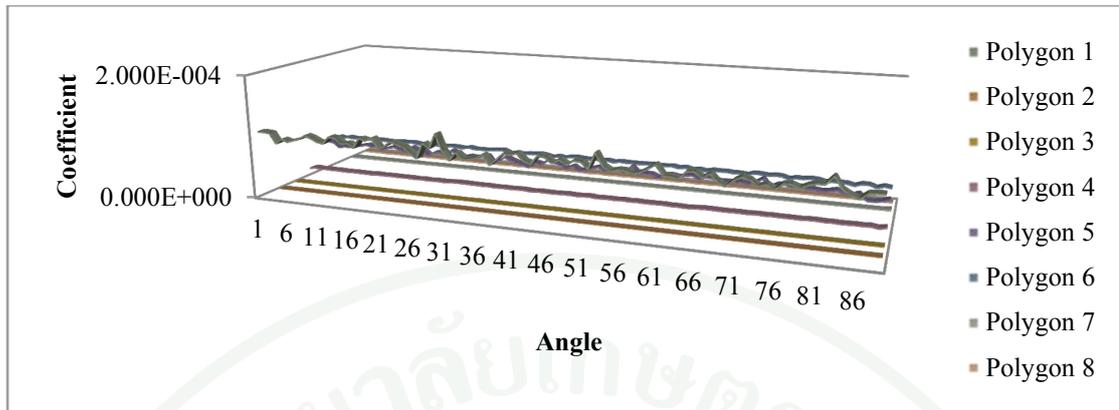
ภาพผนวกที่ ข36 ลำดับแรกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



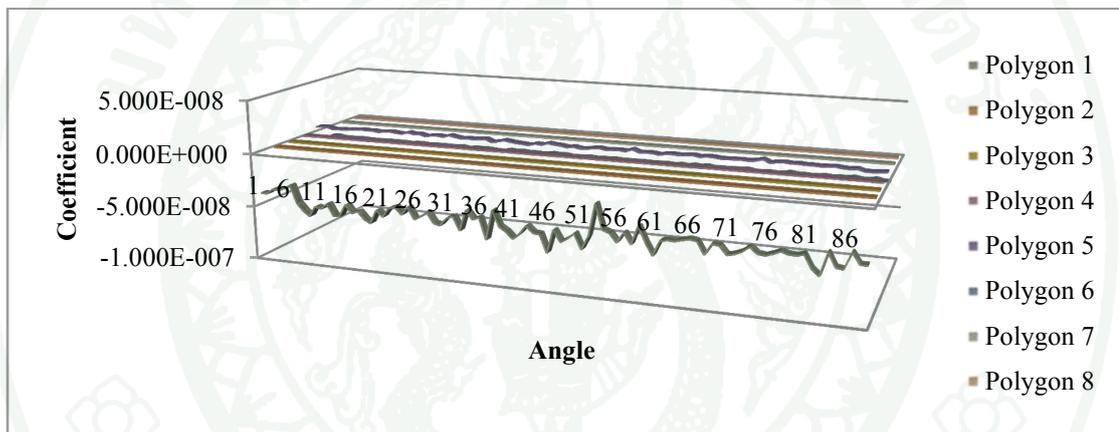
ภาพผนวกที่ ข37 ลำดับที่สองของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



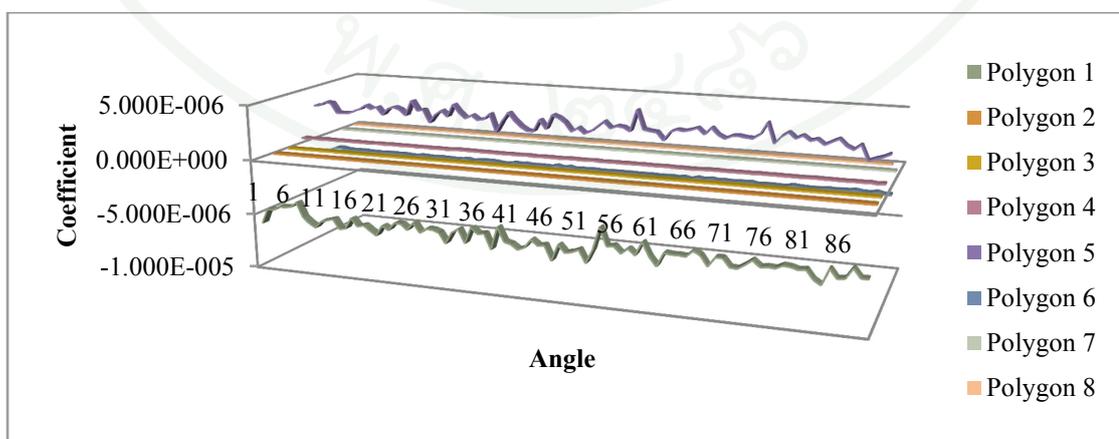
ภาพผนวกที่ ข38 ลำดับที่สามของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินแวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



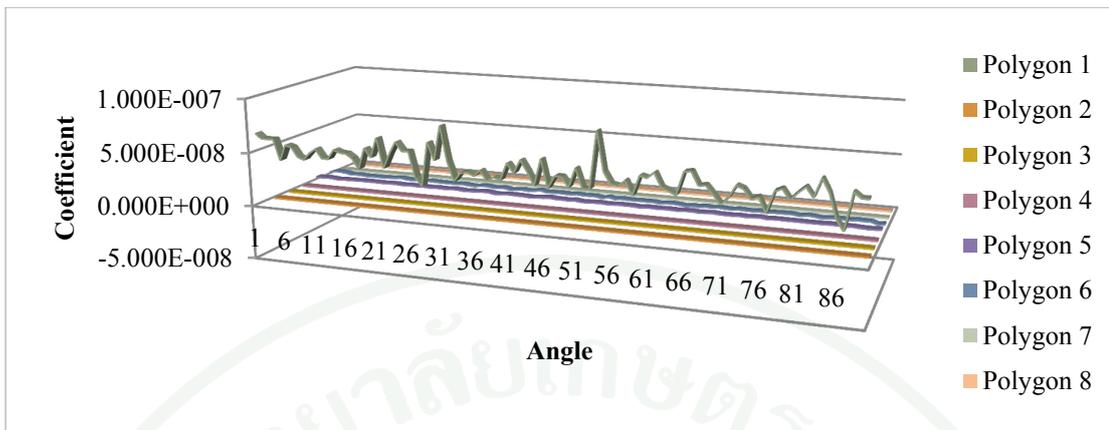
ภาพผนวกที่ ข39 ลำดับที่สี่ของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



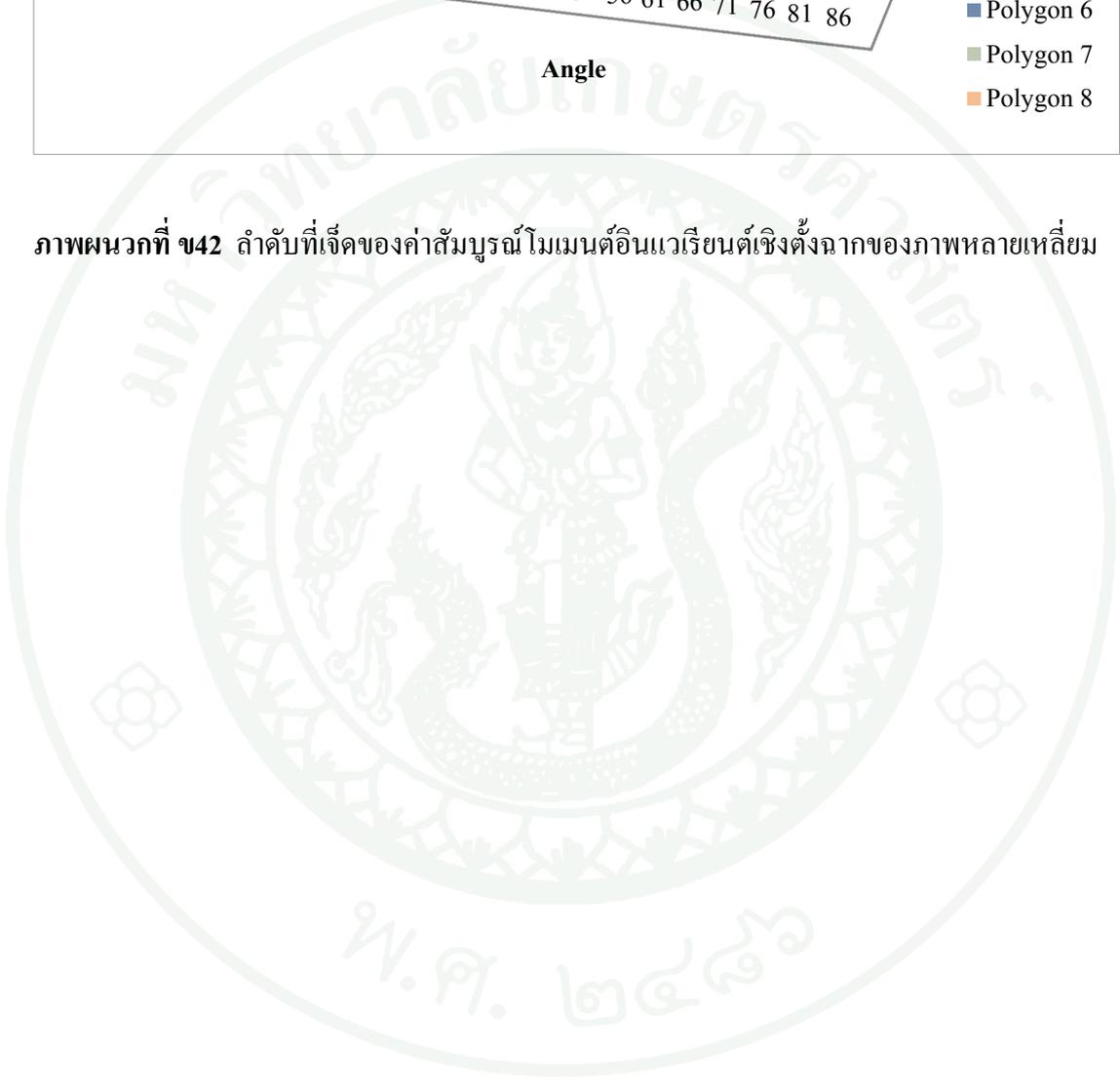
ภาพผนวกที่ ข40 ลำดับที่ห้าของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



ภาพผนวกที่ ข41 ลำดับที่หกของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



ภาพผนวกที่ ข42 ลำดับที่เจ็ดของค่าสัมบูรณ์โมเมนต์อินเวเรียนต์เชิงตั้งฉากของภาพหลายเหลี่ยม



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นายอนล ไพศาล

เกิดวันพุธที่ 24 ธันวาคม พ.ศ. 2523

สถานที่เกิด ตำบลเขาสามยอต อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี

ประวัติการศึกษา

ปวช.(อิเล็กทรอนิกส์) วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี (2542)

ปวส. (อิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม) วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสาคร (2545)

อศ.บ. (อิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2550)

วศ.มบ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2555)

ตำแหน่งปัจจุบัน นักวิจัยอิสระ

สถานที่ทำงานปัจจุบัน 39/1 ซอย สักมสงเคราะห์ 12 ถนน สักมสงเคราะห์ แขวง ลาดพร้าว เขต ลาดพร้าว กรุงเทพฯ 10230

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ-