สารบัญ

		หน้า
สารบัญ		(8)
รายการตาราง		(12)
รายการภาพประกอบ		(14)
บทที่		
1. บทนำ		1
1.1	บทนำต้นเรื่อง	1
1.2	แหล่งกำเนิดและที่มาของการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนในแหล่งน้ำ	2
1.3	ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของโลหะหนักในแหล่งน้ำ	6
1.4	ความสำคัญของตะกอนต่อสิ่งแวดล้อม	8
1.5	ผลกระทบของตะกอนต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	9
1.6	ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักในตะกอน	9
1.6.1	องค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอน	9
1.6.2	ปริมาณสารอินทรีย์ในตะกอน	11
1.7	การเลือกวิธีการในการวิเคราะห์โลหะหนักในตะกอน	11
1.8	การปรับฐานทางธรณีเคมี (geochemical normalization)	13
1.9	ทะเลสาบสงขลา	14
1.9.1	ลักษณะทางกายภาพ	14
1.9.2	สถานการณ์คุณภาพน้ำทะเลสาบสงขลา	15
1.9.3	แหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำของทะเลสาบสงขลา	17
. 1.9.3.1	แหล่งกำเนิดมลพิษประเภทชุมชน	17
1.9.3.2	แหล่งกำเนิดมลพิษประเภทอุตสาหกรรม	18
1.9.3.3	แหล่งกำเนิดมลพิษประเภทฟาร์มสุกร	20
1.9.3.4	แหล่งกำเนิดมลพิษประเภทนากุ้ง	20
1.9.3.5	แหล่งกำเนิดมลพิษประเภทพื้นที่เกษตรกรรม	21
1.10	ปริมาณโลหะหนักในตะกอน	22
1.11	ค่ามาตรฐานดินตะกอน	25
1.12	วัตถุประสงค์	26

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
1.13	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	26
1.14	ขอบเขตงานวิจัย	26
2.	วิธีการวิจัย	27
2.1	การกำหนดจุดเก็บตัวอย่าง	27
2.2	การเก็บและการเก็บรักษาตัวอย่าง	27
2.3	การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ตะกอน	29
2.3.1	การเตรียมตัวอย่าง	29
2.3.2	การหาองค์ประกอบของขนาดอนุภาค (grain size composition)	29
2.3.3	การหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ง่าย	29
2.3.4	การหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ทั้งหมด	29
2.3.5	การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในตะกอนและสารอ้างอิงมาตรฐาน (certified reference material)	29
2.4	การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	30
2.4.1	วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น	30
2.4.2	วิเคราะห์สถิติโดยใช้ principal components analysis (PCA)	30
2.4.3	วิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของสถานีเก็บตัวอย่างโดยใช้ cluster analysis	30
2.5	การนำเสนอข้อมูลด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์	30
2.6	วัสดุและอุปกรณ์	31
2.6.1	อุปกรณ์เก็บตัวอย่างในภาคสนาม	31
2.6.2	เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ	31
3.	ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	33
3.1	องค์ประกอบของขนาดอนุภาคและโครงสร้างของตะกอน (sediment structure) ทะเลสาบสงขลา	33
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา	38
3.2.1	ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลา	39
3.2.2	ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	42
3.2.3	ปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	45

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
3.2.4	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	47
3.2.5	ปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	49
3.3	เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนมาของการย่อยตัวอย่างตะกอน	52
3.4	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา	52
3.4.1	ปริมาณแคดเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา	53
3.4.2	ปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา	54
3.4.3	ปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลสาบสงขลา	57
3.4.4	ปริมาณตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลา	60
3.4.5	ปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลา	63
3.4.6	ปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลา	66
3.4.7	ปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลา	69
3.4.8	ปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา	71
3.5	ความสัมพันธ์ทางสถิติของปัจจัยทางกายภาพและเคมีในตะกอน	74
3.5.1	ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficients)	75
3.5.2	ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal components analysis: PCA)	77
3.6	การจัดกลุ่มข้อมูลด้วย cluster analysis	79
3.7	การจัดกลุ่มข้อมูลร่วมกับการวิเคราะห์ปัจจัยทางกายภาพและเคมีด้วย PCA	80
3.8	การปรับฐานทางธรณีเคมี (geochemical normalization) ของโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาด้วยอลูมิเนียม	83
3.8.1	การแพร่กระจายของโครเมียมหลังจากทำการปรับฐาน	84
3.8.2	การแพร่กระจายของทองแดงหลังจากทำการปรับฐาน	86
3.8.3	การแพร่กระจายของตะกั่วหลังจากทำการปรับฐาน	88
3.8.4	การแพร่กระจายของสังกะสีหลังจากทำการปรับฐาน	90
3.8.5	การแพร่กระจายของแมงกานีสหลังจากทำการปรับฐาน	92
3.8.6	การแพร่กระจายของเหล็กหลังจากทำการปรับฐาน	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.9 ดัชนีบ่งชี้ความรุนแรงของการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา	96
4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	99
4.1 บทสรุป	99
4.2 ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก	111
ก ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง	112
ข การล้างภาชนะและอุปกรณ์ในการทดลอง	114
ค การหาองค์ประกอบของขนาดอนุภาคของตะกอน	116
ง การตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่ออกซิไดซ์ได้ง่ายในตะกอน	120
จ การหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ทั้งหมด	124
ฉ การย่อยตะกอนและสารอ้างอิงมาตรฐาน (certified reference material)	126
ช การวิเคราะห์ตัวแปรหลายตัวด้วยวิธีการทางสถิติ	130
ซ องค์ประกอบขนาดอนุภาคตะกอนทะเลสาบสงขลา	137
ฌ องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา	141
ญ ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา	145
ประวัติผู้เขียน	149

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
1-1	พื้นที่เกษตร (เฉพาะที่เป็นแหล่งกำเนิดลักษณะกระจาย:non-point sources) แบ่งตามลุ่มน้ำย่อย	22
1-2	ความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนจากบริเวณต่างๆ	23
1-3	ความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนจากบริเวณส่วนต่างๆ ของทะเลสาบสงขลา	24
1-4	เกณฑ์ค่ามาตรฐานของตะกอนในแต่ละประเทศ	25
3-1	ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (OC) คาร์บอนทั้งหมด (TC) ไฮโดรเจนทั้งหมด (TH) ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) และซัลเฟอร์ทั้งหมด (TS) ในตะกอนทะเลสาบสงขลาแต่ละตอน	39
3-2	ความเข้มข้นของโลหะในตะกอนมาตรฐาน MESS-1 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน	52
3-3	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา	53
3-4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา	76
3-5	ค่าความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก 2 กลุ่มแรกจากองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา	77
3-6	ค่าความเข้มข้นพื้นฐานเฉลี่ยของโลหะในหินดินดานทั่วไป (mg/kg)	96
3-7	ระดับการปนเปื้อนของตะกอนที่ได้จากการคำนวณค่า Igeo	97
ก-1	พิกัดแสดงตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง	112
ซ-1	องค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอนบริเวณทะเลน้อย	137
ซ-2	องค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนใน	138
ซ-3	องค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนกลาง	139
ซ-4	องค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนนอก	140
ฌ-1	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนบริเวณทะเลน้อย	141
ฌ-2	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนใน	142
ฌ-3	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนกลาง	143
ฌ-4	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนนอก	144
ญ-1	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนบริเวณทะเลน้อย	145
ญ-2	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนใน	146

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
ญ-3	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนกลาง	147
ญ-4	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนบริเวณทะเลสาบตอนนอก	148

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1-1	แหล่งที่มาของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในตะกอนจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์	6
1-2	ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของโลหะหนักในแหล่งน้ำกับสภาวะฟิสิโคเคมิกัลของแหล่งน้ำ	7
1-3	ไดอะแกรมสามเหลี่ยมสำหรับเรียกชื่อตะกอนตามสัดส่วนขององค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอน	10
1-4	การใช้ที่ดินและปัญหามลพิษต่างๆ ในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา	19
2-1	จุดเก็บตัวอย่างในทะเลสาบสงขลา	28
3-1	ไดอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงการกระจายตัวของโครงสร้างดินตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้ง 74 สถานี	34
3-2	รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดทรายในตะกอนทะเลสาบสงขลา	35
3-3	รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดทรายแป้งในตะกอนทะเลสาบสงขลา	36
3-4	รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดดินเหนียวในตะกอนทะเลสาบสงขลา	37
3-5	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	40
3-6	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลา	41
3-7	ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์และคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	42
3-8	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	43
3-9	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	44
3-10	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	45
3-11	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	46
3-12	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	47
3-13	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	48

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
3-14	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	49
3-15	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา	51
3-16	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	54
3-17	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา	55
3-18	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	57
3-19	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลสาบสงขลา	59
3-20	ปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้ในตะกอนทะเลสาบสงขลา	60
3-21	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลา	62
3-22	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	63
3-23	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลา	65
3-24	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	66
3-25	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลา	68
3-26	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	69
3-27	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลา	70
3-28	Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75	72
3-29	รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา	73
3-30	Loading plot จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีในตะกอนทะเลสาบสงขลา	
3-31	Dendogram แสดงการจัดกลุ่มด้วย cluster analysis	81
3-32	การแบ่งกลุ่มของสถานีเก็บตัวอย่างตาม cluster analysis	82

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
3-33	ภาพแสดงการจัดกลุ่มข้อมูลร่วมกับการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้ PCA	83
3-34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียมกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (เส้นทึบ) และแถบแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (เส้นประบาง)	84
3-35	รูปแบบการแพร่กระจายของโครเมียมหลังจากทำการปรับฐานแล้ว	85
3-36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	86
3-37	รูปแบบการแพร่กระจายของทองแดงหลังจากทำการปรับฐานแล้ว	87
3-38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกั่วกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	88
3-39	รูปแบบการแพร่กระจายของตะกั่วหลังจากทำการปรับฐานแล้ว	89
3-40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	90
3-41	รูปแบบการแพร่กระจายของสังกะสีหลังจากทำการปรับฐานแล้ว	91
3-42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมงกานีสกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	92
3-43	รูปแบบการแพร่กระจายของแมงกานีสหลังจากทำการปรับฐานแล้ว	93
3-44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	94
3-45	รูปแบบการแพร่กระจายของเหล็กหลังจากทำการปรับฐานแล้ว	95

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
3-46	กราฟที่ plot ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะและ Igeo index โดยเส้นประเป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระดับของการปนเปื้อนในตะกอนโดยยึดหลักจากค่าของดัชนีการสะสมเชิงธรณี	98
ข-1	ตู้ปลอดฝุ่น (laminar flow cabinet) class 100	114
ข-2	การผึ่งอุปกรณ์ให้แห้งในตู้ปลอดฝุ่น	115
ข-3	อุปกรณ์ที่แห้งแล้วบรรจุในถุงพลาสติกและปิดผนึกมิดชิดพร้อมที่จะใช้งาน	115
ค-1	ลักษณะของแท่งคนตะกอน	117
ฉ-1	ภาชนะอัดความดันเทฟลอน (teflon bomb)	127
ฉ-2	หม้ออัดความดัน (microwave pressure cooker) ผลิตภัณฑ์ NordicWare® รุ่น TENDER COOKER	127
ฉ-3	โกร่งโมราและสากโมรา (Agate mortar and pestle)	128
ฉ-4	การวางหม้ออัดความดันและบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำไว้ภายในไมโครเวฟ	129