

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองศึกษาผลของการกระจายขนาดของตะกอน ต่อพฤติกรรม การเคลื่อนตัวของตะกอนในรางน้ำสี่เหลี่ยมนี้ ได้ทำการทดลองทั้งสิ้น 21 การทดลองด้วยกัน โดยในการศึกษาได้ใช้ทรายที่มีขนาด  $D_{50}$  ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.17-1.18 มม. แต่การกระจายขนาดของทราย  $\sigma_g$  (geometric standard deviation) ต่างกัน คือประมาณ 1.32, 2.11 และ 3.90 รายละเอียดการวิเคราะห์การกระจายขนาดดูภาคผนวก ข. มาจำลองเป็นวัสดุท้องน้ำในรางน้ำสี่เหลี่ยม (rectangular flume) ยาว 18 ม. กว้าง 0.60 ม. ลึก 0.75 ม. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการกระจายขนาดของตะกอนท้องน้ำที่มีต่อพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตะกอน อันได้แก่ อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด ความสัมพันธ์ของปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อตะกอนทั้งหมด ลักษณะรูปร่างของท้องน้ำ และการเปลี่ยนแปลงขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทาง โดยในการทดลองได้มีการปรับสมดุลให้อัตราการไหลทรายสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำ และวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญเมื่อระบบเข้าสู่สมดุล ได้แก่ อัตราการไหล (Q), ความลึกการไหล (h), ความลาดเอียงของผิวน้ำ (i), อุณหภูมิของน้ำ (T), อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด (Total load,  $S_T$ ), อัตราการนำพาตะกอนแขวนลอย (Suspended load,  $S_s$ ), ขนาด  $D_{50}$  (median particle diameter), ค่าการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ  $\sigma_g$  (geometric standard deviation) และรูปร่างท้องน้ำ (Bed form) ดังตาราง 4-1 และภาคผนวก ค. โดยมีสรุปรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญดังนี้

**อัตราการไหล (Q)** ในการศึกษาครั้งนี้ วัดอัตราการไหลโดยใช้ฝายสามเหลี่ยมสันคม ( $90^\circ$  v-notch weir) ซึ่งทำการสอบเทียบกับอัตราการไหลที่วัดได้จริง ผลการสอบเทียบดูภาคผนวก ข. จากการสอบเทียบ ได้สมการเพื่อหาอัตราการไหลดังนี้  $Q = 0.015H^{2.48}$  โดยที่ Q คือ อัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อวินาที, H คือ ความสูงของน้ำเหนือสันฝายในหน่วยเซนติเมตร ในแต่ละอัตราส่วนผสมของทราย (3 อัตราส่วนผสม) ใช้อัตราการไหลจำนวน 7 อัตราการไหล ในการทดลองนี้ มีอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 24.0-55.2 ลิตรต่อวินาที โดยทรายชนิดที่ 1 มีอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 24.0-55.2 ลิตรต่อวินาที ทรายชนิดที่ 2 มีอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 24.8-53.7 ลิตรต่อวินาที และทรายชนิดที่ 3 มีอัตราการไหลอยู่ระหว่าง 25.1-54.6 ลิตรต่อวินาที ขีดจำกัดของอัตราการไหลขึ้นอยู่กับ อัตราการสูบน้ำของเครื่องสูบน้ำ และขนาดของตะกอนท้องน้ำ เนื่องจากต้องปรับสภาพการไหลให้เป็นสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอน

ตาราง 4-1 สรุปค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองของทรายทั้ง 3 กรณี

Sand Run NO.	Discharge (Q) (l/s)	$Q_{s\text{in}}$ (Kg/s)	$Q_{s\text{out}}$ (Kg/s)	W.S. (i)	Depth (h) (cm.)	Velocity (V) (m/s)	Temp. (T) ( $^{\circ}\text{C}$ )	Viscosity (V) ( $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Total Load Sus. Load (S <sub>T</sub> ) (g/min)	Sus. Load (S <sub>S</sub> ) (g/min)	Bed Material D <sub>50</sub> (mm.)	$\sigma_g$	Fr	Flow Regime	Bed Form	
1	A1	24.0	0.020	0.017	1.725	9.39	0.427	28.0	8.376	1170	147	1.22	1.32	0.44	Lower	ripple&dune
	A2	31.2	0.023	0.019	2.408	10.01	0.520	29.4	8.113	1380	237	1.20	1.32	0.52	Lower	dune
	A3	36.4	0.044	0.039	3.072	10.43	0.581	28.3	8.320	2610	516	1.22	1.31	0.57	Lower	dune
	A4	40.8	0.056	0.052	4.508	10.80	0.629	28.2	8.338	3342	564	1.21	1.31	0.61	Lower	dune
	A5	45.3	0.066	0.065	5.294	11.12	0.678	28.3	8.320	3960	789	1.22	1.31	0.65	Lower	dune
	A6	49.4	0.069	0.070	5.296	11.17	0.736	28.1	8.357	4158	1014	1.17	1.32	0.70	Lower	dune
	A7	55.2	0.076	0.083	6.254	10.88	0.845	28.0	8.376	4560	970	1.18	1.32	0.82	Lower	dune
2	B1	24.8	0.022	0.018	1.544	9.06	0.456	25.0	8.940	1290	192	1.22	2.11	0.48	Lower	ripple
	B2	29.9	0.027	0.023	1.994	9.29	0.536	26.0	8.752	1614	364	1.26	2.03	0.56	Lower	ripple&dune
	B3	35.4	0.048	0.046	4.283	9.31	0.633	26.0	8.752	2874	588	1.29	1.98	0.66	Lower	ripple&dune
	B4	39.7	0.060	0.061	4.763	10.30	0.643	27.0	8.564	3576	714	1.27	1.99	0.64	Lower	dune
	B5	45.3	0.069	0.069	5.075	10.05	0.751	27.5	8.470	4158	894	1.17	2.08	0.76	Lower	dune
	B6	49.4	0.074	0.080	5.920	10.94	0.752	25.0	8.940	4440	1254	1.23	2.03	0.73	Lower	dune
	B7	53.7	0.082	0.085	6.283	11.05	0.810	25.5	8.846	4920	1092	1.19	2.03	0.78	Lower	dune
3	C1	25.1	0.023	0.019	1.167	9.01	0.464	26.0	8.752	1380	294	1.19	3.86	0.49	Lower	plane bed
	C2	29.7	0.029	0.030	1.729	9.50	0.521	26.5	8.658	1758	480	1.24	3.84	0.54	Lower	ripple
	C3	34.8	0.053	0.054	2.675	9.81	0.591	27.0	8.564	3198	906	1.27	3.80	0.60	Lower	ripple
	C4	39.7	0.064	0.058	5.300	9.55	0.693	27.5	8.470	3864	942	1.20	3.89	0.72	Lower	ripple&dune
	C5	44.8	0.073	0.071	5.417	9.60	0.778	27.5	8.470	4386	1243	1.19	3.78	0.80	Lower	ripple&dune
	C6	49.8	0.080	0.082	5.175	10.70	0.776	27.5	8.470	4800	1248	1.27	3.77	0.76	Lower	ripple&dune
	C7	54.6	0.091	0.095	6.925	11.09	0.820	27.3	8.508	5442	1578	1.29	3.81	0.79	Lower	dune

**ความลึกการไหล ( $h$ ) และความลาดเอียงของผิวหน้า ( $i$ )** ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (sandy surface measuring) ซึ่งสามารถใช้วัดระดับผิวหน้าระดับท้องน้ำ และความลึกของน้ำได้ ผลการสอบเทียบการวัดความลึกของน้ำ ดูภาคผนวก ข. ในการทดลอง ได้ทำการวัดระดับผิวหน้า และความลึกการไหล จำนวน 3 ครั้ง ที่ตำแหน่ง 2.00 ม., 4.00 ม., 6.00 ม., 8.00 ม. และ 10.00 ม. ดังรูป 3-2 โดยที่ตำแหน่งต่าง ๆ เหล่านี้ ได้มีการวัดระดับผิวหน้า และความลึกการไหล ที่ตำแหน่ง 15 ซม., 30 ซม. และ 45 ซม. ตามความกว้างของรางน้ำด้วย โดยความลึกการไหลที่ใช้ในการทดลองนี้ กำหนดให้ความลึกการไหลอยู่ในช่วง  $10 \pm 1$  ซม. ส่วนความลาดเอียงของผิวหน้า ต้องสัมพันธ์กับอัตราการไหล และความลึกการไหลที่กำหนด เพื่อให้สภาพการไหลเป็นสภาวะที่มีการเคลื่อนที่ของตะกอน และจากผลการทดลองพบว่า ความลึกการไหล อยู่ระหว่าง 9.01-11.17 เซนติเมตร และความลาดเอียงของผิวหน้า อยู่ระหว่าง 0.0012-0.0069 เมตร/เมตร

**ความเร็วการไหล ( $V$ ) และค่าฟรูดนัมเบอร์ ( $Fr$ )** หาได้จากอัตราการไหลที่วัดโดยฝายสามเหลี่ยมสันคม ( $90^\circ$  v-notch weir) และความลึกการไหลที่วัดโดยเครื่องมือวัดความเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (sandy surface measuring) โดยในการทดลองนี้ ความเร็วการไหล อยู่ระหว่าง 42.7-84.5 เซนติเมตรต่อวินาที และค่าฟรูดนัมเบอร์ อยู่ระหว่าง 0.44-0.82 ซึ่งเป็นการไหลต่ำกว่าวิกฤต (subcritical flow,  $Fr < 1$ )

**อุณหภูมิของน้ำ ( $T$ )** ระหว่างทำการทดลอง ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ 3 จุด โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท เพื่อนำอุณหภูมิของน้ำไปใช้ในการหาความหนืดจลน์ของน้ำ (kinematics viscosity,  $\nu$ ) โดยในการทดลองนี้ มีอุณหภูมิของน้ำ อยู่ระหว่าง  $25.0-29.4$  °C และมีค่าความหนืดจลน์ อยู่ระหว่าง  $8.11 \times 10^{-7}$ - $8.94 \times 10^{-7}$  เมตร<sup>2</sup>/วินาที

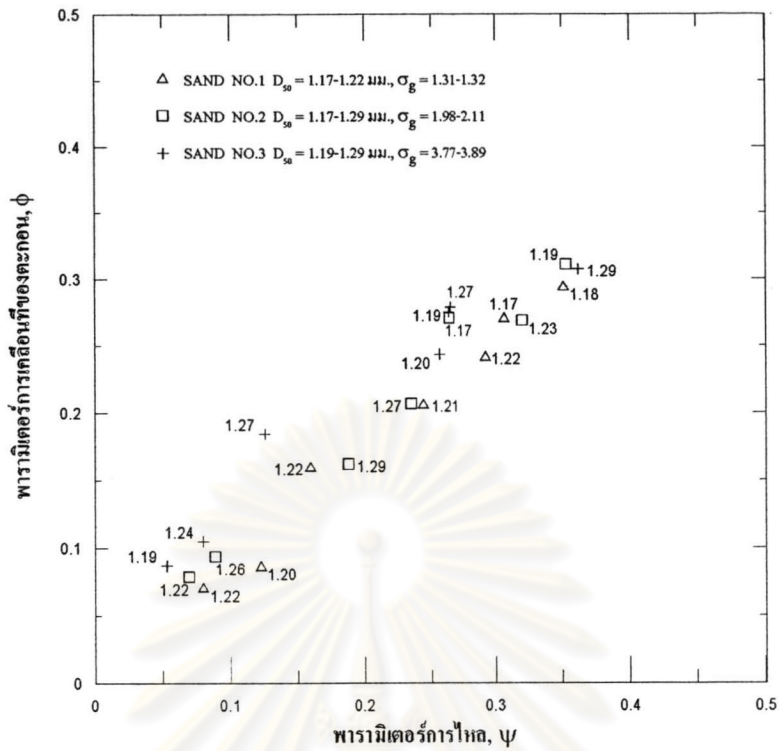
**เวลาที่ใช้ในการทดลอง** เวลาที่ใช้ เพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล (equilibrium) ในการทดลองนี้ อยู่ระหว่าง 180-300 นาที ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและอัตราการโรยทรายที่ใช้ หลังจากระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว ทำการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการ โดยในการทดลอง ได้ทำการตรวจสอบว่าระบบเข้าสู่สมดุล จากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ต้นรางน้ำ ( $Q_{s,in}$ ) กับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ปลายรางน้ำ ( $Q_{s,out}$ ) ว่าแตกต่างกันไม่เกิน 10% ดังตาราง 4-1 พบว่า อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ต้นรางน้ำ ที่หาได้จากอัตราการโรยทราย มีค่าอยู่ระหว่าง 0.020-0.091 กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ปลายรางน้ำ ที่หาได้จากการเก็บตัวอย่างตะกอนทั้งหมดบริเวณท้ายรางน้ำ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.017-0.095 กิโลกรัมต่อวินาที โดยในการทดลอง กรณีที่ 1 ทรายชนิดที่ 1 มีความแตกต่าง

ต่างเฉลี่ย 8.4% การทดลอง กรณีที่ 2 ทราบชนิดที่ 2 มีความแตกต่างเฉลี่ย 7.0% และการทดลอง กรณีที่ 3 ทราบชนิดที่ 3 มีความแตกต่างเฉลี่ย 5.9%

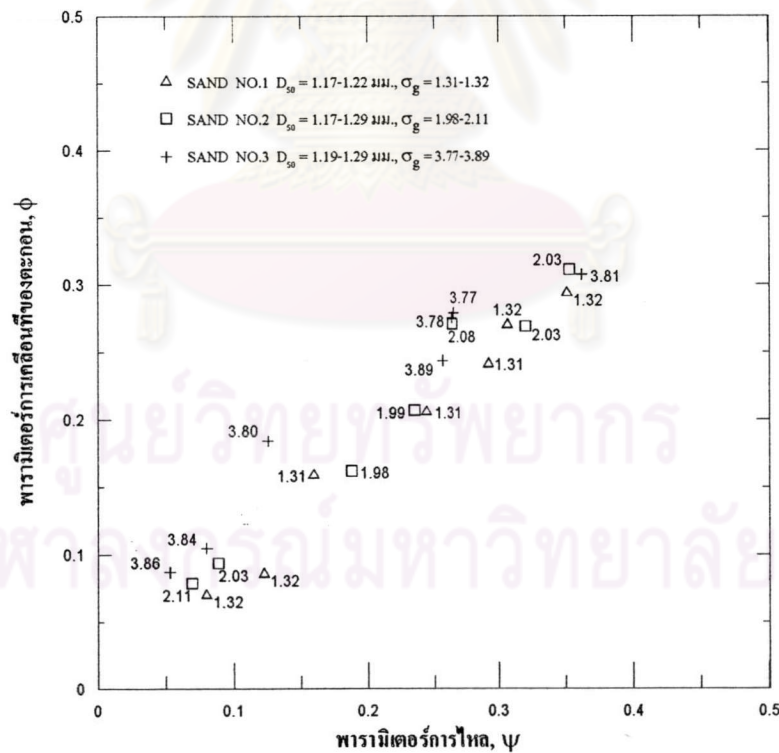
**อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด ( $S_T$ ) และอัตราการนำพาตะกอนแขวนลอย ( $S_S$ )**  
ในการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนทั้งหมด และตัวอย่างตะกอนแขวนลอยบริเวณท้ายรางน้ำ เพื่อตรวจสอบว่าระบบเข้าสู่สมดุล โดยอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด หาได้จากอัตราการไหลทราย ส่วนอัตราการนำพาตะกอนแขวนลอย หาได้จากการเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอยตลอดความลึก ที่ตำแหน่ง 15 ซม., 30 ซม. และ 45 ซม. ตามความของรางน้ำมาเฉลี่ยกัน และจากผลการทดลอง พบว่า อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด มีค่าอยู่ระหว่าง 1,170-5,442 กรัมต่อนาที และอัตราการนำพาตะกอนแขวนลอย มีค่าอยู่ระหว่าง 147-1,578 กรัมต่อนาที

**ขนาดของทรายวัสดุท้องน้ำ ( $D_{50}$ ,  $\sigma_g$ )** หาได้จากการเก็บตัวอย่างท้องน้ำที่ตำแหน่ง 0.00 ม., 2.00 ม., 4.00 ม., 6.00 ม., 8.00 ม., 10.00 ม. และ 12.00 ม. ดังรูป 3-2 ไปวิเคราะห์การกระจายขนาด ที่ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากการวิเคราะห์ พบว่า การทดลอง กรณีที่ 1 ทราบชนิดที่ 1 วัสดุท้องน้ำมีขนาด  $D_{50}$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล อยู่ในช่วง 1.17-1.22 มม. และมีค่า  $\sigma_g$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล อยู่ในช่วง 1.31-1.32 ส่วนการทดลอง กรณีที่ 2 ทราบชนิดที่ 2 วัสดุท้องน้ำมีขนาด  $D_{50}$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลอยู่ในช่วง 1.17-1.29 มม. และมีค่า  $\sigma_g$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล อยู่ในช่วง 1.98-2.11 สำหรับการทดลอง กรณีที่ 3 ทราบชนิดที่ 3 วัสดุท้องน้ำมีขนาด  $D_{50}$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล อยู่ในช่วง 1.19-1.29 มม. และมีค่า  $\sigma_g$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล อยู่ในช่วง 3.77-3.89 ดังรูป 4-1 ซึ่งค่าที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกับขนาด  $D_{50,i}$  และค่า  $\sigma_{g,i}$  ของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ตอนเริ่มต้นมาก ( $D_{50,i} = 1.18$  มม.,  $\sigma_{g,i} = 1.32$  สำหรับทราบชนิดที่ 1,  $D_{50,i} = 1.18$  มม.,  $\sigma_{g,i} = 2.11$  สำหรับทราบชนิดที่ 2,  $D_{50,i} = 1.17$  มม.,  $\sigma_{g,i} = 3.90$  สำหรับทราบชนิดที่ 3) โดยขนาดของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะใช้ค่า  $D_{50}$  และค่า  $\sigma_g$  เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล เป็นขนาดของวัสดุท้องน้ำ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ต่อไป

**รูปร่างท้องน้ำ (Bed form)** กำหนดจากลักษณะของท้องน้ำ ที่ได้จากการวัดระดับท้องน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางน้ำ ทุก ๆ 5 ซม. ตั้งแต่ตำแหน่ง 4.00 ม. ถึง 8.00 ม. ดังรูป 3-2 จากการทดลอง พบว่า รูปร่างท้องน้ำที่ได้ อยู่ในช่วงของริ้วคลื่น (ripple) ถึงลอนคลื่น (dune) ยกเว้นการทดลอง C1 ที่มีรูปร่างท้องน้ำแบบราบเรียบ (plane bed)



ก) ขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำ เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลของ 21 การทดลอง



ข) การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลของ 21 การทดลอง

รูป 4-1 ขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำ และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลของ 21 การทดลอง

#### 4.1 ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำต่ออัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด

การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสามารถแสดงโดยตัวแปรที่สำคัญ คือ  $\sigma_g$  (geometric standard deviation) ซึ่งในการทดลองได้ใช้ทรายที่มีการกระจายขนาดเริ่มต้น  $\sigma_{g,1}$  ต่างกัน 3 ขนาด คือประมาณ 1.32, 2.11 และ 3.90 มาจำลองเป็นวัสดุท้องน้ำสูงจากพื้นรางน้ำ ประมาณ 25 ซม. โดยทรายทั้ง 3 ขนาดนี้ มีขนาด  $D_{50}$  ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.17-1.18 มม.

สำหรับอิทธิพลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ต่ออัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด สามารถแสดงความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของพารามิเตอร์ไร้หน่วยที่สำคัญ 2 ค่า คือ พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ) และพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) ดังตาราง 4-2 และมีเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ ดังรูป 4-2 ซึ่งรูป 4-2 ก. แสดงความสัมพันธ์โดย ไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) และรูป 4-2 ข. แสดงความสัมพันธ์โดยมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) โดย

$$\phi = \frac{s}{\sqrt{\Delta g D_{50}^3}} \quad (4.1)$$

และ

$$\psi = \frac{hi}{\Delta D_{50}} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $s$  = อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของท้องน้ำ ( $m^2/s$ )

$h$  = ความลึกการไหล (m)

$i$  = ความลาดเอียงของผิวน้ำ

$g$  = อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 m/s^2$ )

$\Delta = S_s - 1$

$S_s$  = ความถ่วงจำเพาะของทราย (2.65)

จากผลการทดลองที่ได้ ดังรูป 4-2 พบว่า อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด ซึ่งผันแปรตามพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามเส้นแนวโน้มเมื่อพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) มีค่ามากขึ้น ดังรูป 4-2 ก. และรูป 4-2 ข. เนื่องจากพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) ที่มากขึ้น จะทำให้แรงเฉือนที่ท้องน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนตัวของตะกอนท้องน้ำมีค่ามากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดเพิ่มขึ้น

ตาราง 4-2 ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน( $\phi$ ) และค่าพารามิเตอร์การไหล( $\psi$ )

Run NO.	discharge (Q) (l/s)	W.S. (i) ( $10^{-3}$ )	Depth (h) (cm.)	Velocity (V) (m/s)	Total Load ( $S_T$ ) (g/min)	Bed Material $D_{50}$ (mm.)	$\sigma_g$	$\phi$	$\psi$
A1	24.0	1.725	9.39	0.427	1170	1.22	1.32	0.072	0.080
A2	31.2	2.408	10.01	0.520	1380	1.20	1.32	0.087	0.122
A3	36.4	3.072	10.43	0.581	2610	1.22	1.31	0.160	0.160
A4	40.8	4.508	10.80	0.629	3342	1.21	1.31	0.207	0.244
A5	45.3	5.294	11.12	0.678	3960	1.22	1.31	0.242	0.293
A6	49.4	5.296	11.17	0.736	4158	1.17	1.32	0.271	0.307
A7	55.2	6.254	10.88	0.845	4560	1.18	1.32	0.295	0.351
B1	24.8	1.544	9.06	0.456	1290	1.22	2.11	0.079	0.070
B2	29.9	1.994	9.29	0.536	1614	1.26	2.03	0.094	0.089
B3	35.4	4.283	9.31	0.633	2874	1.29	1.98	0.162	0.188
B4	39.7	4.763	10.30	0.643	3576	1.27	1.99	0.207	0.235
B5	45.3	5.075	10.05	0.751	4158	1.17	2.08	0.271	0.264
B6	49.4	5.920	10.94	0.752	4440	1.23	2.03	0.269	0.320
B7	53.7	6.283	11.05	0.810	4920	1.19	2.03	0.311	0.353
C1	25.1	1.167	9.01	0.464	1380	1.19	3.86	0.087	0.053
C2	29.7	1.729	9.50	0.521	1758	1.24	3.84	0.105	0.080
C3	34.8	2.675	9.81	0.591	3198	1.27	3.80	0.184	0.125
C4	39.7	5.300	9.55	0.693	3864	1.20	3.89	0.243	0.257
C5	44.8	5.417	9.60	0.778	4386	1.19	3.78	0.279	0.265
C6	49.8	5.175	10.70	0.776	4800	1.27	3.77	0.275	0.264
C7	54.6	6.925	11.09	0.820	5442	1.29	3.81	0.308	0.362

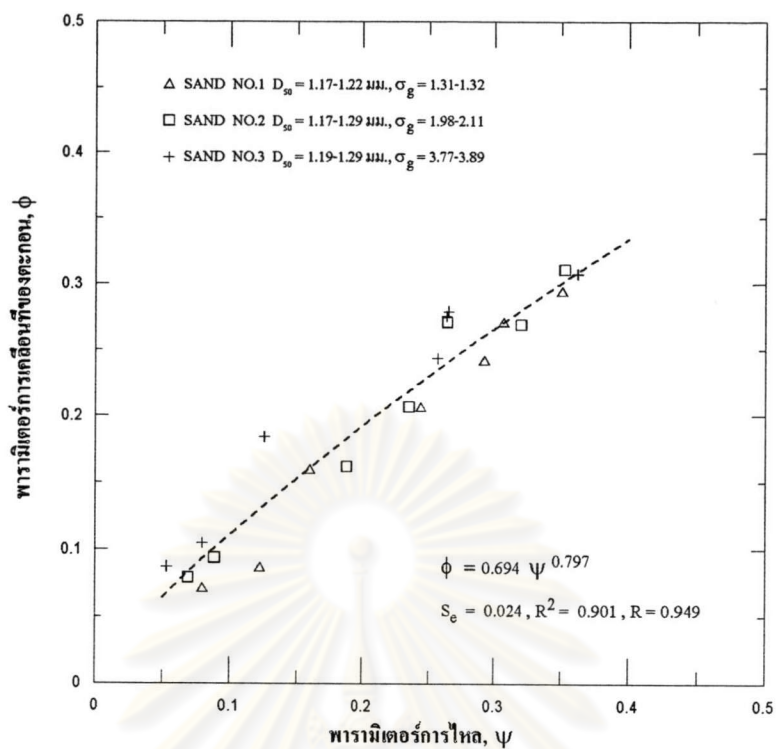
หมายเหตุ

 $\phi$  = transport parameter

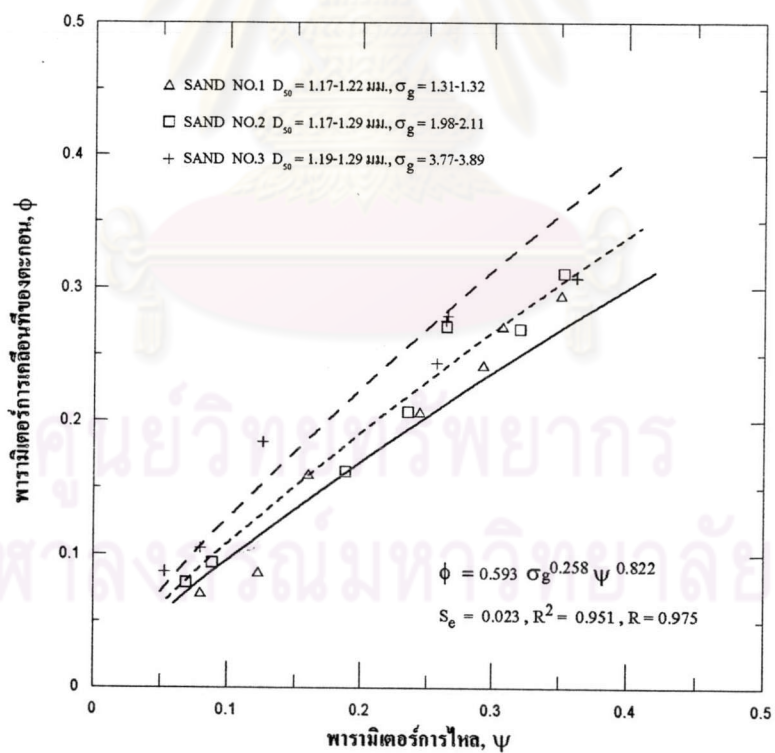
$$= \frac{S}{\sqrt{\Delta g D_{50}^3}}$$

 $\psi$  = flow parameter

$$= \frac{hi}{\Delta D_{50}}$$



ก) เมื่อไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ )



ข) เมื่อพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ )

รูป 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ), พารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) ของทราย 3 ชนิด



และที่พารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) ที่เท่ากัน อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดซึ่งผันแปรตามพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ) จะมีเส้นแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มากขึ้น ดังรูป 4-2 ข. ทั้งนี้เนื่องมาจากท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมากกว่า (Sand NO. 3) จะมีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อยกว่า (Sand NO. 1) โดยทรายชนิดที่ 1 มีขนาดทรายเริ่มต้นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.42 มม. (ตะแกรงเบอร์ 40) อยู่เพียง 1.35% ส่วนทรายชนิดที่ 2 มีขนาดทรายเริ่มต้นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.42 มม. (ตะแกรงเบอร์ 40) อยู่ 16.99% และทรายชนิดที่ 3 มีขนาดทรายเริ่มต้นที่มีขนาดเล็กกว่า 0.42 มม. (ตะแกรงเบอร์ 40) อยู่ถึง 32.64% และที่พารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) ที่เท่ากัน ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนที่ท้องน้ำเท่ากัน ทรายละเอียดจะมีโอกาสเคลื่อนที่ได้มากกว่าทรายหยาบ ดังนั้นจึงทำให้ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมากกว่า ที่มีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่า มีอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่มากกว่า

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ ดังรูป 4-2 ของพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ), พารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร 3 ตัวดังกล่าว โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (multiple non-linear regression) ได้รูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการ 4.3 และ 4.4 รายละเอียดการวิเคราะห์รูปแบบสมการ ดูภาคผนวก จ.

$$\phi = 0.694 \psi^{0.797} \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.901$$

$$R = 0.949$$

$$S_e = 0.024$$

และ  $\phi = 0.593 \sigma_g^{0.258} \psi^{0.822} \quad (4.4)$

$$R^2 = 0.951$$

$$R = 0.975$$

$$S_e = 0.023$$

โดยสมการ 4.3 เป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ) กับพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) เมื่อไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) ดังรูป 4-2 ก. และสมการ 4.4 เป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ) กับพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) เมื่อ

พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_p$ ) โดยทำการปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำในสมการโดยตรง ดังรูป 4-2 ข. ส่วนค่า  $R^2$ ,  $R$  และ  $S_e$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการ

และจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมการดังกล่าว พบว่า สมการ 4.3 ซึ่งเป็นสมการที่ไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ดังนี้  $R^2 = 0.901$  และ  $R = 0.949$  ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ที่ได้ จะเห็นว่าใกล้เคียงกับ 1.0 มาก แสดงว่า พารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ( $\phi$ ) กับพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) น่าจะมีความสัมพันธ์กันและมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง และจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมการ 4.4 ซึ่งเป็นสมการที่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำเพิ่มขึ้นมา โดยทำการปรับแก้โดยตรงนั้น พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์เพิ่มขึ้นจากสมการ 4.3 ดังนี้  $R^2 = 0.951$  และ  $R = 0.975$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มขึ้นจากสมการ 4.3 แสดงให้เห็นว่า การพิจารณาปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำโดยตรงนั้น ทำให้สมการที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น และเมื่อพิจารณาตาราง 4-3 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากสมการต่าง ๆ โดยพิจารณาเฉพาะค่าที่ได้จากการทดลอง เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการ 4.3 และสมการ 4.4 พบว่า อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณด้วยสมการ 4.3 มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองโดยเฉลี่ยประมาณ 13 % ส่วนเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของสมการ 4.4 มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 8 % ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าน้อยลง หรือหมายความว่า การพิจารณาปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ทำให้อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้ มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากขึ้นนั่นเอง

เมื่อพิจารณาตาราง 4-4 และรูป 4-3 ฉ., รูป 4-4 ฉ. และรูป 4-5 ฉ. ที่แสดงการเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการ 4.4 กับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ 4.4 กับค่าที่ได้จากการทดลอง มีความใกล้เคียงกันมาก โดยดูได้จากจุดที่แสดงในรูป 4-3 ฉ., รูป 4-4 ฉ. และรูป 4-5 ฉ. อยู่ใกล้กับเส้น  $45^\circ$  มาก ทั้งนี้เป็นเพราะว่า สมการ 4.4 เป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (multiple non-linear regression) ของการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาวิเคราะห์สมการ ดังนั้นในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ในหัวข้อถัดไป จะไม่นำเอาสมการ 4.4 มาวิเคราะห์ร่วมด้วย เพราะเป็นสมการที่ได้จากการทดลองอยู่แล้ว โดยสมการ 4.4 ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีขอบเขตของขนาดวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในสมการดังตาราง 4-5

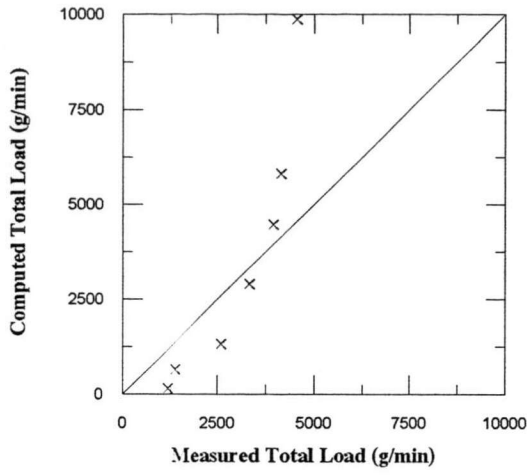
ตาราง 4-3 อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากสมการต่าง ๆ

Run NO.	Experiment (g/min)	Shinohara & Tsubaki (g/min)	Ackers & White (g/min)	Yang (g/min)	Engelund & Hansen (g/min)	Molinas & Wu (g/min)	Equation 4.3 (g/min)	This study (eq 4.4) (g/min)
A1	1170	141	93	272	172	101	1523	1312
A2	1380	634	543	772	474	279	2062	1798
A3	2610	1308	1086	1471	891	524	2620	2295
A4	3342	2895	1734	3073	1965	1156	3642	3223
A5	3960	4458	2478	4628	3015	1775	4262	3789
A6	4158	5808	3463	5417	3737	2205	4150	3699
A7	4560	9867	6046	8622	6031	3560	4660	4167
B1	1290	182	242	241	158	166	1355	1313
B2	1614	518	768	554	322	316	1736	1677
B3	2874	2589	2206	2430	1387	1318	3243	3169
B4	3576	3480	2369	3288	1984	1907	3782	3720
B5	4158	6060	4418	4668	3104	3254	3691	3683
B6	4440	7584	4663	6316	4249	4274	4617	4601
B7	4920	10230	6154	7975	5624	5659	4784	4778
C1	1380	148	382	157	109	488	1064	1197
C2	1758	485	919	428	258	1160	1559	1769
C3	3198	1406	2002	1160	655	2915	2300	2632
C4	3864	5735	4828	3962	2559	12507	3726	4369
C5	4386	8013	7280	5215	3380	15384	3790	4417
C6	4800	7657	7160	5724	3451	15578	4181	4866
C7	5442	12929	9527	9624	6222	29380	5465	6430

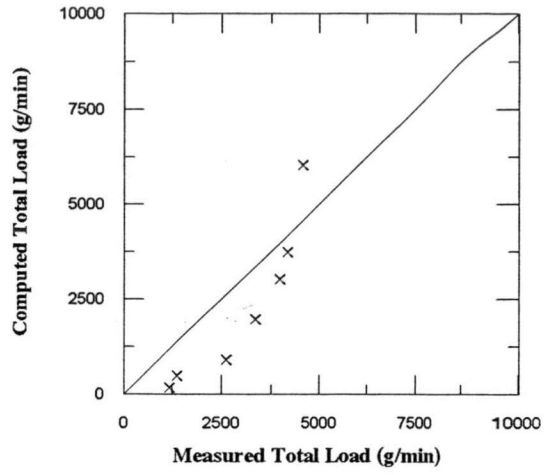
หมายเหตุ This study = อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณด้วย สมการที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นโค้งพหุคูณ (สมการ 4.4)

$$\% \text{ Deviation}_{\text{avg, eq 4.3 VS exp.}} = 13 \%$$

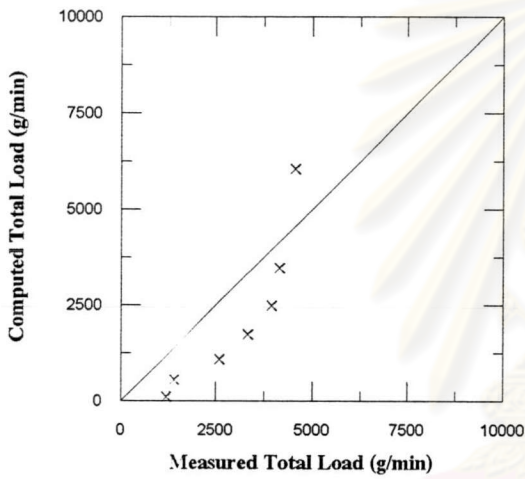
$$\% \text{ Deviation}_{\text{avg, This study VS exp.}} = 8 \%$$



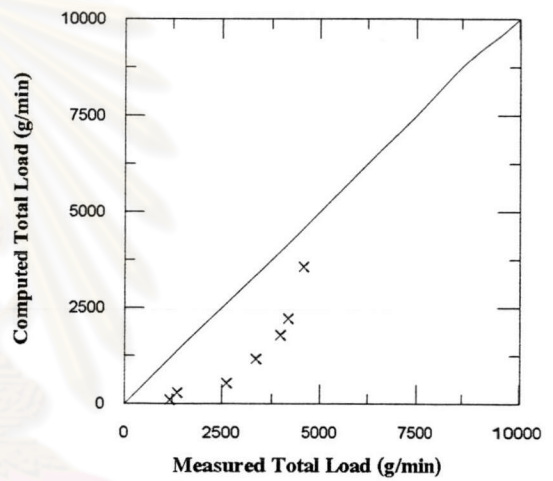
ก) สมการของ Shinohara และ Tsubaki



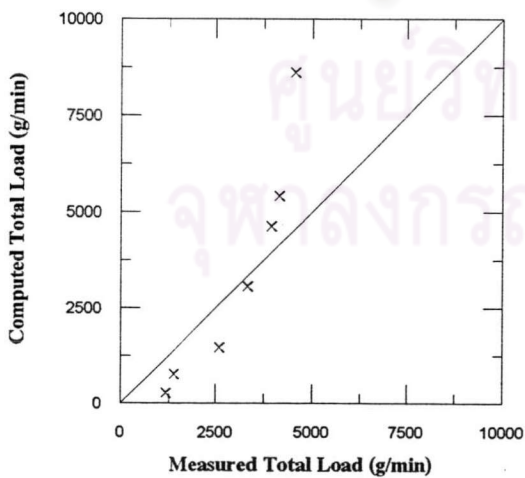
ง) สมการของ Englund และ Hansen



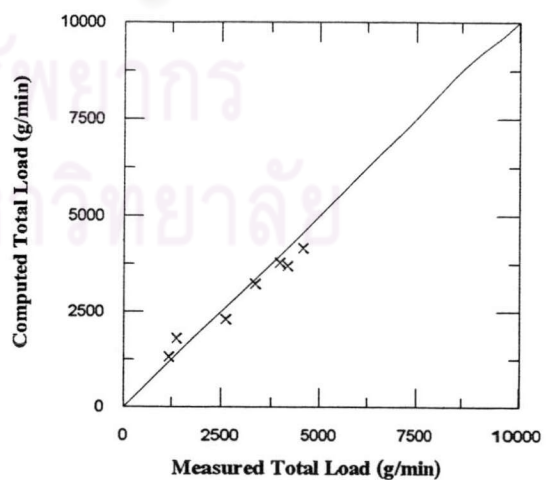
ข) สมการของ Ackers และ White



จ) สมการของ Molinas และ Wu

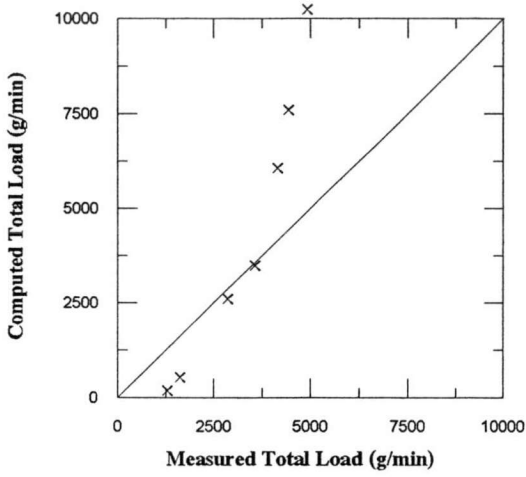


ค) สมการของ Yang

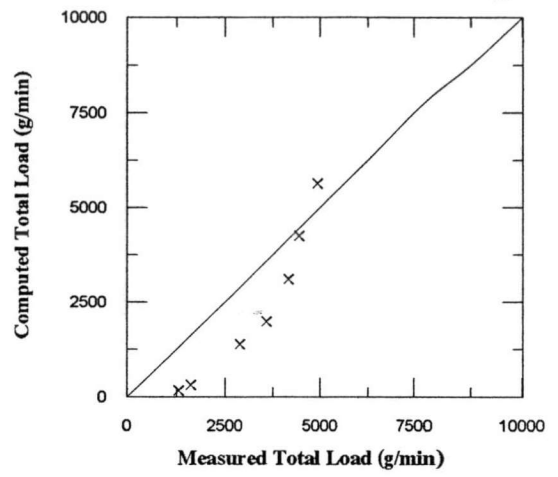


ณ) สมการที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้

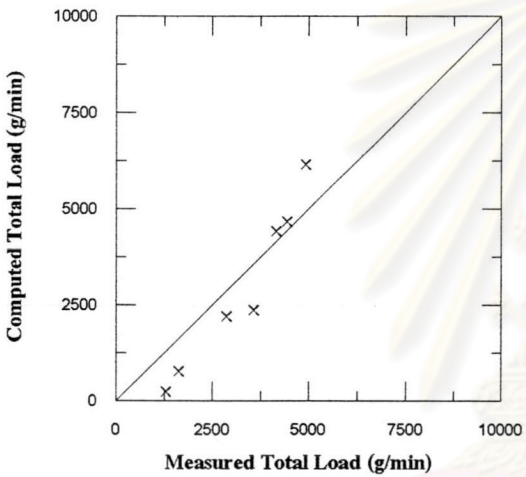
รูป 4-3 การเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 1  $D_{50}=1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g=1.31-1.32$



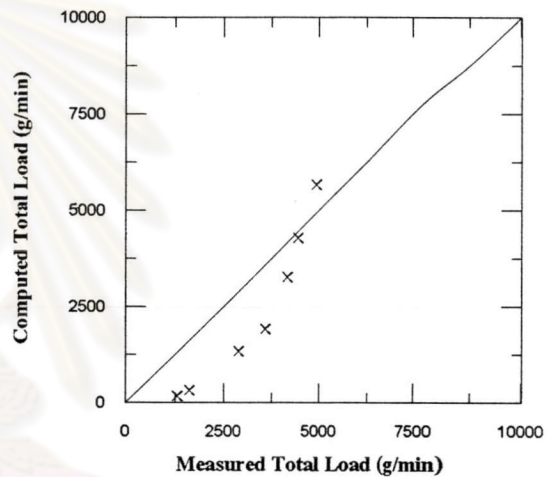
ก) สมการของ Shinohara และ Tsubaki



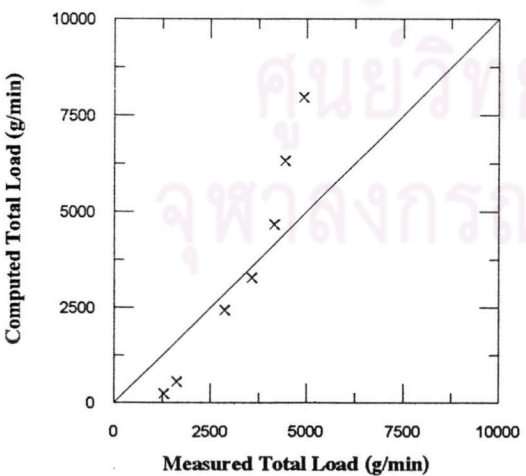
ง) สมการของ Englund และ Hansen



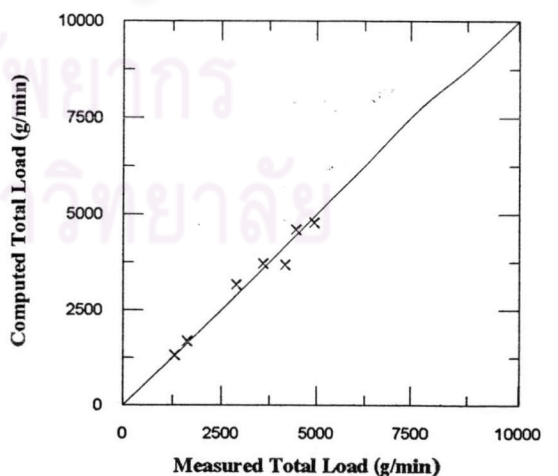
ข) สมการของ Ackers และ White



จ) สมการของ Molinas และ Wu

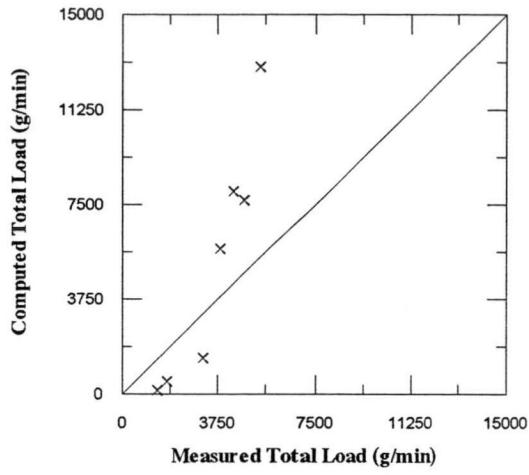


ค) สมการของ Yang

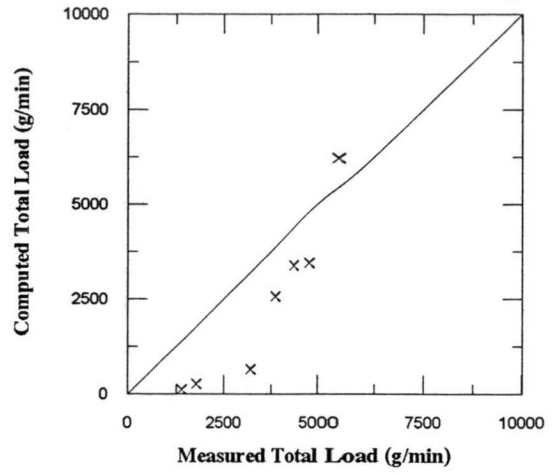


ฉ) สมการที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้

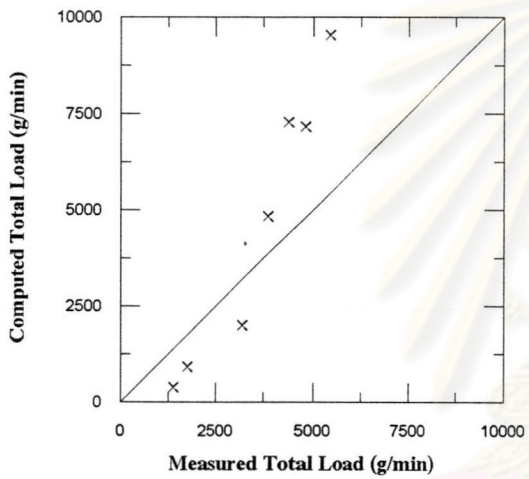
รูป 4-4 การเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 2  $D_{50}=1.17-1.29$  มม.,  $\sigma_g=1.98-2.11$



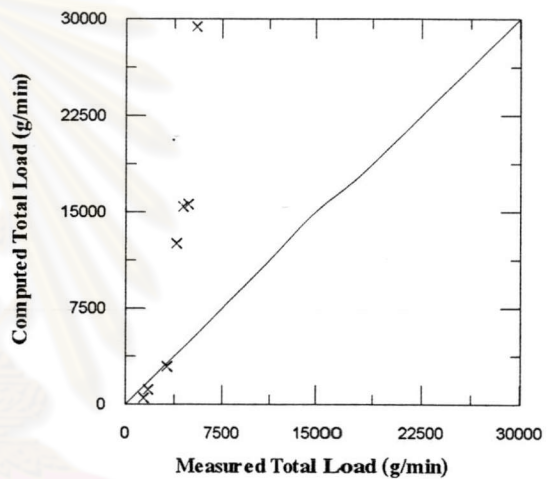
ก) สมการของ Shinohara และ Tsubaki



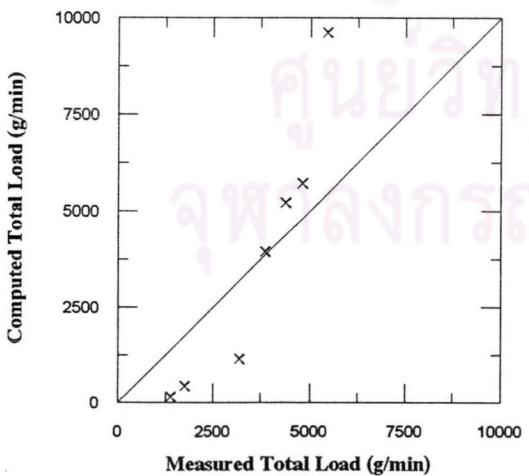
ง) สมการของ Englund และ Hansen



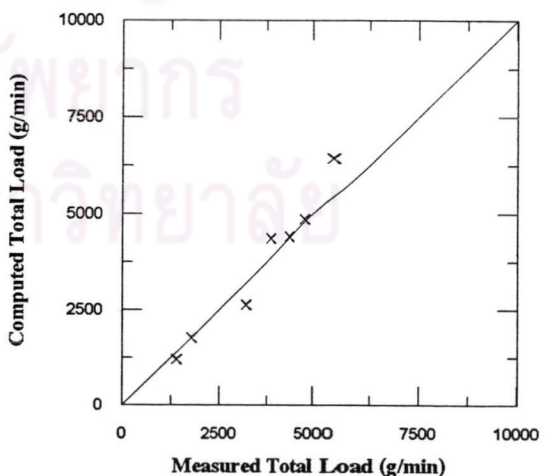
ข) สมการของ Ackers และ White



จ) สมการของ Molinas และ Wu



ค) สมการของ Yang



ฉ) สมการที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้

รูป 4-5 การเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 3  $D_{50}=1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g=3.77-3.89$

ตาราง 4-4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง  
กับที่คำนวณได้จากสมการต่าง ๆ

Case NO.	Bed Material		Standard deviation, $S_d$ (g/min)					This study
	$D_{50}$ (mm.)	$\sigma_g$	Shinohara & Tsubaki	Ackers & White	Yang	Engelund & Hansen	Molinas & Wu	
1	1.17-1.22	1.31-1.32	2403	1394	1874	1285	1874	342
2	1.17-1.29	1.98-2.11	2715	945	1613	1248	1261	253
3	1.19-1.29	3.77-3.89	3813	2405	2100	1606	12152	515

หมายเหตุ

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (S_{TE} - S_{TC})^2}{N - 1}}$$

เมื่อ  $S_{TE}$  = อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง

$S_{TC}$  = อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ

$N$  = จำนวนข้อมูล

ตาราง 4-5 สมการและขอบเขตของขนาดวัสดุท้องน้ำของสมการที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้

ผู้ศึกษา	สมการ *	ขอบเขต $D_{50}$ ที่ใช้ในสมการ (มม.) **		การพิจารณา ผลของการกระจายขนาด
		ต่ำสุด	สูงสุด	
1) Shinohara & Tsubaki	2.9	0.40	30.00	ไม่มีการพิจารณา
2) Ackers & White	2.10 - 2.12	0.04	4.00	มีการพิจารณา ***
3) Yang	2.17	0.15	1.71	ไม่มีการพิจารณา
4) Engelund & Hansen	2.18 - 2.19	0.19	1.00	ไม่มีการพิจารณา
5) Molinas & Wu	2.20 - 2.21	0.10	0.90	มีการพิจารณา ****
6) การศึกษาค้างนี้	4.4	1.17	1.29	มีการพิจารณา *****

หมายเหตุ

\* สมการที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 4

\*\* หรือช่วง  $D_{50}$  ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมการ

\*\*\* มีการพิจารณา โดยการแนะนำให้ใช้  $D_{35}$  แทน  $D_{50}$

\*\*\*\* มีการพิจารณา โดยเสนอค่าปรับแก้ที่เป็นฟังก์ชันของ  $\sigma_g$  ซึ่งขอบเขตของ  $\sigma_g$  ที่ใช้ในสมการอยู่ในช่วง 1.25-2.97

\*\*\*\*\* มีการพิจารณา โดยทำการปรับแก้ผลของการกระจายขนาดในสมการโดยตรง ซึ่งขอบเขตของ  $\sigma_g$  ที่ใช้ในสมการอยู่ในช่วง 1.31-3.89

## 4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ

สมการสำหรับคำนวณอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดและใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ สมการของ Shinohara และ Tsubaki, สมการของ Ackers และ White, สมการของ Yang, สมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Molinas และ Wu ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลาย และสะดวกในการคำนวณหาอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด โดยสมการเหล่านี้มีขอบเขตของขนาดวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในสมการ และมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ดังแสดงในตาราง 4-5 พบว่า ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลองมีขนาด  $D_{50}$  อยู่ในช่วงขอบเขตของขนาด  $D_{50}$  ของสมการที่นำมาเปรียบเทียบเป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นสมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Molinas และ Wu แต่ถึงอย่างไรก็ตามสมการทั้งสอง ก็มีขอบเขตของขนาด  $D_{50}$  ใกล้เคียงกับทฤษฎีที่ใช้ในการทดลองมาก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาขอบเขตของค่าการกระจายขนาดของทราย ( $\sigma_g$ ) ของสมการของ Molinas และ Wu เปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ทรายชนิดที่ 1 ( $\sigma_g = 1.31-1.32$ ) และทรายชนิดที่ 2 ( $\sigma_g = 1.98-2.11$ ) มีช่วงของค่าการกระจายขนาดของทราย ( $\sigma_g$ ) อยู่ในขอบเขตสมการของ Molinas และ Wu ( $\sigma_g = 1.25-2.97$ ) ส่วนทรายชนิดที่ 3 ซึ่งมีการกระจายขนาดของทราย ( $\sigma_g$ ) อยู่ในช่วง 3.77-3.89 นั้น พบว่า ค่าการกระจายขนาดของทราย ( $\sigma_g$ ) ของทรายชนิดที่ 3 มีค่าอยู่นอกขอบเขตสมการของ Molinas และ Wu แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ก็จะนำสมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Molinas และ Wu มาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกับค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด ที่ได้จากการทดลอง เหมือนกับอีก 3 สมการข้างต้น เนื่องจากทั้งสองสมการ เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการคำนวณอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด

อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ และจากการทดลอง ได้แสดงไว้ในตาราง 4-3, รูป 4-3, รูป 4-4 และรูป 4-5 ตัวอย่างการคำนวณดูภาคผนวก ง. โดยรูป 4-3 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 1  $D_{50} = 1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g = 1.31-1.32$  ส่วนรูป 4-4 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 2  $D_{50} = 1.17-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 1.98-2.11$  และรูป 4-5 เป็นการเปรียบเทียบอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 3  $D_{50} = 1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 3.77-3.89$  ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $S_g$ ) ของ



อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณด้วยสมการต่าง ๆ ดังตาราง 4-4 ส่วนตาราง 4-6 เป็นตารางแสดงค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลอง ( $\phi$ ) และที่ได้จากสมการต่าง ๆ ( $\phi_c$ ) โดยรูป 4-6, รูป 4-7, รูป 4-8 และรูป 4-9 เป็นการเปรียบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 1, ชนิดที่ 2, ชนิดที่ 3 และทั้ง 3 ชนิดตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทรายชนิดที่ 1  $D_{50} = 1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g = 1.31-1.32$  ในตาราง 4-4 ซึ่งเป็นกรณีที่ทรายมีขนาดสม่ำเสมอ (Uniform) พบว่า สมการของ Engelund และ Hansen ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณารูป 4-3 พบว่า รูป 4-3 ง. ซึ่งเป็นรูปที่เปรียบเทียบระหว่างค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Engelund และ Hansen มีคู่อันดับที่เข้าใกล้เส้น  $45^\circ$  มากที่สุด โดยเส้น  $45^\circ$  นี้เป็นเส้นที่แสดงถึงค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากัน ดังนั้น จากรูป 4-3 ก็พบว่า สมการของ Engelund และ Hansen ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเหมือนกัน นอกจากนั้น เมื่อพิจารณารูป 4-3 ข. และรูป 4-3 จ. ก็พบว่า ทั้งสมการของ Ackers และ White และสมการของ Molinas และ Wu ก็ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเช่นกัน และเมื่อพิจารณารูป 4-6 ซึ่งแสดงค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดในรูปของพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอน ก็พบว่า สมการของ Engelund และ Hansen ให้เส้นที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด โดยมีสมการของ Ackers และ White และสมการของ Molinas และ Wu ให้เส้นที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากทรายชนิดที่ 1 เป็นทรายที่มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอมาก (Uniform) ดังนั้นค่า  $D_{35}$ ,  $D_{50}$  และ  $D_u$  ที่ใช้ในสมการของ Ackers และ White, สมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Molinas และ Wu ตามลำดับนั้น มีค่าใกล้เคียงกันมาก ประกอบกับตัวแปรอื่น ๆ ในการคำนวณมีค่าเท่ากัน จึงทำให้เส้นที่คำนวณได้จากทั้งสามสมการ มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเหมือนกัน

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทรายชนิดที่ 2  $D_{50} = 1.17-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 1.98-2.11$  ในตาราง 4-4 และรูป 4-4 ข. ในรูป 4-4 ซึ่งเป็นกรณีที่ทรายมีการกระจายขนาดทั่วไป พบว่า สมการของ Ackers และ White ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด ดังตาราง 4-4 และมีคู่อันดับกระจายใกล้เส้น  $45^\circ$  มากที่สุด ดังรูป 4-4 ข. นอกจากนั้นเมื่อพิจารณารูป 4-4 ง. และรูป 4-4 จ. ก็พบว่า ทั้งสองสมการ (สมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Molinas และ Wu) ให้ค่าที่คำนวณ

ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเช่นกัน และเมื่อพิจารณารูป 4-7 ก็พบว่า สมการของ Ackers และ White ให้เส้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก สมการของ Ackers และ White มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ โดยการแนะนำให้ใช้ขนาด  $D_{35}$  แทนขนาด  $D_{50}$  ส่วนสมการของ Molinas และ Wu ซึ่งเป็นสมการที่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำเหมือนกัน แต่กลับมีเส้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองน้อยกว่าสมการของ Ackers และ White นั้น เนื่องจาก วิธีการวิเคราะห์และปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำของทั้งสองสมการไม่เหมือนกัน ดังอธิบายในตาราง 4-5 จึงทำให้เส้นที่คำนวณได้จากสมการของ Molinas และ Wu ใกล้เคียงกับผลการทดลองน้อยกว่าสมการของ Ackers และ White แต่ถึงอย่างไรก็ตาม สมการของ Molinas และ Wu ก็ให้เส้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเหมือนกัน และเป็นที่น่าสังเกตว่าสมการของ Engelund และ Hansen และ สมการของ Molinas และ Wu ที่ได้จากการปรับปรุงสมการของ Engelund และ Hansen โดยการเสนอให้ใช้ค่าปรับแก้  $K_g$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (geometric standard deviation,  $\sigma_g$ ) และลักษณะของการไหล (flow condition) นั้น ให้เส้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ค่าปรับแก้  $K_g$  ที่คำนวณได้ของทรายชนิดที่ 2 ที่ใช้ปรับแก้ค่า  $D_{50}$  ในสมการของ Molinas และ Wu นั้น มีค่าประมาณ 1.0 หรือ  $(u/\omega_{50})^{0.1}(\sigma_g-1)^{2.2}$  มีค่าประมาณ 1.0 นั้นเอง จึงทำให้ค่า  $D_g$  ที่ใช้ในสมการของ Molinas และ Wu นั้น มีค่าใกล้เคียงกับ  $D_{50}$  ที่ใช้ในสมการของ Engelund และ Hansen มาก ประกอบกับตัวรูปสมการของ Molinas และ Wu ก็มีรูปแบบเดียวกับสมการของ Engelund และ Hansen จึงทำให้ค่าที่คำนวณได้จากทั้งสองสมการมีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนทรายชนิดที่ 3  $D_{50} = 1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 3.77-3.89$  ซึ่งเป็นกรณีที่ทรายมีการกระจายขนาดสูง (high gradation) เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในตาราง 4-4 และรูป 4-5 พบว่า สมการของ Engelund และ Hansen ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดเมื่อเทียบกับสมการอื่น ๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ในตาราง 4-4 และค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Engelund และ Hansen ในตาราง 4-3 แล้ว ก็พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้มีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งหมายความว่า สมการของ Engelund และ Hansen ที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดสำหรับกรณีทรายชนิดที่ 3 นั้นก็ยังให้ค่าที่คำนวณได้แตกต่างกับผลการทดลองมาก ซึ่งอาจพิจารณาได้ดังค่าในตาราง 4-3 เช่นกัน และเมื่อพิจารณารูป 4-8 ก็พบว่า สมการทั้ง 5 สมการให้เส้นที่คำนวณได้แตกต่างกับผลการทดลองมากเช่นกัน โดยมีสมการของ Molinas และ Wu และสมการของ Ackers และ White ให้เส้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ทั้งนี้

เนื่องจาก ทั้งสองสมการมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ในขณะที่อีก 3 สมการที่เหลือไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ

สำหรับรูป 4-9 ซึ่งเปรียบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ของทรายทั้ง 3 ชนิด พบว่า เมื่อพิจารณาเฉพาะสมการที่ไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ หรือก็คือการพิจารณาเฉพาะผลของรูปแบบสมการเท่านั้น เนื่องจากตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการเหล่านี้มีค่าเท่ากัน โดยสมการที่จะนำมาพิจารณานั้น มีทั้งหมด 4 สมการด้วยกัน ได้แก่ สมการของ Shinohara และ Tsubaki, สมการของ Yang, สมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Ackers และ White (สำหรับสมการของ Ackers และ White จะพิจารณาเฉพาะกรณีทรายชนิดที่ 1 เนื่องจากเป็นกรณีที่มีทรายมีขนาดสม่ำเสมอ ดังนั้นค่า  $D_{35}$  ที่ใช้ในสมการจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า  $D_{50}$  มาก ดังตัวอย่างในภาคผนวก ง.) ซึ่งจากเส้นที่คำนวณได้ในรูป 4-9 ก็พบว่า สมการของ Engelund และ Hansen และสมการของ Ackers และ White ให้เส้นที่คำนวณได้ใกล้เคียงกันมาก และใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการของ Shinohara และ Tsubaki และสมการของ Yang โดยในการพิจารณาจะไม่พิจารณาถึงผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ

และเมื่อพิจารณาเฉพาะสมการของ Ackers และ White และสมการของ Molinas และ Wu ที่ได้มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำในรูป 4-9 ก็พบว่า สมการของ Ackers และ White ให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการของ Molinas และ Wu (เมื่อพิจารณาทรายทั้ง 3 กรณีประกอบกัน) ทั้งนี้เพราะสมการของ Molinas และ Wu ได้ปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ โดยเสนอให้ใช้ขนาด  $D_e$  (ขนาดตะกอนประสิทธิผล) แทนขนาด  $D_{50}$  โดยขนาด  $D_e$  สำหรับท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดสม่ำเสมอ ( $\sigma_g$  น้อยกว่า 1.7) จะมีค่ามากกว่าขนาด  $D_{50}$  ทำให้อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้มีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Engelund และ Hansen และสำหรับท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดสูง ( $\sigma_g$  มากกว่า 2.3) ขนาด  $D_e$  จะมีค่าน้อยกว่าขนาด  $D_{50}$  ทำให้อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้มีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Engelund และ Hansen ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ค่าส่วนใหญ่ที่ได้ มีค่ามากกว่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Engelund และ Hansen ส่วนในสมการของ Ackers และ White นั้น ได้มีการปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ โดยเสนอให้ใช้ขนาด  $D_{35}$  แทนขนาด  $D_{50}$  จึงทำให้ค่าอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้ มีค่าสูงขึ้นตามการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเพิ่มขึ้นตาม

การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มากขึ้น (ขนาด  $D_{35}$  มีค่าลดลงตามการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มากขึ้น และขนาด  $D_{35}$  ที่ลดลง จะทำให้อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้มีค่าสูงขึ้น) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม สมการของ Molinas และ Wu ก็ยังให้ค่าที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากเช่นเดียวกับสมการของ Ackers และ White และเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของทั้งสองสมการ ดังตาราง 4-5 ประกอบกับรูป 4-9 แล้วก็พบว่า สมการของ Molinas และ Wu เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด สำหรับกรณีที่วัสดุท้องน้ำมีการกระจายขนาด มากกว่าสมการของ Ackers และ White เนื่องจาก สมการของ Molinas และ Wu ได้มีการปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ โดยเสนอค่าปรับแก้  $K_g$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำโดยตรง ในขณะที่สมการของ Ackers และ White กลับเสนอให้ใช้ค่า  $D_{35}$  แทนค่า  $D_{50}$  ในการคำนวณอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด ซึ่งไม่ได้เป็นการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำโดยตรง จึงทำให้สมการของ Molinas และ Wu เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมด สำหรับกรณีที่วัสดุท้องน้ำมีการกระจายขนาด มากกว่าสมการของ Ackers และ White (ในบางกรณีทรายสองชนิดที่มีการกระจายขนาดต่างกัน อาจมีค่า  $D_{35}$  ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Ackers และ White ของทรายทั้งสองชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งในกรณีนี้ก็จะถือว่า สมการของ Ackers และ White ไม่ได้มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำนั่นเอง)

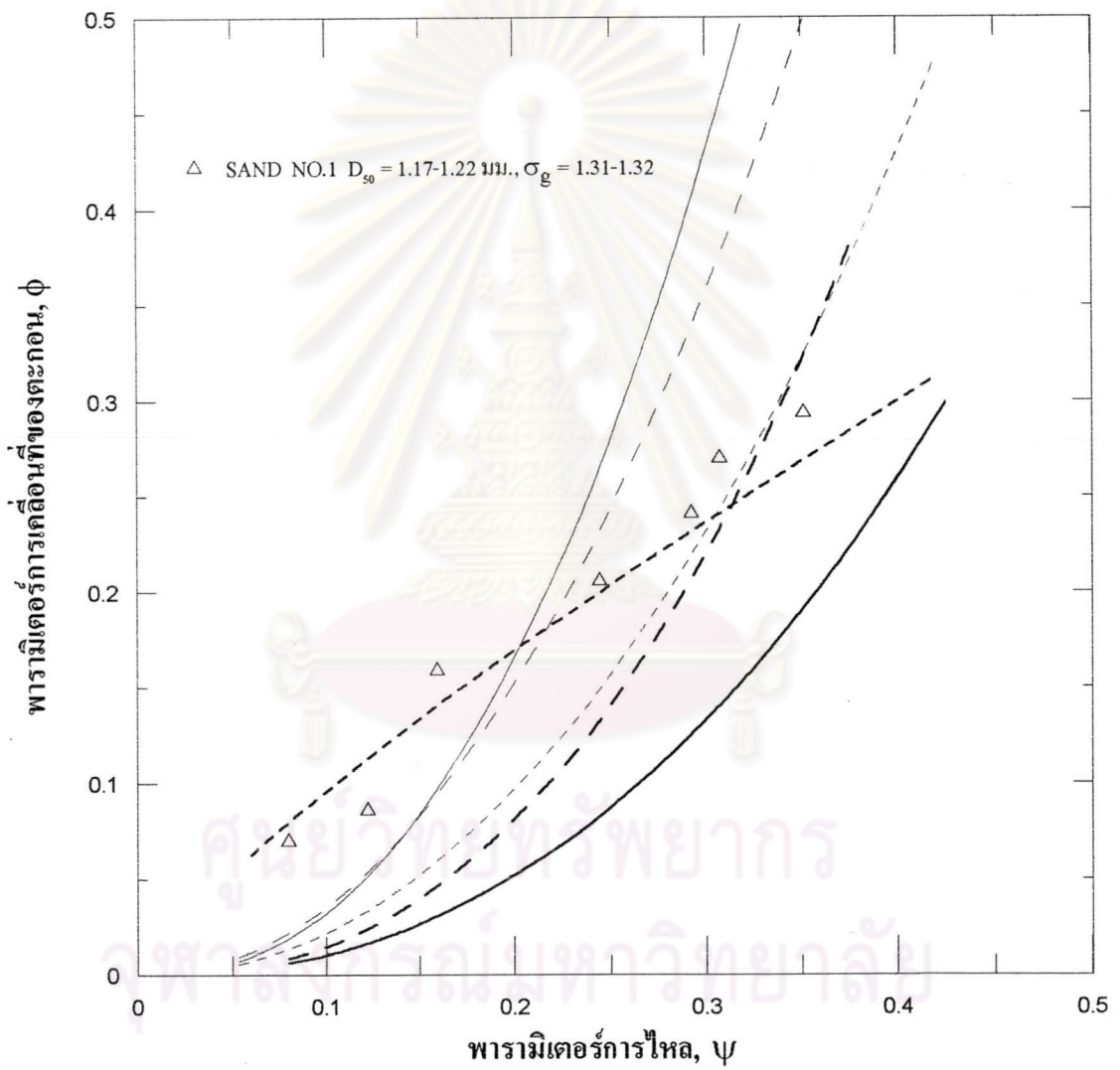
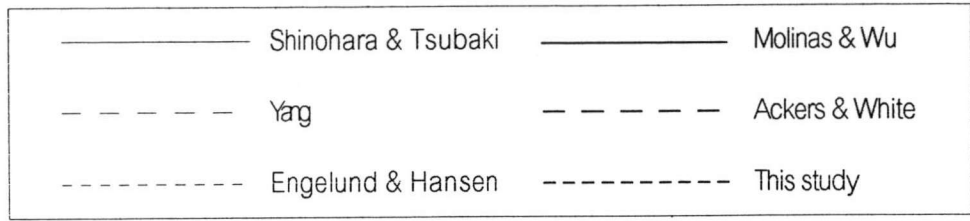
นอกจากนั้นเมื่อพิจารณารูป 4-10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$  (flow parameter,  $\theta = \frac{h_i}{\Delta D}$ ) และ  $f'\phi$  (transport parameter,  $\phi = \frac{s}{\sqrt{\Delta g D^3}}$  และ friction factor,  $f' = \frac{2g}{C^2}$ ) ของข้อมูลผลการทดลอง และข้อมูลของ Molinas และ Wu โดยรูป 4-10 ก. ไม่มีการใช้ค่าปรับแก้  $K_g$  และรูป 4-10 ข. มีการใช้ค่าปรับแก้  $K_g$  พบว่า การใช้ค่าปรับแก้  $K_g$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ (geometric standard deviation,  $\sigma_g$ ) กับลักษณะของการไหล (flow condition) และเป็นการปรับแก้ผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำตามวิธีการของ Molinas และ Wu นั้น สามารถนำมาใช้กับข้อมูลผลการทดลองที่มีพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) ในช่วง 0.05 ถึง 0.40 และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) ในช่วง 1.32-3.90 ได้ดีเช่นเดียวกับ ข้อมูลพารามิเตอร์การไหล ( $\psi$ ) ในช่วง 0.50 ถึง 5.00 และการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ ) ในช่วง 1.25-3.00 ซึ่งเป็นข้อมูลที่นำเสนอโดย Molinas และ Wu ดังแสดงในรูป 4-10 ก. และรูป 4-10 ข. โดยอัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการของ Molinas และ Wu มีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 128 % ของค่าที่วัดได้จากการทดลอง

ตาราง 4-6 ค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลอง( $\phi$ ) และที่ได้จากสมการต่างๆ( $\phi_c$ )

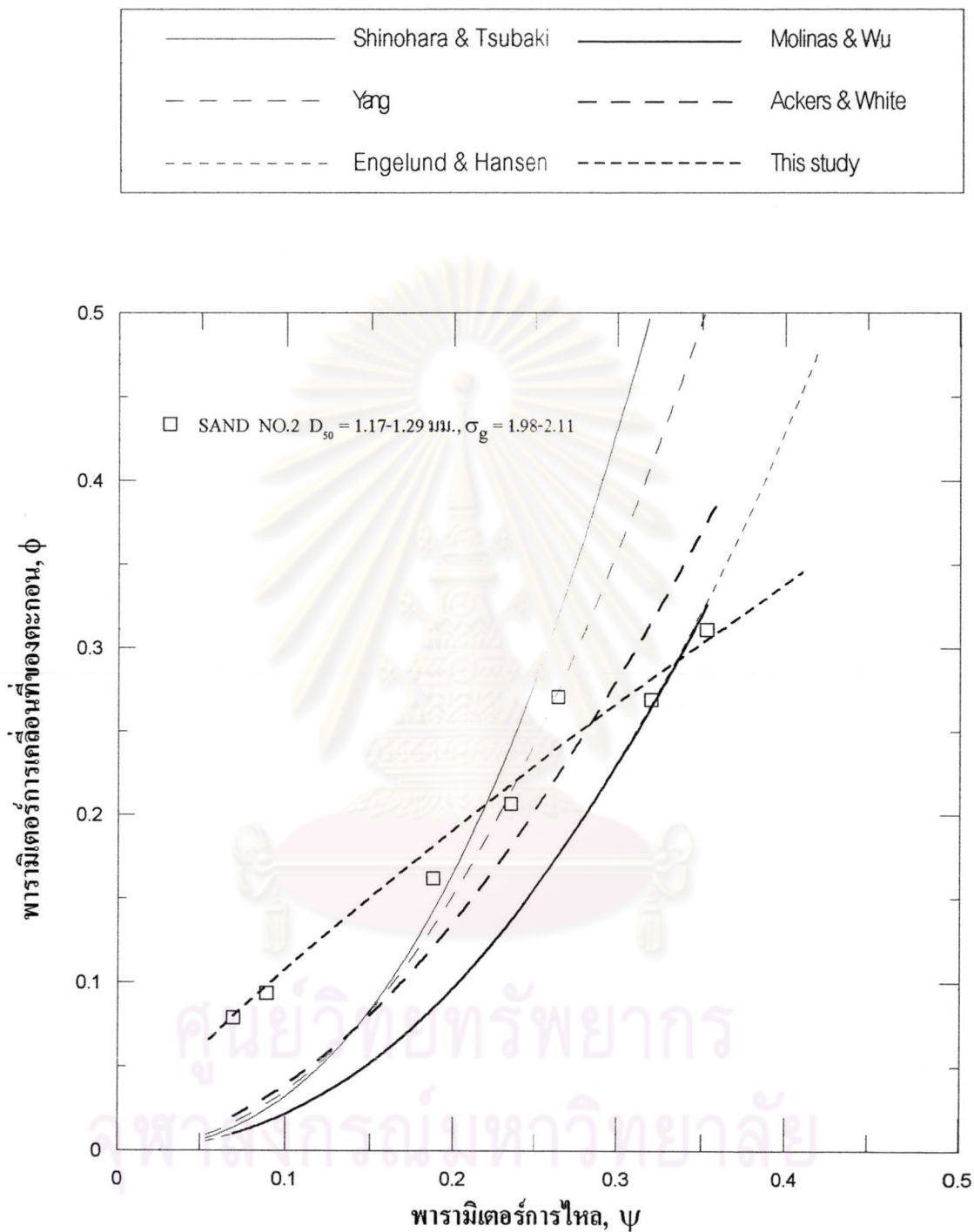
Run NO.	$\psi$	$\phi$	Calculated transport parameter, $\phi_c$					This study
			Shinohara & Tsubaki	Ackers & White	Yang	Engelund & Hansen	Molinas & Wu	
A1	0.080	0.072	0.009	0.006	0.017	0.011	0.006	0.080
A2	0.122	0.087	0.040	0.034	0.049	0.030	0.018	0.113
A3	0.160	0.160	0.080	0.067	0.090	0.055	0.032	0.141
A4	0.244	0.207	0.179	0.107	0.190	0.122	0.072	0.200
A5	0.293	0.242	0.273	0.152	0.283	0.184	0.109	0.232
A6	0.307	0.271	0.379	0.226	0.353	0.244	0.144	0.241
A7	0.351	0.295	0.638	0.391	0.557	0.390	0.230	0.269
B1	0.070	0.079	0.011	0.015	0.015	0.010	0.010	0.080
B2	0.089	0.094	0.030	0.045	0.032	0.019	0.018	0.098
B3	0.188	0.162	0.146	0.124	0.137	0.078	0.074	0.179
B4	0.235	0.207	0.201	0.137	0.190	0.115	0.110	0.215
B5	0.264	0.271	0.395	0.288	0.304	0.202	0.212	0.240
B6	0.320	0.269	0.460	0.283	0.383	0.258	0.259	0.279
B7	0.353	0.311	0.647	0.389	0.504	0.356	0.358	0.302
C1	0.053	0.087	0.009	0.024	0.010	0.007	0.031	0.076
C2	0.080	0.105	0.029	0.055	0.026	0.015	0.069	0.106
C3	0.125	0.184	0.081	0.115	0.067	0.038	0.168	0.152
C4	0.257	0.243	0.361	0.304	0.250	0.161	0.788	0.275
C5	0.265	0.279	0.509	0.463	0.332	0.215	0.978	0.281
C6	0.264	0.275	0.439	0.411	0.328	0.198	0.894	0.279
C7	0.362	0.308	0.731	0.538	0.544	0.352	1.660	0.363

หมายเหตุ 
$$\phi_c = \frac{S_{TC}}{86400 \rho_s B \sqrt{\Delta g D_{50}^3}}$$

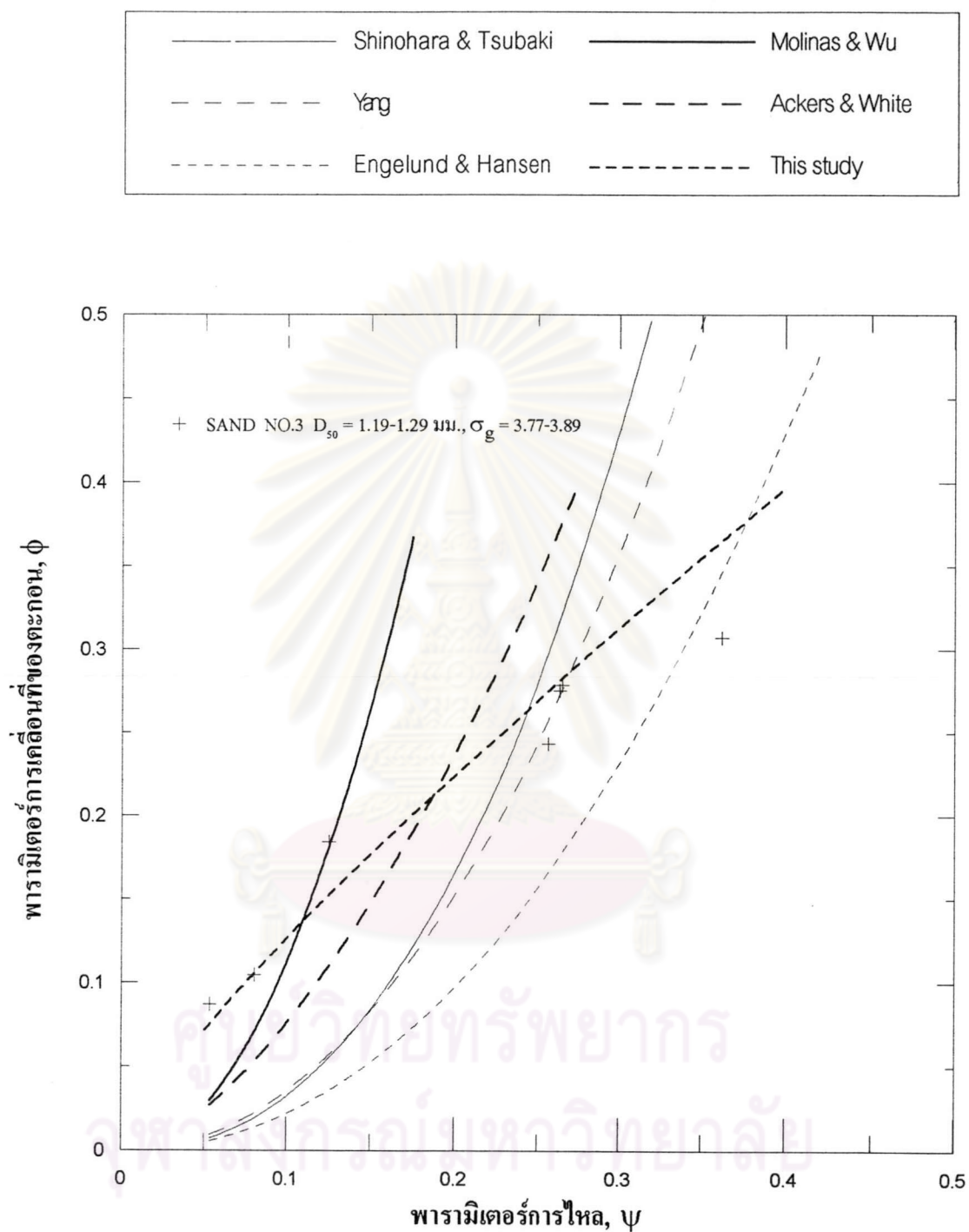
เมื่อ  $S_{TC}$  = อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดได้จากการคำนวณด้วยสมการต่างๆ



รูป 4-6 เปรียบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 1

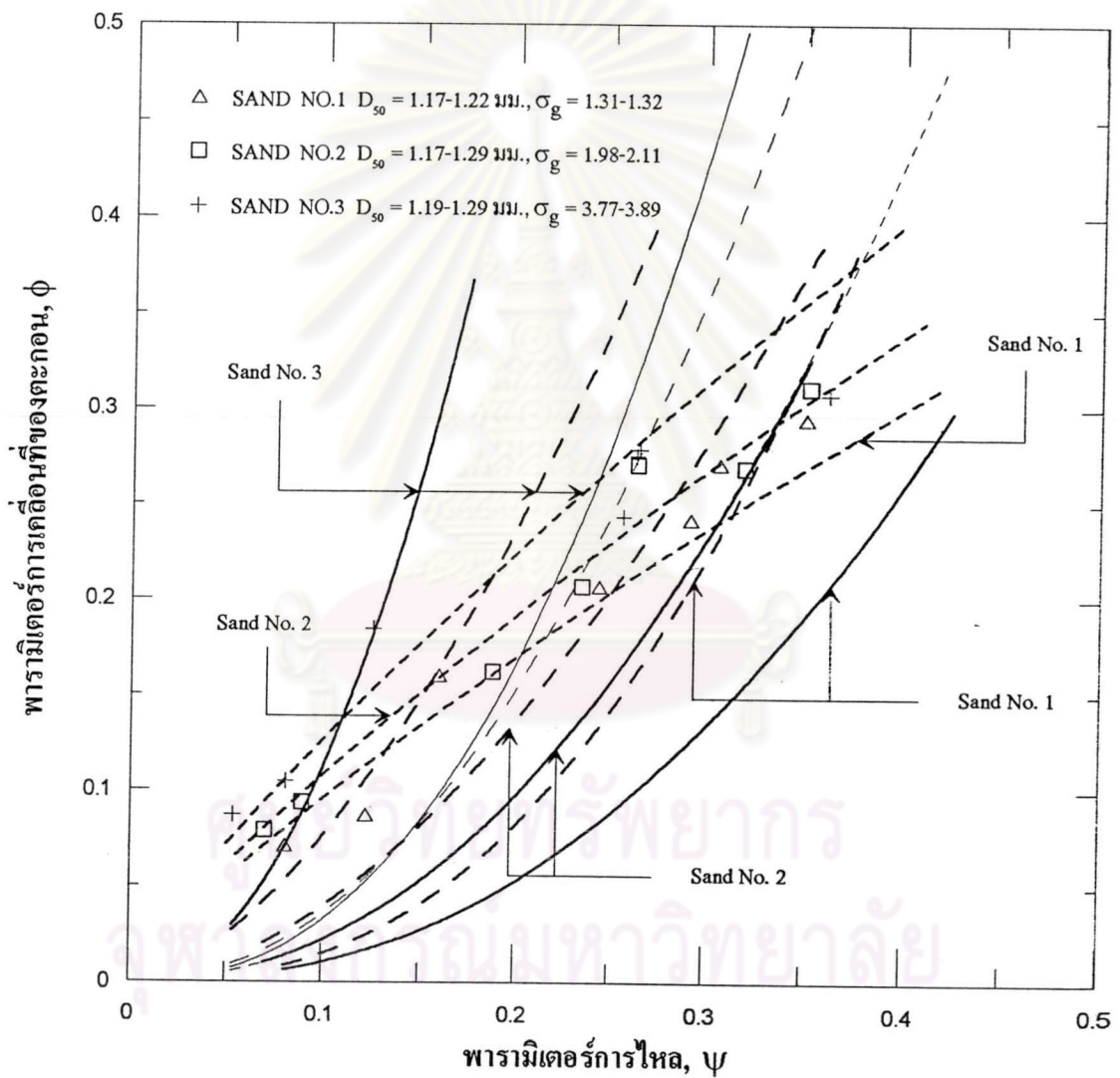
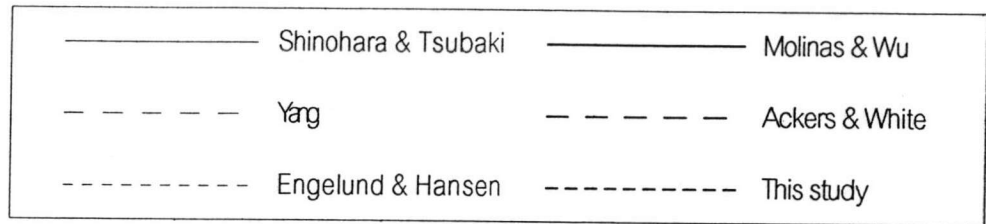


รูป 4-7 เปรียบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 2

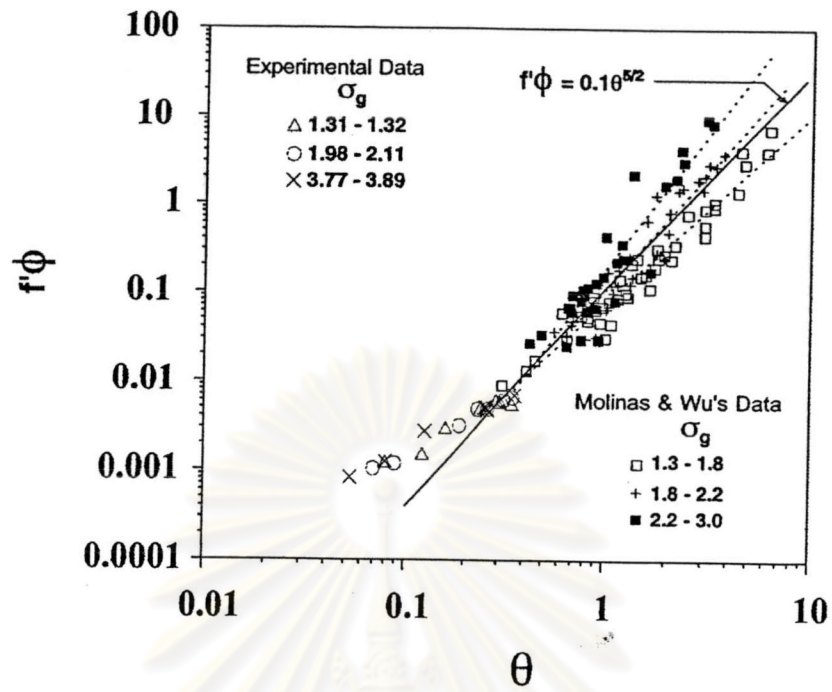


รูป 4-8 เปรียบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ของทรายชนิดที่ 3

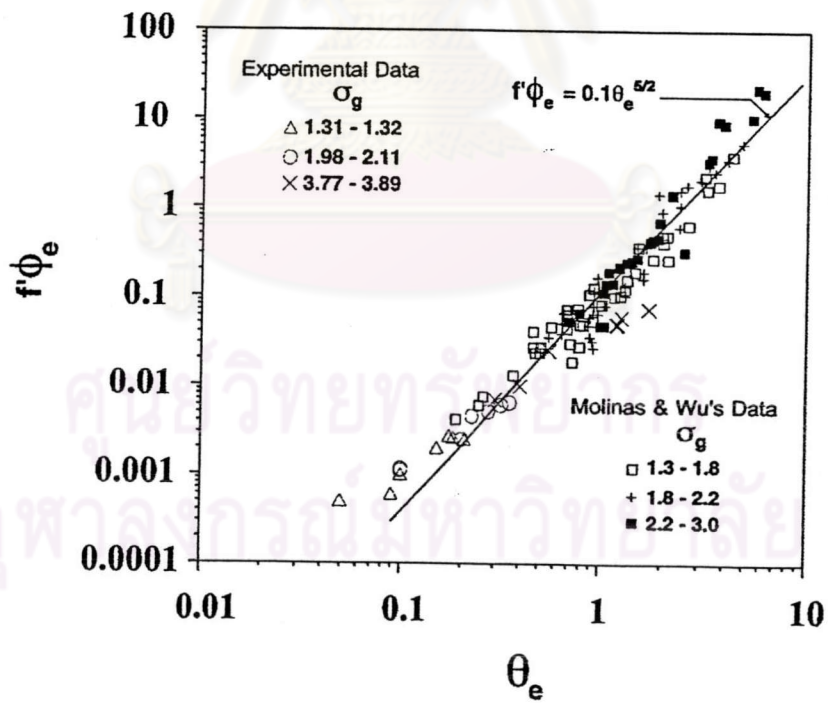




รูป 4-9 เปรียบเทียบพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของตะกอนที่ได้จากการทดลองกับสมการต่าง ๆ ของทรายทั้ง 3 ชนิด



ก) ไม่มีการใช้ค่าปรับแก้  $K_g$



ข) มีการใช้ค่าปรับแก้  $K_g$

รูป 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$  และ  $f'\phi$  ของข้อมูลผลการทดลอง และข้อมูลของ Molinas และ Wu

#### 4.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อปริมาณตะกอนทั้งหมด

ในการศึกษาครั้งนี้ ปริมาณตะกอนทั้งหมดและปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการทดลองจะแสดงในรูปของปริมาณต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยปริมาณตะกอนทั้งหมดและปริมาณตะกอนแขวนลอยที่ได้จากการทดลอง รวมทั้งเปอร์เซ็นต์ของปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อปริมาณตะกอนทั้งหมดของทรายทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราการไหลต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตาราง 4-7 โดยอัตราการไหลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ของทรายทั้ง 3 ชนิด อยู่ในช่วง 25-55 ลิตรต่อวินาที และจากตาราง 4-7 ก็พบว่า ที่อัตราการไหลในช่วง 25-55 ลิตรต่อวินาที ทรายชนิดที่ 1  $D_{50} = 1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g = 1.31-1.32$  มีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 13-24% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด หรือโดยเฉลี่ยคิดเป็น 18.9% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด ทรายชนิดที่ 2  $D_{50} = 1.17-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 1.98-2.11$  มีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 15-28% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด หรือโดยเฉลี่ยคิดเป็น 21.4% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด และทรายชนิดที่ 3  $D_{50} = 1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 3.77-3.89$  มีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่ในช่วง 21-29% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด หรือโดยเฉลี่ยคิดเป็น 26.4% ของปริมาณตะกอนทั้งหมด

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณตะกอนทั้งหมดของทรายทั้ง 3 ชนิด ที่มีขนาด  $D_{50}$  ใกล้เคียงกัน แต่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำต่างกัน ดังแสดงในรูป 4-11 โดยรูป 4-11 ก. เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ส่วนรูป 4-11 ข. เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำแยกเป็นกรณี และจากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณตะกอนทั้งหมดของทรายทั้ง 3 ชนิด เมื่อมีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำแยกเป็นกรณี และเมื่อไม่มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

ทรายชนิดที่ 1  $D_{50} = 1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g = 1.31-1.32$

$$S_s = 0.2445 S_T - 134.52 \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0.949$$

$$R = 0.974$$

ทรายชนิดที่ 2  $D_{50} = 1.17-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 1.98-2.11$

$$S_s = 0.2611 S_T - 124.91 \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0.917$$

$$R = 0.958$$

ทรายชนิดที่ 3  $D_{50} = 1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 3.77-3.89$

$$S_s = 0.2921 S_T - 80.16 \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0.976$$

$$R = 0.988$$

ทรายทั้ง 3 ชนิด (เมื่อไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องถิ่น)

$$S_s = 0.2783 S_T - 149.66 \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0.903$$

$$R = 0.950$$

สำหรับผลการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ที่ได้เมื่อพิจารณาสมการ 4.5, สมการ 4.6 และสมการ 4.7 พบว่า สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณตะกอนทั้งหมดที่ได้ ของทรายทั้ง 3 ชนิด มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.974, 0.958 และ 0.988 สำหรับทรายชนิดที่ 1, ทรายชนิดที่ 2 และทรายชนิดที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ที่ได้เหล่านี้ จะเห็นว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียง 1.0 มาก ซึ่งแสดงว่า สมการที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ของทรายทั้ง 3 ชนิดแยกเป็นกรณี มีความสัมพันธ์กันสูง

และเมื่อพิจารณาสมการ 4.8 ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) โดยไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องถิ่น พบว่า สมการที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.950 ซึ่งจะเห็นว่า มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สมการ โดยพิจารณาผลของการกระจาย

ขนาดของวัสดุท้องน้ำ (แยกเป็นกรณีต่าง ๆ) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ที่ได้ ก็ยังมีค่าค่อนข้างสูง และใกล้เคียงกับ 1.0 มาก ดังนั้น จึงสามารถนำเอาสมการ 4.8 ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น มาใช้ในการประมาณปริมาณตะกอนแขวนลอยจากปริมาณตะกอนทั้งหมดของทรายที่มีขนาด  $D_{50}$  อยู่ในช่วง 1.17-1.29 มม. และมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 25-55 ลิตรต่อวินาทีได้

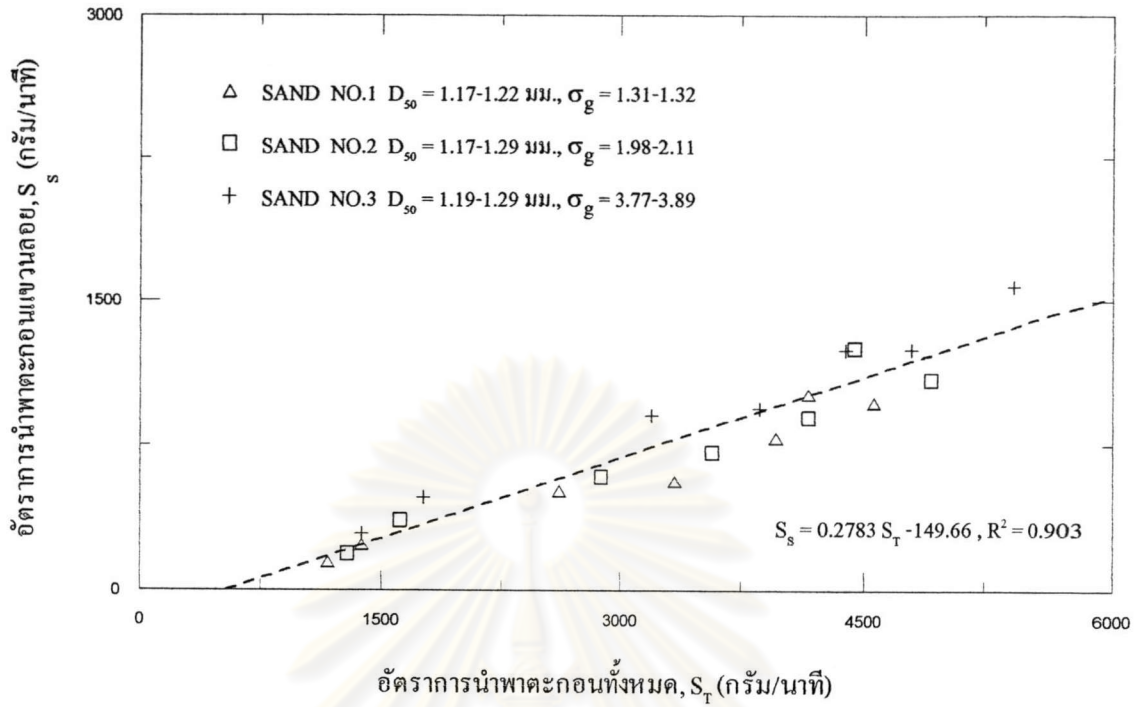
และเมื่อพิจารณาถึงผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำต่อปริมาณตะกอนแขวนลอย พบว่า ที่อัตราการไหลที่เท่ากัน ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง จะมีปริมาณตะกอนแขวนลอยมากกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังผลการทดลองในตาราง 4-7 และรูป 4-11 ข. ทั้งนี้เนื่องมาจาก ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง จะมีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ และส่วนประกอบของทรายละเอียดที่มากกว่าเหล่านี้เอง ที่ทำให้ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง มีปริมาณตะกอนแขวนลอยมากกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ หรืออาจกล่าวได้ว่า ทรายละเอียดมีโอกาสแขวนลอยได้มากกว่าทรายหยาบ จึงทำให้ท้องน้ำที่มีส่วนประกอบของทรายละเอียดมากกว่า (การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง) มีปริมาณตะกอนแขวนลอยมากกว่าท้องน้ำที่มีส่วนประกอบของทรายละเอียดน้อยกว่า (การกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ)

และเป็นที่น่าสนใจว่า ในการศึกษาครั้งนี้ อัตราส่วนปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อปริมาณตะกอนทั้งหมด (หรือเปอร์เซ็นต์ปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อปริมาณตะกอนทั้งหมด) มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับลำน้ำจริง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ขนาด  $D_{50}$  ที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการทดลองนำมาจากลำน้ำจริง จึงส่งผลให้ตะกอนที่แขวนลอยส่วนใหญ่ มีลักษณะที่เป็นการฟุ้ง หรือกระดอนขึ้นมาจากท้องน้ำเป็นหลัก ไม่ใช่เป็นการแขวนลอยตั้งแต่เริ่มต้นหรือตลอดเวลาเหมือนในลำน้ำจริง นอกจากนั้น ในส่วนของลำน้ำจริง การกระจายขนาดของตะกอนอยู่ในช่วงกว้าง โดยตะกอนขนาดเล็กมีความหลากหลายเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ๆ ดังนั้น จึงทำให้สัดส่วนของตะกอนแขวนลอยมีค่ามากขึ้น สำหรับลำน้ำจริงในบางกรณี รวมทั้งความลึกของการไหลในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าอยู่ในช่วง  $10 \pm 1$  ซม. จึงส่งผลทำให้ตะกอนแขวนลอยที่วัดได้ มีลักษณะเหมือนตะกอนที่ฟุ้งมากกว่าตะกอนแขวนลอยตามค่านิยาม ซึ่งอยู่ในลักษณะของสมดุขของแรง 2 ค่า อันได้แก่ แรงโน้มถ่วงที่เกิดจากน้ำหนักของตะกอน กับแรงดันขึ้นที่เกิดจากแรงลอยตัวรวมกับแรงที่เกิดจากความปั่นป่วนของการไหล

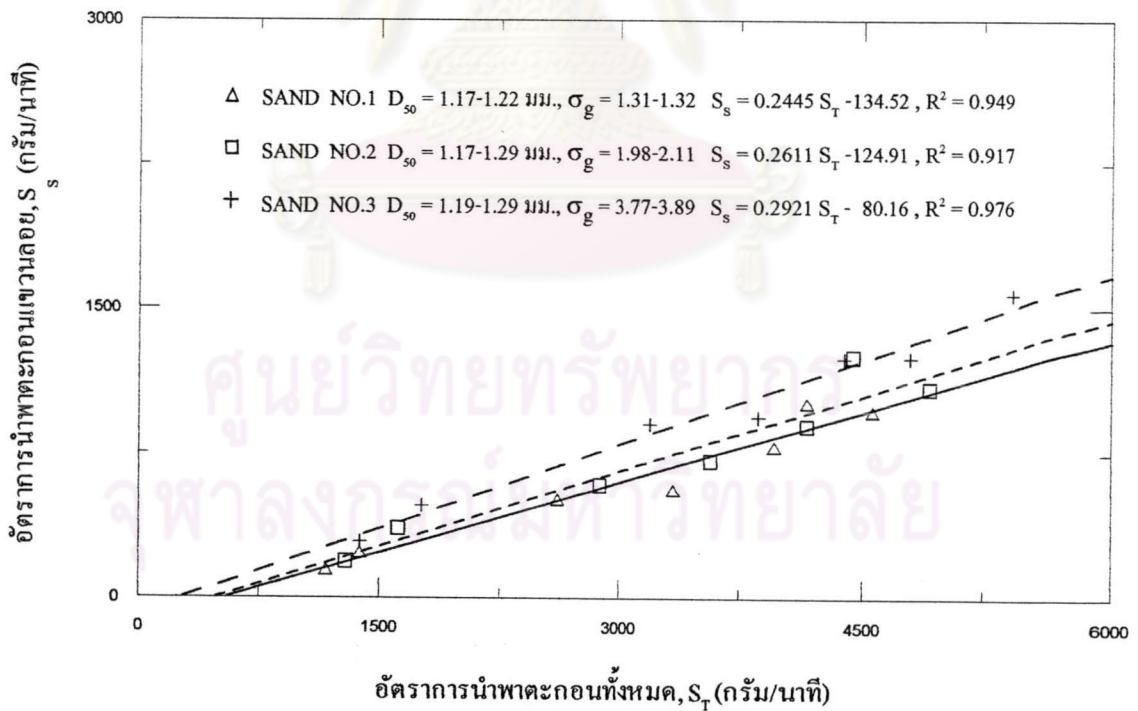
ตาราง 4-7 อัตราการนำพาตะกอนทั้งหมดและอัตราการนำพาตะกอนแขวนลอย

Run NO.	discharge (Q) (l/s)	W.S. (i) ( $10^{-3}$ )	Depth (h) (cm.)	Bed Material		Total Load ( $S_T$ ) (g/min)	Sus. Load ( $S_S$ ) (g/min)	$S_S / S_T$ (%)
				$D_{50}$ (mm.)	$\sigma_g$			
A1	24.0	1.725	9.39	1.22	1.32	1170	147	12.57
A2	31.2	2.408	10.01	1.20	1.32	1380	237	17.20
A3	36.4	3.072	10.43	1.22	1.31	2610	516	19.77
A4	40.8	4.508	10.80	1.21	1.31	3342	564	16.88
A5	45.3	5.294	11.12	1.22	1.31	3960	789	19.92
A6	49.4	5.296	11.17	1.17	1.32	4158	1014	24.39
A7	55.2	6.254	10.88	1.18	1.32	4560	970	21.27
B1	24.8	1.544	9.06	1.22	2.11	1290	192	14.88
B2	29.9	1.994	9.29	1.26	2.03	1614	364	22.53
B3	35.4	4.283	9.31	1.29	1.98	2874	588	20.46
B4	39.7	4.763	10.30	1.27	1.99	3576	714	19.97
B5	45.3	5.075	10.05	1.17	2.08	4158	894	21.50
B6	49.4	5.920	10.94	1.23	2.03	4440	1254	28.24
B7	53.7	6.283	11.05	1.19	2.03	4920	1092	22.20
C1	25.1	1.167	9.01	1.19	3.86	1380	294	21.30
C2	29.7	1.729	9.50	1.24	3.84	1758	480	27.30
C3	34.8	2.675	9.81	1.27	3.80	3198	906	28.33
C4	39.7	5.300	9.55	1.20	3.89	3864	942	24.38
C5	44.8	5.417	9.60	1.19	3.78	4386	1243	28.35
C6	49.8	5.175	10.70	1.27	3.77	4800	1248	26.00
C7	54.6	6.925	11.09	1.29	3.81	5442	1578	29.00

หมายเหตุ  $S_S / S_T$  = เปอร์เซ็นต์ของปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อปริมาณตะกอนทั้งหมด



ก) เมื่อไม่พิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ )



ข) เมื่อพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ( $\sigma_g$ )

รูป 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกอนแขวนลอยกับปริมาณตะกอนทั้งหมดของทราย 3 ชนิด

#### 4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลองกับวิธีต่าง ๆ

หลังจากเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่ต้องการเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้ว ในการศึกษาได้ทำการบันทึกลักษณะของท้องน้ำและรูปร่างท้องน้ำที่เกิดขึ้น โดยทำการเก็บข้อมูลระดับท้องน้ำที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางน้ำทุก ๆ 5 ซม. ตั้งแต่ตำแหน่ง 4.00 ม. ถึง 8.00 ม. ดังรูป 3-2 รายละเอียดผลการทดลองและรูปตัดตามยาวที่กึ่งกลางรางน้ำของทั้ง 21 การทดลองดูภาคผนวก ค. และจากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่เกิดขึ้นได้ดังตาราง 4-8

จากตาราง 4-8 จะเห็นว่ารูปร่างท้องน้ำที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นริ้วคลื่น (ripple) หรือ ลอนคลื่น (dune) ทั้งนี้เพราะว่า ช่วงการไหลที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วงการไหลต่ำกว่าวิกฤต และเมื่อพิจารณารูปตัดตามยาวที่กึ่งกลางรางน้ำของการทดลอง A7, B7 และ C7 ดังรูป 4-12 ซึ่งเป็นการทดลองที่อัตราการไหลประมาณ 55 ลิตรต่อวินาที และมีลักษณะท้องน้ำเป็นลอนคลื่น (dune) เหมือนกัน แต่การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำต่างกัน คือ  $\sigma_0 = 1.32$ ,  $\sigma_0 = 2.03$  และ  $\sigma_0 = 3.81$  สำหรับการทดลอง A7, B7 และ C7 ตามลำดับ พบว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำมากกว่า มีความสูงของรูปร่างคลื่นท้องน้ำที่เล็กกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมากกว่า มีปริมาณของทรายละเอียด และอัตราการทำตะกอนสูงกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อยกว่า ซึ่งทำให้ท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดมากกว่า มีการเติมของตะกอนในส่วนที่เป็นช่องว่าง และการพัดพาของตะกอนในส่วนบนของคลื่นสูงกว่าท้องน้ำที่มีการกระจายขนาดน้อยกว่า จึงทำให้ความสูงของรูปร่างคลื่นท้องน้ำที่ได้เล็กกว่า นอกจากนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า การกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้เปลี่ยนแปลงไป โดยลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้จะมีลักษณะที่เล็กลง (เช่น เปลี่ยนจากลอนคลื่นเป็นริ้วคลื่นผสมลอนคลื่นเป็นต้น) หรือมีความขรุขระน้อยลงดังค่า manning's n ในตาราง 4-8 แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ในบางกรณีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำที่มากขึ้น กลับไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างท้องน้ำจากแบบหนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่ง จะมีก็เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงความสูงของรูปร่างคลื่นท้องน้ำให้เล็กลงเท่านั้น

และเมื่อนำผลการทดลองลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Liu และวิธีของ Simon ดังตาราง 4-8 ประกอบกับรูป 4-13 ซึ่งแสดงข้อมูล และขอบเขตของขนาดวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างท้องน้ำสำหรับวิธีของ Liu และวิธีของ Simon พบว่า ลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่หาได้จาก



วิธีของ Simon ใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลองมากกว่าวิธีของ Liu ทั้งนี้เนื่องมาจาก ขนาดของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์กราฟของวิธีของ Liu ในรูป 4-13 ก. นั้น ขนาดข้อมูลในช่วง 0.60 - 1.50 มม. ซึ่งเป็นขนาดของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ จึงทำให้รูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Liu แตกต่างจากผลการทดลองมากกว่าวิธีของ Simon ในขณะที่วิธีของ Simon นั้น ขนาดของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์กราฟ กลับมีข้อมูลที่ใกล้เคียงกับขนาดของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อยู่ด้วย ( $D_{50} = 0.92$  มม.) ดังแสดงในรูป 4-13 ข. จึงส่งผลให้รูปร่างท้องน้ำที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า และเป็นที่น่าสังเกตว่า ลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Simon ของทรายชนิดที่ 1  $D_{50} = 1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g = 1.31-1.32$  ซึ่งเป็นทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (uniform) มีความใกล้เคียงกับลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลองมากกว่าลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากวิธีของ Simon ของทรายชนิดที่ 3  $D_{50} = 1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 3.77-3.89$  ซึ่งเป็นทรายที่มีการกระจายขนาดสูง (high gradation) ทั้งนี้เป็นเพราะว่า วิธีของ Liu และวิธีของ Simon ไม่ได้มีการพิจารณาผลของการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ จึงทำให้รูปร่างท้องน้ำที่หาได้จากทั้งสองวิธี สำหรับทรายที่มีการกระจายขนาดสูง (ทรายชนิดที่ 3) แตกต่างจากผลการทดลองมากกว่า ทรายที่มีขนาดสม่ำเสมอ (ทรายชนิดที่ 1) หรือที่มีการกระจายขนาดทั่วไป (ทรายชนิดที่ 2)

ตาราง 4-8 ลักษณะรูปร่างท้องน้ำที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ

Run NO.	discharge (Q) (l/s)	Bed Material		Fr	Manning 's		Bed form	
		D <sub>50</sub> (mm.)	σ <sub>g</sub>		n***	Experiment	Liu 's method	Simon 's method
A1	24.0	1.22	1.32	0.44	0.017	ripple&dune *	dune	plane bed **
A2	31.2	1.20	1.32	0.52	0.017	dune	dune	dune
A3	36.4	1.22	1.31	0.57	0.017	dune	standing wave	dune
A4	40.8	1.21	1.31	0.61	0.020	dune	standing wave	dune
A5	45.3	1.22	1.31	0.65	0.020	dune	antidune	dune
A6	49.4	1.17	1.32	0.70	0.019	dune	antidune	dune
A7	55.2	1.18	1.32	0.82	0.017	dune	antidune	dune
B1	24.8	1.22	2.11	0.48	0.015	ripple	dune	plane bed
B2	29.9	1.26	2.03	0.56	0.014	ripple&dune	dune	plane bed
B3	35.4	1.29	1.98	0.66	0.018	ripple&dune	standing wave	dune
B4	39.7	1.27	1.99	0.64	0.019	dune	standing wave	dune
B5	45.3	1.17	2.08	0.76	0.017	dune	standing wave	dune
B6	49.4	1.23	2.03	0.73	0.019	dune	antidune	dune
B7	53.7	1.19	2.03	0.78	0.018	dune	antidune	dune
C1	25.1	1.19	3.86	0.49	0.012	plane bed	ripple	plane bed
C2	29.7	1.24	3.84	0.54	0.014	ripple	dune	plane bed
C3	34.8	1.27	3.80	0.60	0.015	ripple	dune	dune
C4	39.7	1.20	3.89	0.72	0.018	ripple&dune	standing wave	dune
C5	44.8	1.19	3.78	0.80	0.016	ripple&dune	standing wave	dune
C6	49.8	1.27	3.77	0.76	0.017	ripple&dune	antidune	dune
C7	54.6	1.29	3.81	0.79	0.019	dune	antidune	dune

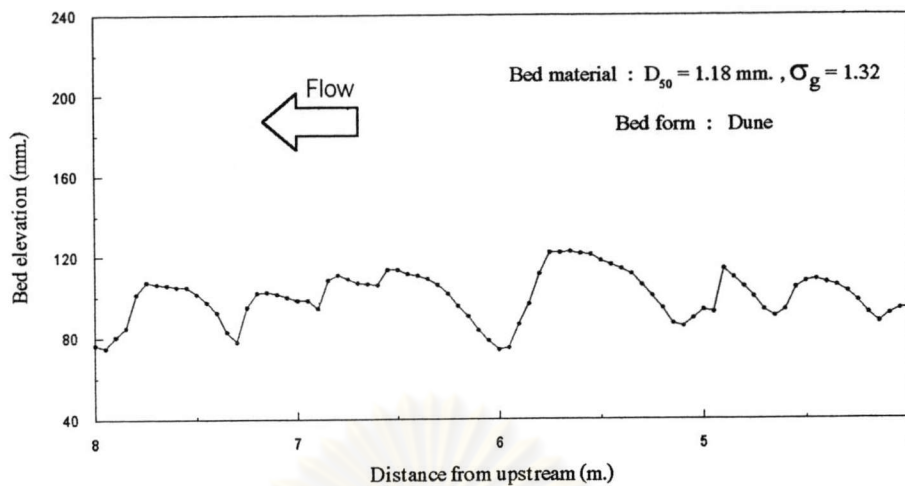
หมายเหตุ

\* ripple&dune = ลักษณะท้องน้ำเป็นริ้วคลื่นและลอนคลื่นผสมกัน

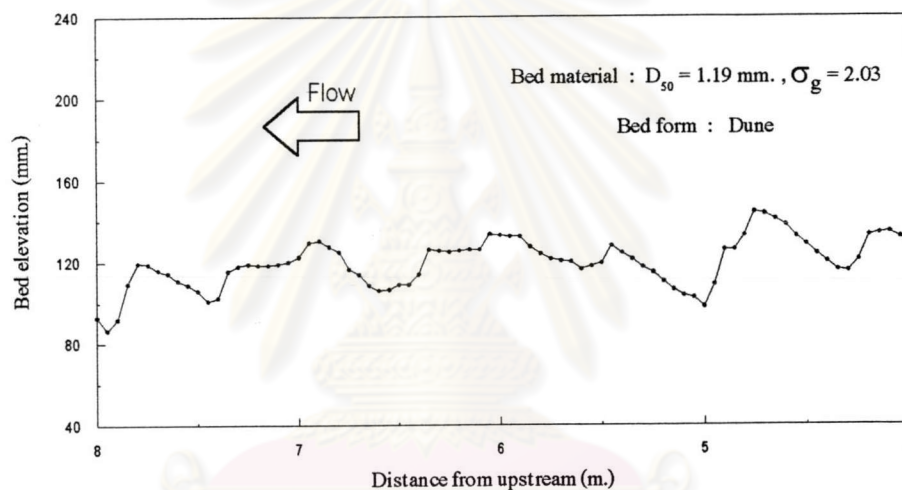
\*\* plane bed = ลักษณะท้องน้ำราบเรียบเริ่มต้น

$$*** n = \frac{\left( \frac{Bh}{2h + B} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{i}}{V}$$

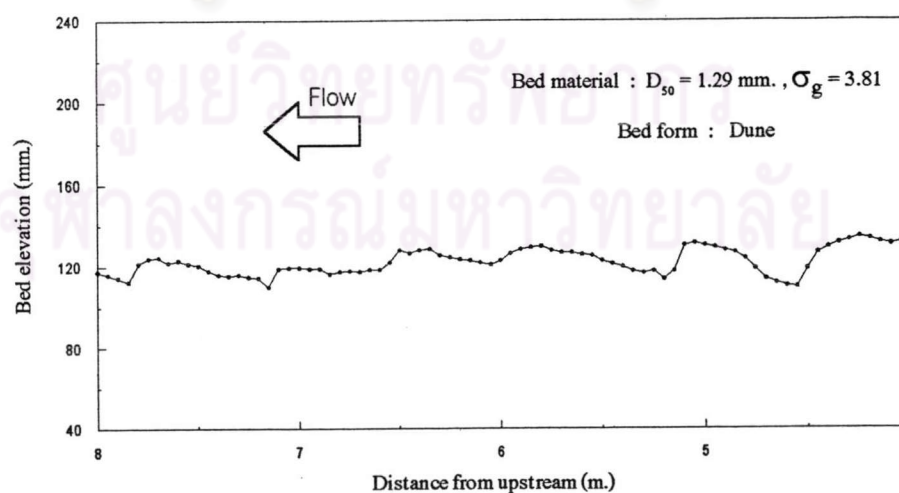
Sand no.1 n<sub>avg</sub> = 0.018  
 Sand no.2 n<sub>avg</sub> = 0.017  
 Sand no.3 n<sub>avg</sub> = 0.016



ก. การทดลอง A7 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.18 \text{ มม.}$ ,  $\sigma_g = 1.32$  อัตราการไหล 55.2 ลิตรต่อวินาที

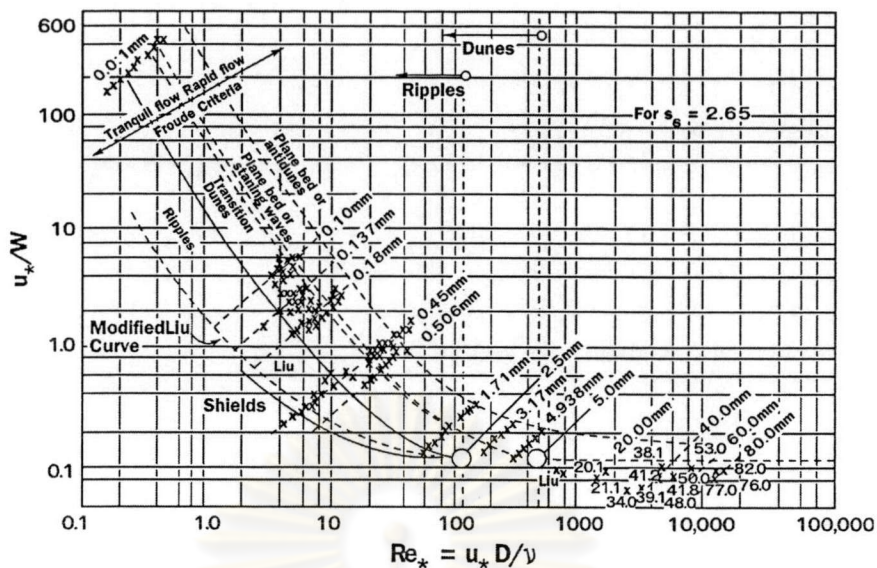


ข. การทดลอง B7 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.19 \text{ มม.}$ ,  $\sigma_g = 2.03$  อัตราการไหล 53.7 ลิตรต่อวินาที

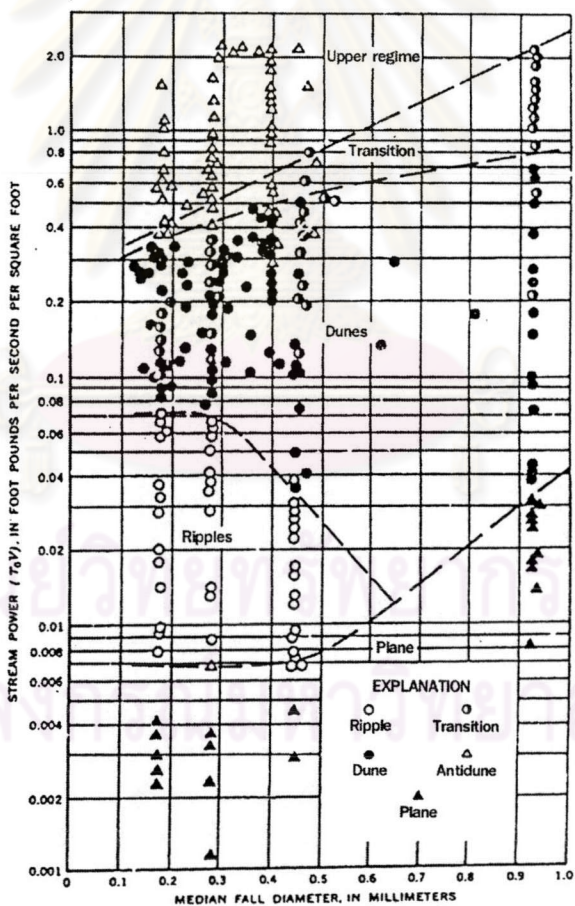


ค. การทดลอง C7 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.29 \text{ มม.}$ ,  $\sigma_g = 3.81$  อัตราการไหล 54.6 ลิตรต่อวินาที

รูป 4-12 รูปตัดตามยาวที่กึ่งกลางของรางน้ำของการทดลอง A7, B7 และ C7



ก) วิธีของ Liu



ข) วิธีของ Simon

รูป 4-13 ขนาด และขอบเขตของวัสดุท้องน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์รูปร่างท้องน้ำ สำหรับวิธีของ Liu และวิธีของ Simon

#### 4.5 การเปลี่ยนแปลงขนาด $D_{50}$ และ $\sigma_g$ ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทาง

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทาง หลังจากทำการทดลอง และเก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ เสร็จสิ้น ได้ทำการเก็บตัวอย่างท้องน้ำที่ตำแหน่ง 0.00 ม., 2.00 ม., 4.00 ม., 6.00 ม., 8.00 ม., 10.00 ม. และ 12.00 ม. ดังรูป 3-2 ไปวิเคราะห์การกระจายขนาด ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดดูภาคผนวก ค. โดยมีสรุปขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังตาราง 4-9 และมีสรุปขนาด  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังตาราง 4-10 และจากตาราง 4-9, ตาราง 4-10 พบว่า ทรายชนิดที่ 1 มีขนาด  $D_{50} = 1.17-1.22$  มม.,  $\sigma_g = 1.31-1.32$  ทรายชนิดที่ 2 มีขนาด  $D_{50} = 1.17-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 1.98-2.11$  ทรายชนิดที่ 3 มีขนาด  $D_{50} = 1.19-1.29$  มม.,  $\sigma_g = 3.77-3.89$

และเมื่อพิจารณารูป 4-14 ถึงรูป 4-20 ซึ่งแสดงขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางของทรายทั้ง 3 ชนิด พบว่า ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระยะทาง สำหรับการทดลองในรางน้ำสี่เหลี่ยมนี้ โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของทรายแต่ละชนิด ดังตาราง 4-9 และตาราง 4-10 และมีค่าต่าง ๆ ดังนี้ ทรายชนิดที่ 1  $D_{50, avg} = 1.20$  มม.,  $\sigma_{g, avg} = 1.32$  ส่วนทรายชนิดที่ 2  $D_{50, avg} = 1.23$  มม.,  $\sigma_{g, avg} = 2.04$  และสำหรับทรายชนิดที่ 3  $D_{50, avg} = 1.24$  มม.,  $\sigma_{g, avg} = 3.82$  ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ที่ได้ จะเห็นว่า ขนาด  $D_{50}$  เฉลี่ยที่ได้ มีค่าสูงขึ้นจากขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำตอนเริ่มต้นเล็กน้อย (1.18 มม. สำหรับทรายชนิดที่ 1 และทรายชนิดที่ 2 และ 1.17 มม. สำหรับทรายชนิดที่ 3) นอกจากนั้นยังพบว่า ขนาด  $\sigma_g$  เฉลี่ยที่ได้ มีการกระจายขนาดน้อยลงจากขนาด  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำตอนเริ่มต้นด้วย (1.32, 2.11 และ 3.90 สำหรับทรายชนิดที่ 1, ทรายชนิดที่ 2 และทรายชนิดที่ 3 ตามลำดับ) โดยเฉพาะทรายชนิดที่ 3 ที่มีการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำสูง (high gradation) ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ทรายละเอียดที่เป็นส่วนประกอบของทรายทั้ง 3 ชนิดนั้น ถูกพัดพาไปได้มากกว่าทรายหยาบ ประกอบกับการเก็บตัวอย่าง จะทำการเก็บตัวอย่าง เฉพาะบริเวณส่วนบนของท้องน้ำเท่านั้น จึงทำให้ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ที่ได้ หลังจากทำการทดลอง และเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ นั้น มีการกระจายขนาดที่น้อยลง และมีขนาด  $D_{50}$  ที่สูงขึ้น

และเป็นที่น่าสังเกตว่า ในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางซึ่งแตกต่างไปจากการศึกษาของ Stenberg (1875) และการศึกษาของ Morris และ Williams (1997) ซึ่งเสนอความสัมพันธ์ในรูปสมการเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) ทั้งนี้เนื่องมาจาก ในการศึกษาของ Stenberg (1875) และการศึกษาของ Morris

และ Williams (1997) เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางในลำน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีความยาวของลำน้ำ มากกว่าความยาวของรางน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นอย่างมาก จึงทำให้ในการศึกษาของ Stemberg (1875) และการศึกษาของ Morris และ Williams (1997) สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4-9 สรุปขนาด  $D_{50}$  ของวัสดุท้องน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของ 21 การทดลอง

Run NO.	Median particle size ( $D_{50}$ ) at station, mm.							Avg.	%Deviation
	0.00 m.	2.00 m.	4.00 m.	6.00 m.	8.00 m.	10.00 m.	12.00 m.		
A1	1.17	1.21	1.23	1.29	1.21	1.25	1.21	1.22	3.75
A2	1.13	1.19	1.22	1.21	1.18	1.21	1.23	1.20	1.33
A3	1.10	1.29	1.22	1.25	1.24	1.25	1.17	1.22	3.15
A4	1.18	1.22	1.23	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	2.54
A5	1.10	1.24	1.28	1.27	1.22	1.26	1.17	1.22	3.39
A6	1.16	1.13	1.24	1.14	1.13	1.21	1.17	1.17	-0.97
A7	1.14	1.15	1.15	1.19	1.22	1.20	1.18	1.18	-0.36
B1	1.27	1.27	1.25	1.25	1.07	1.25	1.17	1.22	3.27
B2	1.27	1.18	1.21	1.39	1.24	1.30	1.24	1.26	6.90
B3	1.26	1.23	1.31	1.35	1.29	1.29	1.28	1.29	9.08
B4	1.21	1.32	1.16	1.15	1.45	1.29	1.28	1.27	7.26
B5	1.06	1.24	1.21	1.17	1.27	1.15	1.09	1.17	-0.85
B6	1.25	1.10	1.23	1.18	1.22	1.28	1.33	1.23	4.00
B7	1.17	1.21	1.10	1.25	1.22	1.20	1.20	1.19	1.09
C1	1.39	1.18	1.19	1.24	1.07	1.32	0.97	1.19	2.08
C2	1.48	1.25	1.33	1.13	1.07	1.25	1.17	1.24	5.98
C3	1.05	1.29	1.42	1.25	1.41	1.21	1.25	1.27	8.42
C4	1.24	1.23	1.33	1.04	1.25	1.10	1.18	1.20	2.20
C5	1.29	1.06	1.23	1.21	1.31	1.08	1.14	1.19	1.59
C6	1.21	1.37	1.41	1.21	1.33	1.17	1.21	1.27	8.79
C7	1.56	1.21	1.29	1.37	1.31	1.09	1.17	1.29	9.89
Mean value of sand NO. 1								1.20	2.21
Mean value of sand NO. 2								1.23	4.64
Mean value of sand NO. 3								1.24	4.67

หมายเหตุ

$$\% \text{ Deviation} = \left[ \frac{D_{50, \text{avg}} - D_{50, i}}{D_{50, i}} \right] \times 100$$

เมื่อ  $D_{50, \text{avg}}$  = ค่าเฉลี่ยของ  $D_{50}$  ทุกตำแหน่ง $D_{50, i}$  = ค่าเริ่มต้นของ  $D_{50}$ 

= 1.18 มม. (A1-B7) และ 1.17 มม. (C1-C7)

ตาราง 4-10 สรุปค่า  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของ 21 การทดลอง

Run NO.	Geometric standard deviation ( $\sigma_g$ ) at station								%Deviation
	0.00 m.	2.00 m.	4.00 m.	6.00 m.	8.00 m.	10.00 m.	12.00 m.	Avg.	
A1	1.41	1.32	1.32	1.28	1.32	1.28	1.28	1.32	-0.32
A2	1.35	1.32	1.28	1.32	1.32	1.32	1.36	1.32	0.32
A3	1.36	1.28	1.32	1.28	1.32	1.32	1.32	1.31	-0.43
A4	1.32	1.32	1.28	1.32	1.32	1.32	1.32	1.31	-0.43
A5	1.36	1.32	1.28	1.28	1.32	1.32	1.32	1.31	-0.43
A6	1.32	1.32	1.28	1.36	1.32	1.32	1.32	1.32	0.00
A7	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	0.00
B1	2.05	1.87	2.11	2.11	2.25	1.98	2.38	2.11	-0.14
B2	2.11	1.98	2.18	1.81	2.18	2.05	1.92	2.03	-3.66
B3	2.07	2.11	1.98	1.98	2.04	1.75	1.92	1.98	-6.23
B4	2.11	2.04	1.86	1.75	2.11	2.05	1.98	1.99	-5.89
B5	2.31	2.11	2.18	1.86	2.11	1.64	2.32	2.08	-1.62
B6	1.92	2.31	2.11	2.25	2.04	1.75	1.81	2.03	-3.93
B7	2.18	1.75	2.25	1.81	2.11	2.04	2.04	2.03	-3.99
C1	3.60	4.02	3.70	3.81	4.06	3.81	4.05	3.86	-0.92
C2	3.51	4.06	3.93	3.93	3.93	3.82	3.70	3.84	-1.54
C3	4.06	4.02	3.60	3.81	3.69	3.58	3.81	3.80	-2.67
C4	3.81	3.93	3.81	3.93	3.80	3.93	4.02	3.89	-0.26
C5	3.58	3.93	3.93	3.61	3.58	3.93	3.93	3.78	-2.97
C6	3.65	3.93	3.81	3.60	3.81	3.93	3.65	3.77	-3.37
C7	3.93	3.61	3.93	3.69	3.58	4.02	3.93	3.81	-2.23
Mean value of sand NO. 1								1.32	0.28
Mean value of sand NO. 2								2.04	3.64
Mean value of sand NO. 3								3.82	1.99

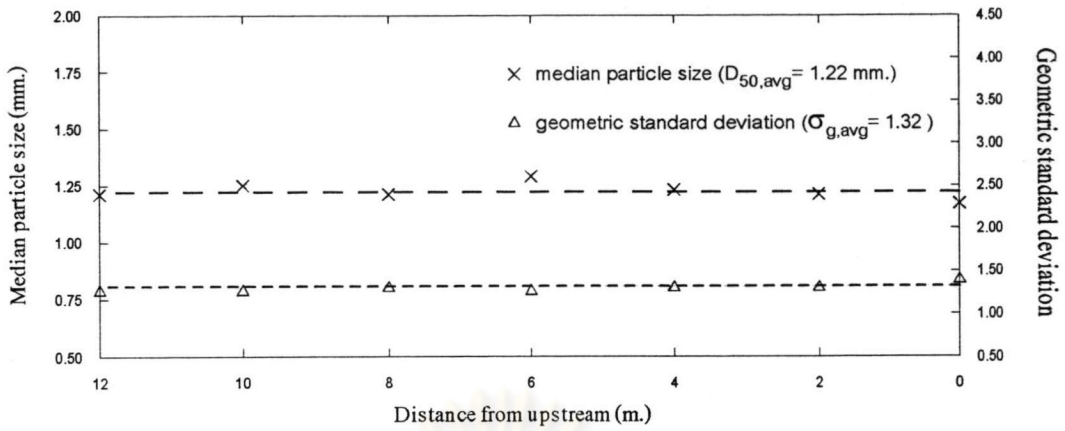
หมายเหตุ

$$\% \text{ Deviation} = \left[ \frac{\sigma_{g, \text{avg}} - \sigma_{g, i}}{\sigma_{g, i}} \right] \times 100$$

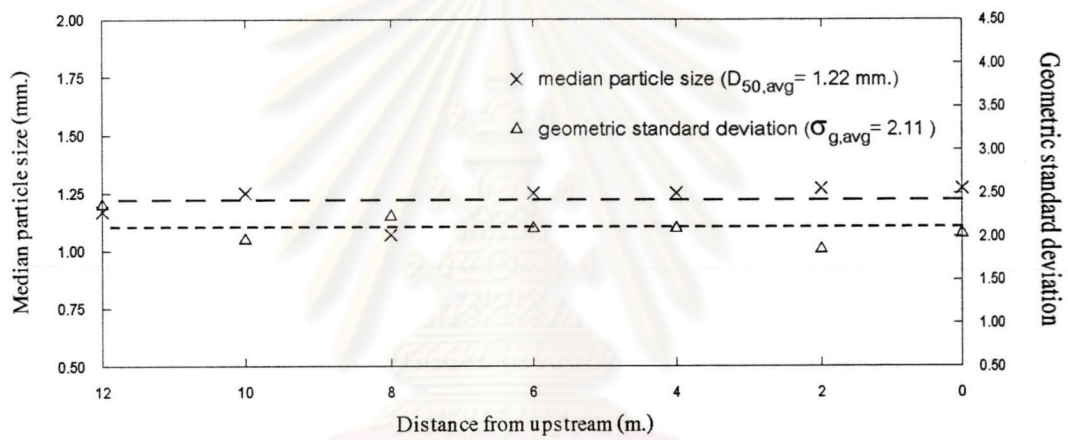
เมื่อ  $\sigma_{g, \text{avg}}$  = ค่าเฉลี่ยของ  $\sigma_g$  ทุกตำแหน่ง $\sigma_{g, i}$  = ค่าเริ่มต้นของ  $\sigma_g$ 

= 1.32, 2.11 และ 3.90 (A1-A7, B1-B7, C1-C7)

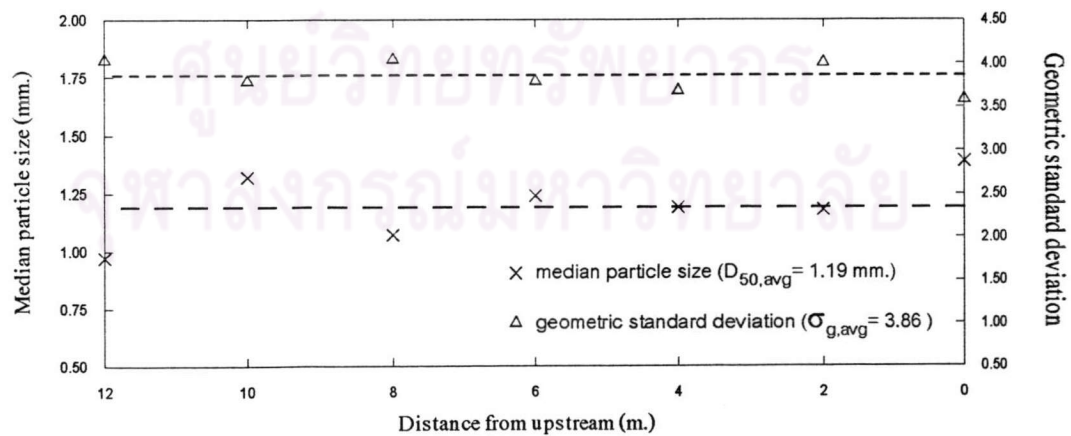




ก. การทดลอง A1 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.22$  mm.,  $\sigma_g = 1.32$  อัตราการไหล 24.0 ลิตรต่อวินาที

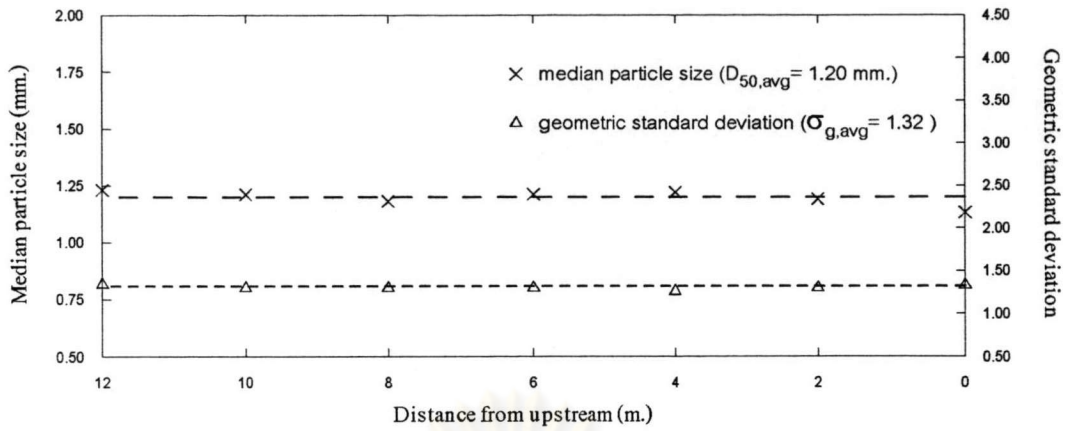


ข. การทดลอง B1 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.22$  mm.,  $\sigma_g = 2.11$  อัตราการไหล 24.8 ลิตรต่อวินาที

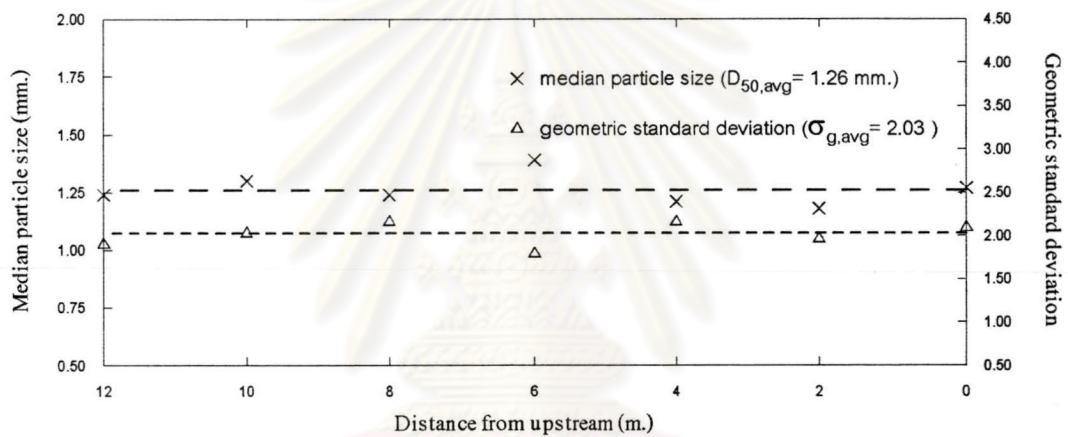


ค. การทดลอง C1 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.19$  mm.,  $\sigma_g = 3.86$  อัตราการไหล 25.1 ลิตรต่อวินาที

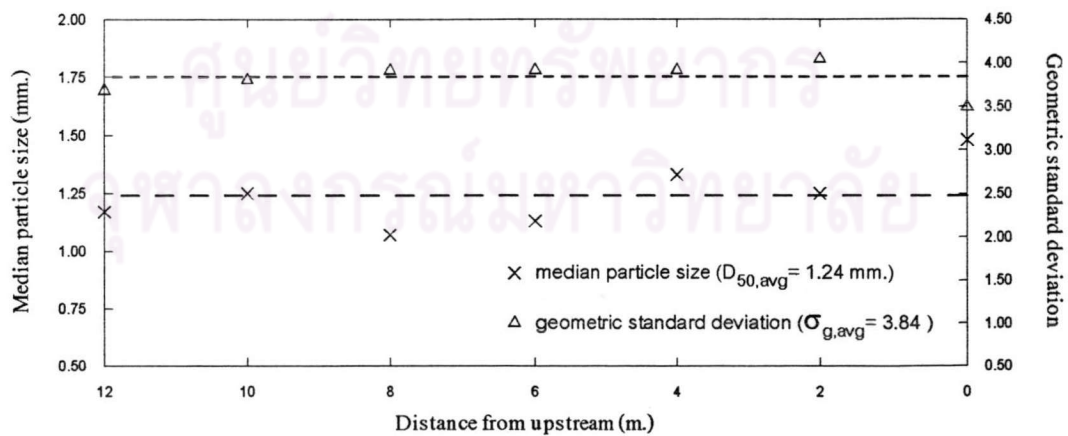
รูป 4-14 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุห้่งน้ำตามระยะทางของการทดลอง A1, B1 และ C1



ก. การทดลอง A2 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.20$  mm.,  $\sigma_g = 1.32$  อัตราการไหล 31.2 ลิตรต่อวินาที

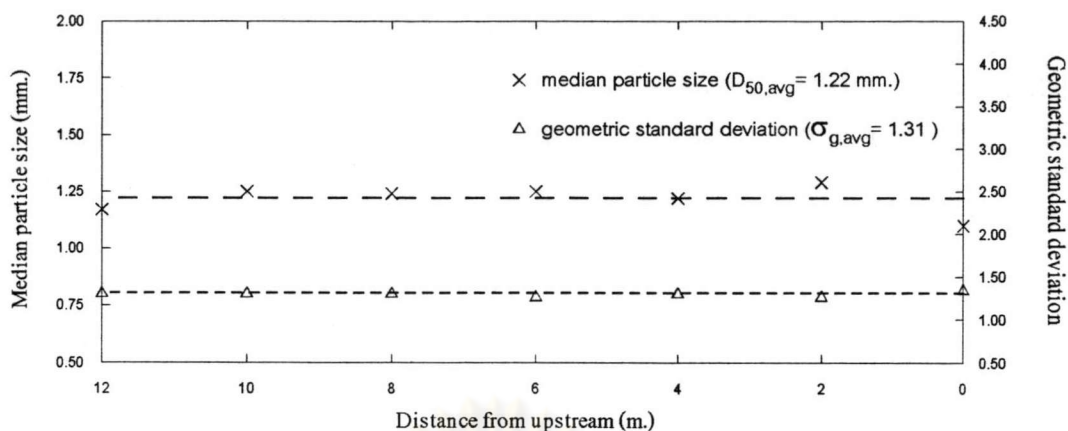


ข. การทดลอง B2 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.26$  mm.,  $\sigma_g = 2.03$  อัตราการไหล 29.9 ลิตรต่อวินาที

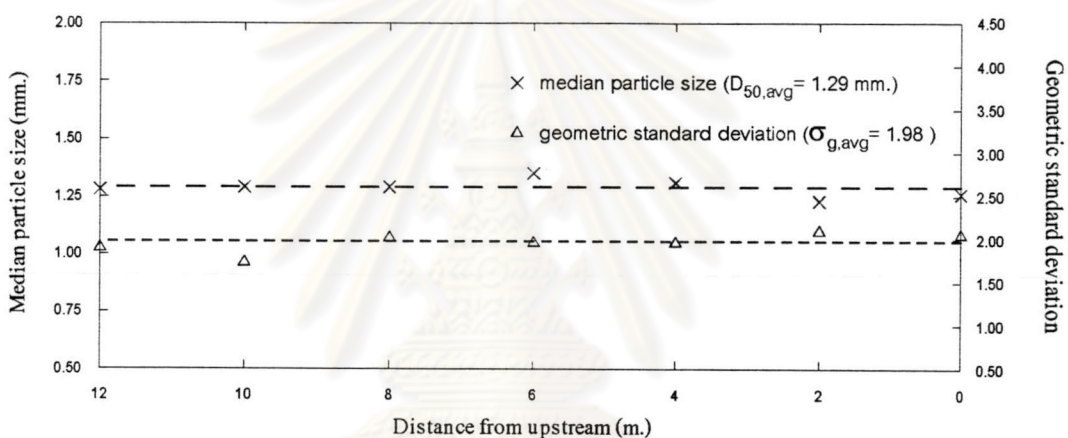


ค. การทดลอง C2 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.24$  mm.,  $\sigma_g = 3.84$  อัตราการไหล 29.7 ลิตรต่อวินาที

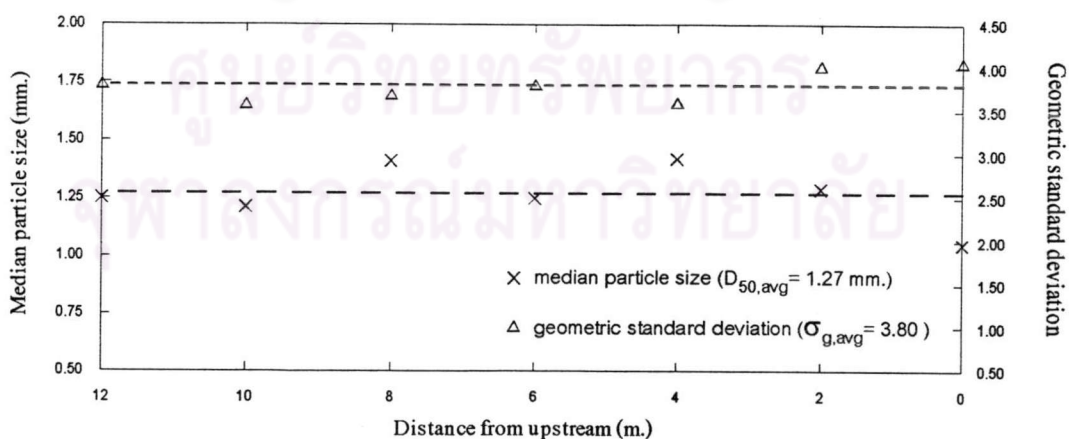
รูป 4-15 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุที่กรองน้ำตามระยะทางของการทดลอง A2, B2 และ C2



ก. การทดลอง A3 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.22 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.31$  อัตราการไหล 36.4 ลิตรต่อวินาที

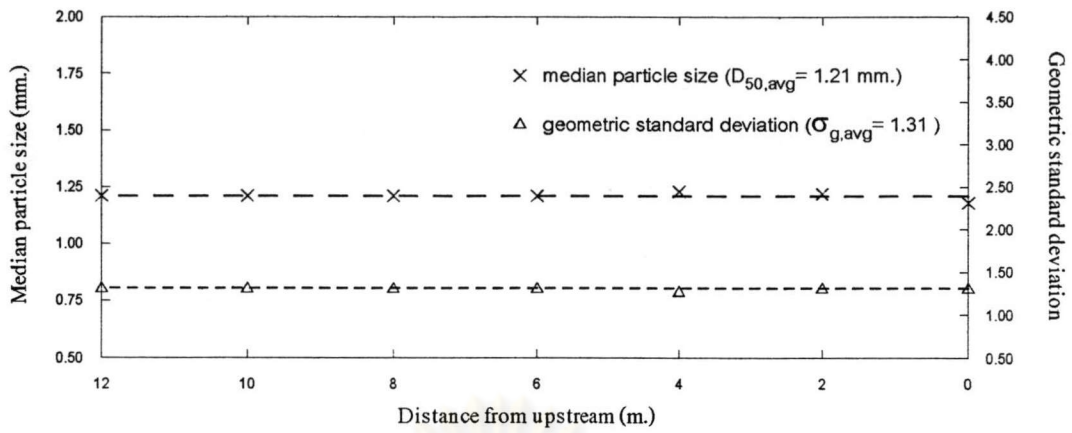


ข. การทดลอง B3 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.29 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.98$  อัตราการไหล 35.4 ลิตรต่อวินาที

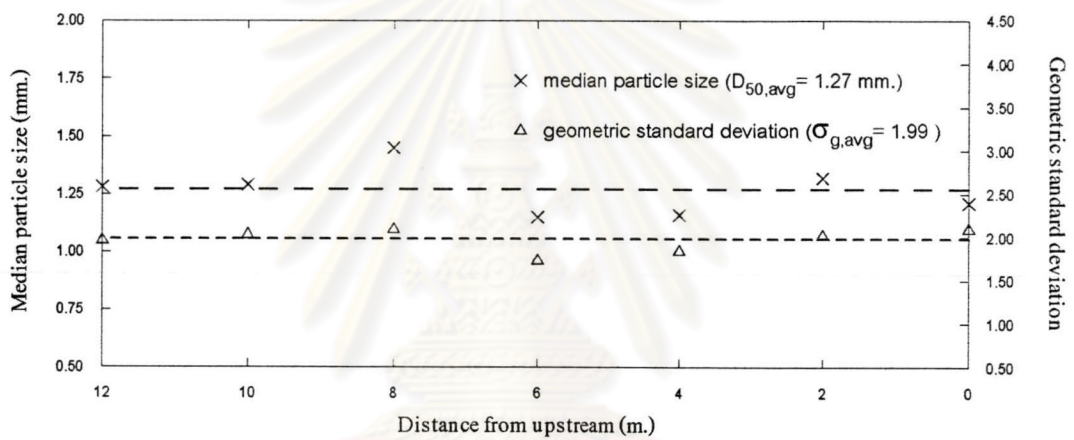


ค. การทดลอง C3 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.27 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 3.80$  อัตราการไหล 34.8 ลิตรต่อวินาที

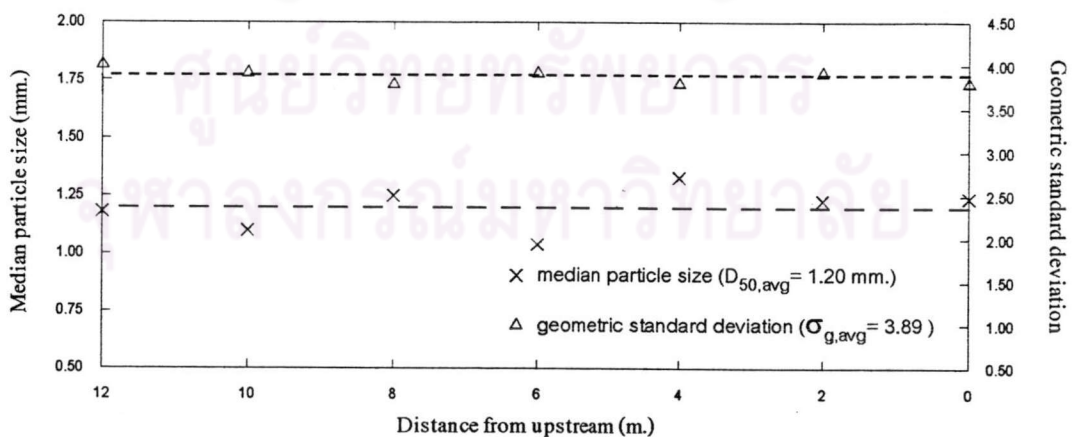
รูป 4-16 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุท้องน้ำตามระยะทางของการทดลอง A3, B3 และ C3



ก. การทดลอง A4 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.21 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.31$  อัตราการไหล 40.8 ลิตรต่อวินาที

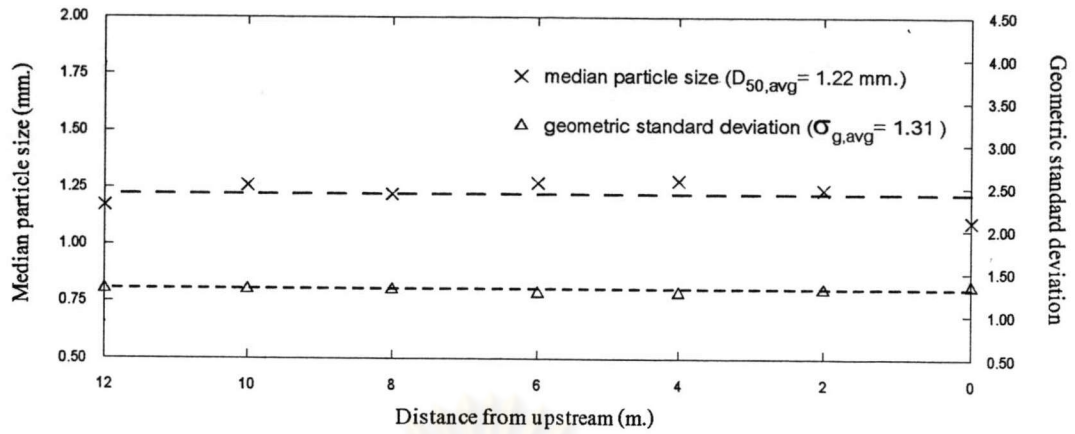


ข. การทดลอง B4 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.27 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.99$  อัตราการไหล 39.7 ลิตรต่อวินาที

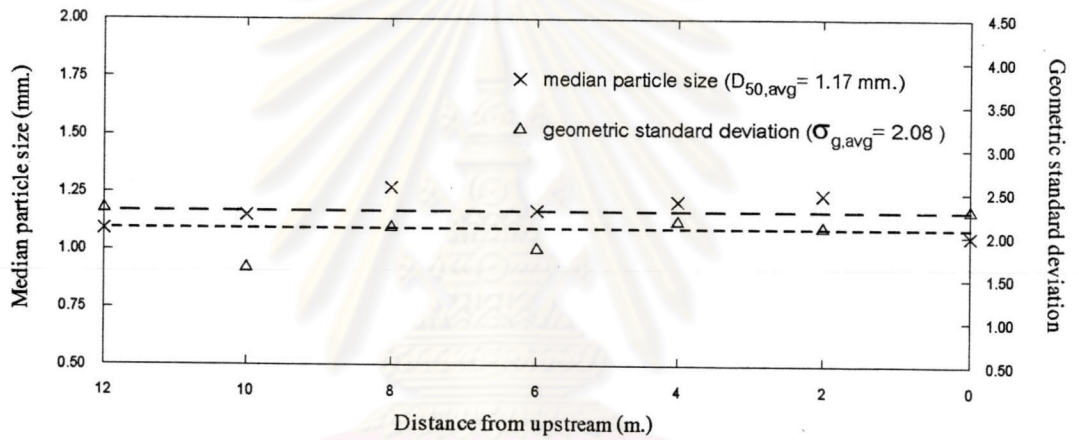


ค. การทดลอง C4 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.20 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 3.89$  อัตราการไหล 39.7 ลิตรต่อวินาที

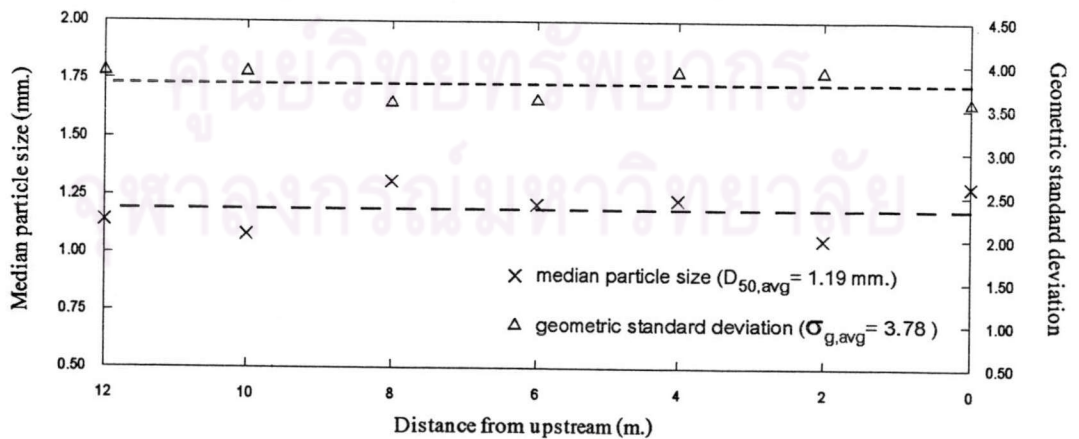
รูป 4-17 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุที่ื่อน้ำตามระยะทางของการทดลอง A4, B4 และ C4



ก. การทดลอง A5 ทรายขนาด  $D_{50} = 1.22 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.31$  อัตราการไหล 45.3 ลิตรต่อวินาที

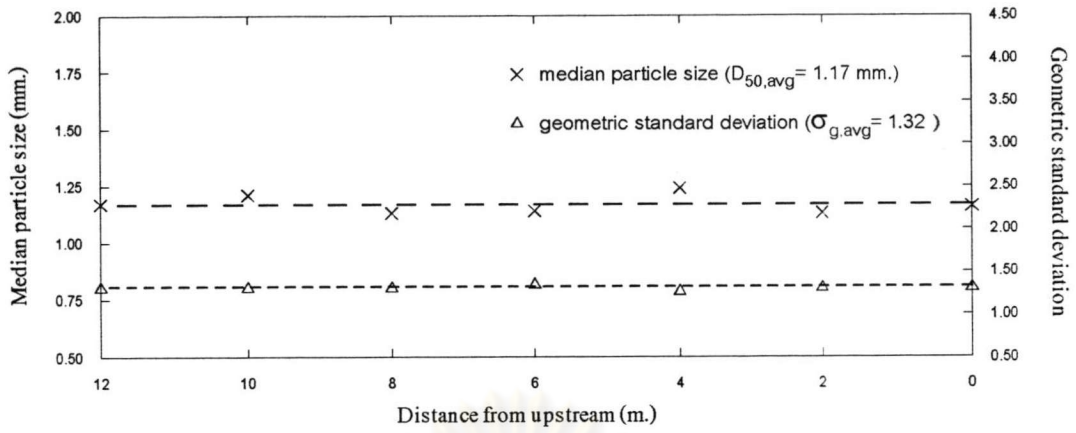


ข. การทดลอง B5 ทรายขนาด  $D_{50} = 1.17 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 2.08$  อัตราการไหล 45.3 ลิตรต่อวินาที

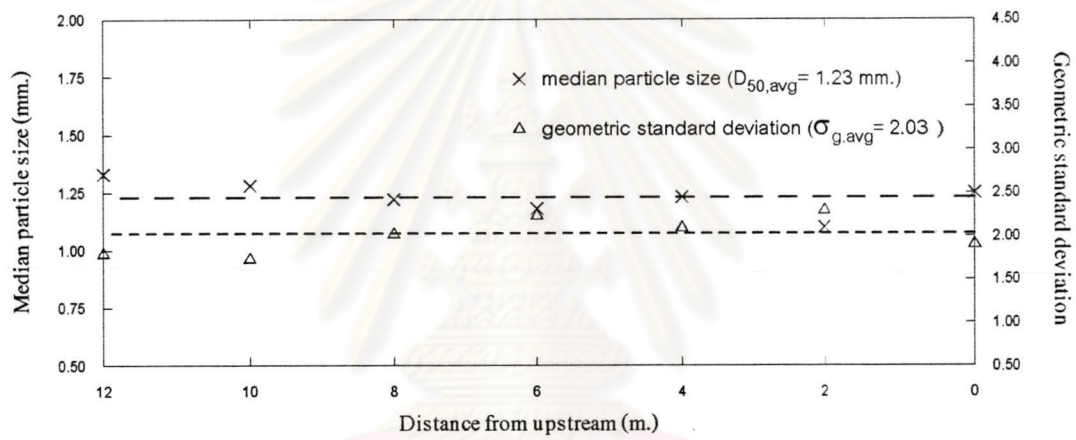


ค. การทดลอง C5 ทรายขนาด  $D_{50} = 1.19 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 3.78$  อัตราการไหล 44.8 ลิตรต่อวินาที

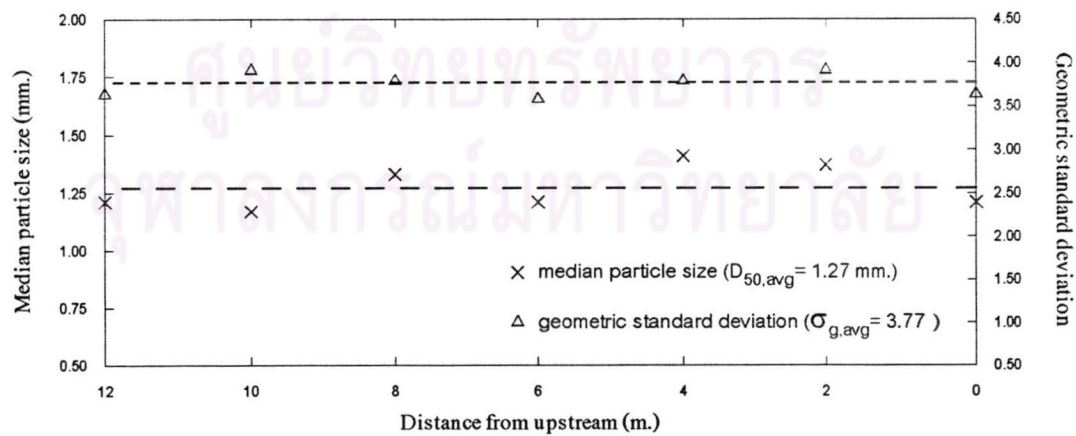
รูป 4-18 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุที่กรองน้ำตามระยะทางของการทดลอง A5, B5 และ C5



ก. การทดลอง A6 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.17 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.32$  อัตราการไหล 49.4 ลิตรต่อวินาที

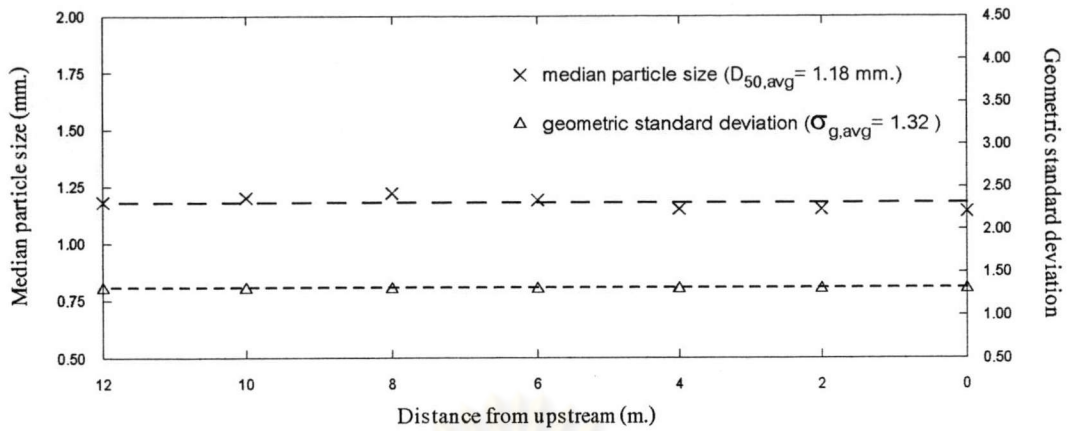


ข. การทดลอง B6 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.23 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 2.03$  อัตราการไหล 49.4 ลิตรต่อวินาที

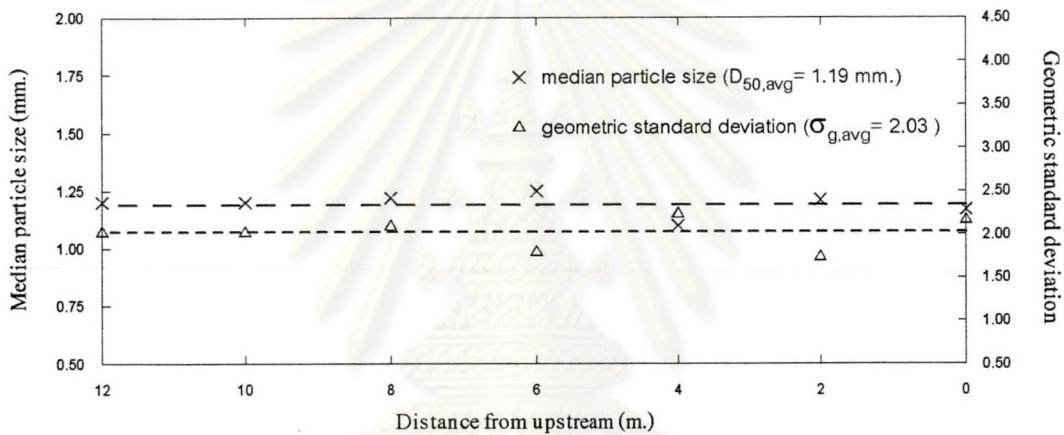


ค. การทดลอง C6 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.27 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 3.77$  อัตราการไหล 49.8 ลิตรต่อวินาที

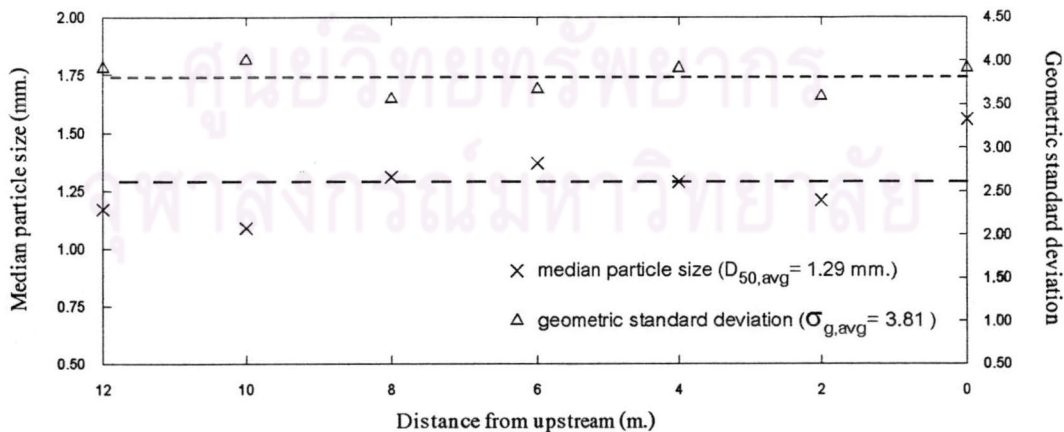
รูป 4-19 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุที่อุ้งน้ำตามระยะทางของการทดลอง A6, B6 และ C6



ก. การทดลอง A7 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.18 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 1.32$  อัตราการไหล 55.2 ลิตรต่อวินาที



ข. การทดลอง B7 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.19 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 2.03$  อัตราการไหล 53.7 ลิตรต่อวินาที



ค. การทดลอง C7 ทราบขนาด  $D_{50} = 1.29 \text{ mm.}$ ,  $\sigma_g = 3.81$  อัตราการไหล 54.6 ลิตรต่อวินาที

รูป 4-20 ขนาด  $D_{50}$  และ  $\sigma_g$  ของวัสดุที่ongน้ำตามระยะทางของการทดลอง A7, B7 และ C7