



การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำปาวด้วยการรับรู้ระยะไกลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ

วิทยานิพนธ์

ของ

พงษ์พัฒน์ สัจจา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

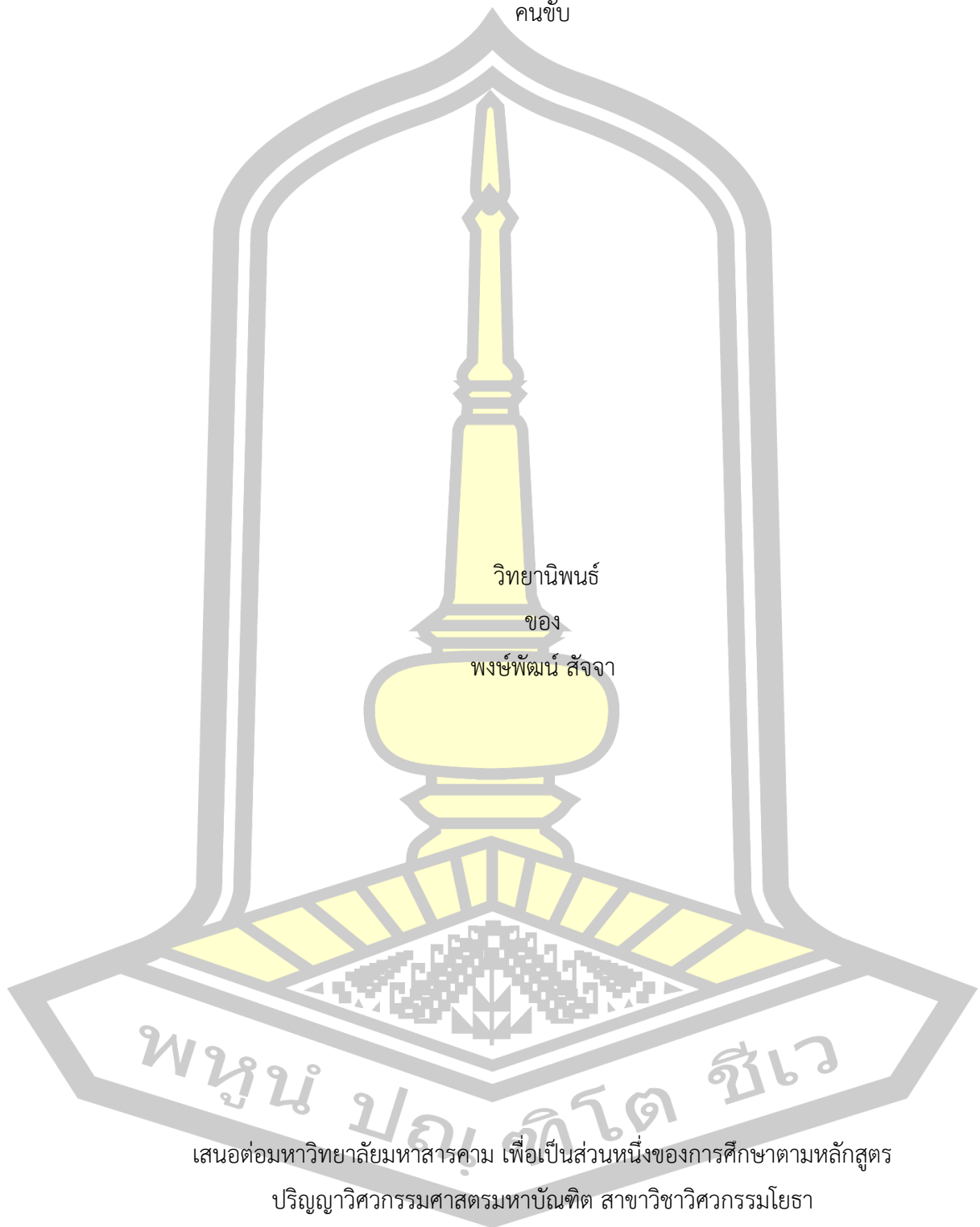
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำปาวด้วยการรับรู้ระยะไกลโดยใช้อากาศยานไร้

คนขับ



วิทยานิพนธ์

ของ

พงษ์พัฒน์ สัจจา

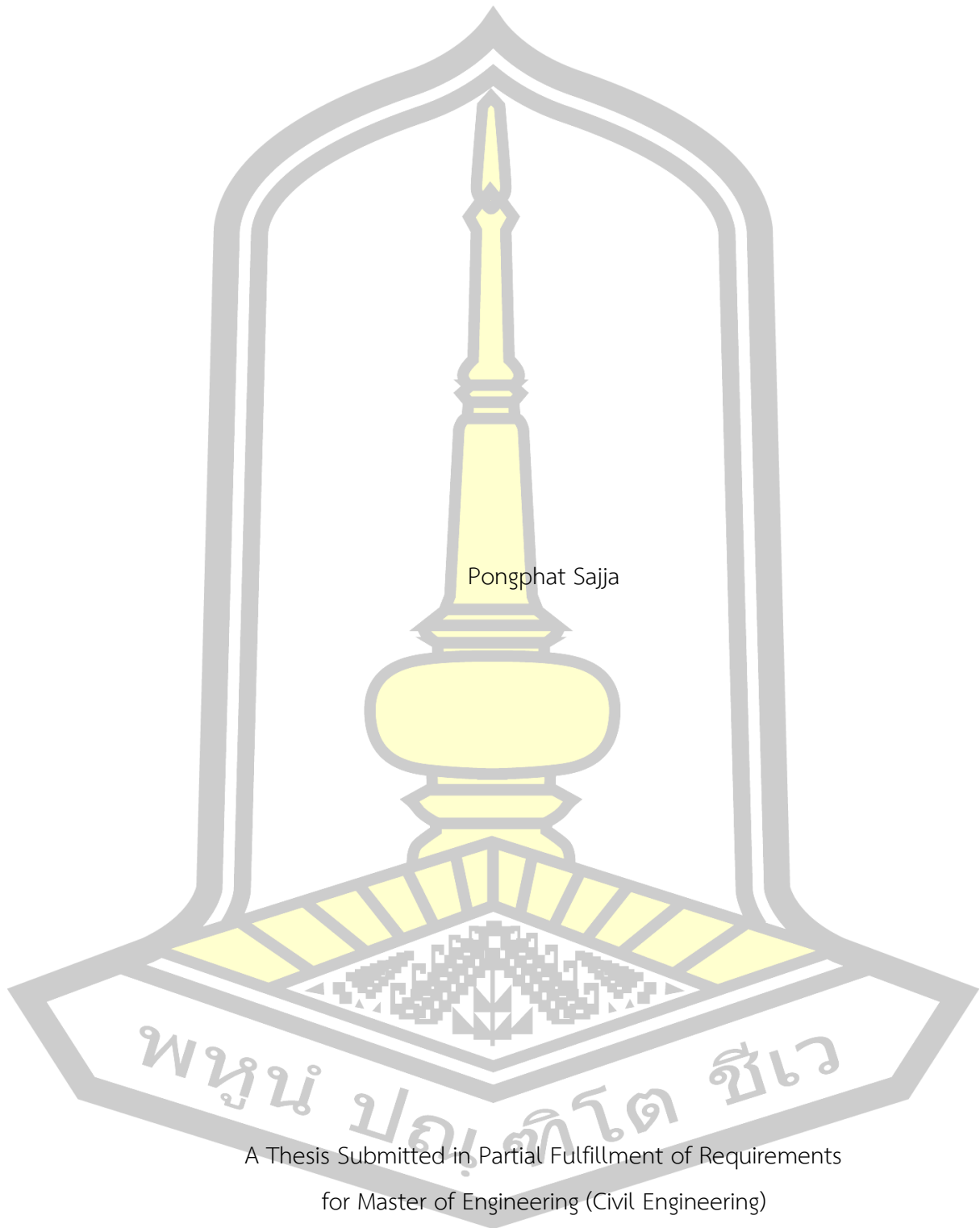
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Estimation of suspended sediment in the Lam Pao river by remote-sensing using UAV



Pongphat Sajja

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Civil Engineering)

August 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายพงษ์พัฒน์ สัจจา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. สมพินิจ เหมืองทอง )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ศิวา แก้วปลั่ง )

กรรมการ

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

กรรมการ

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำปาวด้วยการรับรู้ระยะไกลโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ		
ผู้วิจัย	พงษ์พัฒน์ สัจจา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิवा แก้วปลั่ง		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

### บทคัดย่อ

ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned aerial vehicle, UAV) ได้ถูกนำมาใช้สร้างแผนที่อย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้ต้นทุนที่ต่ำ ประหยัดเวลา และให้ความละเอียดเชิงพื้นที่ที่สูง การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อทำการประเมินการใช้ภาพถ่ายความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับแบบใบพัดหมุน Phantom 3 Professional และติดตั้งกล้อง MAPIR Survey 3 โดยใช้ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Red, Green, Blue, และ NIR เพื่อศึกษาการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำปาว โดยใช้รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตรที่ระดับความลึกของตะกอนแขวนลอยที่ต่างกัน 15, 60, 90 และ 180 เซนติเมตรจากระดับผิวน้ำนำมาประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Generalized Linear Model, Deep Learning และ Support Vector Machines ผลการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอย(SSC) ในลำน้ำปาวทำให้ทราบว่าแบบจำลอง Support Vector Machines ที่รายละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร ให้การประมาณค่าได้แม่นยำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น โดยที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ที่ 0.994 และค่า RMSE อยู่ที่ 0.142

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่มีรายละเอียดจุดภาพสูง ส่งผลให้การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ดียิ่งขึ้น ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น NIR ที่ได้จากกล้อง MAPIR Survey 3 ให้ค่าการสะท้อนแสงในน้ำได้น้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่น Red Green และ Blue เนื่องจากลำน้ำที่ศึกษามีความขุ่นน้อยมาก

คำสำคัญ : อากาศยานไร้คนขับ, การรับรู้ระยะไกล, ตะกอนแขวนลอย, รายละเอียดจุดภาพ

**TITLE** Estimation of suspended sediment in the Lam Pao river by remote-sensing using UAV

**AUTHOR** Pongphat Sajja

**ADVISORS** Assistant Professor Siwa Kaewplang , Ph.D.

**DEGREE** Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

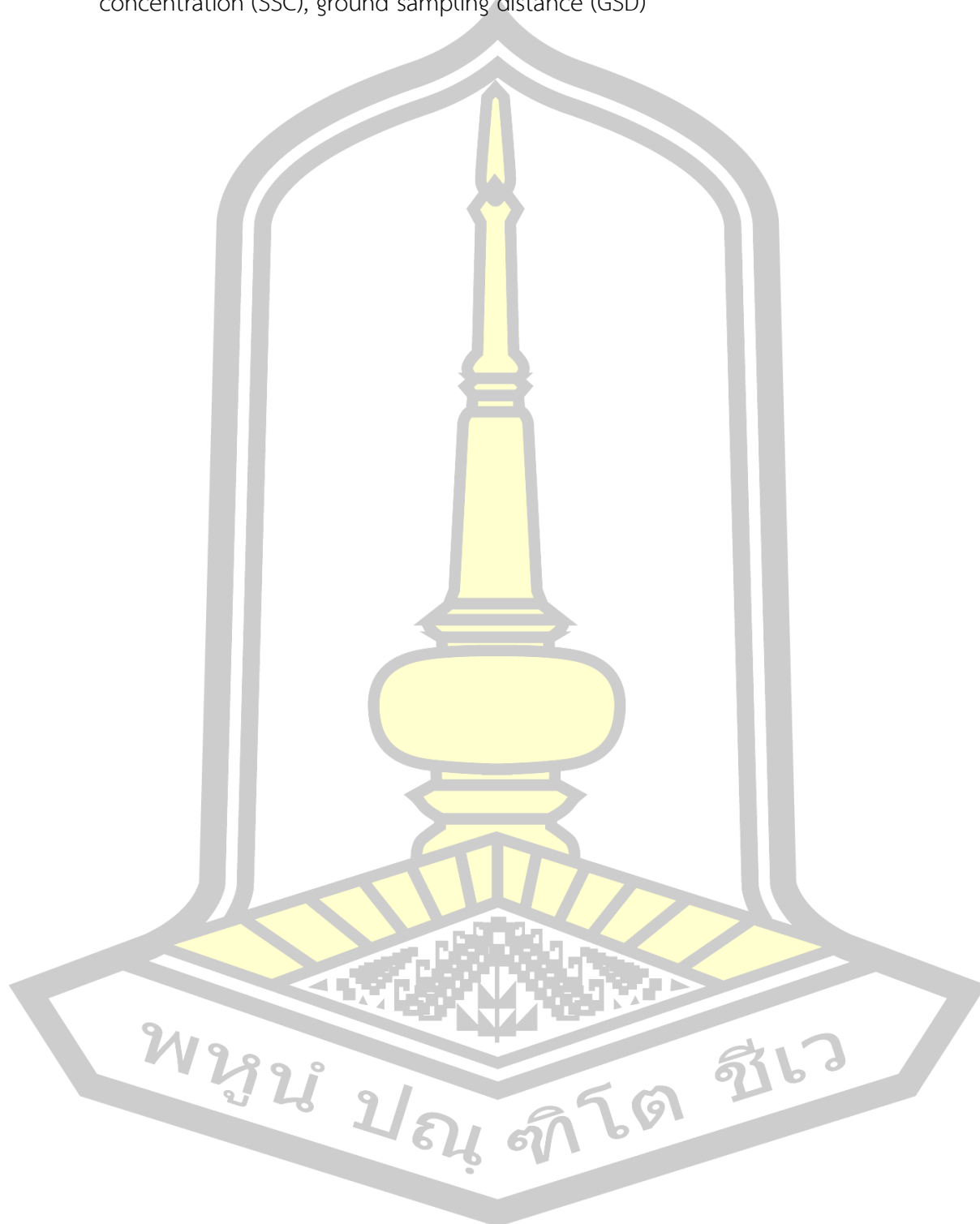
**UNIVERSITY** Mahasarakham **YEAR** 2019  
University

### ABSTRACT

Aerial photos from unmanned aerial vehicles (UAV) have been use to create maps. Because they can be safe time and low cost. Beside above reasons, crucial point that UVAs should be use to create the maps is they can give a high spatial resolution. This study is for assessment images from unmanned aerial vehicle with rotating blade: (Phantom 3 Professional) with MAPIR Survey 3 camera that using reflectance spectrum of Red, Green, Blue and NIR for study estimating the suspended sediment concentration (SSC) in Pao River. Estimation of suspended sediments at ground sampling distance (GSD) 5, 10, 25, 50 and 100 centimeters ,details on many pictures size at a depth of sediments at differences levels namely; 15, 60, 90, and 180 centimeters. Then evaluate the effective of Mathematical models: Generalize linear Model, Deep Learning and Support Vector Machines. The estimation of suspended sediments in Pao River has showed that Support Vector Machines at GSD 10 centimeters gives the most precise prediction ; the coefficient of correlation ( $R^2$ ) = 0.994 and RMSE = 0.142 .

The result of this research showed that images from high ground sampling distance (GSD) unmanned aerial vehicles (UAV) give good effected of suspended sediment concentration (SSC). The reflectance spectrum of NIR from MAPIA survey 3 camera has less reflectance. Therefore SSC in Pao River quite low.

Keyword : unmanned aerial vehicles (UAV), remote sensing, suspended sediment concentration (SSC), ground sampling distance (GSD)



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยแนะนำของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิवा แก้วปลั่ง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพินิจ เหมืองทอง ที่ให้เกียรติเป็นประธาน โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กริสน์ ชัยมูล เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่านที่ให้การอำนวยความสะดวก และประสานงานในการทำวิทยานิพนธ์ให้ผู้เขียนตลอดมา

ท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ข้าราชการเทศบาล พนักงานเทศบาลตำบลท่าคันโท ที่คอยให้กำลังใจจนงานประสบผลสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้เขียนขอให้เป็นกตเวทิตาแต่บิดา มารดา ครอบครัว เพื่อน พ้องของผู้เขียน ตลอดจนผู้เขียนหนังสือ และบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้เขียนจนสามารถให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

พงษ์พัฒน์ สัจจา

พูน ปณ ทิโต ชีเว

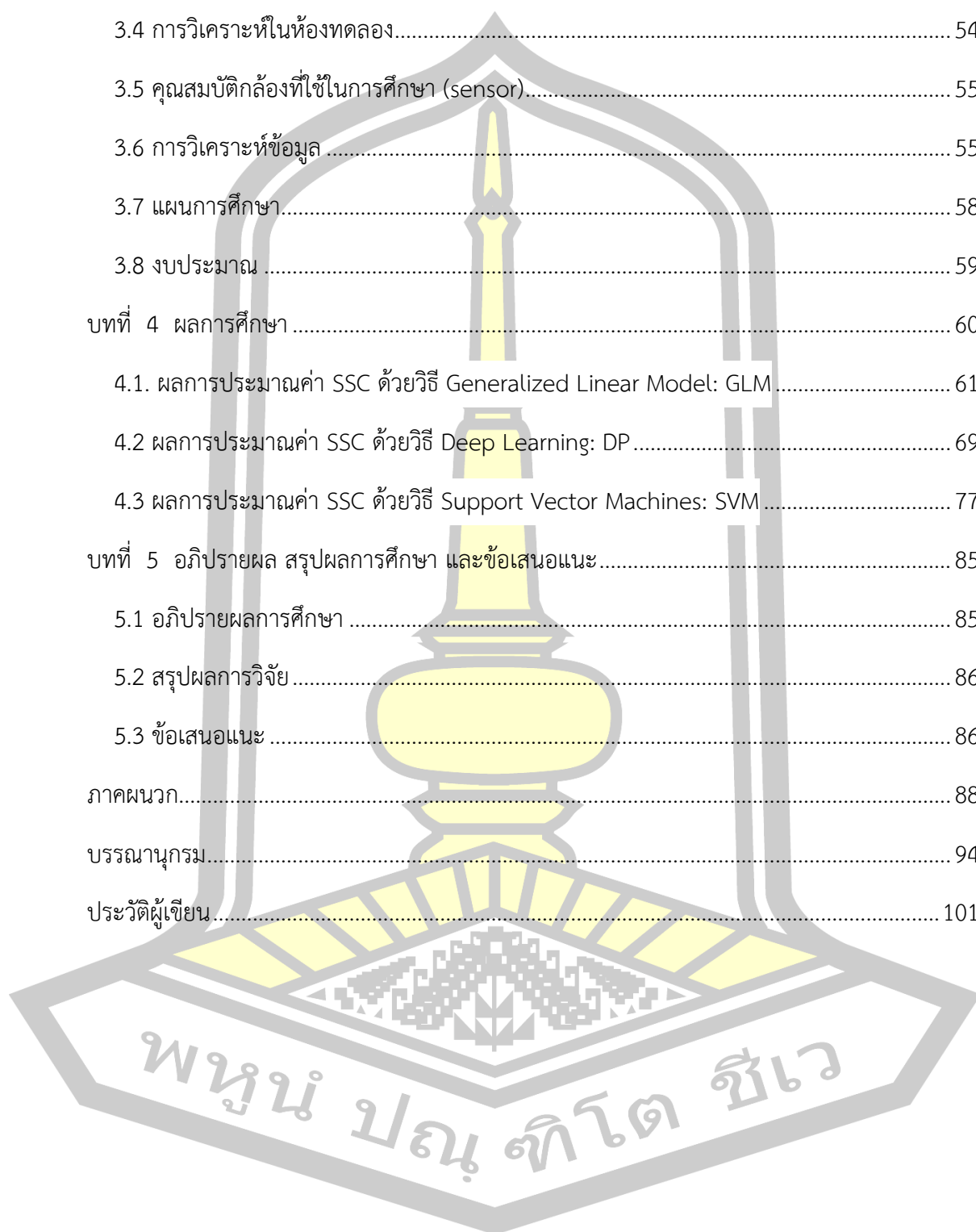


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการทำการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.4 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1. ตะกอนแขวนลอย.....	4
1.1 ความหมายของตะกอน.....	4
1.2 กระบวนการกักเซาะพังทะลาย.....	4
1.3 กระบวนการพัดพาและทับถมของตะกอน.....	4
1.4 เครื่องเก็บตัวอย่างตะกอนแบบสะสมตามจุด (Point-integrating sampler).....	6
1.5 การเก็บตัวอย่างปริมาณตะกอนแขวนลอย.....	7
2. อัตราการไหลของลำน้ำ.....	7
2.1 รูปแบบการไหล (Flow pattern).....	8

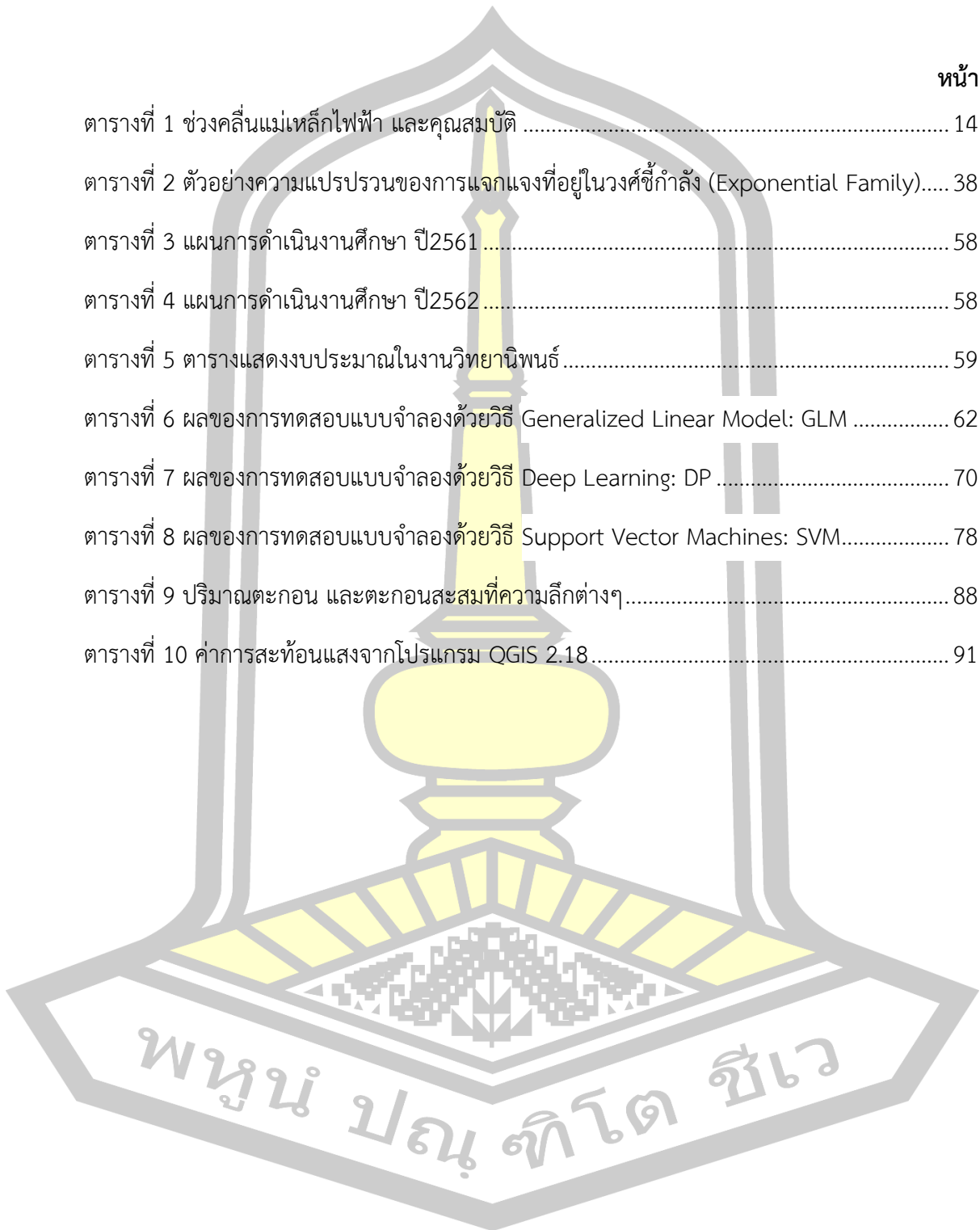
2.2 สมการต่อเนื่อง (Continuity equation).....	9
3. การสำรวจข้อมูลจากระยะไกล (Remote Sensing) .....	10
3.1 ความหมายและกระบวนการ Remote Sensing.....	10
3.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum).....	11
3.3 ช่วงคลื่นที่ใช้ประกอบในการสำรวจข้อมูลระยะไกล.....	13
3.4 พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแผ่รังสี (Energy and Radiation).....	15
3.5 ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานในชั้นบรรยากาศ .....	18
3.6 ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานกับวัตถุบนพื้นผิวโลก .....	20
3.7 การสะท้อนช่วงคลื่น .....	22
4. การสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry).....	25
4.1 ชนิดของภาพถ่าย.....	26
4.2 การบินถ่ายภาพตั้ง.....	27
5. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Regression Analysis.....	34
5.1 แบบจำลอง Generalized Linear Models: GLMs.....	37
5.2 แบบจำลอง Deep learning: DL .....	38
5.3 แบบจำลอง Support Vector Machine: SVM .....	40
5.4 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Statistical significance).....	42
5.5 รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (Root Mean Square Error: RMSE).....	44
5.6 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: $R^2$ ).....	44
5.7 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean Square Error: MSE).....	45
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 พื้นที่ศึกษา.....	50
3.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา .....	52

3.3 การเก็บข้อมูลสนาม .....	53
3.4 การวิเคราะห์ในห้องทดลอง.....	54
3.5 คุณสมบัติกล้องที่ใช้ในการศึกษา (sensor).....	55
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล .....	55
3.7 แผนการศึกษา.....	58
3.8 งบประมาณ .....	59
บทที่ 4 ผลการศึกษา .....	60
4.1 ผลการประมาณค่า SSC ด้วยวิธี Generalized Linear Model: GLM.....	61
4.2 ผลการประมาณค่า SSC ด้วยวิธี Deep Learning: DP.....	69
4.3 ผลการประมาณค่า SSC ด้วยวิธี Support Vector Machines: SVM.....	77
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 อภิปรายผลการศึกษา .....	85
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.3 ข้อเสนอแนะ .....	86
ภาคผนวก.....	88
บรรณานุกรม.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	101



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคุณสมบัติ .....	14
ตารางที่ 2 ตัวอย่างความแปรปรวนของการแจกแจงที่อยู่ในวงศ์ชี้กำลัง (Exponential Family).....	38
ตารางที่ 3 แผนการดำเนินงานศึกษา ปี2561 .....	58
ตารางที่ 4 แผนการดำเนินงานศึกษา ปี2562 .....	58
ตารางที่ 5 ตารางแสดงงบประมาณในงานวิทยานิพนธ์ .....	59
ตารางที่ 6 ผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Generalized Linear Model: GLM .....	62
ตารางที่ 7 ผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Deep Learning: DP .....	70
ตารางที่ 8 ผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Support Vector Machines: SVM.....	78
ตารางที่ 9 ปริมาณตะกอน และตะกอนสะสมที่ความลึกต่างๆ.....	88
ตารางที่ 10 ค่าการสะท้อนแสงจากโปรแกรม QGIS 2.18.....	91

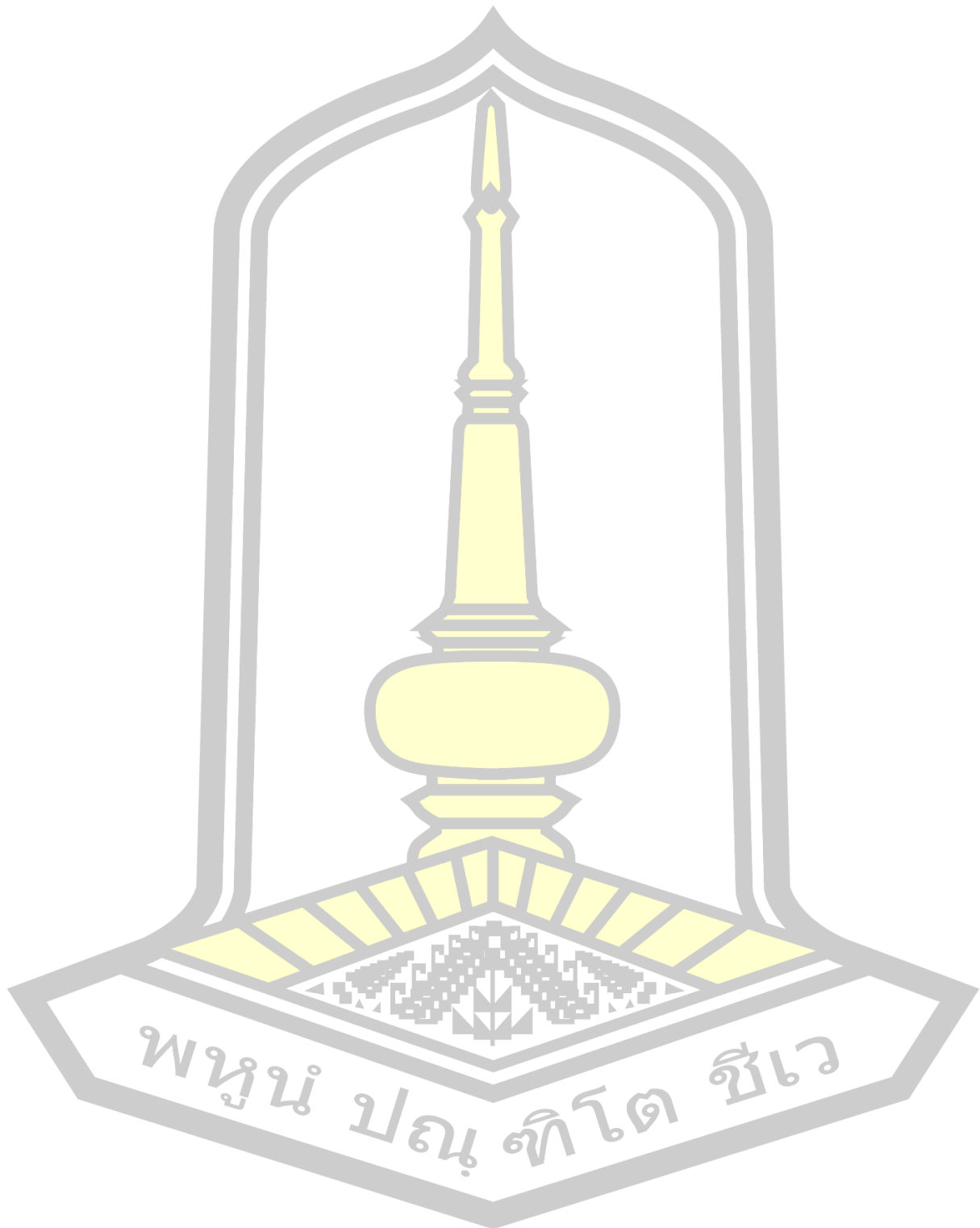


## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล .....	11
ภาพที่ 2 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum).....	12
ภาพที่ 3 ช่วงคลื่น (Band) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
ภาพที่ 4 ลักษณะการแผ่รังสีของเทหวัตถุสีดำ (Black body) ณ อุณหภูมิต่างๆ .....	17
ภาพที่ 5 ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับการทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศสู่ผิวโลก.....	19
ภาพที่ 6 ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับพื้นผิวโลก.....	20
ภาพที่ 7 ลักษณะการสะท้อนพลังงานจากพื้นผิววัตถุเรียบ และขรุขระ .....	21
ภาพที่ 8 ลักษณะการสะท้อนช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ พีช ดิน และน้ำ .....	22
ภาพที่ 9 ภาพสีผสมของข้อมูลดาวเทียม.....	25
ภาพที่ 10 ชนิดภาพถ่ายภาพแนวตั้ง ภาพเฉียงต่ำ ภาพเฉียงสูง .....	27
ภาพที่ 11 ส่วนซ้อนบริเวณที่เหลื่อมกันของภาพ.....	28
ภาพที่ 12 ส่วนเกยของแนวกบิน.....	28
ภาพที่ 13 แผนที่ภาพออร์โธ (Orthophoto Map).....	30
ภาพที่ 14 ภาพเกิดจากการประยุกต์ Oblique View.....	31
ภาพที่ 15 ตัวอย่างแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM).....	32
ภาพที่ 16 ตัวอย่างผลผลิตที่เป็นข้อมูลแบบจุดพิกัด.....	33
ภาพที่ 17 การจัดแบ่ง Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์ .....	35
ภาพที่ 18 ลำดับขั้นตอนและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Regression Analysis.....	36
ภาพที่ 19 ชนิดของโครงข่าย Deep Learning (Types of Deep Learning Networks).....	39
ภาพที่ 20 ตัวอย่างของตัวแบบจำแนก SVM บนข้อมูลขนาด 2 มิติ.....	40
ภาพที่ 21 การคำนวณ Maximum Margin .....	41

ภาพที่ 22 การหาค่า Margin.....	42
ภาพที่ 23 แสดงจุดเก็บข้อมูล.....	50
ภาพที่ 24 ขยายพื้นที่จุดเก็บข้อมูล.....	51
ภาพที่ 25 ขยายพื้นที่ศึกษา.....	51
ภาพที่ 26 แผนที่แสดงจุดควบคุมภาพถ่าย และตำแหน่งการเก็บตะกอนแขวนลอย.....	51
ภาพที่ 27 แผนผังขั้นตอนวิธีการศึกษา.....	56
ภาพที่ 28 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายจาก UAV.....	57
ภาพที่ 29 กราฟผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Generalized Linear Model: GLM.....	63
ภาพที่ 30 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 5 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM.....	64
ภาพที่ 31 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 10 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM.....	65
ภาพที่ 32 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 25 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM.....	66
ภาพที่ 33 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 50 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM.....	67
ภาพที่ 34 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 100 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM.....	68
ภาพที่ 35 กราฟผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Deep Learning: DP.....	71
ภาพที่ 36 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 5 cm. ด้วยแบบจำลอง DP.....	72
ภาพที่ 37 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 10 cm. ด้วยแบบจำลอง DP.....	73
ภาพที่ 38 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 25 cm. ด้วยแบบจำลอง DP.....	74
ภาพที่ 39 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 50 cm. ด้วยแบบจำลอง DP.....	75
ภาพที่ 40 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 100 cm. ด้วยแบบจำลอง DP.....	76
ภาพที่ 41 กราฟผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Support Vector Machines: SVM.....	79
ภาพที่ 42 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 5 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM.....	80
ภาพที่ 43 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 10 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM.....	81
ภาพที่ 44 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 25 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM.....	82
ภาพที่ 45 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 50 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM.....	83

ภาพที่ 46 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 100 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM .....84



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการทำการศึกษา

การกัดเซาะ การพัดพา และการตกทับถมตะกอนทั้งในลำน้ำและอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ ทำให้ปริมาณน้ำต้นทุนของอ่างเก็บน้ำลดลง อายุการใช้งานอ่างเก็บน้ำเปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งเป็นสาเหตุของปัญหาที่ทำให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ โดยเฉพาะปริมาณตะกอนแขวนลอย (Suspended Sediment Concentrations, SSCs) ซึ่งเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมานานในลำน้ำ เนื่องจากเป็นหนึ่งในปัญหาที่พบมากที่สุดทั้งในด้านน้ำหนักรวมและปริมาณ (Qu, 2014; Ritchie and Cooper, 1988) การเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ความลึกมากกว่าที่ผิวน้ำ (Ji, Julien, and Park, 2011) โดยการเคลื่อนที่และการสะสมของตะกอนเหล่านี้มีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำ (Cousino, Becker, and Zmijewski, 2015); (Stow et al., 2015) และระบบนิเวศของลุ่มน้ำ (Alighalehbabakhani et al., 2017; Branigan, 2013; Lodhi et al., 1998; Qu, 2014) โดยรายงานการศึกษาของ (Bosch et al., 2014) ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อปริมาณตะกอนแขวนลอยในลุ่มน้ำ western Lake Erie พบว่าเมื่อลุ่มน้ำมี แนวโน้มของปริมาณฝนที่มากขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำท่าเพิ่มขึ้น 13% ถึง 39% ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ ส่งผลให้ปริมาณตะกอนแขวนลอยเพิ่มขึ้น 9% ถึง 23%

วิธีการเก็บข้อมูลปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำโดยตรงมีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากต้องใช้ เวลาและแรงงานมากในการออกสนาม (Gao and O'leary, 1997; Gilvear and Bryant, 2016; Montanher et al., 2014; Pavelsky and Smith, 2009; Qu, 2014) มีหลายรายงานการศึกษากการใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่นที่ตา สามารถมองเห็นได้ (Red Green Blue, RGB) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared, NIR) ประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ขนาดใหญ่ในหลายๆช่วงเวลา โดยทำการศึกษาชายฝั่ง ทะเล ทะเลสาบและอ่างเก็บน้ำ (ANJI REDDY, 1994; Binding, Bowers, and Mitchelson-Jacob, 2005; Chen et al., 2014; Doxaran et al., 2002; David et al., 2003; Gao and O'leary, 1997; Li et al., 1998; Ma and Dai, 2005; Miller and McKee, 2004; Ouillon, Douillet, and Andrefouet, 2004; Qu, 2014; Ritchie and Cooper, 1988; Tyler et al., 2006; Wang and Lu, 2010; Zhou et al., 2016) และประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำ (Islam, Yamaguchi,



and Ogawa, 2001; Onderka and Pekarova, 2008) แต่อย่างไรก็ตามการสำรวจระยะไกลจากภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดเชิงพื้นที่ขนาดกลาง (ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 7,8 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 30 เมตร ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม MODIS มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 250 เมตร) เหมาะสมในการศึกษากับพื้นที่ขนาดใหญ่เท่านั้นเนื่องจากถูกจำกัดด้วยความละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูลดาวเทียม ในขณะที่ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง เช่น GeoEye-1, WorldView-3 และ IKONOS มีค่ามีความละเอียดเชิงพื้นที่น้อยกว่า 1 เมตร แต่ราคาข้อมูลค่อนข้างสูง และต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์หลังถ่ายภาพในขั้นตอนการส่งมอบข้อมูลทำให้ข้อมูลไม่เป็นปัจจุบัน

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned aerial vehicle, UAV) ได้ถูกนำมาประยุกต์ในการใช้งานด้านต่าง ๆ เนื่องจากให้ความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลาได้สูงเนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลภาพถ่ายได้ทุกเมื่อ จากรายงานการศึกษาของ (Hird et al., 2017) และ (Zeng et al.2017) ใช้ UAV เป็นเครื่องมือสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพน้ำในแม่น้ำสายเล็ก ๆ โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ระดับเซนติเมตร และมีการใช้ภาพถ่ายจาก UAV สำหรับการรับรู้ระยะไกลใช้งานได้สำเร็จในหลายสาขา เช่น การเกษตรความแม่นยำสูง (Adao et al., 2017; Jiang and Islam, 2001; Wang and Lu, 2010; ศิวา และ เนติ, 2560)การสร้างแบบจำลองความไม่ต่อเนื่องของผิวสำหรับการไหลบ่าของน้ำในพื้นที่เมือง (Tokarczyk et al. , 2015) วิเคราะห์พื้นที่ดินถล่ม (Turner, Lucieer, and de Jong, 2015) มีรายงานการศึกษาการใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับความละเอียดสูงของ (Larson et al., 2018) สำหรับการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำโดยใช้ภาพถ่ายระยะสูงที่มีรายละเอียดจุดภาพขนาด 13 เซนติเมตร ทำการถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับแบบปีกแข็ง (fixed-wing) ด้วยกล้อง Multispectral MicaSense Sequoia Sensor โดยใช้ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Green, Red, Red-edge และ NIR โดยทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการสะท้อนแสงของแต่ละแบนด์ อัตราส่วนค่าการสะท้อนแสงของแต่ละแบนด์ และการรวมกันของค่าการสะท้อนแสง และอัตราส่วนค่าการสะท้อนแสงของแต่ละแบนด์ กับปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำที่ความลึกต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลอง Simple linear และ Stepwise regression models ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสามารถประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำที่ความลึกที่เหมาะสม 91 เซนติเมตร

จากหลายรายงานการศึกษาที่กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้การรับรู้ระยะไกลโดยใช้ภาพถ่ายระยะสูงจากอากาศยานไร้คนขับสำหรับการประมาณค่าตะกอนแขวนลอยในลำน้ำ ในการศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อทำการประเมินการใช้ภาพถ่ายความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับแบบใบพัดหมุน Phantom 3 Professional และติดตั้งกล้อง MAPIR Survey 3 โดยใช้ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Blue, Green, Red, และ NIR ใช้รายละเอียดจุดภาพขนาด 5,

10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร โดยใช้แบบจำลอง Generalized Linear Model, Deep Learning และ Support Vector Machines และทำการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองโดยใช้ RMSE

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับรู้ระยะไกลโดยใช้ภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ

## 1.3 ขอบเขตและข้อจำกัดของการวิจัย

1. ประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอยระหว่างความเข้มข้นตะกอน กับค่าการสะท้อนแสง ในช่วงคลื่นสี R, G, B และ NIR โดยใช้แบบจำลอง Generalized Linear Model, Deep Learning และ Support Vector Machines และทำการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองโดยใช้ Root Mean Square Error (RMSE)

2. ข้อมูลภาพถ่ายความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับแบบใบพัดหมุน Phantom 3 Professional และ ติดตั้งกล้อง MAPIR Survey 3

## 1.4 สถานที่ทำการวิจัย

1.4.1 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.4.2 บริเวณสะพานบ้านนาหมุ - บ้านท่าโฮ เป็นสะพานแบ่งเขตระหว่าง อำเภอศรีธาตุ จังหวัดอุดรธานี และอำเภอท่าคันโท จังหวัดกาฬสินธุ์ มีความกว้างของลำน้ำประมาณ 45 เมตร อยู่ที่พิกัด  $16^{\circ}57'06.00''$  เหนือ และ  $103^{\circ}10'4.00''$  ตะวันออก

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ โดยใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำปาวด้วยการรับรู้ระยะไกล โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประกอบแนวคิดในการศึกษา ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 1. ตะกอนแขวนลอย

##### 1.1 ความหมายของตะกอน

ตะกอน คือ เศษวัสดุที่มีที่เกิดการแตกสลายของดินและหิน ทั้งในทางกลศาสตร์ ทางกายภาพ และทางเคมี จะเคลื่อนที่ไปตามแรงโน้มถ่วงของโลกโดยมีตัวกลางประกอบด้วย แรงลม แรงของน้ำในลำน้ำ หรือปัจจัยหลายอย่างรวมกัน ตะกอนมีหลายขนาดแตกต่างกันตั้งแต่ขนาดใหญ่ไปจนถึงเศษวัสดุแขวนลอย และมีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไปด้วย (สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ, 2555)

##### 1.2 กระบวนการกัดเซาะพังทลาย

เมื่อกระแสน้ำไหลตามพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีความลาดชันจะทำให้เกิดกระบวนการกัดเซาะขึ้น พื้นที่ที่น้ำไหลผ่านจะเกิดการพังทลายทำให้ตะกอนเกิดการพัดพาโดยกระแสน้ำเหล่านั้นไปทับถมยังพื้นที่แหล่งใหม่ ในบางครั้งอาจอยู่ในบริเวณใกล้เคียง หรือไม่ก็ห่างไกลกว่าจุดเดิม ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความเร็ว การไหลของน้ำ ปริมาณตะกอน และความลาดชันของพื้นที่ (สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย (กรมทรัพยากรธรณี), 2553)

##### 1.3 กระบวนการพัดพาและทับถมของตะกอน

ตะกอนที่เกิดจากการสึกกร่อนผุพัง ด้วยอิทธิพลของกระแสน้ำ ปฏิกริยาเคมี ความร้อน และ กระแสลมจะถูกพัดพาไปด้วยความแรงของกระแสน้ำหรือกระแสลม เมื่อความแรงลดลงจะเกิดการทับถมของตะกอนที่พัดพามา การเกิดการทับถมของตะกอน ตะกอนจะทับถมกันเป็นชั้น ๆ ตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะถูกพัดพาไปตกที่ใกล้ ส่วนตะกอนที่มีขนาดเล็กจะถูกพัดพาไปตกที่ไกล การทับถมของตะกอนมีลักษณะแตกต่างกันไปตามลักษณะของภูมิประเทศและกระแสน้ำที่พัดผ่าน (สุชีพ, 2557) ดังนี้

### 1.3.1. การพัดพาโดยกระแสน้ำ

1.3.1.1 การพัดพาในสภาพสารละลาย (solution load) สารต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ในรูปแบบของสารละลายและอนุมูล (colloid and ion) จะถูกกระแสน้ำพัดพาได้ไกล เมื่อถึงช่วงเวลา หรือพื้นที่ที่เหมาะสมก็จะเกิดการตกตะกอน สารละลายก็จะตกตะกอน ได้แก่ อนุมูลโซเดียม แคลเซียม คาร์บอเนต เหล็ก ซิลิกา ซัลเฟต และคลอไรด์ เป็นต้น

1.3.1.2 การพัดพาในสภาพแขวนลอย (suspension) เป็นกระบวนการพัดพาอนุภาคแขวนลอยขนาดเล็ก ๆ เช่น อนุภาคดินเหนียว เป็นต้น จะตกตะกอนก็ต่อเมื่อมีความเร็วของกระแสน้ำลดลง หรือไม่มีความเร็วของกระแสน้ำเลย

1.3.1.3 การพัดพาโดยการกระดอน (saltation) เป็นกระบวนการอนุภาคได้เคลื่อนที่ไปตามท้องพื้นน้ำในลักษณะการกระดอนตามความลาดชันของพื้นลำน้ำ อนุภาคที่เคลื่อนย้ายนั้นมีขนาดเท่ากับเม็ดทรายหรืออาจจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย ปัจจัยหลักของการควบคุมอนุภาคเหล่านี้คือแรงเหวี่ยงที่เกิดจากความเร็วของกระแสน้ำ และอนุภาคเหล่านี้ตกตะกอนเมื่อความเร็วของกระแสน้ำไม่สามารถยกตะกอนเหล่านี้ขึ้นจากท้องพื้นน้ำได้ หรือมีสิ่งกีดขวางทางการเคลื่อนที่ของตะกอนเหล่านี้

1.3.1.4 การพัดพาโดยการกลิ้งไป (rolling) เป็นการที่อนุภาคกลิ้งไปโดยไม่เหมือนกับการพัดพาโดยการกระดอน เนื่องจากอนุภาคมีน้ำหนักมากเกินไปจนกระแสน้ำไม่สามารถทำให้เกิดการยกตัวของอนุภาคเหล่านี้ได้ เช่น ก้อนกรวด ก้อนหินขนาดใหญ่

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่กล่าวมาข้างนั้น จะเกิดการเสียดสีระหว่างอนุภาคกับท้องพื้นลำน้ำ หรือฝั่งของลำน้ำ ในขณะที่เดียวกันอนุภาคก็จะมีขนาดที่เล็กลง และมีรูปทรงที่กลมมนมากขึ้น

ในการพัดพานี้จะเห็นได้ว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ซึ่งกระแสน้ำไม่สามารถพัดพาอนุภาคเหล่านี้ได้นั้นจะเกิดการตกตะกอนอยู่ใกล้ๆ กับแหล่งกำเนิด ในขณะที่เดียวกันอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าก็就会被กระแสน้ำพัดออกไปไกลกว่า จึงเป็นลักษณะของการจัดขนาดอนุภาคโดยกระแสน้ำที่เรียกว่า การจัดขนาดตามแนวระนาบ (lateral sorting)

กระบวนการพัดพาก็ยังขึ้นอยู่กับความลาดชันของพื้นที่ปริมาณน้ำ หรือลักษณะการไหลของตะกอนจากแหล่งต้นกำเนิดต่าง ๆ (สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย (กรมทรัพยากรธรณี), 2553)

### 1.3.2 ขบวนการทับถมของตะกอน

การทับถมของตะกอน จะขึ้นอยู่กับแม่น้ำ ลำธารของแต่ละสายซึ่งจะมีความสามารถในการพัดพาอนุภาคที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการทับถมของตะกอนจึงมีความแตกต่างกันออกไปด้วย ตะกอนจะเกิดการทับถมกันมากที่สุด คือที่ระดับฐานของแม่น้ำ (base level of river)

นอกจากนี้แล้วระหว่างทางที่แม่น้ำไหลผ่านก็จะเกิดการทับถมของตะกอนมาตลอดทางในช่วงสภาพน้ำนิ่งหรืออัตราการไหลบริเวณนั้นค่อนข้างต่ำ การตกตะกอนนั้นจะแยกขนาดโดยอนุภาคที่มีน้ำหนักมาก หรือมีความถ่วงจำเพาะที่มากก็จะตกตะกอนก่อน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า หรือมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าก็จะตกตะกอนทีหลัง ลักษณะการตกตะกอนแบบนี้จะทำให้เกิดการแยกขนาดเรียกว่า การจัดขนาดตามแนวตั้ง (vertical sorting) สาเหตุการทับถมของตกตะกอนก็จะมาจาก

1. ความเร็วกระแส น้ำลดลง อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความลาดชัน หรือการคิดเคี้ยวของลำน้ำ
2. มีสิ่งกีดขวางบริเวณลำน้ำ หรือท้องน้ำ
3. น้ำท่วมฝั่ง ทำให้เกิดการพัดพาตะกอนที่อยู่บนฝั่งมาสะสมในลำน้ำ
4. ปริมาณน้ำที่ลดน้อยลงทำให้อัตราการไหลของลำน้ำน้อย
5. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของลำน้ำ

ที่มา : สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย (กรมทรัพยากรธรณี)

#### 1.4 เครื่องเก็บตัวอย่างตะกอนแบบสะสมตามจุด (Point-integrating sampler)

เครื่องเก็บตัวอย่างตะกอนแบบสะสมตามจุดมีความสะดวกสบายและใช้งานง่ายได้กว่าเครื่องเก็บตัวอย่างแบบสะสมตลอดความลึก ใช้เป็นตัวแทนความเข้มข้นตะกอนเฉลี่ยที่จุดใดจุดหนึ่งในพื้นที่ศึกษา ยกเว้นระยะใกล้ท้องน้ำ นิยมใช้เก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในเวลาเดียวกัน การเก็บตะกอนนั้นสามารถเริ่มต้นเก็บที่ความลึกเท่าไรก่อนก็ได้ หลังจากนั้นจะเก็บตัวอย่างต่อไปในทิศทางที่ต่ำลงหรือสูงขึ้นโดยกำหนดระยะตามแนวตั้งสูงสุดไม่เกิน 360 เซนติเมตร

การเก็บตัวอย่างโดยวิธีจุด (point method) หรือวัดค่าชั่วขณะ (instantaneous) การวัดในที่ตั้ง (in-situ) และวิธีสูบน้ำ (pumping) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวิธีจุดของกรมชลประทานนั้นผลิตโดยบริษัท Brinkey and South Pacific ส่วนเครื่องเก็บตัวอย่างรวบรวมตามจุดแบบพิเศษ คือเครื่องสูบน้ำเก็บตัวอย่าง (pumping sampler) จะดูดน้ำที่ผสมกับตะกอนแขวนลอยผานทอหรือสายยางโดยตั้งปลายท่อไว้ที่เก็บตัวอย่าง การควบคุมความเร็วที่ทางเข้าทำให้สามารถเก็บตัวอย่างที่เป็นตัวแทนความเข้มข้นของตะกอนที่ตำแหน่งนั้นได้

เครื่องวัดความเข้มข้นตะกอนในที่ตั้ง “in-situ sediment gauge” ช่วยแก้ปัญหานี้โดยวัดความเข้มข้นตะกอนโดยอ้อม ด้วยการใช้อิเลกทรอนิกส์หาการสูญเสียรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากการสะท้อนแสงของตะกอนแขวนลอย ช่วงคลื่นของรังสีที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของตะกอนแขวนลอย จากช่วงคลื่นของรังสีจะสามารถแปลงเป็นค่าเข้มข้นตะกอนได้อย่างง่ายดายและรวดเร็วโดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นไว้แล้ว (กรมควบคุมมลพิษ, 2547)

## 1.5 การเก็บตัวอย่างปริมาณตะกอนแขวนลอย

การสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยในแหล่งน้ำธรรมชาติ มีการตรวจวัดด้วยการเก็บตัวอย่างของน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยปะปนอยู่ ในการเก็บตัวอย่างของน้ำ ในขณะเดียวกันก็ต้องมีการสำรวจปริมาณน้ำด้วย การสำรวจปริมาณตะกอนแขวนลอยจะมีปริมาณมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่แขวนลอยมากับน้ำ ซึ่งโดยปกติจะมีมากหลังฝนตกหนัก การสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างปริมาณตะกอนแขวนลอย โดยหลักการแล้วต้องการตัวแทนตะกอนทุกระดับความลึก (5, 10, 25 และ 100 เซนติเมตร) ของพื้นที่หน้าตัด ทั้งน้ำขุ่น น้ำใส การสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างแต่ละครั้งจะได้ตัวอย่างน้ำ 180 ขวด ซึ่งระยะการสำรวจต้องครอบคลุมทั้งช่วงน้ำสูงและน้ำต่ำ ซึ่งจากการสำรวจ 1 ครั้ง เครื่องมือที่ใช้เก็บตัวอย่างตะกอน มีทั้งแบบสะสมตลอดความลึก (Depth Integrating Sampler) และเก็บตัวอย่างตะกอนแบบสะสมตามจุด (Point Integrating Sampler) ซึ่งการใช้เครื่องมือและวิธีการเก็บตัวอย่างปริมาณตะกอนสามารถประยุกต์ใช้ตามสภาพภูมิประเทศ ความลึกของลำน้ำ ตลอดจนพิจารณาถึงความสะดวก และความปลอดภัย ของผู้ปฏิบัติงานอีกด้วย

การประมวลผลทางห้องปฏิบัติการ (Laboratory Processing) นำตัวอย่างน้ำเข้าห้องปฏิบัติการ เพื่อวิเคราะห์ SSC โดยใช้วิธีการ USEPA 160.2 โดยใช้ตัวกรองไมโครไฟเบอร์ 47 มิลลิเมตร ในขั้นตอนแรกซึ่งน้ำหนักของผสม (น้ำและตะกอน) เพื่อหาปริมาณตะกอนโดยน้ำหนักของตะกอนแขวนลอยกับน้ำหนักของผสม ซึ่งแสดงค่าเป็นอัตราส่วนต่อล้านส่วน (Part Per Millions; PPM) หรือเป็นหน่วยมิลลิกรัม/ลิตร ต่อจากนั้นทำการแยกตะกอนออกจากน้ำด้วยการกรอง (Filtration Technique) และนำกากตะกอนที่แยกออกมาทำให้แห้งโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เมื่อตะกอนแห้งดีแล้วจะนำไปชั่งน้ำหนักใหม่อีกครั้ง และนำไปคำนวณให้อยู่ในรูปน้ำหนัก (Qu, 2014)

## 2. อัตราการไหลของลำน้ำ

การเคลื่อนที่ในทางกลศาสตร์หรือเรียกว่า การไหล (Flow) ซึ่งสามารถอธิบายการไหลโดยระบุสภาพของการไหลได้หลายวิธี เช่นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) หรือการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) การไหลแบบคงตัว (Steady flow) หรือการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady flow) การไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) หรือการไหลไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform flow) และการไหลแบบหมุนวน (Rotational flow) หรือการไหลแบบไม่หมุนวน (Irrigational flow) เป็นต้น

การไหลแบบราบเรียบ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบมีลักษณะเหมือนเป็นชั้นบาง ๆ และมีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างชั้นน้อยมากการไหลแบบปั่นป่วน อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลของของไหลมาก การไหลคงตัว (Steady flow) คือ การไหลที่มีสภาพการไหล ณ จุดใดจุดหนึ่งในของไหลคงที่

ไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ทั้งนี้ ณ ตำแหน่งอื่นอาจจะแตกต่างจากตำแหน่งนี้ได้ ซึ่งการไหลคงตัวจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อการไหลเป็นแบบราบเรียบเท่านั้น การไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) คือ การไหลที่มีความเร็ว ณ ทุก ๆ จุดในของไหลคงที่ทั้งขนาดและทิศทางที่เวลาใดเวลาหนึ่ง คือการไหลสม่ำเสมอมีสภาพการไหลที่ไม่แปรเปลี่ยนตามระยะทาง

สภาพการไหลโดยทั่ว ๆ ไป จะเกิดจากการผนวกการไหลเข้าด้วยกัน คือ

1. การไหลคงตัวแบบสม่ำเสมอ (Steady uniform flow) เช่น การไหลด้วยอัตราคงที่ผ่านท่อตรงที่ยาวมาก
2. การไหลคงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Steady non-uniform flow) เช่น การไหลด้วยอัตราคงที่ผ่านท่อที่มีขนาดค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้น
3. การไหลไม่คงตัวแบบสม่ำเสมอ (Unsteady uniform flow) เช่น การไหลในท่อตรงที่มีอัตราการไหลไม่คงที่
4. การไหลไม่คงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Unsteady non-uniform flow) เช่น การไหลในอัตราไม่คงที่ผ่านท่อที่ค่อย ๆ ขยายใหญ่ขึ้น (ปริยาพร, 2555)

## 2.1 รูปแบบการไหล (Flow pattern) ประกอบด้วย

เส้นการไหล (Streamline) คือ เส้นที่แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามการไหล เมื่อพิจารณาเส้นการไหลของอนุภาคทั้งหมดก็จะได้เส้นการไหลจำนวนมาก ซึ่งรูปแบบการไหลที่มีเส้นการไหลประกอบกันจำนวนมากนี้เรียกว่า ลำการไหล (Stream tube) คือกลุ่มของเส้นการไหลเส้นทางการไหล (Path line) คือ เส้นที่แสดงให้เห็นถึงทิศทางของความเร็วของอนุภาคใดอนุภาคหนึ่งในช่วงเวลานั้นในการไหลคงตัว เส้นการไหลและเส้นทางการไหลจะเป็นเส้นเดียวกันเพราะอนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นการไหล และเส้นการไหลนี้ก็แสดงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเวลาเดียวกันด้วย ในทางตรงกันข้าม การไหลไม่คงตัวนั้นเวกเตอร์ความเร็วที่จุดต่าง ๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เส้นการไหลจึงเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อย ๆ ทำให้เส้นการไหลกับเส้นทางการไหลแตกต่างกันออกไป

ปริมาตรควบคุม (Control volume) คือ ขอบเขตปริมาตรจำกัดในสนามการไหลที่กำหนดขึ้น เพื่อพิจารณาคุณสมบัติการไหลเฉพาะในปริมาตรควบคุมเท่านั้น โดยปริมาตรควบคุมสามารถนำมาเพื่อวิเคราะห์การไหลได้ คือ สมการสภาพต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน

การไหลหนึ่งมิติ (One - dimensional flow) คือ การไหลตามเส้นการไหลใด ๆ ที่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการไหล เช่น ความดัน ความเร็ว และอื่น ๆ เฉพาะในทิศทางของเส้นการไหลเท่านั้น

การไหลสองมิติ (Two - dimensional flow) คือ การไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติใน 2 ระนาบ เช่น การไหลผ่านฝาย

การไหลสามมิติ (Three-dimensional flow) คือ การไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพทั้ง 3 แกน เป็นการไหลตามธรรมชาติทั่วไป

## 2.2 สมการต่อเนื่อง (Continuity equation)

อัตราการไหล (Flow rate หรือ Discharge) คือ ปริมาณของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งอัตราการไหลมีอยู่ 3 ประเภท คือ

2.2.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate):  $Q$  มีสมการทั่วไป ดังนี้

$$Q = Av$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

$v$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

หน่วยของอัตราการไหลในระบบ SI คือ  $m^3/s$  และในระบบอังกฤษ คือ  $ft^3/s$

2.2.2 อัตราการไหลเชิงน้ำหนัก (Weight flow rate):  $Q_w$  มีสมการทั่วไป ดังนี้

$$Q_w = \gamma Q$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ น้ำหนักจำเพาะของของไหล

หน่วยของอัตราการไหลในระบบ SI คือ  $N/s$  และในระบบอังกฤษ คือ  $lb/s$

2.2.3 อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate):  $Q_M$  มีสมการทั่วไป ดังนี้

$$Q_M = \rho Q = \rho Av$$

หน่วยของอัตราการไหลในระบบ SI คือ  $kg/s$  และในระบบอังกฤษ คือ  $slug/s$

สมการการไหลต่อเนื่องในการไหลคงตัวมิติเดียว เป็นการประยุกต์ใช้หลักการอนุรักษ์มวลสาร คือ ภายในขอบเขตจำกัดมวลสารจะไม่มีการสูญหาย (ปรียาพร, 2555)



### 3. การสำรวจข้อมูลจากระยะไกล (Remote Sensing)

เทคโนโลยีการสำรวจทรัพยากรจากภาพถ่ายดาวเทียม หรือการสำรวจข้อมูลจากระยะไกลในประเทศไทยได้เริ่มต้นขึ้น ตั้งแต่ ปีพ.ศ.2514 โดยได้มีการแต่งตั้งคณะกรรมการแห่งชาติเพื่อประสานงานกับกองสำรวจทรัพยากรธรรมชาติด้วยดาวเทียม ซึ่งมีผู้ทรงคุณวุฒิจากหน่วยงานต่าง ๆ ได้อนุมัติให้เข้าร่วมโครงการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติด้วยดาวเทียมขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) ในการใช้ประโยชน์จากข้อมูลดาวเทียมเพื่อสำรวจทรัพยากรต่าง ๆ ภายในประเทศ ดาวเทียมดวงแรก ได้แก่ LANDSAT-1 โดยใช้เป็นโครงการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติด้วยดาวเทียม ภายใต้อำนาจสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ต่อมาได้มีการยกระดับขึ้นเป็นกองสำรวจทรัพยากรธรรมชาติด้วยดาวเทียม ในปี พ.ศ. 2522 โดยมีหน่วยงานต่าง ๆ ได้นำเอาข้อมูลดาวเทียมไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ดังนั้นคณะรัฐมนตรีจึงได้อนุมัติให้ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ จัดตั้งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมสำรวจทรัพยากร ขึ้นมาในปี พ.ศ. 2523 มีหน้าที่ในการรับและผลิตข้อมูลดาวเทียม ซึ่งเป็นสถานีรับสัญญาณแห่งแรกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในปัจจุบันได้ออนไปอยู่ในหน่วยงาน “สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ” ตั้งขึ้น เมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน พ.ศ.2543

ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมถูกนำไปใช้ในงานสำรวจและติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น พื้นที่ป่าไม้ การเกษตร ธรณีวิทยา อุทกวิทยา และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (สุพรรณิการ์, 2557)

#### 3.1 ความหมายและกระบวนการ Remote Sensing

Remote Sensing คือข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุ พื้นที่ ที่ได้จากเครื่องมือบันทึกข้อมูล (Sensor) โดยเราไม่ได้เข้าไปสัมผัสกับตัววัตถุ แต่จะอาศัยคุณสมบัติคลื่นแม่เหล็กของไฟฟ้า (Electromagnetic Energy) เป็นสื่อ โดยคำที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นทางการ คือ การสำรวจข้อมูลจากระยะไกล (พิชชาพร, 2557)

สำหรับการทำงานของ การสำรวจข้อมูลระยะไกล ประกอบด้วยสองกระบวนการหลัก

3.1.1 การรับข้อมูลและบันทึกสัญญาณข้อมูล (Data acquisition) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) จากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ของพลังงานกับรูปลักษณ์พื้นผิวโลก และเดินทางเข้าสู่เครื่องมือบันทึกข้อมูล (Sensor) ที่ติดตั้งในดาวเทียม (Airborne or Space borne) ข้อมูลจะถูกบันทึก และผลิตเป็นข้อมูลในรูปแบบภาพ (Sensor Data in Pictorial หรือ Photograph) หรือรูปแบบเชิงตัวเลข (Digital Form)

3.1.2 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) จะประกอบด้วย การแปลข้อมูลด้วยสายตา (Visual Interpretation) และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Digital Analysis) (สมบัติ, 2558)



ภาพที่ 1 กระบวนการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล

ที่มา: <http://dc356.4shared.com/doc/8AuUXLWq/preview.html>

### 3.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่ถูกส่งออกมาอย่างต่อเนื่องมีค่าความยาวของช่วงคลื่นหลายเมตรถึงเศษส่วนของพันล้านเมตร (Nanometer;  $10^{-9}$  ม) โดยดวงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งกำเนิดของพลังงานที่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามธรรมชาติและเป็นจุดเริ่มต้นของการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล ซึ่งจะแผ่พลังงานไปตามทฤษฎีของคลื่น (Wave Theory) ที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (Harmonic) มีช่วงซ้ำและจังหวะเท่ากันในเวลาหนึ่งมีความเร็วของแสง ( $c$ ) ระยะทางจากจุดสูงสุดของคลื่นถึงจุดสูงสุดของคลื่นถัดไปเรียกว่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ที่เคลื่อนผ่านจุดคงที่จุดหนึ่งต่อหน่วยเวลา เรียกว่าความถี่คลื่น ( $f$ ) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ กับความเร็วของแสงดังสมการ

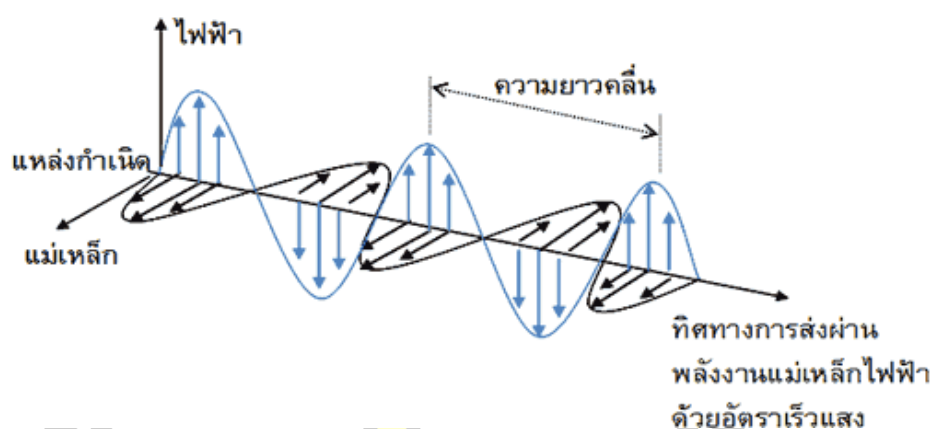
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

โดยที่

$\lambda$  = ความยาวคลื่น (Islam et al.)

$c$  = ความเร็วของแสงมีค่าคงที่ ( $3 \times 10^8$  ม. /วินาที)

$f$  = ความถี่ของคลื่น (รอบ/วินาที หรือ Hertz)



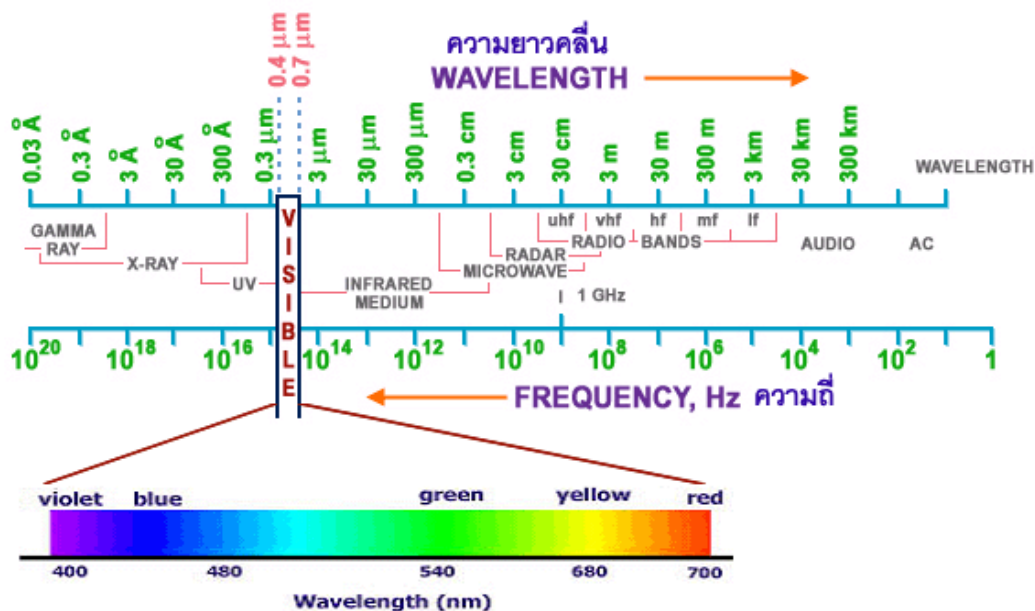
ภาพที่ 2 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum)

ที่มา: <http://eclairkai.blogspot.com/2018/10/blog-post.html>

ความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่น มีความสัมพันธ์กันแบบผกผัน คือ ความยาวคลื่นมากจะมีความถี่ที่น้อย ความยาวคลื่นมีหน่วยวัดเรียกว่า ไมโครมิเตอร์ (Micrometer, mm) หรือไมครอน (Micron,  $\mu$ ) ซึ่งเท่ากับ 0.000001 ม. หรือ  $10^{-6}$  ม.

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะถูกแยกออกตามความยาวของคลื่นที่เรียกว่า ช่วงคลื่น (Band) ตั้งแต่ช่วงคลื่นที่มีความยาวสั้นที่สุด คือ รังสีคอสมิก (Cosmic ray) มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 10-10 ไมครอน จนถึงช่วงคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นหลายกิโลเมตร คุณสมบัติของช่วงคลื่นนั้นจะประกอบไปด้วยช่วงคลื่นตามลำดับของความยาวดังนี้ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ อุลตราไวโอเล็ต ตามองเห็น อินฟราเรด ไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ (Laotrakul, 2015)

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพที่ 3 ช่วงคลื่น (Band) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา : [http://blog.hongseng.co.th/2014/09/blog-post\\_10.html](http://blog.hongseng.co.th/2014/09/blog-post_10.html)

### 3.3 ช่วงคลื่นที่ใช้ประกอบในการสำรวจข้อมูลระยะไกล

แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

3.3.1 ช่วงคลื่นเชิงแสง (Optical Wavelength) อยู่ระหว่าง 0.4 - 14 ไมครอน ซึ่งสามารถถ่ายภาพและบันทึกภาพด้วยฟิล์มถ่ายรูป และอุปกรณ์บันทึกภาพ (Sensor) โดยประกอบไปด้วย ช่วงคลื่นที่มีผลตอบสนองต่อตาของมนุษย์ หรือช่วงคลื่นแสงสว่าง (Visible light) อยู่ระหว่าง 0.4 - 0.7 ไมครอน แบ่งเป็น 3 ช่วงคือ น้ำเงิน เขียว และแดง ถัดมาเป็นช่วงคลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้ (Near Infrared) หรืออินฟราเรดสะท้อนแสงระหว่าง 0.7-3 ไมครอน และอินฟราเรดช่วงความร้อน (Thermal Infrared) ระหว่าง 3-15 ไมครอน

3.3.2 ช่วงคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Wavelength) อยู่ระหว่าง 1 มม. - 1 ม. โดยช่วงคลื่นในกลุ่มนี้ จะเรียกหน่วยนับเป็นหน่วยความถี่ต่างจากกลุ่ม Optical ที่มีหน่วยเป็นความยาวคลื่น ที่รู้จักกันดีก็คือระบบเรดาร์ (RADAR) ซึ่งจะทำการบันทึกข้อมูลในช่วงคลื่นความถี่ระหว่าง 3-12.5 GHz (ความยาวคลื่นระหว่าง 2.4-100 เซนติเมตร) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น แบนด์ต่างๆ ได้ดังนี้

- X - band ความถี่ 8 - 12.5 GHz หรือ ความยาวคลื่น 2.4 - 3.75 ซม.
- C - band ความถี่ 4 - 8 GHz หรือ ความยาวคลื่น 3.75 - 7.5 ซม.
- S - band ความถี่ 2 - 4 GHz หรือ ความยาวคลื่น 7.5 - 15 ซม.
- L - band ความถี่ 1 - 2 GHz หรือ ความยาวคลื่น 15 - 30 ซม.
- P - band ความถี่ 0.3 - 1 GHz หรือ ความยาวคลื่น 30 - 100 ซม.

ที่มา : (เกตุศิริ, 2557)

### ตารางที่ 1 ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคุณสมบัติ

ช่วงคลื่น	ความยาว ช่วงคลื่น	รายละเอียด
รังสีแกมมา (Gamma ray)	< 0.03 ไมครอน	รังสีแกมมาถูกดูดซึมทั้งหมดโดยบรรยากาศชั้นบน
รังสีเอ็กซ์ (X-ray)	0.03 - 3.1 ไมครอน	รังสีเอกซเรย์ถูกดูดซึมทั้งหมดโดยชั้นบรรยากาศเช่นกัน
รังสีเหนือม่วงหรือรังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)	0.03 - 0.4 ไมครอน	ช่วงคลื่นสั้นกว่า 0.3 ไมครอน ถูกดูดซึมทั้งหมดโดยโอโซน (O <sub>3</sub> ) ในบรรยากาศชั้นบน
ช่วงคลื่นไวโอเล็ตภาพถ่าย (Photographic UV band)	0.3 - 0.4 ไมครอน	ช่วงคลื่นสามารถผ่านชั้นบรรยากาศ สามารถถ่ายภาพด้วยฟิล์มถ่ายรูปแต่การกระจายในชั้นบรรยากาศเป็นอุปสรรคมาก
ช่วงคลื่นตามองเห็นได้ (Visible)	0.4 - 0.7 ไมครอน	บันทึกภาพด้วยฟิล์มและอุปกรณ์บันทึกภาพได้รวมทั้งช่วงคลื่นโลกมีการสะท้อนพลังงานสูงสุด (reflected energy peak) ที่ 0.5 ไมครอน ช่วงคลื่นแคบที่มีผลตอบสนองสายตามนุษย์แบ่งได้ 3 ช่วงย่อยคือ 0.4-0.5 ไมครอนสีน้ำเงิน 0.5-0.6 ไมครอน สีเขียว 0.6-0.7 ไมครอน สีแดง
อินฟราเรด (Infrared)	0.7 - 1.00 ไมครอน	มีปฏิสัมพันธ์กับวัตถุตามความยาวคลื่นและการผ่านชั้นบรรยากาศ มีการดูดซึมในบางช่วงคลื่น

ช่วงคลื่น	ความยาว ช่วงคลื่น	รายละเอียด
ช่วงคลื่นอินฟราเรดชนิด ความร้อน (Thermal IR band)	3-5 ไมครอน 8-14 ไมครอน	การบันทึกภาพต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ เช่น scanners
ไมโครเวฟ (Microwave)	0.1-30 cm	ช่วงคลื่นยาวสามารถทะลุผ่านหมอกและฝนได้ บันทึกภาพได้ทั้งระบบ active และ passive
เรดาร์ (Radar)	0.1-30 cm	ระบบ active มีความยาวช่วงคลื่นต่างๆ เช่น Ka band (10 mm), X band (30 มม.) และ L band (25 ซม.)
วิทยุ (Radio)	> 30 cm	ช่วงคลื่นที่ยาวที่สุด บางครั้งมีเรดาร์อยู่ในช่วงนี้ด้วย

ที่มา : สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

### 3.4 พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแผ่รังสี (Energy and Radiation)

#### 3.4.1 ทฤษฎีอนุภาค (Particle Theory)

การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยหน่วยอิสระที่เรียกว่าโฟตอน (Photon) หรือควันตา(Quanta) พลังงานของแต่ละควันตาคจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น ดังนี้

$$E = h \times f$$

โดยที่

$E$  = พลังงานของ 1 quantum มีหน่วยเป็น Joules

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) =  $6.626 \times 10^{-34}$  J.sec

$f$  = ความถี่ของคลื่น (รอบ/วินาที หรือ Hertz)

หรืออาจจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปความยาวคลื่นได้ดังนี้

$$E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

โดยที่

$\lambda$  = ความยาวคลื่น (Islam et al.)

ดังนั้นพลังงานจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น หมายความว่าความยาวคลื่นมากจะให้พลังงานต่ำ ดังนั้น ถ้าวัตถุไหนที่มีการส่งพลังงานช่วงคลื่นยาว เช่น ไมโครเวฟ การตรวจรับพลังงานโดยอุปกรณ์การสำรวจข้อมูลจากระยะไกลในช่วงคลื่นนี้จะยากกว่าการตรวจรับพลังงานในช่วงคลื่นสั้น ดังนั้น ถ้าต้องการบันทึกพลังงานช่วงคลื่นยาวจะต้องบันทึกพลังงานในบริเวณกว้าง และใช้เวลาในการบันทึกนานพอสมควร (พิชชาพร, 2557)

### 3.4.2 Stefan-Boltzmann Law

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญที่สุดของการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล อย่างไรก็ตาม สสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าองศาสมบูรณ์ (0 °K หรือ -273 °C) จะสามารถเปล่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีขนาดและส่วนประกอบของช่วงคลื่นแตกต่างกันไป ซึ่งพลังงานที่วัตถุแผ่ออกมามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของผิววัตถุ สามารถคำนวณได้จากกฎของ Stefan Boltzmann ดังนี้

$$W = \sigma T^4$$

โดยที่

$W$  = พลังงานทั้งหมดที่เปล่งออกมาจากผิววัตถุ  $Wm^{-2}$

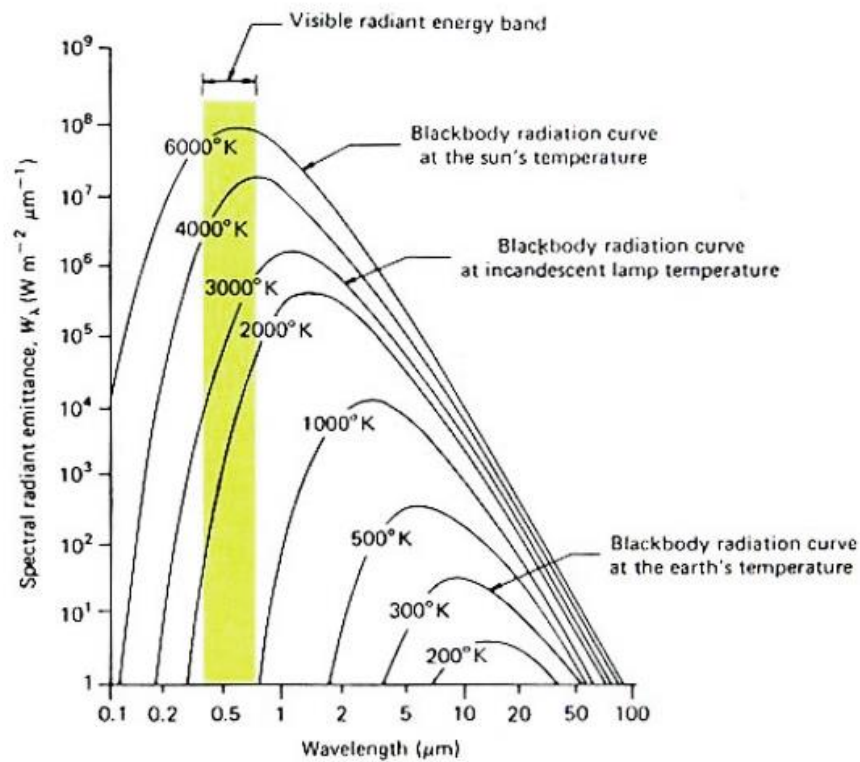
$\sigma$  = ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann;  $5.6697 \times 10^{-8} Wm^{-2}.K^{-4}$

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ °K

การแผ่พลังงานทั้งหมดจากวัตถุจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นพลังงานที่ออกมาจะเพิ่มขึ้นตามอย่างรวดเร็ว

โดยกฎนี้จะใช้ได้กับวัตถุที่มีลักษณะเรียกว่า เทหวัตถุสีดำ (Black Body) ซึ่งเป็นวัตถุสมมุติที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนพลังงานทั้งหมด ที่มาตกกระทบ (Incident energy) และจะแผ่พลังงานออกไปได้สูงสุด ณ อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งมีเพียงวัตถุที่สภาพใกล้เคียงเท่านั้น โดยพลังงานที่แผ่ออกไปจะแปรผันกับอุณหภูมิของวัตถุและความยาวช่วงคลื่น มีการกระจายตัวของสเปกตรัมแตกต่างกันไป

(ภาพที่ 4) วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า จะให้พลังงานออกมาสูงกว่า โดยหักเหไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า (Prapassorn, 2557)



ภาพที่ 4 ลักษณะการแผ่รังสีของเทหวัตถุสีดำ (Black body) ณ อุณหภูมิต่างๆ  
ที่มา : <http://georemotesensing.blogspot.com/2014/11/>

### 3.4.3 Planck Law

การคำนวณหาพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ ณ ความยาวคลื่นที่กำหนดได้จากกฎของพลังค์ หาได้จากสมการ

$$W_\lambda = C1\lambda^{-5}[\exp(C2/\lambda T)^{-1}]^{-1}$$

โดยที่

$$C1 = \text{ค่าคงที่ } 3.74 \times 10^{-16} \text{ W.m}^2$$

$$C2 = \text{ค่าคงที่ } 1.44 \times 10^{-2} \text{ m.}^\circ\text{K}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ}^\circ\text{K}$$



### 3.4.4 Wien's Displacement Law

พลังงานที่แผ่รังสีจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และความยาวช่วงคลื่น ดังนั้นเมื่อเรารู้อุณหภูมิก็จะสามารถหาค่าความยาวคลื่นที่ให้พลังงานสูงสุดได้จาก กฎการแทนที่ของเวียน (Wien's Displacement Law) จากสมการ

$$\lambda_m = \frac{C}{T}$$

โดยที่

$\lambda_m$  = ความยาวคลื่นที่ให้พลังงานสูงสุด

C = ค่าคงที่  $2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

### 3.5 ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานในชั้นบรรยากาศ

คลื่นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากแสงของดวงอาทิตย์จะเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ แล้วสะท้อนกลับสู่บรรยากาศก่อนที่จะถูกบันทึกข้อมูลไว้โดยอุปกรณ์สำรวจ บรรยากาศของโลกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคลื่นพลังงานในด้านทิศทาง ความเข้ม ความยาวและความถี่ของช่วงคลื่น เพราะภายในชั้นบรรยากาศจะประกอบด้วยฝุ่นละออง ไอน้ำ และก๊าซต่างๆ ทำให้เกิดกระบวนการดังต่อไปนี้ (Phakpoom, 2015)

#### 3.5.1 การกระจัดกระจาย (Scattering)

เกิดขึ้นจากอนุภาคเล็ก ๆ ในชั้นบรรยากาศมีการกระจายตัวของอนุภาคไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และความยาวคลื่น แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

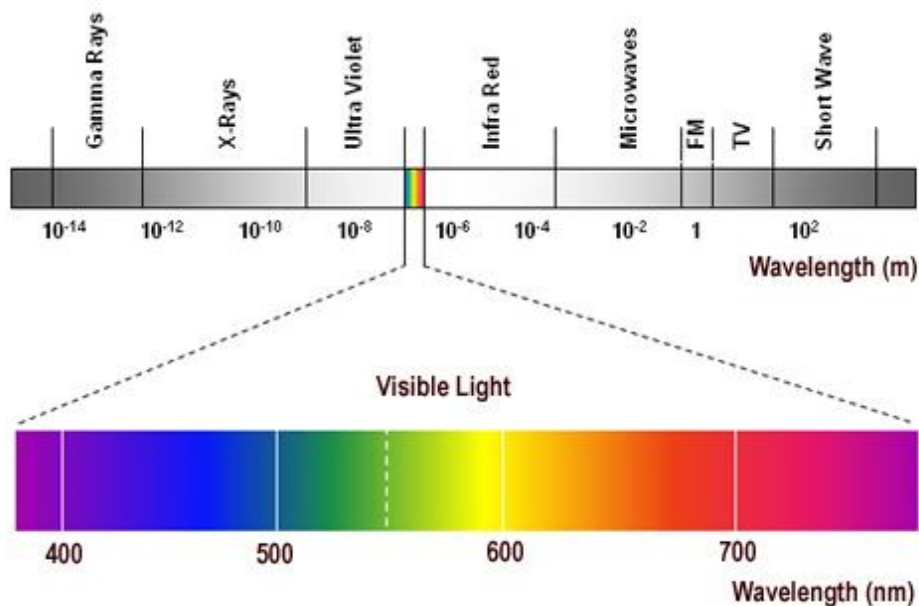
1. Rayleigh scattering เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ทำให้มีสภาพเหมือนกับหมอกควัน (Haze) ส่งผลให้ความคมชัดของภาพลดลง
2. Mie Scattering เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใกล้เคียงกับความยาวคลื่น เช่น ไอน้ำ ฝุ่นละออง เกิดในความยาวของช่วงคลื่นที่ยาวกว่าแบบแรก
3. การกระจัดกระจายแบบไร้ระบบ (Nonselective Scattering) เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เช่น หยดน้ำ หรือกลุ่มเมฆ จะสะท้อนความยาวคลื่นตามมองเห็น (Visible Wavelength) และคลื่นอินฟราเรดสะท้อน (Reflected Infrared) ได้เกือบเท่ากัน ซึ่งในช่วงความยาวคลื่นตามมองเห็น ปริมาณของคลื่นต่างๆ เช่น น้ำเงิน สีขาว และช่วงคลื่นสะท้อนทุกทิศทางเท่ากันทำให้มองเห็นเมฆเป็นสีขาว (พิชชาพร, 2557)

### 3.5.2 การดูดซับ (Absorption)

ความยาวช่วงคลื่นบางช่วงจะถูกดูดซับพลังงาน สิ่งที่จะดูดซับพลังงานในชั้นบรรยากาศได้แก่ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และโอโซน เพราะว่สิ่งเหล่านี้จะดูดซับจากความยาวช่วงคลื่นเฉพาะ ดังนั้นจึงมีบางช่วงคลื่นที่สามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงมาที่ผิวโลกได้เรียกว่า หน้าต่างบรรยากาศ (Atmospheric Window, ภาพที่ 5) ซึ่งหน้าต่างบรรยากาศนี้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นตามองเห็น (0.3-0.7 mm) และช่วงอินฟราเรดสะท้อนกับอินฟราเรดช่วงความร้อน ช่วงของหน้าต่างบรรยากาศเหล่านี้จะมีประโยชน์ ต่อการเลือกใช้อุปกรณ์บันทึกภาพเพื่อให้สัมพันธ์กับการสะท้อนของช่วงคลื่นต่าง ๆ (พิชชาพร, 2557)

### 3.5.2 การหักเห (Refraction)

พลังงานจากแสงดวงอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นต่างกัน ซึ่งปริมาณการหักเหกำหนดโดยค่าดัชนีของการหักเห เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วของแสงในสุญญากาศกับความเร็วของแสงในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล แต่สามารถปรับแก้ไขได้ภายหลัง (พิชชาพร, 2557)



ภาพที่ 5 ช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับการทะลุทะลวงผ่านชั้นบรรยากาศสู่ผิวโลก

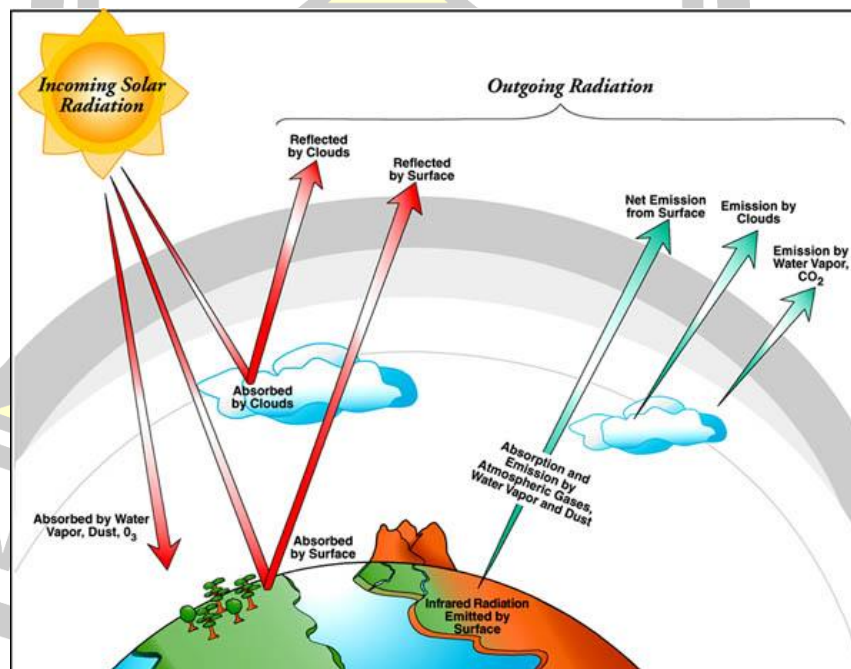
ที่มา : <https://wavelength101.wordpress.com>

### 3.6 ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานกับวัตถุนบนพื้นผิวโลก

เมื่อพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านชั้นบรรยากาศมาตกกระทบพื้นผิวโลก จะเกิดปฏิกิริยา 3 อย่างคือ การสะท้อนพลังงาน (Reflection =  $E_R$ ) การดูดซับพลังงาน (Absorption =  $E_A$ ) และการส่งผ่านพลังงาน (Transmission =  $E_T$ ) ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการสำรวจระยะของวัตถุนบนพื้นผิวโลก (ภาพที่ 6) ซึ่งเขียนเป็นสมการความสมดุลพลังงาน (Energy Balance Equation) ได้ดังนี้

$$E_I (I) = E_R (I) + E_A (I) + E_T (I)$$

เมื่อ พลังงานตกกระทบ (Incident Energy =  $E_I$ ) ซึ่งจะได้รับพลังงานจากแหล่งกำเนิด สัดส่วนของการดูดซับ การส่งผ่าน และการสะท้อนพลังงานจะแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุ ซึ่งจะทำให้สามารถแยกชนิดของวัตถุได้ นอกจากนี้ในวัตถุเดียวกันสัดส่วนของการเกิดปฏิกิริยาทั้งสามนี้จะแตกต่างกันตามความยาวของช่วงคลื่นที่ตกกระทบ วัตถุสองชนิดอาจจะไม่คล้ายกันในช่วงคลื่นหนึ่ง แต่จะสามารถแยกจากกันได้ในช่วงคลื่นหนึ่ง ในส่วนสายตามองเห็น วัตถุจะแสดงให้เห็นในรูปของสีต่างๆ เช่น วัตถุนั้นสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่นสีเขียวมาก เราก็จะมองเห็นวัตถุนั้นเป็นสีเขียว



ภาพที่ 6 ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับพื้นผิวโลก

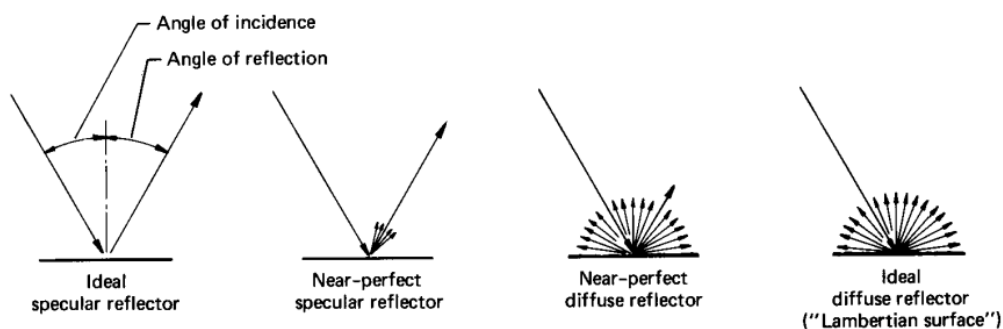
ที่มา : <https://www.archive.arm.gov>

เนื่องจากระบบบันทึกข้อมูลส่วนใหญ่จะบันทึกอยู่ในช่วงของพลังงานสะท้อน (Reflected Energy) คือการบันทึกพลังงานที่สะท้อนมาจากวัตถุ ดังนั้นการศึกษาเพื่อแยกชนิดของวัตถุจึงเป็นการศึกษาการสะท้อนพลังงานของวัตถุซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_R (l) = E_i (l) - [E_A (l) + E_T (l)]$$

ลักษณะพื้นผิวของวัตถุก็เป็นสิ่งสำคัญที่มีปัจจัยต่อการสะท้อนพลังงาน วัตถุที่มีพื้นผิวเรียบมุมสะท้อนพลังงานจะเท่ากับมุมตกกระทบ เป็นลักษณะการสะท้อนแบบ Specular reflectors ส่วนวัตถุที่มีพื้นผิวขรุขระ การสะท้อนพลังงานจะไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า Diffuse หรือ Lambertian reflectors ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นทั้งสองแบบที่กล่าวมา (ภาพที่ 7) (Prapassorn, 2557)

นอกจากลักษณะพื้นผิวของวัตถุแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความยาวของช่วงคลื่นที่ตกกระทบที่วัตถุด้วย ถ้าเป็นพลังงานช่วงคลื่นสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของวัตถุที่ประกอบเป็นพื้นผิววัตถุหรือความต่างระดับของพื้นผิววัตถุ การสะท้อนแสงอาจเป็นแบบให้ลักษณะวัตถุพื้นผิวขรุขระได้ แต่ถ้าในวัตถุชนิดเดียวกันนี้ได้รับพลังงานตกกระทบในช่วงคลื่นยาว เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิววัตถุการสะท้อนแสงก็อาจเป็นแบบลักษณะของวัตถุที่มีพื้นผิวราบได้ (Phakpoom, 2015)



ภาพที่ 7 ลักษณะการสะท้อนพลังงานจากพื้นผิววัตถุเรียบ และขรุขระ

ที่มา : [http://georemotesensing.blogspot.com/2014/11/blog-post\\_7.html](http://georemotesensing.blogspot.com/2014/11/blog-post_7.html)

ในการสำรวจข้อมูลจากระยะไกล เป็นการวัดคุณสมบัติสัสดส่วนในการสะท้อนพลังงานของวัตถุบนผิวโลก ณ ช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่ง เรียกว่า Spectral Reflectance,  $\rho_\lambda$  ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\rho_\lambda = (E_R(\lambda)/E_T(\lambda)) \times 100$$

โดยที่

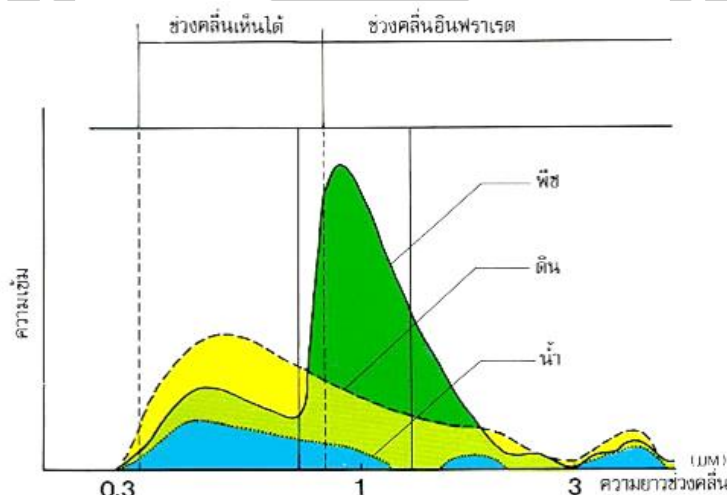
$E_R(\lambda)$  คือ พลังงานช่วงคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุ

$E_T(\lambda)$  คือ พลังงานช่วงคลื่นที่ตกกระทบวัตถุ

พลังงานที่สัญญาณ (Sensor) วัดได้จึงประกอบด้วยพลังงานที่สะท้อนหรือแผ่จากพื้นผิววัตถุ พลังงานบางส่วนจากปฏิกิริยาในชั้นบรรยากาศ พลังงานที่สะท้อนกลับโดยตรงจากก้อนเมฆ ค่าที่วัดได้นี้ อาจจะน้อยหรือมาก หรือเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม มุมของดวงอาทิตย์ มุมของตัวรับสัญญาณ คุณสมบัติของวัตถุในการสะท้อน การดูดซึม และการส่งผ่านพลังงาน (Prapassorn, 2557)

### 3.7 การสะท้อนช่วงคลื่น (Spectral Signature) ของพืชพรรณ ดิน และน้ำ

พืช ดินและน้ำ ที่ปกคลุมผิวโลกจะมีความยาวช่วงคลื่นที่ต่างกัน ทำให้เราสามารถแยกแยะประเภทชนิดต่างๆ ได้ โดยวัตถุทั้งสามชนิดหลักนี้ จะมีรูปแบบการสะท้อนพลังงานช่วงคลื่นต่างๆ เฉพาะตัว เรียกว่า Spectral Signature หรือลายเซ็นต์เชิงคลื่น (ภาพที่ 8) โดยที่ช่วงคลื่นเดียวกัน วัตถุต่างชนิด จะให้ค่าการสะท้อนพลังงานช่วงคลื่นต่างกัน ในขณะที่วัตถุชนิดเดียวกัน จะให้ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นที่ แตกต่างกันไป ทำให้สามารถแยกแยะชนิดของวัตถุได้



ภาพที่ 8 ลักษณะการสะท้อนช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ พืช ดิน และน้ำ

ที่มา : (พิชชาพร, 2557)

### 3.7.1 การสะท้อนช่วงคลื่นของพืชพรรณ

หลักการสะท้อนช่วงคลื่นของพืชพรรณจะใช้การดูดกลืนพลังงานคลอโรฟิลล์ของใบพืชที่ช่วงความยาวคลื่น 0.45-0.65 ไมครอน ซึ่งเป็นช่วงคลื่นสีน้ำเงินและสีแดง สะท้อนพลังงานที่ความยาวคลื่น 0.5 ไมครอน มนุษย์เราจึงมองเห็นใบพืชเป็นสีเขียว ถ้าใบพืชไม่สมบูรณ์ เช่น แห้ง เหี่ยว หรือทำให้คลอโรฟิลล์ลดลงก็จะทำให้การสะท้อนที่คลื่นสีแดงสูงขึ้น ในช่วงคลื่นอินฟราเรดสะท้อน (Reflected Infrared) (0.7-1.3 ไมครอน) การสะท้อนพลังงานของใบพืชจะสูง คือ จะสะท้อนพลังงานประมาณ 50 % ของพลังงานที่ตกกระทบ ซึ่งการสะท้อนพลังงานนี้เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างภายในของพืช เนื่องจากพืชต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างภายในไม่เหมือนกัน ดังนั้นถ้าวัดการสะท้อนพลังงานในช่วงนี้ก็จะสามารถแยกชนิดของพืชได้ ในทำนองเดียวกันการสะท้อนพลังงานที่ความยาวคลื่นอินฟราเรดสะท้อนของพืชที่ไม่สมบูรณ์ จะมีความแตกต่างไปจากการสะท้อนที่มีความยาวคลื่นเดียวกันของพืชที่สมบูรณ์ ดังนั้นระบบการสำรวจข้อมูลจากระยะไกลที่สามารถบันทึกค่าสะท้อนของช่วงคลื่นนี้ได้ สามารถตรวจจับพืชที่ไม่สมบูรณ์ได้ในช่วงคลื่นที่มีความยาวสูงกว่า 1.3 ไมครอน พลังงานส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนหรือสะท้อนมีการส่งผ่านน้อยมาก มักพบค่าต่ำลงที่ช่วงคลื่น 1.4, 1.9 และ 2.7 เพราะในช่วงเหล่านี้ในใบพืชจะดูดกลืนพลังงาน จึงเรียกว่าช่วงคลื่นเหล่านี้ว่าช่วงคลื่นการดูดซับน้ำ (Water Absorption Bands) ดังนั้น ค่าการสะท้อนพลังงานของใบพืชจึงแปรผกผันกับปริมาณน้ำทั้งหมดในใบพืชสำหรับช่วงคลื่นเหล่านี้ด้วย (พิชชาพร, 2557)

### 3.7.2 การสะท้อนช่วงคลื่นของดิน

ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนพลังงานของดินกับความยาวคลื่นมีความแปรปรวนน้อย ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสะท้อนช่วงคลื่นของดิน คือ ความชื้นในดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ เนื้อดิน ปริมาณเหล็กออกไซด์ และความขรุขระของผิวดิน (Roughness) ปัจจัยดังกล่าวมีความซับซ้อน และมีความสัมพันธ์กัน เช่น ดินทรายหยาบมีการระบายน้ำดีจะสะท้อนพลังงานสูง ดินละเอียดมีการระบายน้ำไม่ดีจะสะท้อนพลังงานต่ำ ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงจะมีสีคล้ำ ดูดกลืนพลังงานสูงในช่วงสายตามองเห็น เช่นเดียวกับดินที่มีเหล็กออกไซด์ใน ปริมาณสูง จะปรากฏเป็นสีเข้ม เนื่องจากการสะท้อนพลังงานลดลง ดินที่มีผิวขรุขระมากก็จะทำให้การสะท้อนของพลังงานลดลงเช่นเดียวกัน แสดงลักษณะการสะท้อนพลังงานของดินชนิดต่างๆ ในสภาพความชื้นต่ำ (พิชชาพร, 2557)

### 3.7.3 การสะท้อนช่วงคลื่นของน้ำ

การสะท้อนพลังงานของน้ำมีลักษณะต่างจากการสะท้อนพลังงานวัตถุอื่นอย่างมาก โดยเฉพาะในช่วงคลื่นอินฟราเรด การสะท้อนพลังงานจะแตกต่างกันออกไปเนื่องจากน้ำบนโลกของเรา มีหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นน้ำใส น้ำขุ่น หรือน้ำที่มีสารเคมีเจือปนต่างๆ บางครั้งพื้นที่ที่รองรับน้ำก็

อาจจะมีผลต่อการสะท้อนพลังงานของน้ำ น้ำใสจะดูดกลืนพลังงานได้น้อยในช่วงคลื่นต่ำกว่า 0.6 ไมครอน การส่งผ่านพลังงานเกิดขึ้นสูงในช่วงแสงสีน้ำเงิน เขียว แต่น้ำที่มีตะกอนหรือสิ่งเจือปน การสะท้อน และการส่งผ่านพลังงานจะเปลี่ยนไป เช่น น้ำที่มีตะกอนดินแขวนลอยอยู่มาก จะสะท้อนพลังงานได้มากกว่าน้ำใส ถ้ามีสารคลอโรฟิลล์หรือพีชในน้ำมากขึ้น การสะท้อนช่วงคลื่นสีน้ำเงินจะลดลงและจะเพิ่มขึ้นในช่วงคลื่นสีเขียว (พิชชาพร, 2557)

### 3.7.4 Ground Resolution & Pixel

การบันทึกข้อมูลจะเป็นการบันทึกข้อมูลเชิงตัวเลข (Digital data) ความละเอียดของข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial resolution) จึงขึ้นกับรายละเอียดภาคพื้นดิน (Ground Resolution) โดยแต่ละจุดบนภาพ เรียกว่า Pixel หรือ Picture Element ซึ่งหมายถึงขนาดของพื้นที่ที่เล็กที่สุดที่จะมองเห็นด้วยตาเทียม หมายความว่า เป็นกรอบพื้นที่ขนาดเล็กที่สุดที่จะถูกแทนที่ด้วยค่าเชิงตัวเลข 1 ค่า จะเป็นค่าการสะท้อนพลังงานของวัตถุต่างๆที่อยู่รวมกันในจุดบนภาพ เช่น ข้อมูลรายละเอียด 20 เมตร หมายถึงว่า แต่ละจุดขนาด 20 เมตร บนภาคพื้นดิน จะมีค่าการสะท้อนรวมเพียง 1 ค่า เป็นตัวแทนของวัตถุในจุดบนภาพนั้น ถ้าหากต้องการให้ได้รายละเอียดของข้อมูลมากจะต้องมีขอบเขตขนาดเล็ก (พิชชาพร, 2557)

### 3.7.5 การให้ภาพสีผสม (False Color Composite)

ภาพจากดาวเทียมขาว-ดำหนึ่งภาพในหลายช่วงคลื่นสามารถนำมาซ้อนทับกันได้ครั้งละ 3 แบนด์ โดยทำให้แต่ละแบนด์ที่เป็นสีขาว-ดำกลายเป็นสีบวก (Additive Primary Color) 3 สีหลัก คือ สีน้ำเงิน (Blue) สีเขียว (Green) และสีแดง (ANJI REDDY) ซึ่งคือช่วงคลื่นตามมองเห็น เมื่อนำมาซ้อนทับกันทำให้ได้ภาพสีผสม ปรากฏสีต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีสี คือการซ้อนทับของแม่สีบวกแต่ละคู่จะให้แม่สีลบ (Subtractive Primary Color) คือ สีเหลือง (Yellow) สีม่วงแดง (Magenta) และสีฟ้า (Cyan) ดังนี้ (ภาพที่ 14) (พิชชาพร, 2557)

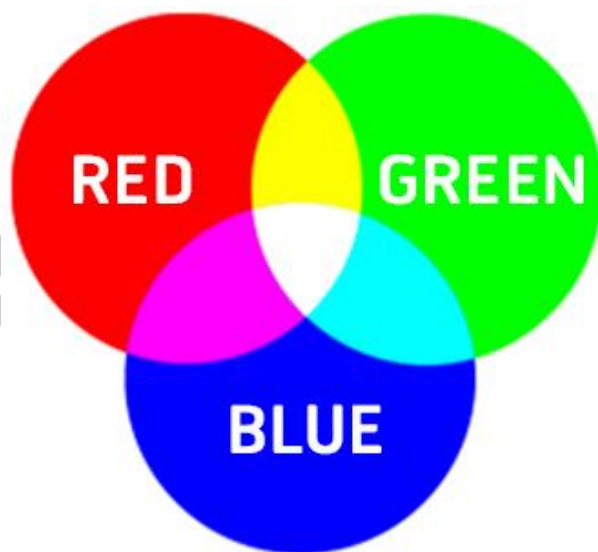
$$\text{สีแดง (R)} + \text{สีเขียว (G)} = \text{สีเหลือง (Y)}$$

$$\text{สีแดง (R)} + \text{สีน้ำเงิน (B)} = \text{สีม่วงแดง (M)}$$

$$\text{สีน้ำเงิน (B)} + \text{สีเขียว (G)} = \text{สีฟ้า (C)}$$

$$\text{สีน้ำเงิน (B)} + \text{สีเขียว (G)} + \text{สีแดง (R)} = \text{สีขาว (W)}$$

$$\text{สีเหลือง (Y)} + \text{สีม่วงแดง (M)} + \text{สีฟ้า (C)} = \text{สีดำ (ภาพที่ 14)}$$



ภาพที่ 9 ภาพสีผสมของข้อมูลดาวเทียม

ที่มา : <https://forum.munkonggadget.com/detail.php?id=267172>

ถ้าหากต้องการภาพสีผสมธรรมชาติ (Natural Color) เราต้องใช้ข้อมูลช่วงคลื่น สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง มาผ่านแม่สีบวกทั้งสาม คือ น้ำเงิน เขียว และแดง ตามลำดับ ในกรณีที่ใช้การผสมสีจากข้อมูลช่วงคลื่นที่แตกต่างไปจากนี้ ภาพที่ได้จะเรียกว่าภาพสีผสมเท็จ (False Color) เช่น ข้อมูลช่วงคลื่นสีเขียว สีแดง และ อินฟราเรดใกล้ ตามลำดับ จะให้ข้อมูลพืชพรรณเป็นสีแดง เนื่องจาก พืชสามารถสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ได้ดี จากหลักการดังกล่าวนี้ทำให้เราสามารถจำแนกชนิดวัตถุตามสีที่ปรากฏได้ (พิชชาพร, 2557)

#### 4. การสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry)

การสำรวจด้วยภาพถ่าย เป็นการสำรวจที่ประยุกต์หลักวิชา Photogrammetry มาใช้ในการสำรวจภูมิประเทศ การทำแผนที่ และการสำรวจภาคพื้นดิน (Terrestrial) และทางอากาศ (Aerial)

โฟโตแกรมเมตรีเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการทำข้อมูลสารสนเทศที่มีความแม่นยำสูงเกี่ยวกับวัตถุภาพและสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยผ่านกระบวนการบันทึก การรังวัด และการแปลความหมายจากภาพถ่าย และรูปแบบการแพร่ของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่ถูกบันทึกไว้ จากคำนิยามของงานทางโฟโตแกรมเมตรี สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ



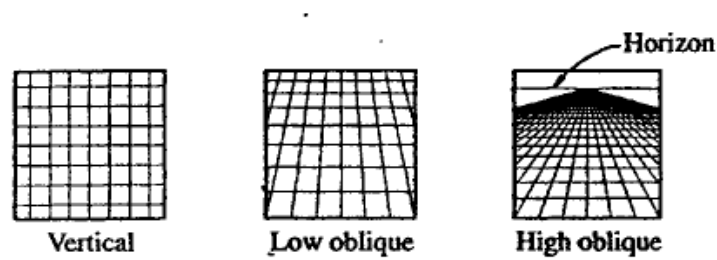
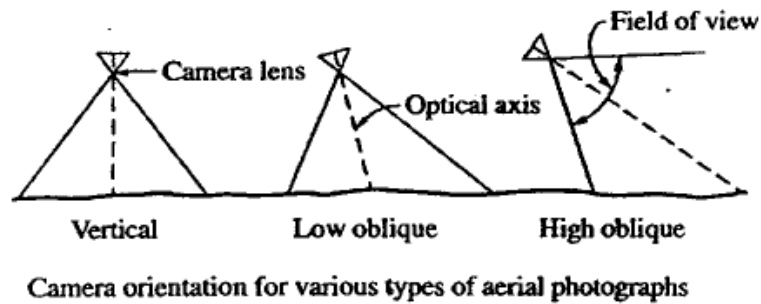
1. Photogrammetry ที่เกี่ยวกับการรังวัดภาพ (Metric photogrammetry) ซึ่งรวมการวัดอย่างละเอียดและการคำนวณ เพื่อให้ได้ขนาดของวัตถุ
2. Photogrammetry ที่เกี่ยวกับการแปลภาพ (Interpretation photogrammetry) ซึ่งเป็นการปฏิบัติเกี่ยวกับการรับรู้ภาพจากระยะไกล และจำแนกวัตถุต่าง ๆ (สันติธรรมนนท์, 2553)

#### 4.1 ชนิดของภาพถ่าย

ภาพถ่ายในงานทาง Photogrammetry แบ่งเป็นภาพที่ถ่ายจากภาคพื้นดิน (Terrestrial) และทางอากาศ (Aerial) ภาพถ่ายภาคพื้นดินถ่ายด้วยกล้องที่อยู่บนพื้น (Ground – based cameras) ซึ่งจะทราบตำแหน่ง (position) และการเอียงตัว (orientation) ของกล้อง ทำให้เกิดสาขาของงาน Photogrammetry ที่เรียกว่า “Terrestrial Photogrammetry” เป็นการประยุกต์การรังวัดด้วยภาพที่มีการใช้เครื่องมือและดำเนินการรังวัดบนภาคพื้นดิน การรังวัดใช้กล้องที่มีขนาดเล็กลงเพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายในสนามได้สะดวก การรังวัดภาพพื้นดินนิยมใช้กับการทำแผนที่ภูมิประเทศที่ขอบเขตไม่กว้างขวางนัก แต่ภูมิประเทศซับซ้อน เช่น การทำแผนที่ของเหมืองเปิด การทำแผนที่ของภูมิประเทศที่เป็นเนินเขาและหุบเขา และอีกสาขา เรียกว่า “Close-range Photogrammetry” เป็นการรังวัดด้วยภาพที่ระยะระหว่างกล้อง อยู่ห่างจากวัตถุที่จะรังวัดไม่มากนัก โดยทั่วไปจะจำกัดในระยะ 1 ถึง 100 เมตร จะมีการใช้กล้องถ่ายภาพพิเศษเพื่อการนี้โดยเฉพาะปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ใช้งานอยู่ทั่วไปในท้องตลาด มักจะประยุกต์ใช้งานด้านโบราณสถาน โบราณวัตถุ งานด้านการตรวจสอบทางอุตสาหกรรม ทางด้านการแพทย์ เพื่อใช้หาขนาดและรูปร่างของวัตถุที่ซับซ้อนหรือต้องการประหยัดเวลาในการบันทึก

ภาพถ่ายทางอากาศ โดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็นภาพตั้ง กับ ภาพเอียง ภาพตั้ง (Vertical) คือภาพที่ถ่ายโดยให้แกนของกล้องอยู่ในแนวตั้งมากที่สุด ถ้าแกนของกล้องขณะถ่ายภาพอยู่ในแนวตั้งจริง ๆ ระยะเวลาภาพจะขนานกับระนาบราบของพื้นหลักฐาน และภาพที่ได้เรียกว่า ตั้งจริง (Truly Vertical) ในการถ่ายภาพตั้ง อาจจะมีปัญหาเรื่องของแนวกล้องที่จะให้อยู่ในแนวตั้งอยู่ตลอดเวลาเนื่องจากสภาพอากาศ ทำให้เครื่องบินเกิดการเอียงในขณะที่ถ่ายภาพ ถ้าแกนของกล้องเอียงไปจากแนวตั้งเพียงเล็กน้อย ภาพที่ได้เรียกว่า ภาพเอียง (Tilt) ความเอียงของแกนกล้องนี้ปกติจะน้อยกว่า  $1^{\circ}$  และไม่เกิน  $3^{\circ}$  ในการทำงานบางครั้งก็ถือเอาภาพเอียงเป็นภาพตั้งจริง เครื่องมือที่มีความละเอียดถูกต้องและวิธีการในงานโฟโตแกรมเมตรี ได้รับการพัฒนาจนทำให้การใช้ภาพเอียงไม่ทำให้ความถูกต้องของงานที่ได้ลดลง

ภาพเอียง (Oblique) คือ ภาพที่ถ่ายโดยให้แกนของกล้องเอียงออกจากแนวตั้ง ภาพเอียงต่ำ (Low Oblique) จะไม่ปรากฏเส้นขอบฟ้า ส่วนภาพเอียงสูง (High Oblique) จะปรากฏแนวเส้นขอบฟ้า (กิตติศักดิ์, 2559)

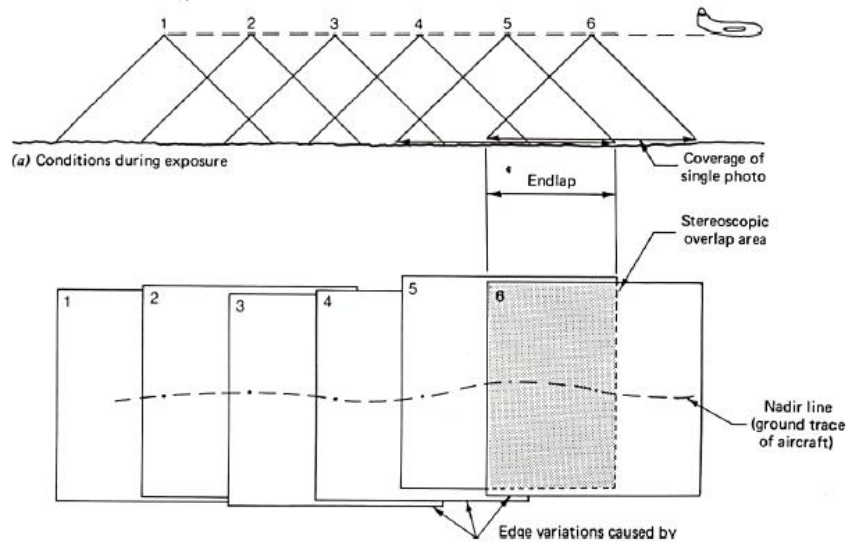


ภาพที่ 10 ชนิดภาพถ่ายภาพแนวตั้ง ภาพเฉียงต่ำ ภาพเฉียงสูง  
ที่มา : (กิตติศักดิ์, 2559)

#### 4.2 การบินถ่ายภาพตั้ง

การถ่ายภาพทางอากาศในแนวตั้งด้วยกล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งบนเครื่องบินให้คลุมพื้นที่จะถ่ายภาพเป็นแนวขนานกัน เรียกว่า “แนวบิน” (Flight Strip) ภาพที่อยู่ประชิดกันในแต่ละแนวบิน จะครอบคลุมพื้นที่เหลื่อมกันเป็นบางส่วน เรียกว่า “ส่วนซ้อน” (End lap /Overlap) ประมาณ 55 - 65 % บริเวณที่เหลื่อมกันตามแนวบินของภาพคู่หนึ่ง เรียกว่า “บริเวณคู่ภาพสามมิติ” (Stereoscopic Overlap Area) และเรียกภาพคู่นี้ว่า “คู่ภาพสามมิติ” (Stereo pairs) ตำแหน่งของกล้องขณะถ่ายภาพ เรียกว่า “ตำแหน่งถ่ายภาพ ” (Exposure Station) และ ความสูงของกล้องเรียกว่า “ระดับบิน” (Flying Height) (กิตติศักดิ์, 2559)

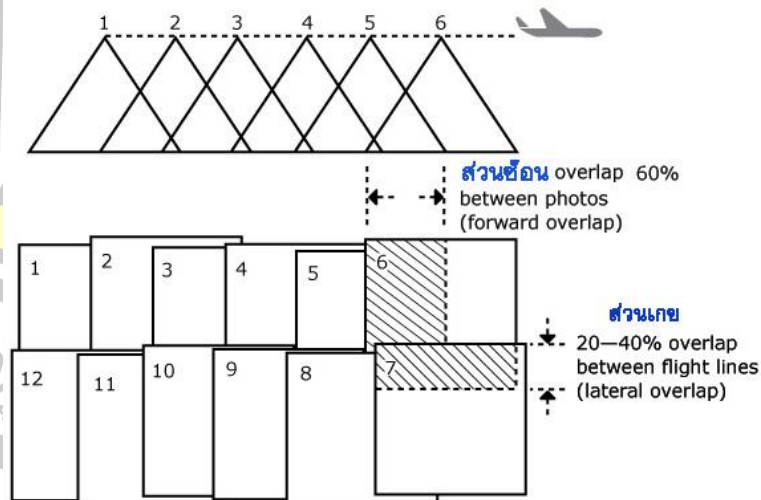
พหุ ประ โท ชี เว



ภาพที่ 11 ส่วนซ้อนบริเวณที่เหลื่อมกันของภาพ

ที่มา : <http://nates.psu.ac.th/Department/EarthScience/remote1/chapter3.pdf>

ภาพถ่ายในแนวนบินข้างเคียงกัน จะมีบริเวณที่ซ้อนกัน เรียกว่า “ส่วนเกย” (Side lap) ประมาณ 20 - 40% ภาพถ่ายทางอากาศที่มีตั้งแต่สองแนวนบินขึ้นไป เรียกว่า “บล็อกของภาพถ่าย” (Block of photos)



ภาพที่ 12 ส่วนเกยของแนวนบิน

ที่มา : <http://www.geog.pn.psu.ac.th>

การเก็บรวบรวมข้อมูลชนิดต่างๆ เข้าสู่ฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้งานในระบบสารสนเทศ ภูมิศาสตร์สามารถทำได้โดยใช้ระบบ Photogrammetry ผลผลิตที่ได้อาจแบ่งออกได้กว้างๆ เป็น 2 ประเภทคือ ผลผลิตที่เป็นภาพ (Image Products) กับผลผลิตที่เป็นจุดและข้อมูลแบบจุดพิกัด (Point and Vector Products) (กิตติศักดิ์, 2559)

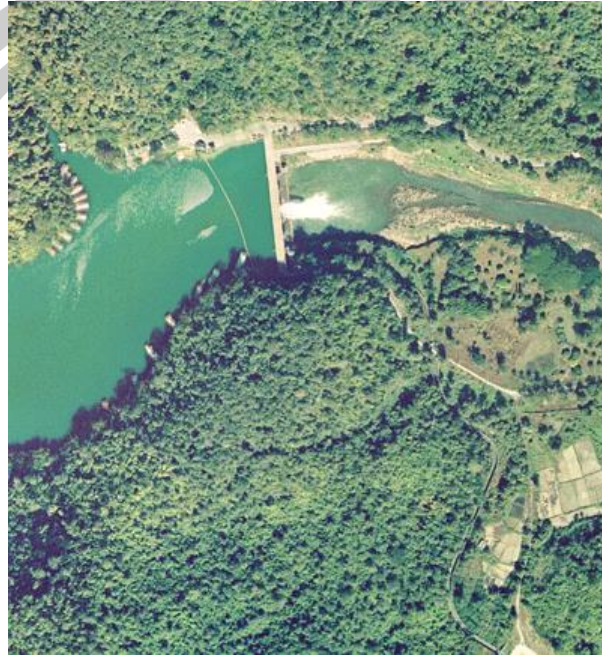
#### 4.2.1. ผลผลิตที่เป็นภาพ (Image Products)

ผลผลิตเหล่านี้อยู่ในรูปแบบของภาพที่แสดงวัตถุเดิมที่อาจอยู่ในรูปแบบสามมิติ โดยแสดงออกมาในลักษณะสองมิติ ตัวอย่างของผลผลิตมีลักษณะดังนี้

1. ภาพถ่ายทางอากาศ ใช้ในการตีความและวางแผนทั่วไป
2. ภาพขาว – ดำ หรือภาพสีที่ได้จากการกำหนดสีให้กับแถบสีต่างๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภาพเหล่านี้สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์และวางแผนทั่วไปในพื้นที่ที่ถ่ายภาพมา
3. ภาพโมเสค (Mosaic) เป็นภาพแต่ละภาพมาต่อกันให้เป็นภาพภาพเดียว ดังนั้นโมเสคจึงเป็นการต่อภาพหลาย ๆ ภาพโดยแต่ละภาพเป็นการมองภูมิประเทศจากจุดศูนย์ทิวทัศน์ (Perspective View)
3. ภาพตัดแก้ (Rectified Imagery) เป็นภาพที่ได้รับการแก้ปัญหาจากการเอียงของกล้อง ในขณะที่ถ่ายภาพออกไปแต่ยังมีอิทธิพลของความสูงต่ำของภูมิประเทศปรากฏอยู่ จึงทำให้มาตราส่วนที่แท้จริงในภาพแปรผันไปตามลักษณะของภูมิประเทศเช่นเดียวกับในกรณีของภาพหรือรูปถ่ายดั้งเดิม และในกรณีของโมเสค
4. ภาพออร์โท (Orthophoto) เป็นภาพของภูมิประเทศที่สร้างจากคู่ภาพที่ซ้อนกันโดยที่มีการขจัดลักษณะเรขาคณิตแบบการฉายจากจุดศูนย์ทิวทัศน์ของภาพออกไป ภาพออร์โทสามารถนำมาใช้ได้ลักษณะเดียวกับแผนที่ทางราบ (Planimetric Map) เนื่องจากมีมาตราส่วนคงที่ ถ้านำเส้นชั้นความสูงมาซ้อนทับบนภาพออร์โท ก็จะได้เป็นแผนที่ภาพออร์โทที่สามารถนำมาใช้เช่นเดียวกับแผนที่ภูมิประเทศ (Topographic Map)

พหุ ประถมศึกษา

5. โหมดของภาพออร์โท (Orthophoto mosaic) เกิดจากการนำภาพออร์โทในบริเวณติดกันหลายๆภาพมารวมกันเข้าเป็นภาพเดียวกัน โดยมีมาตราส่วนคงที่สามารถนำมาทำเป็นแผนที่ได้ (กิตติศักดิ์, 2559)

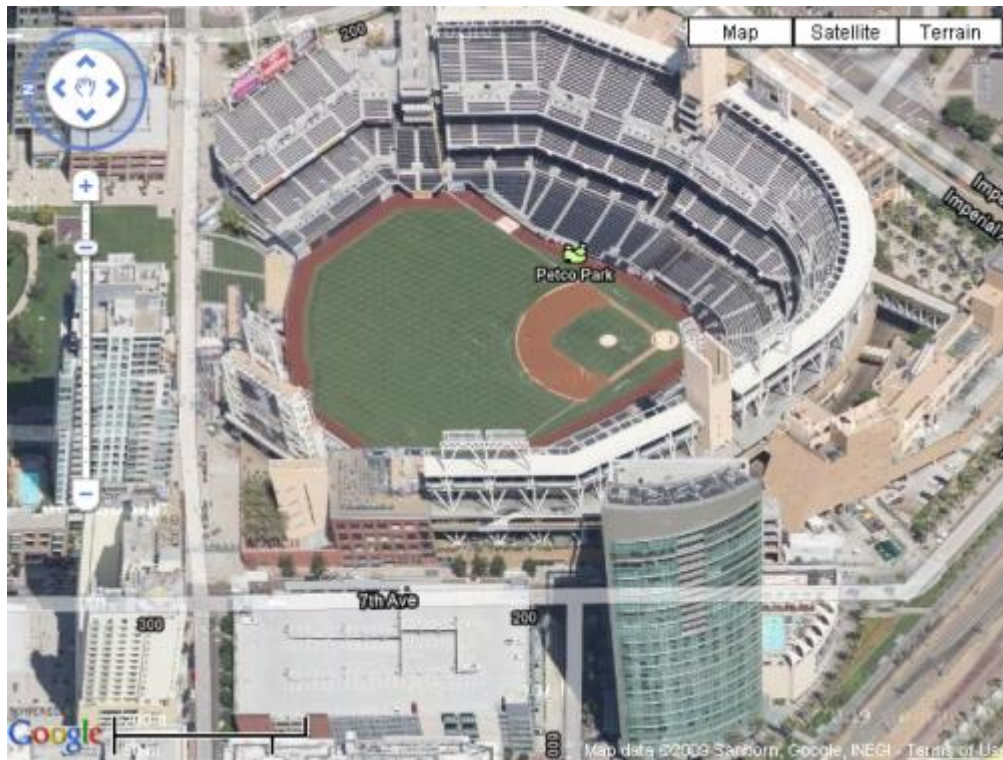


ภาพที่ 13 แผนที่ภาพออร์โท (Orthophoto Map)

ที่มา : <http://www.lddservice.org/services/ortho.php>

งาน Photogrammetry ยุคใหม่สามารถสร้างผลผลิตภาพชนิดอื่น ๆ ได้อีก เช่น ภาพภูมิประเทศทั้งแบบมุมมองจากจุดศูนย์ทิวทัศน์และมุมมองแบบเฉียง (Oblique View) และแผนที่แสดงความสูงโดยใช้สี (Color-coded Elevation Map) เป็นต้น

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพที่ 14 ภาพเกิดจากการประยุกต์ Oblique View  
ที่มา : <https://geochalkboard.wordpress.com>

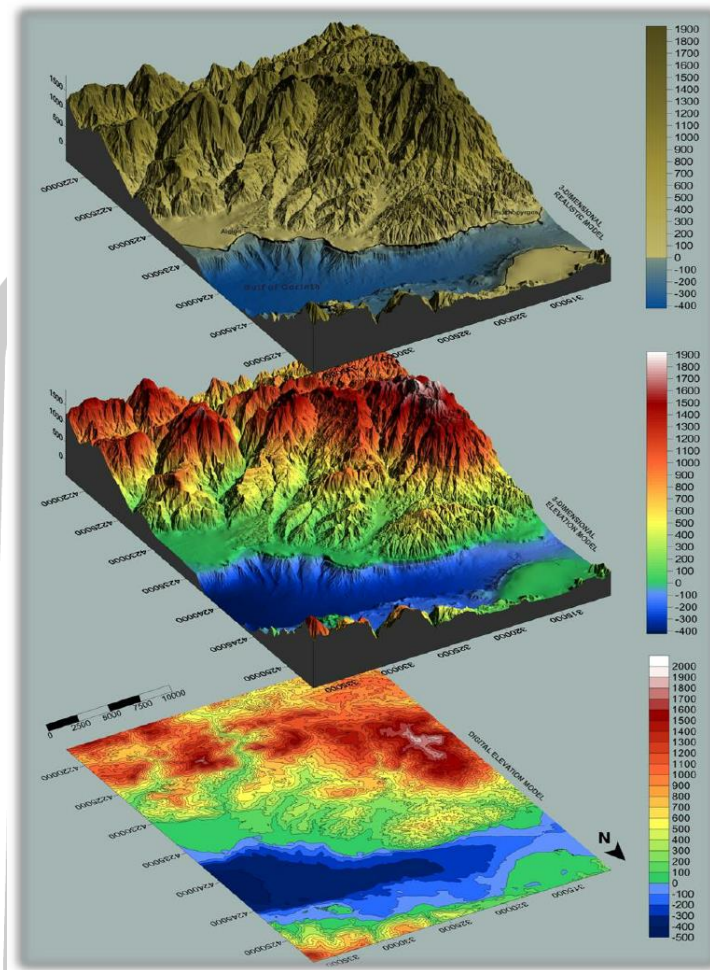
#### 4.2.2 ผลผลิตที่เป็นจุดและข้อมูลแบบจุดพิกัด (Point and Vector Products)

ผลผลิตที่เป็นจุดคือผลผลิตที่เราทราบค่าพิกัดสามมิติของแต่ละจุด ซึ่งค่าพิกัดอาจอยู่ในระบบพิกัดภาคพื้นดินหรืออยู่ในระบบพิกัดอื่น ผลผลิตเหล่านี้ได้แก่

1. จุดควบคุมเพิ่มเติม (Supplementary Control) ที่มักได้จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายด้วยวิธีการถ่ายสามเหลี่ยมอากาศ (Aerotriangulation)
2. การกำหนดตำแหน่งของเป้าหมาย (Targeting) ที่เราจะสร้างหรือกำหนดขึ้นก่อนการถ่ายภาพ (Pre-marking)
3. แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ที่เป็นการประมวลผลจากคอมพิวเตอร์เพื่อให้ได้มาซึ่งพื้นผิวของภูมิประเทศ

3.1 แบบจุดสุ่ม (Random Data Point) เก็บค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่ภูมิประเทศมีการเปลี่ยนแปลงความสูงอย่างมีนัยสำคัญ

3.2 แบบกริด (Gridded Data Point) เก็บค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่กำหนดจากตารางกริดแบบคงที่ในระนาบ XY สำหรับแสดงค่าความสูงตรงจุดตัดแต่ละจุดของเส้นกริด



ภาพที่ 15 ตัวอย่างแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM)

ที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Digital-Elevation-Model-DEM-3D-Elevation-Model-and-3D-Realistic-Model-of-the-combined\\_fig1\\_268074280](https://www.researchgate.net/figure/Digital-Elevation-Model-DEM-3D-Elevation-Model-and-3D-Realistic-Model-of-the-combined_fig1_268074280)

ผลผลิตที่เป็นข้อมูลแบบจุดพิกัดจะใช้บอกรายละเอียดที่อยู่ในภูมิประเทศหรือรายละเอียดของวัตถุที่เป็นโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น ตัวอย่างของผลผลิตนี้คือ แผนที่ลายเส้น (Line map) เช่น

1. แผนที่ทางราบ (Plan metric Map) ที่แสดงเฉพาะตำแหน่งทางราบของรายละเอียดในภูมิประเทศ ผลิตขึ้นโดยมีความละเอียดถูกต้องในระดับต่างๆ ขึ้นอยู่กับเทคนิคการงาน Photogrammetry

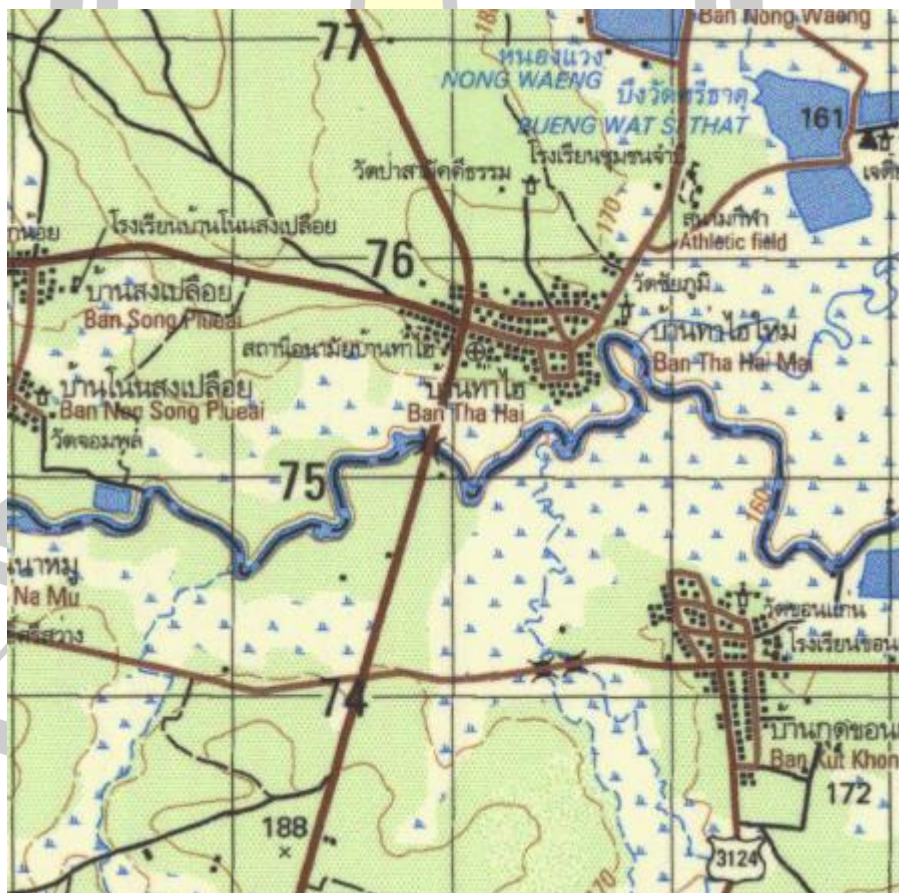
2. แผนที่แสดงเส้นชั้นความสูง (Contour Map) ที่เส้นแต่ละเส้นเกิดจากการตัดกันระหว่างพื้นผิวระดับกับภูมิประเทศ วิธีการนี้เป็นวิธีแรกๆ ที่ใช้แสดงรูปทรงของภูมิประเทศก่อนที่จะมีการนำแนวความคิดเรื่องแบบจำลองความสูงเชิงเลขมาใช้ แผนที่ชนิดนี้อาจสร้างขึ้นโดยตรงจากเครื่องมือทาง Photogrammetry หรืออาจสร้างจากแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข

3. แผนที่ภูมิประเทศที่แสดงทั้งรายละเอียดทางราบ และแสดงรูปทรงและความสูงของพื้นดิน ด้วยเส้นชั้นความสูง

4. แผนที่เฉพาะเรื่อง (Thematic Map) คือการนำเอาแผนที่ของแต่ละเรื่อง มาซ้อนทับกัน เพื่อประเมินข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น การแสดงโครงข่ายคมนาคม รูปแบบทางน้ำ (Drainage Pattern) ชนิดพืชพันธุ์ และความชื้นสามารถแยกแสดงออกมาโดยใช้แผนที่เฉพาะเรื่องจำนวน 4 ราวาง เป็นต้น แผนที่เฉพาะเรื่องเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นชั้นข้อมูลหนึ่ง (Layer) หนึ่งในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้

5. โพรไฟล์ (Profile) แสดงถึงการตัดกันระหว่างระนาบ ที่มักเป็นระนาบตั้งกับพื้นผิวภูมิประเทศ โพรไฟล์อาจมีการวางทิศทางอย่างไรก็ได้เมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิงทางราบ

6. แบบจำลองวัตถุสามมิติ (Three-dimensional Object Model) หรือโครงลวด (Wire frame) ได้จากการประยุกต์งาน Photogrammetry ร่วมกับเครื่องมือทางสาขาวิชาคอมพิวเตอร์ในงานทางอุตสาหกรรมการผลิต (กิตติศักดิ์, 2559)



ภาพที่ 16 ตัวอย่างผลผลิตที่เป็นข้อมูลแบบจุดพิกัด



## 5. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Regression Analysis

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรนั้นจะต้องใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ดีกว่าการเทียบหาสัดส่วน ซึ่งก็คือ " Regression Analysis " การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์จะถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการประมาณการ (Prediction) ฝั่งตัวแปรที่คงที่จะถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวประมาณการ (Predictor) โดยมีสัญลักษณ์แทนตัวเองคือ X ตัวแปรที่มีความคลาดเคลื่อนจะถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวตอบสนอง (Response) สัญลักษณ์แทนตัวเองคือ Y โดยที่

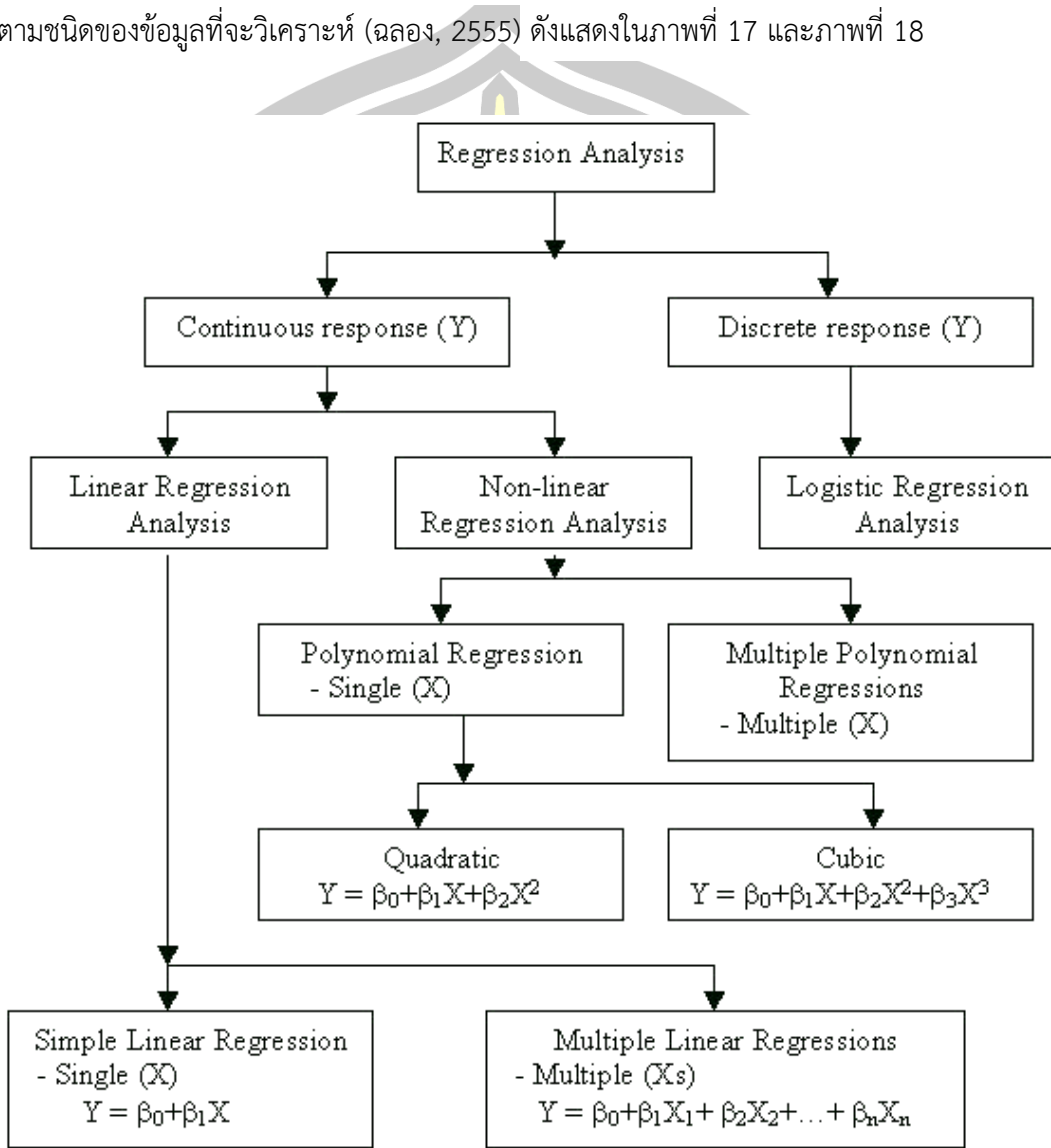
$$Y = F(X)$$

ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปแบบของสมการหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันของทั้งสองตัวแปร ความสัมพันธ์ที่ได้นั้นเราจะเรียกว่า Model หรือ Mathematical Model และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ได้ จะสามารถนำไปทำการประมาณค่า ตัวแปรของฝั่งที่มีค่าคลาดเคลื่อนได้ โดยใช้ค่าของตัวแปรฝั่งที่มีค่าไม่คลาดเคลื่อน นั้นหมายถึงถ้ารู้ตัวแปรฝั่งที่มีค่าไม่คลาดเคลื่อน และรู้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีการแสดงความสัมพันธ์แล้วก็จะสามารถรู้ค่าตัวแปรของฝั่งที่มีค่าคลาดเคลื่อนได้ Mathematical Model ดังกล่าวจึงเรียกว่า Transfer function ในที่สุดก็จะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ในลักษณะใช้ฝั่งใดฝั่งหนึ่งทำการประมาณค่าอีกฝั่งหนึ่งได้ เท่านั้นจึงจะเรียกว่า Transfer function (ฉลอง, 2555)

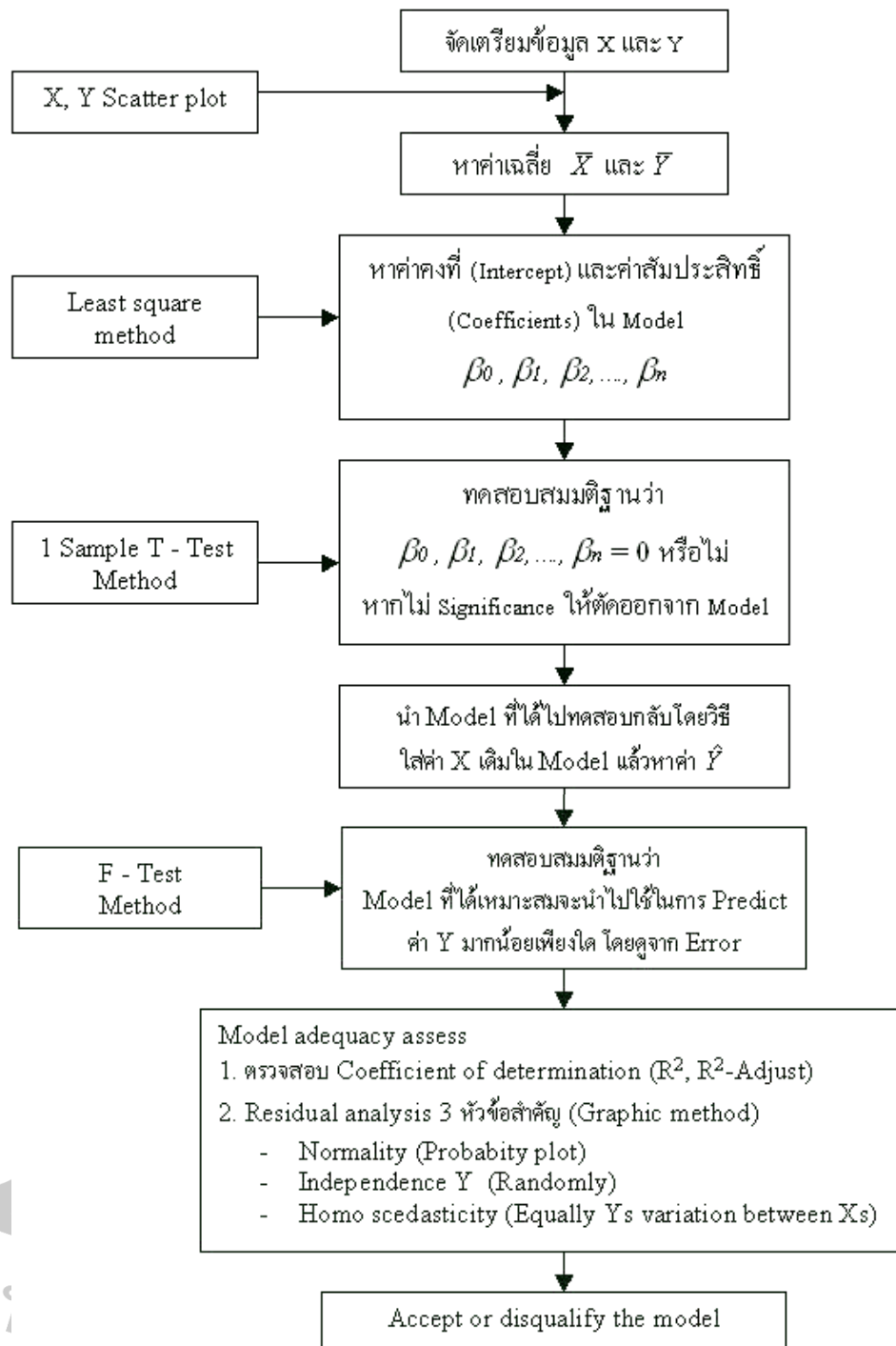
การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Regression Analysis นั้นสามารถใช้งานกับความสัมพันธ์ที่หลากหลาย และปริมาณตัวแปร เช่น

1. Simple linear regression analysis: เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว ความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรนั้นจะอยู่ในลักษณะเชิงเส้นตรง
2. Multiple linear regression analysis: เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เมื่อมีตัวแปรที่เป็นตัวประมาณการมากกว่า 1 ตัวขึ้นไป ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองฝั่งแต่ยังคงเป็นแบบลักษณะเชิงเส้นตรง
3. Polynomial regression analysis เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นลักษณะเชิงเส้นตรง รวมถึงกรณีมีตัวแปร ที่เป็นตัวประมาณการมากกว่า 1 ตัว การวิเคราะห์จะมีความซับซ้อนอย่างมากลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรจะมีทั้งแบบเป็นเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น

Regression Analysis ถือเป็นวิธีทางสถิติที่มีการนำมาใช้ในการประมวลผลข้อมูลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ อย่างแพร่หลาย การแบ่งชนิด Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่จะวิเคราะห์ (ฉลอง, 2555) ดังแสดงในภาพที่ 17 และภาพที่ 18



ภาพที่ 17 การจัดแบ่ง Regression Analysis ตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะวิเคราะห์  
ที่มา : <https://sites.google.com/site/mystatistics01/regression-correlation-analysis/regression-analysis>



ภาพที่ 18 ลำดับขั้นตอนและการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Regression Analysis  
ที่มา : <https://sites.google.com/site/mystatistics01/regression-correlation-analysis/regression-analysis>

## 5.1 แบบจำลอง Generalized Linear Models: GLMs

ตัวแบบเชิงเส้นวางนัยทั่วไป (Generalized Linear Models: GLMs) เป็นชื่อที่ใช้เรียกกลุ่มสมมุติฐานของตัวแบบเชิงเส้นวางนัยทั่วไปมีดังนี้

1. องค์ประกอบแบบสุ่ม (Random Component) ค่าของ  $Y$  เป็นอิสระต่อกัน และมีการแจกแจงแบบใดแบบหนึ่งในวงศ์ชี่กำลัง (Exponential Family)

2. องค์ประกอบแบบเป็นระบบ (Systematic Component)

สามารถเขียนตัวแปรต้นให้อยู่ในรูปตัวประมาณเชิงเส้น  $\eta$  ได้ โดยที่  $\eta = \mathbf{X}\beta$

3. ฟังก์ชันเชื่อมโยง (Link Function) ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแบบสุ่มและองค์ประกอบแบบเป็นระบบถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันเชื่อมโยง ( $g$ ) โดยที่ฟังก์ชันเชื่อมโยงนั้นสามารถหาอนุพันธ์ได้ (Differentiable) และเป็นฟังก์ชันโดยที่

$$E[\underline{Y}] \equiv \underline{\mu} = g^{-1}(\underline{\eta})$$

การแจกแจงที่อยู่ในวงศ์ชี่กำลัง (Exponential Family) มีคุณสมบัติ 2 ประการ ดังนี้

1. การแจกแจงสามารถเขียนได้ในรูปแบบของค่าเฉลี่ย และความแปรปรวน
2. ความแปรปรวนเป็นฟังก์ชันของค่าเฉลี่ยทางเดียว (Monotonic)

จากคุณสมบัติข้อที่ (2) เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$Var(Y_i) = \frac{\phi V(\mu_i)}{\omega_i}$$

โดยที่  $\phi$  เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดของความแปรปรวน (Scaled Parameter) และ  $\omega_i$  เป็นค่าคงที่ที่กำหนดน้ำหนักให้กับค่าสังเกต (Prior Weight) แต่ละตัว โดยการแจกแจงที่อยู่ในวงศ์ชี่กำลังและความแปรปรวนของการแจกแจงต่างๆ (สำนักงานอตราเบ็ญประกกันวินาศภัย, 2559) สามารถสรุปได้โดยย่อตาม ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างความแปรปรวนของการแจกแจงที่อยู่ในวงศ์ชี้กำลัง (Exponential Family)

การแจกแจง	ความแปรปรวน
Normal	1
Poisson	$x$
Gamma	$x^2$
Binomial	$x(1-x)$ เมื่อจำนวนการทดลองเท่ากับ 1 ครั้ง
Inverse Gaussian	$x^3$

ที่มา : สำนักงานอตราเบี้ยประกันวินาศภัย, 2559

## 5.2 แบบจำลอง Deep learning: DL

Deep learning คือ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบการทำงานของระบบโครงข่ายประสาท (neurons) ในสมองมนุษย์ ถือเป็นขั้นเด็ดของ machine learning Algorithm ของ deep learning ถูกสร้างขึ้นจากการนำเอา neural network หลายๆ layer มาต่อกัน โดย layer แรกสุดจะทำหน้าที่ในการรับข้อมูล (Input layer) layer สุดท้ายจะทำหน้าที่ส่งผลลัพธ์การประมวลผลออกมา (Output layer) ส่วน layer ระหว่าง layer แรกสุด และ layer สุดท้าย จะถูกเรียกว่า Hidden layer

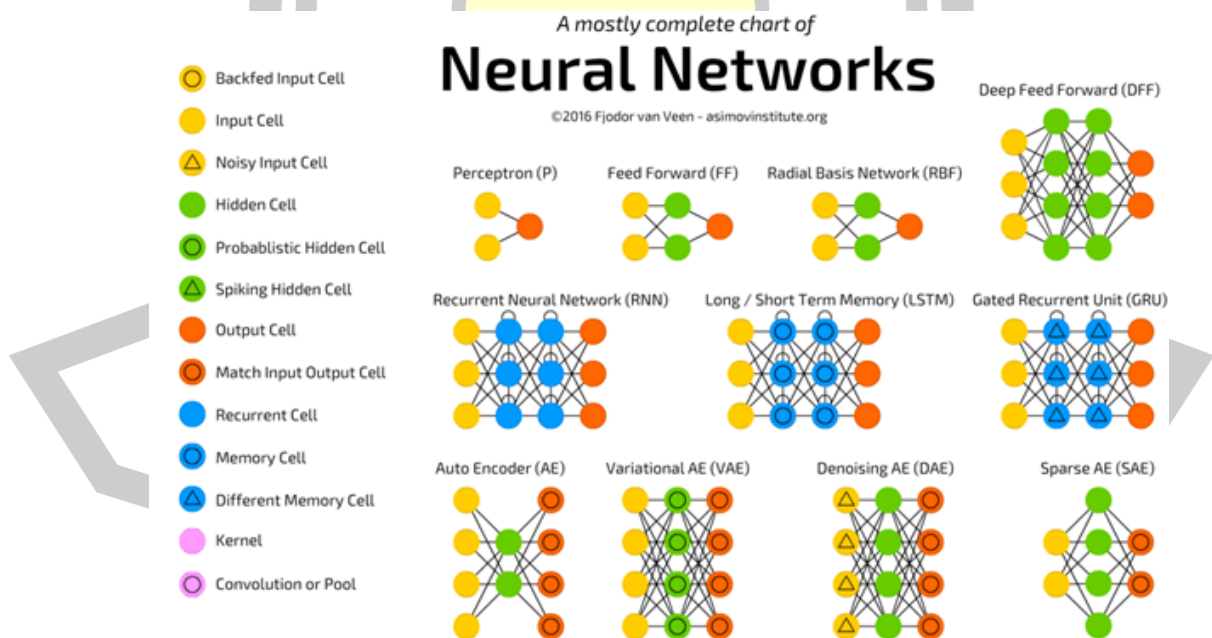
คำว่า deep learning มีที่มาจากการใช้ layer ของ neural network หลายอันมาต่อกัน (มี Hidden layer มากกว่า 2 layer ก็ถือเป็น deep learning แล้ว) เนื่องจาก layer เหล่านี้เป็นโครงสร้างที่ถูกจัดเก็บแบบเป็นกองซ้อน (stack) จึงเปรียบได้ว่า layer ที่จำนวนเยอะๆ ก็จะทำให้มีโครงสร้างที่ลึกยิ่งขึ้น โดย Hidden layer ของแต่ละ layer จะประกอบด้วย เซลล์ประสาท (neural ) จำนวนมาก ซึ่งมีหน้าที่ในการประมวลผลรับข้อมูลจาก layer ที่อยู่เหนือกว่า และส่งข้อมูลที่ประมวลผลเสร็จแล้วไปยัง layer ที่อยู่ต่ำกว่า, ข้อดีของการส่งข้อมูลแบบนี้ก็คือ layer แต่ละ layer สามารถที่จะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) ค่าความเอนเอียงของข้อมูล ( bias ) และวิธีการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (activation function) ที่เป็นอิสระต่อกันได้

การเรียนรู้ที่ deep learning นั้นเกิดขึ้นจาก 2 เฟส เฟสแรกคือการประยุกต์ใช้ การแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear transformation) กับข้อมูลที่ได้รับ (input) ได้ผลลัพธ์ (output) ออกมาอยู่ในรูปของโมเดลทางสถิติ (statistical model) เฟสที่สองคือการนำโมเดลมาผ่านวิธีการทางคณิตศาสตร์อย่าง derivative

โดยทั้ง 2 เฟสนี้จะถูกทำซ้ำแล้วซ้ำอีกจนกว่าจะได้มาซึ่ง model ที่มีความแม่นยำ (accuracy) ในระดับที่น่าพอใจ ซึ่งการกระทำซ้ำ ๆ ของ 2 เฟสนี้มีชื่อว่า iteration ยิ่งเราป้อนข้อมูลให้กับ model มากเท่าไร, layer แต่ละ layer ก็จะสามารถสกัด feature ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น (Nessence, 2018)

1) โครงข่ายประสาทแบบตื้น (Shallow neural network) : มี Hidden layer แค่ 1 layer (แต่ยังมี input layer และ output layer ประกอบเหมือนเดิม )

2) โครงข่ายประสาทแบบลึก (Deep neural network) : มี Hidden layer มากกว่า 1 layer , ยกตัวอย่างเช่น LeNet model ของ Google ที่ใช้สำหรับ การรับรู้ภาพ (image recognition) มี hidden layer มากถึง 22 layer



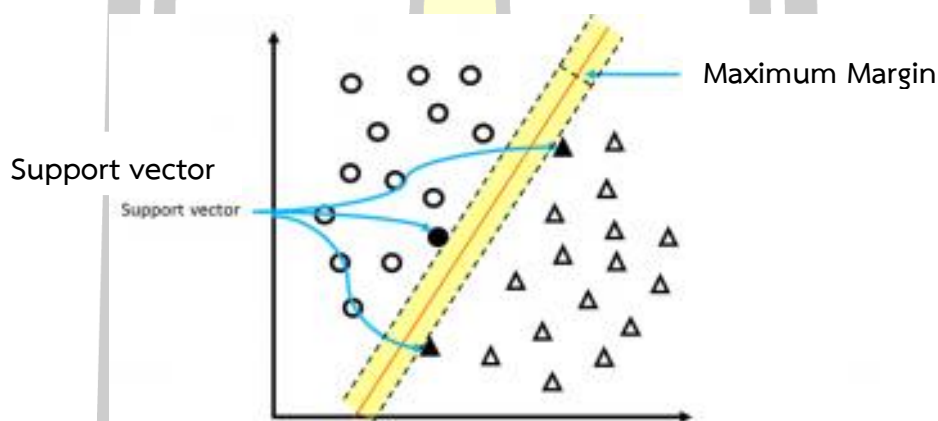
ภาพที่ 19 ชนิดของโครงข่าย Deep Learning (Types of Deep Learning Networks)

ที่มา: <https://www.thaiprogrammer.org>

### 5.3 แบบจำลอง Support Vector Machine: SVM

เป็นตัวจำแนกเชิงเส้น (Linear Classifier) แบบ 2 คลาส ซึ่งเป็นที่ยอมรับถึงประสิทธิภาพของการจำแนกที่เหนือกว่าวิธีการจำแนกอื่น ๆ ข้อได้เปรียบของ SVM คือมีประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลที่มีมิติจำนวนมากได้ นอกจากนี้การใช้ฟังก์ชันเคอร์เนล (Kernel Function) เพื่อแปลงข้อมูลไปยังมิติที่สูงขึ้นในปริภูมิคุณลักษณะ (Feature Space) สามารถจำแนกข้อมูลที่มีความคลุมเครือได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการของ SVM คือการหาเส้นตรงที่มีมาร์จินที่โตที่สุด (Maximum Margin) ที่สามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 คลาส ดังตัวอย่างในภาพที่ 2 เป็นข้อมูลขนาด 2 มิติ โดนถูกจำแนกออกเป็น 2 คลาส ได้แก่ + (○) และคลาส - (△) โดยเส้นตรงที่ใช้แบ่งข้อมูลมีมาร์จินเท่ากับ  $M=2w$  ซึ่ง เป็นความกว้างระหว่างเส้นตรงกับซัพพอร์ตเวกเตอร์ (Support vector) ของข้อมูลทั้ง 2 คลาส

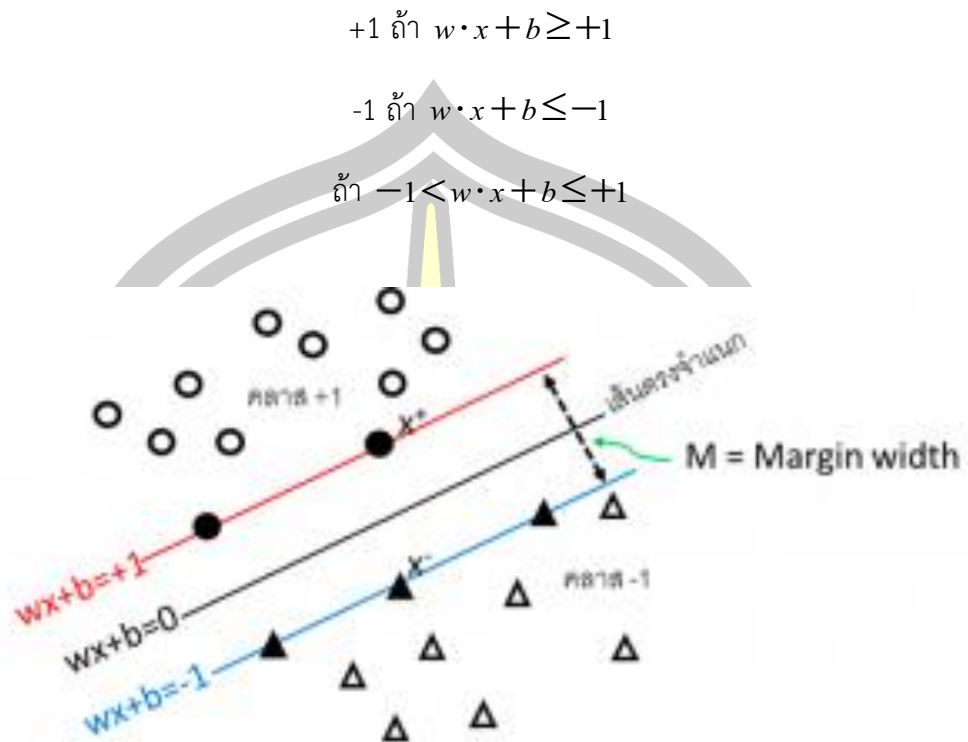
(● และ ▲) การจำแนกเชิงเส้นด้วยมาร์จินที่โตที่สุด



ภาพที่ 20 ตัวอย่างของตัวแบบจำแนก SVM บนข้อมูลขนาด 2 มิติ

ที่มา: <https://knowledge.snu.ac.th>

การใช้เส้นตรงสำหรับแบ่งข้อมูลเป็น 2 กลุ่มด้วยมาร์จินที่โตที่สุด (Maximum Margin) เป็นวิธีที่การันตีได้ว่าจะสามารถแยกข้อมูลได้โดยมีความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยมี support vector เป็นตัวกำหนดขนาดของ Margin ดังนั้นถ้าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เส้นตรงจำแนกก็ยังขึ้นอยู่กับ support vector ซึ่งจะยังเป็น Maximum Margin อยู่ในภาพประกอบ 11 เป็นการหา Maximum Margin ในเชิงคณิตศาสตร์ จากภาพประกอบ 11 จะเห็นได้ว่าข้อมูล  $x$  จะถูกแบ่งเป็นระนาบบวกและระนาบลบ โดยมีสมการคือ  $w \cdot x + b \geq 1$  สำหรับคลาส+ และ  $w \cdot x + b \leq -1$  สำหรับคลาส- ดังนั้นจะสามารถจำแนกข้อมูลได้โดย



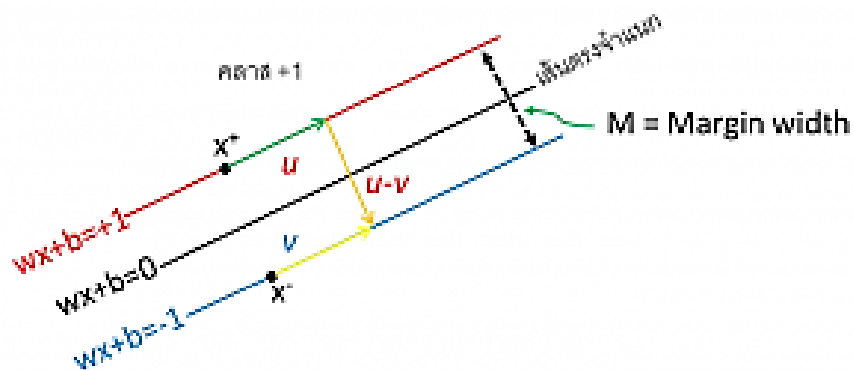
ภาพที่ 21 การคำนวณ Maximum Margin

ที่มา : <https://knowledge.snu.ac.th>

ในการหาความกว้างมาร์จิ้น (margin width) กำหนดให้  $x^-$  เป็นจุดอยู่บนระนาบลบ และให้  $x^+$  เป็นจุดอยู่บนระนาบบวก และทั้งสองจุดใกล้กันมากที่สุด ดังภาพประกอบ 12 จะมีเวกเตอร์  $u$  บนระนาบบวกและทำนองเดียวกันเวกเตอร์  $v$  บนระนาบลบ และมีเวกเตอร์  $w$  ที่เป็นเวกเตอร์นำหน้าของเส้นจำแนก ดังนั้นจะเกิดเวกเตอร์ตั้งฉากกันจะได้  $(u - v) \cdot w = 0$  การคำนวณหาความกว้างของมาร์จิ้นในภาพที่ 22 ในเทอมของ  $w$  และ  $b$

พูนุ ปณุกิตโต ชิว





ภาพที่ 22 การหาค่า Margin

ที่มา : <https://knowledge.sru.ac.th>

สามารถหาได้จากระบบสมการต่อไปนี้

$$M = \frac{2}{(w \times w)} \times \sqrt{(w \times w)} = \frac{2}{\sqrt{(w \times w)}}$$

เนื่องจากเราสามารถหาค่าของเวกเตอร์  $w$  และ ค่าคงที่  $b$  จะทำให้สามารถคำนวณค่า margin  $M$  ได้จากสมการที่ 8 จากนั้นใช้วิธีการค้นหาค่า  $M$  ที่มากที่สุดด้วยวิธีต่างๆ เช่น Gradient Descent, Simulated Annealing, Newton method, EM เป็นต้น เพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมต่อไป (ศาสตรา, 2560)

#### 5.4 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Statistical significance)

**5.4.1 T-Statistic** เมื่อเราได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มา จะต้องทำการพิสูจน์ทางสถิติ ค่าคงที่ ( $\beta_0$ ) และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระทุกค่า ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ) ว่ามีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือไม่โดยตั้งสมมติฐาน

$$H_0: \beta_i = 0$$

$$H_a: \beta_i \neq 0$$

ถ้าเราต้องการยอมรับเงื่อนไข  $H_0$  โดยดูจากค่า  $T$  ที่คำนวณได้ถ้ามีค่าน้อยกว่าค่า  $T$ -critical ก็หมายความว่าค่าคงที่ของตัวแปรอิสระตัวนั้นจะไม่มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็

สามารถตัดออกได้ โดยจะไม่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความเปลี่ยนแปลง แต่ถ้าต้อง Reject  $H_0$  เมื่อ  $T$  ที่คำนวณได้ค่ามากกว่า  $T$ -critical ก็หมายความว่าค่าคงที่หรือสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระตัวนั้น ๆ มีนัยสำคัญต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถตัดออกได้ นั่นจึงเป็นเหตุผลที่ว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Regression Analysis จะต้องมี  $T$ -test หรือมีค่า  $t$  ในตารางผลการวิเคราะห์แบบจำลองนั้น ๆ

**5.4.2 F-Statistic** สุดท้ายเราได้ Model ที่ถือว่าดีที่สุดเท่าที่จะหาได้ แต่ก็เชื่อว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะใช้ในการทำนายค่า  $Y$  ได้ถูกต้อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องพิสูจน์ให้ทราบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวนั้นเมื่อนำไปทำนายค่า  $Y$  แล้วจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนหรือมี Error มากแค่ไหน ระหว่าง  $Y$  และ  $\hat{Y}$  มากน้อยแค่ไหน (ฉลอง, 2555)

$H_0$ : Error ที่เกิดขึ้นที่ ( $Y$ ) เกือบทั้งหมดมาจากตัวแปรอิสระ

$H_a$ : Error ที่เกิดขึ้นที่ ( $Y$ ) ส่วนน้อยเท่านั้นที่มาจากตัวแปรอิสระ

หากผลการทดสอบด้วย F-Test พบว่าการยอมรับเงื่อนไข  $H_0$  หรือ F-Statistic ที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่า F-critical ก็ให้ถือว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมีความความคลาดเคลื่อนหรือมี Error จนไม่อาจยอมรับให้นำไปใช้ต่อไปได้ ทำให้ไม่สามารถที่จะนำมาวิเคราะห์ต่อไป ในทำนองเดียวกันหากผลการทดสอบด้วย F-Test พบว่า Reject  $H_0$  หรือ F-Statistic ที่ได้มีค่ามากกว่าค่า F-critical ก็ให้ถือว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวนั้น เมื่อนำไปทำนายค่า  $Y$  แล้วมีความผิดพลาดน้อยสามารถยอมรับได้

**3. Coefficient of determination** จะนำมาเพื่อพิสูจน์ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นดีพอจะใช้ผลการวิเคราะห์ไปทำนาย ค่า  $Y$  ในอนาคตได้หรือไม่ ถึงแม้ว่า F-Test จะบอกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นมีความผิดพลาดน้อย แต่ถ้าที่มาของการเก็บข้อมูลก่อนการนำไปวิเคราะห์ ไม่เหมาะสม ก็ยังถือว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ดีตัวนั้นอาจเป็นเพราะความผิดพลาดของข้อมูล

$R^2$  เป็นค่าที่ชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้นั้นมีความเหมาะสมหรือไม่ จะมีค่าระหว่าง 0 - 1 ยิ่งมีค่าที่เข้าใกล้ 1 ก็ยิ่งเป็นข้อมูลที่ดี

$R^2$ - Adjust เป็นค่าที่ชี้ให้เห็นว่า  $R^2$  ที่ได้นั้นมีความเหมาะสมจริงหรือไม่ โดยจะทำการลดข้อมูล ที่ได้มาลง 1 ตัว แล้วทำการหาค่า  $R^2$  ใหม่อีกครั้งเรียกว่า Adjust หากมีค่าต่ำกว่า  $R^2$  มากผิดปกติให้สรุปว่า ข้อมูลที่เก็บมานั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำเกินไป หรือ  $R^2$  มีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลมากเกินไป มีโอกาสที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเกิดการผิดพลาดที่สูง ค่า  $R^2$ -Adjust ที่เหมาะสมจะต้องมีค่าที่ต่ำกว่า  $R^2$  เพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงจะถือว่าแบบจำลองนั้นมีเก็บข้อมูลที่ดี มีจำนวนของ

ข้อมูลที่เพียงพอและเหมาะสม เมื่อใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น Regression analysis แล้ว ค่า  $R^2$  และ  $R^2$ -Adjust สามารถจะทำให้แบบจำลองที่ได้นั้นไม่สามารถยอมรับได้ต้องกลับไปดำเนินการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม และเริ่มทำการวิเคราะห์ที่ใหม่อีกครั้ง ถึงแม้ว่า F-test จะบอกว่าแบบจำลองที่ได้นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมากก็ตาม (ฉลอง, 2555)

### 5.5 รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด (Root Mean Square Error: RMSE)

รากกำลังสองเฉลี่ยผิดพลาด คือ การวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ได้จากการประมาณการจากแบบจำลองยกกำลังสอง ถ้าค่า RMSE มีค่าน้อยแสดงว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าจริง แต่ถ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่าไม่เกิดความคลาดเคลื่อนในแบบจำลอง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนตัวแปร  
 $\hat{x}_i$  คือ ค่าพยากรณ์  
 $x_i$  คือ ค่าจริง

### 5.6 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: $R^2$ )

$R^2$  จะเป็นค่าที่บอกร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของค่า  $Y$  ที่เกิดจากอิทธิพลของค่า  $X$  ที่ได้จากการคำนวณจากสมการ ดังนี้

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากแบบจำลอง  
 $\bar{y}_i$  คือ ค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการสำรวจในสนาม  
 $\hat{y}_i$  คือ สมการถดถอย  
 $n$  คือ จำนวนของกลุ่มตัวอย่าง

ถ้าสมการมีค่า  $R^2$  ยิ่งมีค่าสูงยิ่งทำให้เกิดความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือ คาดคะเนผลลัพธ์ย่อมสูงตามไปด้วย โดยทั่วไป สมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า  $R^2$  อย่างน้อย 0.75 หากสูงกว่า 0.90 ถือว่าดีมาก ค่า  $R^2$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ถ้าค่าเป็น 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใด ๆ ระหว่างตัวแปรตามและอิสระ แต่ถ้าค่าเป็น 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ (สุวดี และ ชลธิชา, 2015)

### 5.7 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean Square Error: MSE)

ในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่แท้จริงกับค่าที่ประมาณได้ สำหรับกลุ่มของ ตัวอย่าง เรามักจะใช้ค่าเฉลี่ยของ Error ในรูปของค่าเฉลี่ยของกำลังสองของ Error ในแต่ละคู่ เรียกว่า Mean Square Error (อิจฉรียา, 2547)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2$$

เมื่อ  $y_i$  คือ ค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากแบบจำลอง  
 $\bar{y}_i$  คือ ค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการสำรวจในสนาม  
 $n$  คือ จำนวนของกลุ่มตัวอย่าง

พหุ ประถมศึกษา

## 6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Larson et al., 2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในการถ่ายภาพเพื่อประมาณค่าของตะกอนแขวนลอย ซึ่งมีความละเอียดแต่ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่าการซื้อภาพถ่ายเทียม และใช้ระยะเวลาที่สั้น การศึกษานี้ได้ใช้เซ็นเซอร์มีชื่อว่า MicaSense Sequoia ที่มีค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น R G RE และ NIR ได้ถูกติดตั้งที่ตัวอากาศยานไร้คนขับ เพื่อทำถ่ายภาพตะกอนแขวนลอย ภายในแม่น้ำไนโอไฮโอประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเก็บตัวอย่างน้ำที่ช่วงความลึก 15, 61, 91 และ 182 ซม. จากระดับผิวน้ำ นำมาวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองจากแถบสีในการทำแผนที่ตะกอนแขวนลอย ผลการวิจัยพบว่าเซ็นเซอร์ MicaSense Sequoia มีประสิทธิภาพที่ไม่ค่อยดี เมื่อเทียบกับการวัดสเปกโตรไดอิเล็กทริกของสนาม ที่ความลึก 0 - 61 ซม. และ  $R^2_{adj}$  จะใกล้เคียงกันกับความลึก 0 - 91 ซม. ในขณะที่ความสัมพันธ์เมื่อเทียบค่าตะกอนแขวนลอยจากเครื่องมือเก็บตะกอนแขวนลอยไปทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ความลึก 182 ซม. จะไม่ค่อยตอบสนองต่อค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่นสีเขียว แต่ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น R และ NIR มีความสัมพันธ์ที่ดีกับตะกอนแขวนลอยที่ระดับความลึก 182 ซม. (0-182 ซม.)  $R^2_{adj} = 0.71$  ในขณะที่ข้อมูลสะท้อนของอากาศยานไร้คนขับที่ดีที่สุดความสัมพันธ์กับตะกอนแขวนลอย ที่ระดับความลึก 91 ซม. (0-91 ซม.)  $R^2_{adj} = 0.56$  นั้นหมายความว่าช่วงความลึกประมาณ 91 ซม. เป็นความลึกที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าตะกอนแขวนลอย ผลการวิจัยพบว่า UAV สามารถเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในด้านของการตรวจสอบ SSC ที่พื้นที่ถูกจำกัดในเรื่องของขนาดลำน้ำ

(Montanher et al., 2014) ศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองเพื่อการประเมินความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ Amazonian โดยใช้ Landsat 5 / TM ซึ่งการเก็บข้อมูลแม่น้ำ Amazonian ความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (SSC) จะวัดได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีขนาดพื้นที่ที่ใหญ่ จึงได้มีการใช้เทคนิคการรับรู้ระยะไกลเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์คุณภาพน้ำทั่วโลกซึ่งข้อมูลสำหรับการระบับจะถูกดึงข้อมูลได้มากที่สุด บทความนี้นำเสนอโมเดลเชิงประจักษ์สำหรับการค้นพบ SSC ในแม่น้ำของ Amazonian โดยใช้ข้อมูลสะท้อนแสงจาก Landsat 5 / TM แบบจำลองจะทำการถดถอยพหุคูณสำหรับชุดข้อมูลทั้งหมด (แบบจำลองส่วนกลาง,  $N = 504$ ) และชุดข้อมูลที่แบ่งตามกลุ่ม 5 กลุ่ม (แบบจำลองภูมิภาค) ที่กำหนดโดยคุณสมบัติทางธรณีวิทยาทั่วไปของกลุ่มน้ำ แบบจำลองใช้ VNIR และ SWIR 5 เป็นข้อมูลนำเข้า สำหรับแบบจำลองส่วนกลาง  $R^2$  ที่ปรับแล้วมีค่าเท่ากับ 0.76 ในขณะที่ค่า  $R^2$  ที่ปรับสำหรับภูมิภาคแตกต่างกันไปตั้งแต่ 0.77 ถึง 0.89 ค่านัยสำคัญทั้งหมด (p-value <0.0001)

ผลการวิจัยพบว่าทั้งความผิดพลาดเฉลี่ยของการประมาณค่าและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้นเมื่อช่วงของ SSC เพิ่มขึ้น แบบจำลองพื้นที่ที่กรณีศึกษามีความถูกต้องมากกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงของตัวอย่างน้ำที่สถานีสู่มตัวอย่างต่างๆ ผลลัพธ์ยืนยันความเป็นไปได้ในการประมาณค่า SSC จากข้อมูลชุด Landsat / TM ในช่วงปี 1980 และ 1990

(Pavelsky and Smith, 2009) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลกับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (SSC) โดยใช้การสะท้อนแสงของช่วงคลื่นที่ตาสามารถมองเห็นได้ (Red Green Blue, RGB) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared, NIR) โดยใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม SPOT และ ASTER ทำการสู่มตัวอย่างทั่วพื้นที่ศึกษาโดยใช้ข้อมูลสนามที่วัดได้จาก 30 จุด และภาพการสะท้อนจากดาวเทียม ASTER พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ติระหว่างความเร็วการไหล และค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น  $R^2 = 0.83$  และ  $0.84$  ตามลำดับ เป็นไปได้ที่จะประมาณความเร็วพื้นผิวอย่างน้อยที่สุดในเชิงคุณภาพจาก SSC ที่รับรู้จากระยะไกลแสดงเส้นโค้งการสะท้อนความเร็วสองเส้นที่สร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลสนามที่วัดได้จากการสู่มตัวอย่าง 30 จุดที่พื้นที่ศึกษาและการสะท้อนแสงทั้งหมดจากภาพ ASTER ที่เก็บรวบรวมไว้ในวันที่ 19 กรกฎาคม 2549 และวันที่ 13 กรกฎาคม 2550 ทั้งสองวันนี้ให้ค่าความสัมพันธ์ที่ติระหว่างความเร็ว และค่าการสะท้อนกลับ ( $R^2 = 0.83$  และ  $0.84$ ) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามรูปแบบการถดถอยเป็นแบบเส้นตรงในภาพ ASTER ปี 2549 นอกจากนี้ความแปรปรวนของขนาดตะกอนแขวนลอยอาจส่งผลต่อความสัมพันธ์ของ SSC และการแขวนลอยของตะกอนอาจแตกต่างกันไปตามปริมาณการปล่อยน้ำและความลึกของลำน้ำ

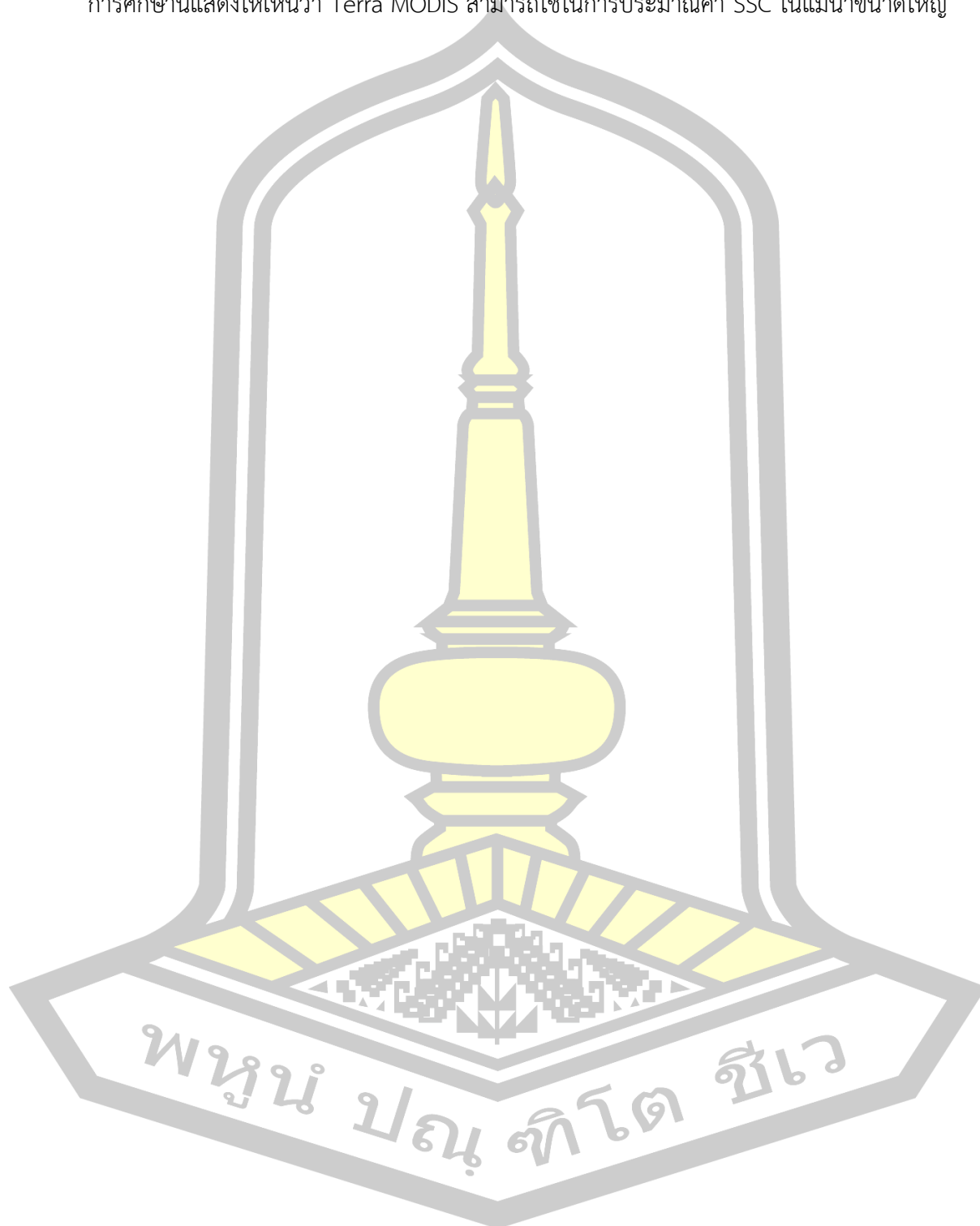
(Long and Pavelsky, 2013) ได้ศึกษาตะกอนแขวนลอยในทะเลสาบและพื้นที่ชุ่มน้ำที่จุดเชื่อมต่อในแม่น้ำ Lake Athabasca โดยการศึกษาครั้งนี้เราใช้ภาพถ่าย MODIS ที่มีความละเอียดภาพถ่าย 250 ม. ช่วงคลื่น (620–670 nm) และ (841–876 nm) เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนย้ายตะกอน และระบุความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (SSC) ทำการแบบจำลองการสะท้อนเราเปรียบเทียบกับสมการเชิงประจักษ์ 31 ชุด โดยใช้ชุดข้อมูลที่มีการสังเกตการณ์ SSC 147 ครั้งและการสะท้อนแสงในแหล่งกำเนิด ผลลัพธ์แนะนำว่ามีโอกาสสำหรับการถ่ายโอนเชิงพื้นที่ของแบบจำลองดังกล่าว แต่ความสำเร็จนั้นขึ้นอยู่กับสมการที่ตรงกับเกณฑ์บางประการ การใช้ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้กับช่วงคลื่นที่ตามองเห็น เพื่อระบุความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในพื้นที่ศึกษา โดยใช้สมการแบบไม่เชิงเส้น สร้างโมเดลการสะท้อนแสงแบบ SSC สามารถคาดการณ์ได้สูง (Spearman's  $\rho = 0.95$ ) ซึ่งตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ Lake Athabasca มีความเกี่ยวข้องอย่างชัดเจนกับการไหลในแม่น้ำ Athabasca นอกจากนี้เรายังติดตามการไหลบ่าเข้ามาของน้ำในแม่น้ำ Athabasca ไปยัง

ทะเลสาบของที่ราบน้ำท่วมถึงและในทะเลสาบสามแห่งระบุเกณฑ์การปล่อยที่แตกต่างกัน (1,040 m<sup>3</sup>/s, 1150 m<sup>3</sup>/s และ 1850 m<sup>3</sup>/s) ซึ่งทำให้เกิดการทับถมของตะกอนในทะเลสาบ

(Qu, 2014) ได้ทำการศึกษาวิธีการใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ ทำการทดลองสเปกตรัมในห้องปฏิบัติการเพื่อการตรวจสอบลักษณะการสะท้อนของน้ำที่ตกตะกอนและผลกระทบของตะกอนดินต่อการสะท้อนแสง ได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมการผสมสเปกตรัมโดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองเชิงเส้นแบบสเปกตรัมเพื่อประเมินความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยจากการสะท้อน พบว่าแบบจำลองที่ใช้อัลกอริทึมการผสมสเปกตรัมสามารถประเมินค่าความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ได้สูงถึง 20 g/l การสำรวจภาคสนามด้วยการวัดสเปกตรัมและการวัด ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ณ สถานที่ระหว่างแม่น้ำและอ่างเก็บน้ำ Sanmenxia บนแม่น้ำ ผลการยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย กับการสะท้อนกลับ รูปแบบเดียวถูกสร้างขึ้นเพื่อประเมินความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย โดยใช้การตั้งค่าของภาพ Landsat 7 (760-900 nm) ( $R^2 = 0.92$ ,  $RMSE = 0.241$  g / l) การประยุกต์ใช้วิธีการผสมสเปกตรัมในสถานที่พบว่าแบบจำลองที่ใช้ขั้นตอนวิธีการผสมสเปกตรัมทำได้ดีกว่าแบบจำลองเลขกลุ่มเดียว ( $R^2 = 0.86$ ,  $RMSE = 0.280$  g / l) แต่เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานดีขึ้นจาก 1.99 g / l เป็น 347 g / l ขั้นตอนวิธีการผสมสเปกตรัมถูกนำมาใช้กับข้อมูล Landsat-7 ETM + สำหรับการตรวจจับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ในแม่น้ำ สำหรับการสอบเทียบและการตรวจสอบพบว่าความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ทุกวันที่วัดโดยระบบการตรวจสอบทางอุทกวิทยาของแม่น้ำเกี่ยวข้องกับภาพ Landsat-7 ETM + ในช่วงปี 2542 ถึง พ.ศ. 2553 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบตามขั้นตอนการผสมสเปกตรัมอาจได้รับความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มมากขึ้น  $R = 0.71$  ระหว่างความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย และการสะท้อนกลับมากกว่าการถดถอยแบบเดิมของวงโคจรเฉพาะ ( $\max R = 0.62$ ) การศึกษาครั้งนี้มีวิธีการวัดระยะไกลเพื่อประเมินความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ด้วยพารามิเตอร์ที่พร้อมสำหรับการใช้งานสำหรับการใช้ภาพถ่าย Landsat-7 ETM + ในแม่น้ำนอกจากนี้ยังสามารถให้การอ้างอิงสเปกตรัมสำหรับความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยในระยะไกลในแม่น้ำในประเทศที่มีเขื่อนสูงอื่น ๆ

(Wang and Lu, 2010) ได้ใช้การสำรวจระยะไกลศึกษาความขุ่นที่แม่น้ำแยงซี โดยใช้ดาวเทียม Landsat TM / ETM + Band 4 เป็นตัวบ่งชี้ SSC สเปกตรัมสำหรับ Yangtze แต่ข้อจำกัดในการแก้ปัญหาชั่วคราวบทความนี้นำเสนอวิธีการประเมิน SSC ของ Jiujiang โดยใช้ข้อมูลดาวเทียมอนุกรมเวลาของ Terra MODIS ความละเอียดสูง พบว่า band ที่ 2 และ band ที่ 5 สามารถให้การประเมิน SSC ที่แม่นยำ หลังจากการตรวจสอบความถูกต้องของข้อผิดพลาดค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์สัมพัทธ์

(ARE) และค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาด (RMSE) อยู่ในระดับต่ำ (เช่น 25.5% และ 36.5% ตามลำดับ) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า Terra MODIS สามารถใช้ในการประมาณค่า SSC ในแม่น้ำขนาดใหญ่





### บทที่ 3

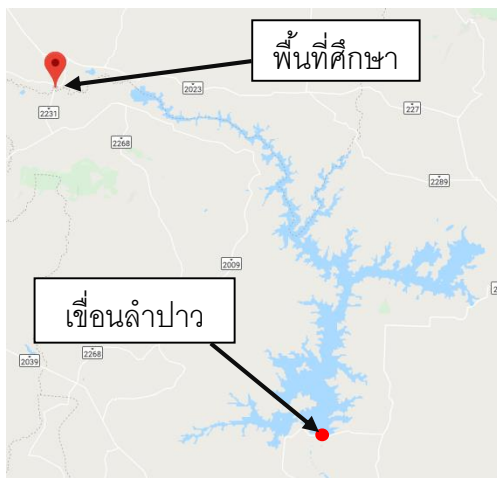
#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในลำน้ำป่าว สะพานบ้านนาหมู - บ้านท่าโฮ เป็นสะพานแขงเขตระหว่างอำเภอศรีธาตุ จังหวัดอุดรธานี และอำเภอท่าคันโท จังหวัดกาฬสินธุ์ มีความกว้างของลำน้ำประมาณ 45 เมตร ยาวประมาณ 400 เมตร อยู่ที่พิกัด  $16^{\circ}57'06.00''$  เหนือ และ  $103^{\circ}10'4.00''$  ตะวันออก เป็นทางเชื่อมต่อระหว่างจังหวัดอุดรธานี และจังหวัดกาฬสินธุ์ โดยลำน้ำป่าวเป็นลำน้ำสาขาหนึ่งของลำน้ำชี มีต้นน้ำอยู่ที่ อ.หนองหาร อ.กุมภวาปี ไหลผ่าน อ.ศรีธาตุ อ.วังสามหมอ อ.ท่าคันโท อ.หนองกุงศรี จังหวัดกาฬสินธุ์ ลงมาที่เขื่อนลำปาว ดังแสดงในภาพที่ 23

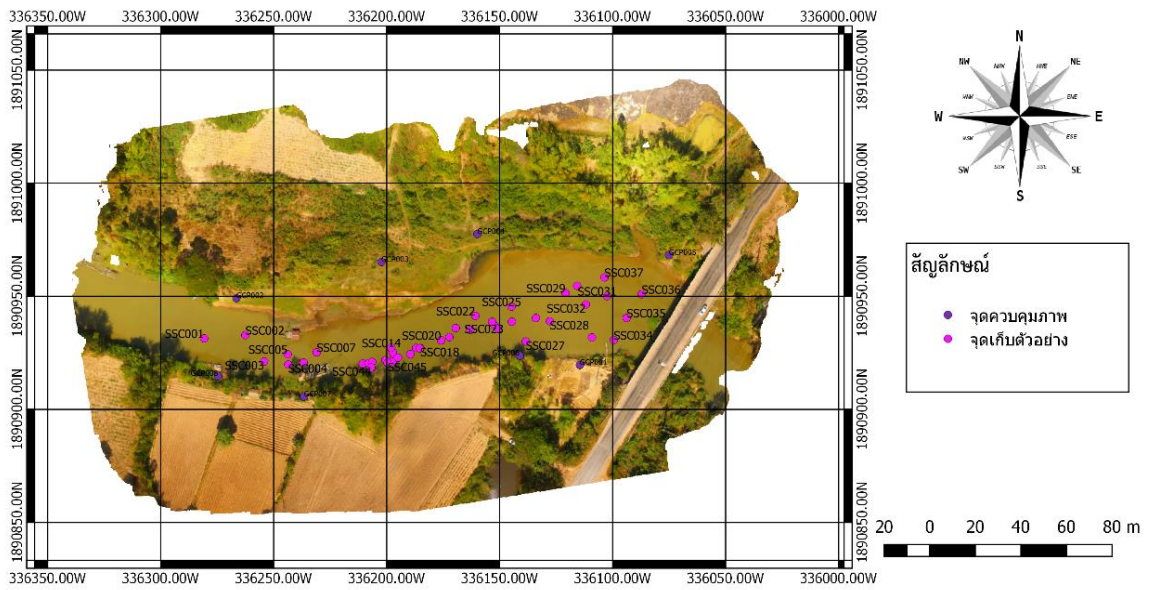


ภาพที่ 23 แสดงจุดเก็บข้อมูล



ภาพที่ 24 ขยายพื้นที่จุดเก็บข้อมูล

ภาพที่ 25 ขยายพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 26 แผนที่แสดงจุดควบคุมภาพถ่าย และตำแหน่งการเก็บตะกอนแขวนลอย

### 3.2 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับในส่วนของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในภาคสนาม และ อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในประมวลผลข้อมูล

#### 3.2.1. อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในภาคสนาม

1. Drone DJI Phantom 3 Advance (Sensor R, G, B)
2. หมุดไม้ (Wooden Pins) ขนาด 5 x 5 x 15 เซนติเมตร
3. โทรศัพท์มือถือ สมาร์ทโฟน ทั้งระบบปฏิบัติการ iOS และ Android
4. แอปพลิเคชัน Handy GPS ใช้ในการบอกตำแหน่งที่ทำการศึกษา
5. ตลับเมตร (Measuring Tape)
6. กล้องสำรวจประมวลผลรวม (Total Station) พร้อมขาตั้งกล้อง
7. ชุดเป้าปริซึม (Prism) พร้อมขาตั้งอลูมิเนียม
8. เรือพร้อมไม้พาย
9. ขวดพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร
10. เป้าจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน ทำจากผ้าไวเนล 2 สีสลับกันเป็นตารางหมากรุกขนาด 1x1 เมตร
11. วอคกี้ ทอคกี้ วิทยุสื่อสารพกพา
12. เครื่องมือปรับเทียบการสะท้อนของแสง
13. แผ่นโฟม ขนาด 30 x 40 x 30 เซนติเมตร
14. ที่ปั้มน้ำ (แบบบีบ) พร้อมสายยาง
15. แอปพลิเคชัน PIX4D Capture
16. ค้อน (Hammer)

#### 3.2.2. อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในประมวลผลข้อมูล

1. คอมพิวเตอร์ (Computer) หรือโน้ตบุ๊ก (Notebook) สำหรับประมวลผลโดยใช้ระบบปฏิบัติการ Windows10 Ram อย่างน้อย 4 GB การ์ดจออย่างน้อย 1 GB พร้อมติดตั้งโปรแกรม Agisoft PhotoScan Professional, โปรแกรม Qgis 2.18 และ โปรแกรม Rapid Miner Studio
2. กระดาษกรอง (Filter Paper) GF/C เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
3. โถดูดความชื้น (Desiccator)
4. เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum Pump)
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
6. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel) เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
7. เตาอบ (Hot Air Oven)
8. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)

9. ปีกเกอร์ (Beaker) 100 มิลลิลิตร
10. กระบอกตวง (Cylinder) 100 มิลลิลิตร
11. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) 1000 มิลลิลิตร
12. ปากคีบ (Forceps)
13. ขวดฉีดน้ำกลั่น (Wash Bottle)
14. ถุงมือกันความร้อน (Heat Resistant Gloves)

### 3.3 การเก็บข้อมูลสนาม

ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ การบินถ่ายภาพ และการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณตะกอนแขวนลอย

#### 3.3.1 การบินถ่ายภาพ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCPs) ให้มีค่าพิกัด และค่าระดับ โดยกำหนดให้ตำแหน่งพิกัดจุดควบคุมภาพ จะกระจายอยู่ในพื้นที่อย่างน้อย 8 จุด

2. การวางแผนการบินถ่ายภาพด้วยอากาศจากอากาศยานไร้คนบิน Phantom 3 Advanced ทำการวางแผนการบินด้วย Application PIX4D บนระบบปฏิบัติการ Android กำหนดความสูงของการบิน เท่ากับ 90 เมตร ทำการถ่ายภาพให้มีระยะซ้อนด้านหน้า 80% และระยะซ้อนด้านข้าง 60 %

3. เลือกทำการการบินถ่ายภาพ ในวันที่สภาพอากาศดี อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส ความเร็วลมไม่เกิน 5 กม.ต่อชั่วโมง มีทัศนวิสัยในการมองเห็นสูง

#### 3.3.2 การเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณตะกอนแขวนลอย (SSCs)

เพื่อให้ได้ตัวอย่างของตัวแทนของตะกอนแขวนลอยที่ไหลในลำน้ำ มีหลักเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอยดังนี้

1. ให้น้ำไหลเข้าเครื่องมือตัวอย่างด้วยความเร็วเดียวกันกับความเร็วของกระแสน้ำโดยรอบ
2. เลือกตำแหน่งเก็บตัวอย่างน้ำ ในลำน้ำที่ค่อนข้างตรง และมีความลึกเพียงพอที่จะทำการเก็บตัวอย่าง หลีกเลี่ยงบริเวณที่ท้องน้ำไม่สม่ำเสมอหรือคดเคี้ยว และให้ห่างไปจากท้ายบริเวณที่ลำน้ำสาขาไหลมาบรรจบเพื่อให้ตะกอนผสมเข้ากันได้ดี

3. การบรรจุตัวอย่างควรให้เต็มถึงระยะประมาณ 5 ซม. จากปากขวด (ที่คอขวด) หากบรรจุจนล้นหรือบรรจุได้น้อยเกินไปควรเก็บตัวอย่างใหม่

4. อย่าให้เครื่องมือเก็บตัวอย่างกระแทกท้องน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในลำน้ำที่ท้องน้ำเป็นทรายหรืออ่อนนุ่ม อาจกระทบกระเทือนตะกอนท้องน้ำจนทำให้ค่าตะกอนแขวนลอยผิดพลาดได้

5. ลดการรบกวนต่อการไหลของน้ำให้น้อยที่สุด

### 3.4 การวิเคราะห์ในห้องทดลอง

ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างตะกอนแขวนลอยในห้องทดลองโดยการหาความเข้มข้นโดยน้ำหนักของตะกอนแขวนลอยกับน้ำหนักของส่วนผสมน้ำ-ตะกอน ซึ่งความเข้มข้นของตัวอย่างตะกอนหาโดยวิธีการกรอง (filtration) ดังนี้

1. อบกระดาษกรองให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 –105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนัก (B) เก็บกระดาษกรองไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) จนกว่าจะใช้ทดลอง
2. วางกระดาษกรองลงในกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel) ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ
3. ใช้น้ำกลั่นฉีดกระดาษกรองให้เปียกแล้วเปิดเครื่องดูดอากาศ เพื่อให้กระดาษกรองแนบติดกับกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel)
4. ตวงปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว 50 มิลลิลิตร แล้วเทน้ำตัวอย่างลงในกรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner Funnel) และ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศจนน้ำแห้ง แล้วล้างเครื่องกรองด้วยน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที
5. เมื่อแห้งแล้วนำกระดาษกรองออกวางในภาชนะเดิม (อาจใช้ถ้วยระเหยหรือกระดาษอลูมิเนียมก็ได้) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 –105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) และชั่งน้ำหนัก (A)

$$\text{การคำนวณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)} = \frac{(A - B) \times 10^6}{\text{Volume (ml)}}$$

เมื่อ A = น้ำหนักของกระดาษกรองและของแข็งแขวนลอย (กรัม)

B = น้ำหนักของกระดาษกรอง (กรัม)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

### 3.5 คุณสมบัติกล้องที่ใช้ในการศึกษา (sensor)

ในการศึกษานี้ใช้กล้อง 2 ชนิด คือ

1. กล้อง Survey3W (Red+Green+NIR) มีความละเอียดจุดภาพ 12 ล้านพิกเซล HFOV 87° (19mm) f/2.8 มีตัวรับสัญญาณ USB GPS ภายนอกเพื่อให้ภาพที่ถ่ายมีค่าพิกัด โดยกล้อง Survey3W ให้ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละช่วงคลื่น คือ Near Infrared เท่ากับ 850 nm Red เท่ากับ 660 nm และ Green เท่ากับ 550 nm

2. กล้องที่ติดตั้งบน Phantom 3 Advanced มีความละเอียด 12 ล้านพิกเซล FOV 94° 20 มิลลิเมตร (เทียบเท่ากับ 35 มิลลิเมตร) f/2.8 ให้ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละช่วงคลื่น คือ Red เท่ากับ 660 nm Green เท่ากับ 550 nm และ BLUE เท่ากับ 475 nm

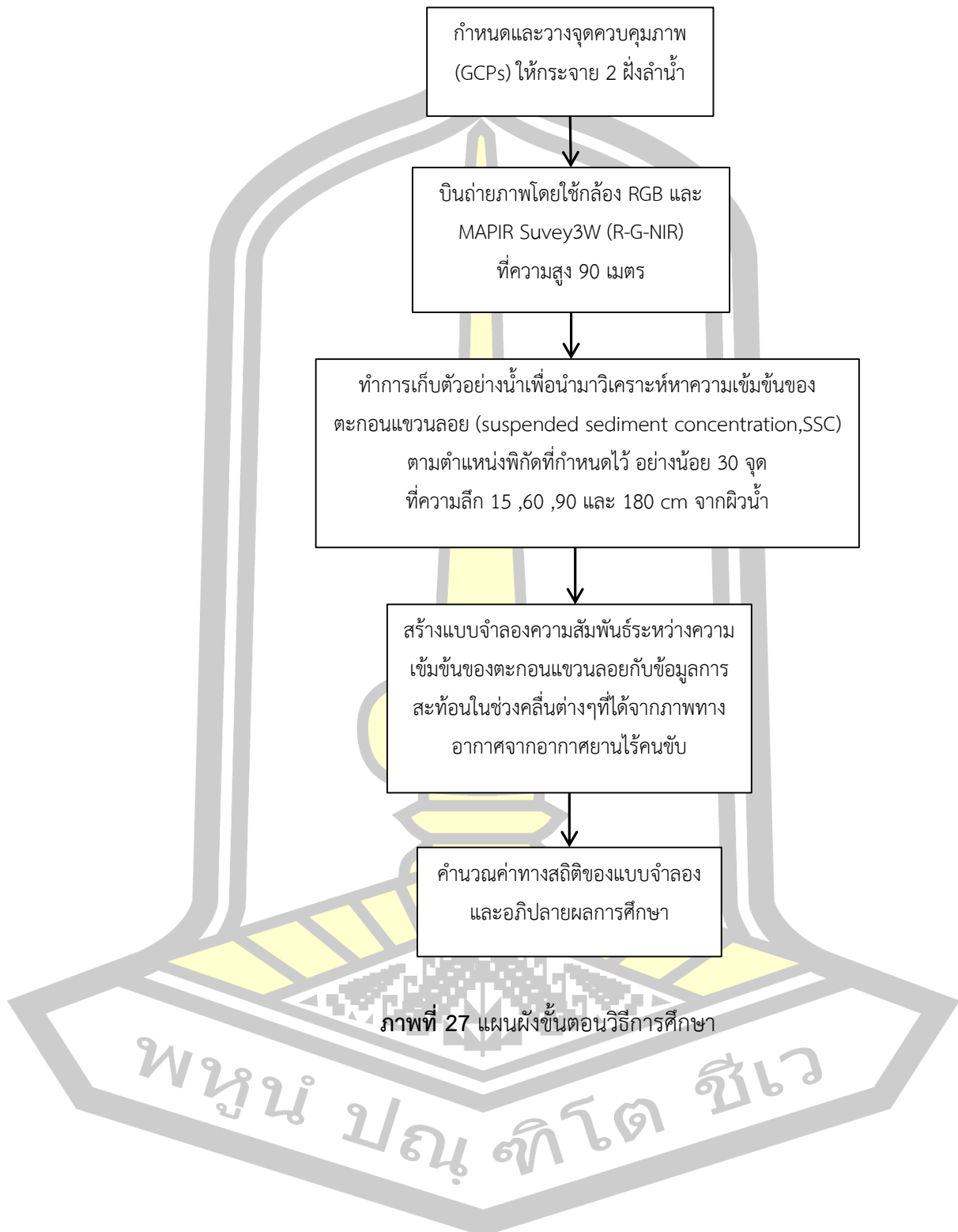
### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

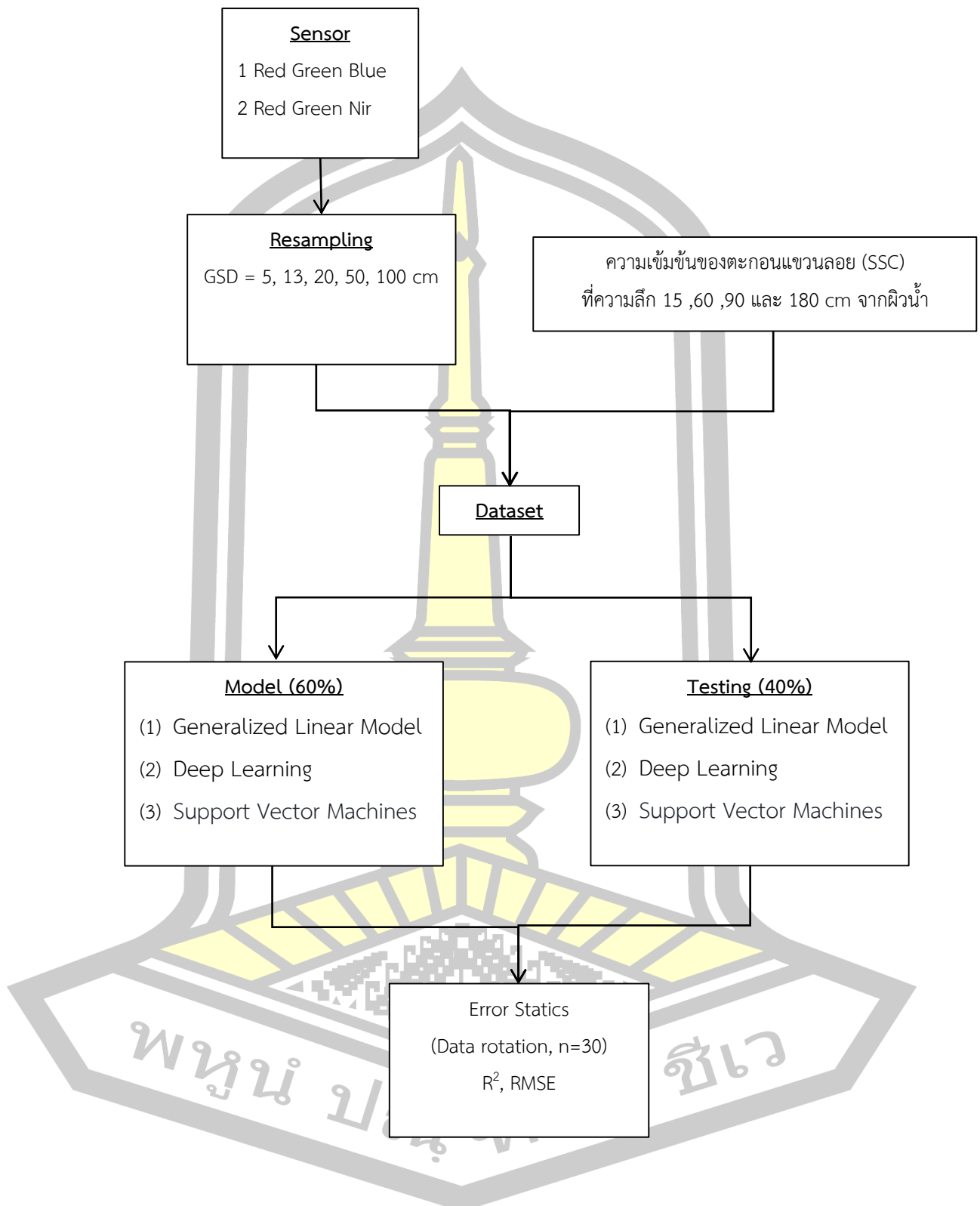
ข้อมูลการสะท้อนแสงจากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ถูกนำมาใช้ในแบบจำลอง ประกอบด้วย 1) ค่าการสะท้อนแสงแบนด์เดี่ยว 2) อัตราส่วนของค่าการสะท้อนแสงเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของตะกอนที่ความลึก 15, 60, 90 และ 180 เซนติเมตร จากผิวน้ำ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ประกอบด้วย

วิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยตัวแปรเดียว (Generalized Linear Model: GLM) แบบเส้นตรง (Linear Function) การประมาณค่า แบบไม่ใช้พารามิเตอร์ (Non Parametric) โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep Learning) และ ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines: SVM)

ทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยทำการแบ่งข้อมูลสนามออกเป็น 2 ชุด คือ Training Data และ Testing Data แบบ Split Half และทำ Data Rotation 30 ครั้ง จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และ ค่า RMSE ของแต่ละครั้ง และทำการตรวจสอบความแตกต่างทางสถิติในระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังภาพที่ 27 และภาพที่ 28

พหุ ประถมศึกษา





ภาพที่ 28 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายจาก UAV



## 3.7 แผนการศึกษา

ลำดับ	กิจกรรม	ระยะเวลา (สัปดาห์)	สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	ปรึกษาหัวข้อวิจัยกับอาจารย์ที่ปรึกษา		■	■	■																	
2	จัดทำ TS1 เพื่อขออนุมัติชื่อเรื่อง และ แต่งตั้งอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์					■	■	■	■													
3	จัดทำ บทที่ 1, 2, 3					■	■	■	■	■	■	■	■									
4	จัดทำ แบบขออนุมัติสอบเค้าโครง วิทยานิพนธ์ TS2													■	■	■	■					
5	สอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ (วันที่ 13 ธันวาคม 2561)																	■				
6	แก้ไขวิทยานิพนธ์																		■	■	■	
7	ส่งรายงานผลการสอบเค้าโครงและ ส่งวิทยานิพนธ์ ฉบับแก้ไข TS3																				■	

ตารางที่ 3 แผนการดำเนินงานศึกษา ปี2561

ลำดับ	กิจกรรม	ระยะเวลา (สัปดาห์)	มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
8	เก็บข้อมูลภาคสนาม		■	■	■																	
9	วิเคราะห์ผลการทดลอง					■	■	■	■													
10	จัดทำ บทที่ 4, 5					■	■	■	■	■	■	■	■									
11	ส่งแบบขออนุมัติสอบวิทยานิพนธ์ TS4									■	■	■	■									
12	สอบวิทยานิพนธ์ (ช่วงวันที่ 4-15 มีนาคม 2562)													■	■	■	■					
13	แก้ไขวิทยานิพนธ์														■	■	■					
14	ส่งรายงานผลการสอบ และ ส่งวิทยานิพนธ์ ฉบับแก้ไข TS5																		■	■	■	
13	ส่งบทความวิจัยวิทยานิพนธ์ TS6																			■	■	
15	ส่งรายงานความก้าวหน้าการทำ วิทยานิพนธ์																			■	■	

ตารางที่ 4 แผนการดำเนินงานศึกษา ปี2562

## 3.8 งบประมาณ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา/หน่วย (บาท)	รวม (บาท)
1	ค่าจ้างเรือเก็บตัวอย่างตะกอน	1	เหมา	500	500
2	การสำรวจด้วย UAV	1	เหมา	5000	5000
2	ขวดเก็บตัวอย่าง	400	ขวด	4	1600
3	อุปกรณ์เก็บตัวอย่าง	1	ชุด	1500	1500
4	กระดาษกรอง	1	ชุด	4000	4000
5	ค่ากระดาษ	1	เหมา	400	400
6	ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด	1	เหมา	2000	2000
	รวม				15000

ตารางที่ 5 ตารางแสดงงบประมาณในงานวิทยานิพนธ์



## บทที่ 4

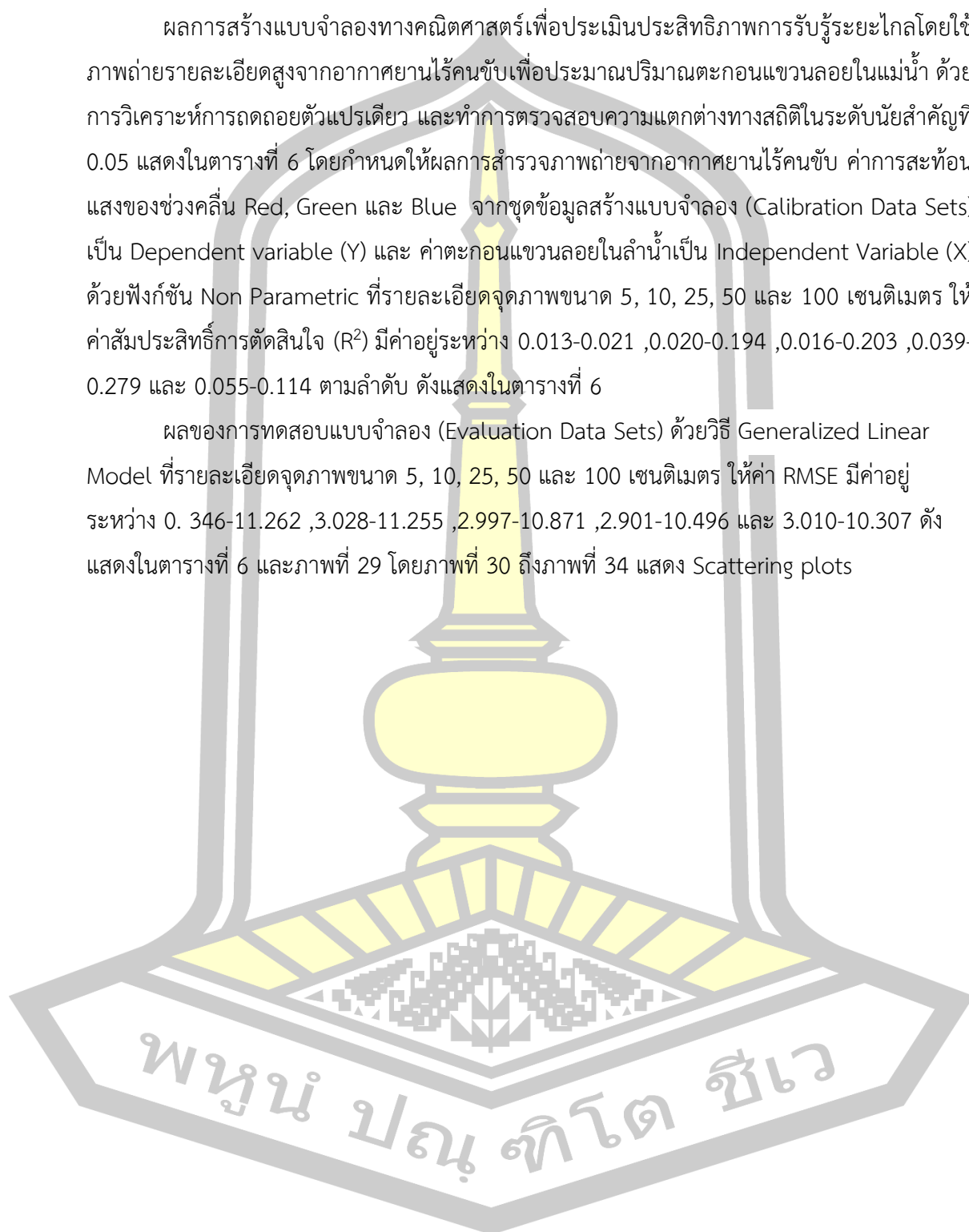
### ผลการศึกษา

จากการสำรวจภาคสนามโดยใช้ภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยใช้รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment concentration, SCC) ที่ความลึก 15, 60, 90 และ 180 เซนติเมตร จากระดับผิวน้ำ เพื่อหาค่าตะกอนแขวนลอยจากห้องปฏิบัติการ โดยค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Red, Green และ Blue จากพื้นที่ศึกษาที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยตัวแปรเดียว (Generalized Linear Model: GLM) แบบเส้นตรง (Linear Function) การประมาณค่า แบบไม่ใช้พารามิเตอร์ (Non Parametric) โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep Learning) และ ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines: SVM) ร่วมกับข้อมูลความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย ที่ได้จากภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ซึ่งข้อมูลจากภาพถ่ายภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) จะประกอบไปด้วยกล้องที่ติดตั้งบน Phantom 3 Advanced มี ให้ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละช่วงคลื่น คือ Red เท่ากับ 660 nm Green เท่ากับ 550 nm และ BLUE เท่ากับ 475 nm และกล้อง Survey3W ให้ค่าการสะท้อนแสงในแต่ละช่วงคลื่น คือ Near Infrared เท่ากับ 850 nm Red เท่ากับ 660 nm และ Green เท่ากับ 550 nm ในช่วงคลื่น ของจุดภาพที่มีค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ตรงกันกับค่าพิกัดภูมิศาสตร์ของพื้นที่ศึกษาและทำการแปลงข้อมูลภาพที่ได้ให้เป็นข้อมูลความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยที่เหมาะสม เพื่อหาความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย (suspended sediment concentration, SCC) ในลำน้ำจากภาคสนาม ทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Calibration Data Sets) จำนวน 60% และกลุ่มข้อมูลในการทดสอบแบบจำลอง (Evaluation Data Sets) จำนวน 40% กลุ่มข้อมูล โดยแต่ละแบบจำลองจะถูกคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) และทำการประเมินความน่าเชื่อถือ ทางสถิติของแบบจำลอง โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ของแต่ละครั้ง และทำการตรวจสอบความแตกต่างทางสถิติในระดับนัยสำคัญที่ 0.05

#### 4.1. ผลการประมาณค่า SSC ด้วยวิธี Generalized Linear Model: GLM

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับรู้ระยะไกลโดยใช้ภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยตัวแปรเดียว และทำการตรวจสอบความแตกต่างทางสถิติในระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงในตารางที่ 6 โดยกำหนดให้ผลการสำรวจภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Red, Green และ Blue จากชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง (Calibration Data Sets) เป็น Dependent variable (Y) และ ค่าตะกอนแขวนลอยในลำน้ำเป็น Independent Variable (X) ด้วยฟังก์ชัน Non Parametric ที่รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.013-0.021 ,0.020-0.194 ,0.016-0.203 ,0.039-0.279 และ 0.055-0.114 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6

ผลของการทดสอบแบบจำลอง (Evaluation Data Sets) ด้วยวิธี Generalized Linear Model ที่รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร ให้ค่า RMSE มีค่าอยู่ระหว่าง 0.346-11.262 ,3.028-11.255 ,2.997-10.871 ,2.901-10.496 และ 3.010-10.307 ดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 29 โดยภาพที่ 30 ถึงภาพที่ 34 แสดง Scattering plots

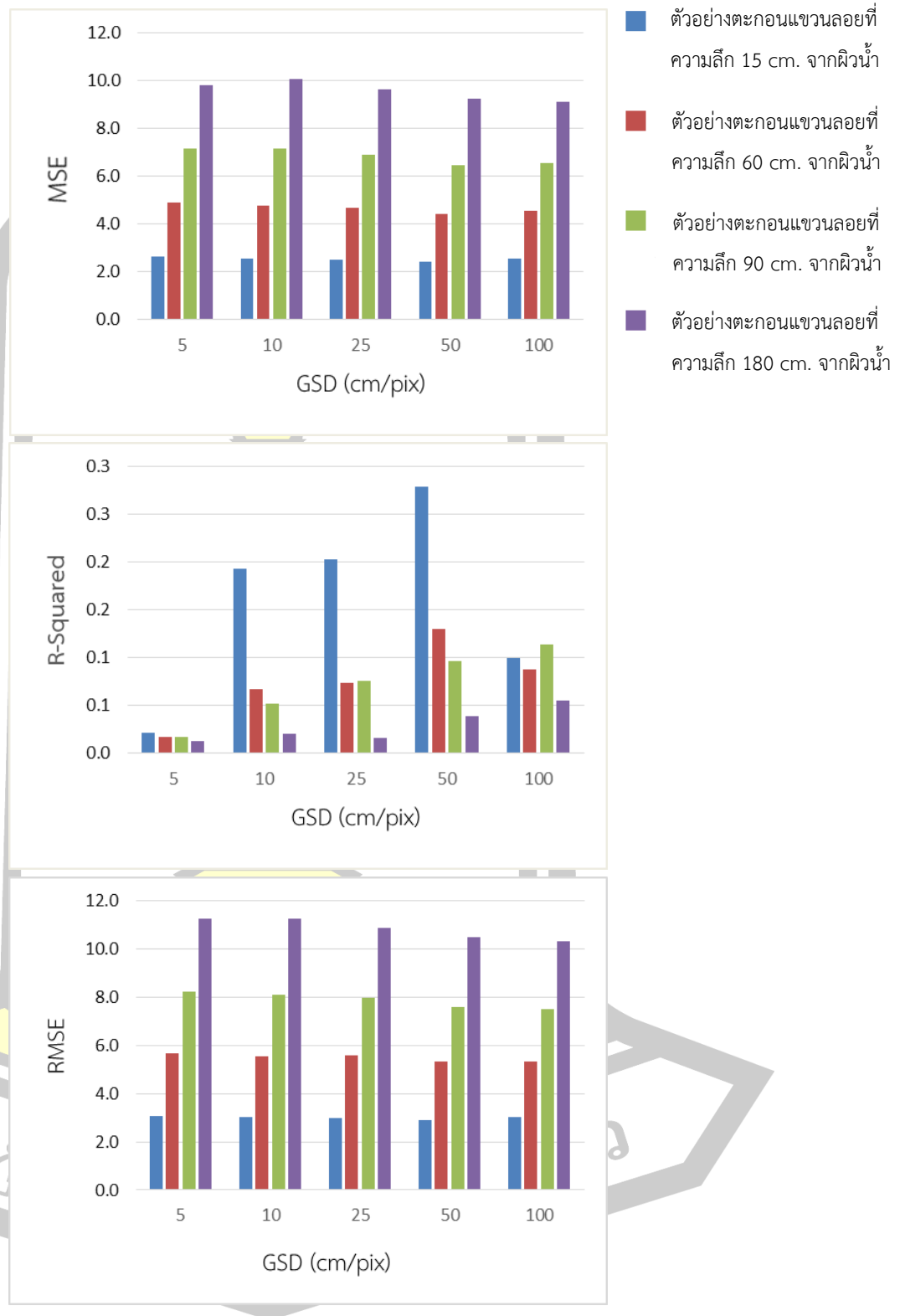


MSE (GLM)					
Pixel ความลึก	5cm	10cm	25cm	50cm	100cm
0-15 cm.	2.627	2.572	2.516	2.421	2.544
0-60 cm.	4.902	4.762	4.682	4.412	4.546
0-90 cm.	7.156	7.168	6.902	6.466	6.547
0-180 cm.	9.825	10.073	9.657	9.229	9.108

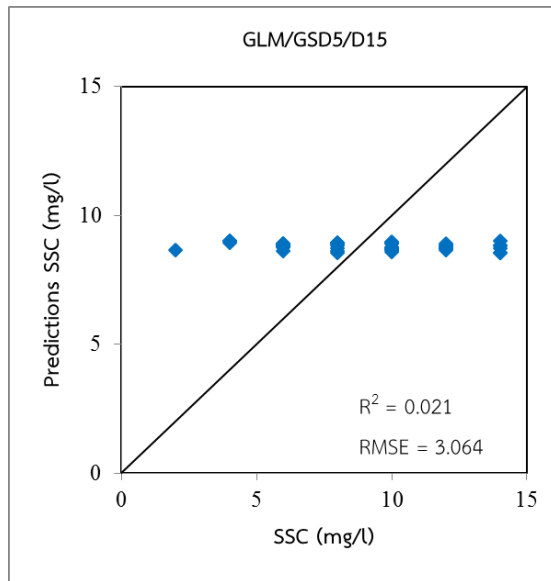
R <sup>2</sup> (GLM)					
Pixel ความลึก	5cm	10cm	25cm	50cm	100cm
0-15 cm.	0.021	0.194	0.203	0.279	0.100
0-60 cm.	0.017	0.067	0.074	0.130	0.088
0-90 cm.	0.017	0.052	0.076	0.097	0.114
0-180 cm.	0.013	0.020	0.016	0.039	0.055

RMSE (GLM)					
Pixel ความลึก	5cm	10cm	25cm	50cm	100cm
0-15 cm.	3.064	3.028	2.997	2.901	3.010
0-60 cm.	5.673	5.531	5.573	5.333	5.321
0-90 cm.	8.229	8.120	7.983	7.587	7.526
0-180 cm.	11.362	11.255	10.871	10.496	10.307

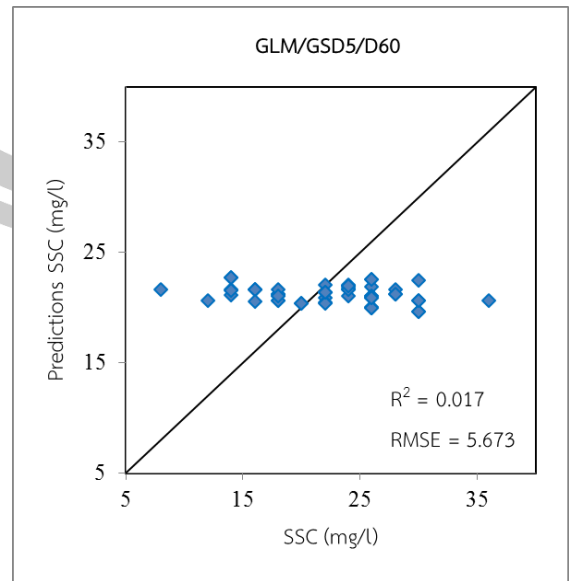
ตารางที่ 6 ผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Generalized Linear Model: GLM



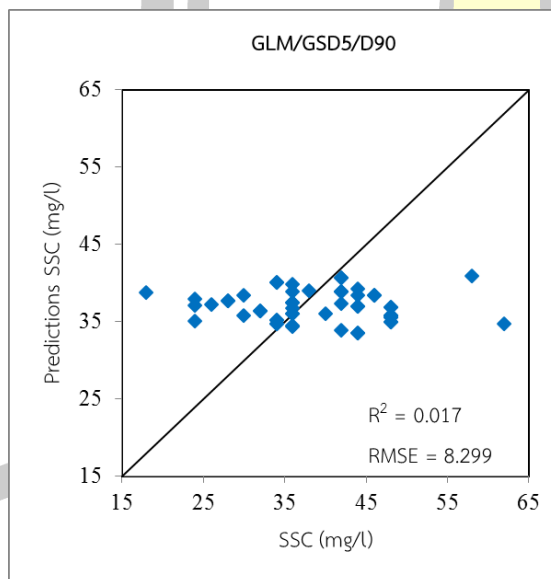
ภาพที่ 29 กราฟผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Generalized Linear Model: GLM



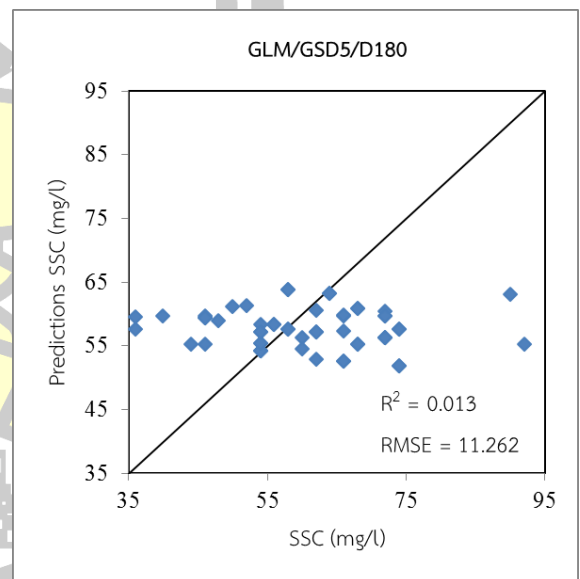
(a)



(b)

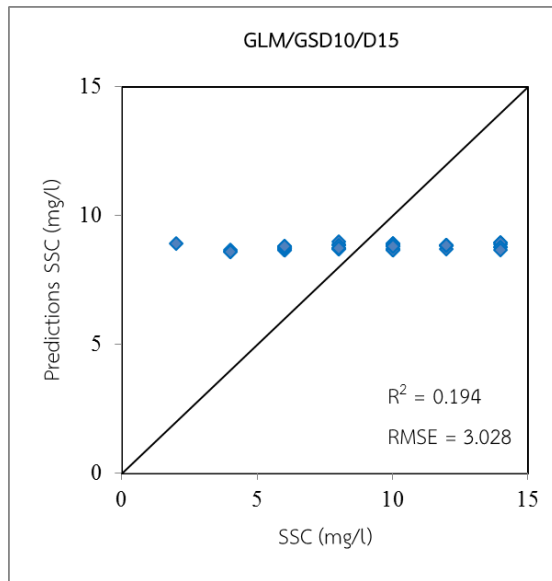


(c)

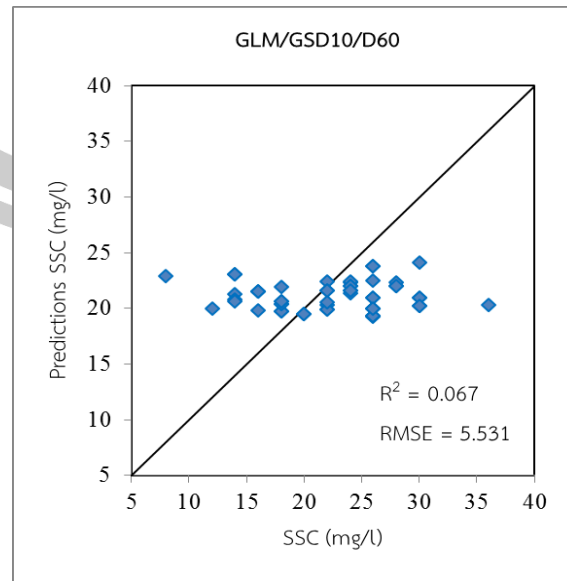


(d)

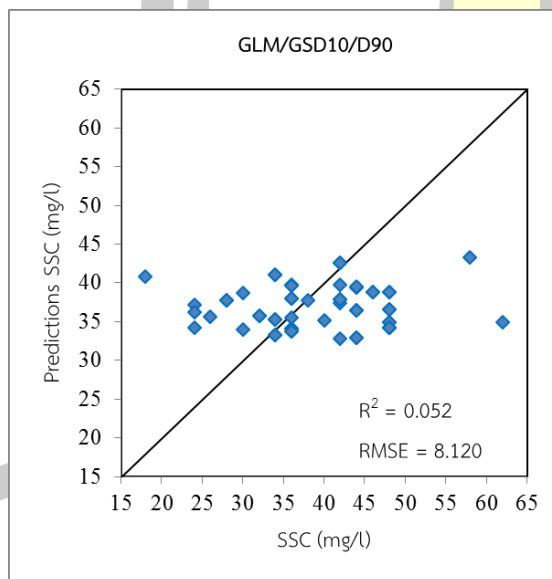
ภาพที่ 30 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 5 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM



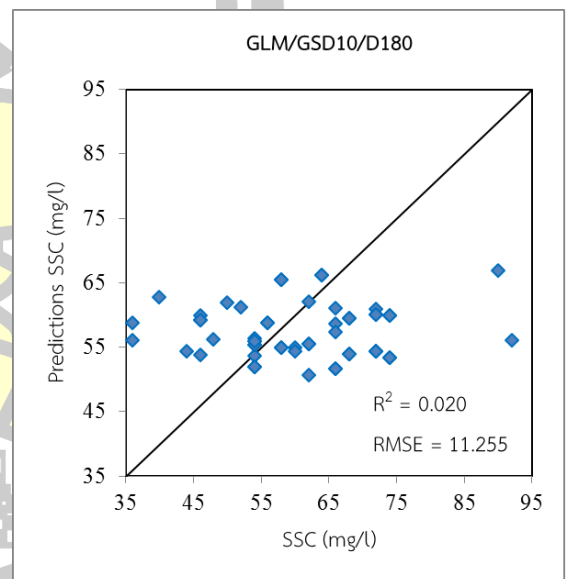
(a)



(b)



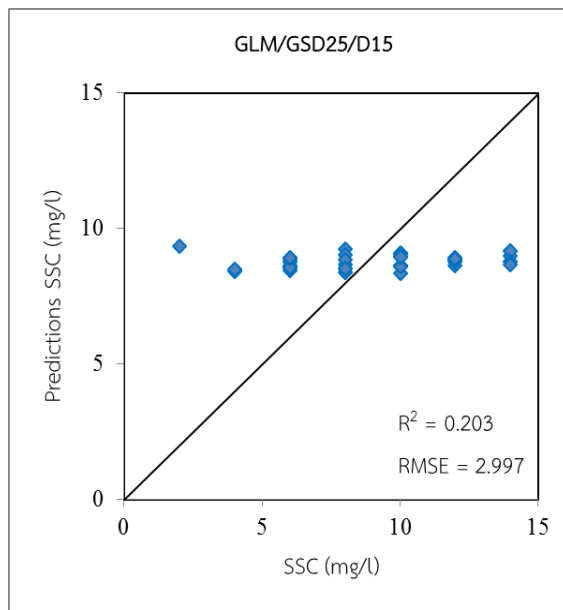
(c)



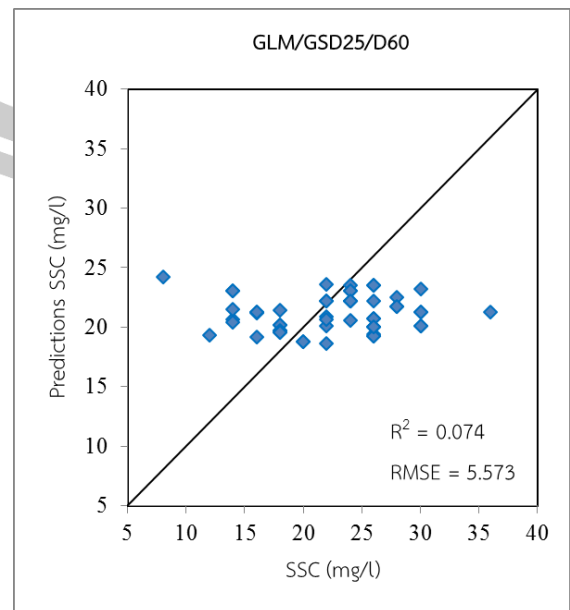
(d)

ภาพที่ 31 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 10 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM

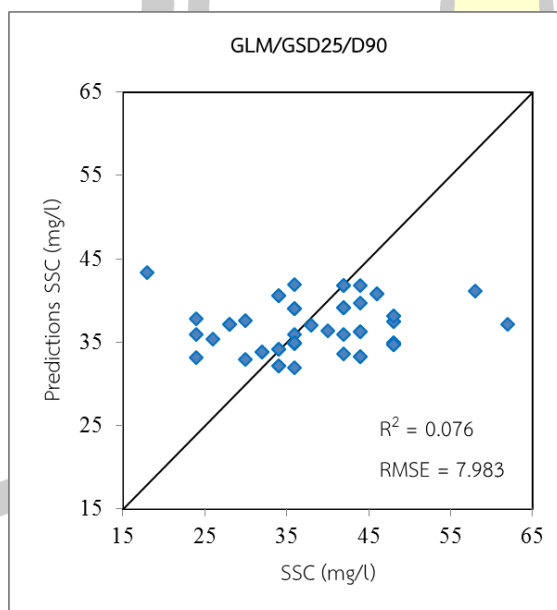




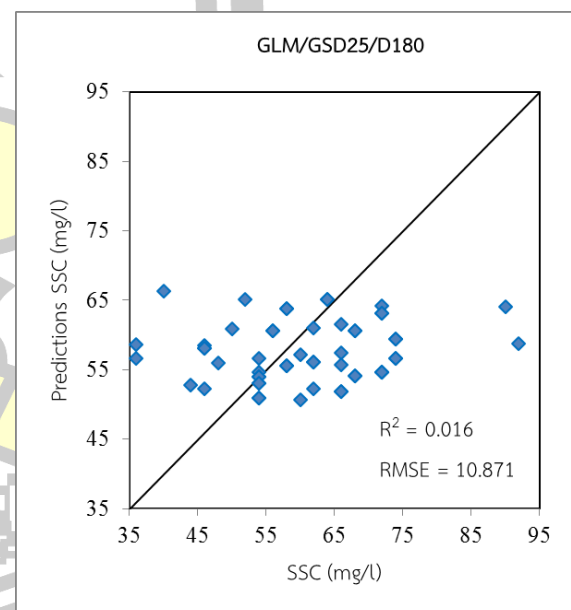
(a)



(b)

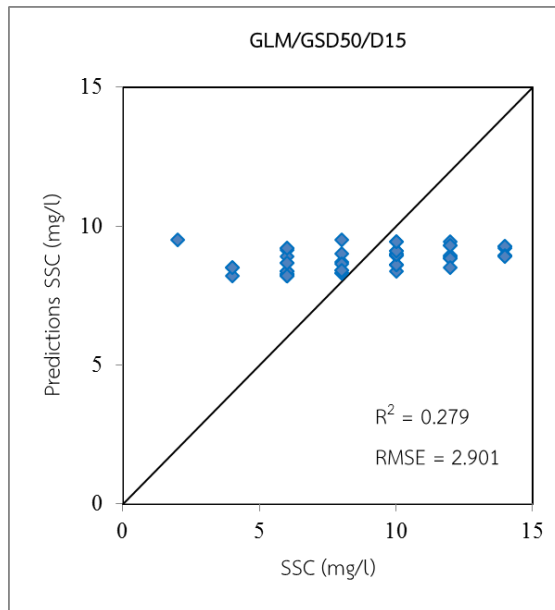


(c)

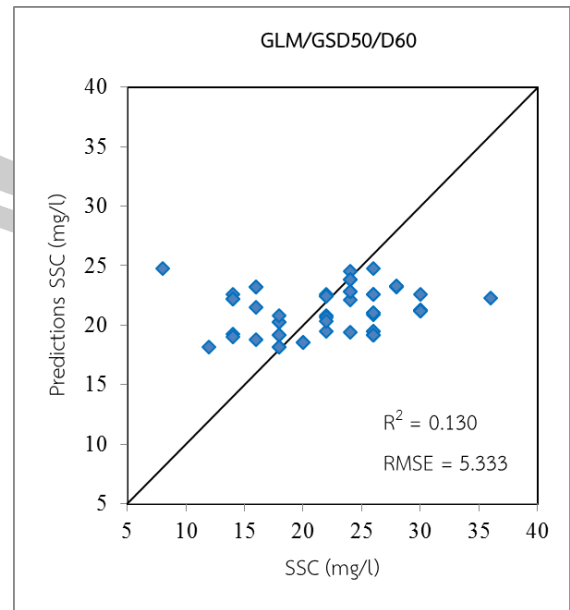


(d)

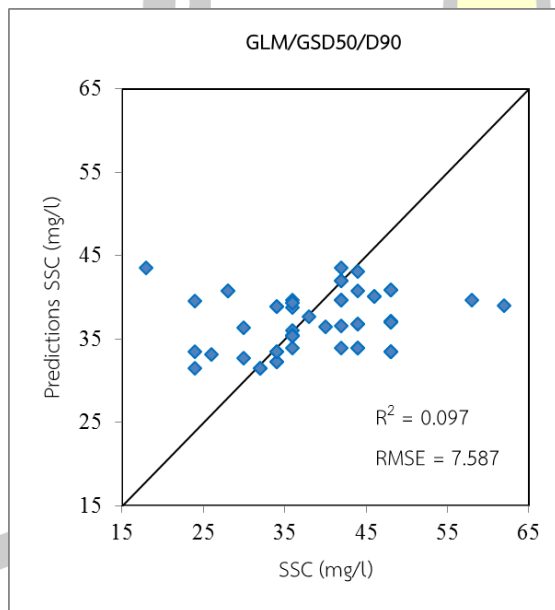
ภาพที่ 32 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 25 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM



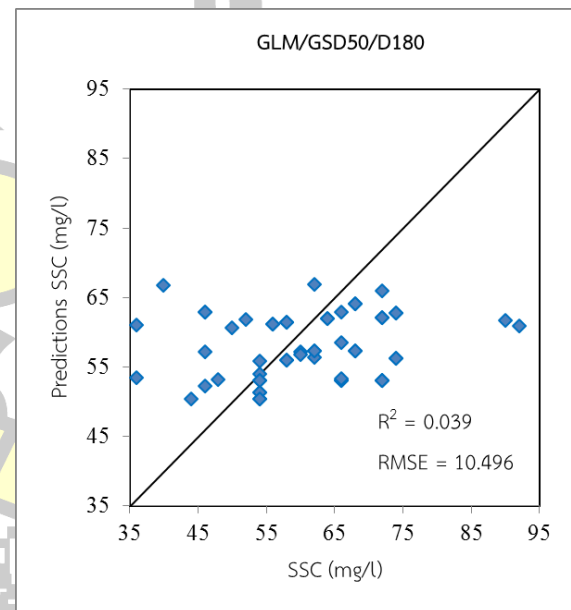
(a)



(b)

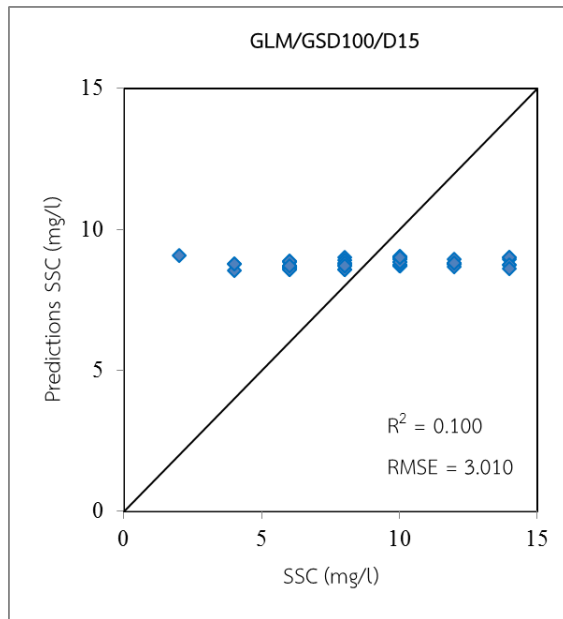


(c)

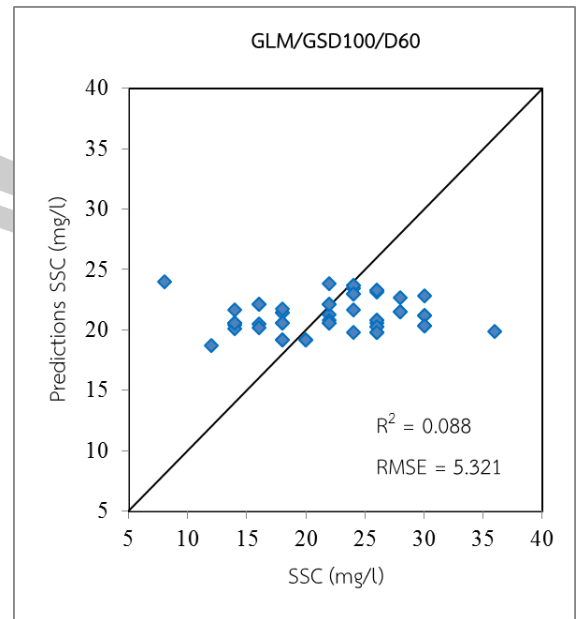


(d)

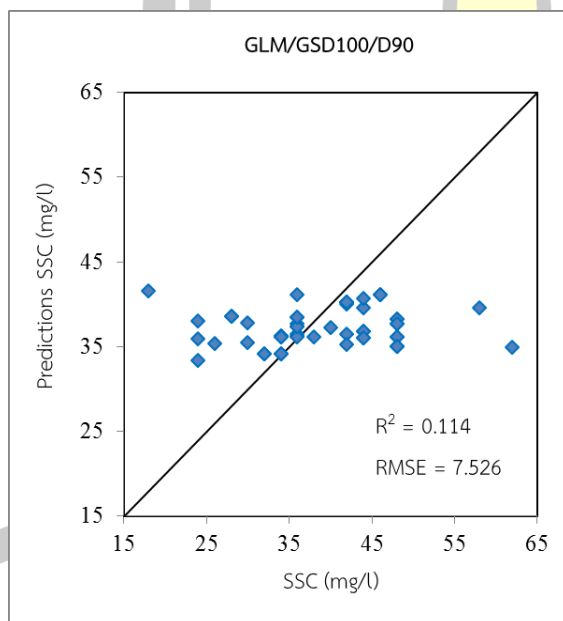
ภาพที่ 33 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 50 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM



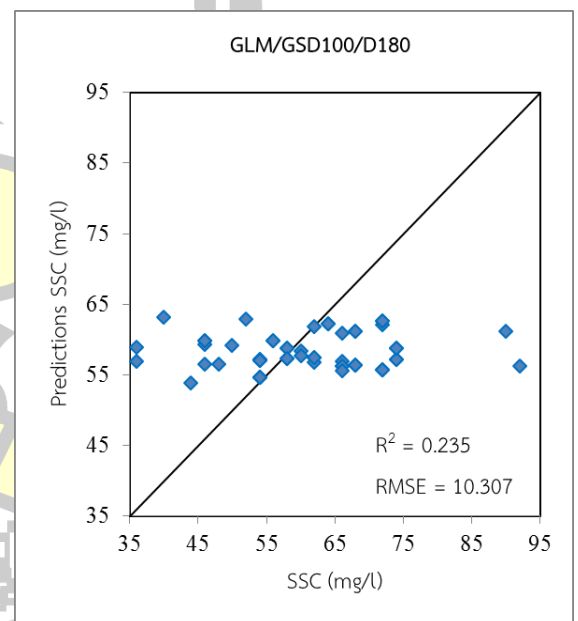
(a)



(b)



(c)



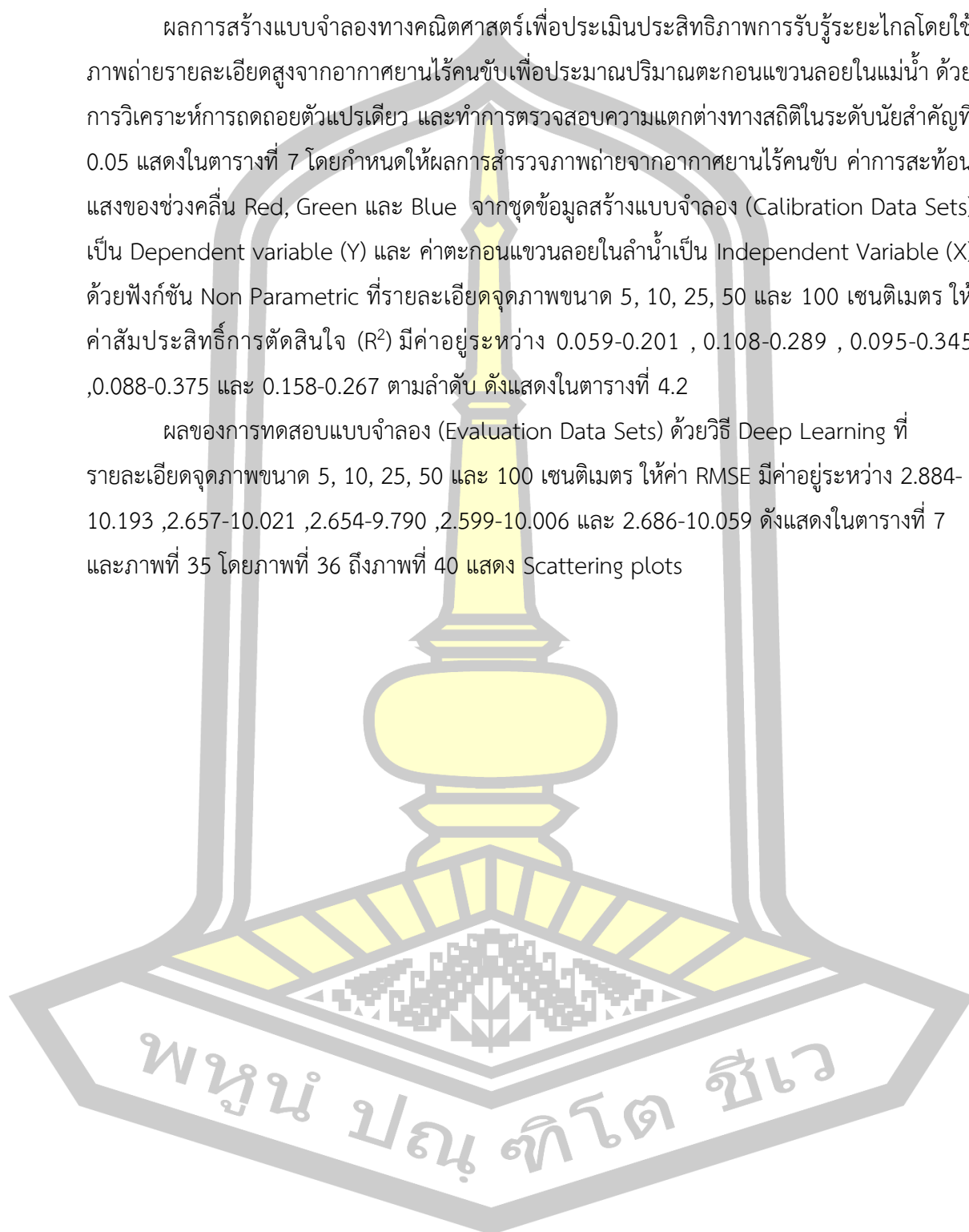
(d)

ภาพที่ 34 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 100 cm. ด้วยแบบจำลอง GLM

#### 4.2 ผลการประมาณค่า SSC ด้วยวิธี Deep Learning: DP

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับรู้ระยะไกลโดยใช้ภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยตัวแปรเดียว และทำการตรวจสอบความแตกต่างทางสถิติในระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงในตารางที่ 7 โดยกำหนดให้ผลการสำรวจภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Red, Green และ Blue จากชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง (Calibration Data Sets) เป็น Dependent variable (Y) และ ค่าตะกอนแขวนลอยในลำน้ำเป็น Independent Variable (X) ด้วยฟังก์ชัน Non Parametric ที่รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.059-0.201 , 0.108-0.289 , 0.095-0.345 , 0.088-0.375 และ 0.158-0.267 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ผลของการทดสอบแบบจำลอง (Evaluation Data Sets) ด้วยวิธี Deep Learning ที่รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร ให้ค่า RMSE มีค่าอยู่ระหว่าง 2.884-10.193 , 2.657-10.021 , 2.654-9.790 , 2.599-10.006 และ 2.686-10.059 ดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 35 โดยภาพที่ 36 ถึงภาพที่ 40 แสดง Scattering plots

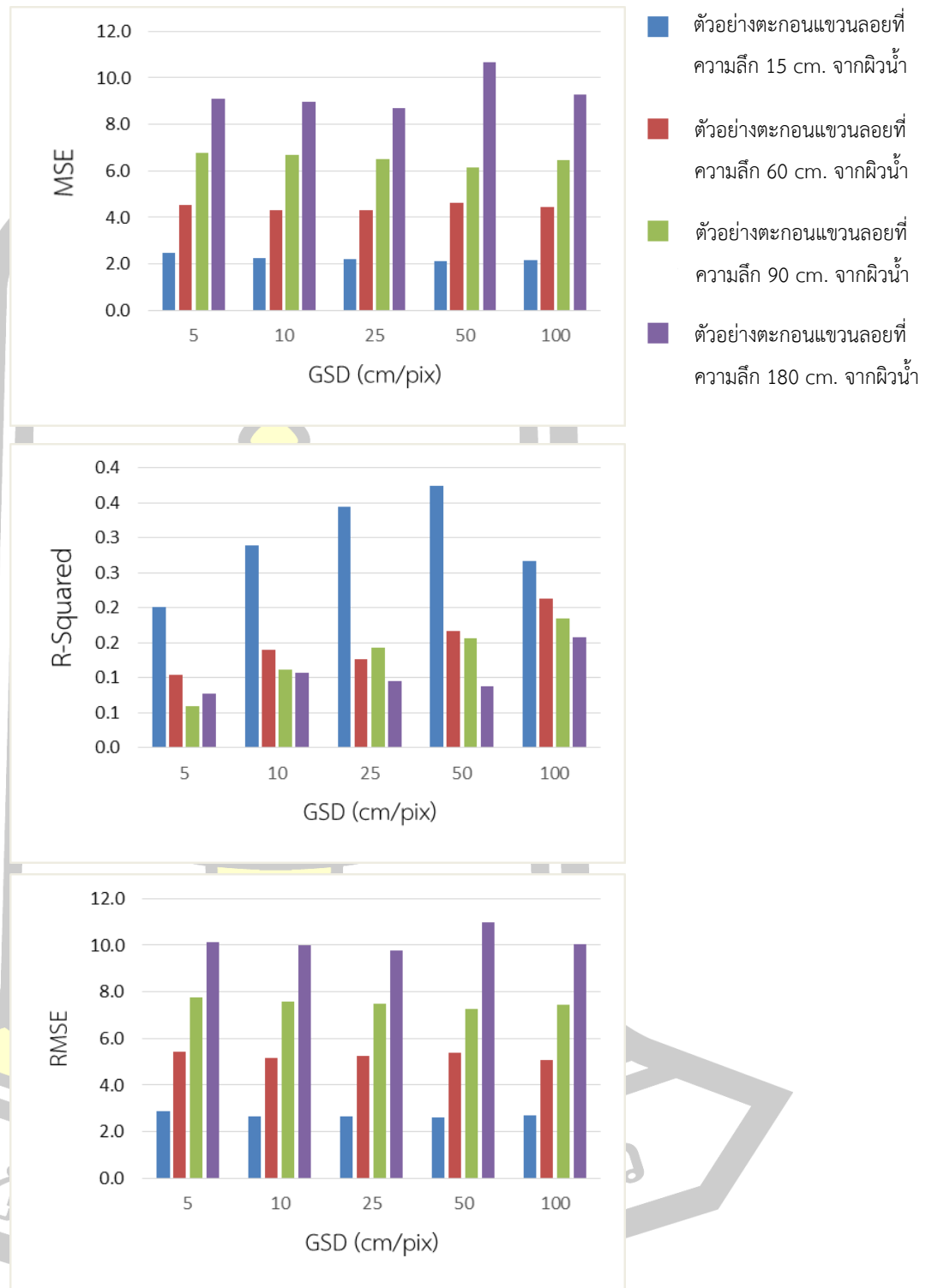


MSE (DP)					
Pixel ความลึก	5 cm.	10 cm.	25 cm.	50 cm.	100 cm.
0-15 cm.	2.497	2.247	2.200	2.104	2.181
0-60 cm.	4.529	4.304	4.330	4.625	4.442
0-90 cm.	6.779	6.684	6.523	6.163	6.457
0-180 cm.	9.091	8.991	8.702	10.679	9.267

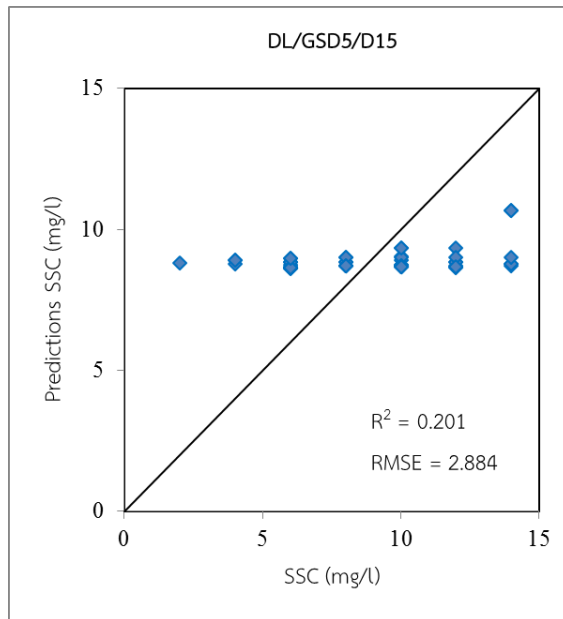
R <sup>2</sup> (DP)					
Pixel ความลึก	5 cm.	10 cm.	25 cm.	50 cm.	100 cm.
0-15 cm.	0.201	0.289	0.345	0.375	0.267
0-60 cm.	0.104	0.140	0.127	0.167	0.213
0-90 cm.	0.059	0.112	0.142	0.157	0.184
0-180 cm.	0.077	0.108	0.095	0.088	0.158

RMSE (DP)					
Pixel ความลึก	5 cm.	10 cm.	25 cm.	50 cm.	100 cm.
0-15 cm.	2.884	2.657	2.654	2.599	2.686
0-60 cm.	5.410	5.173	5.246	5.367	5.085
0-90 cm.	7.777	7.576	7.498	7.261	7.453
0-180 cm.	10.139	10.021	9.790	11.006	10.059

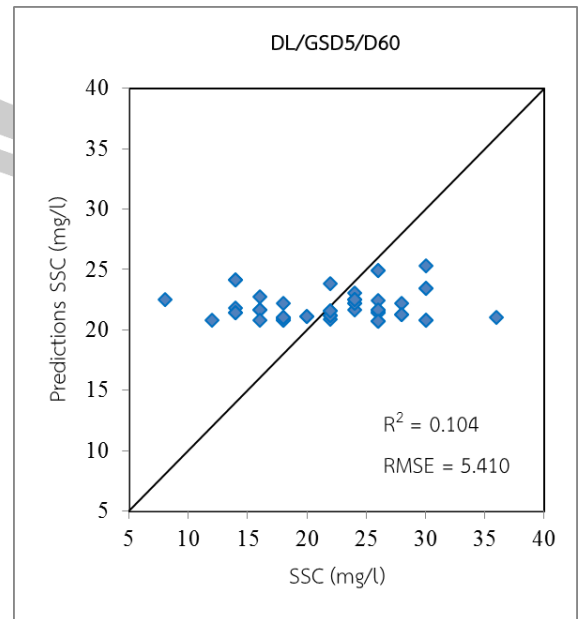
ตารางที่ 7 ผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Deep Learning: DP



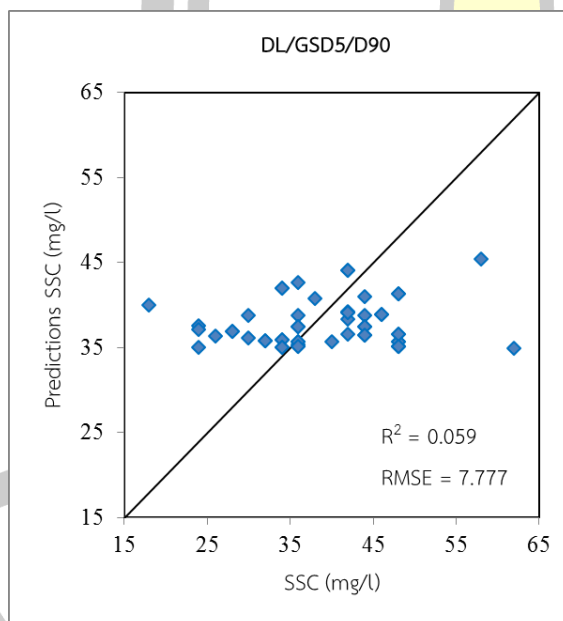
ภาพที่ 35 กราฟผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Deep Learning: DP



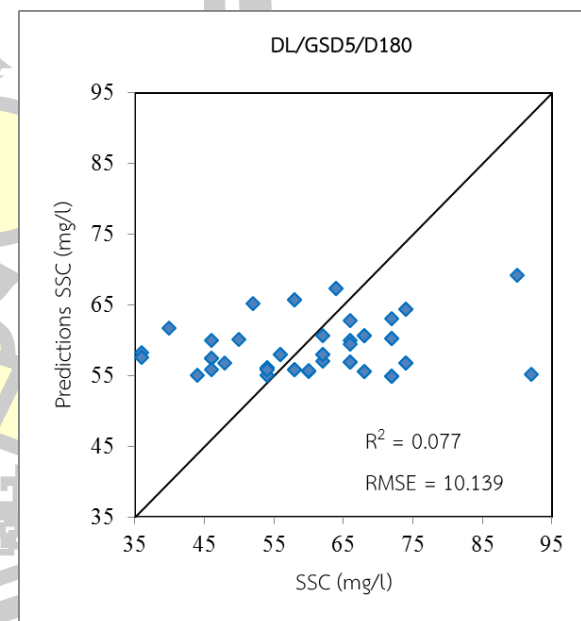
(a)



(b)

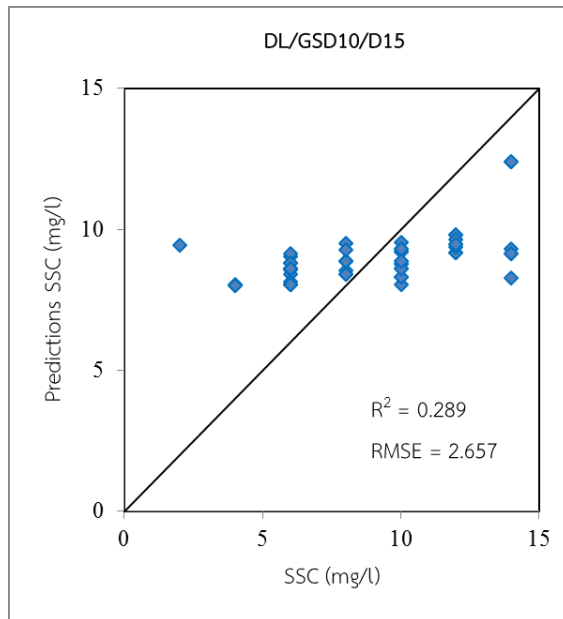


(c)

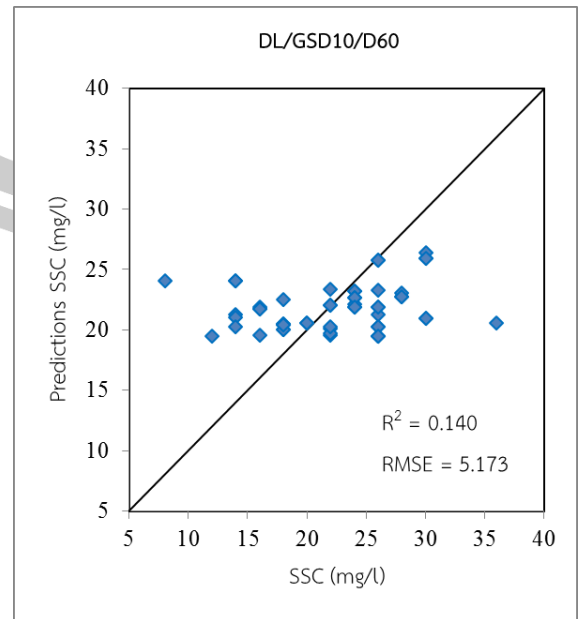


(d)

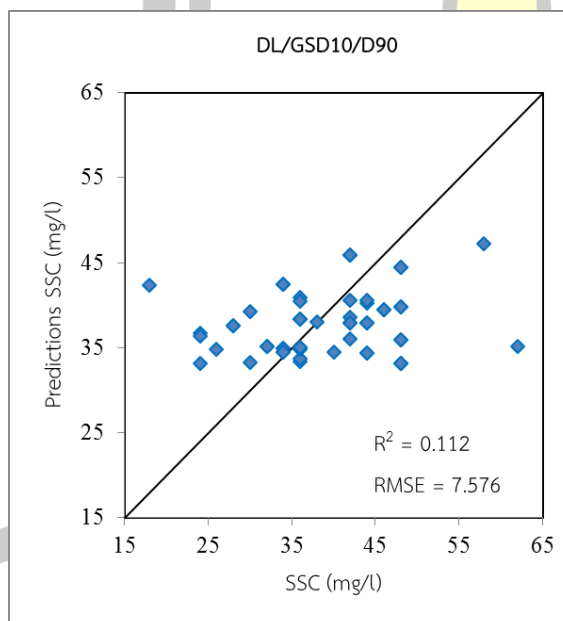
ภาพที่ 36 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 5 cm. ด้วยแบบจำลอง DP



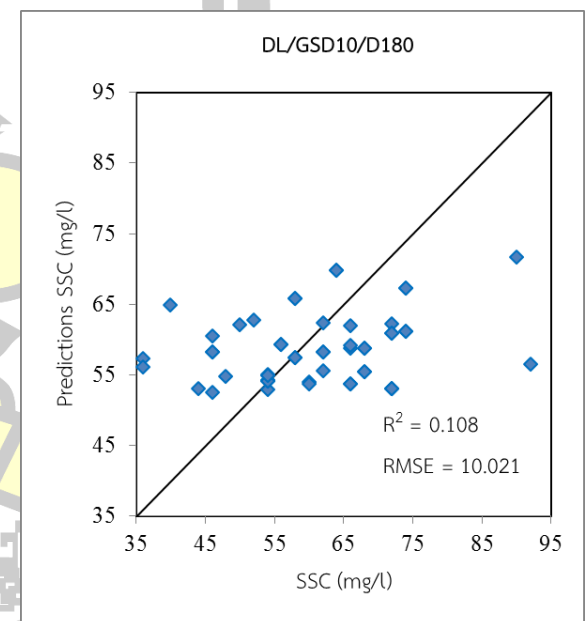
(a)



(b)



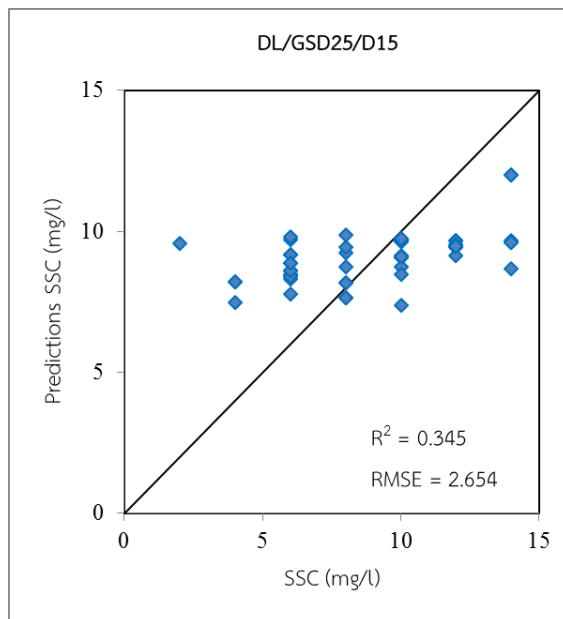
(c)



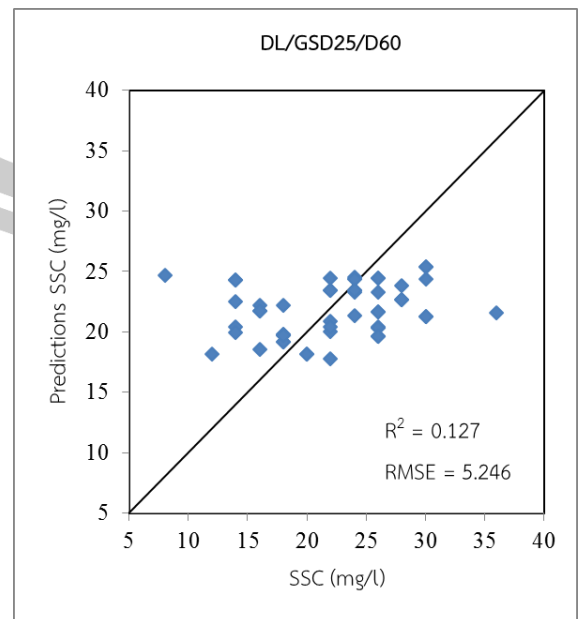
(d)

ภาพที่ 37 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 10 cm. ด้วยแบบจำลอง DP

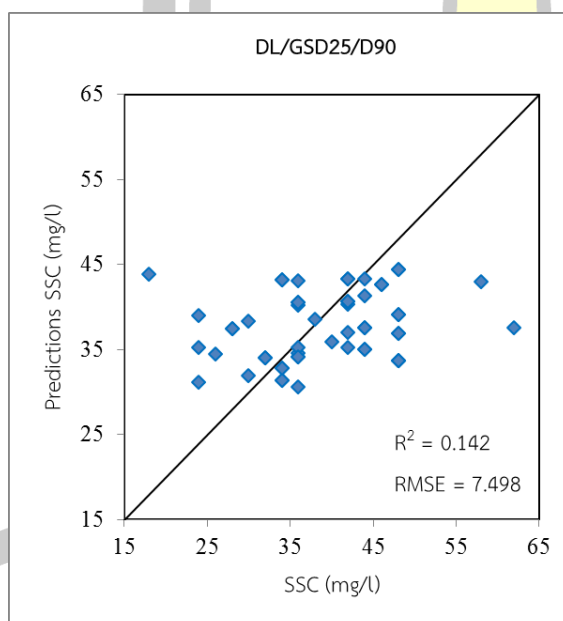




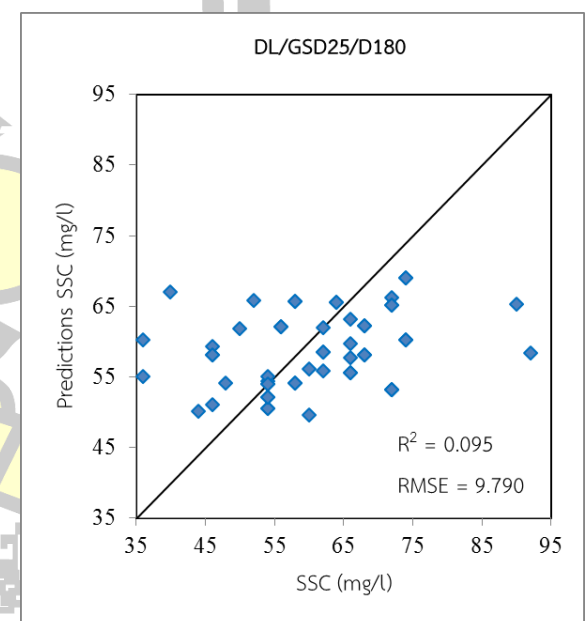
(a)



(b)

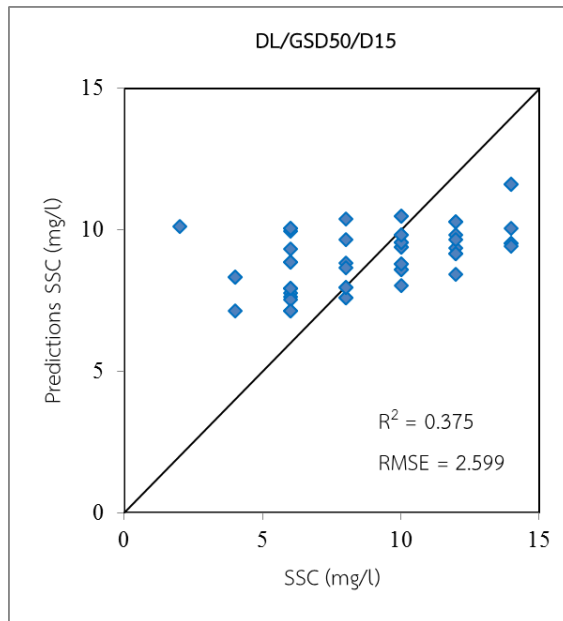


(c)

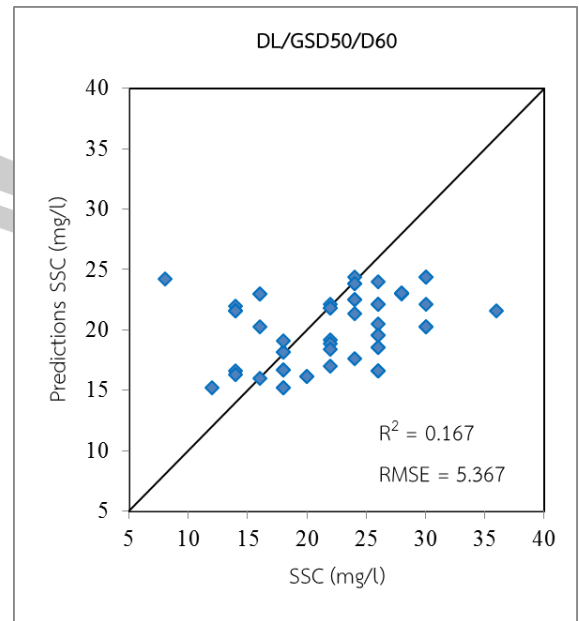


(d)

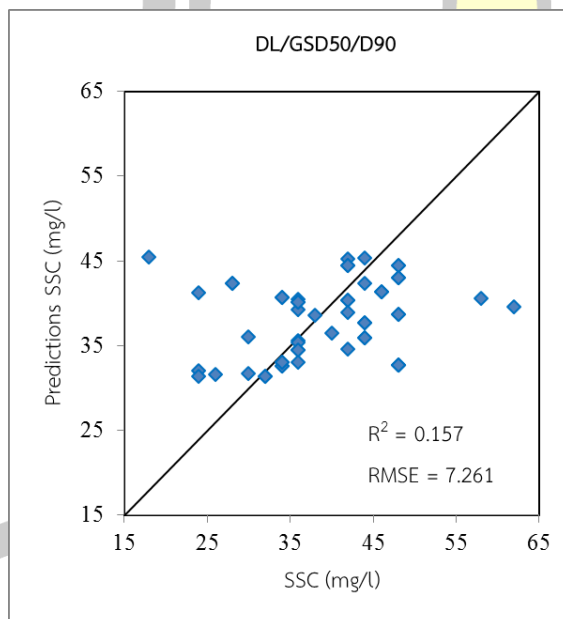
ภาพที่ 38 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 25 cm. ด้วยแบบจำลอง DP



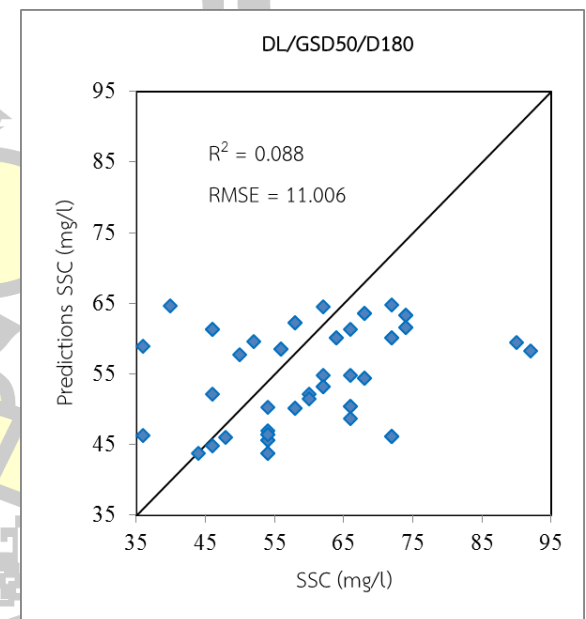
(a)



(b)

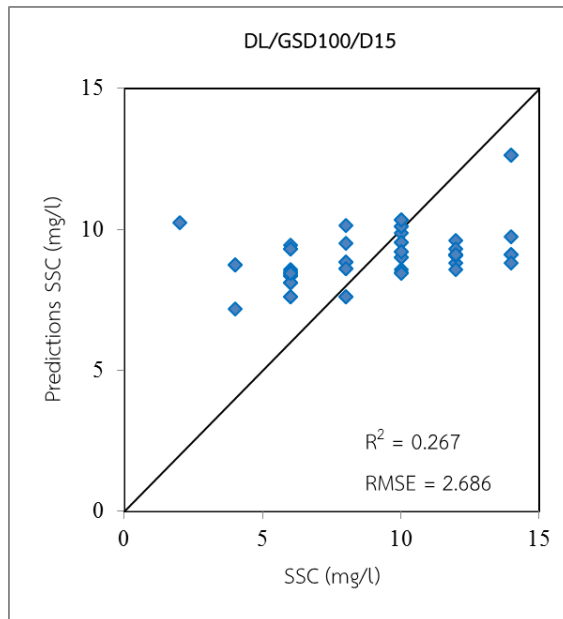


(c)

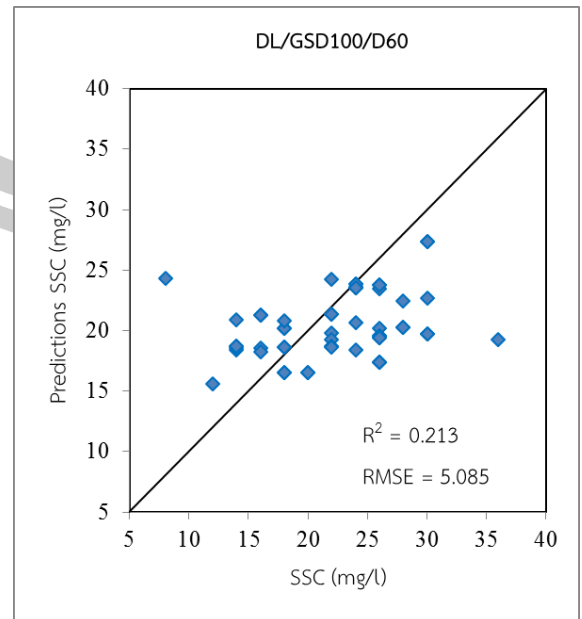


(d)

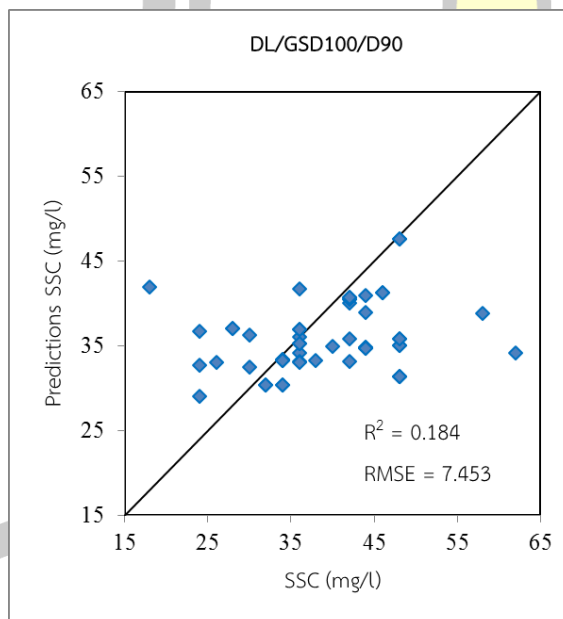
ภาพที่ 39 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 50 cm. ด้วยแบบจำลอง DP



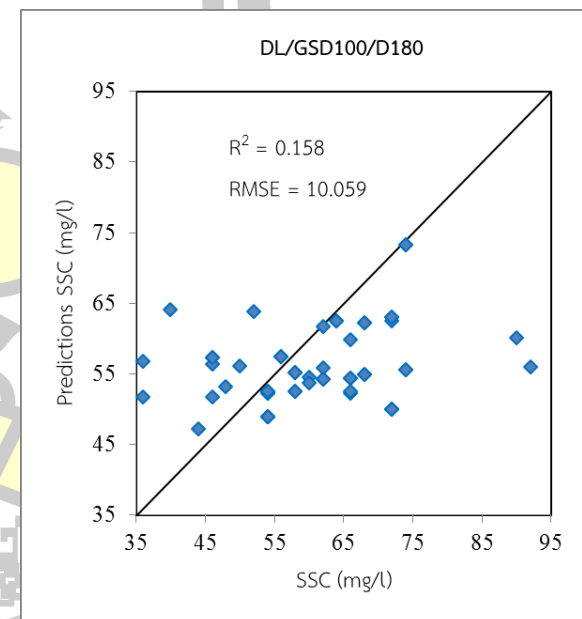
(a)



(b)



(c)



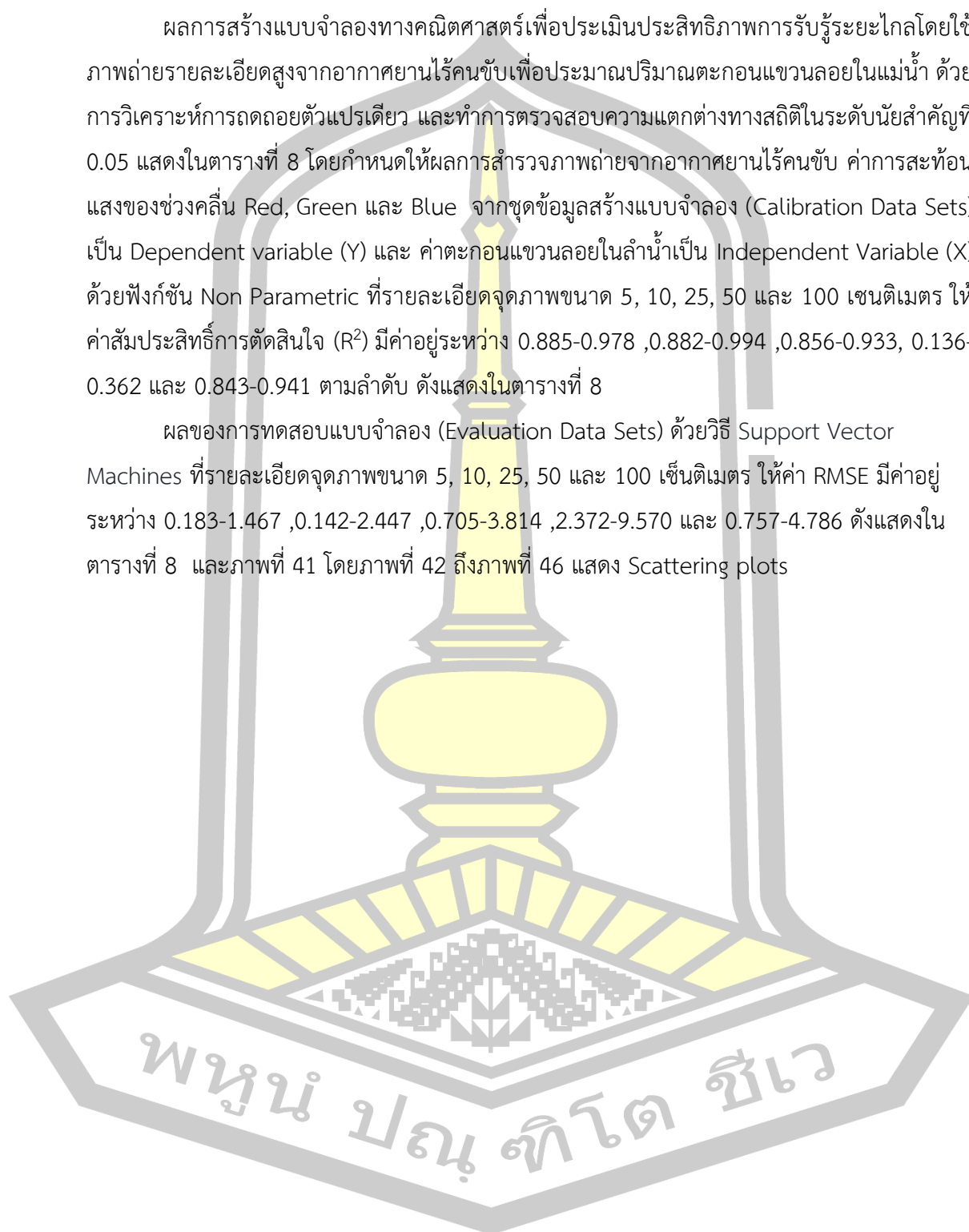
(d)

ภาพที่ 40 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 100 cm. ด้วยแบบจำลอง DP

#### 4.3 ผลการประมาณค่า SSC ด้วยวิธี Support Vector Machines: SVM

ผลการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับรู้ระยะไกลโดยใช้ภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยตัวแปรเดียว และทำการตรวจสอบความแตกต่างทางสถิติในระดับนัยสำคัญที่ 0.05 แสดงในตารางที่ 8 โดยกำหนดให้ผลการสำรวจภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ค่าการสะท้อนแสงของช่วงคลื่น Red, Green และ Blue จากชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง (Calibration Data Sets) เป็น Dependent variable (Y) และ ค่าตะกอนแขวนลอยในลำน้ำเป็น Independent Variable (X) ด้วยฟังก์ชัน Non Parametric ที่รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.885-0.978 ,0.882-0.994 ,0.856-0.933, 0.136-0.362 และ 0.843-0.941 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 8

ผลของการทดสอบแบบจำลอง (Evaluation Data Sets) ด้วยวิธี Support Vector Machines ที่รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร ให้ค่า RMSE มีค่าอยู่ระหว่าง 0.183-1.467 ,0.142-2.447 ,0.705-3.814 ,2.372-9.570 และ 0.757-4.786 ดังแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 41 โดยภาพที่ 42 ถึงภาพที่ 46 แสดง Scattering plots

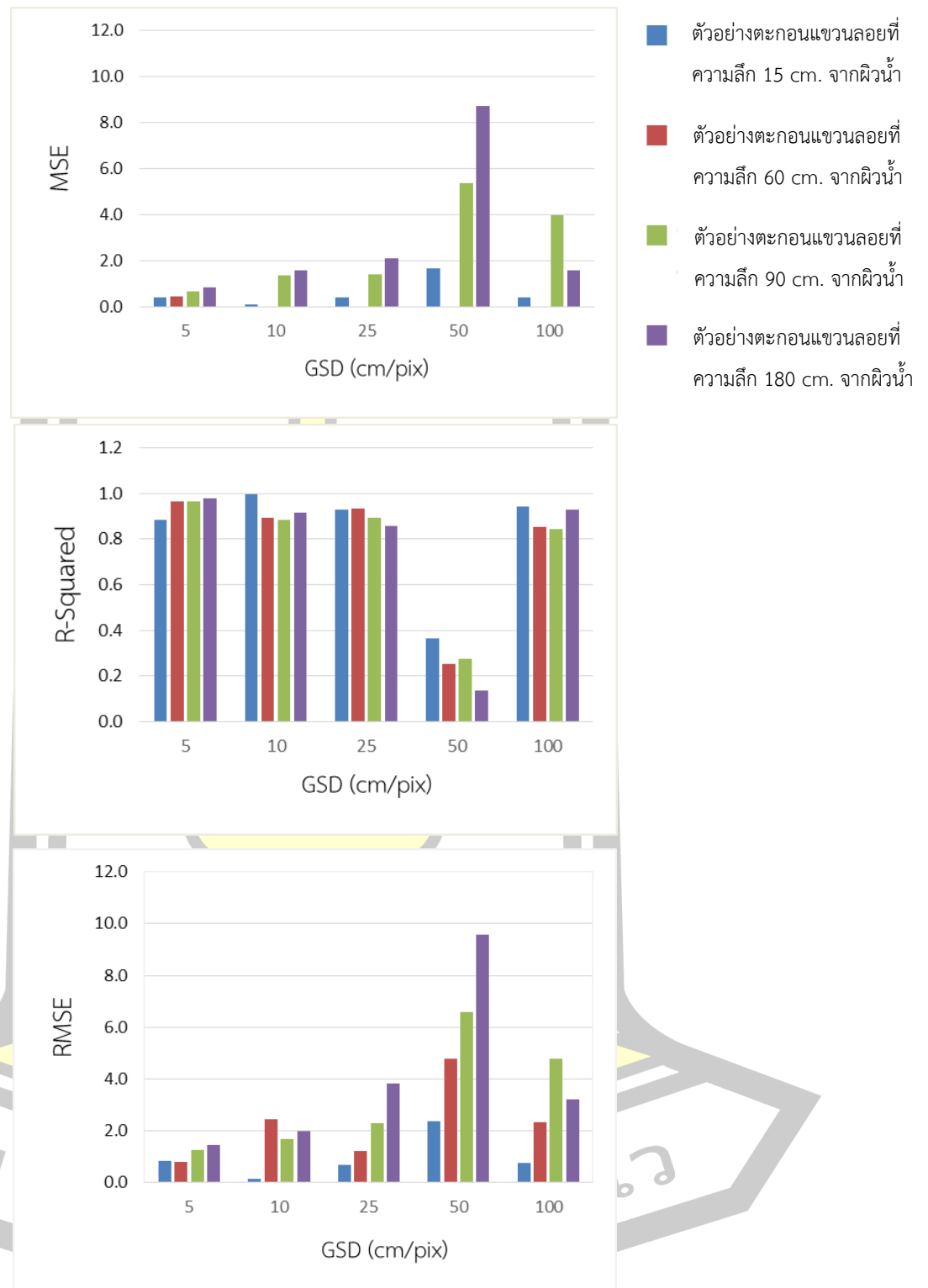


MSE (SVM)					
Pixel ความลึก	5 cm.	10 cm.	25 cm.	50 cm.	100 cm.
0-15 cm.	0.416	0.111	0.377	1.664	0.396
0-60 cm.	0.421	2.166	0.693	3.701	1.284
0-90 cm.	0.645	1.334	1.381	5.382	3.960
0-180 cm.	0.848	1.556	2.082	8.711	1.554

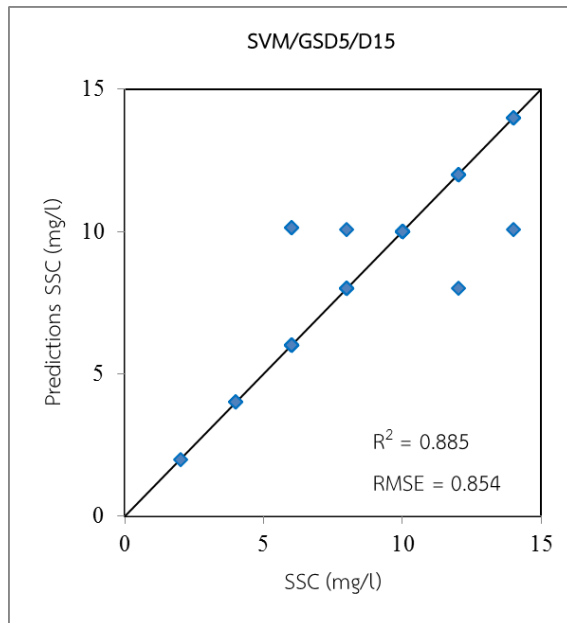
R <sup>2</sup> (SVM)					
Pixel ความลึก	5 cm.	10 cm.	25 cm.	50 cm.	100 cm.
0-15 cm.	0.885	0.994	0.927	0.362	0.941
0-60 cm.	0.964	0.895	0.933	0.251	0.854
0-90 cm.	0.962	0.882	0.895	0.277	0.843
0-180 cm.	0.978	0.914	0.856	0.136	0.927

RMSE (SVM)					
Pixel ความลึก	5 cm.	10 cm.	25 cm.	50 cm.	100 cm.
0-15 cm.	0.854	0.142	0.705	2.372	0.757
0-60 cm.	0.813	2.447	1.224	4.774	2.326
0-90 cm.	1.259	1.697	2.303	6.598	4.786
0-180 cm.	1.467	1.980	3.814	9.570	3.202

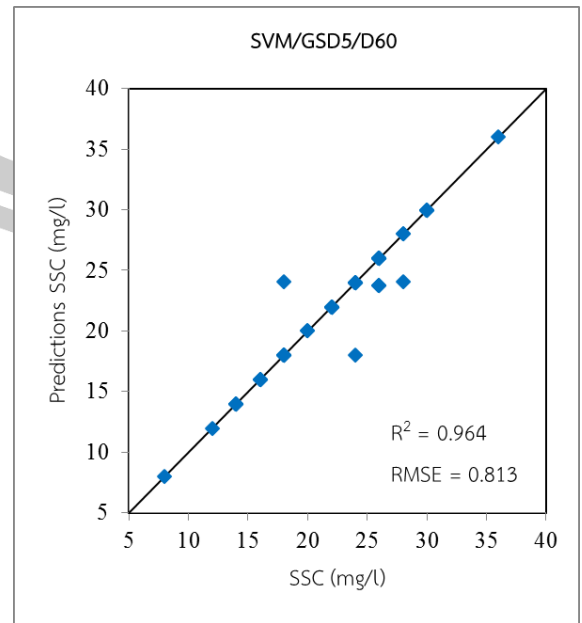
ตารางที่ 8 ผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Support Vector Machines: SVM



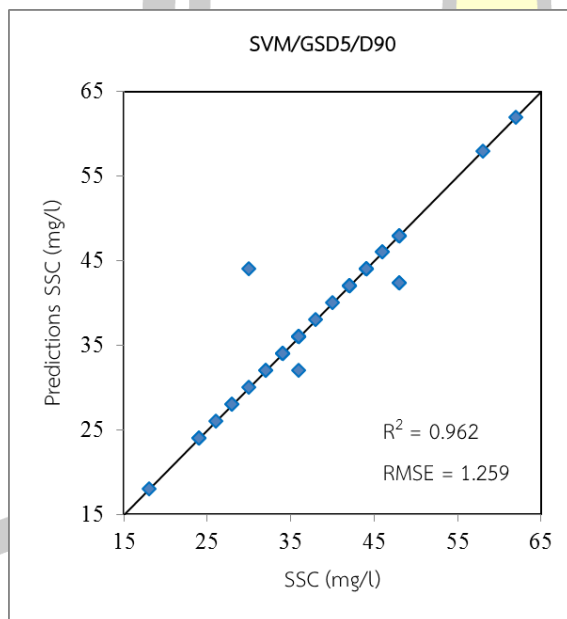
ภาพที่ 41 กราฟผลของการทดสอบแบบจำลองด้วยวิธี Support Vector Machines: SVM



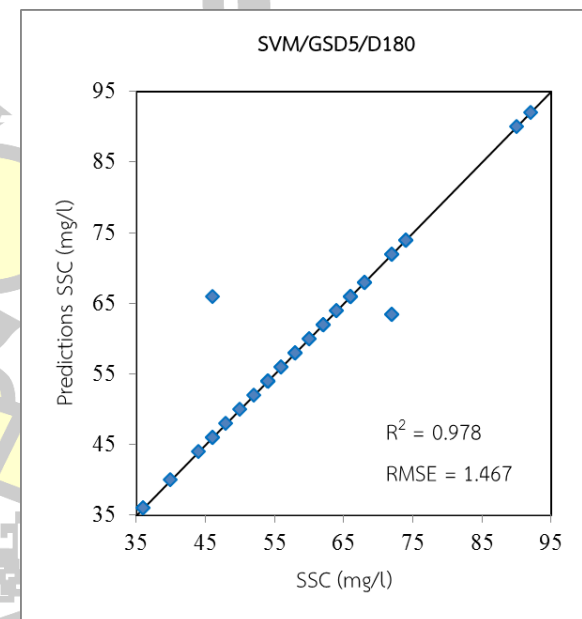
(a)



(b)

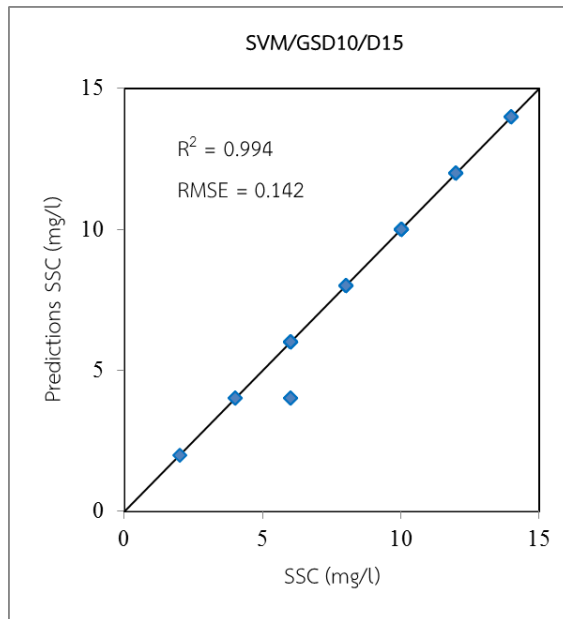


(c)

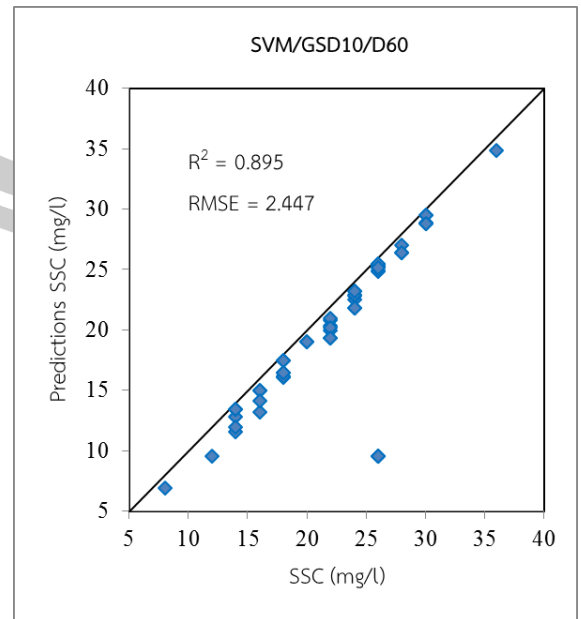


(d)

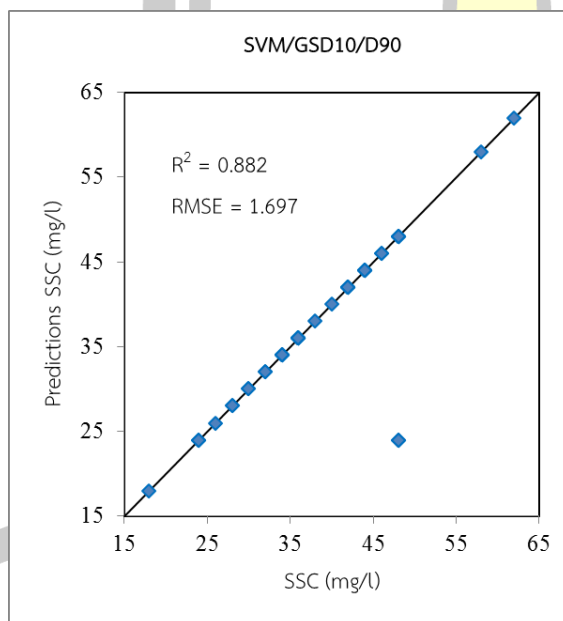
ภาพที่ 42 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 5 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM



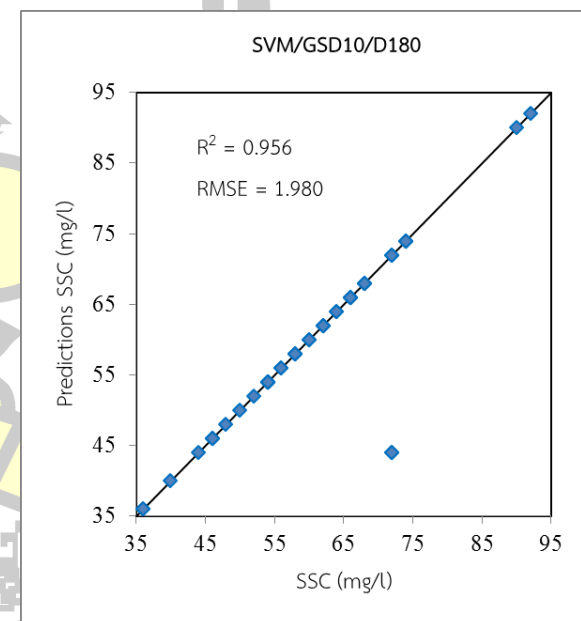
(a)



(b)



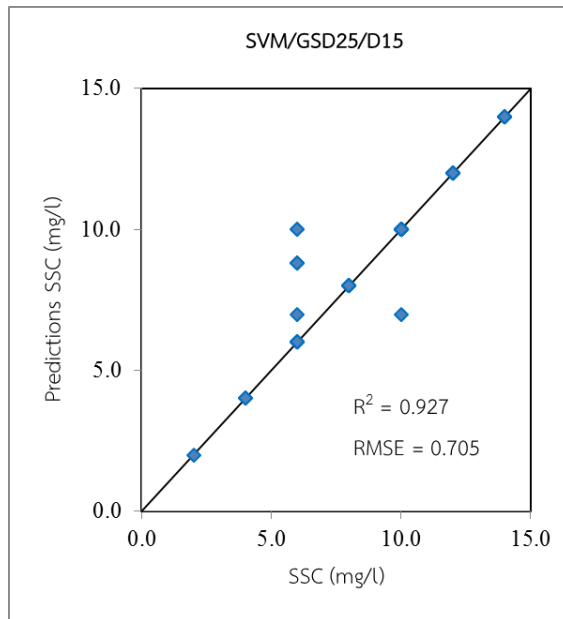
(c)



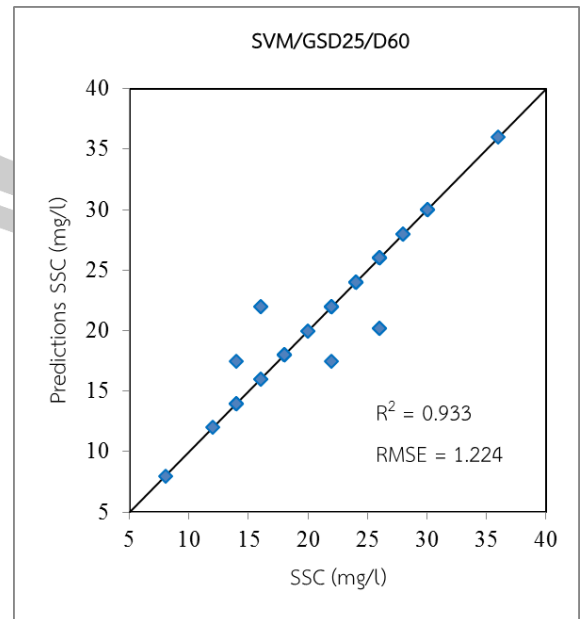
(d)

ภาพที่ 43 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 10 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM

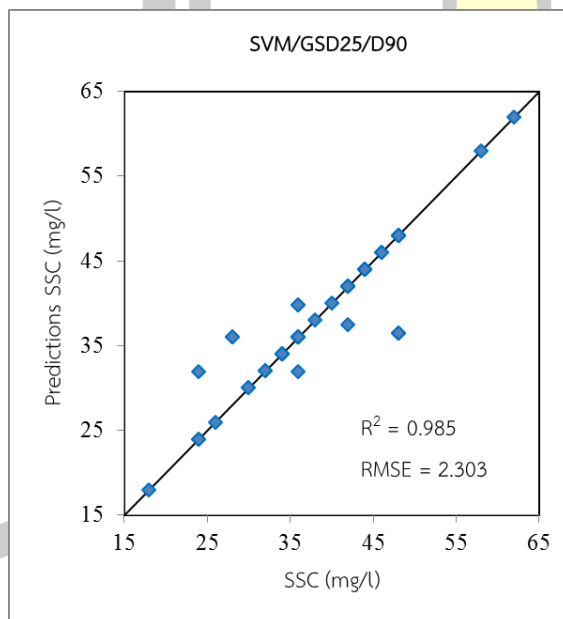




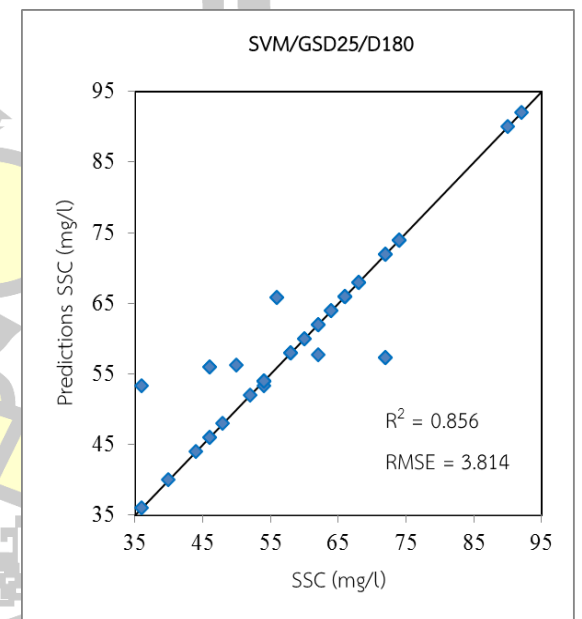
(a)



(b)

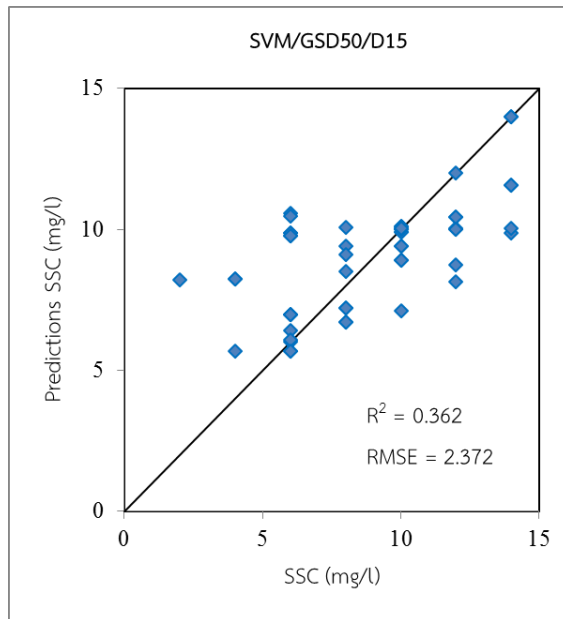


(c)

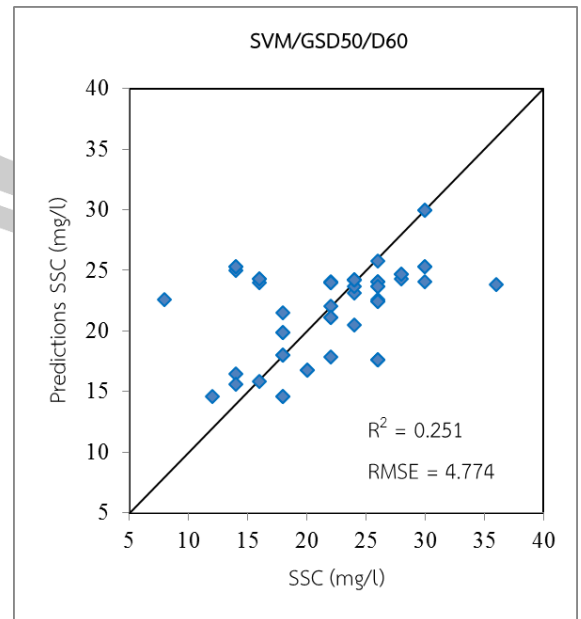


(d)

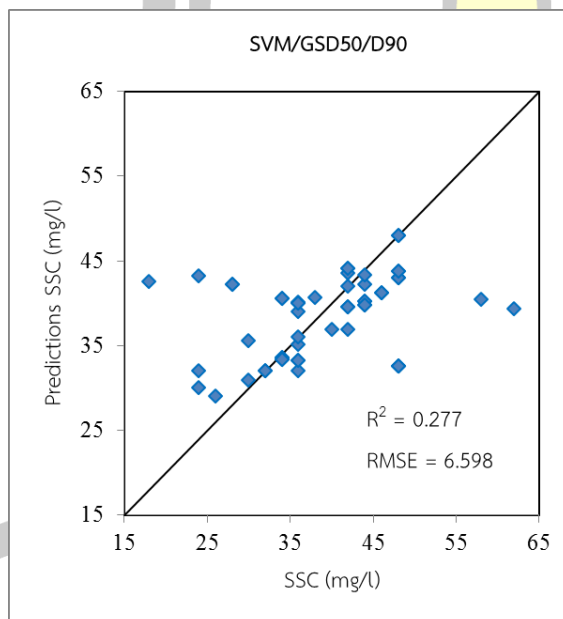
ภาพที่ 44 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 25 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM



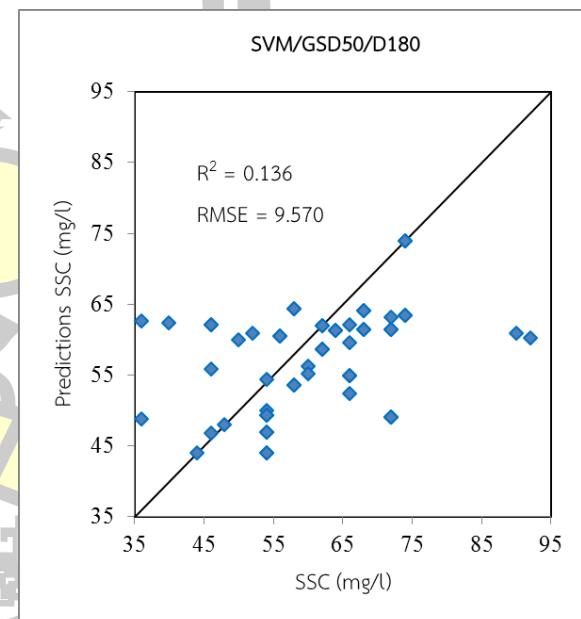
(a)



(b)

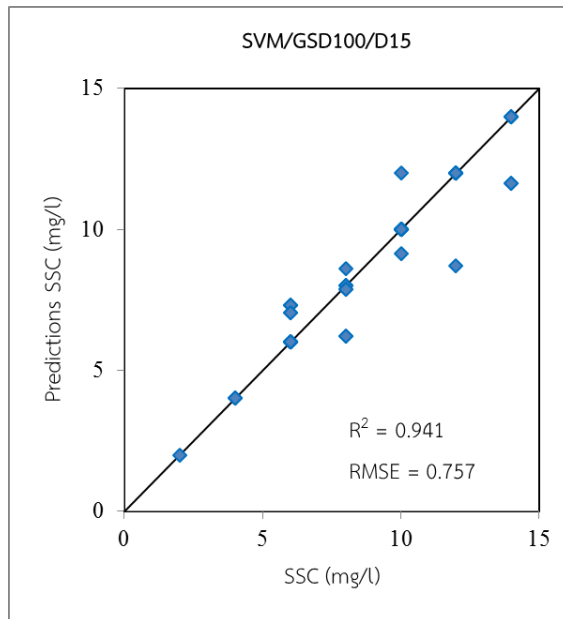


(c)

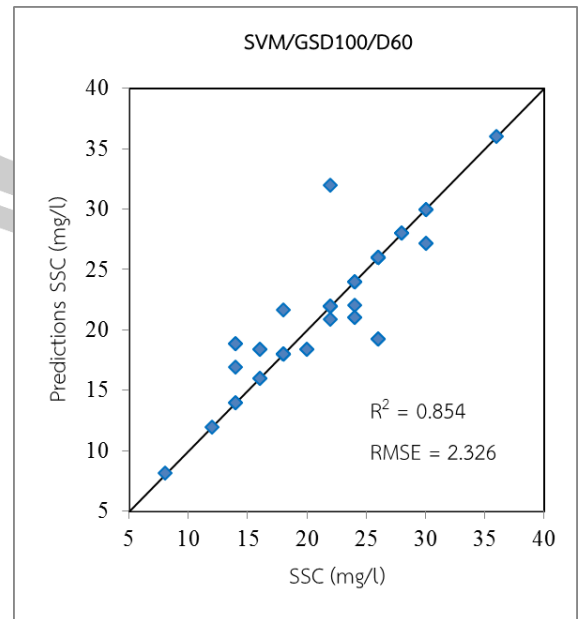


(d)

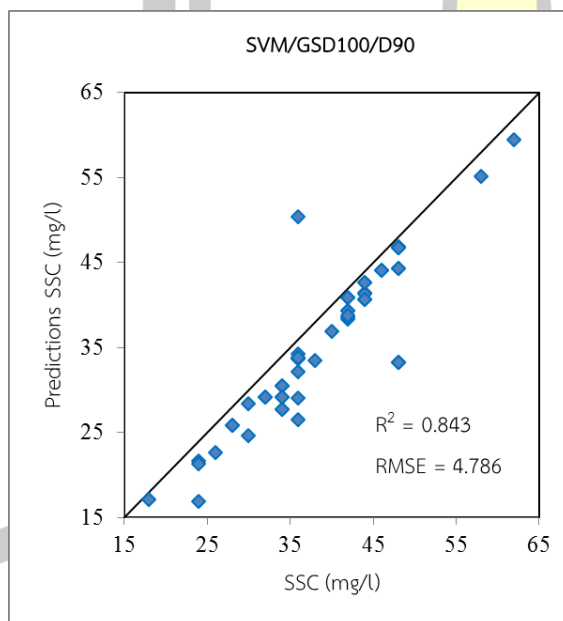
ภาพที่ 45 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 50 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM



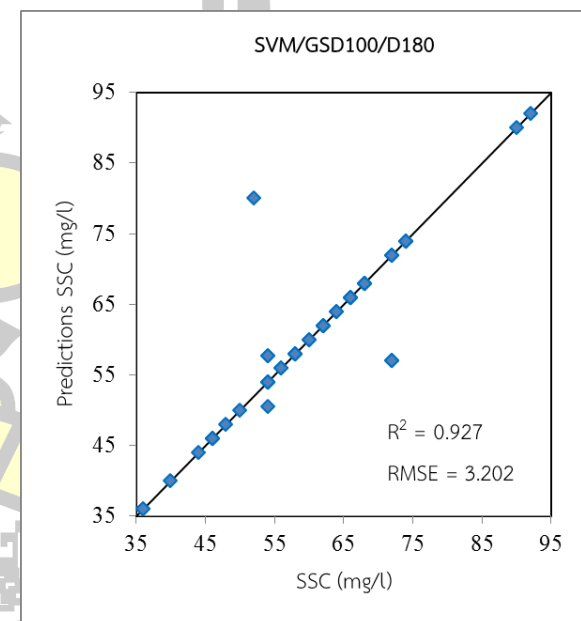
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 46 กราฟผลการทำนายค่าตะกอนแขวนลอยที่ GSD 100 cm. ด้วยแบบจำลอง SVM

## บทที่ 5

### อภิปรายผล สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการศึกษา สรุปผลการศึกษา ข้อจำกัดในการศึกษาและข้อเสนอแนะในการนำเสนอผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ในอนาคต การศึกษานี้แยกทำการวิเคราะห์ข้อมูล 3 วิธี คือ Generalized Linear Model ,Deep Learning และ Support Vector Machines เพื่อทำการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำที่ความลึกต่างๆ 15 ,60 ,90 และ 180 เซนติเมตร จากระดับผิวน้ำ ตามลำดับโดยจะแยกส่วนการอภิปรายและสรุปผลการศึกษา

#### 5.1 อภิปรายผลการศึกษา

ผลการศึกษาการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำที่ความลึก 15 เซนติเมตร จากระดับผิวน้ำ พบว่า วิธีการวิเคราะห์ Support Vector Machines ให้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) อยู่ที่ 0.111 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ที่ 0.994 และค่า RMSE มีค่าอยู่ที่ 0.142 ที่รายละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร

การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำที่ความลึก 60 เซนติเมตรจากระดับผิวน้ำ พบว่า วิธีการวิเคราะห์ Support Vector Machines ให้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) อยู่ที่ 0.421 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ที่ 0.964 และค่า RMSE มีค่าอยู่ที่ 0.183 ที่รายละเอียดจุดภาพ 5 เซนติเมตร

การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำที่ความลึก 90 เซนติเมตรจากระดับผิวน้ำ พบว่า วิธีการวิเคราะห์ Support Vector Machines ให้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) อยู่ที่ 0.645 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ที่ 0.962 และค่า RMSE มีค่าอยู่ที่ 1.259 ที่รายละเอียดจุดภาพ 5 เซนติเมตร

การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำที่ความลึก 180 เซนติเมตรจากระดับผิวน้ำพบว่า วิธีการวิเคราะห์ Support Vector Machines ให้ค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (MSE) อยู่ที่ 0.848 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ที่ 0.978 และค่า RMSE มีค่าอยู่ที่ 1.467 ที่รายละเอียดจุดภาพ 5 เซนติเมตร (ดูตารางที่ 8 และ ภาพที่ 41 ประกอบ)

## 5.2 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถของค่าการสะท้อนแสงในแต่ละช่วงคลื่น คือ Red Green และ BLUE และ NIR ทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ของค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำปาว การศึกษาวิจัยนี้แยกทำการศึกษาเป็น 4 ระดับความลึก คือ 15, 60, 90 และ 180 เซนติเมตร จากระดับผิวน้ำ โดยใช้รายละเอียดจุดภาพขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 เซนติเมตร จากภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในพื้นที่บริเวณลำน้ำปาว สะพานบ้านนาหมู - บ้านท่าไฮ เป็นสะพานแบ่งเขตระหว่าง อำเภอศรีธาตุ จังหวัดอุดรธานี และ อำเภอกำกันโท จังหวัดกาฬสินธุ์ จากผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรในแบบจำลองทางสถิติที่ได้ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติสูงในการสร้างแบบจำลอง

จากวิธีการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยในแม่น้ำที่รายละเอียดจุดภาพ 10 เซนติเมตร ด้วยการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines: SVM) ให้ผลการประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ดีที่สุด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2 = 0.994$  และ  $RMSE = 0.142$  แสดงให้เห็นว่าการใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่มีรายละเอียดจุดภาพสูง จะส่งผลให้การประมาณค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้ดียิ่งขึ้น

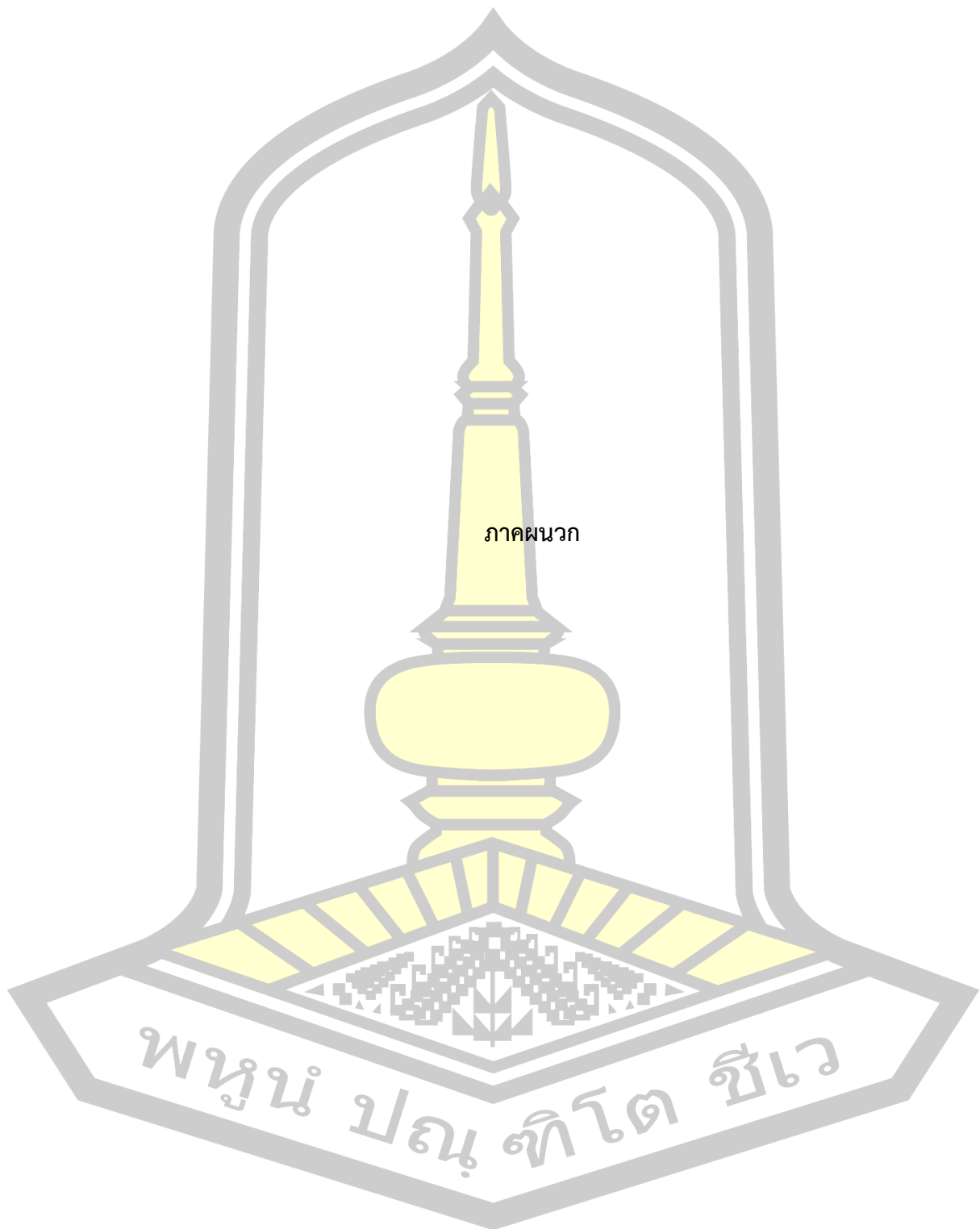
## 5.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาประเมินประสิทธิภาพการรับรู้ระยะไกลโดยใช้ภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอย ผู้วิจัยเลือกพื้นที่ลำน้ำปาวเพื่อศึกษาหาค่าตะกอนแขวนลอยในช่วงฤดูแล้ง ของวันที่ 6 มกราคม 2562 เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะเวลาในการศึกษา ลำน้ำที่ศึกษามีสภาพที่นิ่งทำให้การกระจายตัวของตะกอนจะมีค่าน้อยสำหรับผิวน้ำ จะมากขึ้นสำหรับท้องน้ำ ในการศึกษาต่ออาจเปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยจากที่ต่างๆ เนื่องจากลำน้ำแต่ละพื้นที่มีสีของลำน้ำที่แตกต่างกันตามสภาพของแต่ละพื้นที่ ซึ่งความแตกต่างของสีเหล่านี้เกิดมาจากแร่ธาตุรวมไปถึงสารอินทรีย์ที่ไหลมากับแหล่งต้นน้ำ (Yepez et al., 2018) จะส่งผลกับค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่นต่างๆ และการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการติดกล้องกล้อง MAPIR Survey 3 ที่ให้ค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่น NIR เมื่อนำมาเข้า Software เพื่อประเมินผลเพื่อวัดค่า NIR พบว่ามีค่าเท่ากับ 0 เป็นผลเนื่องมาจากตะกอนแขวนลอยในลำน้ำที่ทำการศึกษานั้นมีค่าน้อยมากเนื่องจากเป็นฤดูแล้ง ตามทฤษฎีแล้วช่วงคลื่น NIR วัดค่าปริมาณตะกอนแขวนลอยได้น้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงคลื่น Red Green และ Blue (Larson et al., 2018) ในการใช้ค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่น NIR ควรจะใช้ในลำน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยมาก ๆ หรือช่วงฤดูฝน ในการใช้ค่าการสะท้อนแสงในช่วงคลื่น NIR ควรระวังในเรื่องของแสงสะท้อนที่ไหลมากับลำน้ำ เนื่องจากค่า

การสะท้อนแสงในช่วงคลื่น NIR จะให้ค่าการสะท้อนแสงที่ดีกับพืช อาจส่งผลให้ข้อมูลที่ได้เกิดความผิดพลาด

ผู้วิจัยเห็นว่าข้อมูลการสำรวจจากระยะไกลด้วยเทคนิคต่างๆนี้มีความสำคัญต่อการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท ปริญญาเอก และหน่วยงานที่มีหน้าที่บริหารจัดการทรัพยากรน้ำสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการศึกษาวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต





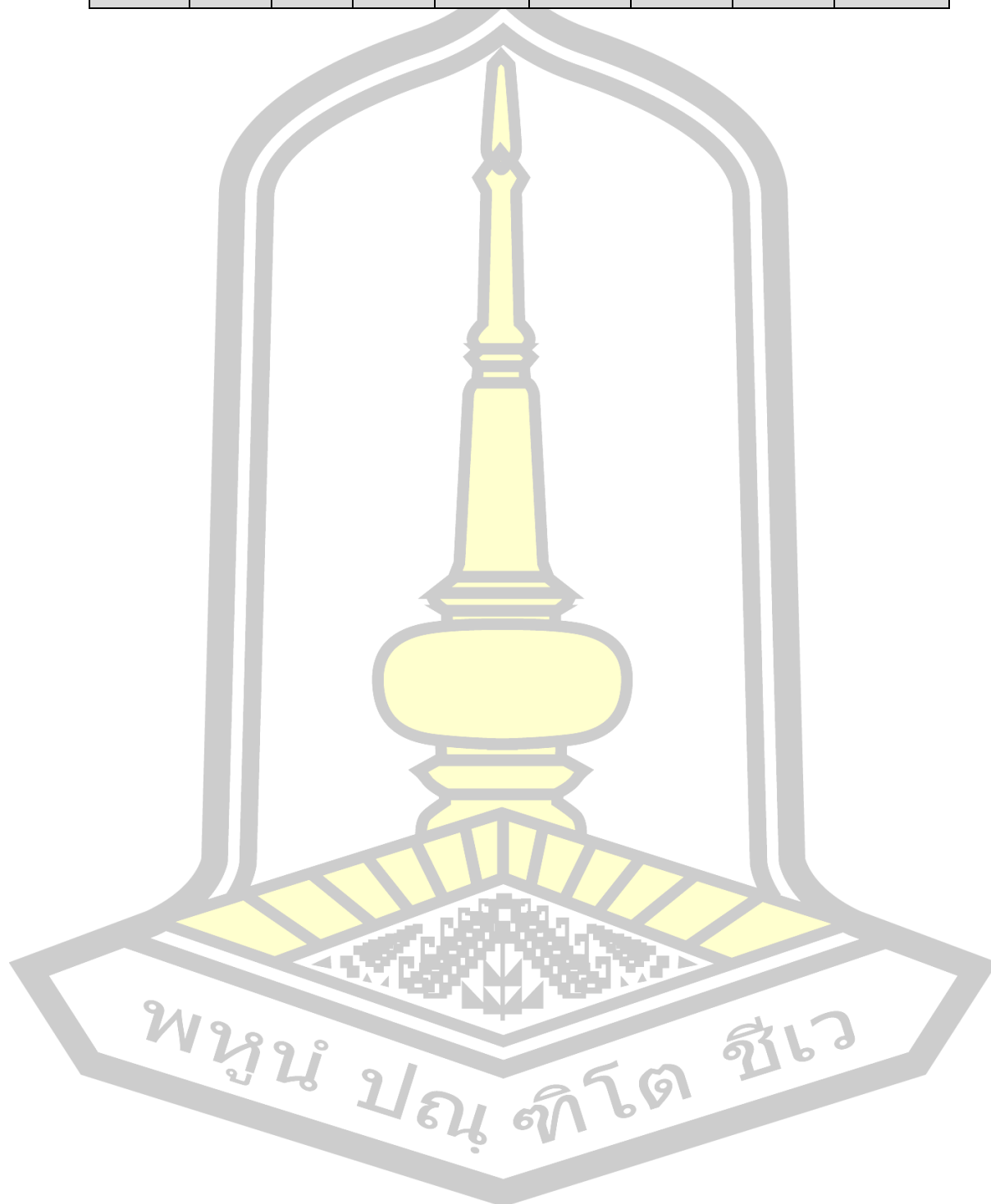
ตารางที่ 9 ปริมาณตะกอน และตะกอนสะสมที่ความลึกต่างๆ

จุดที่	ตะกอนที่ความลึกต่างๆ(มก./ลิตร)				ตะกอนสะสม(มก./ลิตร)			
	15cm	60cm	90cm	180cm	0-15cm	0-60cm	0-90cm	0-180cm
1	12	14	16	20	12	26	42	62
2	14	16	18	20	14	30	48	68
3	12	14	18	18	12	26	44	62
4	10	16	18	22	10	26	44	66
5	12	12	18	24	12	24	42	66
6	14	16	18	26	14	30	48	74
7	12	14	18	32	12	26	44	76
8	10	14	22	24	10	24	46	70
9	12	16	20	26	12	28	48	74
10	14	22	26	30	14	36	62	92
11	12	14	16	20	12	26	42	62
12	10	12	14	16	10	22	36	52
13	14	14	16	22	14	28	44	66
14	12	12	12	14	12	24	36	50
15	12	20	22	26	12	32	54	80
16	8	16	20	28	8	24	44	72
17	10	16	16	22	10	26	42	64
18	8	10	12	16	8	18	30	46
19	6	10	12	18	6	16	28	46
20	10	12	14	20	10	22	36	56
21	6	10	10	16	6	16	26	42
22	6	8	12	22	6	14	26	48
จุดที่	ตะกอนที่ความลึกต่างๆ(มก./ลิตร)				ตะกอนสะสม(มก./ลิตร)			
	15cm	60cm	90cm	180cm	0-15cm	0-60cm	0-90cm	0-180cm



23	8	14	18	20	8	22	40	60
24	10	12	14	18	10	22	36	54
25	6	8	10	12	6	14	24	36
26	6	8	10	12	6	14	24	36
27	6	10	14	16	6	16	30	46
28	8	12	14	20	8	20	34	54
29	8	10	16	20	8	18	34	54
30	6	20	22	24	6	26	48	72
31	10	12	14	18	10	22	36	54
32	6	12	14	22	6	18	32	54
33	4	6	10	14	4	10	20	34
34	10	12	14	24	10	22	36	60
35	8	10	14	18	8	18	32	50
36	6	18	20	22	6	24	44	66
37	6	8	20	24	6	14	34	58
38	4	8	12	20	4	12	24	44
39	6	10	22	28	6	16	38	66
40	4	14	18	22	4	18	36	58
41	8	22	28	32	8	30	58	90
42	10	12	14	20	10	22	36	56
43	10	14	22	26	10	24	46	72
44	10	14	18	26	10	24	42	68
45	2	6	10	22	2	8	18	40
ค่าเฉลี่ย	8.8	12.9	16.4	21.4	8.8	21.7	38.1	59.5
จุดที่	ตะกอนที่ความลึกต่างๆ(มก./ลิตร)				ตะกอนสะสม(มก./ลิตร)			
	15cm	60cm	90cm	180cm	0-15cm	0-60cm	0-90cm	0-180cm

ค่าสูงสุด	14	22	28	32	14	36	62	92
ค่าต่ำสุด	2	6	10	12	2	8	18	34



ตารางที่ 10 ค่าการสะท้อนแสงจากโปรแกรม QGIS 2.18

R	G	B	$r = \frac{R}{R+G+B}$	$g = \frac{G}{R+G+B}$	$b = \frac{B}{R+G+B}$
169	139	41	0.484	0.398	0.118
166	137	37	0.488	0.403	0.109
158	132	33	0.489	0.409	0.102
164	134	40	0.485	0.396	0.118
162	137	34	0.487	0.411	0.102
124	110	33	0.464	0.412	0.124
161	121	22	0.530	0.398	0.072
136	114	27	0.491	0.412	0.098
149	122	30	0.495	0.405	0.100
152	121	33	0.497	0.395	0.108
146	120	26	0.500	0.411	0.089
143	120	25	0.497	0.417	0.087
150	124	28	0.497	0.411	0.093
158	128	27	0.505	0.409	0.086
145	120	24	0.502	0.415	0.083
143	120	26	0.495	0.415	0.090
147	121	23	0.505	0.416	0.079
150	124	28	0.497	0.411	0.093
151	122	28	0.502	0.405	0.093
153	126	30	0.495	0.408	0.097
155	127	30	0.497	0.407	0.096
159	128	30	0.502	0.404	0.095
160	131	34	0.492	0.403	0.105
161	131	37	0.489	0.398	0.113
167	136	31	0.500	0.407	0.093
162	134	33	0.492	0.407	0.100

R	G	B	$r = \frac{R}{R+G+B}$	$g = \frac{G}{R+G+B}$	$b = \frac{B}{R+G+B}$
156	130	35	0.486	0.405	0.109
173	142	40	0.487	0.400	0.113
174	141	38	0.493	0.399	0.108
170	138	36	0.494	0.401	0.105
166	133	32	0.502	0.402	0.097
171	139	35	0.496	0.403	0.101
168	139	39	0.486	0.402	0.113
164	132	37	0.493	0.396	0.111
158	128	27	0.505	0.409	0.086
159	129	22	0.513	0.416	0.071
169	134	25	0.515	0.409	0.076
173	140	38	0.493	0.399	0.108
160	135	30	0.492	0.415	0.092
158	125	31	0.503	0.398	0.099
155	130	25	0.500	0.419	0.081
151	122	30	0.498	0.403	0.099
145	120	27	0.497	0.411	0.093
143	117	25	0.502	0.411	0.088
143	120	27	0.493	0.414	0.093



## บรรณานุกรม

- กิตติศักดิ์ ศรีกลาง. (2559). เอกสารประกอบรายวิชาการสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศ. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2561 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.rtsd.mi.th/>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2547). โครงการการกำหนดประเภทแหล่งน้ำลุ่มน้ำภาคตะวันออก แม่น้ำระยอง จันทบุรี และตราด รายงานฉบับสมบูรณ์.กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- ฉลอง สีแก้วสีว. (2555). Regression Analysis / Correlation Analysis. สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2561 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://sites.google.com/site/mystatistics01/system/app/pages/sitemap/list>
- เนาวรัตน์ สุชีพ. (2557). การเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลก. สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2562 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://sites.google.com/site/karpeliynpaelngkhxngpeluxklok/kar-peliynpaelng-khxng-peluxk-lok>
- ปรียาพร โกษา. (2555). ชลศาสตร์ (Hydraulics) .สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พิชชาพร อุ่นผาง. (2557). การสำรวจจากระยะไกล (Remote Sensing). สืบค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2561;(ระบบออนไลน์).แหล่งที่มา : [http://pitchaporns13.blogspot.com/2014/10/remote-sensing-1\\_56.html](http://pitchaporns13.blogspot.com/2014/10/remote-sensing-1_56.html)
- ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2553). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศิวา แก้วปลั่ง และ เนติ ศรีหามู. (2560). การประมาณค่าชีวมวลของต้นข้าวก่อนข้าวออกรวงโดยการสำรวจ ระยะไกลด้วยอากาศยานไร้คนขับจากดัชนีพืช BNDVI และ GRVI กรณีศึกษา : ข้าวนาปีใน จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย.
- ศาสตรา วงศ์นวนสุ. (2560). ปัญญาประดิษฐ์ทฤษฎีโปรแกรมและการประยุกต์.
- สุพรรณิการ์ เกตุศิริ. (2557). การสำรวจข้อมูลระยะไกลหรือการรับรู้ระยะไกล(Remote sensing). สืบค้นเมื่อ 09 เมษายน 2562 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา <http://remotesensing2557.blogspot.com/2014/11/remote-sensing.html>.
- สุวดี นำพาเจริญ และ ชลธิชา จำรัสพร. (2015). การวิเคราะห์สมการถดถอย การแปลความหมายค่า R-Square และการประเมินตัวแบบว่าเหมาะสมหรือไม่. สืบค้นเมื่อ 9 มกราคม 2562 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา

:<https://www.solutioncenterminitab.com/blog/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1-3/>

สมบัติ อยู่เมือง. (2558). ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing). สืบค้นเมื่อ 11 ตุลาคม 2561 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.gisthai.org/about-gis/remote-sensing.html>

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ(องค์การมหาชน). ดำเนินเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์. สืบค้นเมื่อ 09 เมษายน 2562 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : [www.gistda.or.th](http://www.gistda.or.th)

สำนักงานอัตราเบี้ยประกันวินาศภัย. (2559). การสร้างตัวแบบเชิงเส้นวางนัยทั่วไป(Generalized Linear Models).

สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ. (2555). การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับพื้นที่ลุ่มน้ำ ใน 25 ลุ่มน้ำหลัก; สืบค้นเมื่อ 2 ตุลาคม 2561; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : [http://hydrology.rid.go.th/sedimentwq/filepdf/suspendsediment/Hydro\\_sed\\_wq\\_25\\_12.pdf](http://hydrology.rid.go.th/sedimentwq/filepdf/suspendsediment/Hydro_sed_wq_25_12.pdf)

สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย (กรมทรัพยากรธรณี). (2553). ความรู้เกี่ยวกับดินถล่ม. สืบค้นเมื่อ 09 เมษายน 2562 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : [http://www.dmr.go.th/download/Landslide/what\\_landslide1.htm](http://www.dmr.go.th/download/Landslide/what_landslide1.htm)

อิจฉริยา ปราบอริพ่าย. (2547). สถิติกับคอมพิวเตอร์สำหรับสังคมศาสตร์. สืบค้นเมื่อ 09 เมษายน 2562 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://pirun.ku.ac.th/~faasatp/734421/data/chapter1.pdf>

Adao, T., Hruska, J., Padua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. (2017).

Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*, 9(11), 1110.

Alighalehabakhani, F., Miller, C. J., Selegean, J. P., Barkach, J., Abkenar, S. M. S., Dahl, T., & Baskaran, M. (2017). Estimates of sediment trapping rates for two reservoirs in the Lake Erie watershed: Past and present scenarios. *Journal of hydrology*, 544, 147-155.

ANJI REDDY, M. S., S. (1994). Comparison of IRS-IB LISS-II pixel array sizes for estimating suspended solids concentration in Hussain Sagar Lake, Hyderabad, India—a statistical approach. *International Journal of Remote Sensing*, 15(18), 3693-3706.

- Binding, C., Bowers, D., & Mitchelson-Jacob, E. (2005). Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters; the impact of variable particle scattering properties. *Remote sensing of Environment*, 94(3), 373-383.
- Bosch, N. S., Evans, M. A., Scavia, D., & Allan, J. D. (2014). Interacting effects of climate change and agricultural BMPs on nutrient runoff entering Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 40(3), 581-589.
- Branigan, J. (2013). Development of a Field Test for Total Suspended Solids Analysis.
- Chen, J., Cui, T., Qiu, Z., & Lin, C. (2014). A three-band semi-analytical model for deriving total suspended sediment concentration from HJ-1A/CCD data in turbid coastal waters. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 93, 1-13.
- Cousino, L. K., Becker, R. H., & Zmijewski, K. A. (2015). Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 762-775.
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., & Castaing, P. (2002). A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5079-5085.
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., & Castaing, P. (2003). Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios. *Applied Optics*, 42(15), 2623-2634.
- Gao, J., & O'leary, S. (1997). Estimation of suspended solids from aerial photographs in a GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 18(10), 2073-2086.
- Gilvear, D., & Bryant, R. (2016). Analysis of remotely sensed data for fluvial geomorphology and river science. *Tools in Fluvial Geomorphology*.
- Hird, J., Montaghi, A., McDermid, G., Kariyeva, J., Moorman, B., Nielsen, S., & McIntosh, A. (2017). Use of unmanned aerial vehicles for monitoring recovery of forest vegetation on petroleum well sites. *Remote Sensing*, 9(5), 413.
- Islam, M. R., Yamaguchi, Y., & Ogawa, K. (2001). Suspended sediment in the Ganges and Brahmaputra Rivers in Bangladesh: observation from TM and AVHRR data. *Hydrological Processes*, 15(3), 493-509.

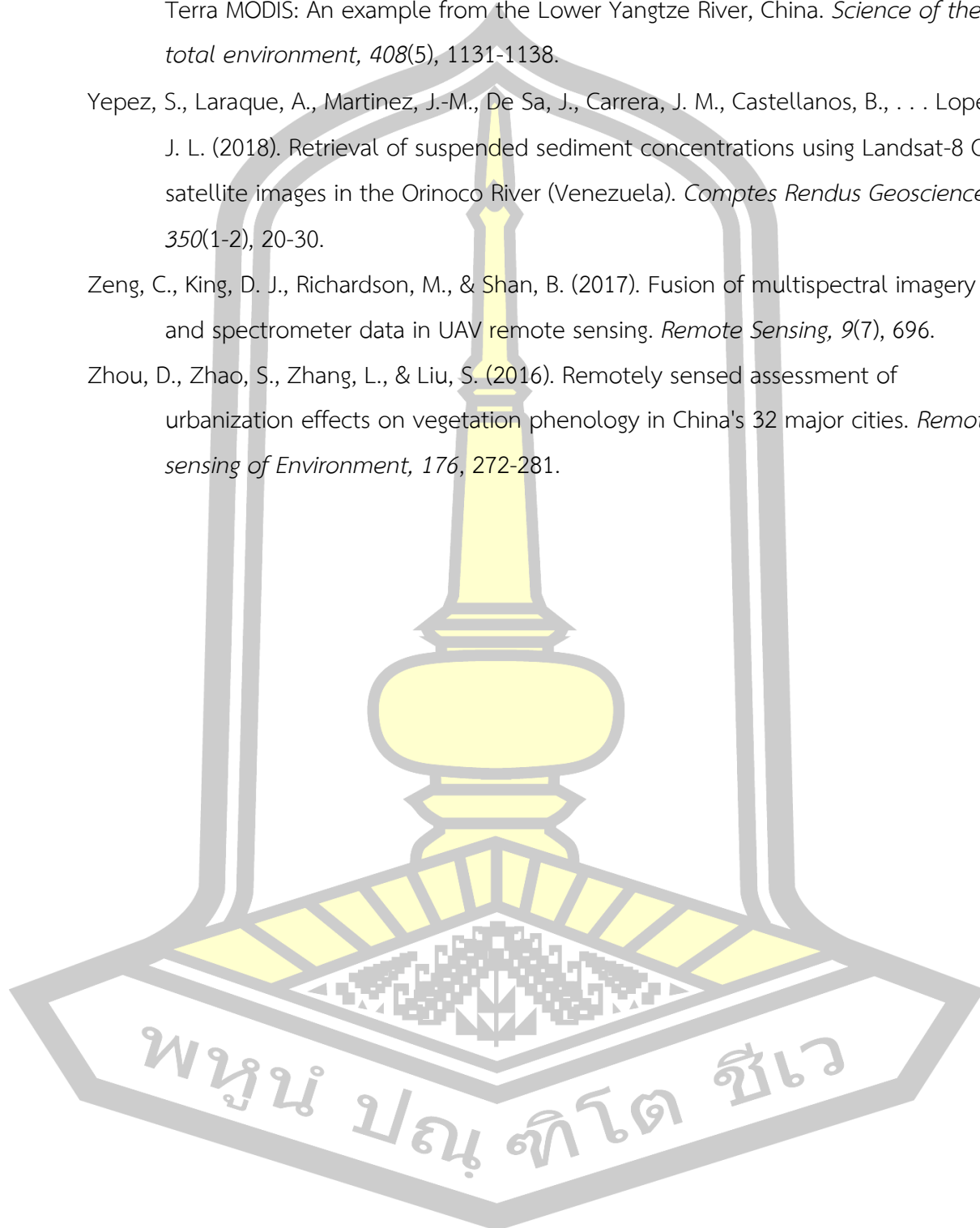
- Ji, U., Julien, P., & Park, S. (2011). Sediment flushing at the Nakdong river estuary barrage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1522-1535.
- Jiang, L., & Islam, S. (2001). Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2), 329-340.
- Phakpoom Laotrakul. (2015). พื้นฐานการรับรู้จากระยะไกล. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2561 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://gistda.or.th/main/th/node/936>
- Larson, M. D., Simic Milas, A., Vincent, R. K., & Evans, J. E. (2018). Multi-depth suspended sediment estimation using high-resolution remote-sensing UAV in Maumee River, Ohio. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5472-5489.
- Li, G., Wei, H., Han, Y., & Chen, Y. (1998). Sedimentation in the Yellow River delta, part I: flow and suspended sediment structure in the upper distributary and the estuary. *Marine Geology*, 149(1-4), 93-111.
- Lodhi, M. A., Rundquist, D. C., Han, L., & Kuzila, M. S. (1998). Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance. *Geocarto International*, 13(2), 11-15.
- Long, C. M., & Pavelsky, T. M. (2013). Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. *Remote sensing of Environment*, 129, 197-209.
- Ma, R., & Dai, J. (2005). Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China. *International Journal of Remote Sensing*, 26(13), 2779-2795.
- Miller, R. L., & McKee, B. A. (2004). Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote sensing of Environment*, 93(1-2), 259-266.
- Montanher, O. C., Novo, E. M., Barbosa, C. C., Renno, C. D., & Silva, T. S. (2014). Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 29, 67-77.
- Nessence. (2018). Deep learning. สืบค้นเมื่อ 28 ตุลาคม 2561; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://www.thaiprogrammer.org/2018/12/deep-learning->

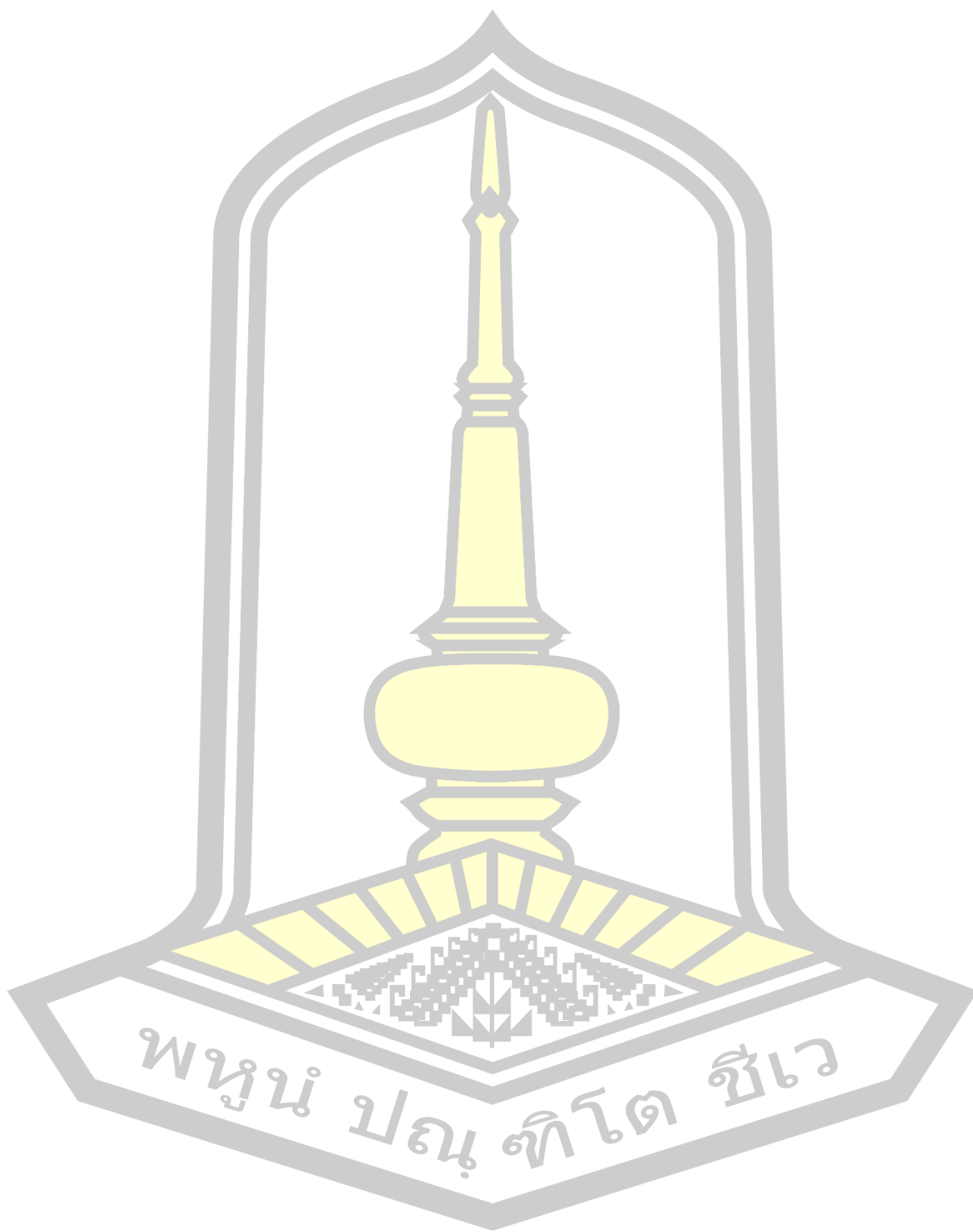


[%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3/](#)

- Onderka, M., & Pekarova, P. (2008). Retrieval of suspended particulate matter concentrations in the Danube River from Landsat ETM data. *Science of the total environment*, 397(1-3), 238-243.
- Quillon, S., Douillet, P., & Andrefouet, S. (2004). Coupling satellite data with in situ measurements and numerical modeling to study fine suspended-sediment transport: a study for the lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*, 23(1), 109-122.
- Pavelsky, T. M., & Smith, L. C. (2009). Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada. *Water Resources Research*, 45(11).
- Qu, L. (2014). Remote sensing suspended sediment concentration in the Yellow River.
- Ritchie, J. C., & Cooper, C. M. (1988). Comparison of measured suspended sediment concentrations with suspended sediment concentrations estimated from Landsat MSS data. *Title REMOTE SENSING*, 9(3), 379-387.
- Prapassorn sanpet. (2557). ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานกับวัตถุบนพื้นผิวโลก. สืบค้นเมื่อ 8 ตุลาคม 2561 ; (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา : [http://georemotesensing.blogspot.com/2014/11/blog-post\\_7.html](http://georemotesensing.blogspot.com/2014/11/blog-post_7.html)
- Stow, C. A., Cha, Y., Johnson, L. T., Confesor, R., & Richards, R. P. (2015). Long-term and seasonal trend decomposition of Maumee River nutrient inputs to western Lake Erie. *Environmental science & technology*, 49(6), 3392-3400.
- Tokarczyk, P., Leitao, J. P., Rieckermann, J., & Blumensaat, F. (2015). High-quality observation of surface imperviousness for urban runoff modelling using UAV imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4215-4228.
- Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 7(2), 1736-1757.
- Tyler, A., Svab, E., Preston, T., Presing, M., & Kovacs, W. (2006). Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high suspended sediment. *International Journal of Remote Sensing*, 27(8), 1521-1537.

- Wang, J.-J., & Lu, X. (2010). Estimation of suspended sediment concentrations using Terra MODIS: An example from the Lower Yangtze River, China. *Science of the total environment*, 408(5), 1131-1138.
- Yepez, S., Laraque, A., Martinez, J.-M., De Sa, J., Carrera, J. M., Castellanos, B., . . . Lopez, J. L. (2018). Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus Geoscience*, 350(1-2), 20-30.
- Zeng, C., King, D. J., Richardson, M., & Shan, B. (2017). Fusion of multispectral imagery and spectrometer data in UAV remote sensing. *Remote Sensing*, 9(7), 696.
- Zhou, D., Zhao, S., Zhang, L., & Liu, S. (2016). Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities. *Remote sensing of Environment*, 176, 272-281.





พหุณฺ์ ปณฺุ ทิตฺ สวี

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	พงษ์พัฒน์ สัจจา
วันเกิด	19 พฤษภาคม 2532
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลหนองคาย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	602 หมู่ 9 ตำบลโพธิ์ชัย อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย 43000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้ช่วยผู้อำนวยการกองช่าง เทศบาลตำบลท่าคันโท
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักงานเทศบาลตำบลท่าคันโท ตำบลนาตาล อำเภอท่าคันโท จังหวัดกาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนปทุมเทพวิทยาคาร อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย พ.ศ. 2558 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วศ.บ) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว