

## บทที่ 3

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

ดำเนินการเก็บตัวอย่างตะกอนทะเลสาบทั้ง 74 สถานี ดังนี้ สถานี N1-N15 เก็บตัวอย่างวันที่ 16 ธ.ค.2546, สถานี S1-S9 เก็บตัวอย่างวันที่ 13 ธ.ค.2546, สถานี S10-S26 เก็บตัวอย่างวันที่ 14 ธ.ค.2546, สถานี S27-S32 เก็บตัวอย่างวันที่ 21 ม.ค.2547 และ สถานี S33-S59 เก็บตัวอย่างวันที่ 13 ม.ค.2547 พิกัดภูมิศาสตร์ของตำแหน่งเก็บตัวอย่างทั้ง Easting (X) และ Northing (Y) ในระบบ WGS 84 zone 47N-UTM และ ในระบบ latitude-longitude แสดงไว้ในตารางที่ ก-1 และ ก-2 ในภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และโลหะหนักของแต่ละตัวอย่าง รวมทั้งผลการวิเคราะห์ทางสถิติ มีรายละเอียดดังนี้

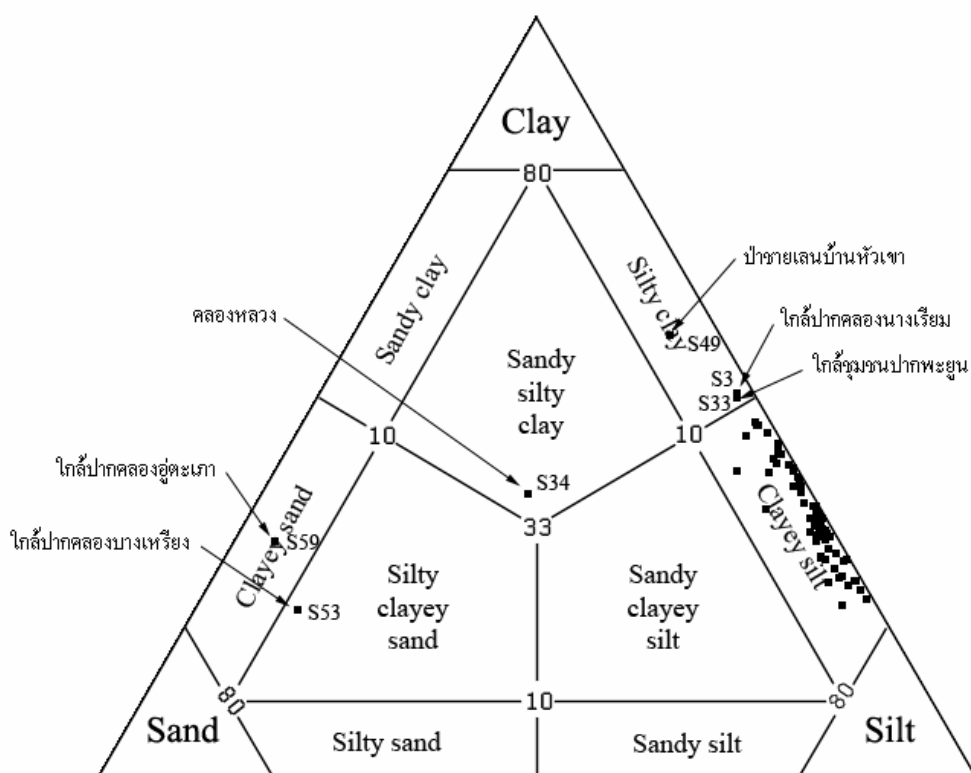
#### 3.1 องค์ประกอบของขนาดอนุภาคและโครงสร้างของตะกอน (sediment structure) ทะเลสาบสงขลา

ข้อมูลองค์ประกอบขนาดอนุภาคของตะกอน แสดงในตารางผนวกที่ ซ-1 ถึง ซ-4 ในภาคผนวก ซ เมื่อ plot ในไดอะแกรมรูปสามเหลี่ยมโดยใช้โปรแกรม Golden Software Grapher 3 แล้วนำไปซ้อนทับกับไดอะแกรมสามเหลี่ยมที่ใช้เรียกชื่อตะกอนตามสัดส่วนขององค์ประกอบของขนาดอนุภาคตะกอนตามวิธีของ Gorsline (1960) อ้างถึงใน Sompongchaiyakul (1989) ดังภาพประกอบที่ 3-1 พบว่าองค์ประกอบขนาดอนุภาคของตะกอนในทะเลสาบสงขลาส่วนใหญ่เป็นทรายแป้งปนดินเหนียว (clayey silt) มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียดถึงหยาบเล็กน้อย เมื่อพิจารณาตามพื้นที่ พบว่า

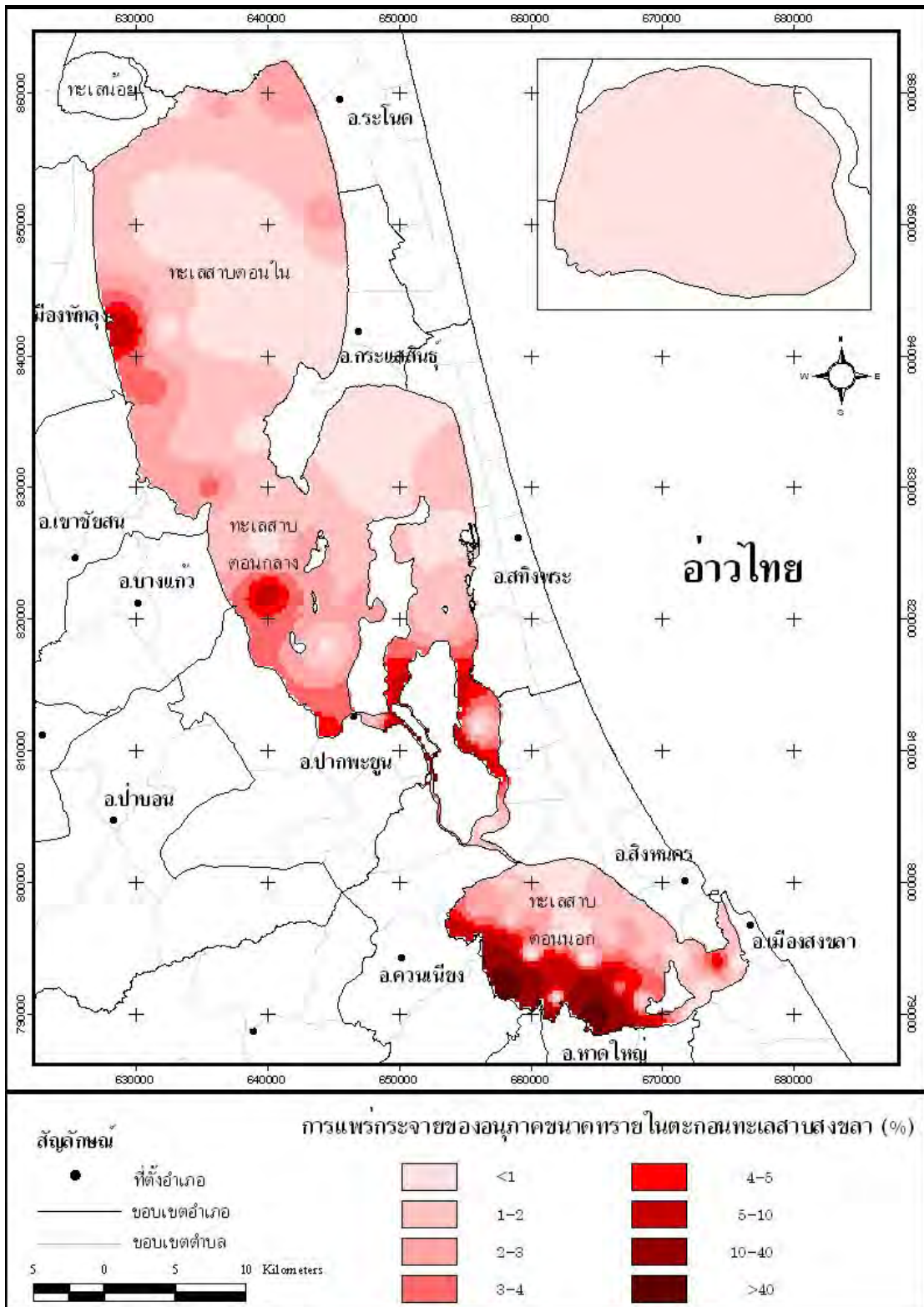
- ทะเลน้อยมีโครงสร้างตะกอนเป็นทรายแป้งปนดินเหนียวทั้งหมด
- ทะเลสาบตอนในมีโครงสร้างตะกอนเป็นทรายแป้งปนดินเหนียวเกือบทั้งหมด ยกเว้น สถานี S03 ที่อยู่บริเวณใกล้ปากคลองนางริยมซึ่งเชื่อมต่อระหว่างทะเลน้อยและทะเลสาบสงขลา มีลักษณะโครงสร้างตะกอนเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง (silty clay) ซึ่งมีลักษณะตะกอนที่ค่อนข้างละเอียดมากกว่า clayey silt เล็กน้อย

- ทะเลสาบตอนกลางมีโครงสร้างตะกอนส่วนใหญ่เป็นทรายแป้งปนดินเหนียว เช่นเดียวกับกับทะเลสาบตอนบน ยกเว้นสถานี S33 (ใกล้ห่มชนปากพะยูน) และ สถานี S34 (คลองหลวง) โดย สถานี S33 มีโครงสร้างของตะกอนเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง ส่วนสถานี S34 เป็นดินเหนียวที่มีทรายและทรายแป้งปน (sandy silty clay)
- ทะเลสาบตอนนอกมีโครงสร้างตะกอนส่วนใหญ่เป็นทรายแป้งปนดินเหนียว เช่นเดียวกับกับทะเลสาบสงขลาส่วนอื่นๆ ยกเว้นสถานี S49(บริเวณป่าชายเลนบ้านหัวเขา) มีโครงสร้างของตะกอนเป็นดินเหนียวปนทรายแป้ง, สถานี S53 (ใกล้ปากคลองบางเหริยง) เป็นทรายที่มีทรายแป้งและดินเหนียวปน (silty clayey sand)และ สถานี S59 (ใกล้ปากคลองอู่ตะเภา) เป็นทรายที่มีดินเหนียวปน (clayey sand)

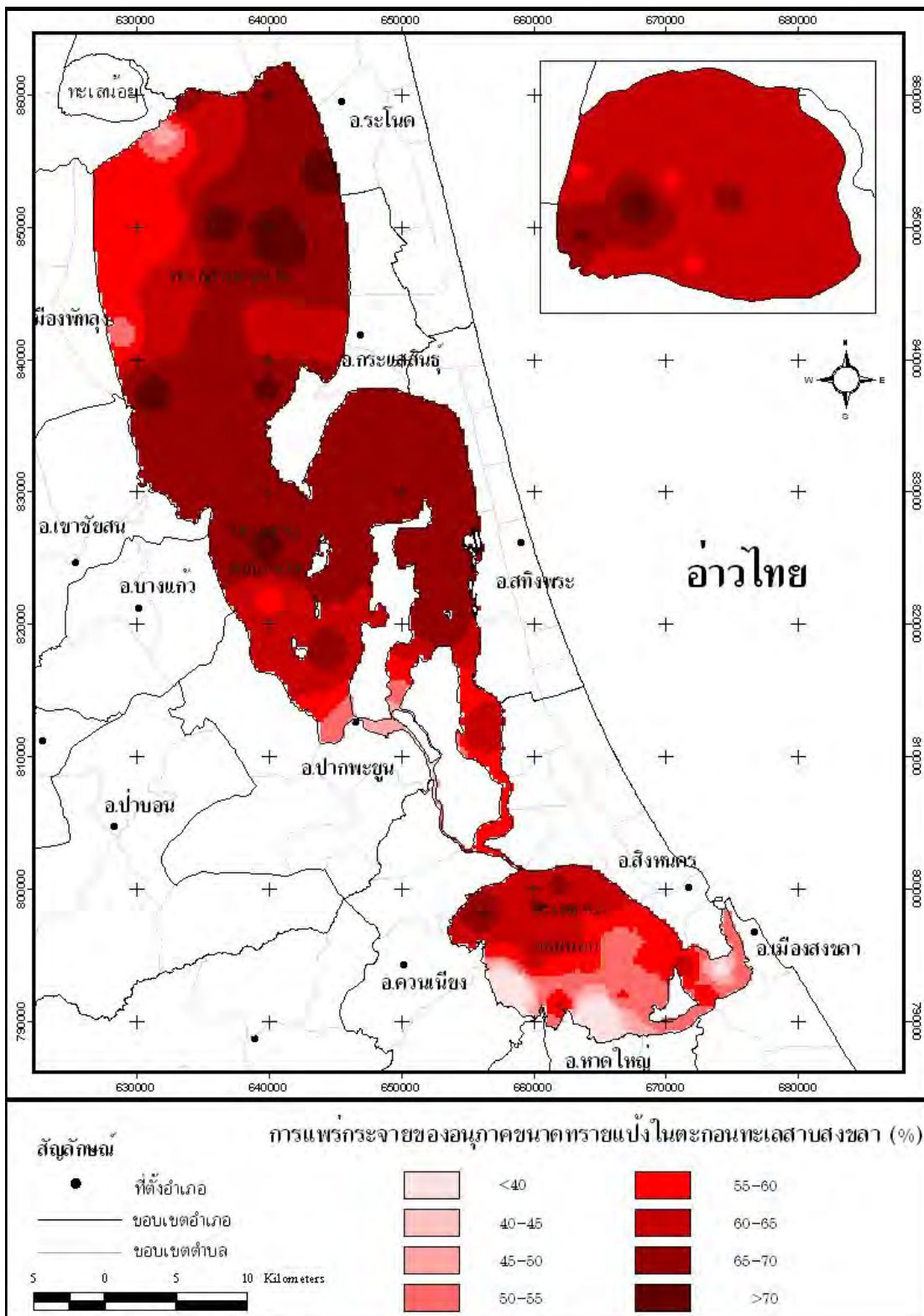
การนำข้อมูลองค์ประกอบ โครงสร้างของอนุภาคตะกอนมาวิเคราะห์เชิงพื้นที่ได้รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวในตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้งระบบ ดังภาพที่ 3-2, 3-3 และ 3-4 ตามลำดับ



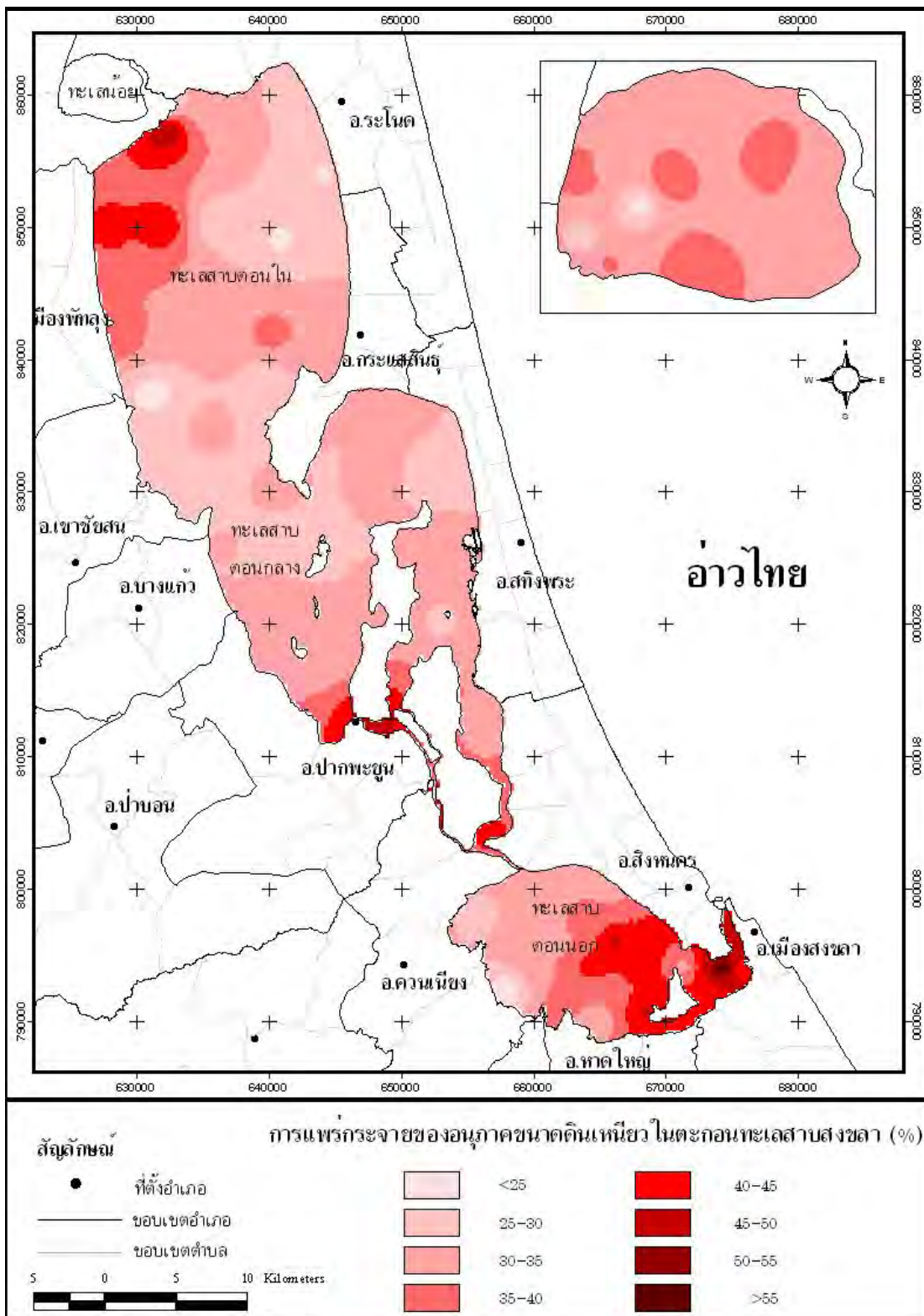
ภาพประกอบที่ 3-1 ไคอะแกรมสามเหลี่ยมแสดงการกระจายตัวของโครงสร้างดินตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้ง 74 สถานี



ภาพประกอบที่ 3-2 รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดทรายในตะกอนทะเลสาบสงขลา



ภาพประกอบที่ 3-3 รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดทรายแป้งในตะกอนทะเลสาบสงขลา



ภาพประกอบที่ 3-4 รูปแบบการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดดินเหนียวในตะกอนทะเลสาบสงขลา



เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลจากการศึกษาในครั้งนี้กับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่า โครงสร้างตะกอนทะเลสาบสงขลาไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แม้จะมีการเรียกชื่อที่แตกต่างกันไปบ้าง โครงสร้างตะกอนในทะเลสาบตอนใน ตอนกลาง และตอนนอกในช่วง พ.ศ.2521-2522 ส่วนใหญ่ประกอบด้วยทรายแป้งเป็นหลัก (ณรงค์ ณ เชียงใหม่, 2522) อำนาจ ศิริเพชร (2543) ศึกษาในทะเลสาบตอนกลาง ในช่วง พ.ศ.2541-2542 พบว่าตะกอนส่วนใหญ่เป็น silty clay loam คือประกอบด้วยทรายแป้งเป็นส่วนใหญ่ วิเชียร จาภูพจน์ และคณะ (2537) พบว่าโครงสร้างตะกอนในทะเลสาบสงขลาตอนนอก ในช่วง พ.ศ.2534-2536 เป็น silty clay ถึง light clay มีทรายแป้งเป็นองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงบ่งชี้ได้ว่าโครงสร้างของตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้งระบบเป็นทรายแป้งปนดินเหนียว มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างละเอียด ขนาด <math>< 63 \mu\text{m}</math> มากเกินกว่า 90% เกือบทั้งทะเลสาบ ซึ่งตะกอนที่มีขนาด <math>< 63 \mu\text{m}</math> นี้ จะมีโครงสร้างทางเคมีที่สามารถดูดซับสารอาหารและโลหะหนักได้มาก เพราะมีองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (clay mineral) และมีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะสูง จึงพบว่าความเข้มข้นของโลหะจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตะกอนลดลง (Bentivegna *et al.*, 2004; Moore *et al.*, 1989 อ้างใน Ong *et al.*, 2006; DON, 2000; Loring and Rantala, 1995) ดังนั้นสารอาหารและโลหะหนักที่ลงสู่ทะเลสาบสงขลาจะสะสมอยู่ในตะกอน และเมื่อใดที่สภาวะทางฟิสิกส์เคมี (physicochemical condition) ในแหล่งน้ำเปลี่ยนแปลงไป ทำให้โลหะหนักที่สะสมอยู่ในตะกอนถูกปลดปล่อยกลับออกสู่มวลน้ำ ตะกอนซึ่งกลายเป็น sink ของสารอาหารและโลหะหนัก ก็จะกลายเป็น source ได้

### 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา

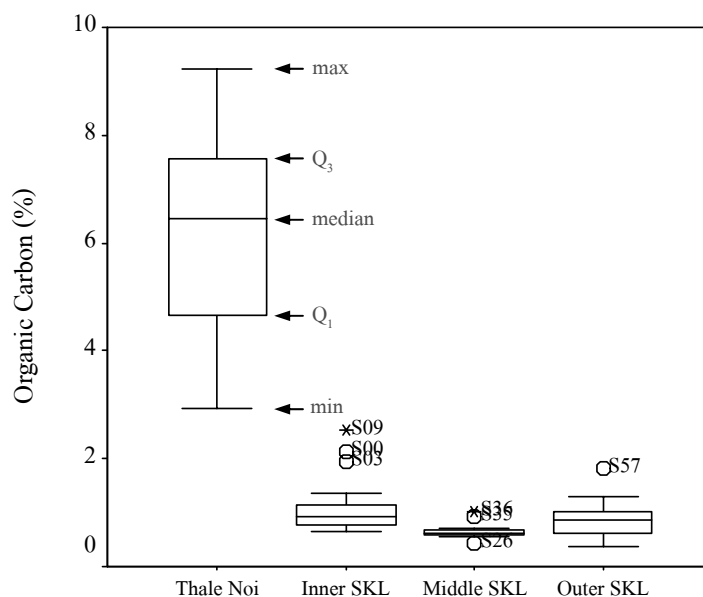
ค่าเฉลี่ย ช่วงค่าและค่ามัธยฐานขององค์ประกอบทางเคมี (คาร์บอนอินทรีย์ คาร์บอนทั้งหมด ไฮโดรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมด และซัลเฟอร์ทั้งหมด) ในตะกอนทะเลสาบสงขลาแต่ละตอน แสดงในตารางที่ 3-1 ส่วนรายละเอียดผลการวิเคราะห์ในแต่ละสถานีรายงานไว้ในภาคผนวกที่ ๘ ตารางผนวกที่ ๘-1 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลน้อย ตารางผนวกที่ ๘-2 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลสาบตอนใน ตารางผนวกที่ ๘-3 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลสาบตอนกลาง และตารางผนวกที่ ๘-4 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลสาบตอนนอก

ตารางที่ 3-1 ค่าเฉลี่ย ช่วงและค่ามัธยฐานของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ (OC), คาร์บอนทั้งหมด (TC), ไฮโดรเจนทั้งหมด (TH), ไนโตรเจนทั้งหมด (TN) และซัลเฟอร์ทั้งหมด (TS) ในตะกอนทะเลสาบสงขลาแต่ละตอน

พื้นที่		OC (%)	TC (%)	TH (%)	TN (%)	TS (%)
ทะเลน้อย	ค่าเฉลี่ย	6.24±1.79	7.94±2.91	1.63±0.40	0.71±0.24	1.81±0.68
	อยู่ในช่วง	2.93-9.22	3.49-14.45	1.01-2.41	0.38-1.30	0.88-3.18
	ค่ามัธยฐาน	6.45	7.60	1.52	0.69	1.69
ตอนใน	ค่าเฉลี่ย	1.09±0.49	1.29±0.47	0.59±0.10	0.25±0.10	0.27±0.12
	อยู่ในช่วง	0.64-2.52	0.83-2.76	0.38-0.88	0.07-0.50	0.11-0.72
	ค่ามัธยฐาน	0.93	1.19	0.59	0.26	0.25
ตอนกลาง	ค่าเฉลี่ย	0.66±0.14	0.75±0.15	0.56±0.13	0.14±0.08	0.14±0.04
	อยู่ในช่วง	0.43-1.01	0.59-1.10	0.39-0.83	0.03-0.32	0.06-0.20
	ค่ามัธยฐาน	0.62	0.71	0.53	0.15	0.14
ตอนนอก	ค่าเฉลี่ย	0.88±0.31	0.99±0.47	0.66±0.22	0.23±0.17	0.27±0.17
	อยู่ในช่วง	0.38-1.83	0.38-2.64	0.27-1.18	0.02-0.67	0.03-0.68
	ค่ามัธยฐาน	0.85	0.89	0.68	0.20	0.22

### 3.2.1 ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ 6.24±1.79%, 1.09±0.49%, 0.66±0.14% และ 0.88±0.31% ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 6.45%, 0.93%, 0.62% และ 0.85% ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-5 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 ( $Q_1$ ) และ ค่า percentile ที่ 75 ( $Q_3$ ) ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ตามพื้นที่ แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-6

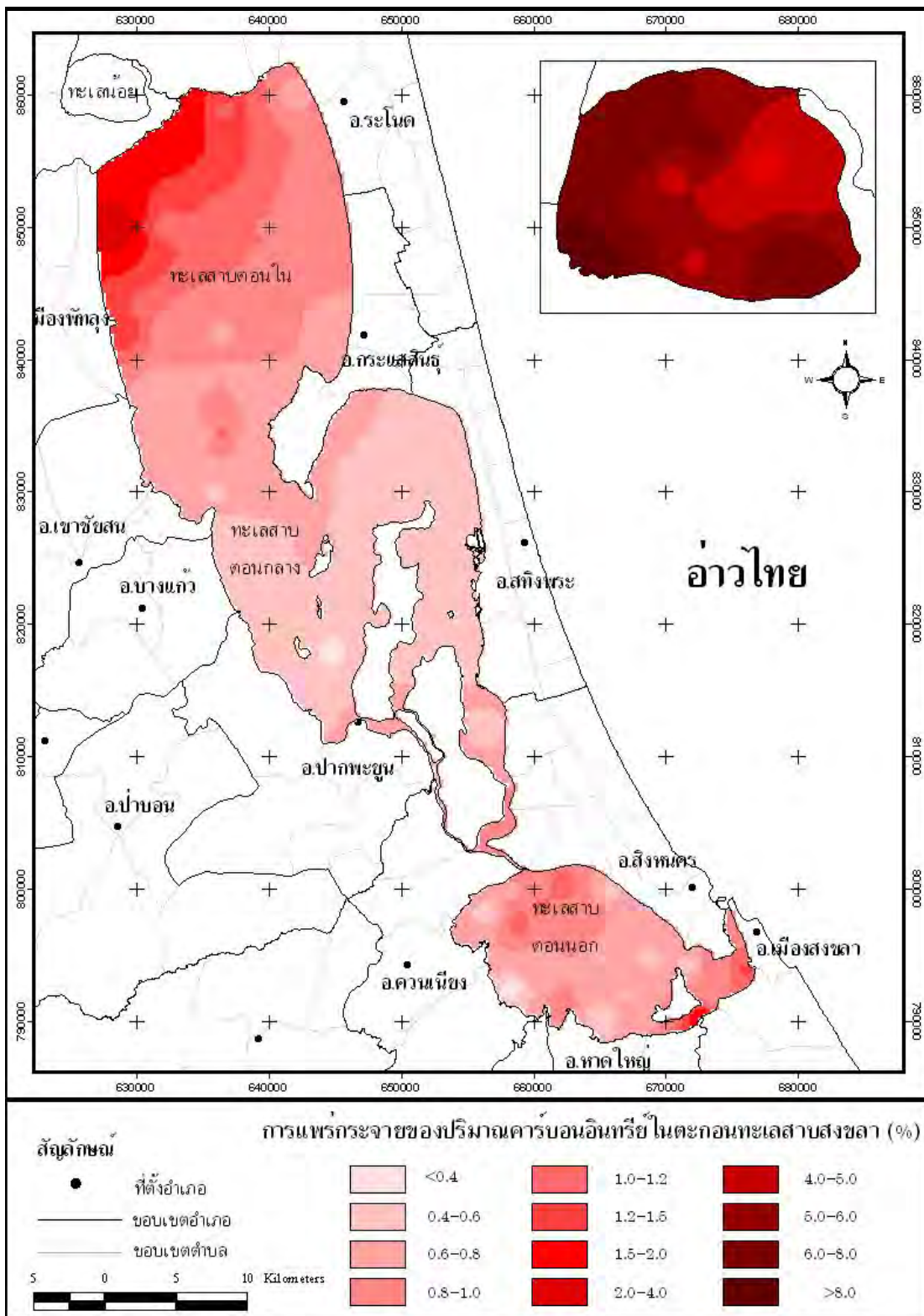


ภาพประกอบที่ 3-5 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

จากภาพประกอบที่ 3-5 และ 3-6 จะเห็นว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลาสะสมมากที่สุดที่สถานี N5 ก็ยังมีค่าสูงกว่าค่าสูงสุดในทะเลสาบตอนอื่นๆ ค่าสูงสุดพบที่สถานี N8 (ใกล้ชุมชนทะเลน้อย) สำหรับทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S20 และสูงสุดที่สถานี S09 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S26 และสูงสุดที่สถานี S36 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S57 (ใกล้ปากคลองพะวง) การที่ทะเลน้อยมีการสะสมของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ที่สูงกว่าส่วนอื่นมาก โดยมีความเฉลี่ยอยู่ที่ 6.24% ขณะที่ทะเลสาบส่วนอื่นมีค่าเฉลี่ย  $\leq 1\%$  เนื่องจากทะเลน้อยเป็นทะเลสาบน้ำจืด ลักษณะสภาพแวดล้อม เป็นส่วนหนึ่งของพรุควนเคื่อง มีการถ่ายเทมวลน้ำค่อนข้างน้อย มีพืชน้ำประเภทต่างๆ ขึ้นอยู่เป็นจำนวนมาก พืชน้ำเหล่านี้เจริญเติบโต และทับถมเน่าเปื่อยสะสมอยู่ในทะเลน้อย เป็นวัฏจักร

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาในอดีตพบว่าสอดคล้องและใกล้เคียงกัน โดยในทะเลสาบตอนในและตอนกลาง เพราะพรหม แสงสกุล (2528) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.22% (0.63-2.65%) และสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.54% (0.41-3.47%) ส่วนทะเลสาบตอนนอก โดยณรงค์ ฒ เชียงใหม่ และคณะ (2522) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 (0.82-1.30%) และวิเชียร จากุพจน์ และคณะ (2537) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.24% (0.28-2.28%)



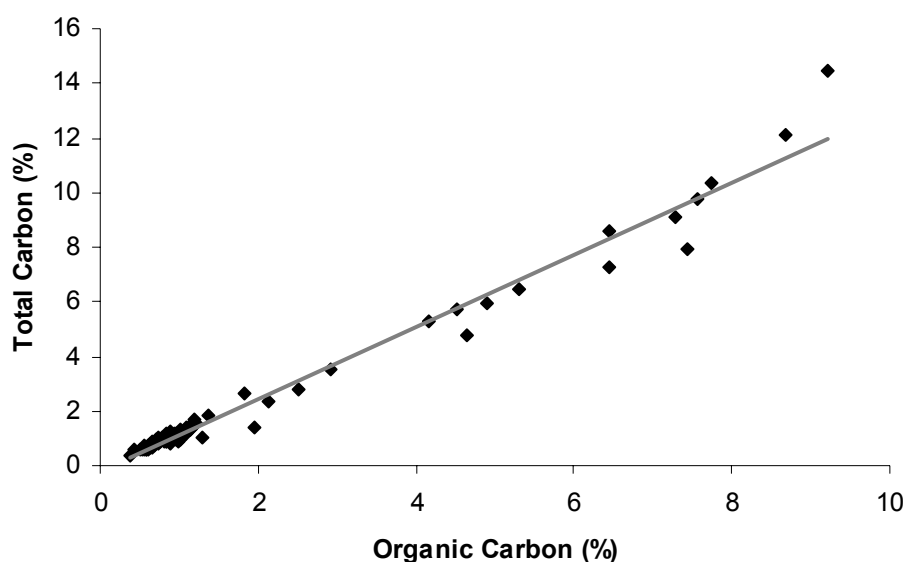


ภาพประกอบที่ 3-6 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลา

จากข้อมูลทั้งหมดเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในทะเลสาบสงขลาทั้งระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย แสดงว่าอัตราการการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในตะกอนน่าจะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการทับถม และสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำถูกพัดพาออกสู่ทะเลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งน่าจะเกิดในฤดูฝนซึ่งมีปริมาณน้ำท่าสูงกว่าฤดูแล้งมาก ทำให้ไม่เกิดการสะสมในทะเลสาบ ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปของ วิเชียร จาญพนัน และคณะ (2537) แม้ว่าคาร์บอนอินทรีย์ที่สะสมในตะกอนทะเลสาบยังมีค่าไม่สูงมาก แต่หากไม่มีการควบคุมแหล่งกำเนิด ทำให้มีสารอินทรีย์สะสมมากขึ้นไป จะทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรมได้ เพราะการย่อยสลายสารอินทรีย์จะใช้ออกซิเจนไปจนแหล่งน้ำขาดออกซิเจนจนไม่พอต่อการหายใจของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้สารอินทรีย์ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเคลื่อนย้าย ทับถม และเก็บกักโลหะหนักในตะกอน (Loring and Rantala, 1995)

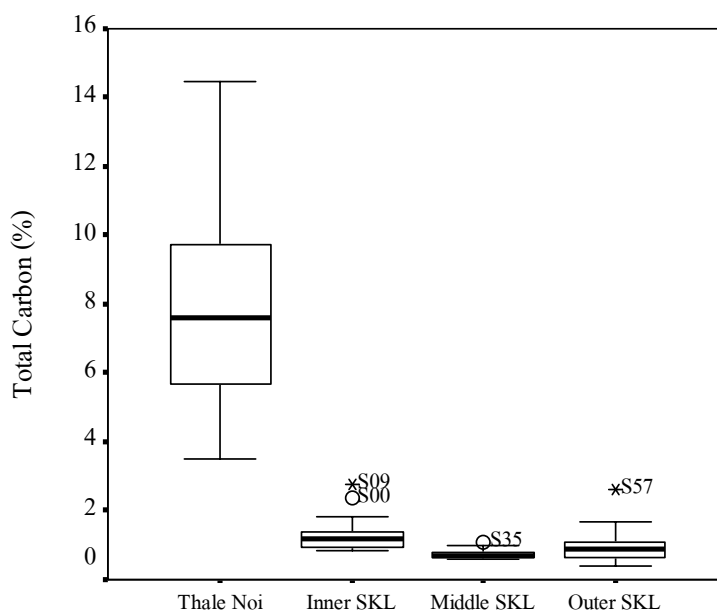
### 3.2.2 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับคาร์บอนอินทรีย์ ยกเว้นเมื่อ TC สูงๆ คาร์บอนส่วนที่เนื่องต่อการทำปฏิกิริยาเคมีจะมีมากขึ้น ดังภาพประกอบที่ 3-7 โดยคาร์บอนส่วนที่เนื่องต่อการทำปฏิกิริยาเคมีและย่อยสลายซากพวกนี้พีชีน้ำจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก



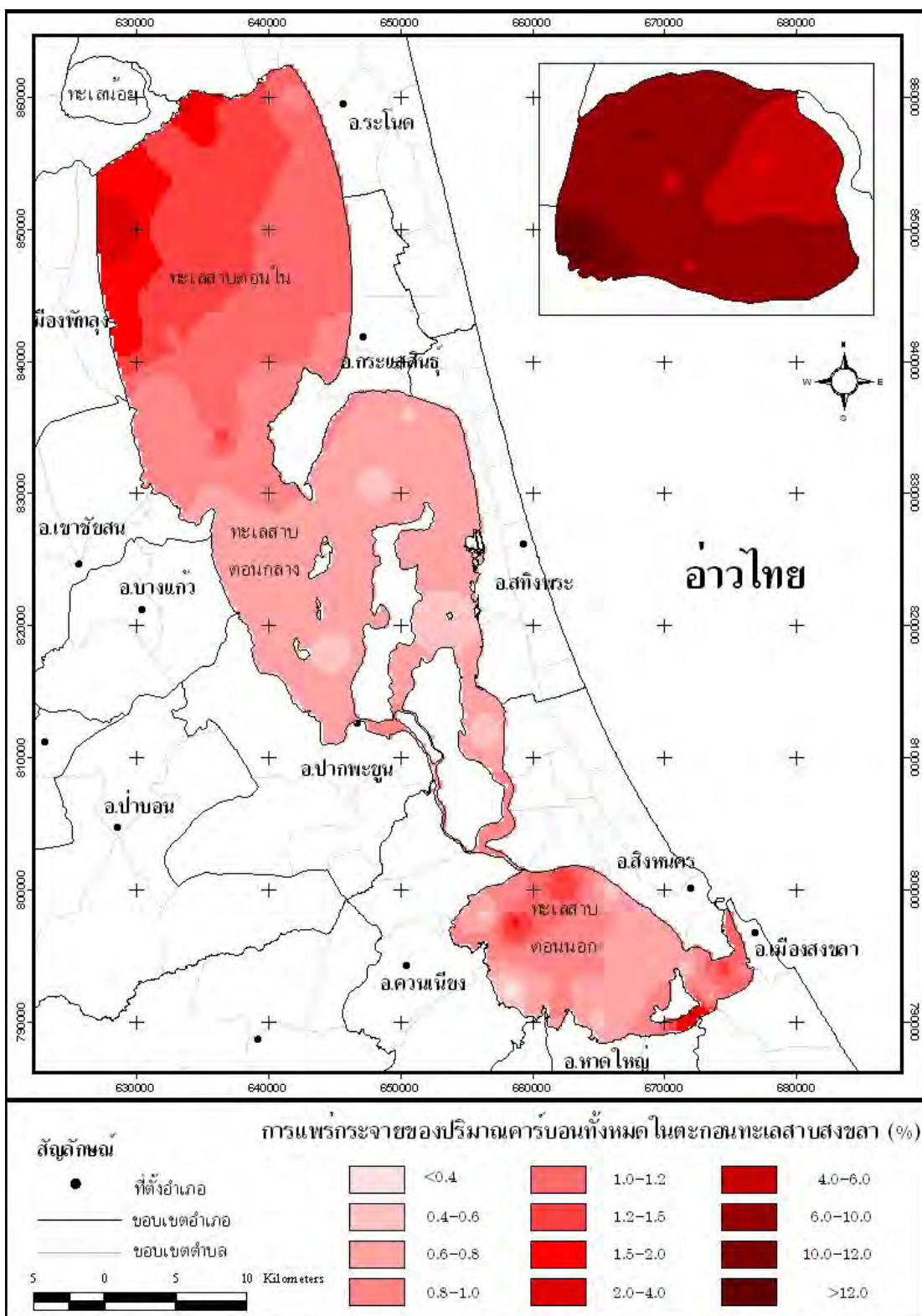
ภาพประกอบที่ 3-7 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์และคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $7.94 \pm 2.91\%$ ,  $1.29 \pm 0.475\%$ ,  $0.75 \pm 0.15\%$  และ  $0.99 \pm 0.47\%$  ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน  $7.60\%$ ,  $1.19\%$ ,  $0.71\%$  และ  $0.89\%$  ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-8 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณคาร์บอนทั้งหมดตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-9



ภาพประกอบที่ 3-8 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

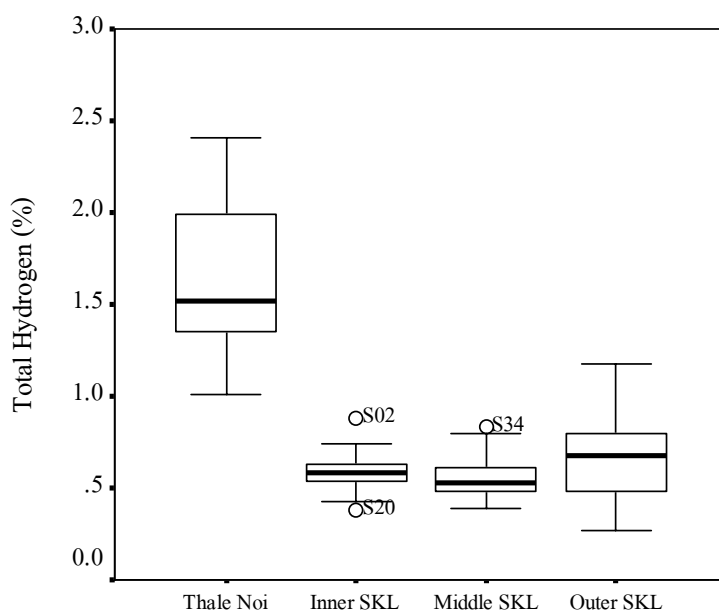
เนื่องจากปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในทะเลสาบสงขลา มีการสะสมในทิศทางเดียวกันกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ คือ รูปแบบการแพร่กระจาย (ภาพประกอบที่ 3-6) สอดคล้องและใกล้เคียงกับภาพประกอบที่ 3-9 และมีค่าต่ำสุดและสูงสุดที่สถานีเดียวกัน ยกเว้น ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S31 และสูงสุดที่สถานี S35 โดย OC มีค่าประมาณ 88% ของ TC แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนส่วนใหญ่ในตะกอนทะเลสาบสงขลาเป็นอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลาย (ออกซิไดซ์) ได้ง่าย



ภาพประกอบที่ 3-9 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.2.3 ปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

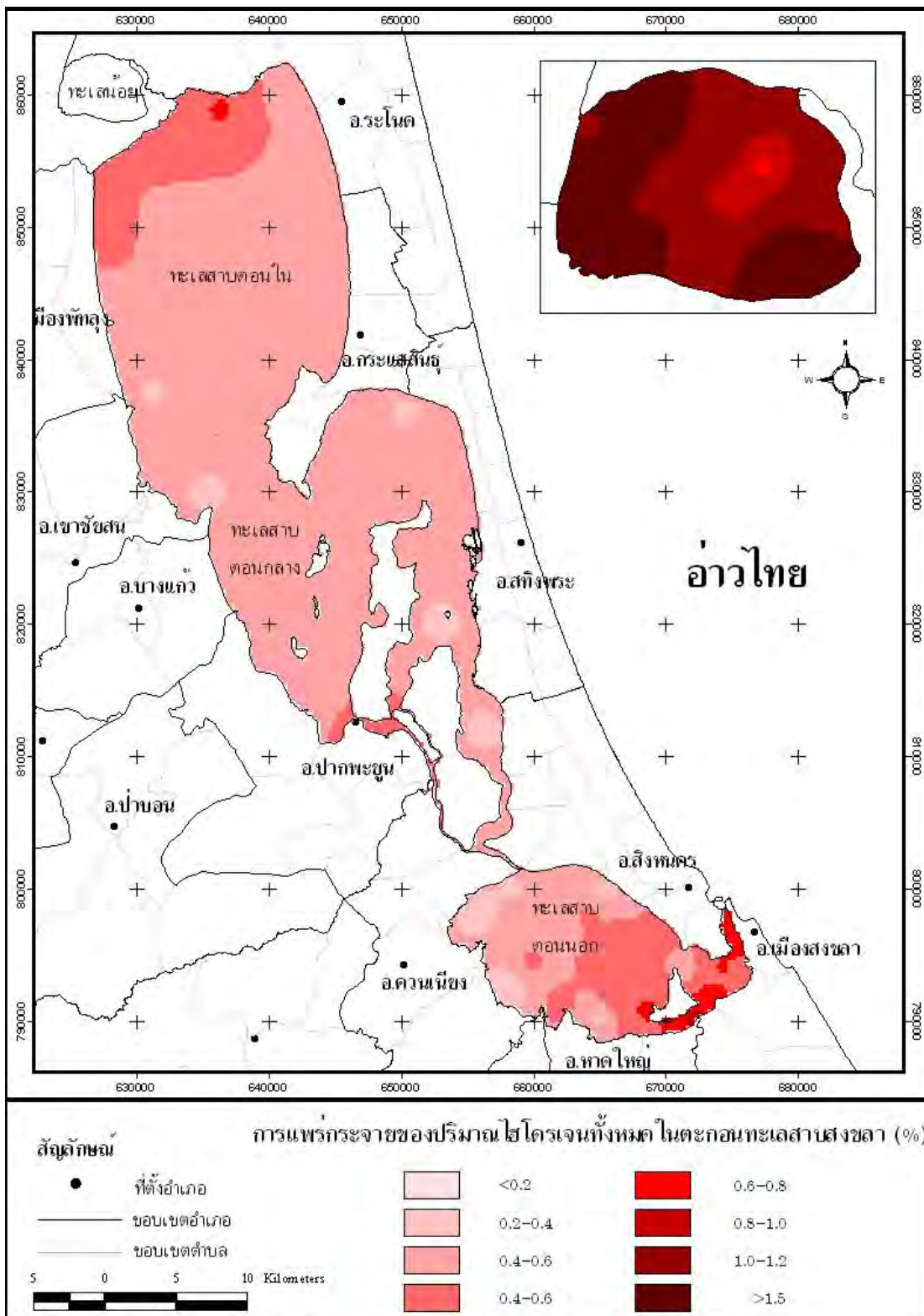
ค่าเฉลี่ยปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา โดยแบ่งตามระดับความลึก (ทะเลสาบตอนใน, ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก) มีค่าเท่ากับ  $1.63 \pm 0.40\%$ ,  $0.59 \pm 0.10\%$ ,  $0.56 \pm 0.13\%$  และ  $0.66 \pm 0.22\%$  ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 1.52%, 0.59%, 0.53% และ 0.68% ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-10 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดตามพื้นที่ที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-11



ภาพประกอบที่ 3-10 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณไฮโดรเจนทั้งหมดในทะเลสาบสงขลา มีการสะสมในทิศทางเดียวกันกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และคาร์บอนทั้งหมด เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของอินทรียสาร คือ  $\text{CH}_2\text{O}$  จึงพบว่าการสะสมในทะเลสาบสงขลาเหมือนกัน และมีค่าต่ำสุดและสูงสุดที่สถานีเดียวกัน ส่วนตัวทะเลสาบอีก 3 ส่วน สถานีที่ต่ำสุดและสูงสุดจะแตกต่างกันไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีแหล่งกำเนิดที่ซับซ้อนกว่าทะเลสาบสงขลา โดยทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S32 และสูงสุดที่สถานี S34 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S57

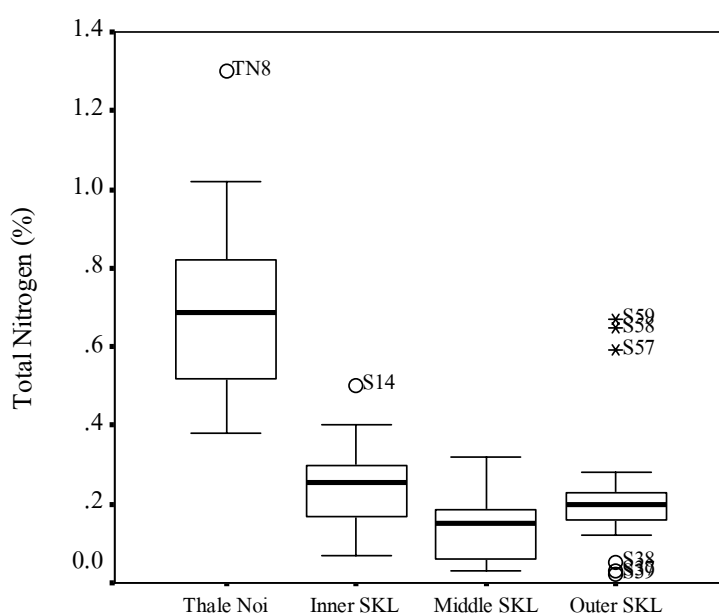




ภาพประกอบที่ 3-11 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.2.4 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

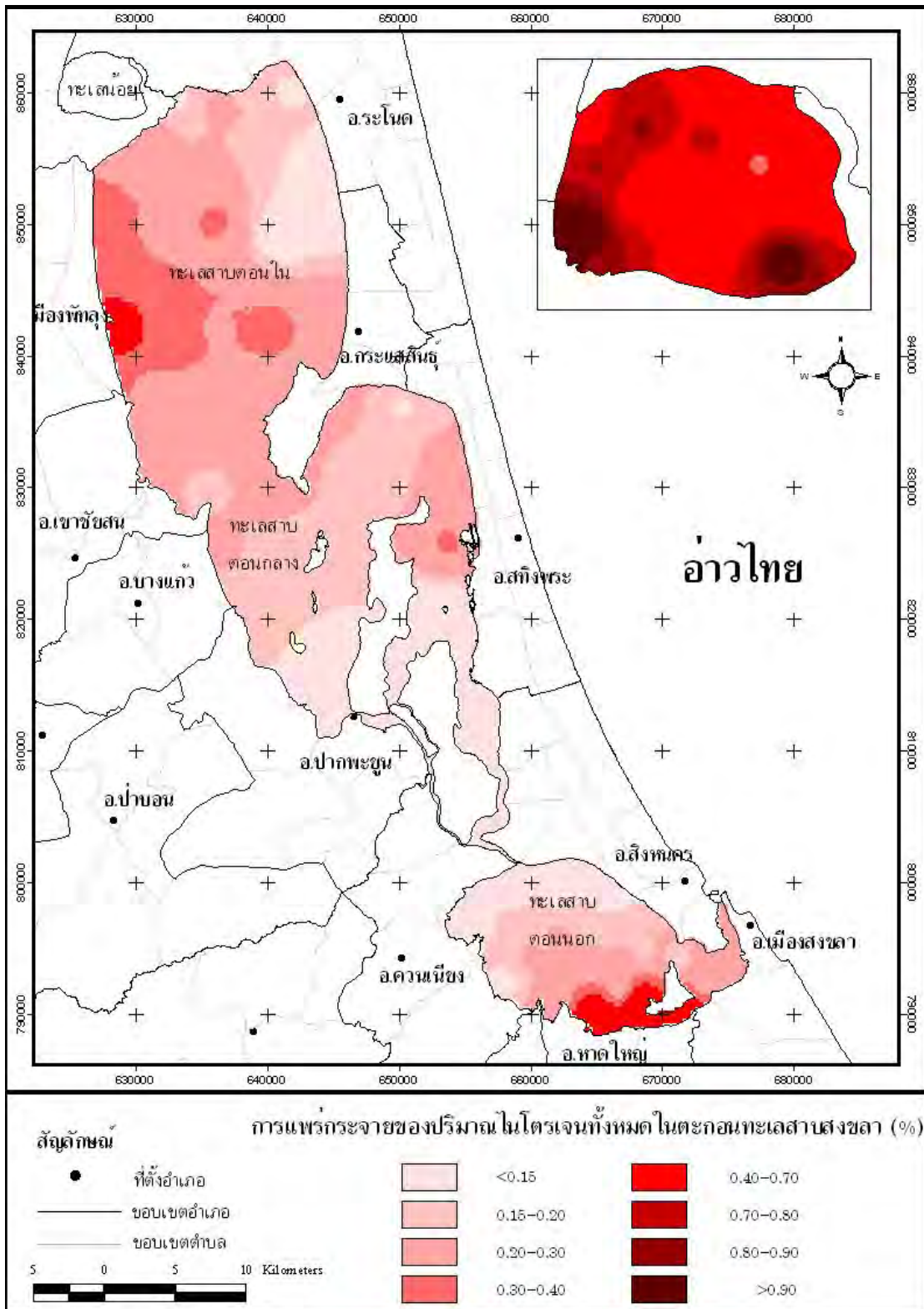
ค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาในตะกอนทะเลสาบตอนใน ตะกอนทะเลสาบตอนกลาง และตะกอนทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $0.71 \pm 0.24\%$ ,  $0.25 \pm 0.10\%$ ,  $0.14 \pm 0.08\%$  และ  $0.23 \pm 0.17\%$  ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน  $0.69\%$ ,  $0.26\%$ ,  $0.15\%$  และ  $0.20\%$  ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-12 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบที่ 3-12 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในทะเลสาบสงขลา มีการสะสมในทิศทางเดียวกันกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอน คาร์บอนทั้งหมด และไฮโดรเจนทั้งหมด และทะเลน้อยพบสะสมค่าสุดที่สถานี N5 และสูงสุดที่สถานี N8 เช่นเดียวกับ OC, TC และ TH ทะเลสาบตอนในมีค่าค่าสุดที่สถานี S06 และสูงสุดที่สถานี S14 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าค่าสุดที่สถานี S34 และสูงสุดที่สถานี S30 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าค่าสุดที่สถานี S39 และสูงสุดที่สถานี S59 การที่สถานีที่มีค่าค่าสุดและสูงสุดในทะเลสาบหลักมีค่าแตกต่างจาก OC, TC และ TH แสดงให้เห็นถึงแหล่งกำเนิดในทะเลสาบหลักมีความหลากหลายของแหล่งกำเนิดของแต่ละพารามิเตอร์มากกว่าทะเลน้อย นอกจากนี้การสะสมไนโตรเจนที่สูงตามกับปริมาณคาร์บอนอินทรีย์แสดงว่าหากสารอินทรีย์ในตะกอนทะเลสาบสงขลา โดยเฉพาะทะเลน้อย ย่อยสลายก็จะปลดปล่อยสารอาหารไนโตรเจนออกสู่มวลน้ำ



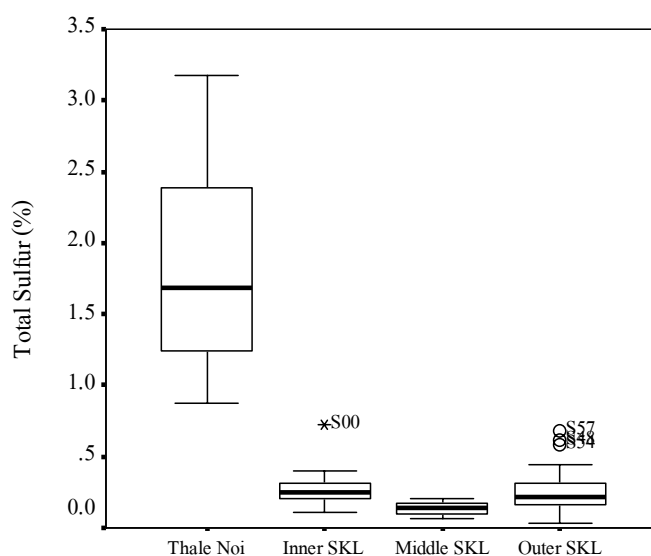


ภาพประกอบที่ 3-13 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าในส่วนการสะสมของไนโตรเจนในตะกอนทะเลสาบในช่วงที่ผ่านมาทั้ง ทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน และทะเลสาบตอนกลาง มีค่าสูงกว่างานวิจัยของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ที่พบว่ามีค่าเฉลี่ยของไนโตรเจนทั้งหมดในตะกอนที่ระดับ 0-10 เซนติเมตรเท่ากับ 0.33%, 0.09% และ 0.08 % ตามลำดับ ส่วนในบริเวณทะเลสาบตอนนอกก็พบว่าการศึกษารั้งนี้มีค่าสูงกว่างานวิจัยที่ผ่านมาของวิเชียร จาญพจน์ และคณะ (2537) ที่พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.07% และอยู่ในช่วง 0.03-0.12% จากข้อมูลทั้งหมดสรุปได้ว่าทะเลสาบสงขลาทั้งระบบมีการสะสมของอินทรีย์สารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าปัจจุบันตะกอนทะเลสาบเป็นแหล่งสะสม (sink) ของสารอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจนในปริมาณที่สูง ดังนั้นหากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางฟิสิกเคมีกัลของแหล่งน้ำ อาจจะทำให้ตะกอนทะเลสาบสงขลา กลายเป็นแหล่งกำเนิด (source) ของสารอาหารไนโตรเจนซึ่งจะนำไปสู่การเกิดมลภาวะของแหล่งน้ำต่อไปได้

### 3.2.5 ปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $1.81 \pm 0.68\%$ ,  $0.27 \pm 0.12\%$ ,  $0.14 \pm 0.04\%$  และ  $0.27 \pm 0.17\%$  ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 1.69%, 0.25%, 0.14% และ 0.22% ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-14 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณคาร์บอนทั้งหมดตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-15

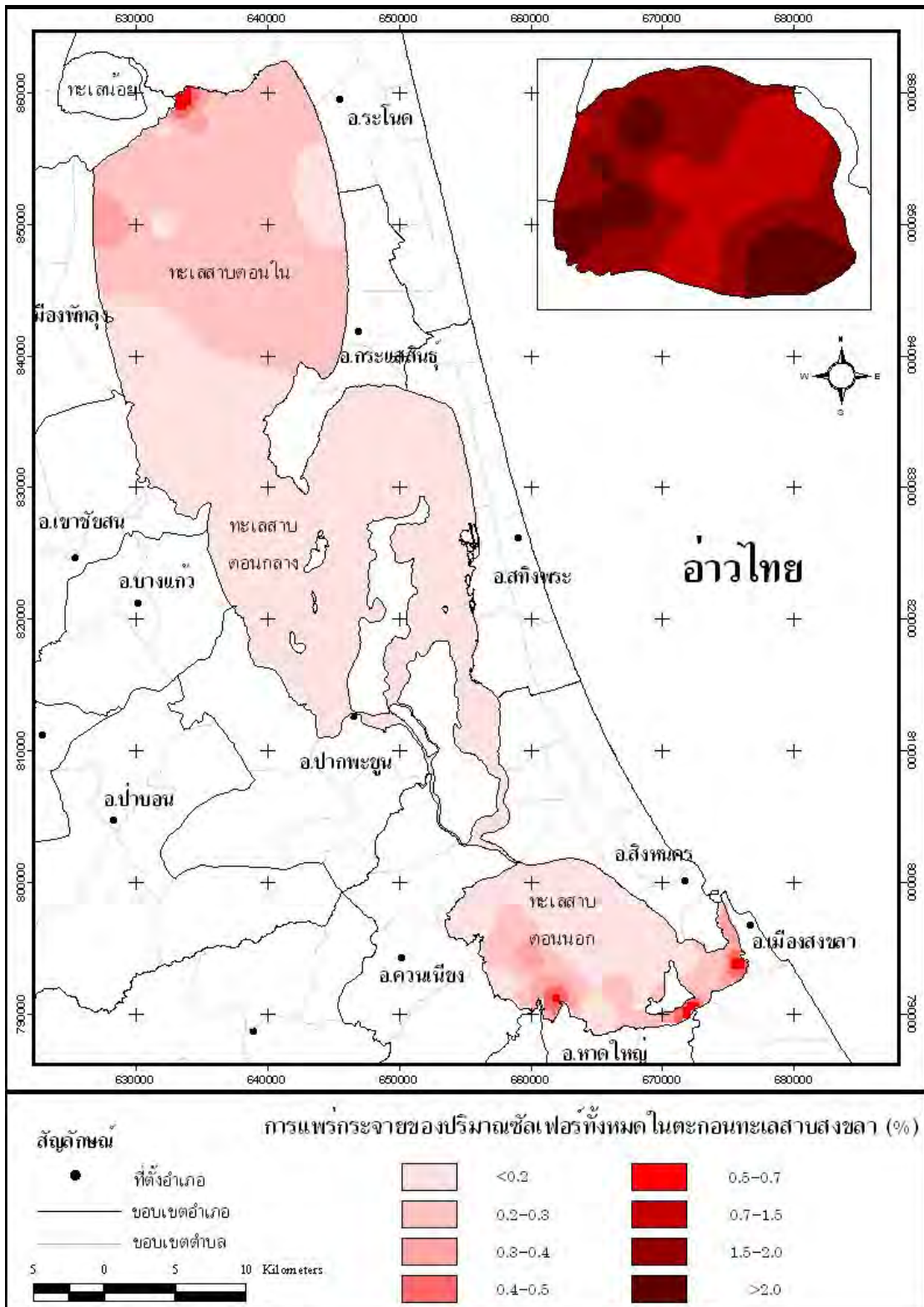


ภาพประกอบที่ 3-14 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดในทะเลสาบสงขลามีการสะสมไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอน คาร์บอนทั้งหมด ไฮโดรเจนทั้งหมด และไนโตรเจนทั้งหมดโดยมีการสะสมมากที่สุดบริเวณทะเลน้อย โดยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N5 และสูงสุดที่สถานี N10 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S15 และสูงสุดที่สถานี N13 (หรือ S00) ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S32 และสูงสุดที่สถานี S29 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S39 และสูงสุดที่สถานี S57

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลกับการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ทะเลน้อยมีการสะสมปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดสูงขึ้นกว่าการศึกษาของ สมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ที่พบค่าเฉลี่ยในบริเวณทะเลน้อยเท่ากับ 1.30% และในบริเวณทะเลสาบตอนล่างก็พบว่ามีค่าสูงกว่าการศึกษาของวิเชียร จาญุพจน์ และคณะ (2537) ที่พบปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.05-0.50% จากข้อมูลในข้างต้นพบว่าปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในตะกอนในทุกๆ ส่วนของทะเลสาบสงขลา ซึ่งตรงกับการศึกษาของ วิเชียร จาญุพจน์ และคณะ (2537) ที่ทำการศึกษาในบริเวณตอนล่างและพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณซัลเฟอร์ทั้งหมด โดยพบว่าจุดใดที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงก็จะทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์สูงตามไปด้วย นอกจากนี้ วิเชียร จาญุพจน์ และคณะ (2537) ยังพบว่าปัจจัยอีกประการหนึ่งที่จะทำให้มีการสะสมซัลเฟอร์ทั้งหมดในตะกอนสูงขึ้นก็คือความเค็ม โดยพบว่าสถานีเก็บตัวอย่างบางสถานีแม้จะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ แต่ก็มีมีการสะสมซัลเฟอร์ทั้งหมดในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อความเค็มของน้ำในบริเวณนั้นสูงขึ้น

การที่ซัลเฟอร์ทั้งหมดสูงทำให้เกิดการสะสมโลหะในตะกอน เนื่องจากซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในสภาวะขาดออกซิเจน (anaerobic condition) จะทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอนรวมอยู่กับตะกอน ทำให้โลหะอื่นๆ ซึ่งได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี เกิดการแยกตัวออกจากมวลน้ำมาสะสมในตะกอนโดยการแทนที่เหล็กและเกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะเหล่านั้น (Bentivegna *et al.*, 2004; DON, 2000) ซึ่งสามารถจะเห็นได้อย่างชัดเจน ณ บริเวณจุดเก็บตัวอย่าง ที่ S54 (ใกล้ปากคลองอุตะเถา) และ S57 (ใกล้ปากคลองพะวง) ซึ่งทั้ง 2 สถานีได้รับอิทธิพลจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมและจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง ทำให้มีโอกาสได้รับการปนเปื้อนของสารอินทรีย์และโลหะหนักในปริมาณที่สูงกว่าสถานีอื่นๆ ทำให้มีการสะสมของสารอินทรีย์คาร์บอนและซัลเฟอร์ทั้งหมดในปริมาณที่ค่อนข้างสูงกว่าสถานีอื่นๆ ดังนั้นจึงมีโอกาสสูงที่สถานีเก็บตัวอย่างทั้งสองจะมีปริมาณโลหะหนักสะสมในปริมาณสูงกว่าสถานีอื่นๆ ในบริเวณใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบที่ 3-15 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณซีลเฟอรืทั้งหมดในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.3 เปรอร์เซ็นต์การได้กลับคืนมาของการย่อยตัวอย่างตะกอน

ศึกษาความถูกต้องในการย่อยตัวอย่างตะกอน โดยทำการย่อยตะกอนอ้างอิง (Sediment reference material) MESS-1 ของ National Research Council of Canada (NRCC) โดยใช้วิธีเดียวกันกับการย่อยตัวอย่าง แล้วเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของโลหะที่วัดได้กับค่าความเข้มข้นรับรองของตะกอนอ้างอิง MESS-1 แล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนมาของการย่อยตัวอย่าง ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ความเข้มข้นของโลหะในตะกอนมาตรฐาน MESS-1 เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน

โลหะ	Sediment reference material MESS-1 (mg/kg)				Mean±SD	Certified Value	% Recovery
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4			
Cd*	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59±0.00	0.59±0.05	100.00
Cr	57.26	58.59	59.02	63.45	59.58±2.33	71±11	83.91
Cu	22.68	22.58	21.64	23.02	22.48±0.51	25.1±3.8	89.56
Pb*	34.19	33.55	32.27	32.40	33.10±0.80	31.1±1.1	106.43
Zn	153.57	146.25	157.60	151.80	152.31±4.08	180±2	84.62
Mn	507.99	470.71	469.50	479.18	481.84±15.55	513±25	93.93

\* วิเคราะห์ความเข้มข้นโดยใช้เครื่อง Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometer (GFAAS)

จากการวิเคราะห์พบว่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนมาของ แคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb) สังกะสี (Zn) และแมงกานีส (Mn) มีค่ามากกว่า 80% โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 83.90% (Cr) และ 106.44% (Pb) ซึ่งค่าที่ได้นี้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เลือกใช้ในการย่อยตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ จะให้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือสูง

### 3.4 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้ง 4 ส่วน แสดงในตารางที่ 3-3 ส่วนรายละเอียดทั้งหมดของผลการวิเคราะห์ในแต่ละสถานีอยู่ในภาคผนวก ญ ตารางผนวกที่ ญ-1 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลน้อย ตารางผนวกที่ ญ-2 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลสาบตอนใน ตารางผนวกที่ ญ-3 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลสาบตอนกลาง และตารางผนวกที่ ญ-4 แสดงผลการวิเคราะห์ตะกอนทะเลสาบตอนนอก

ตารางที่ 3-3 ปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา

โลหะ		Thale Noi	Inner SKL	Middle SKL	Outer SKL
Cd (mg/kg)	ค่าเฉลี่ย	ND <sup>a</sup>	ND <sup>a</sup>	ND <sup>a</sup>	ND <sup>a</sup>
	อยู่ในช่วง	-	-	-	-
	ค่ามัธยฐาน	-	-	-	-
Cr (mg/kg)	ค่าเฉลี่ย	45.2±5.0	35.4±5.9	38.3±12.1	29.5±9.2
	อยู่ในช่วง	36.0-55.2	23.7-46.0	27.7-73.3	7.9-48.2
	ค่ามัธยฐาน	45.1	34.3	33.9	31.0
Cu (mg/kg)	ค่าเฉลี่ย	7.9±5.8	4.6±5.5	1.0±0.9	4.1±4.3
	อยู่ในช่วง	ND <sup>b</sup> -21.3	ND <sup>b</sup> -19.7	ND <sup>b</sup> -4.0	ND <sup>b</sup> -14.6
	ค่ามัธยฐาน	6.3	1.0	0.7	2.0
Pb (mg/kg)	ค่าเฉลี่ย	ND <sup>c</sup>	3.5±0.6	4.0±2.2	3.8±1.3
	อยู่ในช่วง	-	ND <sup>c</sup> -6.4	ND <sup>c</sup> -12.0	ND <sup>c</sup> -9.2
	ค่ามัธยฐาน	-	3.3	3.3	3.3
Zn (mg/kg)	ค่าเฉลี่ย	50.3±11.8	34.9±9.5	29.6±11.5	45.9±13.4
	อยู่ในช่วง	28.2-79.8	18.5-59.5	17.3-56.6	13.6-69.1
	ค่ามัธยฐาน	49.8	33.8	25.9	48.0
Mn (mg/kg)	ค่าเฉลี่ย	254.7±123.7	570.5±332.2	404.4±162.2	397.6±146.1
	อยู่ในช่วง	132.7-547.5	170.0-1339.1	167.9-794.1	139.1-776.4
	ค่ามัธยฐาน	206.9	474.6	358.0	362.2
Fe (g/kg)	ค่าเฉลี่ย	31.7±7.1	18.7±3.9	27.7±28.2	28.3±8.9
	อยู่ในช่วง	21.3-44.4	12.5-29.4	13.9-128.1	8.5-45.6
	ค่ามัธยฐาน	33.1	18.9	17.0	29.8
Al (g/kg)	ค่าเฉลี่ย	58.0±9.5	50.2±12.3	42.9±11.6	51.6±14.2
	อยู่ในช่วง	39.4-78.9	28.9-76.2	30.3-68.9	17.6-71.4
	ค่ามัธยฐาน	57.6	50.5	37.3	52.0

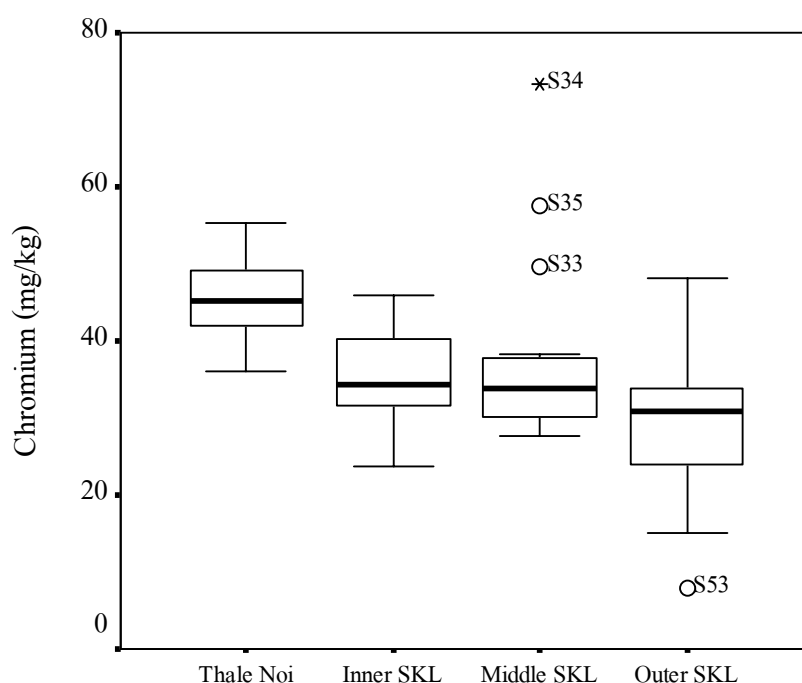
ND<sup>a</sup> = non detected โดยมีค่า <1.3, ND<sup>b</sup> = non detected โดยมีค่า <0.7, ND<sup>c</sup> = non detected โดยมีค่า <3.3

#### 3.4.1 ปริมาณแคดเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ผลการวิจัยพบว่าปริมาณแคดเมียมในทะเลสาบสงขลาทั้งระบบมีค่าต่ำกว่าค่า detection limit ของเครื่อง Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) โดยพบว่าตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้งระบบมีปริมาณแคดเมียมต่ำกว่า 1.3 mg/kg

### 3.4.2 ปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา

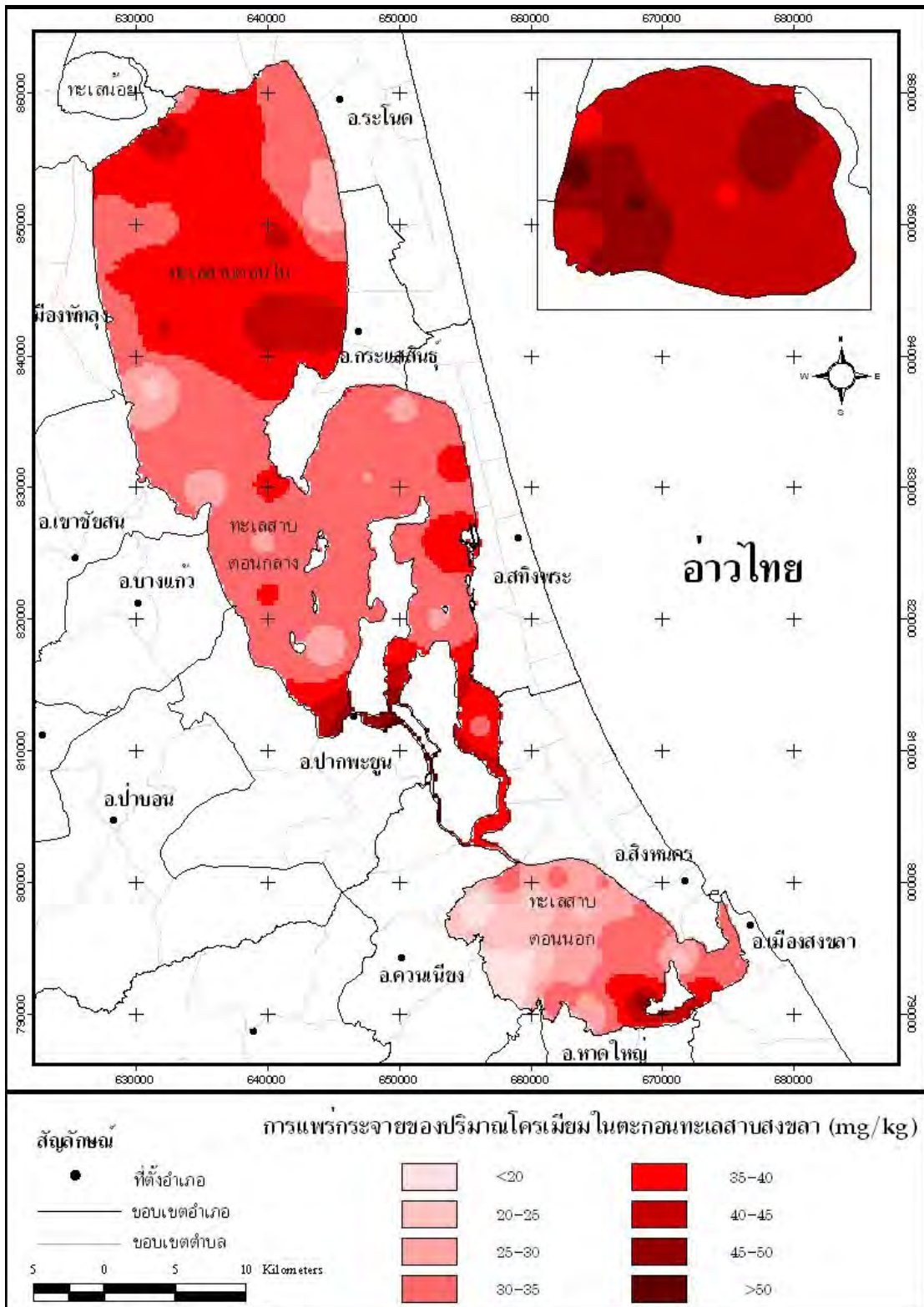
ค่าเฉลี่ยปริมาณ โครเมียมในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $45.2 \pm 5.0$ ,  $35.4 \pm 5.9$ ,  $38.3 \pm 12.1$  และ  $29.5 \pm 9.2$  mg/kg ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 45.1, 34.3, 33.9 และ 31.0 mg/k ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-16 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณโครเมียมตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-17



ภาพประกอบที่ 3-16 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณ โครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณโครเมียมในทะเลสาบสงขลามีการสะสมในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในทุกพื้นที่โดยมีการสะสมมากที่สุดบริเวณทะเลน้อย โดยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N14 และสูงสุดที่สถานี N15 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S15 และสูงสุดที่สถานี S3 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S26 และสูงสุดที่สถานี S34 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S58





ภาพประกอบที่ 3-17 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณ โครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา

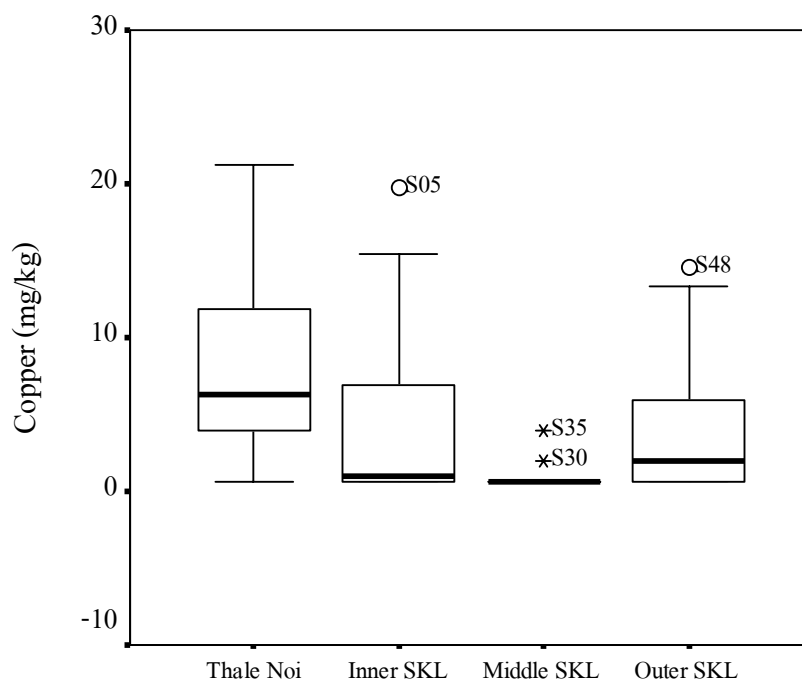
เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการสะสมของโครเมียมในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน และทะเลสาบตอนกลาง มีค่าสูงกว่าการศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) (ตารางที่ 1-3 ในบทที่ 1) แต่พบว่ามีค่าความเข้มข้นอยู่ในระดับเดียวกันกับบึงไหมโป (Mai Po Marsh Nature Reserve) ในเขตฮ่องกง (Liang and Wong, 2003) และยังพบว่ามีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าบึงและทะเลสาบโอดีล ในเมืองฮีลว่า (Odiel estuary and marshes, Huelva) ทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศสเปน (Gómez-Ariza *et al.*, 1999) (ตารางที่ 1-2 ในบทที่ 1) แสดงว่าความเข้มข้นของโครเมียมในตะกอนทะเลสาบทั้ง 3 ส่วนนี้ยังอยู่ในระดับปกติ การที่พบว่ามีค่าสูงกว่าการศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ก็อาจจะเนื่องมาจากวิธีการในการย่อยแตกต่างกัน ซึ่งการศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ไม่ได้ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ในการย่อย จึงอาจทำให้ไม่สามารถปลดปล่อยปริมาณโครเมียมทั้งหมดออกมาได้ ทำให้การศึกษานี้มีค่าที่สูงกว่า ส่วนการศึกษาของไตรภพ ผ่องสุวรรณ และครุณี ผ่องสุวรรณ (2545) ที่ใช้วิธีการในการย่อยตัวอย่างที่เหมือนกัน พบว่าปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาในครั้งนี้ (ตารางที่ 1-3 บทที่ 1) แสดงให้เห็นว่าทะเลสาบตอนนอกมีการเปลี่ยนแปลงการสะสมของโครเมียมน้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับ Thailand proposed guideline (2006) (PCD, 2006) (ตารางที่ 1-4 ในบทที่ 1) พบว่ายังมีค่าต่ำกว่าค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (effect range low : ERL) (81 mg/kg-dry weight)

เมื่อพิจารณาแผนผังการแพร่กระจายของปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา พบว่าตะกอนทะเลน้อยมีการแพร่กระจายความเข้มข้นของโครเมียมสูงกว่าทะเลสาบส่วนอื่น และสถานที่ที่พบว่ามีปริมาณการแพร่กระจายของโครเมียมสูงมากเช่นเดียวกับทะเลน้อย คือ สถานี S34 (บริเวณคลองหลวง) และบริเวณรอบๆ เกาะขอม ซึ่งในบริเวณทะเลน้อยนั้นพบที่มีการสะสมปริมาณคาร์บอนอินทรีย์และปัจจัยทางเคมีที่ค่อนข้างสูงมาก จึงทำให้พบที่มีการสะสมของโลหะในบริเวณนี้สูงตามไปด้วย และจากการศึกษายังพบว่ารูปแบบการแพร่กระจายของโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา มีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูงกับการแพร่กระจายของปริมาณดินเหนียวและคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอน จึงอาจสรุปได้ว่าปริมาณโครเมียมในตะกอนทะเลสาบสงขลาโดยส่วนมากมีแหล่งที่มาจากรธรรมชาติ

### 3.4.3 ปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $7.9 \pm 5.0$ ,  $4.6 \pm 5.5$ ,  $1.0 \pm 0.9$  และ  $4.1 \pm 4.3$  mg/kg ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 6.3, 1.0, 0.7 และ 2.0 mg/kg ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-18 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณทองแดงตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-19

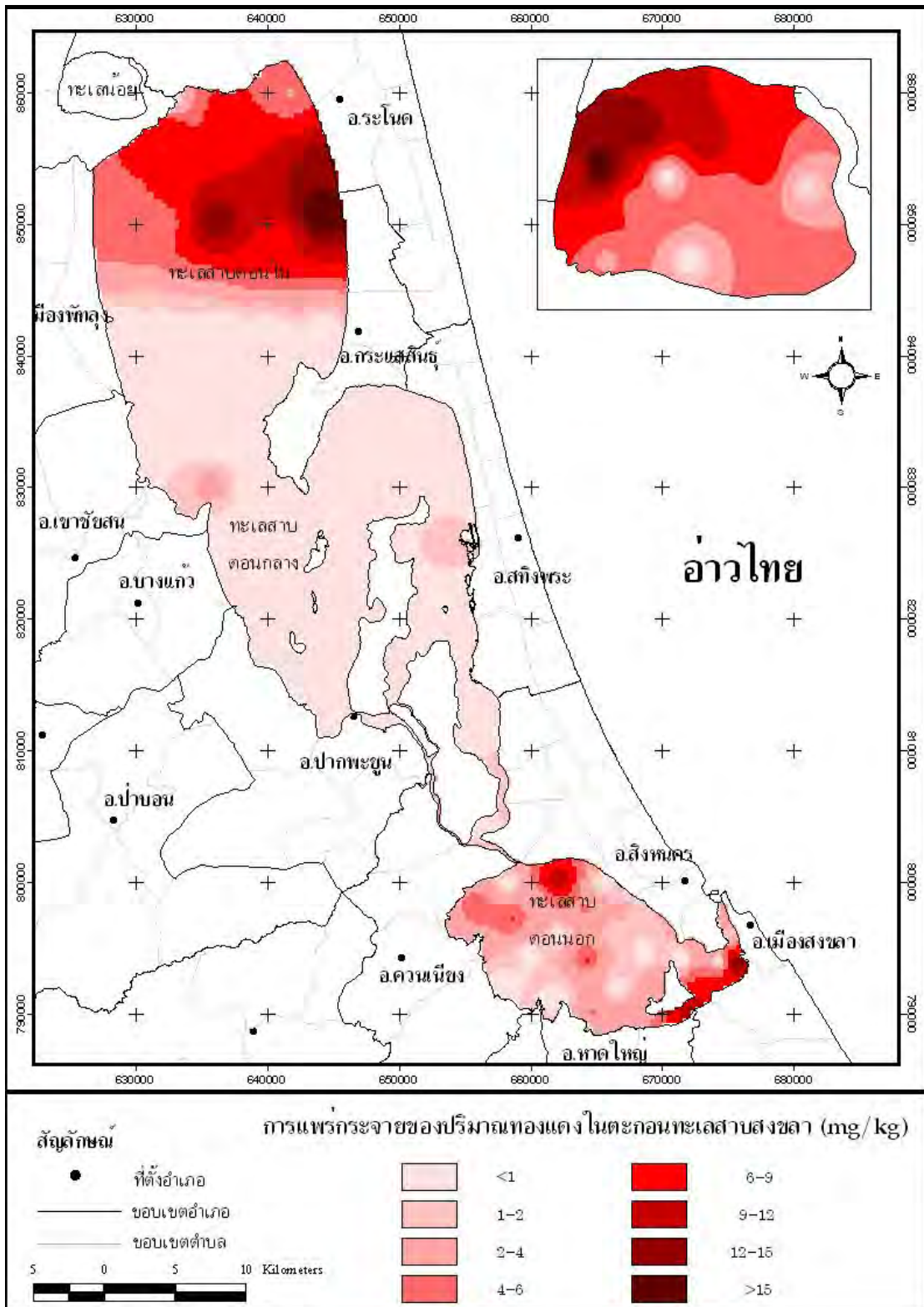
ปริมาณทองแดงในทะเลสาบสงขลามีการสะสมมากในบริเวณทะเลน้อย และต่ำสุดในพื้นที่ทะเลสาบตอนกลาง โดยทะเลน้อยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N4 และ N9 (มีค่าต่ำกว่า detection limit ของเครื่อง ICP-OES) และสูงสุดที่สถานี N3 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S10-S19 และ S21 (ต่ำกว่า detection limit) และสูงสุดที่สถานี S5 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S22-S23, S25-S29, S31-S34 และ S36 (ต่ำกว่า detection limit) และสูงสุดที่สถานี S35 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S37, S39, S44, S50 และ S52-S55 (ต่ำกว่า detection limit) และสูงสุดที่สถานี S48



ภาพประกอบที่ 3-18 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลน้อย และทะเลสาบตอนบนมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ สมศักดิ์ มณีพงษ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) (ตารางที่ 1-3 ในบทที่ 1) แต่ในบริเวณทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำกว่าการศึกษาของ สมศักดิ์ มณีพงษ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ส่วนในบริเวณทะเลสาบตอนนอกก็พบว่ามีความต่ำกว่า การศึกษาของ Maneepong (1996) แต่พบว่าค่าความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากการศึกษารั้งนี้มี ค่าไม่ต่างจากทะเลสาบลาดาโกกา ในประเทศรัสเซีย (Ladoga Lake, Russia) (Ristola *et al.*, 1996) และทะเลสาบลอชนาการ์ ในประเทศสกอตแลนด์ (Lochnagar, Scotland) (Yang *et al.*, 2002) (ตารางที่ 1-2 ในบทที่ 1) แสดงว่าทองแดงที่สะสมในตะกอนทะเลสาบสงขลา ยังอยู่ในระดับปกติ ส่วนการที่พบว่าทะเลสาบตอนกลางและตอนนอกมีค่าต่ำกว่าการศึกษาที่ผ่านมา อาจเนื่องมาจาก ทะเลสาบ 2 ส่วนนี้ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำมากกว่าทะเลสาบอีก 2 ส่วน ที่อยู่ด้านบน จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางฟิสิกเคมีกัลในแหล่งน้ำ ทองแดงที่สะสมอยู่ใน ตะกอนจึงเกิดการละลายกลับสู่มวลน้ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับ Thailand proposed guideline (2006) (PCD, 2006) (ตารางที่ 1-4 ในบทที่ 1) พบว่ายังมีค่าต่ำกว่าค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้โดยไม่ส่งผล กระทบต่อสิ่งแวดล้อม (effect range low : ERL) (34 mg/kg-dry weight)

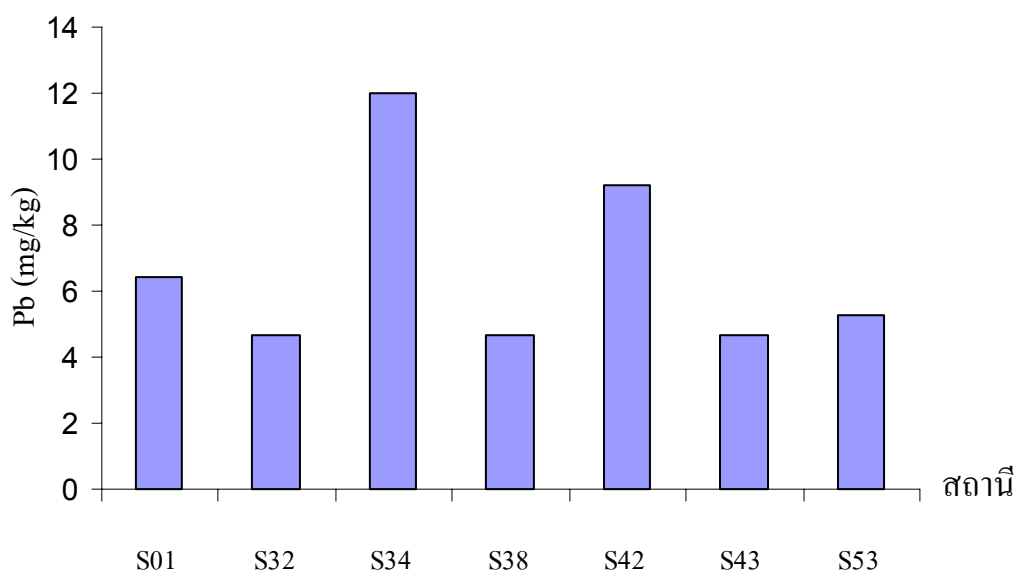
เมื่อพิจารณาแผนผังการแพร่กระจายความเข้มข้นของทองแดงในตะกอนทะเลสาบ สงขลา พบว่ามีความเข้มข้นที่ค่อนข้างสูงในบริเวณของทะเลน้อยตอนบนบางส่วน ใกล้ปากคลอง ระโนด สถานี S38 (ใกล้จุดเชื่อมต่อระหว่างคลองหลวงกับทะเลสาบตอนนอก) ใกล้ปากคลอง พะวง และบริเวณท่าเทียบเรือประมงสงขลา การที่พบว่าการแพร่กระจายสูงในบริเวณเหล่านี้ น่าจะเกิดจากการสะสมร่วมกับคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอน โดยเฉพาะในบริเวณทะเลน้อย ปาก คลองพะวง และท่าเทียบเรือสงขลา ซึ่งพบว่าปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในสองบริเวณหลังน่าจะมา จากน้ำที่จากชุมชนและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับแพปลาเกิดการตกตะกอน (precipitate) และเคลือบ อยู่ที่ผิวของเม็ดตะกอน ต่างจากปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในทะเลน้อยที่เกิดจากการย่อยสลายและ ทับถมของพืชน้ำเป็นหลัก นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ควบคุมการ แพร่กระจายของทองแดงคือซัลเฟต ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในบริเวณสถานีปากคลองพะวงและท่า เทียบเรือประมงสงขลา โดยสองบริเวณนี้มีสารอินทรีย์ที่ถูกปลดปล่อยมากับน้ำทิ้งในปริมาณสูง การย่อย สลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำก็สูงตามไปด้วย และการย่อยสลายที่เกิดในสภาวะขาด ออกซิเจน จะทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ และในสภาพที่ขาดออกซิเจนเช่นนี้ โลหะที่มีได้หลายวา เลนซีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในสภาพที่มีวาเลนซ์ต่ำและมักจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ ถ้า ซัลไฟด์ของโลหะใดละลายน้ำได้ดีก็จะพบโลหะนั้นในน้ำสูง แต่ถ้าโลหะซัลไฟด์นั้นละลายน้ำได้ น้อยก็จะพบโลหะนั้นจากตะกอนในสภาพซัลไฟด์ของโลหะนั้นๆ (มนูวดี หังสพฤกษ์, 2532)



ภาพประกอบที่ 3-19 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณทองแดงในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.4.4 ปริมาณตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณตะกั่วในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่า  $<3.3$ ,  $3.5\pm 0.7$ ,  $4.0\pm 2.2$  และ  $3.8\pm 1.3$  mg/kg ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-20 แสดงค่าตะกั่วที่ตรวจวัดได้ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณตะกั่วตามพื้นที่แสดงไว้ใน ภาพประกอบที่ 3-21



ภาพประกอบที่ 3-20 ปริมาณตะกั่วที่ตรวจวัดได้ในตะกอนทะเลสาบสงขลา

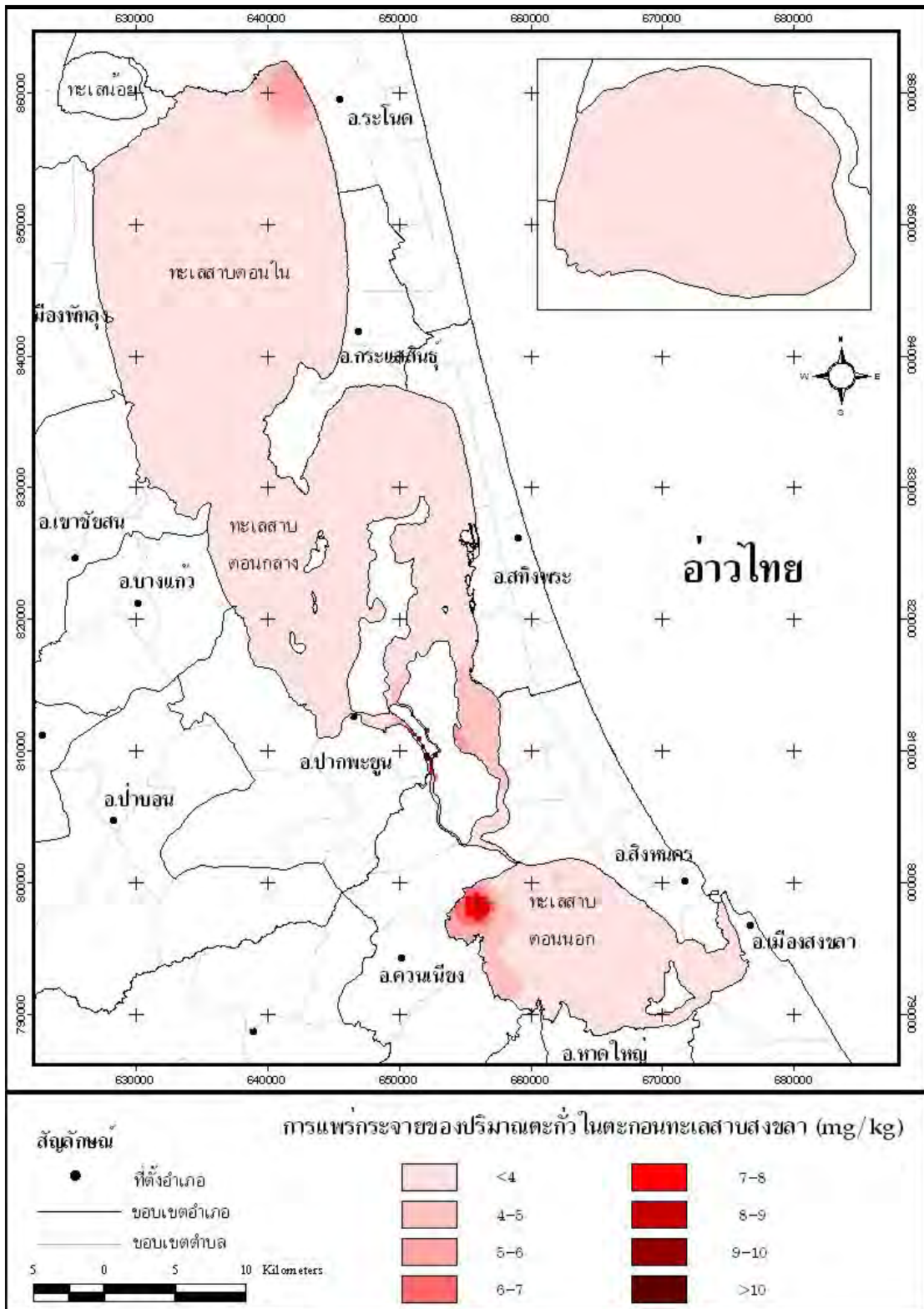
ปริมาณตะกั่วในทะเลสาบสงขลา มีการสะสมสูงบริเวณทะเลสาบตอนกลาง ต่างจากการสะสมตัวของโครเมียม และทองแดง โดยพบว่าที่ทะเลน้อยมีค่าต่ำกว่าค่า detection limit ทุกสถานี และสถานีเก็บตัวอย่างบริเวณทะเลสาบตอนใน ตอนกลาง และตอนนอกเกือบทุกสถานีมีค่าความเข้มข้นของตะกั่วต่ำกว่าค่า detection limit เช่นกัน มีเพียง 7 สถานีเก็บตัวอย่างที่มีค่ามากกว่าค่า detection limit ได้แก่ สถานี S01 (ใกล้ปากคลองศาลาธรรม) มีค่าเท่ากับ 6.4 mg/kg, สถานี S32 (บริเวณเขตรอยต่อระหว่างอำเภอสิงหนครและอำเภอสทิงพระ อยู่ใกล้ปากคลองที่เชื่อมต่อกับคลองชลประทานเหมืองพลเอกเปรม เหมืองพลเอกอาทิตย์กำลังเอก และเหมืองบ้านสร้างใหม่เทศ) มีค่าเท่ากับ 4.7 mg/kg, สถานี S34 (บริเวณคลองหลวง) มีค่าเท่ากับ 12.0 mg/kg สถานีนี้มีการสะสมเหล็กในปริมาณที่สูงจึงพบการสะสมตะกั่วสูงในบริเวณนี้ด้วย สถานี S42 (ใกล้ปากคลองปากจำ) มีค่าเท่ากับ 9.2 mg/kg, สถานี S38 (ใกล้ปากคลองป่าขาด) มีค่าเท่ากับ 4.6 mg/kg, สถานี S43 มีค่าเท่ากับ 4.6 mg/kg เป็นสถานีที่อยู่ถัดจากสถานี S42 เข้าไปด้านในทะเลสาบเล็กน้อย จึงอาจจะ

ได้รับอิทธิพลของปริมาณตะกั่วจากสถานี S42 และสถานี S53 (ใกล้ปากคลองบางเหริยง) มีค่าเท่ากับ 5.2 mg/kg มีโอกาสได้รับการปนเปื้อนจากการเกษตรที่อยู่ในพื้นที่ตำบลบางเหริยง

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีค่าน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต เนื่องด้วยวิธีการในการเก็บตัวอย่าง การเตรียมตัวอย่าง รวมถึงการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ต่างกัน โดยการศึกษาในครั้งนี้ใช้ภาชนะทุกอย่างเป็นพลาสติกที่ผ่านการแช่กรดและทำความสะอาดด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน การเตรียมตัวอย่างและการถ่ายเทตัวอย่างทุกครั้งทำในตู้ปลอดฝุ่น (laminar flow cabinet) Class 100 และสวมถุงมือทุกครั้งที่ทำกรทดลอง โอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนตะกั่วจึงมีน้อยกว่าการศึกษารั้งอื่นๆ ส่วนการศึกษาของเวียงชัย จงศรีรัตนกุล (2545) ที่ทำการศึกษาด้วยวิธีการที่เหมือนกันทุกอย่างแต่กลับพบว่ามีค่าสูงกว่าการศึกษาในครั้งนี้ ก็เนื่องมาจากการศึกษาของเวียงชัย จงศรีรัตนกุล (2545) เป็นการศึกษาตามระดับความลึกเฉพาะบริเวณปากคลองอู่ตะเภาและเข้าไปด้านในตามลำน้ำ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีโอกาสได้รับการปนเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมสูง ทำให้พบว่ามีค่าตะกั่วสูงกว่าการศึกษาในครั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นในพื้นที่อื่นๆ พบว่าค่าความเข้มข้นของตะกั่วที่ได้จากการศึกษารั้งนี้มีค่าไม่ต่างจากทะเลสาบวิลกี ทางตะวันตกของโปแลนด์ (Wielkie Lake, West Poland) (Szywanowaka *et al.*, 1999) อ่างเก็บน้ำเบลทางตอนใต้สุดของรัฐควีนแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย (Bell Creek Catchment Southeast Queensland, Australia) (Liaghati *et al.*, 2004) และป่าชายเลนบริเวณปากแม่น้ำที่เรงกานู ประเทศมาเลเซีย (Estuarine mangrove forests of Terengganu, Malaysia) (Ong *et al.*, 2006) (ตารางที่ 1-2 บทที่ 1) ซึ่งแสดงว่าตะกั่วที่สะสมในตะกอนทะเลสาบสงขลาอยู่ในระดับปกติ และเมื่อเปรียบเทียบกับ Thailand proposed guideline (2006) (PCD, 2006) (ตารางที่ 1-4 ในบทที่ 1) พบว่ายังมีค่าต่ำกว่าค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับให้มีได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (effect range low : ERL) (46.7 mg/kg-dry weight)

เมื่อพิจารณาแผนผังการแพร่กระจายของปริมาณตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลา พบว่ามีการแพร่กระจายความเข้มข้นของตะกั่วในบริเวณสถานีใกล้ปากคลองเป็นส่วนมาก แสดงให้เห็นว่าตะกั่วที่สะสมอยู่ในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่มีมาจากการกระทำของมนุษย์เป็นส่วนใหญ่ ส่วนในบริเวณสถานี S34 ที่พบว่าการสะสมปริมาณตะกั่วสูงที่สุด อาจจะเนื่องมาจากเกิดการพัดพามาจากที่อื่นและตกตะกอนนอนก้นในบริเวณนี้

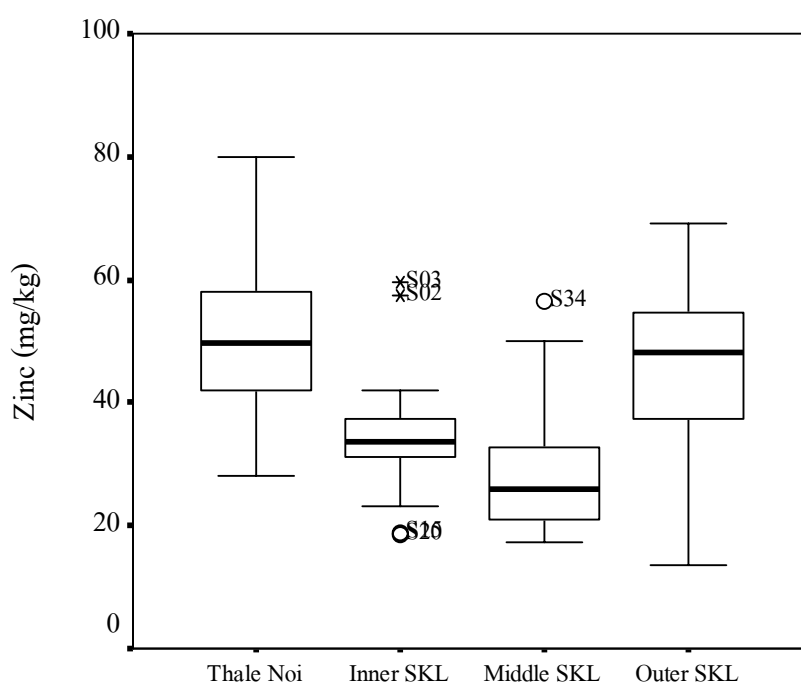




ภาพประกอบที่ 3-21 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.4.5 ปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $50.3 \pm 11.8$ ,  $34.9 \pm 9.5$ ,  $29.6 \pm 11.5$  และ  $45.9 \pm 13.4$  mg/kg ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 49.8, 33.8, 25.9 และ 48.0 mg/kg ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-22 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณสังกะสีตามพื้นที่ที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-23

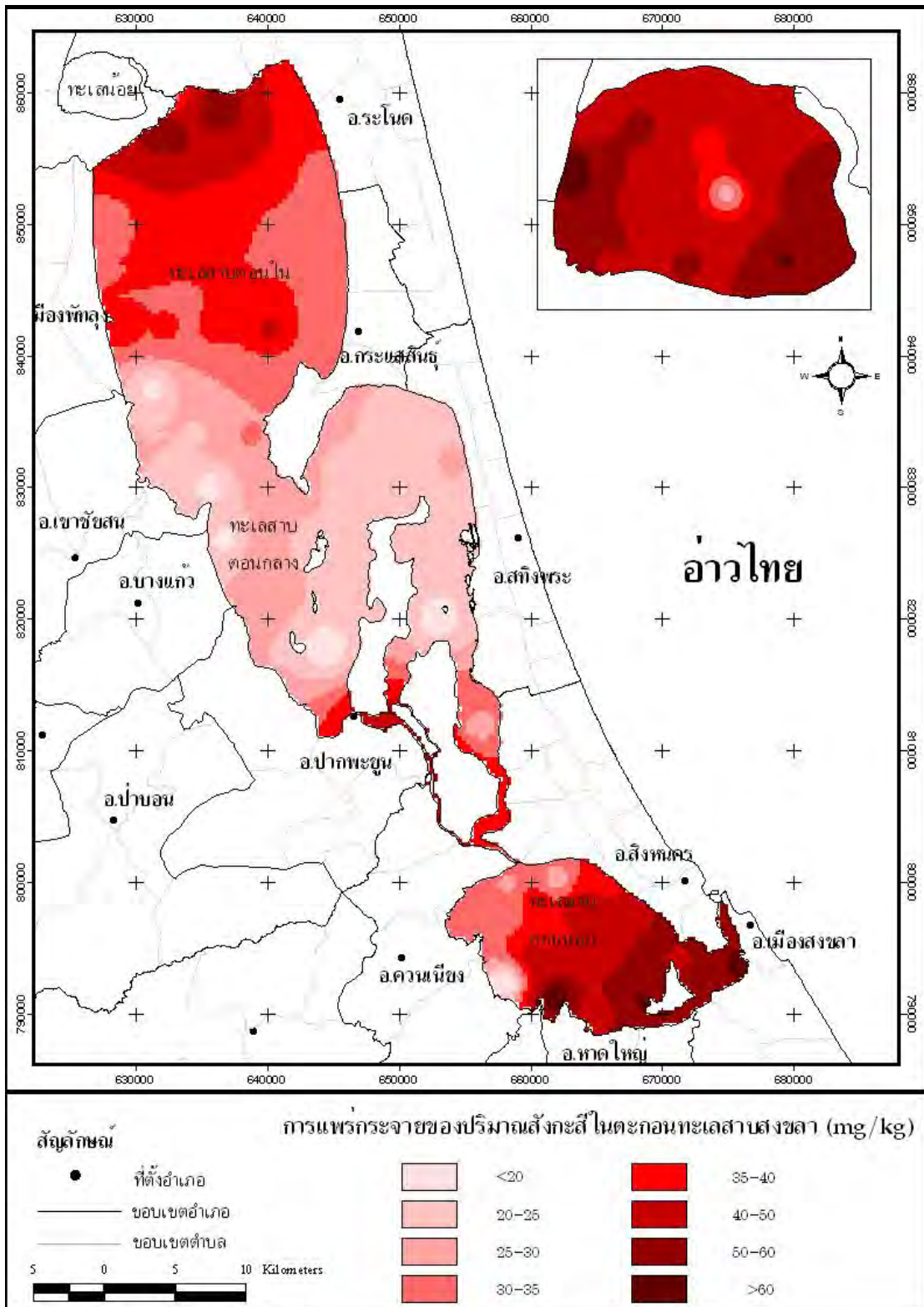


ภาพประกอบที่ 3-22 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณสังกะสีในทะเลสาบสงขลามีการสะสมค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกพื้นที่ ซึ่งคล้ายกับการสะสมตัวของโครเมียม โดยพบว่าที่ทะเลน้อยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N6 และสูงสุดที่สถานี N15 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S20 และสูงสุดที่สถานี S3 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S26 และสูงสุดที่สถานี S34 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S54

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าตะกอนทะเลน้อยมีปริมาณสังกะสีใกล้เคียงกับการศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) (ตารางที่ 1-3 ในบทที่ 1) ทะเลสาบตอนในและตอนกลางพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ ณรงค์ ฌ เชียงใหม่ และคณะ (2521) ส่วนทะเลสาบตอนนอกก็พบว่ามีค่าแตกต่างไม่มากนักจากการศึกษาของ ณรงค์ ฌ เชียงใหม่ และคณะ (2521) โดยสรุปแล้วพบว่าตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้งระบบมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของปริมาณสังกะสีน้อยมาก และพบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลาทั้งระบบมีค่าไม่ต่างจากทะเลสาบอื่นในพื้นที่ห่างไกล โดยพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับทะเลสาบลอนนาการ์ในประเทศสกอตแลนด์ (Lochnagar, Scotland) (Yang *et al.*, 2002) อ่างเก็บน้ำเบลทางตอนใต้สุดของรัฐควีนแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย (Bell Creek Catchment Southeast Queensland, Australia) (Liaghati *et al.*, 2004) และอ่าวเมจิลโลเนสทางตอนเหนือของประเทศชิลี (Mejillones Bay, Northern Chile) (Valdés *et al.*, 2005) (ตารางที่ 1-2 ในบทที่ 1) แสดงว่าสังกะสีที่สะสมในตะกอนทะเลสาบสงขลาอยู่ในระดับปกติทั่วไป และเมื่อเปรียบเทียบกับ Thailand proposed guideline (2006) (PCD, 2006) (ตารางที่ 1-4 ในบทที่ 1) พบว่ายังมีค่าต่ำกว่าค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (effect range low : ERL) (150 mg/kg-dry weight)

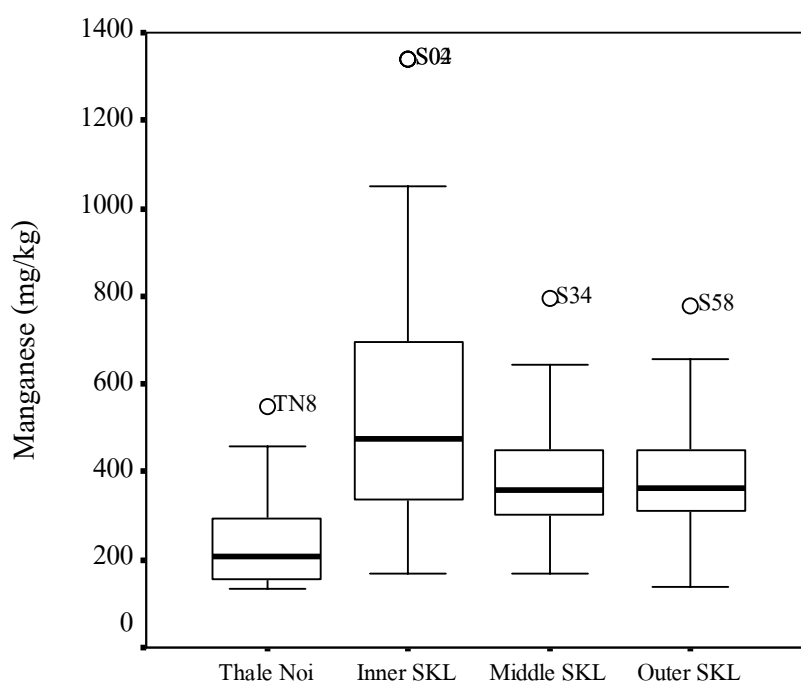
เมื่อพิจารณาแผนที่การแพร่กระจายของปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลา พบว่ามีการกระจายความเข้มข้นของสังกะสีสูงในบริเวณทะเลน้อย และบริเวณตอนบนของทะเลสาบตอนใน ซึ่งบริเวณดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากการรับอนินทรีย์และอนุภาคดินเหนียวในตะกอนทะเลน้อย ส่วนอีกบริเวณที่มีการแพร่กระจายของปริมาณสังกะสีสูงคือบริเวณทะเลสาบตอนนอกใกล้ปากทะเลสาบ ซึ่งในบริเวณนี้เกิดจากการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และส่งผลให้ธาตุอื่นร่วมตกตะกอนไปด้วย เช่น ทองแดง นิกเกิล โคบอลต์ ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม อลูมิเนียม โมลิบดีนัม วุลแฟรม ทอเรียม และเทลลูเรียม เป็นต้น (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532) จากแผนที่การแพร่กระจายพบว่าในสถานี S53 (ใกล้ปากคลองบางเหริยง) ซึ่งอยู่ในทะเลสาบสงขลาตอนล่างบริเวณที่มีโอกาสเกิดการตกตะกอนร่วมระหว่างสังกะสีกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ แต่กลับพบว่ามีปริมาณสังกะสีในบริเวณนี้ต่ำ ที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากในบริเวณนี้มีองค์ประกอบของขนาดอนุภาคเป็นทรายสูงมาก จึงทำให้ความสามารถในการยึดเกาะหรือดูดซับโลหะหนักมีน้อย



ภาพประกอบที่ 3-23 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณสังกะสีในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.4.6 ปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ค่าเฉลี่ยปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $254.7 \pm 123.7$ ,  $570.5 \pm 332.2$ ,  $404.4 \pm 162.2$  และ  $397.6 \pm 146.1$  mg/kg ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 206.9, 474.6, 358.0 และ 362.2 mg/kg ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-24 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณแมงกานีสตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-25



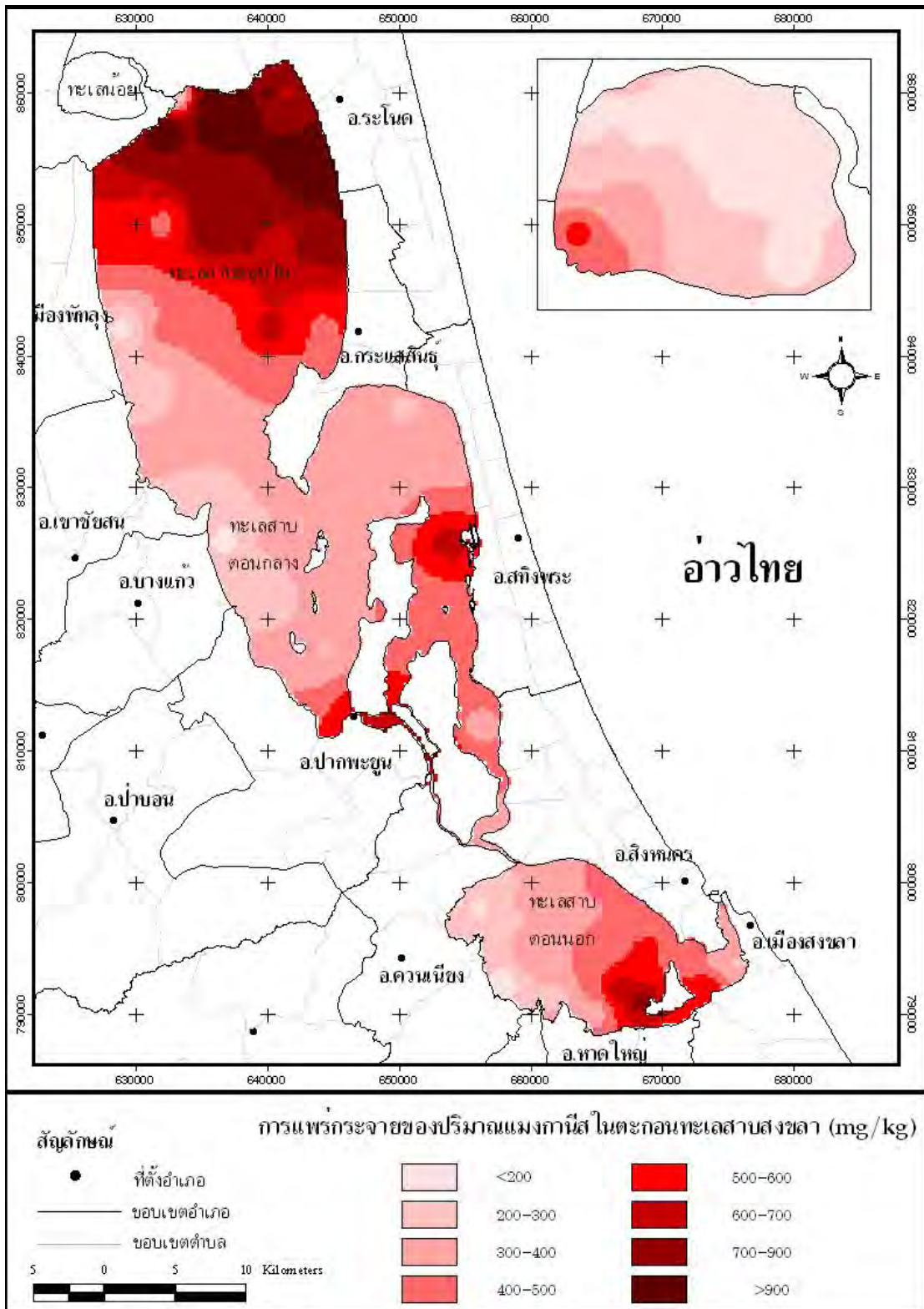
ภาพประกอบที่ 3-24 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณแมงกานีสในทะเลสาบสงขลา มีการสะสมสูงในบริเวณทะเลสาบตอนใน ซึ่งต่างจากการสะสมตัวของโครเมียมและทองแดง โดยพบว่าที่ทะเลน้อยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N14 และสูงสุดที่สถานี N8 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S14 และสูงสุดที่สถานี S4 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S22 และสูงสุดที่สถานี S34 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S58

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) พบว่าปริมาณแมงกานีสในบริเวณทะเลน้อยมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในทะเลสาบตอนในและตอนกลางพบว่ามีค่าสูงกว่า (ตารางที่ 1-3 ในบทที่ 1) อาจจะเนื่องจากแมงกานีสที่สะสมอยู่ในตะกอนทะเลน้อยเป็นแมงกานีสที่สะสมร่วมกับคาร์บอนอินทรีย์ และเป็นแมงกานีสที่อยู่ในรูป bioavailable เป็นส่วนใหญ่ การย่อยที่ไม่ใช้กรดไฮโดรฟลูออริกก็สามารถปลดปล่อยโลหะส่วนนี้ออกมาได้ ส่วนในทะเลสาบตอนในนั้น อาจจะเป็นแมงกานีสที่อยู่ในรูป total metal ดังนั้น การศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ไม่ได้ใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ในการย่อย จึงไม่สามารถปลดปล่อยปริมาณแมงกานีสทั้งหมดออกมาได้ ทำให้การศึกษานี้มีค่าที่สูงกว่า ส่วนในบริเวณทะเลสาบตอนกลางนั้นพบว่ามีบางสถานีที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของทะเลสาบส่วนนี้มีค่าเฉลี่ยสูง ซึ่งได้แก่ สถานี S30 (บริเวณคูขุด), S33 (ใกล้ชุมชนปากพะยูน) และ S34 (บริเวณคลองหลวง) ซึ่งเมื่อพิจารณาเป็นรายสถานีจากการศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) พบว่าสถานีที่อยู่ในบริเวณคูขุด พบค่าที่ใกล้เคียงกับการศึกษาในครั้งนี้ แต่ในบริเวณใกล้ชุมชนปากพะยูนและคลองหลวงนั้น ยังไม่มีผู้ใดทำการศึกษาไว้ ส่วนในบริเวณทะเลสาบตอนนอกพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของไตรภพ ผ่องสุวรรณ และครุณี ผ่องสุวรรณ (2545) (ตารางที่ 1-3 ในบทที่ 1) และพบว่าค่าความเข้มข้นของแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับทะเลสาบลาดอกา ในประเทศรัสเซีย (Ladoga Lake, Russia) (Ristola *et al.*, 1996) แต่มีค่าสูงกว่าทะเลสาบวิลกี ทะเลสาบบอสโกโว และทะเลสาบโดมินีกี ทางตะวันตกของโปแลนด์ (Wielkie Lake, Boszkowo Lake and Dominikie Lake, West Poland) (Szywanowaka *et al.*, 1999) และอ่าวเมจิลโลนส์ทางตอนเหนือของประเทศชิลี (Mejillones Bay, Northern Chile) (Valdés *et al.*, 2005) (ตารางที่ 1-2 ในบทที่ 1) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแมงกานีสยังอยู่ในระดับปกติ แต่มีค่าความเข้มข้นพื้นฐานในพื้นที่สูงกว่าทะเลสาบหลายๆ แห่งในพื้นที่ห่างไกล ส่วน Thailand proposed guideline (2006) ไม่ได้มีการกำหนดค่าของแมงกานีสไว้

เมื่อพิจารณาแผนที่การแพร่กระจายของปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลาพบว่าการกระจายความเข้มข้นของแมงกานีสสูงบริเวณทะเลสาบตอนในบริเวณใกล้ปากคลองนางเรียม และปากคลองระโนด ซึ่งทั้งสองบริเวณนี้อาจได้รับอิทธิพลจากน้ำทิ้งชุมชน หรือการชะพาสารมลพิษจากแผ่นดินจากกิจกรรมการทำนาข้าว หรือการเลี้ยงกุ้งในบริเวณอำเภอรโนดลงสู่ทะเลสาบสงขลา และเกิดการตกตะกอนและสะสมอยู่ในตะกอนโดยการสะสมร่วมกับคาร์บอนอินทรีย์ในตะกอน



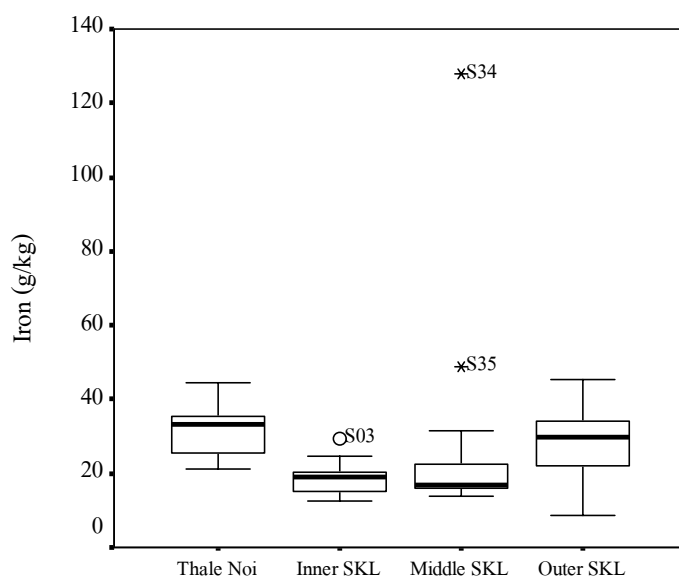


ภาพประกอบที่ 3-25 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณแมงกานีสในตะกอนทะเลสาบสงขลา



### 3.4.7 ปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลา

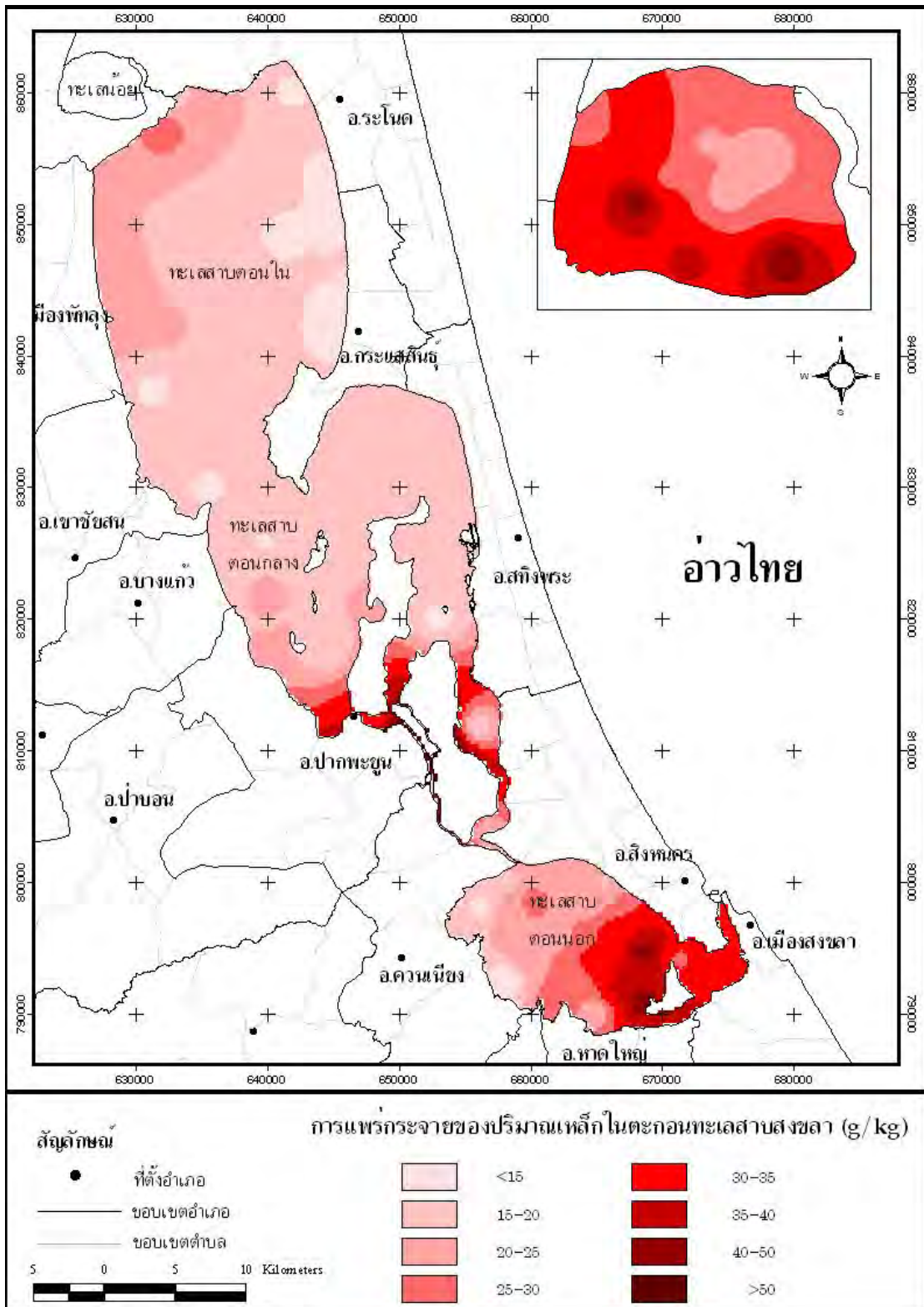
ค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $31.7 \pm 7.1$ ,  $18.7 \pm 3.9$ ,  $27.7 \pm 28.2$  และ  $28.3 \pm 8.9$  g/kg ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 33.1, 18.9, 17.0 และ 29.8 g/kg ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-26 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณเหล็กตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-27



ภาพประกอบที่ 3-26 Box plot แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานและช่วงปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่ percentile ที่ 25 และ 75

ปริมาณเหล็กในทะเลสาบสงขลา มีการสะสมค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกพื้นที่ ซึ่งคล้ายกับการสะสมตัวของโครเมียม และสังกะสี โดยพบว่าที่ทะเลน้อยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N5 และสูงสุดที่สถานี N7 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S10 และสูงสุดที่สถานี S3 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S31 และสูงสุดที่สถานี S34 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S58

เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าตะกอนทะเลน้อยมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของสมศักดิ์ มณีพงศ์ และสุภาพร รักเขียว (2541) ทะเลสาบตอนในและตอนกลางพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ ณรงค์ ณ เชียงใหม่ และคณะ (2521) และในบริเวณตอนนอกมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของไตรภพ ฟ่องสุวรรณ และครุณี ฟ่องสุวรรณ (2545) (ตารางที่ 1-3 ในบทที่ 1) โดยรวมพบว่าความเข้มข้นของเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลาไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากอดีต



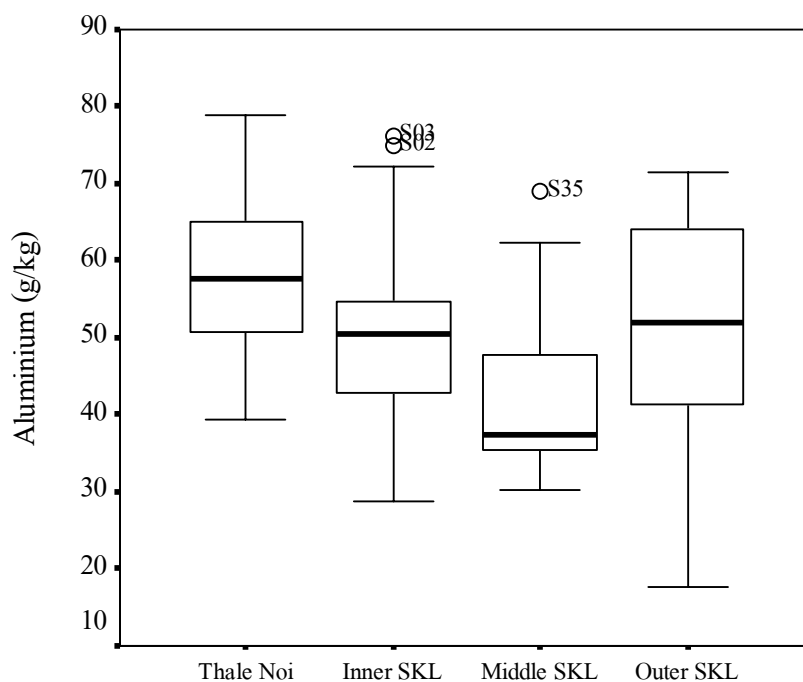
ภาพประกอบที่ 3-27 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลา

และเมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนในพื้นที่ห่างไกล พบว่าค่าความเข้มข้นของเหล็กในตะกอนมีค่าใกล้เคียงกับทะเลสาบลาโดกา ในประเทศรัสเซีย (Ladoga Lake, Russia) (Ristola *et al.*, 1996) แต่มีค่าสูงกว่าทะเลสาบวิลกี ทะเลสาบบอสโกโว และทะเลสาบโดมินีกี ทางตะวันตกของโปแลนด์ (Wielkie Lake, Boszkowo Lake and Dominikie Lake, West Poland) (Szywanowaka *et al.*, 1999) (ตารางที่ 1-2 ในบทที่ 1) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลายังอยู่ในระดับปกติ แต่มีค่าความเข้มข้นพื้นฐานในพื้นที่สูงกว่าทะเลสาบหลายแห่งในพื้นที่ห่างไกล ส่วน Thailand proposed guideline (2006) ไม่ได้มีการกำหนดค่าของเหล็กไว้

เมื่อพิจารณาแผนผังการแพร่กระจายของปริมาณเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลา พบว่ามีการแพร่กระจายสูงในบริเวณทะเลน้อยตอนล่าง คลองหลวง และทะเลสาบตอนล่าง โดยในส่วนของทะเลน้อยนั้นอาจเกิดจากการสะสมร่วมกับอนุภาคดินเหนียวโดยการยึดเกาะกับสารอินทรีย์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาค เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวมีการสะสมของคาร์บอนอินทรีย์ในปริมาณสูง บริเวณสถานี S34 (บริเวณคลองหลวง) ที่พบว่ามีสารสะสมเหล็กที่สูงกว่าบริเวณใกล้เคียงกันเกือบ 3 เท่า และสูงบริเวณอื่นในตอนกลางด้วยกันเกือบ 10 เท่า นั้นอาจเกิดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของคลองที่ลึกมากทำให้เกิดการทับถมและสะสมเหล็กในบริเวณนี้ โดยไม่มีการชะพาไปยังที่อื่น ส่วนในบริเวณทะเลสาบตอนนอกที่มีการผสมผสานระหว่างน้ำจืดกับน้ำเค็มเกิดเป็นน้ำกร่อย และก่อให้เกิดการแยกตัวของโลหะหนักออกจากมวลน้ำ (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532) จึงพบว่าเหล็กจะเกิดจากการตกตะกอน (precipitation) สะสมอยู่ในบริเวณทะเลสาบตอนนอกสูง นอกจากนี้ยังพบว่าเหล็กมีความสัมพันธ์ที่สูงกับอลูมิเนียม แสดงให้เห็นว่าเหล็กที่สะสมอยู่ในตะกอนทะเลสาบสงขลามีที่มาจากธรรมชาติมากกว่าจากการกระทำของมนุษย์

#### 3.4.8 ปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา

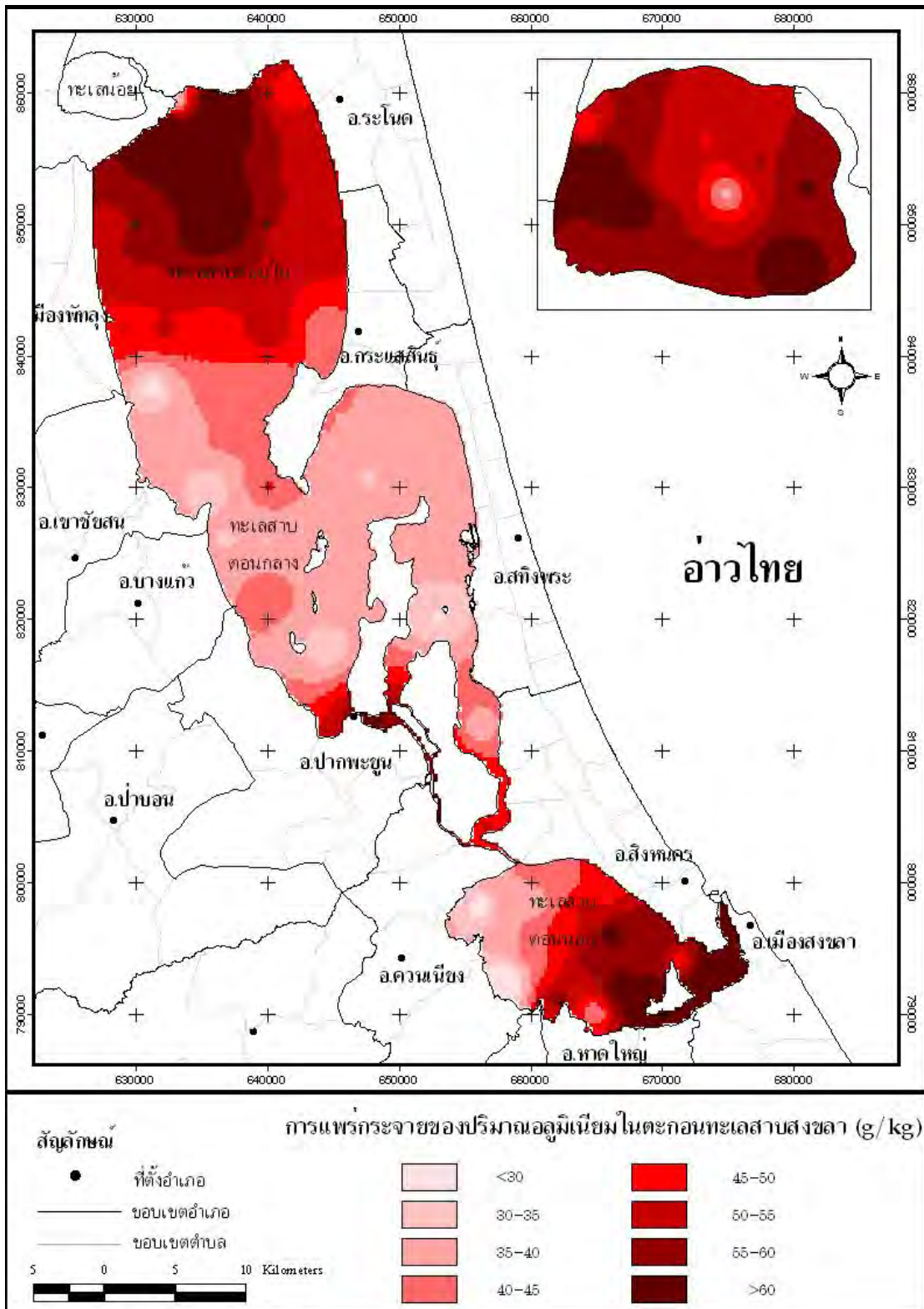
ค่าเฉลี่ยปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลน้อย ทะเลสาบตอนใน ทะเลสาบตอนกลาง และทะเลสาบตอนนอก มีค่าเท่ากับ  $58.0 \pm 9.5$ ,  $50.2 \pm 12.34$ ,  $42.9 \pm 11.6$  และ  $51.6 \pm 14.2$  g/kg ตามลำดับ โดยมีค่ามัธยฐาน 57.6, 50.5, 37.3 และ 52.0 mg/kg ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-28 แสดงการเปรียบเทียบค่ามัธยฐานโดยใช้ Box plot ซึ่งจะแสดงค่า percentile ที่ 25 และ 75 ของข้อมูล ตลอดจนข้อมูลที่มีค่าสูงหรือต่ำกว่าข้อมูลส่วนใหญ่ ส่วนรูปแบบการแพร่กระจายปริมาณอลูมิเนียมตามพื้นที่แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 3-29



ภาพประกอบที่ 3-28 Box plot แสดงช่วงของค่าเฉลี่ยปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ปริมาณอลูมิเนียมในทะเลสาบสงขลามีการสะสมค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกพื้นที่ ซึ่งคล้ายกับการสะสมตัวของโครเมียม สังกะสี และเหล็ก โดยพบว่าที่ทะเลน้อยมีค่าต่ำสุดที่สถานี N6 และสูงสุดที่สถานี N15 ทะเลสาบตอนในมีค่าต่ำสุดที่สถานี S15 และสูงสุดที่สถานี S03 ทะเลสาบตอนกลางมีค่าต่ำสุดที่สถานี S31 และสูงสุดที่สถานี S35 ทะเลสาบตอนนอกมีค่าต่ำสุดที่สถานี S53 และสูงสุดที่สถานี S57 และพบว่าค่าความเข้มข้นของอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลามีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับทะเลสาบลาดอกา ในประเทศรัสเซีย (Ladoga Lake, Russia) (Ristola *et al.*, 1996) (ตารางที่ 1-2 ในบทที่ 1) ส่วน Thailand proposed guideline (2006) ไม่ได้มีการกำหนดค่าของอลูมิเนียมไว้

เมื่อพิจารณาแผนผังการแพร่กระจายของปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา พบว่ามีรูปแบบการแพร่กระจายคล้ายกับสังกะสี และมีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกันในเกือบทุกพื้นที่ โดยมีปัจจัยหลายตัวที่ควบคุมรูปแบบการแพร่กระจาย ไม่ว่าจะเป็นปริมาณแร่ดินเหนียว คาร์บอนอินทรีย์ รวมไปถึงการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปแล้วมักจะพบว่า  $Al^{3+}$  มักจะถูกไฮโดรไลต์เป็นคอมพลอยด์ที่เป็นโพลีเมอร์ ซึ่งจะเกิดการตกตะกอนเมื่อพบกับน้ำเค็มที่มีอิเล็กโตรไลต์สูง จึงแยกตัวออกมาตกตะกอนในบริเวณปากแม่น้ำ (มนูดี หังสพฤกษ์, 2532)



ภาพประกอบที่ 3-29 รูปแบบการแพร่กระจายของปริมาณอลูมิเนียมในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### สรุป

ข้อมูลในภาพรวมพบว่า มีหลายปัจจัยที่ควบคุมการสะสมและการแพร่กระจายของโลหะในตะกอนทะเลสาบสงขลา ไม่ว่าจะเป็นปริมาณแร่ดินเหนียว คาร์บอนอินทรีย์ ซัลเฟอร์ทั้งหมด และปริมาณอลูมิเนียม โดยทะเลน้อยมีการสะสมของปริมาณปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้มีการสะสมโลหะหนักเกือบทุกตัวสูงกว่าทะเลสาบส่วนอื่นๆ ส่วนซัลเฟอร์นั้นพบว่ามีบทบาทในการควบคุมการสะสมของโลหะมากในบริเวณทะเลน้อย และรอบๆ เกาะขอม โดยเฉพาะด้านที่ใกล้ปากคลองอยู่ตะกาศและคลองพะวง ซึ่งสองบริเวณหลังนี้ได้รับอิทธิพลจากสารอินทรีย์ที่มากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อสารอินทรีย์ย่อยสลายภายใต้สภาวะขาดออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ของเหล็ก (FeS) ที่อยู่ในรูปของแข็งและถูกตรึงไว้กับตะกอน จะส่งผลให้โลหะอื่นๆ ซึ่งได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี เกิดการแยกตัวออกจากมวลน้ำมาสะสมในตะกอนโดยการแทนที่เหล็กและเกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะเหล่านั้น (Bentivegna *et al.*, 2004; DON, 2000) ทำให้พบว่าในบางสถานที่ที่มีซัลเฟอร์สูงมักมีการสะสมของโลหะสูงด้วย

เมื่อพิจารณาเป็นส่วนๆ พบว่าในบริเวณปากคลองต่างๆ มีการสะสมของปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและโลหะหนักที่ค่อนข้างสูงกว่าสถานที่อื่นๆ ดังนั้นจึงเป็นจุดที่ควรจะให้ความสนใจเป็นพิเศษหากต้องการติดตามควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษในทะเลสาบสงขลา แต่หากต้องการดูภาพรวมของปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบทั้งหมด ก็ไม่ควรจะใช้เฉพาะข้อมูลบริเวณปากคลอง เพราะจะทำให้ภาพรวมดูเหมือนว่ามีการสะสมโลหะหนักที่สูงในทะเลสาบสงขลา และอีกสถานีหนึ่งที่ควรให้ความสนใจ คือ สถานี S34 บริเวณคลองหลวง ที่พบว่าปริมาณโลหะหนักหลายๆ ตัวที่สูงมาก ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการปนเปื้อนจากการกระทำของมนุษย์ในสถานีนี้ เมื่อพิจารณาจากข้อมูลในภาพรวมจะเห็นว่าอลูมิเนียมมีความสัมพันธ์ที่สูงกับโลหะเกือบทุกตัว ดังนั้นจึงเป็นการเหมาะสมที่จะนำอลูมิเนียมมาใช้เป็นธาตุอนุรักษ์ที่จะใช้ในการปรับฐานและทำการประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา

### 3.5 ความสัมพันธ์ทางสถิติของปัจจัยทางกายภาพและเคมีในตะกอน

การวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยแต่ละอย่างซึ่งทำการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficients) ซึ่งเป็นวิธีการในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยทีละคู่ จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลพร้อมกันหลายๆ ตัวแปร โดยใช้ principal components analysis (PCA) เพื่อพิจารณาการรวมตัวกันของโลหะหนัก และทำการจัดกลุ่มของสถานีเก็บตัวอย่างโดยใช้ cluster analysis

### 3.5.1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficients)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อหาความสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยต่างๆ ในตะกอน ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.01 และ 0.05 ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 3-4

จากตารางพบว่าคาร์บอนอินทรีย์ (OC) มีความสัมพันธ์ที่สูงมากกับปัจจัยทางเคมีทุกตัว ( $p$ -value < 0.01) โดยเฉพาะปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (TC) และคาร์บอนอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับโลหะเกือบทุกตัว ยกเว้นตะกั่วและเหล็ก และมีความสัมพันธ์ผกผันกับแมงกานีสในระดับต่ำ ( $r = -0.240$ )

โลหะเกือบทุกตัวมีความสัมพันธ์สูงกับอลูมิเนียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครเมียม สังกะสีและเหล็ก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.643, 0.858 และ 0.502 ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ที่สูงนี้แสดงให้เห็นว่าโลหะเหล่านี้เกิดการตกตะกอนร่วมกับเหล็กออกซิไฮดรอกไซด์ (iron-oxyhydroxide) (Förstner and Wittman, 1983; Salomon *et al.*, 1987; Sompongchaiyakul, 1989) ส่วนทองแดงและแมงกานีสพบว่ามีสัมพันธ์ในระดับปานกลางกับอลูมิเนียม ( $r = 0.414$  และ 0.435 ตามลำดับ) ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้สามารถอธิบายได้ว่าโลหะเกือบทั้งหมด โดยเฉพาะ โครเมียม สังกะสี และเหล็กในตะกอนทะเลสาบสงขลา มีแหล่งที่มาจากรธรรมชาติ และมีความเกี่ยวข้องกับแร่อลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate mineral) (Rubio *et al.*, 2000) โดยยืนยันได้จากความสัมพันธ์ที่สูง ( $p < 0.01$ ) ของโลหะเหล่านี้กับขนาดอนุภาคดินเหนียว (% Clay) ซึ่งเป็นอนุภาคที่เกิดจากการสลายตัวผุพัง (weathering) ของแร่ปฐมภูมิหรือแร่ประกอบหินดั้งเดิมที่พบมากทั่วไปในดิน (ไพบูลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา, 2546) และการที่ตะกั่วไม่มีความสัมพันธ์กับอลูมิเนียมก็อาจจะกล่าวได้ว่าตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลาไม่ได้มีแหล่งที่มาจากรธรรมชาติ แต่มาจากการกระทำของมนุษย์ และพบว่าปัจจัยที่ควบคุมการสะสมของตะกั่วในตะกอนทะเลสาบสงขลา คือ ขนาดอนุภาคทราย และเหล็ก ซึ่งคู่ได้จากความสัมพันธ์ที่สูงของปัจจัยเหล่านี้กับตะกั่ว ( $r = 0.339$  และ 0.513 ตามลำดับ,  $p$ -value = 0.01) แสดงว่าตะกั่วที่สะสมในตะกอนทะเลสาบสงขลาเป็นการสะสมโดยยึดเกาะกับเหล็กที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคทราย

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีในตะกอนทะเลสาบสงขลาในตารางที่ 3-4 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของอนุภาคดินเหนียว สารอินทรีย์ และอลูมิเนียมเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการสะสมของโลหะในตะกอนทะเลสาบสงขลา เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวเป็นอนุภาคขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะและแลกเปลี่ยนไอออนสูง และสารอินทรีย์ที่เคลือบอยู่ที่อนุภาคขนาดเล็กก็มีส่วนช่วยให้เกิดการสะสมของโลหะในตะกอน



ตารางที่ 3-4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา

	Sand	Silt	Clay	OC	TC	TH	TN	TS	Cr	Cu	Pb	Zn	Mn	Fe	Al
Sand	1.000	-0.814**	-0.163	-0.164	-0.154	-0.190	-0.023	-0.142	-0.172	-0.104	0.339**	-0.102	-0.050	0.134	-0.237*
Silt		1.000	-0.440**	0.137	0.142	0.065	-0.009	0.152	-0.043	0.098	-0.237*	-0.255*	-0.007	-0.356**	-0.152
Clay			1.000	0.022	-0.001	0.185	0.051	-0.038	0.337**	-0.004	-0.121	0.591**	0.088	0.399**	0.625**
OC				1.000	0.989**	0.947**	0.851**	0.931**	0.423**	0.420**	-0.136	0.422**	-0.240*	0.210	0.341**
TC					1.000	0.951**	0.870**	0.920**	0.413**	0.395**	-0.125	0.403**	-0.217	0.211	0.325**
TH						1.000	0.862**	0.913**	0.537**	0.408**	-0.126	0.608**	-0.133	0.376**	0.541**
TN							1.000	0.835**	0.379**	0.336**	-0.217	0.453**	-0.184	0.177	0.371**
TS								1.000	0.413**	0.421**	-0.124	0.436**	-0.259*	0.240*	0.352**
Cr									1.000	0.169	0.120	0.495**	0.218	0.622**	0.643**
Cu										1.000	-0.052	0.302**	0.240*	0.032	0.414**
Pb											1.000	-0.012	0.072	0.513**	-0.134
Zn												1.000	0.193	0.576**	0.858**
Mn													1.000	0.150	0.435**
Fe														1.000	0.502**
Al															1.000

\* P-value < 0.05

\*\* P-value < 0.01

### 3.5.2 ความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal components analysis : PCA)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ PCA พบว่ามีองค์ประกอบ 2 กลุ่มแรกที่ให้ค่า Eigenvalue สูงกว่า 2.0 โดยกลุ่มที่ 1 มีค่า Eigenvalue = 6.0178 และกลุ่มที่ 2 มีค่า Eigenvalue = 2.9032 และ ผลรวมของความแปรปรวนทั้งสององค์ประกอบเท่ากับ 63% นั่นคือ ทั้งสององค์ประกอบสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรทั้งหมดได้ 63% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3-5 และแสดงค่าความสัมพันธ์และตำแหน่งของปัจจัยที่ควบคุมการแบ่งกลุ่มของตัวอย่างไว้ในภาพประกอบที่ 3-30

ตารางที่ 3-5 ค่าความสัมพันธ์ของผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก 2 กลุ่มแรกจากองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของตะกอนทะเลสาบสงขลา

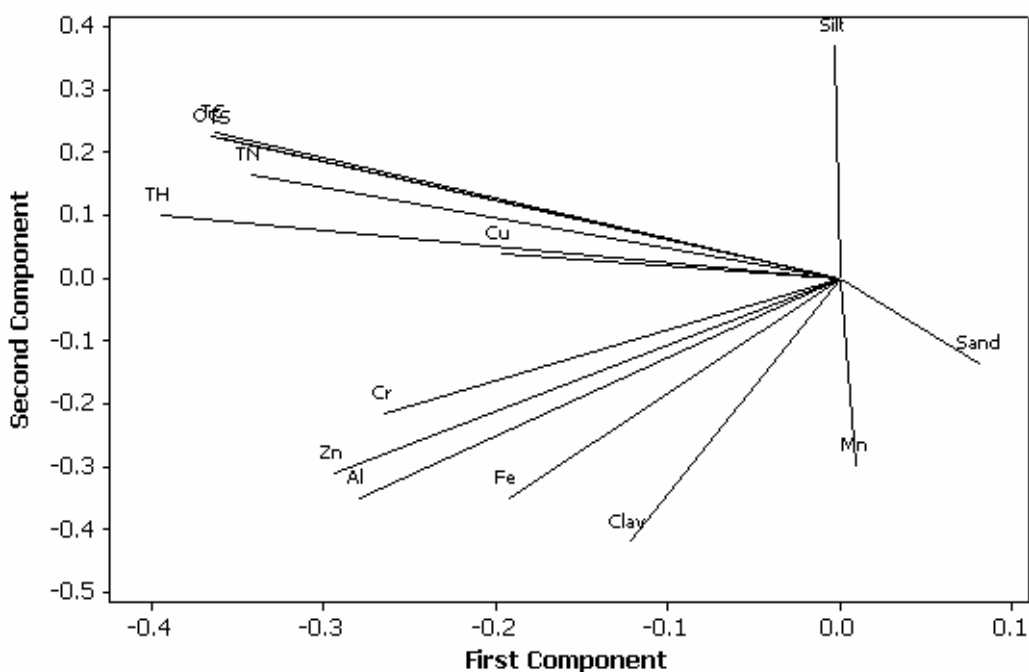
ปัจจัยทางกายภาพและเคมี	ค่าความสัมพันธ์	
	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2
ทราย (Sand)	0.081	-0.135
ทรายแป้ง (Silt)	-0.003	0.369
ดินเหนียว (Clay)	-0.122	-0.419
คาร์บอนอินทรีย์ (OC)	-0.366	0.225
คาร์บอนทั้งหมด (TC)	-0.363	0.231
ไฮโดรเจนทั้งหมด (TH)	-0.395	0.100
ไนโตรเจนทั้งหมด (TN)	-0.342	0.164
ซัลเฟอร์ทั้งหมด (TS)	-0.359	0.223
โครเมียม (Cr)	-0.265	-0.215
ทองแดง (Cu)	-0.197	0.039
สังกะสี (Zn)	0.010	-0.299
แมงกานีส (Mn)	-0.294	-0.310
เหล็ก (Fe)	-0.280	-0.351
อลูมิเนียม (Al)	-0.193	-0.351
Eigenvalue	6.0072	2.8099
% Variation	42.9	20.1

หมายเหตุ: ปัจจัยทางโลหะหนัก 2 ปัจจัยที่ไม่ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก คือ Cd และ Pb เนื่องจากค่าส่วนมากต่ำกว่าค่า detection limit ของเครื่อง ICP-OES

จากค่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในตารางที่ 3-5 พบว่า PCA กลุ่มที่ 1 เกือบทุกปัจจัย ซึ่งได้แก่ ทรายแป้ง (-0.003) ดินเหนียว (-0.122) คาร์บอนอินทรีย์ (-0.366) คาร์บอนทั้งหมด

(-0.363) ไฮโดรเจนทั้งหมด (-0.395) ไนโตรเจนทั้งหมด (-0.342) ซัลเฟอร์ทั้งหมด (-0.359) โครเมียม (-0.265) ทองแดง (-0.197) สังกะสี (-0.294) เหล็ก (-0.187) และอลูมิเนียม (-0.280) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นปัจจัย 2 ตัว คือ ทราย (0.081) และแมงกานีส (0.010) ที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับปัจจัยอื่นๆ

PCA กลุ่มที่ 2 พบว่า ทรายแป็ง (0.369) คาร์บอนอินทรีย์ (0.225) คาร์บอนทั้งหมด (0.231) ไฮโดรเจนทั้งหมด (0.100) ไนโตรเจนทั้งหมด (0.164) ซัลเฟอร์ทั้งหมด (0.223) ทองแดง (0.039) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และทราย (-0.135) ดินเหนียว (-0.419) โครเมียม (-0.215) แมงกานีส (-0.299) สังกะสี (-0.310) อลูมิเนียม (-0.351) และเหล็ก (-0.350) มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน



ภาพประกอบที่ 3-30 Loading plot จากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ของปัจจัยทางกายภาพและเคมีในตะกอนทะเลสาบสงขลา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในกลุ่มที่ 1 (เป็นกลุ่มหลักหรือองค์ประกอบหลักที่ดีที่สุดในการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัย) ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์และดินเหนียวกับปัจจัยทางกายภาพ เคมี และโลหะหนัก (ยกเว้นทราย และแมงกานีส) พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนอินทรีย์กับปัจจัยต่างๆ (-0.366) สูงกว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างดินเหนียวกับปัจจัยต่างๆ (-0.122) ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ตารางที่ 3-4) โดยเฉพาะค่าความสัมพันธ์ของคาร์บอนอินทรีย์กับปัจจัยทางเคมีและโลหะหนักหลายๆ ตัว ส่วนการที่พบว่า

ค่าความสัมพันธ์ของดินเหนียวกับปัจจัยทางเคมีและโลหะหนักบางตัวมีค่าสูงกว่านั้น ก็สามารถใช้ความสัมพันธ์ของ PCA กลุ่มที่ 2 มาอธิบาย ซึ่งในกลุ่มนี้พบว่า ดินเหนียวมีค่าความสัมพันธ์กับปัจจัยทางโลหะหนัก (ยกเว้นทองแดง) ที่ค่อนข้างสูง (-0.419) โดยเฉพาะกับอลูมิเนียม (-0.351) ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของดินเหนียวส่วนใหญ่ประกอบด้วยแร่ลูมิโนซิลิเกต นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยทางเคมีอีกตัวที่มีลักษณะเด่น คือ ซัลเฟอร์ โดยพบว่าใน PCA กลุ่มที่ 1 ซัลเฟอร์มีความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสูง (-0.359) กับโลหะเกือบทุกตัว ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

### 3.6 การจัดกลุ่มข้อมูลด้วย cluster analysis

การจัดกลุ่มของข้อมูลสถานีเก็บตัวอย่างดินตะกอนทะเลสาบสงขลาใช้เทคนิค Cluster Analysis โดยใช้ปัจจัยทางกายภาพ เคมี และ โลหะหนัก (ยกเว้นแคดเมียมและตะกั่ว) เป็นตัวแปรในการแบ่งกลุ่ม พบว่ากลุ่มตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มทะเลน้อย และกลุ่มทะเลสาบ และเมื่อใช้ distance cluster combine = 5 สามารถทำการแบ่งกลุ่มสถานีออกเป็น 4 clusters (ภาพประกอบที่ 3-31 และ 3-32) ดังนี้

Cluster I-1A ประกอบด้วยสถานีที่อยู่บริเวณทะเลสาบสงขลา จำนวน 44 สถานี ค่าเฉลี่ยของปัจจัยทางกายภาพและเคมีใน cluster นี้ คือ ทราย = 1.83% ทรายแป้ง = 66.02% ดินเหนียว = 32.13% อินทรีย์คาร์บอน = 0.89% คาร์บอนทั้งหมด = 1.05% ไฮโดรเจนทั้งหมด = 0.55% ไนโตรเจนทั้งหมด = 0.20% ซัลเฟอร์ทั้งหมด = 0.21% โครเมียม = 31.95 mg/kg ทองแดง = 3.28 mg/kg สังกะสี = 32.28 mg/kg แมงกานีส = 443.63 mg/kg เหล็ก = 19.28 g/kg และอลูมิเนียม = 44.50 g/kg cluster กลุ่มนี้ เป็นกลุ่มที่มีความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ cluster กลุ่มอื่นๆ

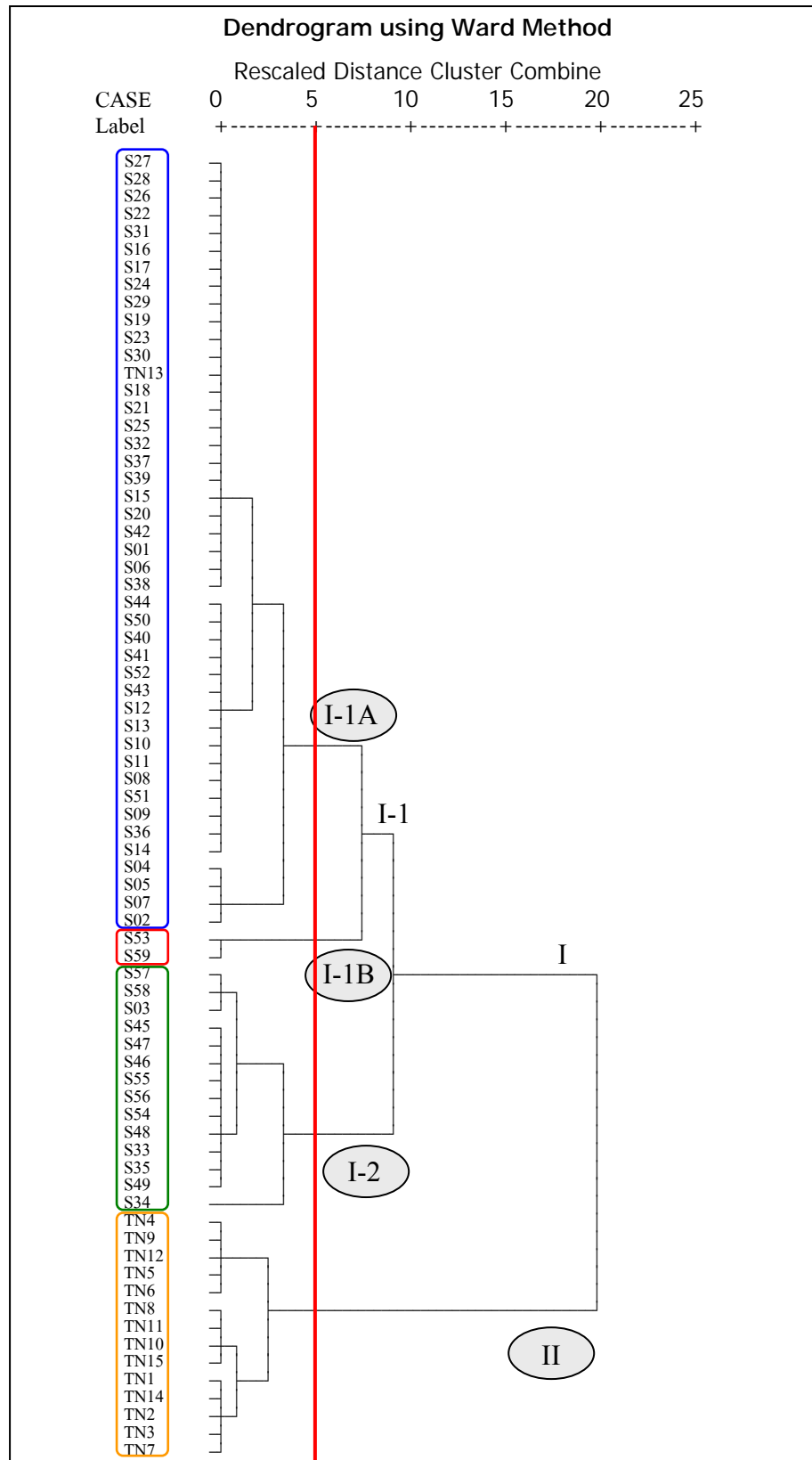
Cluster I-1B ประกอบด้วยสถานีที่อยู่บริเวณทะเลสาบสงขลาตอนนอก จำนวน 2 สถานี คือ สถานี S53 และสถานี S59 ค่าเฉลี่ยของปัจจัยทางกายภาพและเคมีใน cluster นี้ คือ ทราย = 65.30% ทรายแป้ง = 8.30% ดินเหนียว = 26.40% อินทรีย์คาร์บอน = 0.45% คาร์บอนทั้งหมด = 0.50% ไฮโดรเจนทั้งหมด = 0.35% ไนโตรเจนทั้งหมด = 0.40% ซัลเฟอร์ทั้งหมด = 0.19% โครเมียม = 17.52 mg/kg ทองแดง = 2.65 mg/kg สังกะสี = 29.30 mg/kg แมงกานีส = 245.59 mg/kg เหล็ก = 14.53 g/kg และอลูมิเนียม = 29.48 g/kg cluster กลุ่มนี้ เป็นกลุ่มที่เด่นในเรื่องของปัจจัยทางกายภาพ โดยเฉพาะทราย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่สูงมากกว่า cluster กลุ่มอื่นๆ ทั้งหมด (>60%) แต่มีค่าเฉลี่ยของปัจจัยทางโลหะหนักที่ต่ำกว่า cluster กลุ่มอื่นๆ

Cluster I-2 ประกอบด้วยสถานีที่อยู่บริเวณทะเลสาบสงขลา จำนวน 14 สถานี ค่าเฉลี่ยของปัจจัยทางกายภาพและเคมีใน cluster นี้ คือ ทราย = 4.31% ทรายแป็ง = 50.87% ดินเหนียว = 44.81% อินทรีย์คาร์บอน = 1.01% คาร์บอนทั้งหมด = 1.09% ไฮโดรเจนทั้งหมด = 0.83% ไนโตรเจนทั้งหมด = 0.24% ซัลเฟอร์ทั้งหมด = 0.31% โครเมียม = 42.27 mg/kg ทองแดง = 4.39 mg/kg ตะกั่ว = 3.95 mg/kg สังกะสี = 56.29 mg/kg แมงกานีส = 553.61 mg/kg เหล็ก = 42.87 g/kg และอลูมิเนียม = 65.50 g/kg cluster กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่เด่นในเรื่องของปัจจัยทางกายภาพและโลหะหนักโดยปัจจัยทางกายภาพที่เด่นคือดินเหนียว ซึ่งมีค่าเฉลี่ยที่สูง (>40%) ส่วนโลหะหนักก็พบว่ามีความเข้มข้นสูงถึงสูงมากเกือบทุกตัว

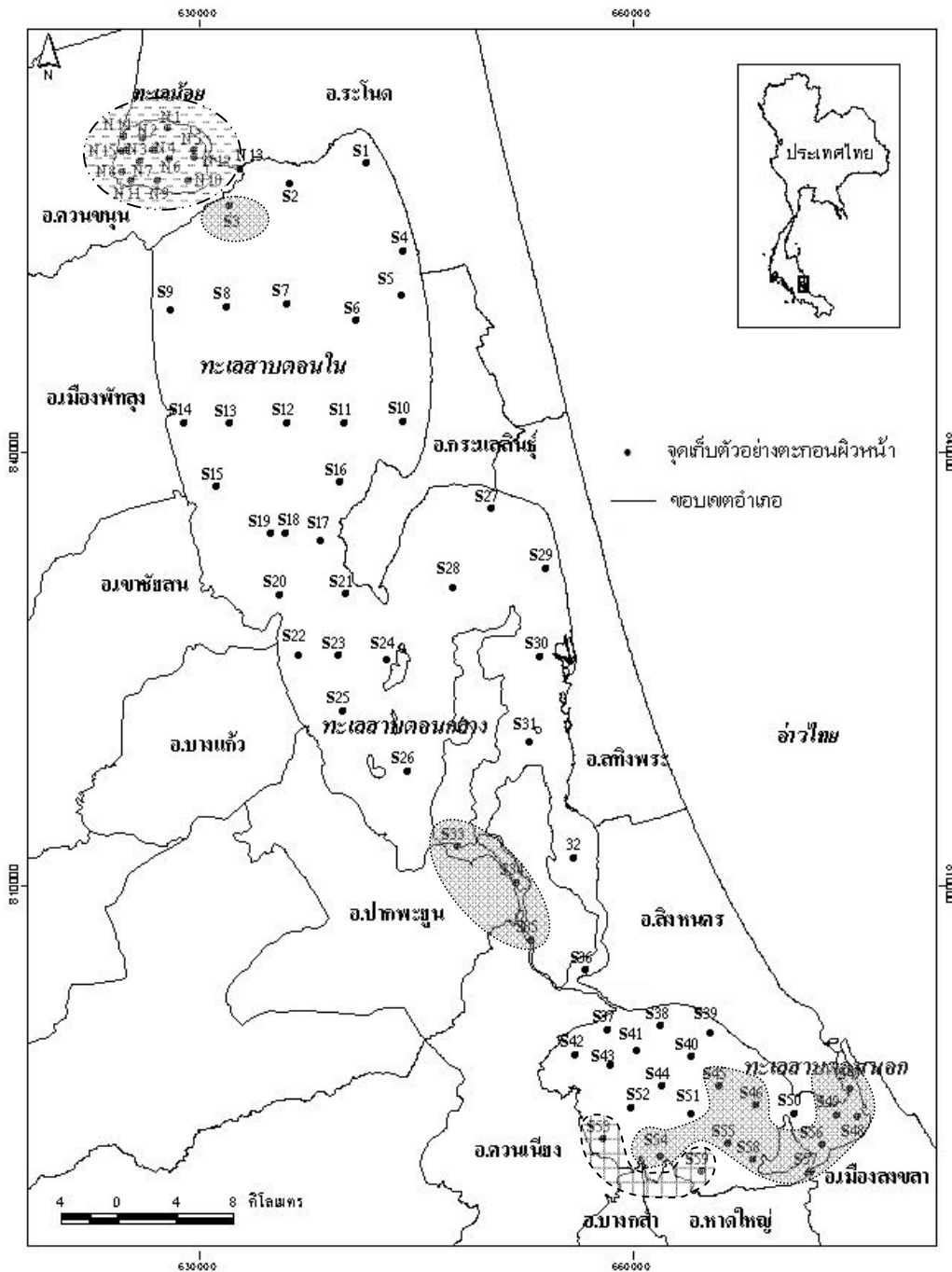
Cluster II ประกอบด้วยสถานีที่อยู่บริเวณทะเลน้อยทั้งหมด จำนวน 14 สถานี ค่าเฉลี่ยของปัจจัยทางกายภาพและเคมีใน cluster นี้ คือ ทราย = 0.67% ทรายแป็ง = 67.70% ดินเหนียว = 34.63% อินทรีย์คาร์บอน = 6.24% คาร์บอนทั้งหมด = 7.94% ไฮโดรเจนทั้งหมด = 1.63% ไนโตรเจนทั้งหมด = 0.71% ซัลเฟอร์ทั้งหมด = 1.81% โครเมียม = 45.18 mg/kg ทองแดง = 7.87 mg/kg ตะกั่ว < 3.33 mg/kg สังกะสี = 50.31 mg/kg แมงกานีส = 254.69 mg/kg เหล็ก = 31.07 g/kg และอลูมิเนียม = 58.04 g/kg cluster กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่เด่นในเรื่องของปัจจัยทางเคมีและโลหะหนัก โดยเฉพาะในเรื่องของสารอินทรีย์ที่มีค่าเฉลี่ยที่สูงมาก ๆ และมีปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในแนวโน้มที่ค่อนข้างสูงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาข้อมูลต่างๆ จะเห็นได้ชัดว่าทะเลน้อยมีความแตกต่างจากทะเลสาบส่วนอื่น ทั้งนี้เนื่องด้วยลักษณะทางกายภาพของทะเลน้อยที่เป็นทะเลสาบน้ำจืดตลอดทั้งปี มีการถ่ายเทมวลน้ำค่อนข้างน้อย มีพืชน้ำเจริญเติบโตอยู่เป็นจำนวนมาก บวกกับได้รับอิทธิพลจากพายุคลื่นที่อยู่บริเวณด้านบน ทำให้บริเวณทะเลน้อยมีการย่อยสลายและสะสมสารอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในปริมาณที่สูงตามไปด้วย

### 3.7 การจัดกลุ่มข้อมูลร่วมกับการวิเคราะห์ปัจจัยทางกายภาพและเคมีด้วย PCA

จากการจัดกลุ่มข้อมูลร่วมกับการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้ PCA สามารถจัดกลุ่มสถานีออกเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ ด้วยกัน (แสดงในภาพประกอบที่ 3-32) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย cluster analysis คือ กลุ่ม A ตรงกับ cluster I-1A ประกอบด้วยสถานีเก็บตัวอย่างบริเวณทะเลสาบสงขลาจำนวน 44 สถานี กลุ่ม B ตรงกับ cluster I-1B ประกอบด้วยสถานีเก็บตัวอย่างบริเวณทะเลสาบสงขลาตอนนอกจำนวน 2 สถานี กลุ่ม C ตรงกับ cluster I-2 ประกอบด้วยสถานีเก็บตัวอย่างบริเวณทะเลสาบสงขลาจำนวน 14 สถานี และ กลุ่ม D ตรงกับ cluster II ประกอบด้วยสถานีเก็บตัวอย่างบริเวณทะเลน้อยทั้งหมด จำนวน 14 สถานี



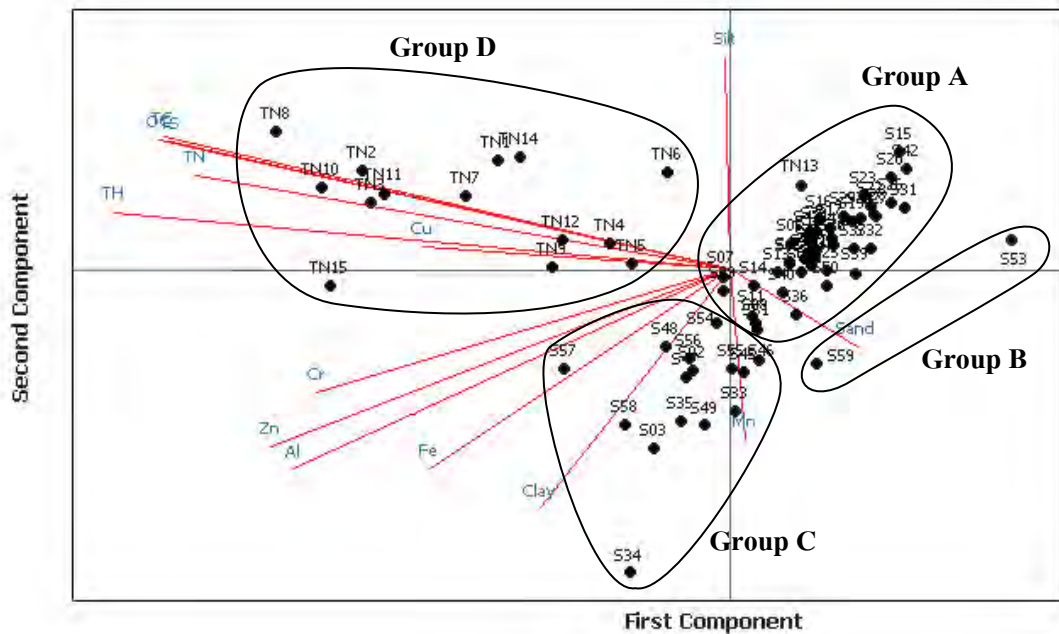
ภาพประกอบที่ 3-31 Dendrogram แสดงการจัดกลุ่มด้วย cluster analysis



ภาพประกอบที่ 2-32 การแบ่งกลุ่มของสถานีเก็บตัวอย่างตาม cluster analysis โดย

- คือ cluster I-1A (เป็น cluster ที่ไม่ได้ระบายสี)
- คือ cluster I-1B
- คือ cluster I-2
- คือ cluster II





ภาพประกอบที่ 3-33 ภาพแสดงการจัดกลุ่มข้อมูลร่วมกับการวิเคราะห์ปัจจัยโดยใช้ PCA

เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบที่ 3-33 จะเห็นได้ชัดเจนว่า กลุ่ม A (cluster I-1A) เป็นกลุ่มที่ไม่ค่อยมีปัจจัยด้านใดเด่นเป็นพิเศษ และปัจจัยหลายๆ ตัวก็ไม่ค่อยสัมพันธ์กันเท่าใดนัก กลุ่ม B (cluster I-1B) เป็นกลุ่มที่มีความเด่นในเรื่องของทราย กลุ่ม C (cluster I-2) เป็นกลุ่มที่เด่นในเรื่องของดินเหนียวและโลหะหนัก และกลุ่มสุดท้าย คือ กลุ่ม D (Cluster II) เป็นกลุ่มที่เด่นมากในเรื่องของคาร์บอนอินทรีย์ และปัจจัยทางเคมี

### 3.8 การปรับฐานทางธรณีเคมี (geochemical normalization) ของโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาด้วยอลูมิเนียม

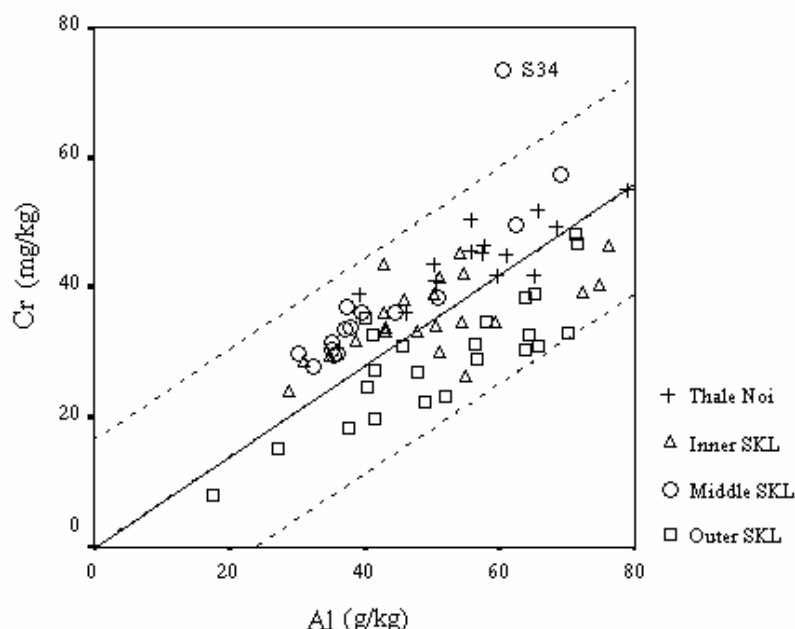
จากผลการศึกษาของโลหะหนักในตะกอนข้างต้นนั้น ยังเป็นข้อมูลที่ไม่เพียงพอในการที่จะประเมินสถานการณ์การปนเปื้อนของโลหะหนัก เนื่องจากในบางพื้นที่อาจจะมีความเข้มข้นพื้นฐาน (background concentration) ของโลหะบางตัวสูงโดยธรรมชาติ ดังนั้นเราจึงต้องทำการปรับฐานทางธรณีเคมี (geochemical normalization) ของโลหะนั้นๆ เพื่อลดความแปรปรวนของความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนที่เกิดจากความแตกต่างของขนาดเม็ดตะกอน และแร่ประกอบในตะกอน และเพื่อให้สามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติของความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนได้ (Loring and Rantala, 1995; ไตรภพ ฟ่องสุวรรณ และครุณี ฟ่องสุวรรณ, 2545)

การปรับฐานในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้อลูมิเนียม (Aluminium : Al) เป็นธาตุอนุรักษ์ โดยสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักแต่ละตัวกับธาตุอนุรักษ์และกำหนด

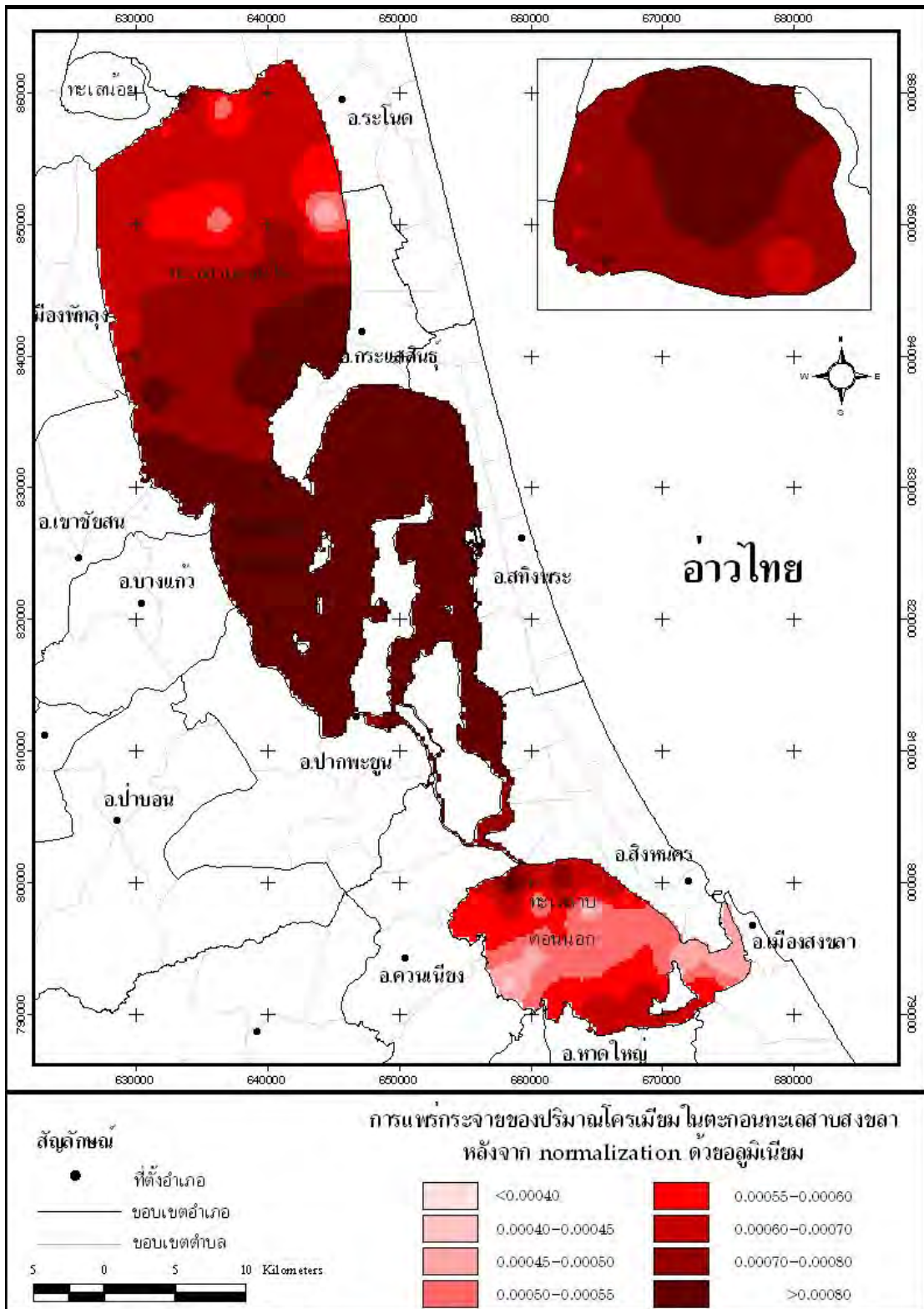
เกณฑ์ว่าค่าความแปรปรวนของโลหะที่มีการสะสมตามธรรมชาติตามลักษณะทางธรณีเคมี ควรจะตกอยู่ในภายในแถบกว้าง  $\pm 2S_{y/x}$  (เส้นประบาง) ที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (เส้นทึบ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และแสดงผลด้วยข้อมูลภาพที่ทำขึ้นโดยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยข้อมูลภาพที่สร้างขึ้นนี้เป็นการนำเข้าข้อมูลการปรับฐานโดยการนำค่าโลหะหนักแต่ละตัวหารกับค่าความเข้มข้นของอลูมิเนียม (ในหน่วยเดียวกัน) ซึ่งมีผลการปรับฐานดังนี้

### 3.8.1 การแพร่กระจายของโครเมียมหลังจากทำการปรับฐาน

ค่าความแปรปรวนของโครเมียมภายหลังจากทำการปรับฐานนั้นส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ยกเว้นสถานี S34 (ภาพประกอบที่ 3-34) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลภาพที่ทำขึ้นจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 3-35 จากข้อมูลเหล่านี้อาจสรุปได้ว่าโลหะโครเมียมในทะเลสาบสงขลานั้นส่วนใหญ่มีที่มาจากธรรมชาติ ยกเว้นสถานี S34 ที่พบว่ามี การสะสมสูงกว่าค่าทั่วไปในธรรมชาติ ซึ่งอาจสันนิษฐานว่าสถานีนี้เกิดการปนเปื้อนจากการกระทำของมนุษย์ แต่หากเรานำข้อมูลของปริมาณเหล็กในตะกอนของสถานีนี้มาพิจารณาร่วมด้วยก็จะทำให้พบว่าสถานีนี้ไม่ได้เกิดการปนเปื้อน แต่การที่พบว่ามีปริมาณโครเมียมสูงก็เนื่องมาจากเกิดการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์



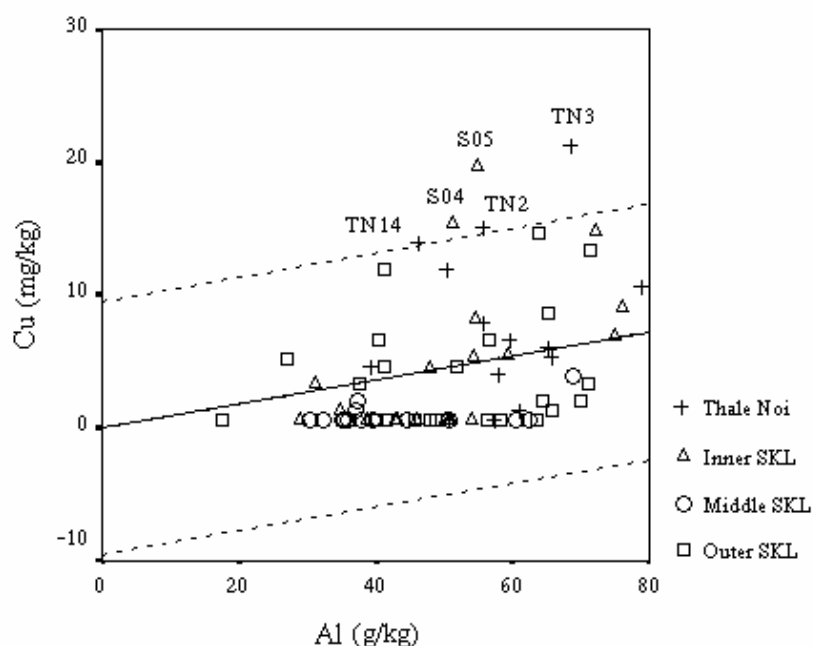
ภาพประกอบที่ 3-34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียมกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (เส้นทึบ) และแถบแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (เส้นประบาง)



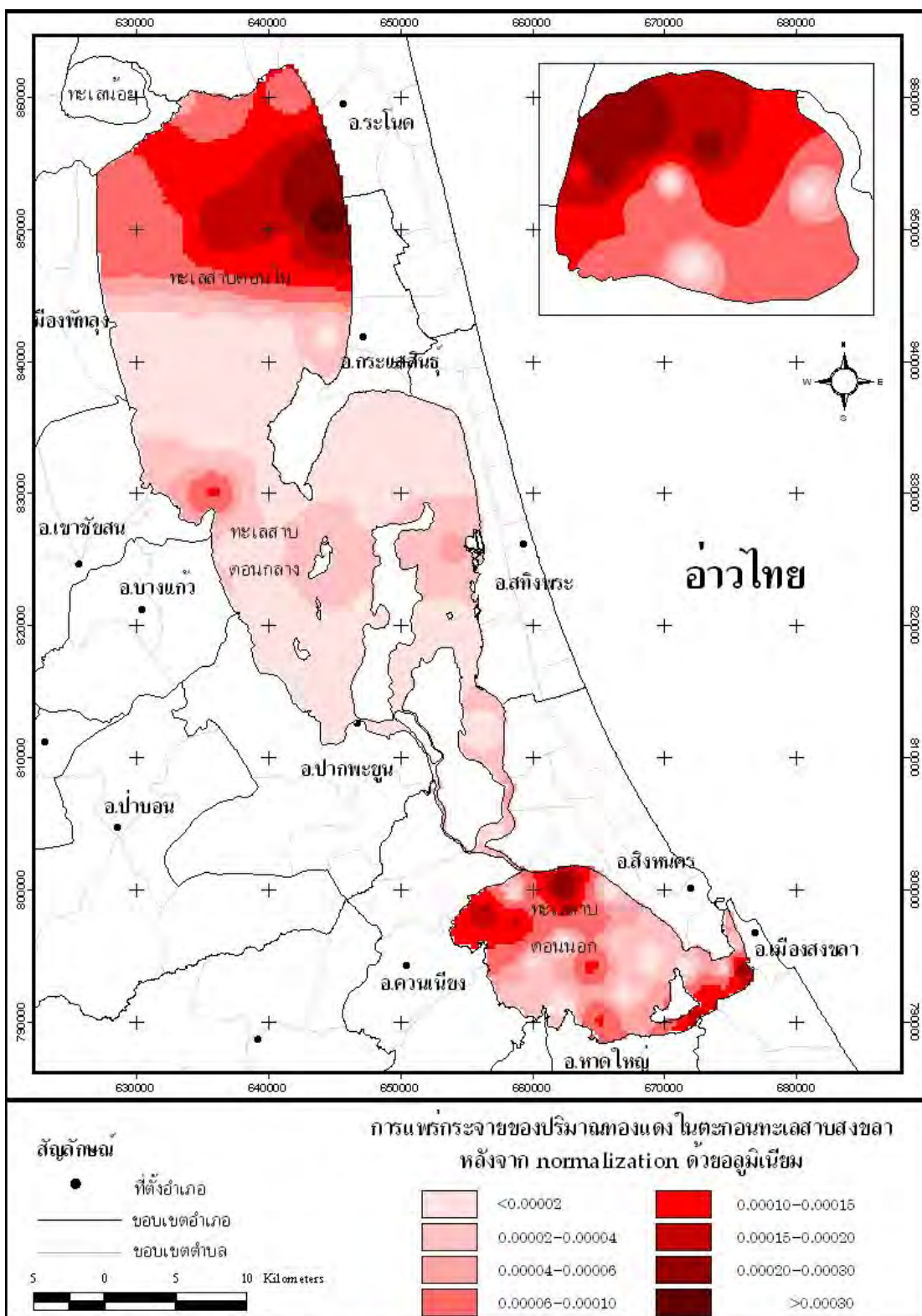
ภาพประกอบที่ 3-35 รูปแบบการแพร่กระจายของโครเมียมหลังจากทำการปรับฐานแล้ว

### 3.8.2 การแพร่กระจายของทองแดงหลังจากทำการปรับฐาน

ค่าความแปรปรวนของทองแดงภายหลังจากการปรับฐานนั้นส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ยกเว้นสถานี TN2 TN3 TN14 S04 และ S05 (ภาพประกอบที่ 3-36) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลภาพที่สร้างขึ้นจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 3-37 จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าโลหะทองแดงในทะเลสาบสงขลานั้น มีที่มาจากธรรมชาติเช่นเดียวกับโครเมียม ยกเว้นสถานีเก็บตัวอย่าง 5 สถานี ที่อยู่นอกเส้นที่กำหนดไว้ ซึ่งสถานี TN2 TN3 และ TN14 ที่อยู่ในบริเวณทะเลน้อยใกล้กับชุมชนทะเลน้อย จึงน่าจะได้รับการสะสมปริมาณทองแดงที่มากกว่าค่าปกติตามธรรมชาติมาจากกิจกรรมของชุมชน ส่วนสถานี S04 และ S05 ที่อยู่บริเวณทะเลสาบตอนในใกล้ปากคลองระโนดนั้น น่าจะได้รับทองแดงปริมาณมากจากการเลี้ยงกุ้งหรือการทำนาข้าวในบริเวณนี้



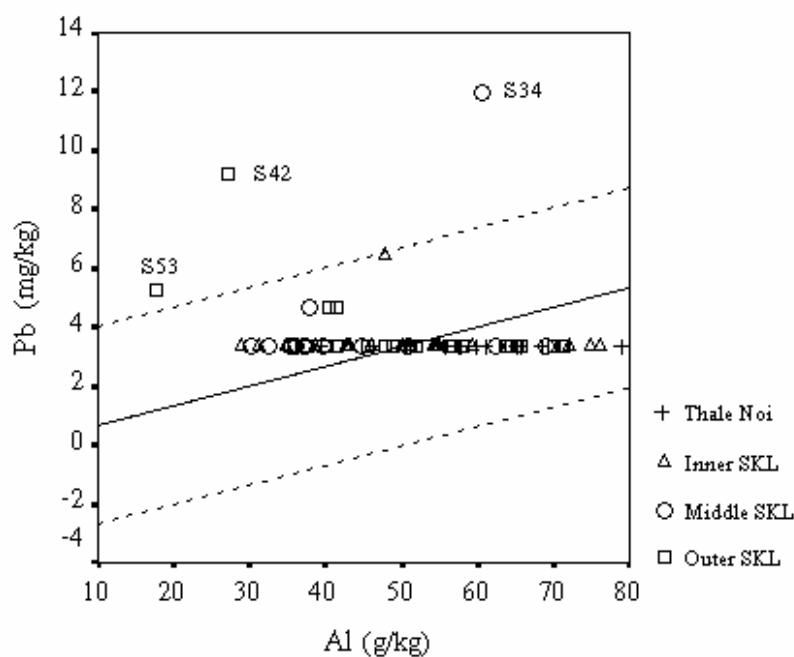
ภาพประกอบที่ 3-36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทองแดงกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพประกอบที่ 3-37 รูปแบบการแพร่กระจายของทองแดงหลังจากทำการปรับฐานแล้ว

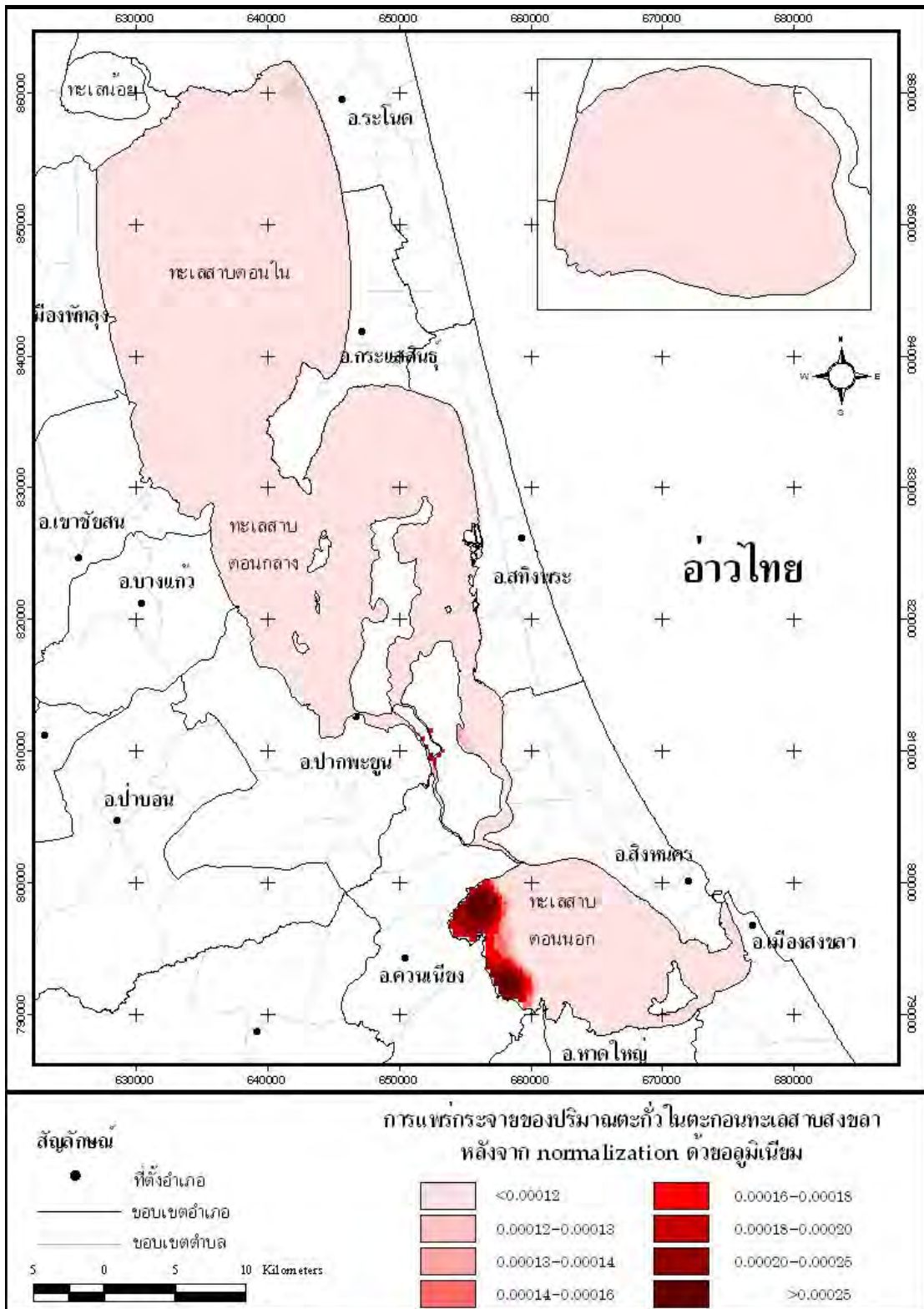
### 3.8.3 การแพร่กระจายของตะกั่วหลังจากทำการปรับฐาน

ค่าความแปรปรวนของตะกั่วภายหลังจากการปรับฐานนั้นส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ยกเว้นสถานี S34 S42 และ S53 (ภาพประกอบที่ 3-38) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลภาพที่สร้างขึ้นจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 3-39 จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าโลหะตะกั่วในทะเลสาบสงขลานั้นส่วนใหญ่ มีที่มาจากธรรมชาติเช่นเดียวกับโครเมียม ทองแดงและแมงกานีส ยกเว้นสถานีเก็บตัวอย่าง 3 สถานี ที่อยู่นอกเส้นที่กำหนดไว้ ซึ่งสถานี S34 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณทะเลสาบตอนกลางบริเวณคลองหลวง ที่สถานีนี้มีการสะสมตัวของเหล็กสูง ดังนั้นปริมาณตะกั่วที่สูงกว่าค่าปกติทั่วไปในธรรมชาติ นั้นน่าจะมาจากการตกตะกอนร่วมกับเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ สถานี S42 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณใกล้ปากคลองปากจำ โดยรอบมีพรุ และนาทุ่ง 1 แห่ง ปริมาณตะกั่วที่พบจึงน่าจะมาจากน้ำที่จากคลองปากจำหรือการทำนาทุ่งในบริเวณนี้ ส่วนสถานี S53 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณปากคลองบางเหริยง ปริมาณตะกั่วที่สูงนี้น่าจะมาจากน้ำที่จากการเกษตรในเขตตำบลบางเหริยง



ภาพประกอบที่ 3-38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตะกั่วกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



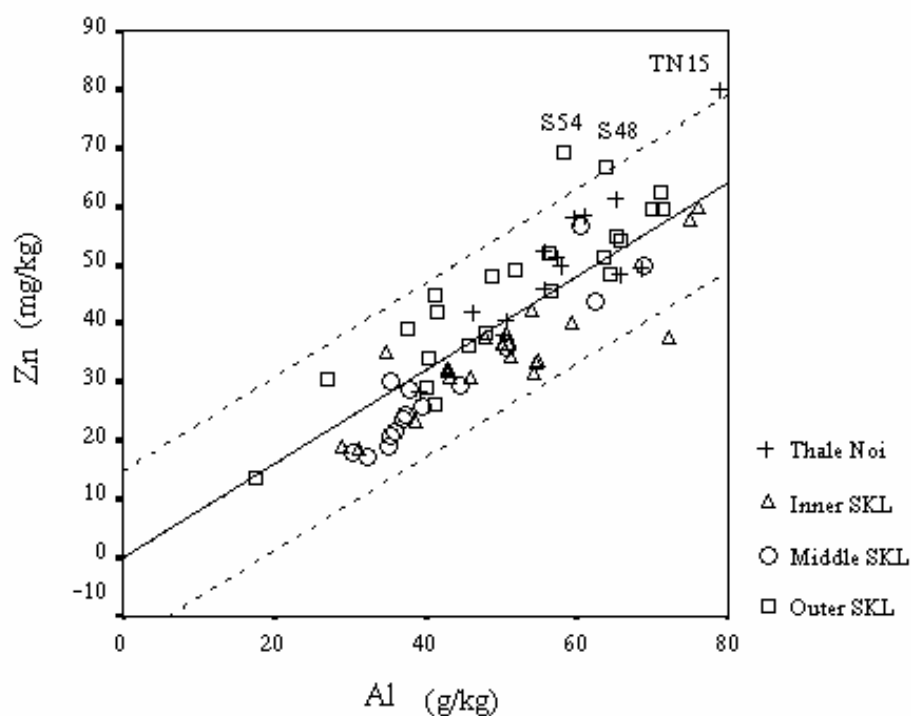


ภาพประกอบที่ 3-33 รูปแบบการแพร่กระจายของตะกั่วหลังจากทำการปรับฐานแล้ว

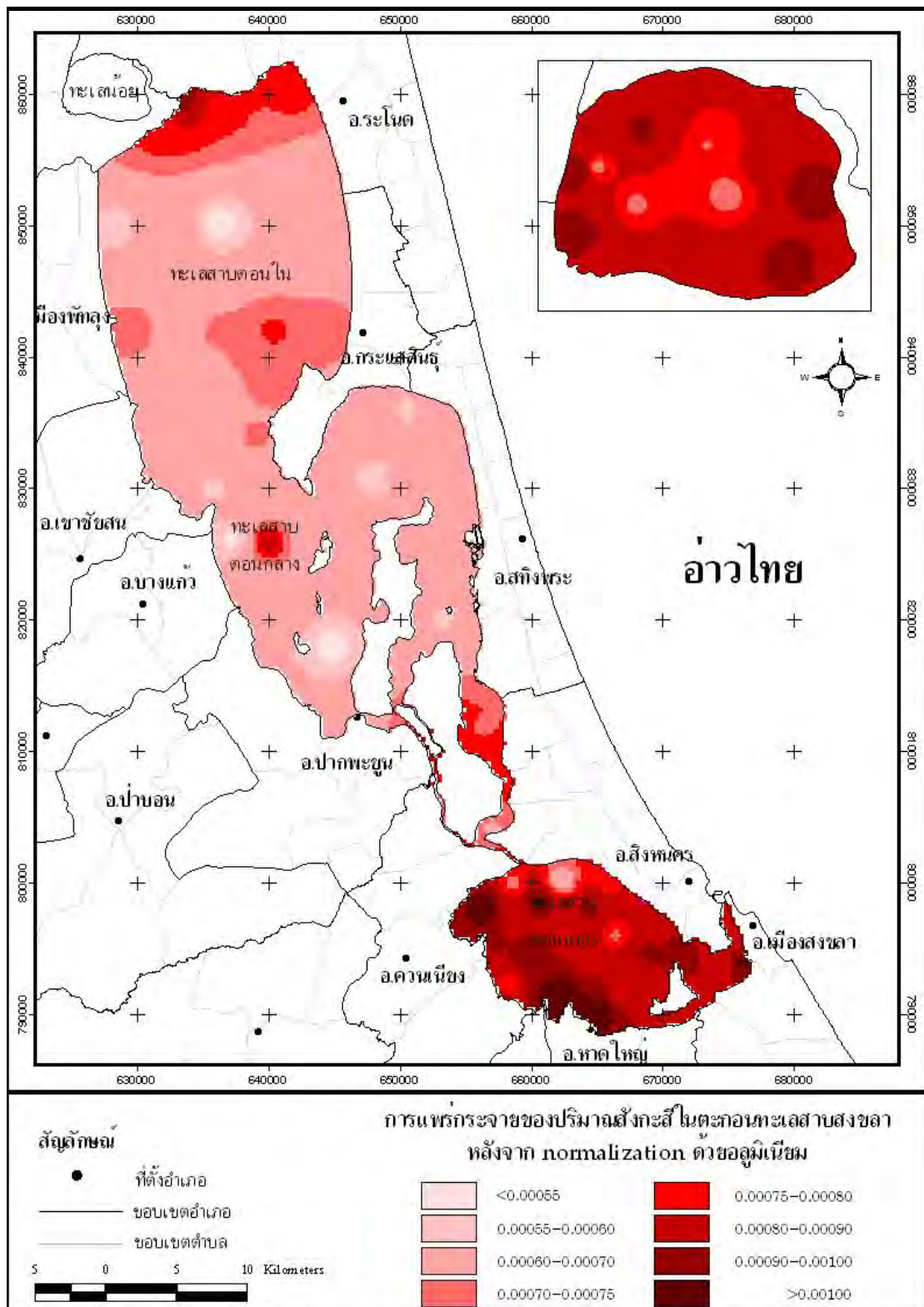


### 3.8.4 การแพร่กระจายของสังกะสีหลังจากทำการปรับฐาน

ค่าความแปรปรวนของสังกะสีภายหลังจากทำการปรับฐานนั้นส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ยกเว้นสถานี TN15 S48 และ S54 (ภาพประกอบที่ 3-40) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลภาพที่ทำขึ้นจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 3-41 จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าโลหะสังกะสีในทะเลสาบสงขลานั้นส่วนใหญ่ มีที่มาจากธรรมชาติเช่นเดียวกับโครเมียม ทองแดงและแมงกานีส ยกเว้นสถานีเก็บตัวอย่าง 3 สถานี ที่อยู่นอกเส้นที่กำหนดไว้ ซึ่งสถานี TN15 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณทะเลสาบตอนในที่เชื่อมต่อมาจากทะเลน้อย บริเวณนี้จึงอาจได้รับอิทธิพลมาจากทะเลน้อย ส่วนสถานี S48 และ S54 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณทะเลสาบตอนนอก โดยซึ่งสถานี S48 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณท่าเทียบเรือประมงสงขลา จึงน่าจะได้รับการแพร่กระจายของสังกะสีมาจากกิจกรรมของประชาชนและชุมชนในบริเวณนี้ ส่วนสถานี S54 เป็นสถานีที่อยู่บริเวณปากคลองอู่ตะเภาจึงน่าจะเกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ลงสู่คลองอู่ตะเภา



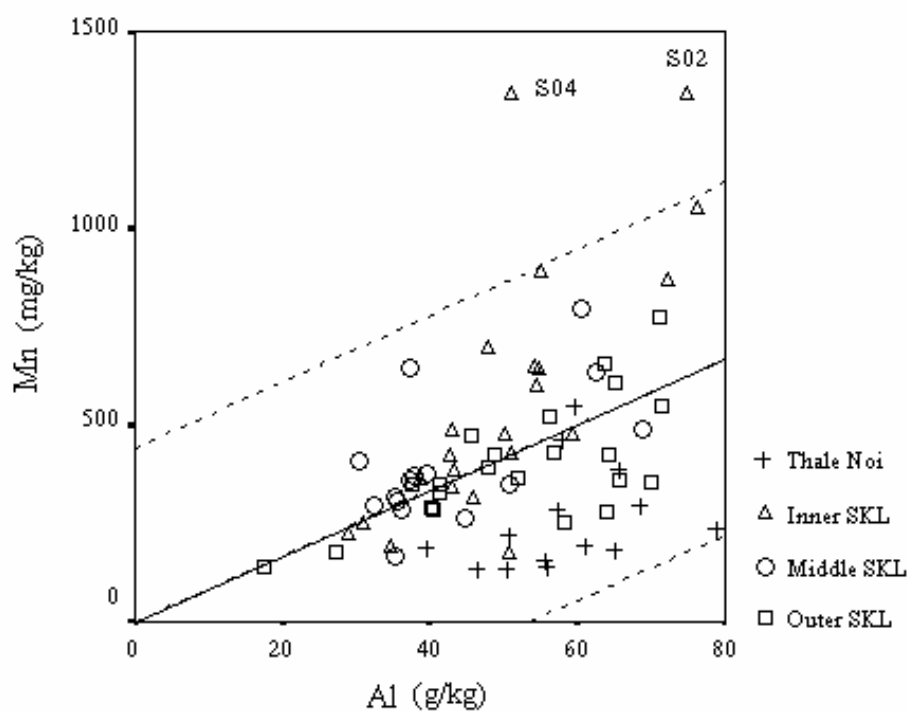
ภาพประกอบที่ 3-40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



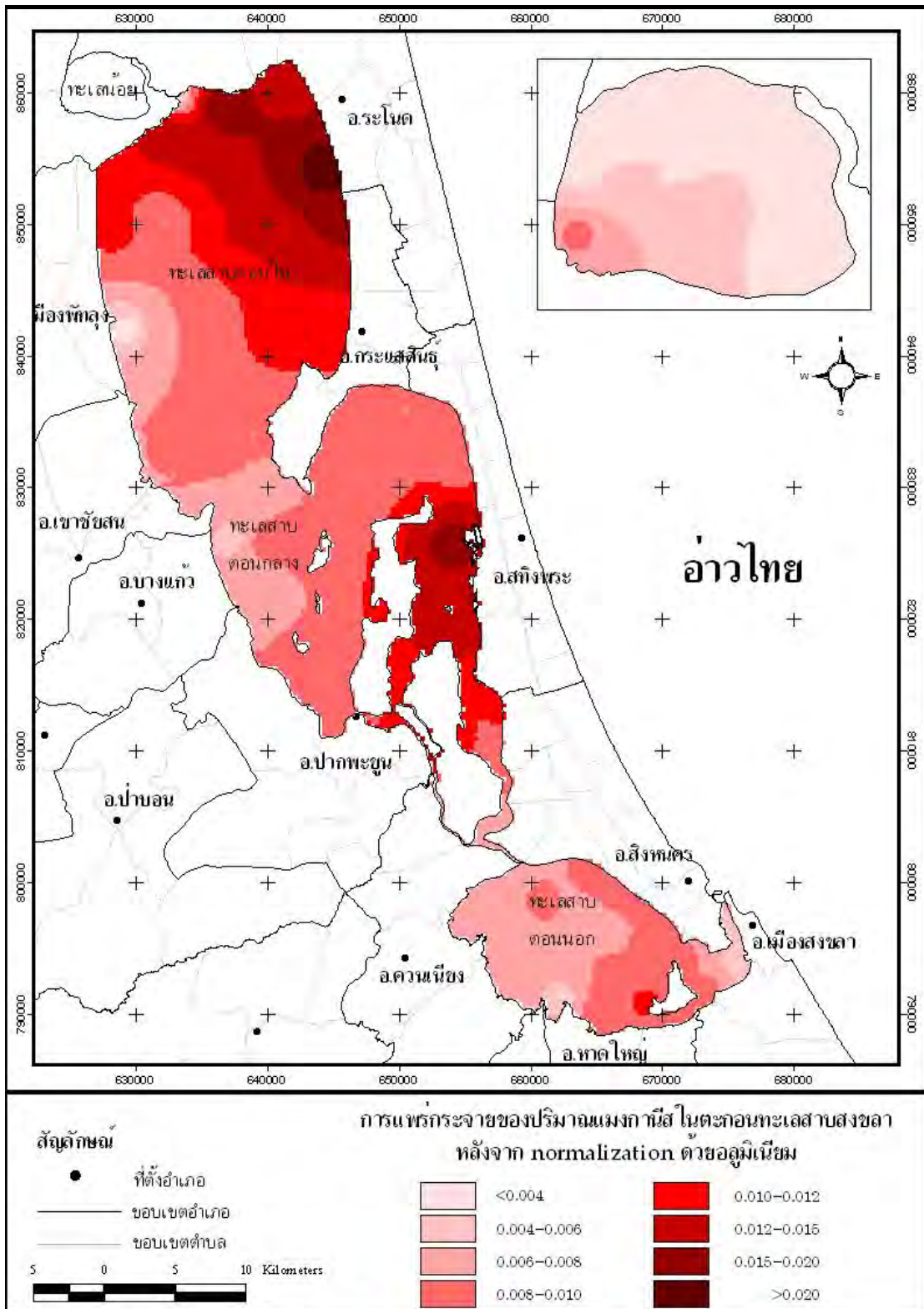
ภาพประกอบที่ 3-41 รูปแบบการแพร่กระจายของสังกะสีหลังจากทำการปรับฐานแล้ว

### 3.8.5 การแพร่กระจายของแมงกานีสหลังจากทำการปรับฐาน

ค่าความแปรปรวนของแมงกานีสภายหลังจากทำการปรับฐานนั้นส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ยกเว้นสถานี S02 และ S04 (ภาพประกอบที่ 3-42) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลภาพที่สร้างขึ้นจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 3-43 จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าโลหะแมงกานีสในทะเลสาบสงขลานั้นส่วนใหญ่ มีที่มาจากธรรมชาติ เช่นเดียวกับโครเมียมและทองแดง ยกเว้นสถานีเก็บตัวอย่าง 2 สถานี ที่อยู่นอกเส้นที่กำหนดไว้ โดยสถานี S02 และ S04 ที่อยู่บริเวณทะเลสาบตอนในใกล้อำเภอรโนคนั้น น่าจะได้รับอิทธิพลมาจากการแพร่กระจายของแมงกานีสจากการทำนาข้าวหรือการเลี้ยงกุ้งของชาวบ้านในบริเวณนี้



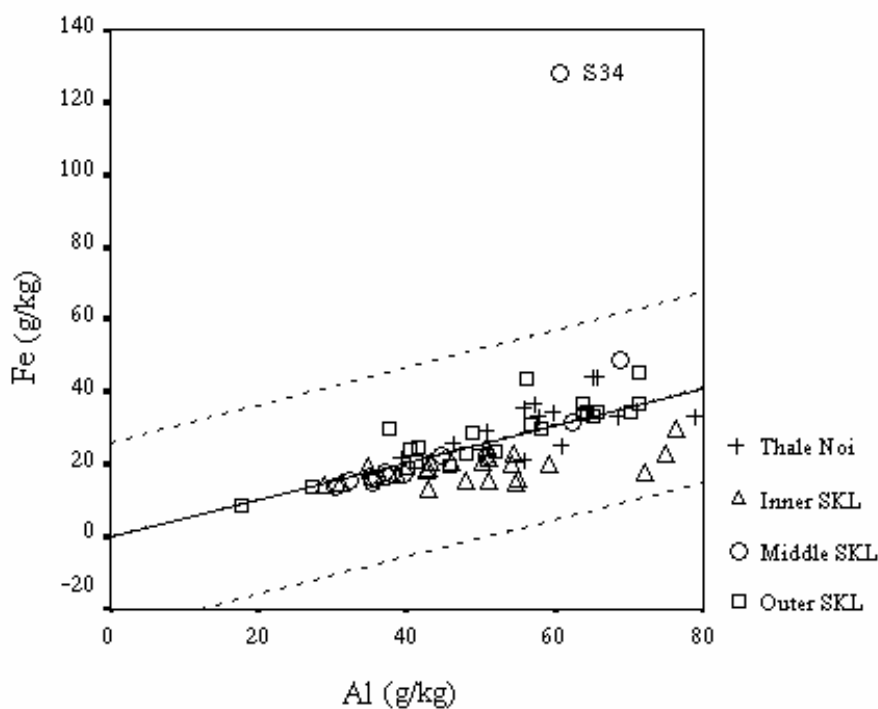
ภาพประกอบที่ 3-42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแมงกานีสกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพประกอบที่ 3-43 รูปแบบการแพร่กระจายของเมงกานีสหลังจากทำการปรับฐานแล้ว

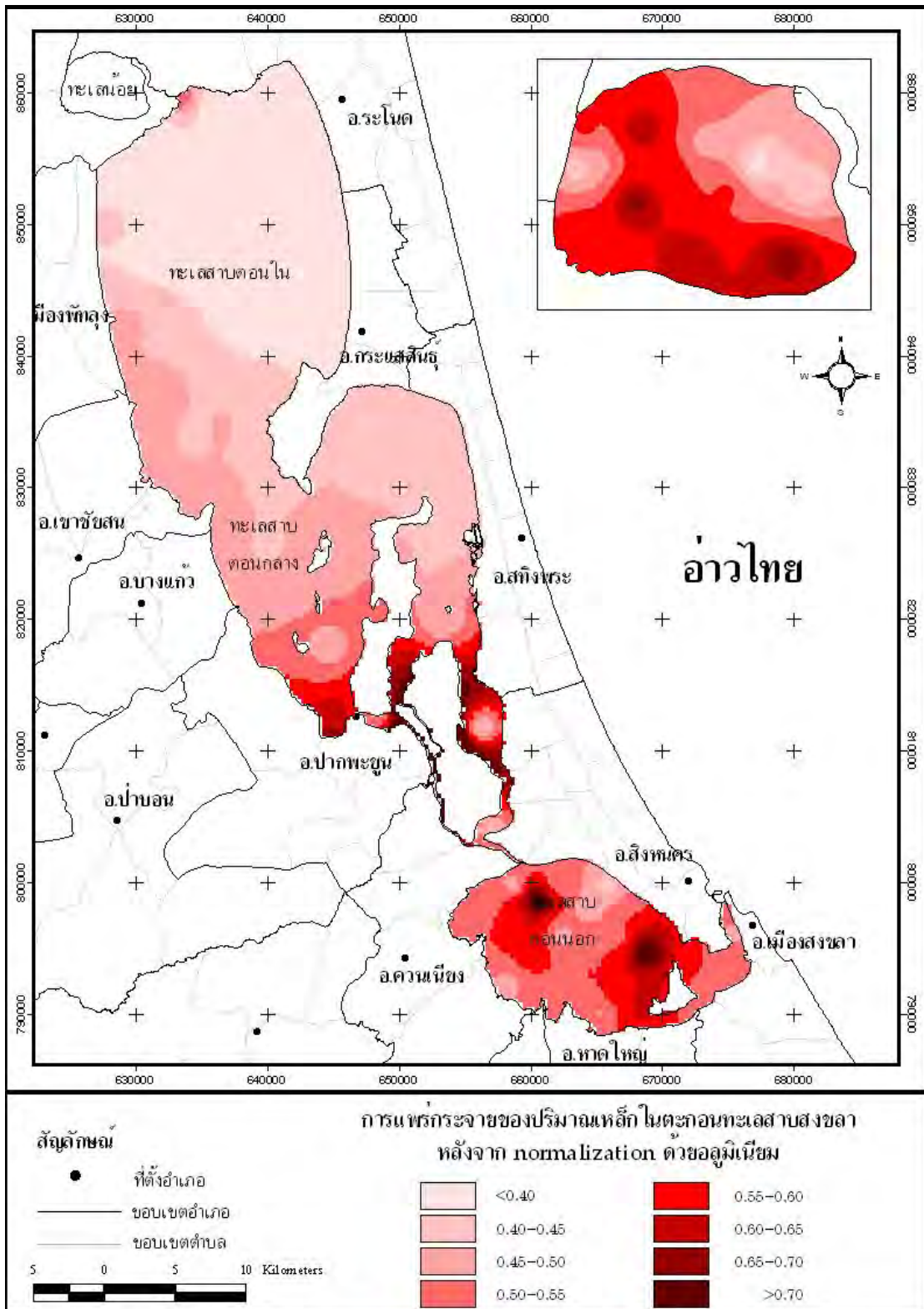
### 3.8.6 การแพร่กระจายของเหล็กหลังจากทำการปรับฐาน

ค่าความแปรปรวนของเหล็กภายหลังจากการปรับฐานนั้นส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ยกเว้นสถานี S34 เพียงสถานีเดียว (ภาพประกอบที่ 3-44) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลภาพที่สร้างขึ้นจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในภาพประกอบที่ 3-45 จากข้อมูลเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่าโลหะเหล็กในทะเลสาบสงขลานั้นส่วนใหญ่ มีที่มาจากธรรมชาติเช่นเดียวกับโครเมียม ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี ในส่วนของสถานีเก็บตัวอย่าง S34 บริเวณคลองหลวง ที่พบว่ามีค่าอยู่นอกเส้นที่กำหนดไว้นั้น อาจเกิดการสะสมที่สูงมากเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของดินในบริเวณนี้ที่มีเหล็กสะสมอยู่มากและคุณลักษณะของจุดเก็บตัวอย่างที่เป็นคลองที่ลึกมาก โอกาสที่จะเกิดการ flood ตะกอนท้องน้ำไปยังบริเวณอื่นจึงมีน้อย จึงทำให้เกิดการสะสมเหล็กได้มาก และชักพาให้โลหะอื่นๆ ตกตะกอนร่วมด้วย ดังนั้นจึงมักพบค่าโลหะที่สูงในจุดนี้



ภาพประกอบที่ 3-44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกับอลูมิเนียม ซึ่งแสดงเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นและแถบแสดงส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระดับความเชื่อมั่น 95%





ภาพประกอบที่ 3-45 รูปแบบการแพร่กระจายของเหล็กหลังจากทำการปรับฐานแล้ว

หลังจากทำการปรับฐานแล้วพบว่าข้อมูลจากกราฟจะทำให้เราสามารถประเมินในเบื้องต้นได้ว่ามีโลหะชนิดใดในสถานีเก็บตัวอย่างใดบ้างที่มีที่มาจากผลกระทบของธรรมชาติและสถานีใดที่อาจจะเกิดการปนเปื้อนจากการกระทำของมนุษย์ แต่ข้อมูลที่ได้นี้ยังไม่เพียงพอที่จะประเมินว่าเกิดการปนเปื้อนหรือไม่ และหากเกิดการปนเปื้อน ระดับของการปนเปื้อนอยู่ในระดับใด ดังนั้นเราจึงต้องหาคำชี้แจงที่จะใช้ประเมินว่าการปนเปื้อนนี้อยู่ระดับใด โดยใช้ดัชนีการสะสมเชิงธรณี

### 3.9 ดัชนีบ่งชี้ความรุนแรงของการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลา

ในการประมาณค่าของการปนเปื้อนของโลหะหนักที่สะสมในตะกอน เราสามารถคำนวณได้จากค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index : Igeo) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร (Loring and Rantala, 1995; ไตรภพ ฟ่องสุวรรณ และครุณี ฟ่องสุวรรณ, 2545)

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_n}{1.5B_n} \right]$$

เมื่อ  $C_n$  คือ ความเข้มข้นของโลหะ  $n$  ในตะกอนตัวอย่าง  
 $B_n$  คือ ความเข้มข้นพื้นฐาน (background concentration) ของโลหะ  $n$  เฉลี่ยในหินดินดานทั่วไป (Turekian and Wedepohl, 1961) (ตารางที่ 3-6)  
 ตัวเลข 1.5 ครอบคลุมการแปรปรวนปกติของโลหะนั้นที่เป็นสัดส่วนมาจากธรรมชาติ

ตารางที่ 3-6 ค่าความเข้มข้นพื้นฐานเฉลี่ยของโลหะในหินดินดานทั่วไป (mg/kg)

โลหะ	Cd	Pb	Cr	Cu	Mn	Zn	Al	Fe
ค่าเฉลี่ย	-	20	90	45	850	95	80000	47200

การใช้ค่า Igeo ในการประเมินการปนเปื้อนนั้น จะมีการแยกระดับความรุนแรงของการปนเปื้อนออกเป็น 7 ระดับ (Alagarsamy, 2006; ไตรภพ ฟ่องสุวรรณ และครุณี ฟ่องสุวรรณ, 2545) ดังตารางที่ 3-7

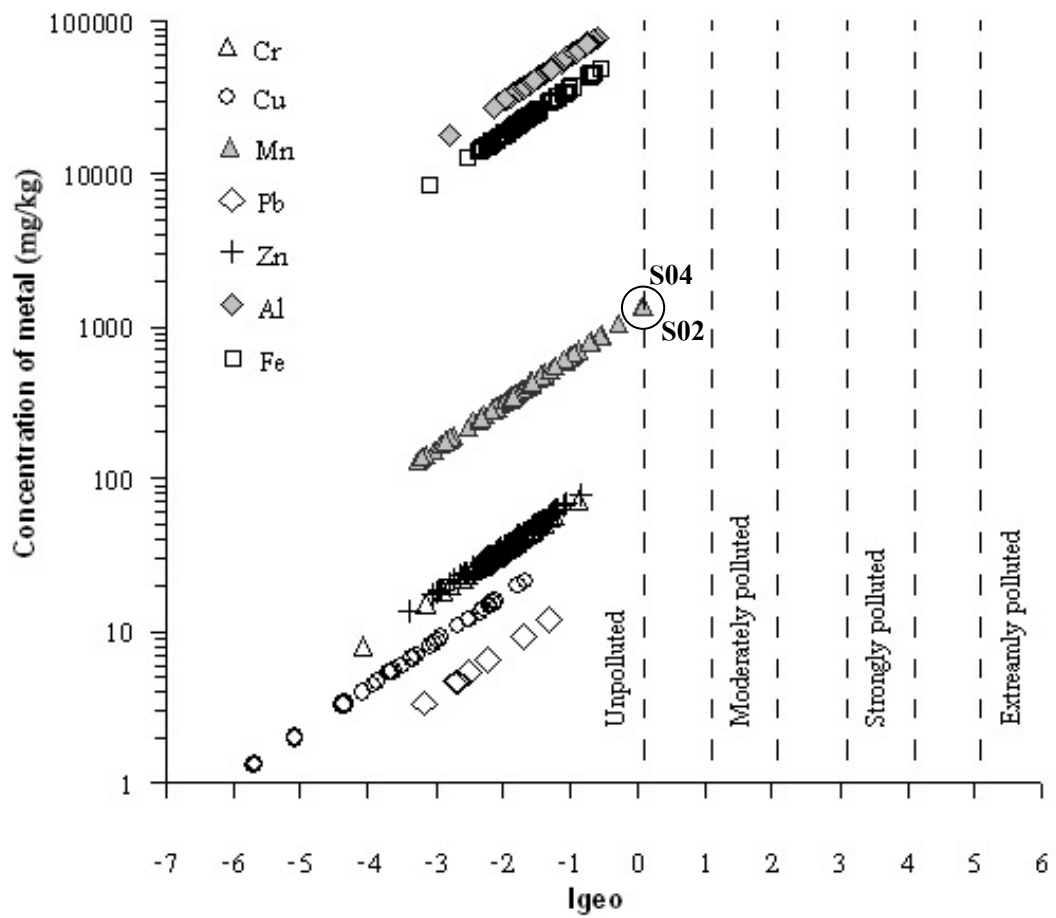


ตารางที่ 3-7 ระดับการปนเปื้อนของตะกอนที่ได้จากการคำนวณค่า Igeo

Igeo	Igeo Class	ความรุนแรงของการปนเปื้อน
>5	6	ปนเปื้อนรุนแรงมาก (Extremely polluted)
4-5	5	ปนเปื้อนรุนแรงถึงปนเปื้อนรุนแรงมาก (Strongly to extremely polluted)
3-4	4	ปนเปื้อนรุนแรง (Strongly polluted)
2-3	3	ปนเปื้อนไม่รุนแรงถึงปนเปื้อนรุนแรง (Moderately to strongly polluted)
1-2	2	ปนเปื้อนไม่รุนแรง (Moderately polluted)
0-1	1	ไม่ปนเปื้อนถึงปนเปื้อนไม่รุนแรง (Unpolluted to moderately polluted)
<0	0	ไม่ปนเปื้อน (Unpolluted)

ที่มา : Müller, 1979. อ้างถึงใน Loring and Rantala, 1995; Rubio *et al.*, 2000; Green-Ruiz And Páez-Osuna, 2001; Muniz *et al.*, 2004 และ Buccolieri *et al.*, 2006

ผลการวิเคราะห์หาค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี (Igeo) ของโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาพบว่าค่า Igeo ของโลหะทุกตัวที่ทำการศึกษาที่มีค่า <0 เกือบทุกตัว ยกเว้นแมงกานีสในสถานะ S02 และ S04 ที่พบว่ามีความมากกว่า 0 เล็กน้อย (0.069 และ 0.071 ตามลำดับ) และเมื่อนำข้อมูลมา plot ในกราฟพบว่า ปริมาณโลหะทุกตัวที่สะสมในทุกระดับอยู่ในระดับที่ไม่ปนเปื้อนถึงปนเปื้อนไม่รุนแรง (ภาพประกอบที่ 3-45) จึงสรุปได้ว่าปริมาณโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาที่มีการสะสมอยู่ในระดับต่ำ และยังไม่เกิดการปนเปื้อนจากกิจกรรมของมนุษย์รอบๆ ทะเลสาบสงขลาจนถึงขั้นที่จะเกิดมลพิษได้ ส่วนการที่พบว่าโลหะหลายตัวในหลายพื้นที่มีค่าความเข้มข้นที่สูงมากก็เนื่องจากความเข้มข้นพื้นฐานของโลหะนั้นๆ ในธรรมชาติมีสูง และบางสถานที่มีค่าสูงเกินกว่าค่าการสะสมปกติตามธรรมชาติตามลักษณะทางธรณีเคมี ซึ่งอาจจะเกิดจากการตกตะกอนร่วมกับเหล็กและแมงกานีสในแหล่งน้ำ หรือสะสมอยู่กับตะกอนในรูปซัลไฟด์ของโลหะ โดยเฉพาะในบริเวณที่เกิดสภาพขาดออกซิเจน เนื่องมาจากซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จะทำปฏิกิริยาของโลหะเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ ถ้าซัลไฟด์ของโลหะใดละลายน้ำได้ดีก็จะพบโลหะนั้นในน้ำสูง แต่ถ้าโลหะซัลไฟด์นั้นละลายน้ำได้น้อยก็จะพบโลหะนั้นตกตะกอนในรูปของซัลไฟด์ (มนูวดี หังสพฤกษ์, 2532)



ภาพประกอบที่ 3-46 กราฟที่ plot ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะและ Igeo index โดยเส้นประ เป็นเส้นที่แบ่งขอบเขตระดับของการปนเปื้อนในตะกอน โดยยึดหลักจากค่า ของดัชนีการสะสมเชิงธรณี