

ความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb, Cr และ Cd
ในตะกอนท้องน้ำทะเลสาบสงขลาตอนนอก ที่ตกตะกอนระหว่าง
ปี พ.ศ. 2520-2538

ไทรภพ ผ่องสุวรรณ¹ และ ครุณี ผ่องสุวรรณ²

Abstract

Bhongsuwan, T.¹ and Bhongsuwan, D.²

Concentration of heavy metals, Mn, Fe, Ni, Pb, Cr and Cd in bottom sediments of the Outer Songkhla Lake deposited between the year B.E. 2520-2538

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2002, 24(1) : 89-106

The study aimed to analyse the heavy metals Mn, Fe, Ni, Pb, Cr and Cd in 20 bottom sediment samples from 0 - 9 cm depth collected in 4 sites in the Outer Songkhla Lake. These sediment samples were deposited during the year B.E. 2520-2538 according to the Cs-137 dating. Total acid digestion was used to totally dissolve the samples using aqua regia and hydrofluoric acids. A quality control was performed by digesting the certified reference material IAEA SL-1 (lake sediment). Percent recoveries of selected heavy metals were between 79.96 (Ni) and 99.26 (Cr). Concentrations of Mn, Fe, Ni, Pb and Cr in the sediment

¹Department of Physics, ²Material Science Program, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112 Thailand.

¹Ph.D. (Applied Geophysics) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ ²วศ.ม. (นิวเคลียร์เทคโนโลยี) สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding email : btripob@ratree.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 9 เมษายน 2544

รับลงพิมพ์ 26 ตุลาคม 2544

samples were in ranges 368-756, 21014-36683, 1.1-16.7, 24.5-59.8 and 30.1-67.5 mg/kg, respectively. Cadmium was non-detectable but calculated to be less than 2.5 mg/kg in all samples. Result showed that Mn has significantly increased between the depth 9-0 cm (the deposition years B.E. 2520-2538), while Fe, Ni, Pb and Cr had not changed significantly. It was concluded that Mn, Fe, Ni and Cr were still in low concentration comparable to those of sediments in several remote lakes worldwide both in Europe and America. Only Pb concentration was found to be higher than that in remote lakes worldwide. Iron was found to be the best conservative element in the outer Songkhla Lake. Regional anomaly criteria showed that Mn, Ni, Pb and Cr in most samples were within the natural geochemical population except for Ni in one sample of core U, which was considered to be a regional anomaly. Geoaccumulation index calculated in comparison with heavy metal concentration in average shale showed that sediment samples of the outer Songkhla Lake were not polluted by Mn, Fe, Ni, Cr at any site, and were unpolluted/moderately polluted for Pb at site T. Analysis of the magnetic susceptibility and the heavy metal contents in sediments showed no clear relation between them.

Key words : heavy metal, bottom sediment, Songkhla Lake

บทคัดย่อ

ไตรภพ ผ่องสุวรรณ และ ดร.ณิ ผ่องสุวรรณ

ความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb, Cr และ Cd ในตะกอนท้องน้ำทะเลสาบสงขลาตอนนอก ที่ตกตะกอนระหว่าง ปี พ.ศ. 2520-2538

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2545 24(1) : 89-106

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb, Cr และ Cd ในตะกอนท้องน้ำ จาก 4 จุด ในทะเลสาบสงขลาตอนนอก จำนวน 20 ตัวอย่าง ที่มีอายุของการตกตะกอนระหว่าง ปี พ.ศ. 2520-2538 การย่อยตัวอย่างตะกอนใช้เทคนิคย่อยทั้งหมดด้วยกรด aqua regia ร่วมกับกรด HF ผลการวิเคราะห์เพื่อควบคุมคุณภาพการย่อยโดยใช้สารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA SL-1 ได้เปอร์เซ็นต์การแยกระหว่าง 79.96 (Ni) และ 99.26 (Cr) ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอนตัวอย่าง พบว่า Mn, Fe, Ni, Pb และ Cr มีค่าอยู่ในช่วง 368-756, 21014-36683, 1.1-16.7, 24.5-59.8 และ 30.1-67.5 มก/กก. ตามลำดับ ส่วน Cd มีปริมาณน้อยจนไม่สามารถวิเคราะห์ได้ แต่คำนวณได้ว่ามีความเข้มข้น Cd น้อยกว่า 2.5 มก/กก. ในทุกตัวอย่างตะกอน จากการวิเคราะห์พบว่า Mn ในตะกอนทะเลสาบสงขลามีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความลึก 9-0 ซม. ที่สัมพันธ์กับอายุการตกตะกอนระหว่าง ปี พ.ศ. 2520-2538 ส่วนในโลหะหนัก Fe, Ni, Pb และ Cr มีการแปรปรวนของความเข้มข้น ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหรือไม่ สรุปว่าความเข้มข้น Mn, Fe, Ni และ Cr ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกยังคงอยู่ในระดับต่ำเทียบเท่ากับความเข้มข้นโลหะหนักดังกล่าวในตะกอนทะเลสาบที่อยู่ห่างไกลทั้งในยุโรปและอเมริกา ยกเว้น Pb ซึ่งพบว่าในตะกอนทะเลสาบสงขลา มี Pb มากกว่าในตะกอนทะเลสาบอื่น จากการวิเคราะห์การแปรปรวนทางธรณีเคมีในธรรมชาติพบว่าสามารถใช้เหล็กเป็นธาตุอนุรักษ์ได้ดี ในกรณีโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก เมื่อใช้เกณฑ์ค่าผิดปกติเชิงภูมิภาพพบว่า Mn, Ni, Pb และ Cr ในตัวอย่างตะกอนส่วนใหญ่มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติ ยกเว้น Ni ในตัวอย่างตะกอน 1 ตัวอย่างจากตำแหน่ง U ที่แสดงความผิดปกติเชิงภูมิภาพ จากการวิเคราะห์ค่าดัชนีสะสมเชิงธรณีโดยเทียบกับความเข้มข้นโลหะหนักเฉลี่ยในหินดินดานทั่วไปพบว่า ตะกอนตัวอย่างไม่ปนเปื้อนโลหะ Mn, Fe, Ni และ Cr ที่ทุกตำแหน่ง และอยู่ในสภาพไม่ปนเปื้อน/ปนเปื้อนไม่รุนแรงสำหรับโลหะ Pb ที่ตำแหน่ง T อาจสรุปได้ว่าในตะกอนทะเลสาบสงขลา มีเพียงโลหะหนัก Pb เท่านั้น ที่อาจมีต้นกำเนิดบางส่วนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ เมื่อวิเคราะห์ค่าสภาพรีดิวซ์ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนตัวอย่างเทียบกับความเข้มข้นโลหะหนัก ยังไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างค่าสภาพรีดิวซ์ได้ทางแม่เหล็กกับความเข้มข้นโลหะที่ศึกษา

ทะเลสาบสงขลาเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประชาชนในจังหวัดสงขลา พัทลุง และบางส่วนของจังหวัดนครศรีธรรมราช ที่ดำรงชีวิตอยู่โดยรอบทะเลสาบแห่งนี้ ทะเลสาบสงขลาเป็นทะเลสาบที่ใหญ่ที่สุดในภาคใต้ของประเทศไทยมีพื้นที่ผิวน้ำรวม 1,046 ตร.กม (Office of Research and Development, 1994) มีลักษณะที่แตกต่างไปจากทะเลสาบอื่นๆ คือ มีทั้งระบบนิเวศน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม รวมอยู่ด้วยกัน โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ทะเลสาบตอนนอก (Outer Songkhla Lake) เป็นทะเลเปิด มีเนื้อที่ 182 ตร.กม สภาพน้ำเป็นน้ำเค็ม ทะเลสาบสงขลาตอนในหรือทะเลหลวง (Thale Luang) มีเนื้อที่ 837 ตร.กม สภาพน้ำเป็นน้ำกร่อยตามฤดูกาล และทะเลน้อย (Thale Noi) เป็นทะเลน้ำจืด มีเนื้อที่ 27 ตร.กม มีน้ำจากลำคลองหลายสายไหลลงสู่ทะเลสาบโดยเฉพาะทะเลสาบตอนนอก เนื่องจากทะเลสาบสงขลาตอนนอกมีระบบนิเวศวิทยาที่ซับซ้อน จึงมีความหลากหลายทางชีวภาพสูง ทะเลสาบสงขลาจึงเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนตามธรรมชาติ และเป็นแหล่งทำประมงที่สำคัญ มีชุมชนขนาดใหญ่อยู่โดยรอบ พื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาถูกใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มีชุมชนขนาดใหญ่ มีการทำประมง การเกษตรกรรม การทำเหมืองแร่ (ดีบุก วุลแฟรม ตะกั่ว และ แบไรต์ เป็นต้น) และโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ทะเลสาบสงขลากลายเป็นที่รองรับน้ำเสียปริมาณมหาศาลที่ไหลลงสู่ทะเลสาบ จากข้อมูลของสำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 (2543) รายงานปริมาณน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรอบทะเลสาบสงขลา ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากยางพารา และอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำ พบว่ามีอัตราสูงถึง 70,920 ลบ.เมตร/วัน โดยจำนวน 57,910 ลบ.เมตร/วัน ถูกระบายลงสู่ทะเลสาบสงขลาที่เหลือระบายลงทะเลอ่าวไทย นอกจากนั้นยังมีน้ำเสียจากชุมชนเมืองขนาดใหญ่ เช่น จากชุมชนเทศบาลนครสงขลา และจากชุมชนเทศบาลนครหาดใหญ่และปริมณฑล รวมทั้งน้ำเสียที่มาจากพื้นที่ทำการเกษตรซึ่งคิดเป็น 62.4 % ของพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด (สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12, 2543)

การปนเปื้อนอย่างรุนแรงของโลหะหนักในตะกอนดิน มักพบว่ามีสาเหตุสำคัญมาจากกิจกรรมของมนุษย์ (anthropogenic) ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นโลหะหนักที่มาจาก

การอุตสาหกรรม (Alloway, 1995) การปนเปื้อนโลหะหนักในทะเลสาบสงขลา อาจมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากน้ำเสียจากกิจการอุตสาหกรรม จากการใช้สารเคมีเกษตร เช่น ยาฆ่าแมลง ปุ๋ย การทำเหมืองแร่ และการขยายตัวของชุมชน รวมกับปริมาณโลหะหนักที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น เกิดจากการผุพังของหินแวลล์ (rock erosion) กลายเป็นตะกอนที่ไหลมากับน้ำลงสู่ทะเลสาบ แม้ว่าโลหะหนักหลายธาตุที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ได้แก่ Zn, Mn, Cu, Cr, Ni, Co และ Mo แต่บางชนิด เช่น Pb, Cd, Ag, Hg และ Sn ไม่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตและเป็นพิษเมื่อได้รับธาตุเหล่านี้ โลหะหนักที่จำเป็นต่อร่างกายแต่หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไปก็เป็นพิษได้เช่นกัน

ทะเลสาบหลายแห่งในต่างประเทศมีการปนเปื้อนโลหะหนักที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ตะกอนในทะเลบอลติกที่อ่าวโบทเนียน (Bothnian Bay) ของประเทศฟินแลนด์ มีการปนเปื้อนโลหะหนัก Mn, Fe, Pb และ Cr เท่ากับ 1,720-8,960, 49,000-62,000, 30-79 และ 41-73 มก/กก. ตามลำดับ (Leivuori, 1998) โดยค่าค่าคือค่าความเข้มข้นโลหะหนักเฉลี่ยที่ระดับลึก 24-25 ซม. ซึ่งผู้วิจัยถือเป็นค่าภูมิหลังตามธรรมชาติ และค่าสูงเป็นค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่ระดับลึกของตะกอน 0-1 ซม. ผู้วิจัยสรุปว่าเป็นตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนักที่มาจากกิจการอุตสาหกรรมเป็นหลัก โลหะหนักที่มาจากการทำเหมืองแร่ก็อาจปนเปื้อนตะกอนท้องน้ำอย่างรุนแรงได้เช่นกัน เช่น ตะกอนลำน้ำที่ไหลผ่านเหมือง Pecos และเหมือง La Bajada ใน New Mexico ซึ่งทำเหมืองแร่ซัลไฟด์ของโลหะหนัก ที่เหมือง Pecos พบความเข้มข้นโลหะหนัก Cu, Pb และ Zn สูงมากถึง 280-355, 255-310 และ 2,700-3,050 มก/กก. ตามลำดับ ขณะที่ไม่พบการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนลำน้ำที่ผ่านเหมือง La Bajada โดยมีความเข้มข้นโลหะหนัก Cu, Pb และ Zn สูง 2.0-3.2, 2.0-3.3 และ 6.2-9.0 มก/กก. ตามลำดับ (Brandvold and McLemore, 1998)

สำหรับในทะเลสาบสงขลาตอนนอก ก็เคยมีการศึกษาหาความเข้มข้นโลหะหนักบางชนิดในตะกอนมาแล้ว เช่น Nachiangmai (1979) และ Maneepong (1996) ใช้เทคนิคการย่อยตะกอนด้วยกรดแก่ (strong acid digestion) $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ ขณะที่ Maneepong และ

Angsupanich (1999) เลือกวิเคราะห์โลหะหนักในตะกอนจากการย่อยตะกอนด้วยกรด HCl ความเข้มข้น 1 โมลาร์ การย่อยตะกอนด้วยวิธีข้างต้น ปกติจะไม่สามารถละลายแร่กลุ่มซิลิเกตที่มีอยู่ในตะกอนได้หมด จึงมักจะมีของแข็งตกค้างซึ่งจะถูกกรองแยกออกไป สัดส่วนของโลหะที่ติดอยู่ในสารตกค้างจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ทำให้ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในตะกอนเมื่อใช้วิธีการย่อยแตกต่างกัน มักจะไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ อย่างไรก็ตามมีกลุ่มนักวิจัยที่มีความเห็นว่า ปริมาณโลหะที่ติดค้างอยู่ในแร่กลุ่มที่คงทนต่อกรด เช่น แร่กลุ่มซิลิเกต ย่อมจะไม่ละลายตัวออกมาส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต แต่คงไม่มีใครสามารถประกันได้ว่าในระยะยาวแล้วกระบวนการทางเคมี ชีวเคมี และฟิสิกส์ในธรรมชาติจะไม่สามารถเปลี่ยนโลหะที่ติดค้างอยู่นั้นให้ออกมาส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้ ฉะนั้นการเลือกใช้กระบวนการย่อยตะกอนที่ทำให้ทราบถึงปริมาณโลหะทั้งหมดในตะกอน เช่น วิธีย่อยตะกอนแบบย่อยทั้งหมดด้วยกรด (total acid digestion) จึงยังคงเป็นวิธีที่นิยมใช้กัน การทราบความเข้มข้นทั้งหมดของโลหะในตะกอนเปรียบเสมือนการทราบศักยภาพปนเปื้อนสูงสุด (contamination potential) ของตะกอนนั้น

ตะกอนดินที่มีแร่แม่เหล็กปะปนอยู่อาจมีค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (magnetic susceptibility) หรือค่า k แปรเปลี่ยนจาก k เป็นลบ เนื่องจากมีปริมาณแร่แม่เหล็กชนิดไดอะแมกเนติก (diamagnetic mineral) เช่น แร่ควอร์ตซ์ หรือตะกอนอาจมีค่า k สูงมาก เมื่อมีแร่ประกอบเป็นพวกเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic minerals) โดยเฉพาะอย่างยิ่งแร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) หรือ แมกนีไมต์ ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) แร่เหล็กในตะกอนมีต้นกำเนิดหลักจากการผุพังของหิน และจากการตกตะกอน นักวิทยาศาสตร์พบว่าแร่เหล็กบางชนิด มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี โดยสามารถจับโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำทะเล ในตะกอนดิน และในแหล่งแร่ได้ดี ด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption) และการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) (Jackson and Bistricki, 1995) มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กกับความเข้มข้นของธาตุที่เป็นพิษในสิ่งแวดล้อม เช่น Hunt และคณะ (1984) พบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าแมกนีไทต์แซตURATION (saturation iso-

thermal remanent magnetization) กับความเข้มข้น Pb, Cu, Zn และ Cd ในฝุ่นแขวนลอย (atmospheric suspended particulates) ขณะที่ Strzyszc และคณะ (1996) พบความสัมพันธ์แบบเดียวกันในดินชั้นบน (top soil) ในประเทศโปแลนด์ Hullet และคณะ (1980) พบว่าธาตุโลหะกลุ่มทรานซิชัน เช่น V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn และ Cu ในขี้เถ้า (fly ash) ที่ลอยมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในสหรัฐอเมริกา จะพบอยู่ร่วมกับแร่แม่เหล็กและส่วนใหญ่จะเกิดอยู่ในรูปผลึกแบบ substituted spinels ความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจเกิดจาก (1) อะตอมของธาตุโลหะดังกล่าวแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึกของแร่เฟอร์โรแมกเนติกในระหว่างการเผาไหม้ถ่านหิน (combustion process) หรือ (2) เกิดจากการดูดซับ (adsorption) ธาตุโลหะที่ผิวของแร่เฟอร์โรแมกเนติกที่มีอยู่แล้วในสิ่งแวดล้อม Rose และ Bianchi-Mosquera (1993) ยืนยันว่าแร่เกอไทต์ (goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$) และฮีมาไทต์ (hematite, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) สามารถดูดซับโลหะหนัก Cu, Pb, Zn และ Co ได้ดี Andrews และ Jennings (1987) ใช้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนในอ่าวบับฟินของประเทศแคนาดา เพื่อตามรอยไปหาพื้นที่ที่เป็นต้นกำเนิดตะกอน และใช้ศึกษาลักษณะเฉพาะของการตกตะกอน ขณะที่ Ďurža (1999) ศึกษาสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของดินรอบๆ โรงงานถลุงโลหะ VSŽ Košice ในรัฐสโลวาเกีย ตะวันออก ประเทศสาธารณรัฐเชค พบว่ามีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นโลหะหนักที่ตรวจพบในดินรอบๆ โรงงานเป็นต้น สำหรับในทะเลสาบสงขลา Bhongsuwan และ Chitrakarn (1997) ตรวจพบว่าตะกอนในทะเลสาบสงขลาตอนนอกมีค่า k เฉลี่ย เท่ากับ $132 \mu\text{SI}$ ($N = 320, \sigma = 39 \mu\text{SI}$) สูงกว่าค่า k เฉลี่ยของตะกอนจากทะเลหลวง ($80 \mu\text{SI}$, $N = 121, \sigma = 32 \mu\text{SI}$) ซึ่งความแตกต่างของค่า k ดังกล่าว พบว่าสัมพันธ์กับสัดส่วนของตะกอนขนาดละเอียดและอาจจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอนด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb, Cr และ Cd ในตะกอนตัวอย่างที่มาจากแท่งตะกอนที่เก็บจากทะเลสาบสงขลาตอนนอก ซึ่งเป็นจุดรองรับน้ำเสียที่มาจากชุมชน พื้นที่อุตสาหกรรมเกษตรกรรม และเหมืองแร่ ผ่านทางคลองอู่ตะเภาและคลองสาขาอื่นๆ ตัวอย่างตะกอนจากจุด T (Figure 1) ที่ความลึก 1 และ

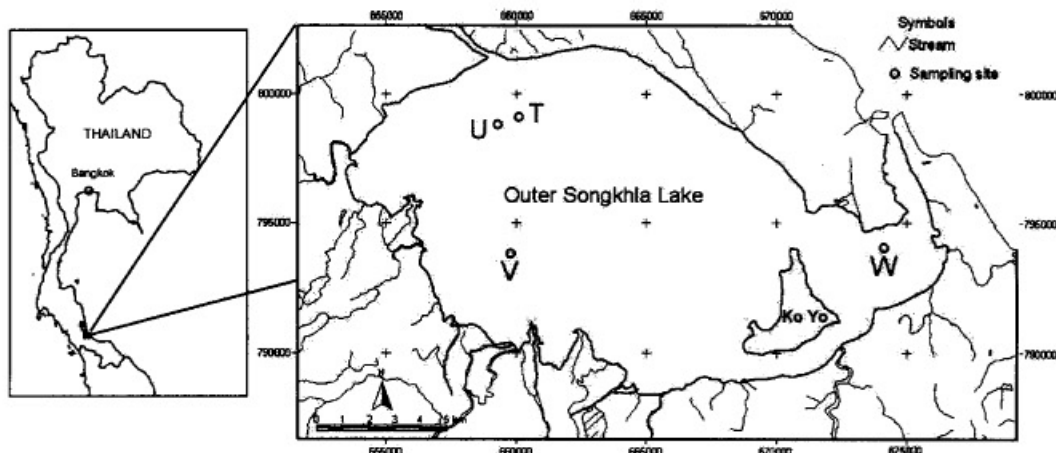


Figure 1. Map showing the study area in the Songkhla province of Southern Thailand, and the sampling sites in the Outer Songkhla Lake.

18 ซม. ถูกตรวจสอบด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Computerized X-ray diffractometer, Phillip PW3710) และพบว่าทั้ง 2 ตัวอย่าง มีแร่องค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ ควอร์ตซ์ เคโอลิไนต์ และ อิลไลต์ ซึ่งเป็นข้อมูลขั้นต้นที่ชี้ว่าตะกอนทะเลสาบมีที่มาของวัสดุจากแหล่งเดียวกัน ตลอดช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา แร่ดินกลุ่มเคโอลิไนต์ และ อิลไลต์ เกิดจากการแปรสภาพของหินดินดาน หินทราย/ทรายแป้ง และหินแกรนิต (จุมพล และคณะ, 2521) ซึ่งเป็นหินท้องถิ่นที่พบอยู่ในเขตลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากหินดินดานเนื่องจากหินดินดานไม่คงทนต่อสภาพแวดล้อม พุพังได้ง่ายกว่าหินแกรนิต

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติแม่เหล็กของตะกอนกับความเข้มข้นโลหะหนักที่สะสมอยู่ในตะกอนท้องน้ำในคลองอู่ตะเภาและทะเลสาบสงขลา โดยวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ประกอบด้วย (1) เพื่อศึกษาการย่อยตะกอนด้วยเทคนิคการย่อยทั้งหมดด้วยกรด และการควบคุมคุณภาพการย่อยและการวิเคราะห์โดยใช้สารอ้างอิงมาตรฐาน (Certified reference material) ของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (2) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb, Cr และ Cd ในตะกอนท้องน้ำทะเลสาบสงขลาตอนนอก ที่ระดับความลึกต่างๆ และ (3) เพื่อประเมินความรุนแรงของการปนเปื้อน

โลหะหนักดังกล่าวในตะกอนท้องน้ำของทะเลสาบสงขลาตอนนอก

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

1. การเก็บตัวอย่างแท่งตะกอน การเตรียมตัวอย่าง และการวัดค่าสภาพรีดิวซ์ได้ทางแม่เหล็ก

แท่งตะกอนท้องน้ำที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ เก็บตัวอย่างในปี พ.ศ. 2538 ในทะเลสาบสงขลาตอนนอก ด้วยเครื่องเก็บตะกอนแบบเก็บแกน (sediment corer) ทำด้วยเหล็กไร้สนิมรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม. ยาว 75 ซม. เก็บตัวอย่างตะกอนท้องน้ำถึงระดับลึกประมาณ 50 ซม. ตรวจวัดพิกัดภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่าง ด้วยเครื่องบอกพิกัดด้วยดาวเทียม (Trimble Navigator: Basic plus, USA) แท่งตะกอนที่อบแห้งหมาดๆ จะถูกตัดเป็นชิ้นตัวอย่างหนา 1 ซม. ไปจนตลอดแท่ง อบตัวอย่างตะกอนเพื่อไล่ความชื้นที่ 100°C เป็นเวลานาน 20 ชั่วโมง แล้วนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนทำด้วยเหล็กไร้สนิม (Retsch, Germany) แล้วคัดเอาเฉพาะตะกอนที่เล็กกว่า 0.3 มม. นำตัวอย่างที่คัดแล้วไปบดละเอียดให้เป็นเนื้อเดียวกัน แต่ละแท่งตะกอนจะเลือกคัดเฉพาะชั้นตะกอน ที่ความลึก 0-1 ซม. 2-3 ซม. 4-5 ซม. 6-7 ซม. และ 8-9 ซม. แผนที่จุดเก็บตัวอย่างแสดงใน

Figure 1

จากตัวอย่างที่อบแห้งแล้ว ชั่งน้ำหนักแล้วบรรจุในกระปุกพลาสติก แล้วทำการวัดค่าสภาพรีดไว้ได้ทางแม่เหล็กของตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Spinning Kappabridge KLY-3S (AGICO, Czech Republic) ที่มีความไวสูง 0.030 μ SI ค่า k ของกระปุกพลาสติกที่วัดไว้ก่อนล่วงหน้าจะถูกหักออก ตัวอย่างตะกอนที่ทำการวัดเป็นตะกอนชุดเดียวกันกับที่นำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนัก

2. การย่อยตะกอนตัวอย่างและสารอ้างอิงมาตรฐานและการวิเคราะห์โลหะหนัก

การควบคุมคุณภาพของเทคนิคการย่อยตะกอนและการวิเคราะห์ปริมาณโลหะ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA SL-1 lake sediment (Dybzyński and Suschny, 1999) ซึ่งเป็นตะกอนทะเลสาบเช่นเดียวกับตะกอนที่ศึกษา โดยในการย่อยสารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA SL-1 ใช้วิธีเดียวกันกับการย่อยตะกอนตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์โลหะหนักในสารอ้างอิง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นอ้างอิงในใบรับรอง (certified values) จะทำให้สามารถหาเปอร์เซ็นต์การแยก (% Recovery) ของแต่ละธาตุได้ นอกจากนี้เพื่อลดความผิดพลาดอันเนื่องจากการปนเปื้อนโลหะในสารเคมีที่ใช้ จึงได้เตรียมสารละลาย blank เพื่อทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำกลั่นและสารเคมีที่ใช้ การเตรียมสารละลาย blank ใช้วิธีเดียวกันกับกรณีการย่อยตะกอนตัวอย่าง

การย่อยตะกอนตัวอย่าง และสารอ้างอิงมาตรฐานเลือกใช้เทคนิคย่อยทั้งหมดด้วยกรด (Potts, 1992) เริ่มต้นโดยการชั่งตะกอน (Mettler, AE200) ที่อบไล่ความชื้นจนน้ำหนักคงที่ (dry weight) ประมาณ 200 มก. บรรจุตะกอนตัวอย่างในขวด PP (Nalgene, USA) เติมหาควาเรกียา (HCl : HNO₃ = 3 : 1; Potts, 1992) ปริมาตร 1 มล. และเติมกรด HF 40% (Merck, Germany) ปริมาตร 5 มล. นำไปย่อยที่อุณหภูมิน้ำเดือด (98-100°C) จนตะกอนละลายหมดโดยไม่มีของแข็งตกค้าง เติมหาควาเรกียา กรด H₃BO₃ 50 มล. (Merck, Germany) แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มล. บรรจุใส่ในขวด PP แล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP-AES (Perkin Elmer รุ่น 4300DV)

3. การวิเคราะห์เพื่อประเมินคุณภาพตะกอน

โลหะหนักในตะกอนมาจากแหล่งกำเนิดหลัก 2 ส่วน คือ (1) กำเนิดจากธรรมชาติ และ (2) มีกำเนิดเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ การที่จะแยกสัดส่วนว่าโลหะหนักในตะกอนมาจากธรรมชาติเท่าใดและปนเปื้อนด้วยฝีมือของมนุษย์เท่าใดนั้น จำเป็นต้องมีหลักเกณฑ์ในการวิเคราะห์วิธีการที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 วิธี คือ การปรับค่าสู่สภาวะปกติทางธรณีเคมี (geochemical normalization) เพื่อลดความแปรปรวนของความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอนที่เกิดจากความแตกต่างของขนาดเม็ดตะกอนและของแร่ประกอบในตะกอน และเพื่อให้สามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติของความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอน วิธีนี้เริ่มต้นด้วยการเลือกธาตุโลหะที่จะใช้อ้างอิง เรียกว่า ธาตุอนุรักษ์ (conservative element) เช่น Din (1992); Szefer และคณะ (1995) และ Summer และคณะ (1996) เลือกใช้ Al เป็นธาตุอนุรักษ์ Herut และคณะ (1993); Tam และ Yao (1998) เลือกใช้ Fe เป็นธาตุอนุรักษ์ นอกจากนั้นยังมีการใช้ธาตุอนุรักษ์อื่นๆ ด้วย เช่น Li, Rb และ Sc การเลือกใช้ธาตุอนุรักษ์ที่เหมาะสมไม่มีกฎตายตัว (Green-Ruiz and Páez-Osuna, 2000) แต่จะสัมพันธ์กับธรรมชาติทางธรณีเคมีของพื้นที่ศึกษาและกิจกรรมของมนุษย์ในพื้นที่ Szefer และคณะ (1995) ได้สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโลหะหนักแต่ละตัวกับธาตุอนุรักษ์ที่เลือก และได้กำหนดเกณฑ์ว่าความแปรปรวนของโลหะหนักที่มีกำเนิดจากธรรมชาติ (natural geochemical population) ควรตกอยู่ภายในแถบของเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) $\pm 2S_{y/x}$ เมื่อ $S_{y/x}$ (Chapra and Canale, 1990) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานออกจากเส้นตรง ส่วนความเข้มข้นโลหะหนักที่อยู่นอกช่วงหรือเลยเส้นประเส้นบนขึ้นไป จัดว่าเป็นค่าผิดปกติเชิงภูมิภาค (regional anomaly) ที่อาจเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์

อีกวิธีหนึ่งที่จะใช้วัดความรุนแรงของการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนจากทะเลสาบสงขลาตอนนอก โดยการคำนวณค่าดัชนีวัดการสะสมเชิงธรณี (geoaccumulation index, Igeo) ซึ่งคำนวณจากสูตร (Stoffers *et al.*, 1986)

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{M_i}{1.5M_b} \right]$$

เมื่อ M_s เป็นความเข้มข้นโลหะ M ในตะกอนตัวอย่าง และ M_b เป็นความเข้มข้นโลหะ M เฉลี่ยในดินดินดานทั่วไป (Herr and Gray, 1997) ตัวเลข 1.5 ครอบคลุมการแปรปรวนปกติของโลหะหนักที่เป็นสัดส่วนจากธรรมชาติ เกณฑ์การใช้ค่า I_{geo} จะจำแนกความรุนแรงของการปนเปื้อนเป็น 7 ระดับ คือ $I_{geo} = 0$ (ไม่ปนเปื้อน); 1 (ไม่ปนเปื้อน/ปนเปื้อนไม่รุนแรง); 2 (ปนเปื้อนไม่รุนแรง); 3 (ปนเปื้อนไม่รุนแรง/ปนเปื้อนรุนแรง); 4 (ปนเปื้อนรุนแรง); 5 (ปนเปื้อนรุนแรง/ปนเปื้อนรุนแรงมาก); 6 (ปนเปื้อนรุนแรงมาก)

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. อายุของการตกตะกอน

จากการศึกษาอัตราการตกตะกอนด้วยวิธีวัดไอโซโทปซีเซียม-137 ที่ติดตั้งอยู่ในตะกอนโดย Chittrakarn และคณะ (1996) พบว่าแท่งตะกอนจากตำแหน่ง U, V, และ W มีอัตราการตกตะกอนเฉลี่ย 5.7, 6.3 และ 5.1 มม./ปี ตามลำดับ ส่วนแท่งตะกอนจากตำแหน่ง T มีอัตราการตกตะกอนเฉลี่ย 4.2 มม./ปี หาโดยวิธีเทียบลำดับชั้นแม่เหล็ก (Bhongsuwan and Chittrakarn, 1997) คิดเป็นอัตราการตกตะกอนเฉลี่ยทั้ง 4 จุด เท่ากับ 5.3 มม./ปี ดังนั้นความหนา 1 ซม. ของตะกอนจึงเกิดจากการตกตะกอนนานประมาณ 2 ปี เนื่องจากแท่งตะกอนจากทั้ง 4 จุด เก็บในปี พ.ศ. 2538 ดังนั้นชั้นตะกอนที่ตัดจากความลึก 8-9 ซม. 6-7 ซม. 4-5 ซม. 2-3 ซม. และ 0-1 ซม. จึงเป็นตะกอนที่ตกสะสมในช่วงปี (โดยประมาณ) พ.ศ. 2520-2522, พ.ศ. 2524-2526, พ.ศ. 2528-2530, พ.ศ. 2532-2534 และ พ.ศ. 2536-2538 ตามลำดับ

2. ผลการย่อยสารอ้างอิงมาตรฐานและตะกอนตัวอย่าง

ผลการย่อยตะกอนตัวอย่างโดย (1) ใช้ aqua regia ร่วมกับกรด HF พบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุดในการย่อยเมื่อเทียบกับ (2) การใช้กรด HNO_3 ร่วมกับกรด HCl หรือ (3) เมื่อใช้กรด HNO_3 ร่วมกับกรด aqua regia หรือ (4) เมื่อใช้กรด HNO_3 ร่วมกับกรด $HClO_4$ สำหรับการย่อยด้วย aqua regia ร่วมกับกรด HF ตะกอนดินในสารละลายกรดจะมีสีซีดจางลงอย่างรวดเร็ว และละลายไปตามลำดับจนไม่ปรากฏของแข็งตกค้าง ในการย่อยสารอ้างอิง

มาตรฐานพบว่า สารอ้างอิงมาตรฐาน IAEA SL-1 จำนวน 2 ตัวอย่าง น้ำหนักตัวอย่างละประมาณ 200 มก. ใช้เวลาย่อยที่อุณหภูมิน้ำเดือด นานประมาณ 50 ชั่วโมง ตะกอนจึงละลายหมด ส่วนในการย่อยตะกอนตัวอย่างจากทะเลสาบสงขลาตอนนอก ใช้เวลาย่อยจนละลายหมด อยู่ในช่วง 55 - 110 ชั่วโมง หรือเฉลี่ยประมาณ 82 ชั่วโมง

ผลการย่อยด้วยวิธี (2), (3) และ (4) พบว่า ไม่สามารถย่อยตะกอนได้หมดในช่วงเวลาทดลองย่อยคือ 6 ชั่วโมง และสิ้นเปลืองกรดที่ใช้เนื่องจากการเป็นการย่อยในภาชนะเปิด ทำให้เกิดการระเหยอย่างรวดเร็วจนแห้งแล้วต้องเติมกรดเพิ่มเติม เมื่อครบ 6 ชั่วโมง จึงหยุดการทดลอง เหตุผลที่ไม่เลือกใช้วิธีการย่อยที่ (2) - (4) เนื่องจากสิ้นเปลืองกรด ต้องเฝ้าติดตามตลอดเวลา และเชื่อว่าจะไม่สามารถละลายแร่ซิลิเกตที่มีอยู่ในตะกอนได้ทั้งหมด เนื่องจากมีเพียงกรด HF เท่านั้น ที่จะสามารถละลายแร่กลุ่มซิลิเกตได้อย่างง่ายดาย (Potts, 1992) อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้กรด HF เพียงอย่างเดียวก็อาจเกิดปฏิกิริยารุนแรงได้ โดยปกติจึงมักใช้ร่วมกับกรดอื่นเช่นกรดไนตริก หรือ aqua regia (Potts, 1992)

ผลการวิเคราะห์สารละลายอ้างอิงมาตรฐาน IAEA SL-1 และสารละลาย blank แสดงอยู่ใน Table 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์การแยกรวมของธาตุโลหะหนักที่สนใจมีค่าอยู่ระหว่าง 76.33 (Zn) และ 99.26 (Cr) สำหรับ Cd ตรวจไม่พบเนื่องจากมีความเข้มข้นน้อยเกินไปในสารอ้างอิงมาตรฐาน แสดงว่าความเข้มข้น Cd ในสารละลายอ้างอิงมีค่าต่ำกว่าขีดเริ่มตรวจวัดเชิงปฏิบัติของเครื่อง ICP-AES

3. ความเข้มข้นโลหะหนักที่สนใจในตัวอย่างตะกอน

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอนตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 20 ตัวอย่าง จาก 4 แท่งตะกอน ที่เก็บจากตำแหน่ง T, U, V และ W จากทะเลสาบสงขลาตอนนอก แสดงอยู่ใน Table 2 จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นโลหะหนักในตัวอย่างตะกอนท้องน้ำทะเลสาบสงขลาตอนนอก จำนวน 4 จุด ที่ระดับความลึก 0 - 9 ซม. ที่สอดคล้องกับอายุการตกตะกอนในระหว่างปี พ.ศ. 2520 - 2538 ทำให้ทราบแนวโน้มปริมาณการสะสมของโลหะหนักดังนี้

แมงกานีส (Mn) ความเข้มข้นของ Mn ในตัวอย่าง

Table 1. Heavy metals concentration in the reference material IAEA SL-1 and percent recovery of heavy metals.

Metals	Certified Reference Material IAEA SL-1					% recovery
	Blank (mg/kg)	No.1 (mg/kg)	No.2 (mg/kg)	Mean (mg/kg)	Certified value (mg/kg)	
Mn	0.85	3272	3228	3250	3460	93.93
Fe	25.2	61439	61296	61368	67400	91.05
Ni	ND	36.0	35.8	35.9	44.9	79.96
Zn	2.16	175.0	165.5	170.2	223	76.33
Pb	2.99	33.0	33.3	33.2	37.7	88.02
Cr	0.99	102.5	104.0	103.2	104	99.26
Cd	ND	ND	ND	ND	0.26	ND
As	20.19	27.4	21.0	24.2	27.6	87.68

Note: Blank = blank sample; ND = non detectable

ตะกอนที่ระดับลึก 0 - 9 ซม. พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 368 - 756 มก/กก. (Table 2) จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Mn ในช่วงความลึกดังกล่าว (Figure 2a) พบว่า ตะกอนที่ตำแหน่ง T, U และ V มีความเข้มข้นของ Mn เพิ่มขึ้น และสูงสุดในช่วงความลึก 0 - 1 ซม. (ตกตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2536-2538) ส่วนในตะกอนที่ตำแหน่ง W ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ใกล้ปากทะเลสาบสงขลา ความเข้มข้นของ Mn จะมีค่าใกล้เคียงกันทุกความลึก (377-401 มก/กก.) น่าจะเกิดจากสภาพความเค็มของน้ำและการไหลเวียนของน้ำและตะกอนบริเวณใกล้ปากทะเลสาบ ที่ตำแหน่ง T, U และ V โลหะ Mn มีลักษณะการกระจายตัวคล้ายคลึงกัน (Figure 2a)

เนื่องจากแหล่งกำเนิดหลักของ Mn มาจากการผุพังของหินโดยเฉพาะในสภาพทางธรณีวิทยาที่มีหินตะกอนเป็นหินแวดล้อม เช่น ในลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาที่มีหินทราย หินทรายแป้ง และหินดินดานอายุคาร์บอนิเฟอรัสเป็นหินแวดล้อม โดยมีหินแกรนิตอายุอ่อนกว่าดันแทรกขึ้นมา ความเข้มข้นเฉลี่ยของ Mn ในหินดินดานทั่วไป มีค่า 850 มก/กก. (Gatti *et al.*, 1999) ขณะที่ความเข้มข้น Mn ในหินแกรนิตที่เก็บจากเหมืองทุ่งโพธิ์ในอำเภอหาดหม่ม มีค่าระหว่าง 40 - 480 มก/กก. (Pungrassami, 1984) ส่วนในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกมีค่าเฉลี่ย 474 มก/กก. (Table 3) การเพิ่มขึ้นของ Mn ในตะกอนเป็นลำดับใน

ช่วงความลึก 0 - 4 ซม. (ตกตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2530-2538) อาจแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของตะกอนที่มาจากการผุพังของหิน การเปิดหน้าดินจากการทำลายป่าไม้ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีตะกอนเพิ่มขึ้นในระบบของ ตะกอน-คลองสาขา-ทะเลสาบ อย่างไรก็ตามกิจกรรมของมนุษย์รอบๆ ทะเลสาบที่เพิ่มขึ้น ทั้งทางด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม และของเสียชุมชน อาจมีส่วนกระทบต่อความเข้มข้นของ Mn ที่สะสมในตะกอนทะเลสาบได้เช่นกัน ผลการศึกษาความเข้มข้นของ Mn ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกของ Nachiangmai (1979) พบว่าอยู่ในช่วง 291 - 774 มก/กก. มีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาครั้งนี้

เหล็ก (Fe) ความเข้มข้นของ Fe ในตะกอนตัวอย่างจากช่วงความลึก 0 - 9 ซม. จากทุกตำแหน่ง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 21,013 - 36,683 มก/กก. (Table 2, Figure 2b) ที่ตำแหน่ง V ความเข้มข้นของ Fe มีค่ากว้างไกลในช่วงกว้าง (21,014 - 34,103 มก/กก.) แต่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น Fe ในตะกอนยังไม่ชัดเจนว่าเพิ่มขึ้นหรือไม่ Nachiangmai (1979) ศึกษาความเข้มข้นของ Fe ในตะกอนดินทะเลสาบสงขลาตอนนอก พบว่าอยู่ในช่วง 26,050 - 45,000 มก/กก. เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน น่าจะสรุปได้ว่าตรวจไม่พบการปนเปื้อนของ Fe เพิ่มขึ้นในตะกอนที่ตกสะสมในช่วงปี พ.ศ. 2520-2538

Table 2. Magnetic susceptibility and heavy metals contents in bottom sediment samples from cores T, U, V and W in the Outer Songkhla Lake at depths 0 - 9 cm.

Sample/ UTM position	Depth (cm)	k (μ SI)	Heavy metal concentration (mg/kg)					
			Mn	Fe	Ni	Pb	Cr	Cd
Core T/ E 660272 N 798926	0 - 1	120.9	756	36150	12.8	45.6	57.0	≤ 2.5
	2 - 3	121.6	489	31247	10.7	53.0	49.2	≤ 2.5
	4 - 5	120.0	459	33799	12.2	59.8	57.6	≤ 2.5
	6 - 7	129.2	457	35663	12.2	48.0	57.5	≤ 2.5
	8 - 9	123.8	478	36683	12.8	57.9	57.1	≤ 2.5
Core U/ E 660637 N 793113	0 - 1	153.3	683	35315	9.4	38.6	53.0	≤ 2.5
	2 - 3	131.8	512	30584	7.8	41.4	51.4	≤ 2.5
	4 - 5	128.1	382	30234	16.7	36.1	54.2	≤ 2.5
	6 - 7	126.4	368	29118	6.8	43.4	49.5	≤ 2.5
	8 - 9	146.9	420	34785	13.1	42.7	67.5	≤ 2.5
Core V/ E 659558 N 798810	0 - 1	196.5	721	33430	4.7	37.1	57.5	≤ 2.5
	2 - 3	143.0	531	21014	3.5	24.6	30.1	≤ 2.5
	4 - 5	163.6	451	34103	5.3	40.8	51.1	≤ 2.5
	6 - 7	182.0	405	27790	5.3	43.6	53.0	≤ 2.5
	8 - 9	135.6	418	30162	4.2	40.9	52.1	≤ 2.5
Core W/ E 673681 N 793433	0 - 1	93.4	394	26955	5.7	36.6	35.0	≤ 2.5
	2 - 3	119.8	401	27212	7.6	26.9	34.7	≤ 2.5
	4 - 5	216.9	393	26920	1.5	34.3	48.2	≤ 2.5
	6 - 7	155.3	384	27124	1.9	24.5	35.8	≤ 2.5
	8 - 9	182.1	377	25078	1.1	29.5	41.4	≤ 2.5
Minimum		93.4	368	21014	1.1	24.5	30.1	-
Maximum		216.9	756	36683	16.7	43.6	67.5	-
Mean		144.5	474	30668	7.8	40.3	49.6	-
Std. dev.		30.6	116.1	4275	4.5	9.8	9.6	-

UTM = Universal Transverse Mercator

แหล่งกำเนิดหลักของ Fe ในตะกอนมาจากการผุพังของหินเช่นเดียวกับ Mn ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้น Fe ในหินดินดานทั่วไปมีค่า 47,200 มก/กก. (Gatti *et al.*, 1999; Table 3) ขณะที่ในหินแกรนิตจากเหมืองทุ่งโพธิ์ในอำเภอหาดหมอม ตรวจพบความเข้มข้นของ Fe ระหว่าง 4,000-61,600 มก/กก. (Pungrassami, 1984) จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้น Fe ในหินดินดานทั่วไปยังมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้น Fe ในตะกอนทะเลสาบที่ศึกษา

(30,668 มก/กก., Table 3) แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น Fe ในตะกอนน่าจะมีส่วนหลักมาจากการผุพังของหินในพื้นที่

นิกเกิล (Ni) ความเข้มข้นของ Ni ในตะกอนดินจากทุกตำแหน่งและทุกระดับความลึกมีค่าอยู่ในช่วง 1.1 - 16.7 มก/กก. (Table 2, Figure 2c) พบว่าแท่งตะกอน T และ V มีความเข้มข้น Ni เกือบคงที่ (10.7-12.8, 3.5-5.3 มก/กก. ตามลำดับ) ตลอดช่วงความลึก 0 - 9 ซม. (ตก

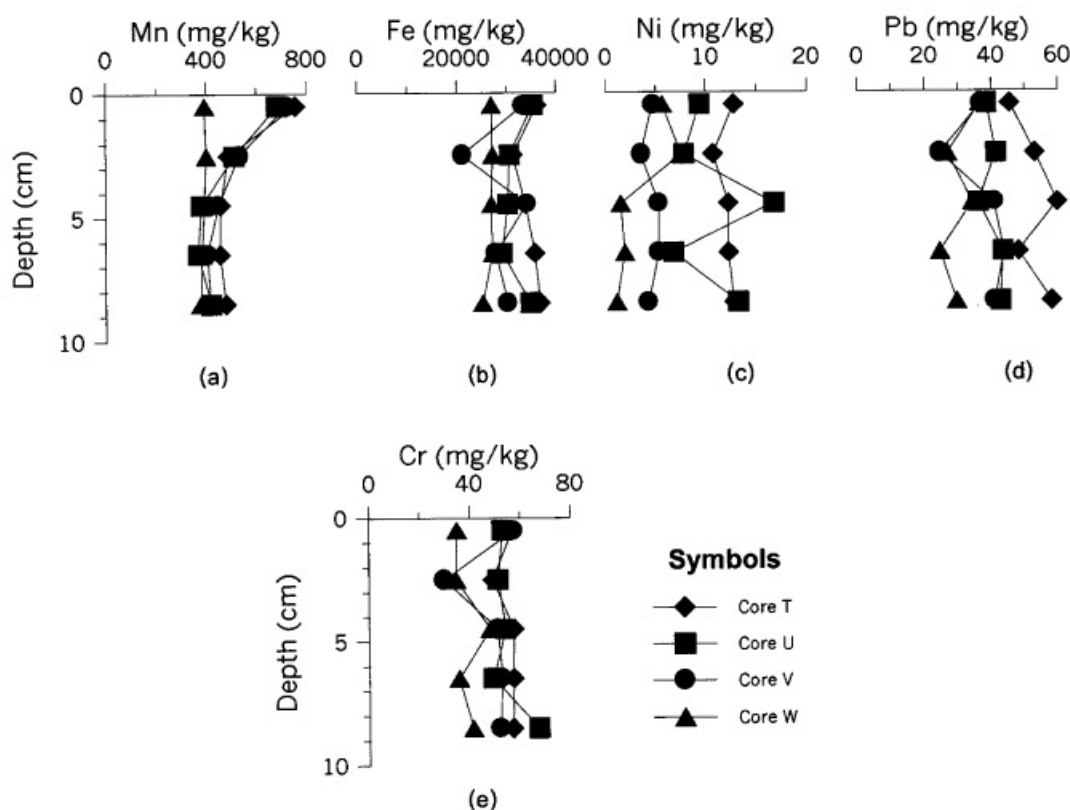


Figure 2. Variation of heavy metals concentration with depths in sediment samples from the Outer Songkhla Lake (cores T, U, V and W). (a) Mn, (b) Fe, (c) Ni, (d) Pb and (e) Cr. Symbols indicate data from cores T, U, V and W.

Table 3. Heavy metals concentrations (mg/kg) in sediments from the Outer Songkhla Lake in comparison with those of the world lake sediments and averages for shales.

Metals	Recent lake sediment from remote area ^a	Averages for European and American lakes ^b	Lake Cadagno ^c	Shales ^d	The Outer Songkhla Lake Mean (min.-max.)
Mn	760	860	500	850	474 (368-756)
Fe	43400	26700	35000	47200	30668 (21014-36683)
Ni	66	50	40	68	7.8 (1.1-16.7)
Pb	34	35	20	20	40.3 (24.5-59.8)
Cr	62	49	35-45	90	49.6 (30.1-67.5)
Cd	0.4	0.58	0.4	-	ND (< 2.5 mg/kg)

^a Förstner and Salomons (1981), ^b Håkanson (1980), ^c Birch *et al.* (1996), ^d Gatti *et al.* (1999); ND : non-detectable.

ตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2520-2538) ตะกอนจากตำแหน่ง U มีความเข้มข้น Ni แปรปรวนในช่วงกว้าง (6.8-16.7 มก/กก.) สรุปไม่ได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือไม่

ส่วนตะกอนจากตำแหน่ง W เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น Ni ในตะกอน จาก 1.1-1.9 มก/กก. ในตะกอนที่ความลึก 4 - 9 ซม. (ตกตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2520-

2530) ไปเป็น 5.7-7.6 มก/กก. ในตะกอนที่ความลึก 0 - 3 ซม. (ตกตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2532-2538) หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 4-5 เท่า อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาความเข้มข้นเฉลี่ยของ Ni ในหินดินดานทั่วไป (68 มก/กก.; Gatti *et al.*, 1999) พบว่ายังมีค่าสูงกว่าระดับความเข้มข้นที่พบในตะกอนมาก จึงอาจเป็นไปได้ว่าความเข้มข้น Ni ในตะกอนทะเลสาบสงขลาจากการผุพังของหินแวตลอมเป็นหลัก

ตะกั่ว (Pb) ความเข้มข้นของ Pb ในตะกอนจากจุด T, U, V และ W ที่ความลึก 0 - 9 ซม. (ตกตะกอนในช่วงปี พ.ศ. 2520-2538) มีค่าอยู่ในช่วง 24.5 - 59.8 มก/กก. (Table 2, Figure 2d) การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น Pb ในตะกอนในช่วงความลึกดังกล่าว มีการแปรปรวนไม่ชัดเจนว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง จึงอาจสรุปได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของความเข้มข้น Pb ในตะกอนที่ตกสะสมในระหว่างปี พ.ศ. 2520-2538 ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความเข้มข้นของ Pb ในตะกอนดินทะเลสาบสงขลาตอนนอกของ Nachiangmai (1979) ที่พบความเข้มข้น Pb อยู่ในช่วง 49.9 - 78.5 มก/กก. และเมื่อพิจารณาความเข้มข้นเฉลี่ยของ Pb ในหินดินดานทั่วไป (20 มก/กก.; Gatti *et al.*, 1999) หรือความเข้มข้น Pb ในหินแกรนิตซึ่งเป็นหินท้องที่ส่วนหนึ่งของอำเภอนาหม่อม (5-20 มก/กก.; Pungrassami, 1984) พบว่าความเข้มข้น Pb ในหินแวตลอม มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้น Pb ที่ตรวจพบในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกที่ศึกษาหลายเท่าตัว จึงน่าจะเชื่อว่าปริมาณ Pb ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก ส่วนหนึ่งมีต้นกำเนิดมาจากกิจกรรมของมนุษย์

โครเมียม (Cr) ความเข้มข้นของ Cr ในตะกอนที่ความลึก 0 - 9 ซม. (ตกตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2520-2538) จากจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 4 จุด มีค่าอยู่ในช่วง 30.1 - 67.5 มก/กก. (Table 2, Figure 2e) และมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ตะกอนตัวอย่างจากจุด W มีความเข้มข้น Cr โดยเฉลี่ยต่ำกว่าจุดอื่นๆ ในขณะที่จุด T, U และ V มีความเข้มข้น Cr ไม่ต่างกันมากนักในทุกช่วงความลึก ผลการศึกษาของ Maneepong (1996) ตรวจพบระดับความเข้มข้น Cr ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก อยู่ในช่วง 9 - 24 มก/กก. ซึ่งน้อยกว่าผลการศึกษาในครั้งนี้ เมื่อเทียบกับความเข้มข้น

Cr เฉลี่ยในหินดินดาน (90 มก/กก.; Gatti *et al.*, 1999) อาจสรุปได้ว่าความเข้มข้น Cr ในตะกอนทะเลสาบสงขลาจากการผุพังของหินแวตลอมเป็นหลัก

แคดเมียม (Cd) ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น Cd ในตะกอนตัวอย่างพบว่าไม่สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง ICP-AES ในทุกตะกอนตัวอย่าง จากทั้ง 4 ตำแหน่ง แสดงว่าตะกอนในทะเลสาบสงขลาตอนนอกมีความเข้มข้น Cd ต่ำกว่าค่าขีดเริ่มต้นความเข้มข้นของ Cd ที่เครื่อง ICP-AES จะสามารถวิเคราะห์ได้ ซึ่งมีค่า ≤ 5 มก/กก. เมื่อคำนวณเทียบกับปริมาณสารละลายตัวอย่าง (100 มล.) ที่เตรียมได้จากปริมาณตะกอนที่ย่อยแต่ละครั้งประมาณ 0.2 กรัม คำนวณได้เป็นค่าขีดเริ่มต้นความเข้มข้น Cd ในตะกอนได้ที่ ≤ 2.5 มก/กก. นั่นคือ ตัวอย่างตะกอนที่เก็บจากทะเลสาบสงขลาตอนนอกทุกตัวอย่าง มีค่าความเข้มข้น Cd ≤ 2.5 มก/กก.

4. คุณภาพของตะกอนและดัชนีบ่งชี้ความรุนแรงของการปนเปื้อน

ในการหาความสัมพันธ์ร่วมระหว่างโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกพบว่า การแปรปรวนของความเข้มข้นของธาตุโลหะหนักอื่นเมื่อเทียบกับ Fe (คือใช้ Fe เป็นธาตุอนุรักษ์) จะมีค่าน้อยที่สุด Figure 3 แสดงกราฟระหว่างความเข้มข้นของธาตุอนุรักษ์ คือ Fe (ตัวแปรอิสระ) และความเข้มข้นโลหะหนักอื่น (ตัวแปรตาม) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) r มีค่า 0.46, 0.67, 0.72 และ 0.83 สำหรับโลหะหนัก Mn, Ni, Pb และ Cr ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า Fe สามารถใช้เป็นธาตุอนุรักษ์ได้ผลดีสำหรับการกระจายโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก และเห็นได้ชัดว่าความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Ni, Pb และ Cr มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้น Fe เพิ่มขึ้น (Figure 3) ซึ่งเชื่อว่าเป็นเพราะแร่เหล็กในตะกอนน่าจะมีส่วนอยู่ในรูปหรือเคยอยู่ในรูปของแร่เหล็กชนิดที่สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี เช่น เกอไทต์ และ ฮีมาไทต์ เป็นต้น Bhongsuwan (1993) ใช้เทคนิคการวัดอำนาจแม่เหล็กในหิน ตรวจพบว่าหินดินดานของยุคคาร์บอนิเฟอรัสที่เก็บจากเกาะยอ มีส่วนประกอบของแร่แม่เหล็ก เกอไทต์ และฮีมาไทต์ หินดินดานดังกล่าวเชื่อว่าเป็นต้นกำเนิดหลักของตะกอนและ

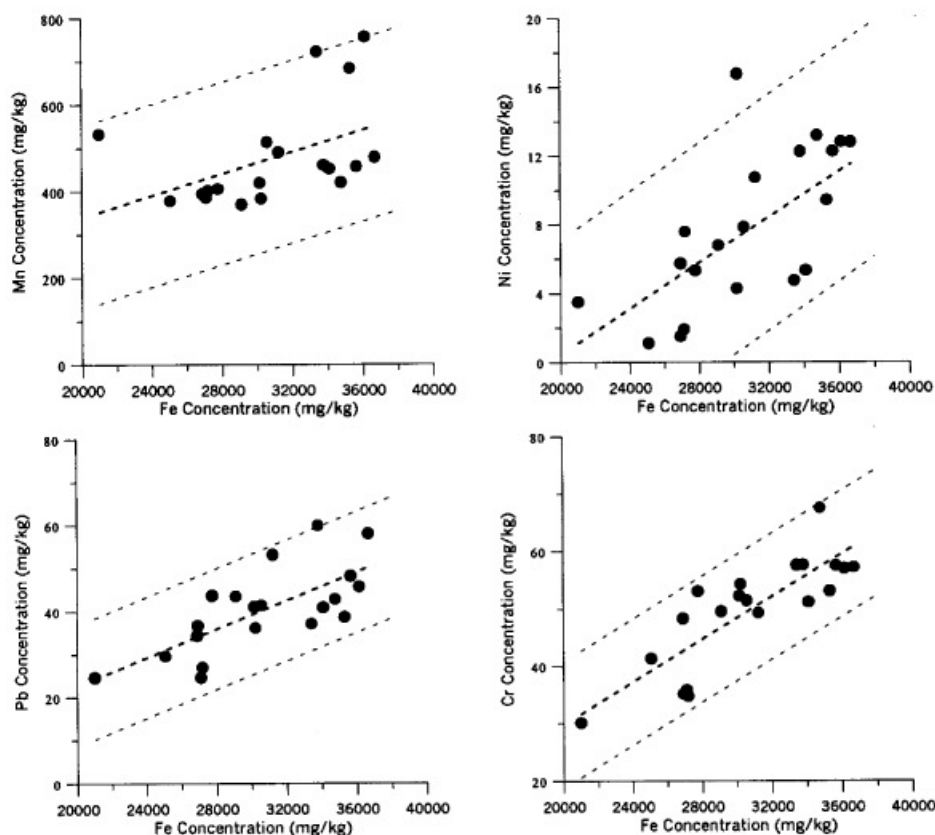


Figure 3. Linear regressions for Mn, Ni, Pb and Cr as a function of Fe concentration. The regression line (thick dashed line) and twice standard deviation band (thin dashed lines) according to regional anomalies criterion (Szefer *et al.*, 1995) are shown.

ของโลหะหนักในตะกอนในทะเลสาบสงขลาตอนนอก

เมื่อใช้เกณฑ์ของ Szefer และคณะ (1995) ที่กำหนดว่า ความแปรปรวนของโลหะหนักที่มีกำเนิดจากธรรมชาติ ควรตกอยู่ในแถบกว้าง $\pm 2S_{y/x}$ (เส้นประบาง 2 เส้นใน Figure 3) ที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผลการวิเคราะห์กราฟใน Figure 3 พบว่า ค่าความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Ni, Pb และ Cr เมื่อเทียบกับความเข้มข้น Fe ในตัวอย่างตะกอน มีความแปรปรวนอยู่ในแถบ $\pm 2S_{y/x}$ เกือบทุกตัวอย่าง ยกเว้นโลหะ Ni ที่ตำแหน่ง U จำนวน 1 ตัวอย่าง มีความเข้มข้นสูงนอกเส้นขอบเขต นอกจากนั้นโลหะ Mn ในตะกอนจากตำแหน่ง T และ V อย่างละ 1 ตัวอย่าง โลหะ Pb ที่ตำแหน่ง T จำนวน 1 ตัวอย่าง และโลหะ Cr ที่ตำแหน่ง U จำนวน 1 ตัวอย่าง ที่ตกอยู่บนเส้นขอบเขตพอดี ผล

การวิเคราะห์โดยใช้เกณฑ์ของ Szefer พบว่า โลหะหนักในตัวอย่างตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกทั้งหมด มีความแปรปรวนอยู่ในภายในแถบของ $\pm 2S_{y/x}$ แสดงว่าต้นกำเนิดของโลหะหนักในตะกอนน่าจะมาจากธรรมชาติเป็นหลัก ยกเว้น Ni ในตะกอน 1 ตัวอย่าง ที่เก็บจากตำแหน่ง U ที่มีค่าสูงผิดปกติ ซึ่งอาจมีต้นกำเนิดมาจากตะกอนปนเปื้อนที่มาจากทะเลหลวง

ผลจากการวิเคราะห์ค่าดัชนีวัดการสะสมเชิงธรณี Igeo ของโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก เมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นโลหะภูมิหลังเฉลี่ยในหินดินดานทั่วไป พบว่าค่า Igeo ของโลหะหนัก Mn, Fe, Ni และ Cr ในตะกอนตัวอย่าง มีค่า < 0 ทั้งหมด (Figure 4) แสดงว่าไม่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก Mn, Fe, Ni และ Cr ในตะกอนตัวอย่าง ยกเว้นกรณีของโลหะ Pb ในตะกอน

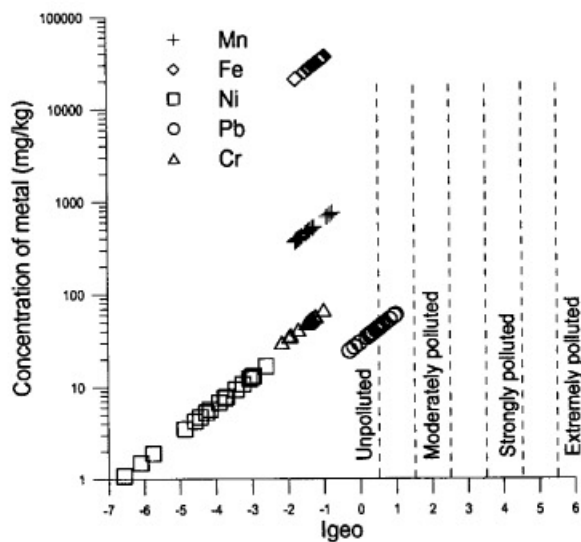


Figure 4. Plots between concentration of metal and Igeo index. Dashed lines indicate degree of contamination of sediment according to Igeo criteria (Stoffers *et al.*, 1986).

ตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่า Igeo (Pb) > 0 แต่ทั้งหมดมีค่า ≤ 1 (Figure 4) ค่า Igeo (Pb) สูงสุดเป็นตะกอนตัวอย่างจากตำแหน่ง T (0.6-1.0; เฉลี่ย 0.8) ค่า Igeo (Pb) ของตัวอย่างจากตำแหน่ง U มีค่าระหว่าง 0.3 - 0.5 ขณะที่ตัวอย่างจากตำแหน่ง V และ W มีค่าระหว่าง -0.3 ถึง +0.5

ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี Igeo สรุปได้ว่า โลหะ Mn, Fe, Ni และ Cr ยังอยู่ในระดับไม่ปนเปื้อน ยกเว้นโลหะ Pb ที่ตำแหน่ง T ซึ่งมีค่า Igeo อยู่ในระดับ ไม่ปนเปื้อน/ปนเปื้อนไม่รุนแรง แสดงว่าปริมาณ Pb ในตะกอนที่ตำแหน่ง T อาจมีบางส่วนที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ ตำแหน่ง T อยู่ใกล้คลองที่เชื่อมทะเลสาบสงขลาตอนนอกกับทะเลหลวง กระแสน้ำในฤดูน้ำหลากจะไหลจากทะเลหลวงลงสู่ทะเลสาบตอนนอก เป็นไปได้ว่าปริมาณ Pb ที่มาจากกิจกรรมมนุษย์อาจมาจากตะกอนปนเปื้อนสารเคมีมีการเกษตรหรือจากตะกอนท้องน้ำที่มาจากแหล่งแร่ตะกั่วใน อ.กงหรา จ.พัทลุง อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องตรวจสอบตะกอนท้องน้ำที่มาจากเหมืองตะกั่วใน อ.กงหรา เพื่อให้มั่นใจว่าการปนเปื้อน Pb ในตะกอนท้องน้ำใกล้แหล่งแร่จะไม่เป็นพิษ และเพื่อพิสูจน์ความเกี่ยวข้องของปริมาณ Pb ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก

เมื่อพิจารณาการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนท้องน้ำทะเลสาบสงขลาตอนนอกแล้วพบว่า ยังไม่อยู่ในระดับที่รุนแรงแต่อย่างใด เมื่อเทียบความเข้มข้นโลหะหนักชนิดเดียวกันในตะกอนทะเลสาบจากที่อื่นๆ ทั่วโลก (Table 3) พบว่าความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni และ Cr ในตะกอนทะเลสาบสงขลา มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับ (หรือค่าต่ำกว่า) ความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอนทะเลสาบอายุปัจจุบันในพื้นที่ทางไกล (Forstner and Salomons, 1981) หรือในทะเลสาบของทวีปยุโรปและทวีปอเมริกา (Håkanson, 1980) และในตะกอนของ Lake Cadagno ที่อยู่ทางไกลในป่าสนแห่งเทือกเขาแอลป์ของประเทศสวิสเซอร์แลนด์ (Birch *et al.*, 1996) ยกเว้นสำหรับโลหะ Pb ที่มีความเข้มข้นสูงในตะกอนทะเลสาบสงขลา มากกว่าในทะเลสาบอื่นๆ จากการวิเคราะห์ค่าผิดปกติเชิงภูมิภาค และค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี Igeo บ่งชี้ว่า ตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกบริเวณตำแหน่ง T และ U กำลังอยู่ในภาวะปนเปื้อนเบาบางของโลหะ Pb ที่มาจากกิจกรรมของมนุษย์

5. ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนตัวอย่าง

ผลการวัดค่า k ของตะกอนตัวอย่าง แสดงอยู่ใน Table 2 ค่า k ของตะกอนมีค่าอยู่ระหว่าง 93.4 - 196.5 μSI โดยมีค่าเฉลี่ย 144.5 μSI (N = 20) ค่า k เฉลี่ยของตะกอนตัวอย่างในทะเลสาบตอนนอกมีค่าสูง (144.5 μSI) เมื่อเทียบกับตะกอนในทะเลหลวงที่มีค่า k เฉลี่ยเท่ากับ 80.3 μSI (Bhongsuwan and Chittrakarn, 1997) ค่า k สูงในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก สอดคล้องกับความจริงที่ว่า ทะเลสาบตอนนอกมีปริมาณตะกอนเม็ดละเอียดมากกว่าในทะเลหลวง และอาจจะมีความเข้มข้นมากกว่าในทะเลหลวงด้วย เพราะทะเลสาบสงขลาตอนนอกเป็น ที่รวมของน้ำเสียจากพื้นที่โดยรอบทะเลสาบสงขลาตอนนอกเอง รวมทั้งน้ำที่ไหลหลากมาจากทะเลหลวงก่อนลงสู่ทะเลสาบสงขลาตอนนอก ซึ่งอาจทำให้ค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนมีค่าสูงขึ้นได้

การแปรเปลี่ยนของค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนในชุดเดียวกับที่วิเคราะห์โลหะหนัก แสดงอยู่ใน Table 2 และ Figure 5 ตะกอนจากตำแหน่ง T และ U ซึ่งอยู่ใกล้คลองเชื่อมระหว่างทะเลหลวงกับทะเลสาบสงขลาตอนนอก และไกลจากชุมชนขนาดใหญ่ มีค่า k ค่อนข้าง

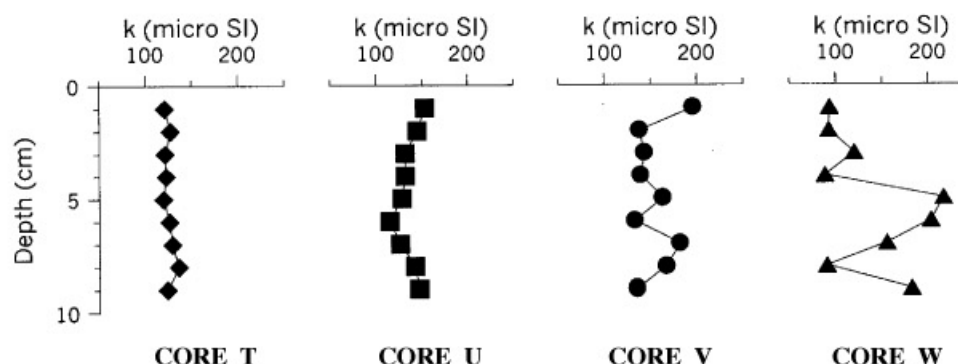


Figure 5. Variation of magnetic susceptibility with depth of bottom sediment samples of cores T, U, V and W.

สัณฐานของตะกอนและการตกตะกอน การแปรเปลี่ยนของค่า k มีเพียงเล็กน้อย แสดงว่าในช่วงการตกตะกอนดังกล่าว (ช่วง ปี พ.ศ. 2520-2538) เป็นการตกตะกอนอย่างสงบ มีกระแสน้ำปั่นป่วนก่อกวนน้อย (less perturbation) หรือมีกิจกรรมทางแม่เหล็กสัณฐานของตะกอนที่จุด V และ W มีการเปลี่ยนแปลงของค่า k ที่รุนแรงกว่า แสดงการผันผวนขึ้นลงของกิจกรรมทางแม่เหล็ก เช่น มีการตกตะกอนของแร่เฟอร์โรแมกเนติก ที่เกิดขึ้นใหม่โดยปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ (authigenic) ที่ตำแหน่งดังกล่าว ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการตกตะกอน หรือเป็นตะกอนที่มีแร่เฟอร์โรแมกเนติกที่ถูกพัดพามาจากที่อื่น (allogenic) เนื่องจากจุด V อยู่ใกล้ปากคลองอู่ตะเภา และจุด W อยู่ใกล้กับปากทะเลสาบและตัวเมืองนครสงขลา และอยู่ในอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลงที่เข้าออกปากทะเลสาบ แร่เฟอร์โรแมกเนติกและโลหะหนักที่พัดมาจากเขตเมือง พื้นที่อุตสาหกรรม พื้นที่เกษตรกรรมและเหมืองแร่ ที่ไหลลงคลองอู่ตะเภาและออกสู่ทะเลสาบแล้วมาตกจมที่ใกล้จุด V และ W อาจมีส่วนทำให้ค่า k ของตะกอนที่จุด V และ W ผันผวน โดยเฉพาะในช่วงอายุการตกตะกอนระหว่างปี พ.ศ. 2520-2530

Figure 6 แสดงกราฟระหว่างความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb และ Cr กับค่า k ของตะกอนตัวอย่าง จากกราฟไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับความเข้มข้นโลหะหนักดังกล่าว การที่ Fe สามารถใช้เป็นธาตุอนุรักษ์ได้ดีสำหรับโลหะหนักในทะเลสาบสงขลาตอนนอก ซึ่งได้อธิบายไปแล้วว่า เนื่องมาจากสารประกอบของ Fe ในตะกอนทะเลสาบสงขลาจะมีทั้งแร่ เกอไทต์ และ ฮีมาไทต์

ซึ่งตรวจพบในหินดินดานที่เป็นต้นกำเนิดหลักของตะกอนทะเลสาบสงขลา ทำให้ตะกอนสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี จึงเห็นได้ว่าความเข้มข้นโลหะหนักอื่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้น Fe เพิ่มขึ้น (Figure 3) ในแง่สมบัติแม่เหล็ก แม้ว่าแร่เกอไทต์และฮีมาไทต์จะเป็นแร่เฟอร์โรแมกเนติก แต่จัดอยู่ในกลุ่มแอนติเฟอร์โรแมกเนติก (anti-ferromagnetic) ที่มีอำนาจแม่เหล็กอ่อนมาก (Dunlop and Özdemir, 1997) โดยค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กเชิงมวลของแร่เกอไทต์มีค่าน้อยกว่าของฮีมาไทต์ราว 25 เท่า และน้อยกว่าของแมกนีไทต์ราว 580 เท่า (Tarling and Hrouda, 1993) ดังนั้นค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนจึงน่าจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแร่แมกนีไทต์และแมกนีไทต์ที่มีอยู่ในตะกอนซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในตะกอน ต่างกับกรณีของแร่เกอไทต์

อย่างไรก็ตามยังมีค่าพารามิเตอร์ทางแม่เหล็กอื่นๆ ของตะกอนที่ยังอยู่ในระหว่างการตรวจสอบ เช่น ค่าแมกนีไทเซชันตกค้างอิมมูโนแบบไอโซเทอร์มัล ผลของปฏิกิริยาระหว่างเกรนแม่เหล็กและอื่นๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์จะนำเสนอในลำดับต่อไป

สรุป

เทคนิคการย่อยตะกอนแบบย่อยทั้งหมดด้วยกรด aqua regia ร่วมกับกรด HF สามารถย่อยตะกอนทะเลสาบสงขลาได้หมดโดยไม่มีของแข็งตกค้าง โดยต้องใช้เวลาย่อยตะกอนนานระหว่าง 55 - 110 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

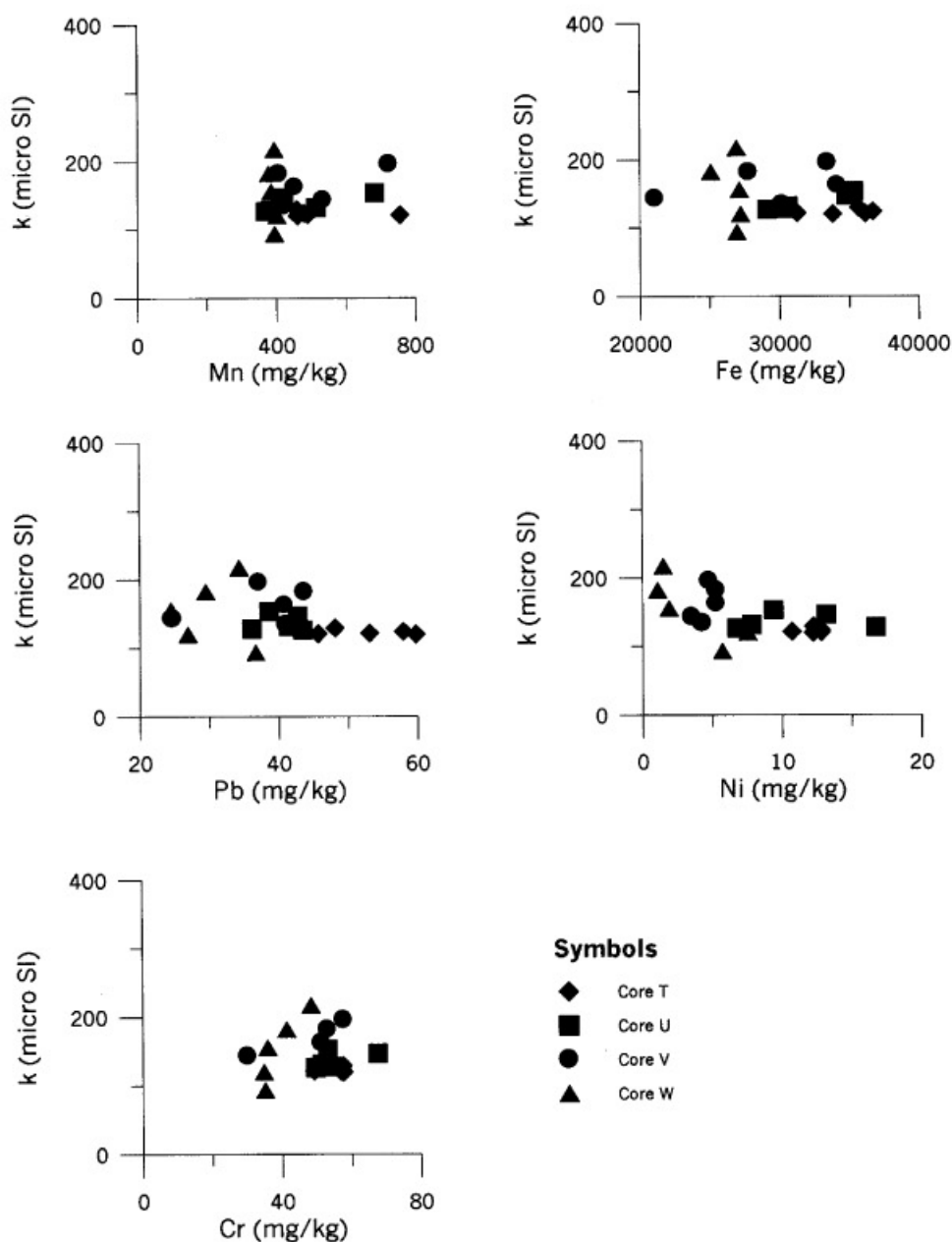


Figure 6. Plots between the heavy metal concentration and magnetic susceptibility of sediment samples from cores T, U, V and W.

การย่อยด้วยกรดแก่ HNO_3 , HCl , HClO_4 ไม่สามารถย่อยตะกอนได้ทั้งหมด เนื่องจากตะกอนทะเลสาบสงขลามีส่วนประกอบของแร่กลุ่มซิลิเกตที่คงทนต่อการดัดกลาย

ความเข้มข้น Mn ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความลึก 9-0 ซม.

(ตกตะกอนระหว่าง ปี พ.ศ. 2520-2538) ส่วนในโลหะหนัก Fe, Ni, Pb และ Cr มีการแปรปรวนของความเข้มข้น ทำให้ไม่สามารถบอกได้ว่ามีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหรือไม่ สรุปได้ว่าความเข้มข้น Mn, Fe, Ni และ Cr ในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกยังคงอยู่ในระดับต่ำเทียบเท่า (หรือ

ต่ำกว่า) ความเข้มข้นโลหะหนักชนิดดังกล่าวในตะกอนทะเลสาบที่อยู่ห่างไกลทั้งในยุโรปและอเมริกา ยกเว้น Pb ซึ่งมีความเข้มข้นสูงในตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอก มากกว่าในตะกอนทะเลสาบที่อยู่ห่างไกลอื่นๆ

เมื่อใช้เกณฑ์ความผิดปกติเชิงภูมิภาคของ Szefer และคณะ (1995) พบว่า เมื่อเลือกให้ Fe เป็นธาตุอนุรักษ์ ความแปรปรวนของโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb และ Cr มีค่าน้อยที่สุด และพบว่าความเข้มข้นโลหะหนัก Mn, Fe, Ni, Pb และ Cr ในตะกอนเกือบทุกตัวอย่างไม่มีความผิดปกติเชิงภูมิภาค หมายความว่าปริมาณโลหะหนักดังกล่าวมีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติ ยกเว้นโลหะ Ni ในตะกอนที่ตำแหน่ง U เพียง 1 ตัวอย่าง ที่มีค่าสูงผิดปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อตรวจสอบค่าดัชนีการสะสมเชิงธรณี Igeo ตามเกณฑ์ของ Stoffers และคณะ (1986) แสดงระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในตะกอนโดยเทียบกับค่าเฉลี่ยโลหะหนักในหินดินดานทั่วไป พบว่าตัวอย่างตะกอนทะเลสาบสงขลาตอนนอกไม่ปนเปื้อนโลหะ Mn, Fe, Ni และ Cr แต่มีระดับการปนเปื้อนเล็กน้อยสำหรับโลหะ Pb ที่ตำแหน่ง T ซึ่งอาจปนเปื้อนจากสารเคมีการเกษตรหรือจากแหล่งแร่ในตะกอนที่มาจากทะเลหลวง

อาจสรุปได้ว่าในตะกอนทะเลสาบสงขลา มีเพียงโลหะ Pb เท่านั้น ที่มีความเข้มข้นสูงผิดปกติไปเล็กน้อย ซึ่งอาจมีต้นกำเนิดบางส่วนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของมนุษย์ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ทราบข้อมูลโลหะหนักสัดส่วนที่มีกำเนิดจากธรรมชาติ ควรศึกษาปริมาณโลหะหนักในตะกอนที่ระดับลึกประมาณ 50 ซม. ซึ่งหากใช้ค่าอัตราการตกตะกอนคงที่จาก Chitrakarn และคณะ (1996) พบว่าตะกอนที่ระดับลึก 50 ซม. น่าจะมีอายุการตกตะกอนประมาณ 100 ปี ซึ่งโลหะหนักที่พบในตะกอนที่ระดับลึกนี้ควรมีต้นกำเนิดจากธรรมชาติ

เมื่อวิเคราะห์ค่าสภาพรีดิวซ์ได้ทางแม่เหล็กของตะกอนตัวอย่างเทียบกับความเข้มข้นโลหะหนัก ยังไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างสมบัติทั้งสอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิโทรเพื่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประเทศไทย ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย ประจำปี 2542

ให้กับโครงการวิจัยเรื่องการศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติแม่เหล็กของตะกอนกับความเข้มข้นโลหะหนักในตะกอนคลองอู่ตะเภาและทะเลสาบสงขลา ที่เป็นโครงการใหญ่ โดยโครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการใหญ่ ขอขอบคุณสถาบัน International Programme in Physical Science, Uppsala, Sweden ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือวิจัยแม่เหล็ก แก่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้สนับสนุนวัสดุครุภัณฑ์ในการวิจัย ขอขอบคุณองค์การพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ ที่ได้เอื้อเฟื้อสนับสนุนสารอ้างอิงมาตรฐานตะกอนทะเลสาบ IAEA SL-1

เอกสารอ้างอิง

- จุมพล คีนดัก ธงชัย พึ่งรัศมี และ พิกพ วสุวานิช. 2521. ดิน (Clays). เอกสารเศรษฐกิจธรณีวิทยา เล่มที่ 19 กองเศรษฐกิจธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กรุงเทพฯ 282 หน้า
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 (2543). รายงานการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา ปี 2542. สงขลา. กรกฎาคม 2543 : 19 - 23.
- Alloway, B.J., 1995. Heavy Metals in Soils, 2nd ed. Blackie, Glasgow.
- Andrews, J. T. and Jennings, A. E. 1987. Influence of sediment source and type on the magnetic susceptibility of fiord and shelf deposits, Baffin Island and Baffin Bay, N.W.T. Can. J. Earth Sci., 24 : 1386-1401.
- Bhongsuwan, T. 1993. Palaeomagnetic investigations in Thailand. Licentiate thesis, Department of applied Geophysics, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 128 p.
- Bhongsuwan, T. and Chitrakarn, T. 1997. Magnetic susceptibility stratigraphy of bottom core-sediments from Songkhla Lake, Songkhlanakarin J. Sci. Technol., 19 : 363-373.
- Birch, L., Hanselmann, K.W. and Bachofen, R. 1996. Heavy metal conservation in Lake Cadagno sediments : historical records of anthropogenic emissions in a meromictic alpine lake. Wat. Res., 30 : 679-687.
- Brandvold, L.A. and McLemore, V.T. 1998. A study of analytical variation of sampling and analysis of

- stream-sediments from areas contaminated by mining and milling. *Journal of Geochemical Exploration*, 64 : 185-196.
- Chapra, S.C. and Canale, R.P. 1990. Numerical methods for engineers. McGraw-Hill, Singapore.
- Chittrakarn, T., Bhongsuwan, T., Nuannin, P. and Thongjerm, T. 1996. The Determination of Sedimentation Rate in Songkhla Lake Using Isotopic Technique. The 6th Nuclear Science and Technology Conference, OAEP, Bangkok, Thailand, Dec 1996 : 333-345.
- Din, Z. 1992. Use of aluminum to normalize heavy-metal data from estuarine and coastal sediments of Straits of Malaka. *Mar. Pollut. Bull.*, 24 : 484 - 491.
- Dunlop, D.J. and Özdemir, Ö. 1997. *Rock Magnetism*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Đurža, O. 1999. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24 : 541-543.
- Dybczyński, R. and Suschny, O. 1999. Final Report on the Intercomparison Run SL-1 for the Determination of Trace Elements in a Lake Sediment Sample, International Atomic Energy Agency, Laboratory Seibersdorf, (IAEA/RL/064), September 1999.
- Förstner, U. and Salomons, W. 1981. Trace metals analysis on polluted sediments. *Delft Hydraul. Lab. Publ.* 248 : 1-13.
- Gatti, L.V., Mozeto, A.A. and Artaxo, P. 1999. Trace elements in lake sediments measured by the PIXE technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 150 : 298-305.
- Green-Ruiz, C. and Pérez-Osuna, F. 2000. Heavy metal anomalies in lagoon sediments related to intensive agriculture in Altata-Ensenada del Pabellon coastal system (SE Gulf of California). *Environmental International*, 26 : 265 - 273.
- Håkansson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control - a sedimentological approach, *Wat. Res.*, 14 : 975-1101.
- Herr, C. and Gray, N.Y. 1997. Sampling riverine sediments impacted by acid mine drainage : problems and solutions. *Environmental Geology*, 29 : 37 - 45.
- Herut, B., Hornung, H., Krom, M.D., Kress, N., Cohen, Y. 1993. Trace metals in shallow sediments from the Mediterranean coastal region of Israel. *Mar. Pollut. Bull.*, 26 : 675 - 682.
- Hullet, L.D., Weisberger, A.J., Northcutt, K.J. and Ferguson, M. 1980. Chemical species in fly ash from coal-burning power plants. *Science*, 210 : 1356 - 1358.
- Hunt, A., Jones, J. and Oldfield, F. 1984. Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin. *The Science of the Total Environment*, 33 : 129 - 139.
- Jackson, T.A., Bistricki, T., 1995. Selective scavenging of copper, zinc lead and arsenic by iron and manganese oxyhydroxide coatings on plankton in lakes polluted with mine and smelter wastes: results of energy dispersive x-ray micro-analysis. *J. Geochem. Explor.*, 52 : 97-125.
- Leivuori, M. 1998. Heavy metal contamination in surface sediments in the Gulf of Finland and comparison with the Gulf of Bothnia. *Chemosphere*, 36 : 43-59.
- Maneepong, S. 1996. Distribution of heavy metals in sediments from outer part of Songkhla Lagoon, Southern Thailand, *Songkhlanakarin J. Sci. Technol.*, 18 : 87 - 97.
- Maneepong, S. and Angsupanich, S. 1999. Concentration of arsenic and heavy metals in sediments and aquatic fauna from the outer part of Songkhla Lagoon, Phawong and U Taphao canals, *Songkhlanakarin J. Sci. Technol.*, 21 : 111 - 121.
- Nachiangmai, N. 1979. Report of Songkhla Lake Research Project, 1978 - 1979. Prince of Songkla University and National Environment Board of Thailand.
- Office of Research and Development, 1994. *Natural Resources Profile of Songkhla Lake Basin*, ICSLB, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkhla.
- Potts, P. J. 1992. *A handbook of silicate rock analysis*, Blackie & Son Ltd., BishopBriggs, Glasgow G64 2NZ, London.
- Pungrassami, T. 1984. Tin Mineralization of the Thung

- Pho-Thung Khamin Mining District, Changwat Songkhla. Conference on Application of Geology and the National Development, Chulalongkorn University, Bangkok, 19-22 November 1984 : 207-214.
- Rose, A.W. and Bianchi-Mosquera, G.C. 1993. Adsorption of Cu, Pb, Zn, Co, Ni and Ag on goethite and hematite : a control on metal mobilization from red-beds into stratiform copper deposits. *Economic geology*, 88 : 1226 - 1236.
- Stoffers, P., Glasby, G.P., Wilson, C.J., Davis, K.R., Walter, P. 1986. Heavy metal pollution in Wellington Harbour. *NZ J. Mar. Freshwater Res.*, 20 : 495 - 512.
- Strzyszczyk, Z., Magiera, T. and Heller, F. 1996. The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia. *Studia. geoph. geod.*, 40 : 276-286.
- Summers, J.K., Wade, L.T., Engle, V.D. and Malaeb, Z.A. 1996. Normalization of metal concentrations in estuarine sediments from the Gulf of Mexico. *Estuaries*, 19 : 581 - 594.
- Szefer, P., Glasby, G.P., Pempkowiak, J., Kaliszan, R., 1995. Extraction studies of heavy-metal pollution in surficial sediments from the southern Baltic Sea off Poland. *Chem. Geol.*, 120 : 111 - 126.
- Tam, N.F.Y. and Yao, M.W.Y. 1998. Normalization and heavy metal concentration in mangrove sediments. *Sci. Total Environ.*, 216 : 33 - 39.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F. 1993. *The Magnetic Anisotropy*. Chapman & Hall, London.