บทที่ 3

โปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค โดยวิธีมาตรฐาน JIS

การคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z8820 และ JIS Z8822) สำหรับการวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนแบบสะสม เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากในขั้นตอนการวิเคราะห์ผล เนื่องจากจะต้องทำการลากเส้นสัมผัสจากกราฟการตกตะกอนเพื่อหาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา t ใดๆ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคต่อไป ในขั้นตอนการลากเส้นสัมผัสหากเราทำการลากเส้นสัมผัสโดยการประมาณจากสายตา บุคคลต่างกันก็จะลากเส้นที่ต่างกัน ซึ่งวิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดเส้นสัมผัสที่เป็นมาตรฐานจากข้อมูลเพียงชุดเดียวกันที่กำหนดมาให้ ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่มีความแน่นอน และไม่น่าเชื่อถือ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการประดิษฐ์โปรแกรมสำหรับคำนวณค่าการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีมาตรฐาน JIS ขึ้น โดยตั้งชื่อว่าโปรแกรม AUTOCAL-JIS ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งผลการวิเคราะห์ที่ได้จะมีความเที่ยงตรง และน่าเชื่อถือมากกว่า

ในเบื้องต้นของบทที่ 3 นี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม และเนื่องจากงานนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของโปรแกรมซึ่งจะกล่าวถึงในตอนท้ายของบทที่ 3 นี้

3.1 การสร้างเส้นสัมผัส

การประดิษฐ์เส้นสัมผัสที่เป็นมาตรฐานสำหรับข้อมูลที่กำหนดมาให้ จะประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง และการหาค่าจุดตัดแกนตั้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ในการทดลองเพื่อหาค่าการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาคตัวอย่างคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักที่ส่งมาจากเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่อง ตลอดเวลาที่ทำการทดลอง เนื่องจากค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์จะมีข้อมูลบางตำแหน่งที่มีการแกว่ง ซึ่งการแกว่งของค่าน้ำหนักนี้มาจากหลายสาเหตุ เช่น ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดลอง ฯลฯ ทำให้ผลการทดลองที่ได้จะมีสัญญาณรบกวน (noise) ส่วนหนึ่งประกอบอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนออกไปก่อนจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการขจัดสัญญาณรบกวนในข้อมูลโดยการสร้างเส้นกราฟที่แสดงแนวโน้มของข้อมูลในแต่ละช่วง โดยการลากเส้นกราฟผ่านข้อมูลเหล่านี้เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกไป วิธีการแบบนี้เรียกว่าระเบียบวิธีการถดถอยน้อยที่สุด (method of least-squares regression) จากการทดลองพบว่าข้อมูลระหว่างค่าน้ำหนักที่สะสมบนจานรับน้ำหนักกับค่าเวลาในการตกตะกอนของอนุภาคเป็นข้อมูลที่มีการกระจายไม่อยู่ในรูปแบบของเชิงเส้นหรือเอ็กโพเนนเชียล ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) มาใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ในที่นี้เราจะประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองในรูปของฟังก์ชัน

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + e \qquad (3.1)$$

โดย a_0, a_1, a_2 เป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่า และ e คือ ค่าความผิดพลาด (หรือค่าแตกต่าง) ระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง ค่า e สามารถแสดงได้โดยการจัดรูปสมการที่ (3.1) ใหม่ดังนี้

$$e = y - a_0 - a_1x - a_2x^2 \qquad (3.2)$$

สมการที่ (3.2) แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาด (หรือค่าแตกต่าง) คือ ผลต่างระหว่างค่า y ที่ถูกต้องกับค่า y ที่ได้จากการประมาณ ($a_0 + a_1x + a_2x^2$) ที่ทำนายโดยสมการพหุนามอันดับสอง

ขั้นตอนในการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองนี้ เริ่มจากการหาค่าความผิดพลาดทั้งหมด (E) ที่เกิดขึ้นจากข้อมูลจำนวน n ข้อมูล ในรูปแบบดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_{i,measured} - y_{i,model}\right)^2 \quad (3.3)$$

ในที่นี้เราทำการยกกำลังสองของค่าผลต่าง e_i เพื่อทำค่าที่อาจมีเครื่องหมายเป็นลบให้เป็นค่าบวก ดังนั้นสมการที่ (3.3) จะให้ความหมายของค่าความผิดพลาดทั้งหมด สมการที่ (3.3) สามารถเขียนได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2\right)^2 \quad (3.4)$$

จากสมการที่ (3.4)สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งไม่รู้ค่า (a_0, a_1, a_2) ที่ต้องการได้โดยวิธีการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่าความผิดพลาด E ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = -2\sum_{i=1}^{n} \left(y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2\right) \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = -2\sum_{i=1}^{n} x_i \left(y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2\right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_2} = -2\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \left(y_i - a_0 - a_1 x_i - a_2 x_i^2\right) \quad (3.7)$$

หลังจากนั้นกำหนดให้ค่าอนุพันธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับศูนย์ตามเงื่อนไขการหาค่าต่ำสุด ทำการจัดเรียงสมการเพื่อให้อยู่ในรูปแบบสมการทั่วไป จะได้

$$(na_0) + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) a_2 = \sum_{i=1}^{n} y_i \quad (3.8)$$

$$\left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^3\right) a_2 = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \quad (3.9)$$

$$\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2\right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^3\right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^4\right) a_2 = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i \quad (3.10)$$

สมการทั้งสามสมการข้างต้น สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^2 & \sum_{i=1}^{n} x_i^3 & \sum_{i=1}^{n} x_i^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i^2 y_i \end{Bmatrix} \qquad (3.11)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ (a_0, a_1, a_2) ของสมการพหุนามอันดับสองที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถหาได้โดยการแก้ชุดสมการที่ (3.11)

3.1.2 การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง

การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าจากกราฟการตกตะกอนทำได้โดยการสร้างเส้นตรงซึ่งลากให้สัมผัสกับเส้นกราฟ ณ จุดที่สนใจ โดยในที่นี้จะประดิษฐ์สมการเส้นตรงในรูปแบบของฟังก์ชัน

$$y = mx + b \qquad (3.12)$$

โดยที่ m และ b คือค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงค่าความชัน และค่าจุดตัดแกนตั้งตามลำดับ เนื่องจากได้มีการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนโดยการสร้างสมการพหุนามอันดับสอง ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น ดังนั้นค่าความชันของเส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่ต้องการทราบค่านี้ จะมีค่าเท่ากับค่าอนุพันธ์ของสมการพหุนามอันดับสองที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาค่า ดังนี้

$$m = \frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx}(a_0 + a_1 x + a_2 x^2) \qquad (3.13)$$

$$\therefore \quad m = a_1 + 2a_2 x \qquad (3.14)$$

โดย a_1, a_2 เป็นสัมประสิทธิ์ที่ได้จากขั้นตอนการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสอง แทนค่าสมการที่ (3.14) ลงในสมการที่ (3.12) จะได้

$$m = (a_1 + 2a_2x)x + b \qquad (3.15)$$

จัดรูปสมการที่ (3.15) ใหม่ จะได้สมการคำนวณหาค่าจุดตัดแกนตั้ง ดังนี้

$$b = y - a_1x - 2a_2x^2 \qquad (3.16)$$

ดังนั้นค่าจุดตัดแกนตั้งสามารถคำนวณได้โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์ a_1, a_2 ที่ได้จากขั้นตอนการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสอง และค่าของข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า (x, y) ลงในสมการที่ (3.16) การหาค่าจุดตัดแกนตั้งโดยวิธีการสร้างเส้นสัมผัสผ่านจุดที่ต้องการทราบค่าโดยอาศัยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากขั้นตอนการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองจะก่อให้เกิดชุดเส้นสัมผัสมาตรฐานเพียงชุดเดียวจากข้อมูลที่กำหนดมาให้

3.2 การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค

การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคทั้งการกระจายขนาดแบบสะสมและการกระจายขนาดแบบสัมพัทธ์จะทำการคำนวณตามวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (JIS Z8820 และ JIS Z8822) ดังที่ได้อธิบายรายละเอียดในบทที่ 2 (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.4) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติมบางสมการที่ใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคของโปรแกรม AUTOCAL-JIS

3.2.1 สมการคำนวณขนาดอนุภาคใหญ่สุด

เนื่องจากสมการของสโตกส์นั้นใช้ได้เฉพาะกับการไหลในช่วงการไหลแบบชั้นๆ ที่ช้ามาก (slow laminar flow) เท่านั้น ดังนั้นขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวัดได้จะถูกกำหนดโดยค่าเลขเรย์โนลด์ โดย JIS Z 8820 กำหนดให้เลขเรย์โนลด์มีค่าไม่เกิน 0.4 เพราะเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะไม่เป็นการเคลื่อนที่แบบชั้นๆ อย่างสมบูรณ์ และลภาวะความปั่นป่วน

ที่เกิดขึ้นทางด้านหลังของอนุภาคที่กำลังตกตะกอนจะทำให้อนุภาคตกตะกอนด้วยความเร็วที่ช้ากว่าความเร็วที่ทำนายโดยสมการของสโตกส์

สำหรับอนุภาคที่มีรูปร่างทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่แท้จริงสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับค่าเลขเรย์โนลด์ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\pi}{6}(\rho_p - \rho_f)D_\beta^3 = \frac{24}{Re_p}\frac{\pi D_\beta^2}{4}\frac{\rho_f V_{st}^2}{2} \qquad (3.17)$$

จากสมการค่าเลขเรย์โนลด์สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$V_{st} = \frac{Re_p \mu}{\rho_f D_\beta^2} \qquad (3.18)$$

แทนค่า V_{st} ลงในสมการที่ (3.17) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเลขเรย์โนลด์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ดังนี้

$$D_p = \left(\frac{18\mu^2 Re_p}{(\rho_p - \rho_f)\rho_f g}\right)^{1/3} \qquad (3.19)$$

แทนค่า Re_p = 0.4 ลงในสมการที่ (3.19) จะได้สมการคำนวณขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถวัดได้อย่างถูกต้องโดยวิธีการตกตะกอน ดังนี้

$$D_{pmax} = \left(\frac{7.2\mu^2}{(\rho_p - \rho_f)\rho_f g}\right)^{1/3} * 10^6 \qquad (3.20)$$

โดย D_{pmax} คือ ขนาดอนุภาคใหญ่สุดที่สามารถวัดด้วยวิธีของสโตกส์ (ไมโครเมตร)

ยกตัวอย่างเช่นในกรณีการตกตะกอนของอนุภาคในตัวกลางที่เป็นน้ำที่อุณหภูมิห้อง (μ = 1 cp = 0.001 kg/m.s) ค่า D_{pmax} จะเท่ากับ 90.2, 71.6, 62.6 μm สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่น 2000, 3000 และ 4000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ในกรณีที่ต้องการวัดตัวอย่างที่มีขนาด D_{pmax} โตขึ้นจะต้องใช้ของเหลวที่มีความหนืดสูงขึ้น เช่นในกรณีของของเหลวคล้ายน้ำที่มีค่า μ = 100 cp ค่า D_{pmax} จะเท่ากับ 1,944, 1543, 1348 μm สำหรับอนุภาคที่มีความหนาแน่น 2000, 3000 และ 4000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

3.2.2 สมการคำนวณขนาดอนุภาคเล็กสุด

ขนาดอนุภาคเล็กสุดที่สามารถวัดได้จากวิธีการตกตะกอน คือ ขนาดของอนุภาคที่เล็กสุดที่เคลื่อนที่เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีอิทธิพลของแพร่ (Brownian motion)

โดยทั่วไปขนาดอนุภาคเล็กสุดที่สามารถวัดได้จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่อนุภาคจะต้องใช้ในการตกตะกอน เนื่องจากในการทดลองที่ต้องใช้เวลานานๆ มักจะเกิดปรากฏการณ์การพาตามธรรมชาติอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างไม่สม่ำเสมอของสารแขวนลอย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากการระเหยของตัวกลางจากผิวบน จากเหตุผลดังกล่าววิธีวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนโดยทั่วไปจึงมักใช้วัดขนาดของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 μm ขึ้นไป

โปรแกรม AUTOCAL-JIS จะคำนวณขนาดอนุภาคเล็กสุดจากค่าเวลาสิ้นสุดของการทดลองโดยอาศัยสมการดังนี้

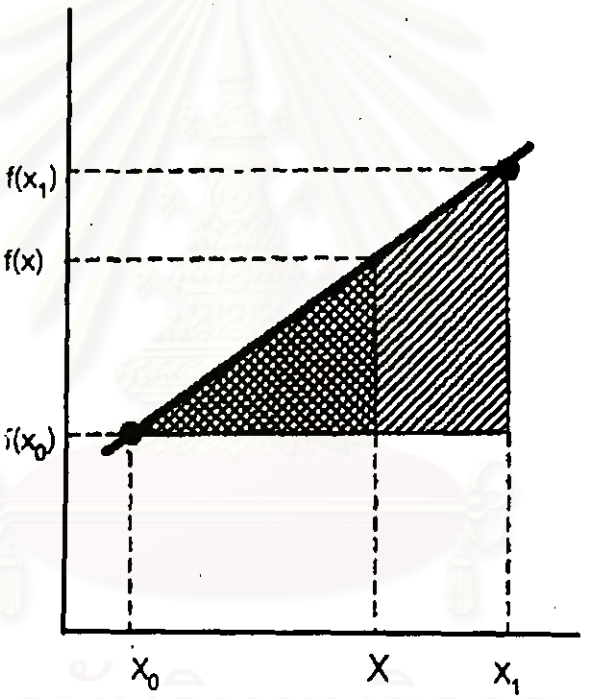
$$D_{pmin} = \sqrt{\frac{18\mu h}{(\rho_p - \rho_f) g\, t_{final}}} * 10^{12} \qquad (3.21)$$

โดย D_{pmin} คือ ขนาดอนุภาคเล็กสุดของโปรแกรม AUTOCAL-JIS (ไมโครเมตร)

t_{final} คือ เวลาสิ้นสุดการทดลอง (วินาที)

3.2.3 สมการคำนวณหาขนาดของอนุภาคที่ % oversize ที่กำหนด

เนื่องจากข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการคำนวณวิเคราะห์ช้างต้นเป็นข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูง แต่จะมีข้อมูลเฉพาะตำแหน่งในจำนวนจำกัดเท่านั้น ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear interpolation) มาใช้ในการประมาณค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง % oversize ที่ต้องการหาค่า กล่าวคือจะคำนวณหาขนาดของอนุภาคที่อยู่ตามตำแหน่งต่างๆ นอกเหนือจากตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ โดยการนำข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆ (discrete data points) มาสร้างเป็นกลุ่มของกราฟโดยใช้ฟังก์ชันต่อเนื่อง (continuous function) ซึ่งฟังก์ชันที่เกิดขึ้นดังกล่าวไม่เพียงแต่จะบ่งบอกค่าตามตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณเท่านั้น แต่จะบอกค่า ณ จุดใดๆ ระหว่างตำแหน่งต่างๆ ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นโดยการสร้างสามเหลี่ยมคล้าย

ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นสามารถประดิษฐ์ขึ้นมาได้ ดังนี้

$$\frac{f(x)-f(x_0)}{x-x_0} = \frac{f(x_1)-f(x_0)}{x_1-x_0} \qquad (3.22)$$

สมการที่ (3.22) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \qquad (3.23)$$

สมการที่ (3.23) คือ สูตรการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear-interpolation formula)

3.3 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL-JIS) เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้ภาษาฟอร์แทรน (Compaq Visual Fortran V6.1) ซึ่งการทำงานของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- ขั้นตอนการใส่ข้อมูล (Input operation)
- ขั้นตอนการประมวลผล (Computation)
- ขั้นตอนการแสดงข้อมูล (Output operation)

แต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการใส่ข้อมูล (Input operation)

ข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคมีดังต่อไปนี้

ข้อมูลสำหรับหาค่าจุดตัดแกนตั้ง

- ระยะห่างของเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลน้ำหนักแต่ละจุด (วินาที)
- จำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง
- จำนวนจุดของข้อมูลที่จะย้อนกลับเพื่อนำมาประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองชุดถัดไป
- จำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการหาค่า

I19379614

ข้อมูลจำเพาะของการทดลอง

- ความหนาแน่นของอนุภาคตัวอย่าง (ρ_p, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- ความหนาแน่นของตัวกลาง (ρ_f, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- ความหนืดของตัวกลาง (μ, นิวตัน.วินาที/เมตร^2)
- ระยะทางในการตกตะกอน (ความสูงจากจานรองถึงผิวของตัวกลาง) (เมตร)
- มวลของอนุภาคส่วนที่ไม่ตกตะกอน (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 6.3.4) (กรัม)

หมายเหตุ

1. โดยปกติจะบันทึกข้อมูลออนไลน์ทุกวินาที แต่ผู้วิเคราะห์สามารถสั่งให้เก็บข้อมูลทุกกี่วินาทีก็ได้ในการทำการทดลอง
2. เพื่อให้การฟิตเส้นกราฟการทดลองทำได้อย่างแม่นยำ และเพื่อขจัดสัญญาณรบกวนออกจากข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ การใส่จำนวนจุดข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง จะต้องใส่ข้อมูลแยกกันสำหรับชุดข้อมูลแต่ละชุด (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2)
3. จำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองสามารถเลือกได้ตั้งแต่จำนวน 4 จุด จนถึงจำนวนข้อมูลทั้งหมดของอนุภาคในส่วนนั้น
4. โดยปกติข้อมูลในส่วนแรกที่ได้จากการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.2) จะเป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าน้ำหนักของอนุภาคที่ตกตะกอนลงบนจานรับน้ำหนักอย่างรวดเร็ว และเป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน (noise) น้อย ดังนั้นการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามของข้อมูลส่วนนี้จะใช้จำนวนจุดของข้อมูลไม่มากนัก ขึ้นอยู่กับจำนวนจุดของข้อมูลที่มี แต่โดยทั่วไปมักมีค่าไม่เกิน 1000 จุด ส่วนข้อมูลในส่วนที่สองเป็นข้อมูลที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เร็วมากและมีแนวโน้มที่จะคงที่ ดังนั้นในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามของข้อมูลส่วนนี้จะใช้จำนวนข้อมูลมากกว่าข้อมูลในส่วนแรก โดยขึ้นอยู่กับจำนวนจุดของข้อมูลที่มี แต่ไม่เกิน 2000 จุด สำหรับข้อมูลส่วนสุดท้ายเป็นข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้ามาก และมีจำนวนมากที่สุด ข้อมูลในส่วนนี้มักจะเป็นข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนประกอบอยู่ ดังนั้นในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามจึงต้องใช้ข้อมูลจำนวนที่มากพอที่จะสามารถขจัดสัญญาณรบกวนออกไป ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าไม่เกิน 5000 จุด

5. เพื่อให้การฟิตเส้นกราฟในแต่ละช่วงมีการเชื่อมต่อกันอย่างราบรื่นจึงมีการใช้จุดข้อมูลจำนวนหนึ่งที่ซ้ำกัน (overlap) ระหว่างช่วงปัจจุบันและช่วงก่อน ซึ่งเรียกว่าจุดข้อมูลที่จะย้อนกลับ จากการทดลองแบบสุ่ม (trials and errors) ในเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจำนวนจุดข้อมูลย้อนกลับควรเป็นประมาณ 50 % ของจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามในแต่ละช่วง
6. จำนวนจุดของข้อมูลที่จะย้อนกลับสามารถเลือกได้ตั้งแต่จำนวนศูนย์จุด จนถึงจำนวน 80% ของข้อมูลที่ใช้ประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนาม
7. จำนวนจุดของผลลัพธ์ที่ต้องการประมวลค่าและสามารถป้อนให้กับโปรแกรม AUTOCAL-JIS จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 – 30 จุด แต่จากการทดลองในเงื่อนไขต่างๆ พบว่าจำนวนจุดของผลลัพธ์ที่เหมาะสมควรใช้ประมาณ 20 จุด เพราะการกำหนดจำนวนจุดของผลลัพธ์มากกว่านี้อาจจะก่อให้เกิดการแกว่งตัวของฟังก์ชันการกระจายขนาดและค่าการกระจายขนาดแบบสะสมที่คำนวณได้

3.3.2 ขั้นตอนการประมวลผล

เมื่อใส่ข้อมูลสำหรับการหาค่าจุดตัดแกนตั้ง และข้อมูลจำเพาะของการทดลองเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปโปรแกรมจะเริ่มทำการประมวลผลเพื่อคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การตรวจสอบข้อมูลในแฟ้มข้อมูล

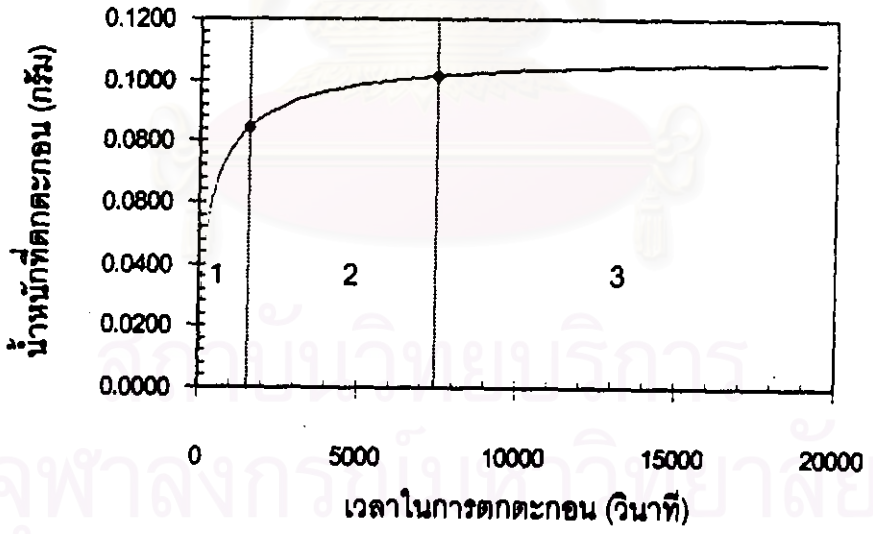
ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะนับจำนวนข้อมูลการทดลองทั้งหมดที่เก็บอยู่ในแฟ้มข้อมูล พร้อมทั้งตรวจสอบหาความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับข้อมูลในแฟ้มข้อมูล เพราะในการทำการทดลองจะทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักรวมที่ชั่งได้ตามเวลาแบบ on-line ซึ่งการบันทึกข้อมูลจำนวนมากๆ แบบ on-line อาจเกิดความผิดพลาดขึ้นระหว่างการบันทึกข้อมูลได้ ต่อจากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าน้ำหนักสุทธิของอนุภาคที่สะสมอยู่บนจานรับน้ำหนัก โดยการลบค่าน้ำหนักรวมเมื่อเริ่มทำการเก็บข้อมูล (เวลา t = 0) ออกจากค่าน้ำหนักรวม ณ เวลา t ใดๆ หลังจากเริ่มเก็บข้อมูล

ขั้นตอนที่ 2 การประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับลอง

ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับลอง โปรแกรมจะแบ่งข้อมูลการทดลองทั้งหมดออกเป็น 3 ส่วน โดยใช้ปริมาณน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนตามค่าน้ำหนักที่กำหนดให้ (ค่ามาตรฐานของโปรแกรมคือ 80 และ 96 เปอร์เซ็นต์) โดยข้อมูลในส่วนแรกจะประกอบด้วยข้อมูลตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงข้อมูลที่มีค่าน้ำหนักเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่ตกตะกอนบนจานรับน้ำหนัก ข้อมูลส่วนที่สองจะประกอบด้วยข้อมูลที่มีค่าน้ำหนักของอนุภาคอยู่ระหว่าง 80 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ และข้อมูลในส่วนสุดท้ายจะประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมดที่มีค่าน้ำหนักมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่ตกตะกอนบนจานรับน้ำหนัก

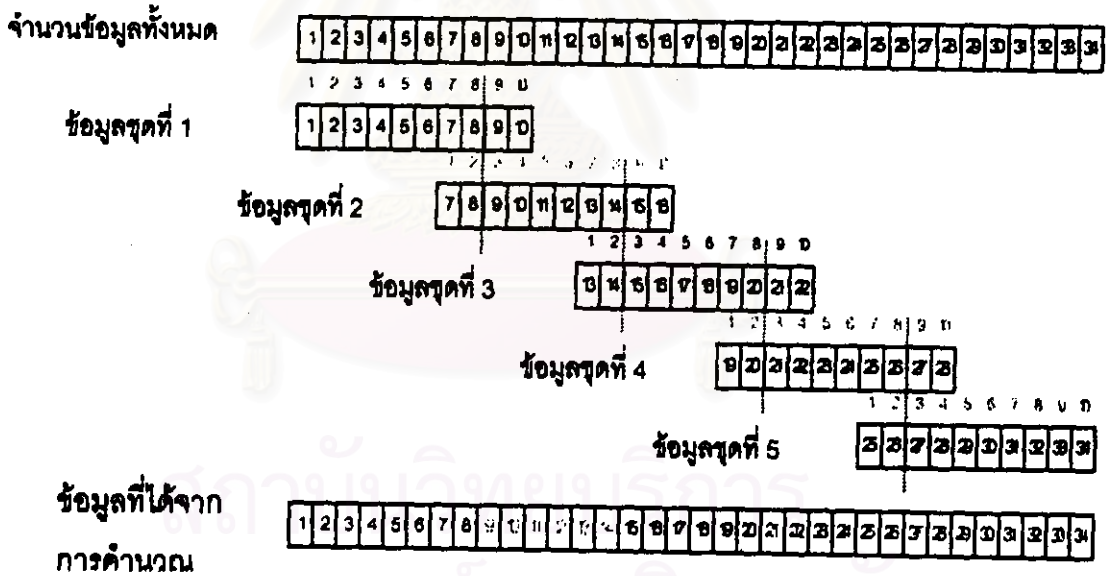
<u>หมายเหตุ</u>

ในกรณีที่อนุภาคตัวอย่างมีลักษณะการกระจายขนาดแบบกว้างมาก ให้เปลี่ยนเกณฑ์น้ำหนักที่ใช้ในการแบ่งข้อมูลจาก 0.8/0.96 เป็น 0.6/0.8 จะทำให้สามารถฟิตเส้นกราฟได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



<u>รูปที่ 3.2</u> ตัวอย่างการแบ่งข้อมูลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยใช้ปริมาณน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง

ต่อจากนั้นโปรแกรมจะทำการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับลองระหว่างข้อมูลน้ำหนักของอนุภาคที่ตกตะกอน (y) กับข้อมูลเวลาในการตกตะกอน (x) โดยโปรแกรมจะทำการแบ่งข้อมูลใน 3 ส่วนหลักที่แบ่งในตอนต้นออกเป็นช่วงสั้นๆ ตามจำนวนจุดของข้อมูลที่กำหนดมาให้ และทำการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับลองของข้อมูลแต่ละชุด โดยอาศัยระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ที่ใช้ร่วมกับเทคนิคการเลือกตัวหลัก (pivoting) ในการแก้สมการที่ (3.11) เพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่ไม่รู้ค่า a_0, a_1, a_2 หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองของข้อมูลชุดถัดไป โดยจะมีการนำข้อมูลของชุดข้อมูลชุดเดิมจำนวนหนึ่งมาเป็นส่วนประกอบของชุดข้อมูลชุดถัดไป เพื่อเสริมความเข้าใจ จะอธิบายโดยยกตัวอย่างให้ดู ตัวอย่างในรูปที่ 3.3 เป็นการสร้างฟังก์ชันพหุนามอันดับลองของข้อมูลส่วนหนึ่งที่ประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้นจำนวน 34 ข้อมูล โดยกำหนดให้ชุดข้อมูลแต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 10 ข้อมูล และกำหนดให้ใช้ข้อมูลของชุดข้อมูลที่อยู่ด้านหน้าจำนวน 4 ข้อมูล ในการสร้างชุดข้อมูลชุดถัดไป จากข้อกำหนดข้างต้น ข้อมูล 1 ส่วนของข้อมูลตัวอย่างที่กำหนดมาให้จะสามารถประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองได้จำนวน 5 ฟังก์ชัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการสร้างชุดข้อมูลย่อยเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสอง

ขั้นตอนที่ 3 การหาค่าจุดตัดแกนตั้ง

ค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา t ใดๆ สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.16) เพราะค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ (ค่า y) และค่าเวลาในการตกตะกอน (ค่า x) เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ส่วนสัมประสิทธิ์ a_1, a_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามอันดับสองที่ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับข้อมูล ณ จุดนั้น ดังนั้นเราจึงสามารถหาค่าน้ำหนักของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสโตกส์ ที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลา t ใดๆ ได้โดยการแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (3.16)

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค

ในการคำนวณการกระจายขนาดแบบสะสมของอนุภาค โปรแกรมจะหาค่ามวลของอนุภาคทั้งหมดที่สะสมบนจานรับน้ำหนักจากชุดของข้อมูลจุดตัดแกนตั้งที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 3 พร้อมทั้งคำนวณค่าขนาดของอนุภาคใหญ่สุด (D_{pmax}) และค่าขนาดของอนุภาคเล็กสุด (D_{pmin}) จากสมการที่ (3.20) และสมการที่ (3.21)เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้คำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค โดยโปรแกรมจะคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีที่กำหนดในเอกสารมาตรฐานอุตสาหกรรมของประเทศญี่ปุ่น (ดูรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.4)

โปรแกรม AUTOCAL- JIS จะมีการคำนวณ 2 แบบให้เลือก คือ การคำนวณสำหรับการแสดงผลด้วยกราฟโดยใช้สเกลปกติ และการคำนวณสำหรับการแสดงผลด้วยกราฟโดยใช้สเกลล็อก ซึ่งการคำนวณทั้งสองแบบจะใช้สูตรในการคำนวณที่แตกต่างกัน (ดูหัวข้อ 2.2.4)

หลังจากโปรแกรมทำการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคตามวิธีมาตรฐาน JIS เสร็จสิ้น ขั้นต่อไปโปรแกรมจะคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน (D_{p50}) และค่าขนาดของอนุภาค ณ ตำแหน่ง %oversize ที่กำหนดโดยใช้ระเบียบวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น โดยอาศัยสมการที่ (3.23) พร้อมทั้งคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค

3.3.3 **ขั้นตอนการแสดงข้อมูล** (Output operation)

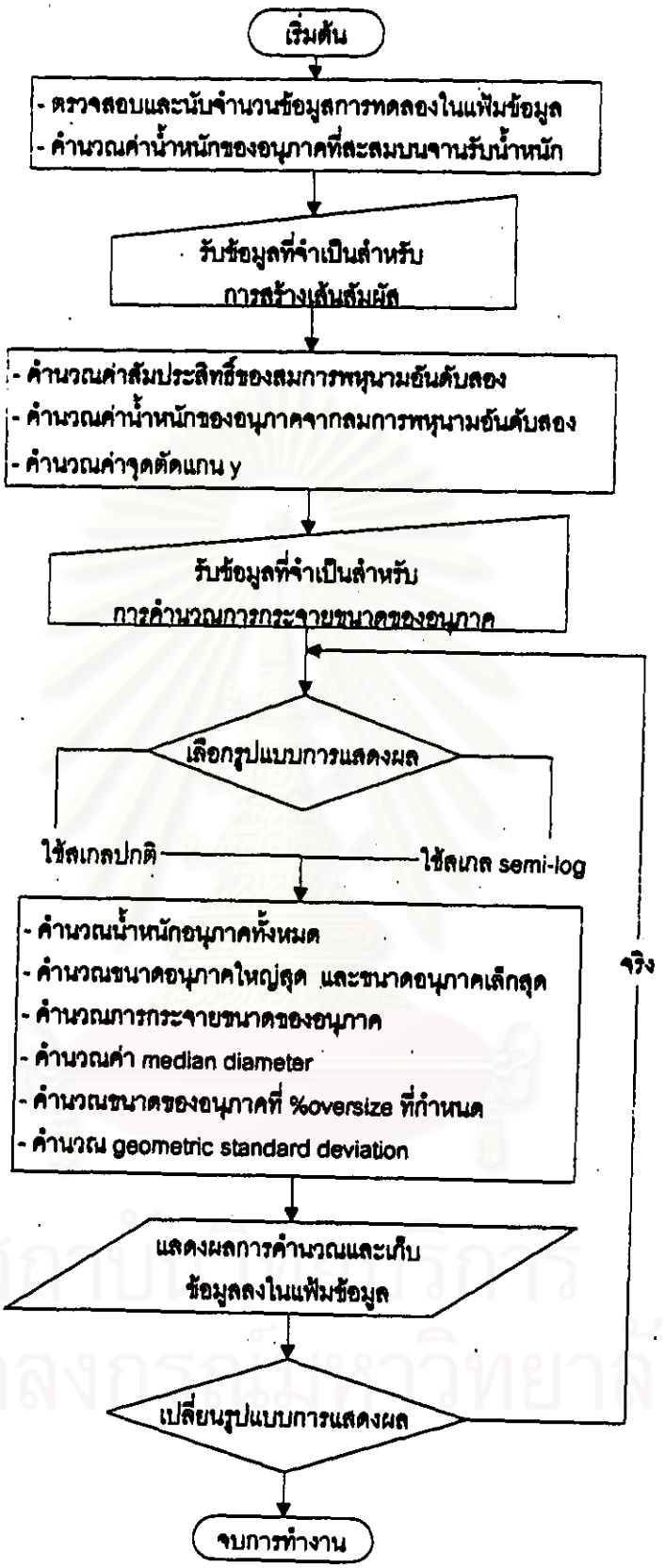
เมื่อขั้นตอนการประมวลผลเสร็จสิ้นจะได้ข้อมูลทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคแบบสะสมและแบบสัมพัทธ์ สำหรับการแสดงผลโดยใช้สเกลปกติ และสำหรับการแสดงผลโดยใช้สเกลล็อก พร้อมทั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมัธยฐาน, ข้อมูลขนาดของอนุภาคที่ % oversize ที่กำหนด และเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค

เมื่อนำข้อมูลการกระจายขนาดของอนุภาคมาพิจารณาหรือเขียนเป็นกราฟโดยใช้โปรแกรม EXCEL ก็จะได้กราฟการกระจายขนาดของอนุภาค ทั้งกราฟแบบสะสมและกราฟแบบสัมพัทธ์ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการแสดงผลการกระจายขนาดของอนุภาคตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกผลการคำนวณทั้งหมดลงในแฟ้มข้อมูลเพื่อเพิ่มความสะดวกในการตรวจสอบ และการนำข้อมูลมาใช้งานภายหลัง

ในการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลมาเขียนเป็นกราฟด้วยโปรแกรม EXCEL จะกำหนดให้แกนนอนแสดงค่าขนาดของอนุภาค ส่วนแกนตั้งเป็นค่าการกระจายขนาด สำหรับในกรณีการแสดงผลโดยใช้สเกลล็อกจะต้องสั่งให้โปรแกรม EXCEL กำหนดให้แกนนอนเป็นสเกลแบบล็อก

ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL –JIS) สามารถแสดงวิธีการทำงานอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



<u>รูปที่ 3.4</u> ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการประมวลผลของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS (โปรแกรม AUTOCAL-JIS)

3.4 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม และผลที่ได้รับ

การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมทำโดยการเปรียบเทียบค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมโดยใช้ข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคมาตรฐานที่ได้ทดลองเอง กับข้อการกระจายขนาดจากเอกสารอ้างอิง ผลการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคจะนำเสนอในบทที่ 6 ในหัวข้อนี้จะแสดงเฉพาะผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่ได้จากการประมาณค่าในขั้นตอนการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของโปรแกรม กับข้อมูลการทดลองเท่านั้น

3.4.1 เปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่ได้จากการประมวลผลโดยโปรแกรม กับข้อมูลการทดลอง

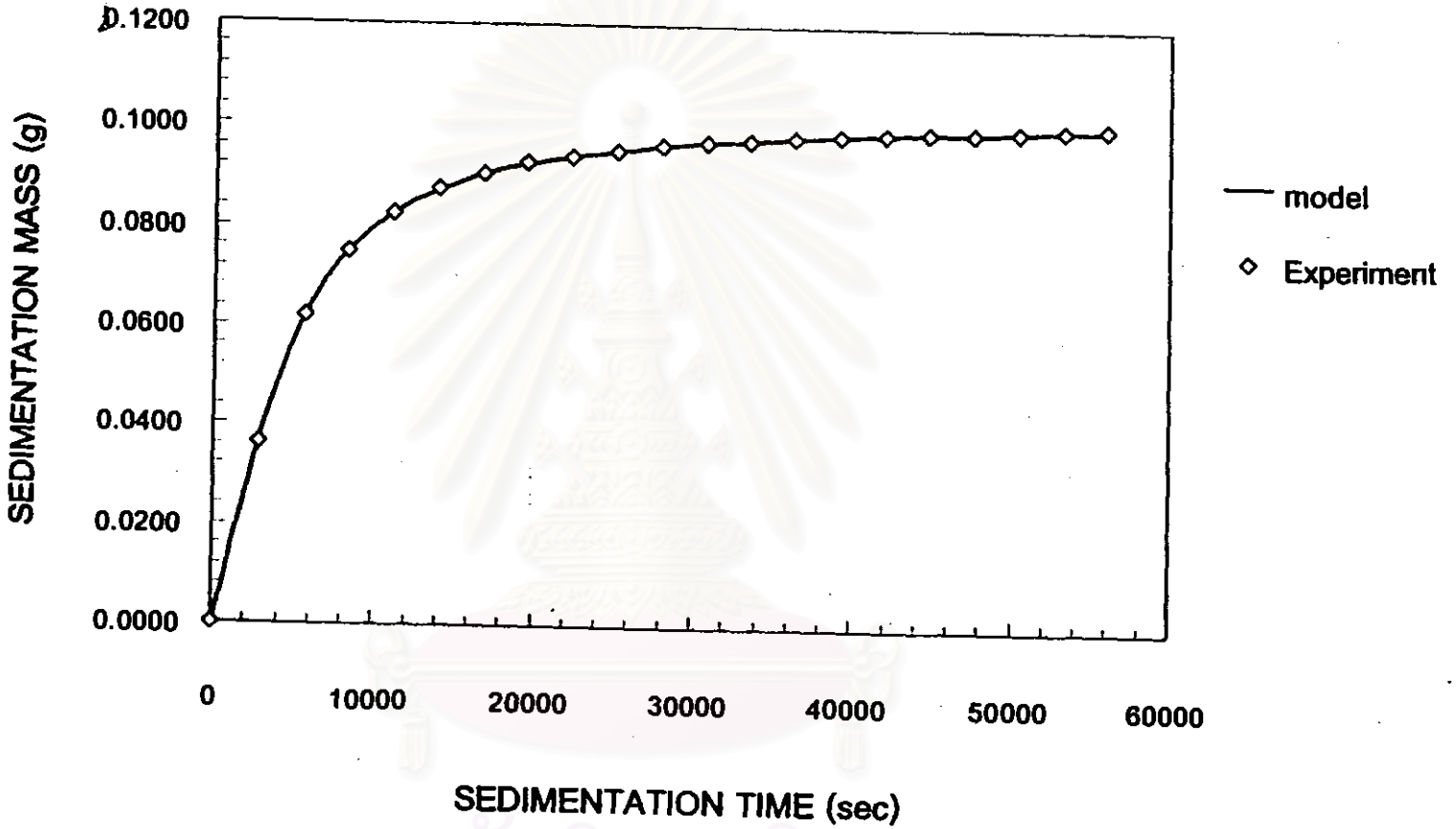
จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคโดยวิธีมาตรฐาน JIS จะหาค่าน้ำหนักของอนุภาคทั้งหมดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์ของสโตกส์ ณ เวลาใดๆ โดยการสร้างเส้นสัมผัสผ่านข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาค่ามาตัดกับแกนตั้ง ค่าความชันของเส้นสัมผัสที่สร้างขึ้นคือค่าอนุพันธ์ของสมการพหุนามอันดับสองที่สร้างขึ้นสำหรับชุดข้อมูลที่มีข้อมูล ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาค่าประกอบอยู่ ต่อจากนั้นจึงนำค่าจุดตัดแกนตั้งที่ได้ไปคำนวณหาการกระจายขนาดของอนุภาคต่อไป

จากขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมดังกล่าว จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมากของโปรแกรม เพราะสมการพหุนามอันดับสองที่ประดิษฐ์ขึ้นจะมีผลต่อความถูกต้องของค่าการกระจายขนาดของอนุภาคที่คำนวณได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนการประดิษฐ์ฟังก์ชันพหุนามอันดับสองของโปรแกรม กับข้อมูลการทดลองจริง (ดูรายละเอียดการทดลองในบทที่ 6) โดยใช้เกณฑ์ในการประดิษฐ์สมการพหุนามอันดับสองสำหรับข้อมูลแต่ละชุด ดังแสดงในตารางที่ 3.1

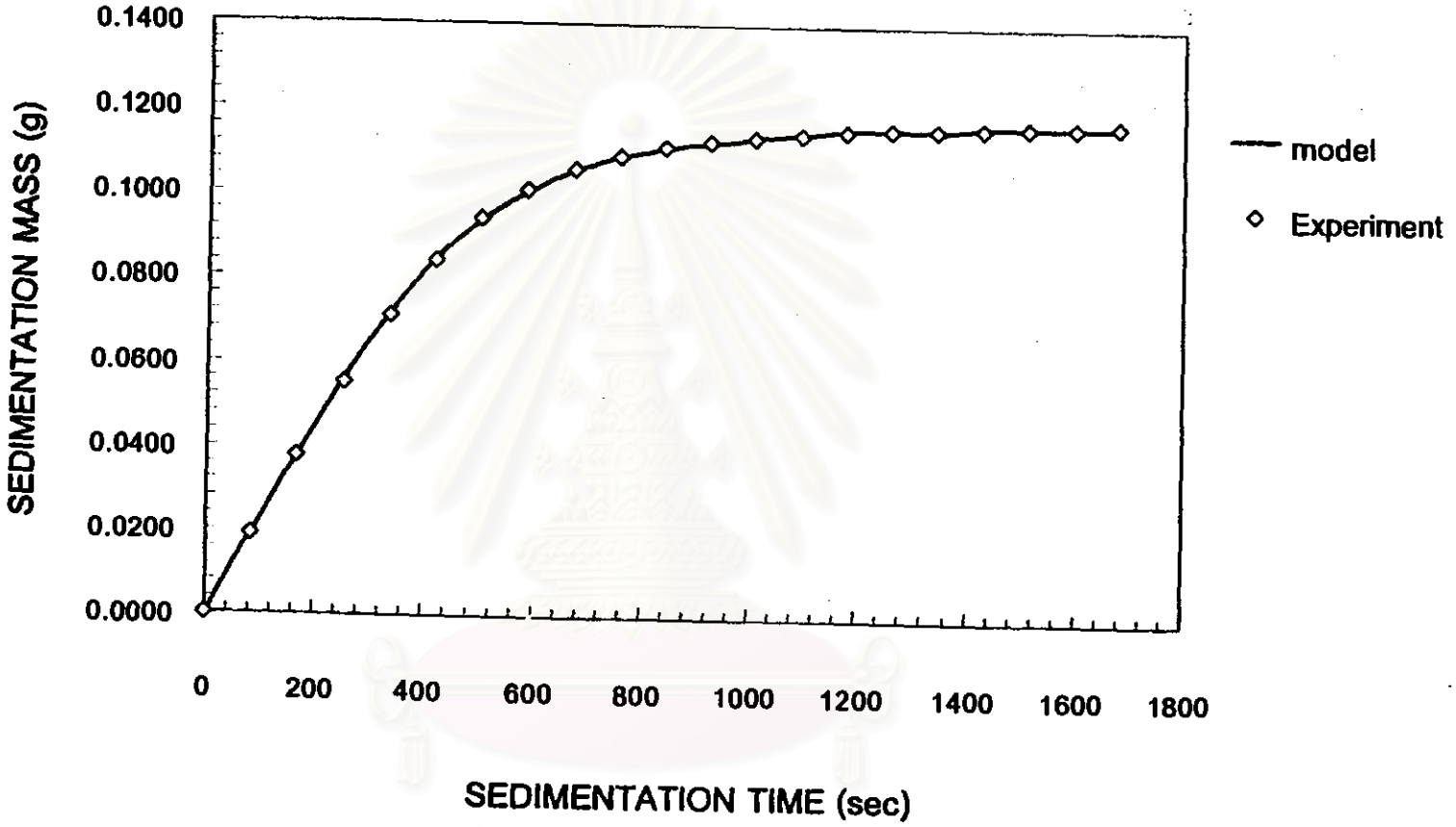
ตารางที่ 3.1 เกณฑ์ที่ใช้ในการประดิษฐ์ชุดของสมการพหุนามอันดับสองของโปรแกรมคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาค โดยวิธีมาตรฐาน JIS สำหรับข้อมูลการทดลองแต่ละชุด

อนุภาคตัวอย่าง	เกณฑ์ในการแบ่งช่วงข้อมูล	จำนวนข้อมูลของชุดข้อมูล / จำนวนข้อมูลที่มีการใช้ซ้ำ		
		ข้อมูลส่วนที่ 1	ข้อมูลส่วนที่ 2	ข้อมูลส่วนที่ 3
อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบแคบ (narrow size distribution)				
JIS TEST POWDER II, NO.1	0.8 / 0.96	1000 / 500	2000 / 1000	3000 / 1500
JIS TEST POWDER II, NO.3	0.8 / 0.96	100 / 50	100 / 50	100 / 50
JIS TEST POWDER II, NO.4	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	60 / 30
อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบฐานนิยมคู่ (Bimodal)				
BIMODAL 1	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	100 / 50
BIMODAL 2	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	60 / 30
BIMODAL 3	0.8 / 0.96	60 / 30	60 / 30	60 / 30
อนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคแบบช่วงกว้าง				
JIS TEST POWDER I, NO.5	0.8 / 0.96	100 / 50	1000 / 500	3000 / 1500
JIS TEST POWDER I, NO.10	0.6 / 0.8	100 / 50	1500 / 700	3000 / 1500
JIS TEST POWDER I, NO.11	0.6 / 0.8	100 / 50	1000 / 500	3000 / 1500

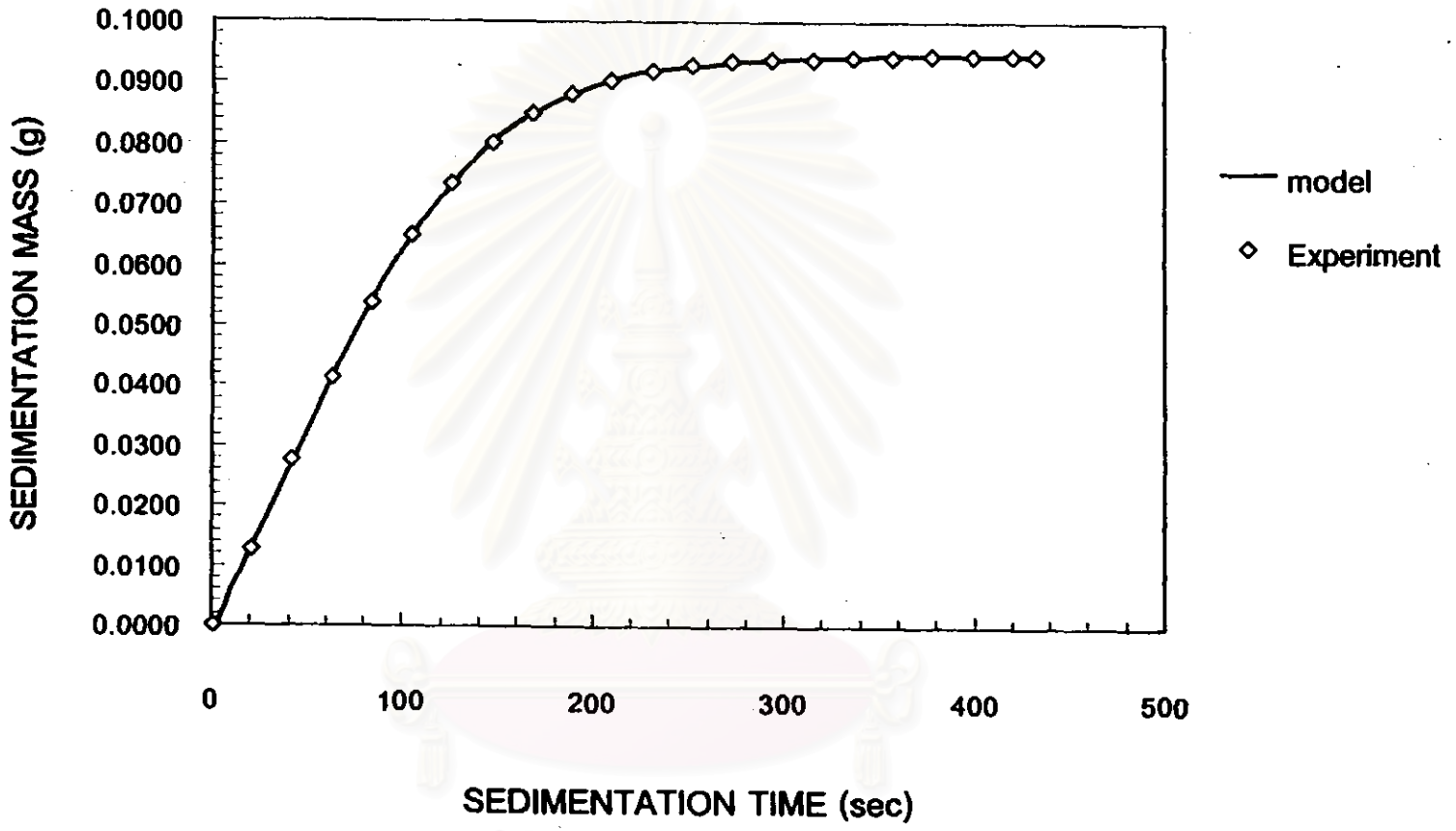
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



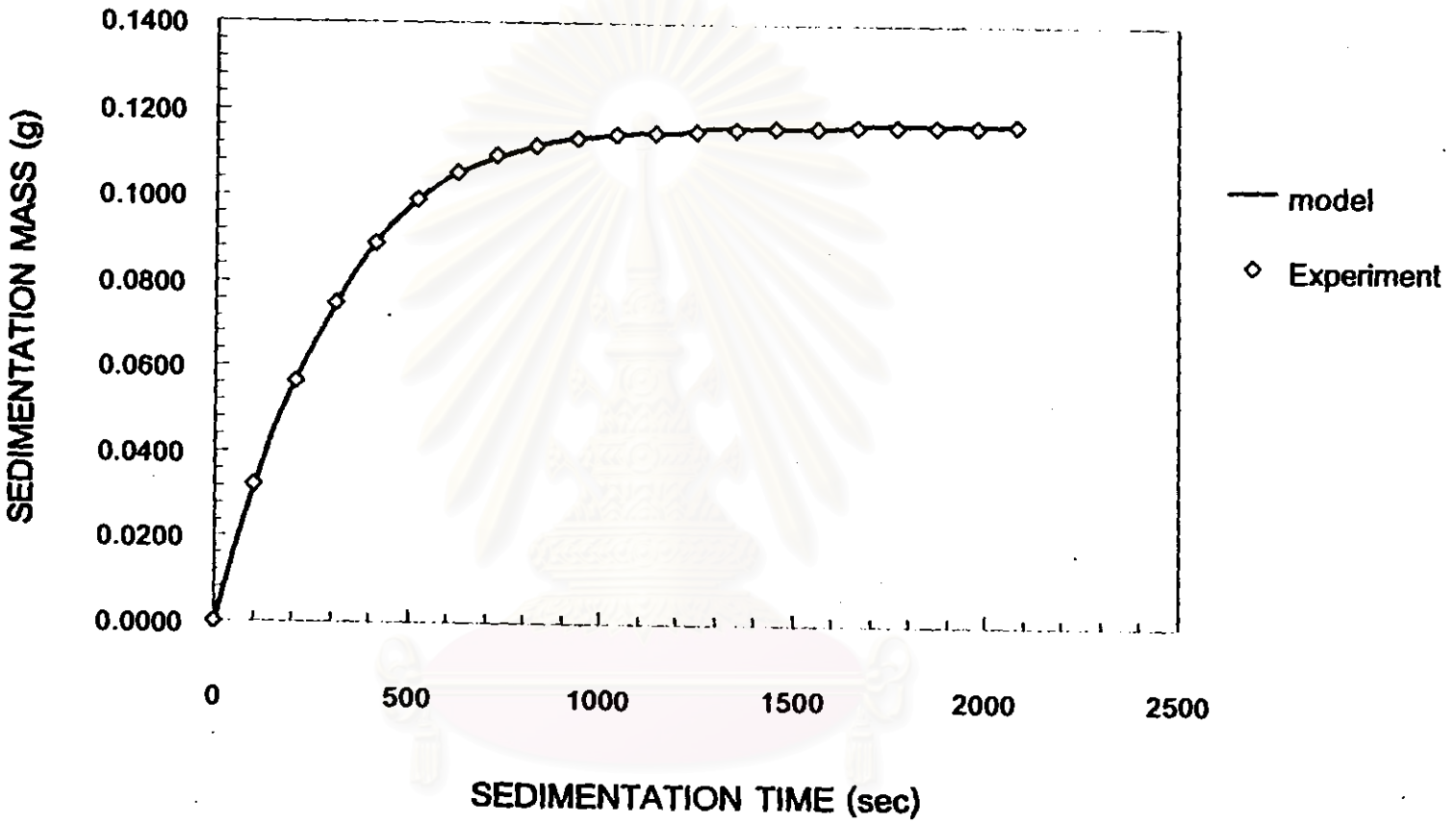
รูปที่ 3.5 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.1



รูปที่ 3.6 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักรองอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดรองอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนรองอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.3

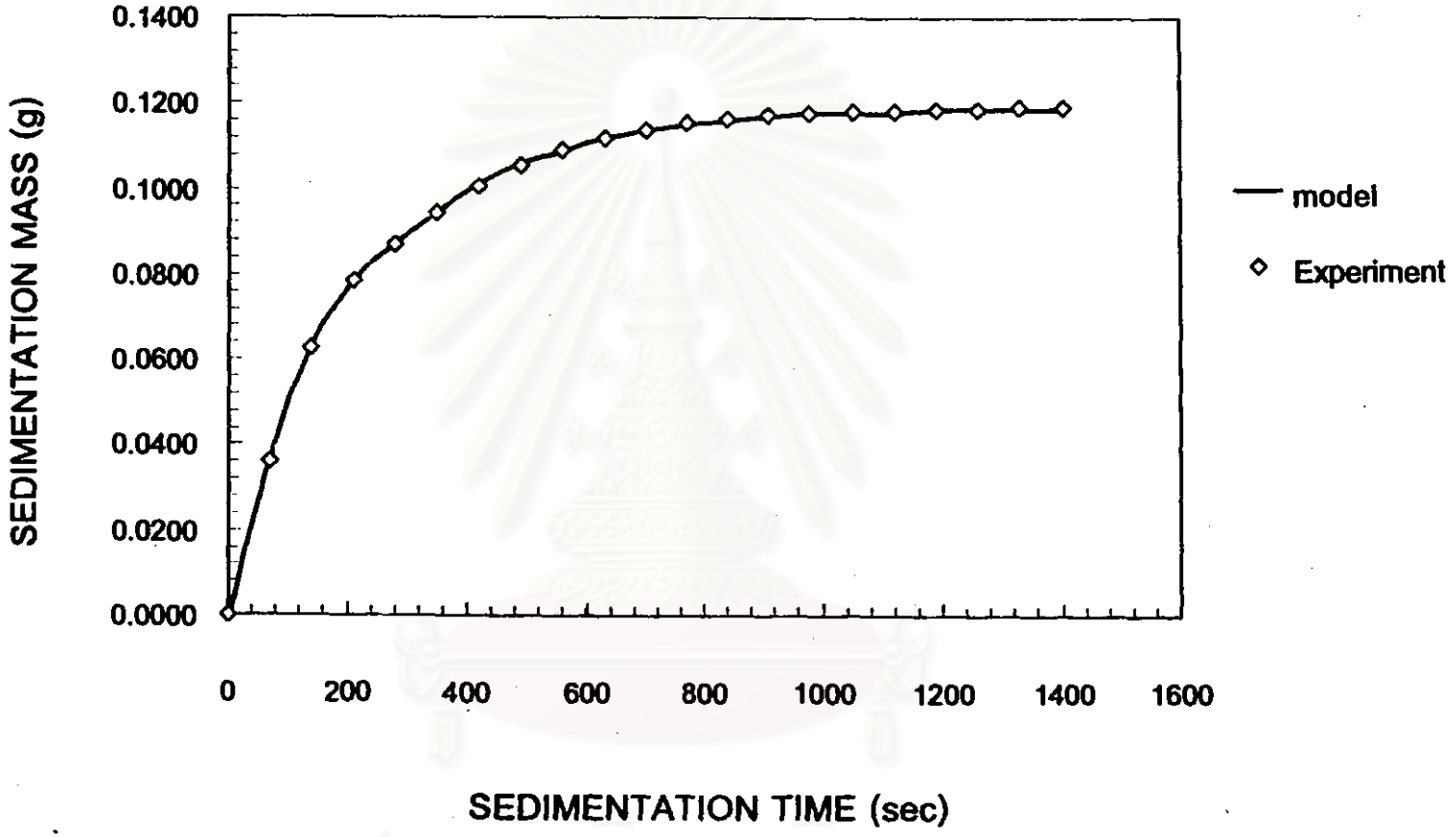


รูปที่ 3.7 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค JIS TEST POWDER II, No.4

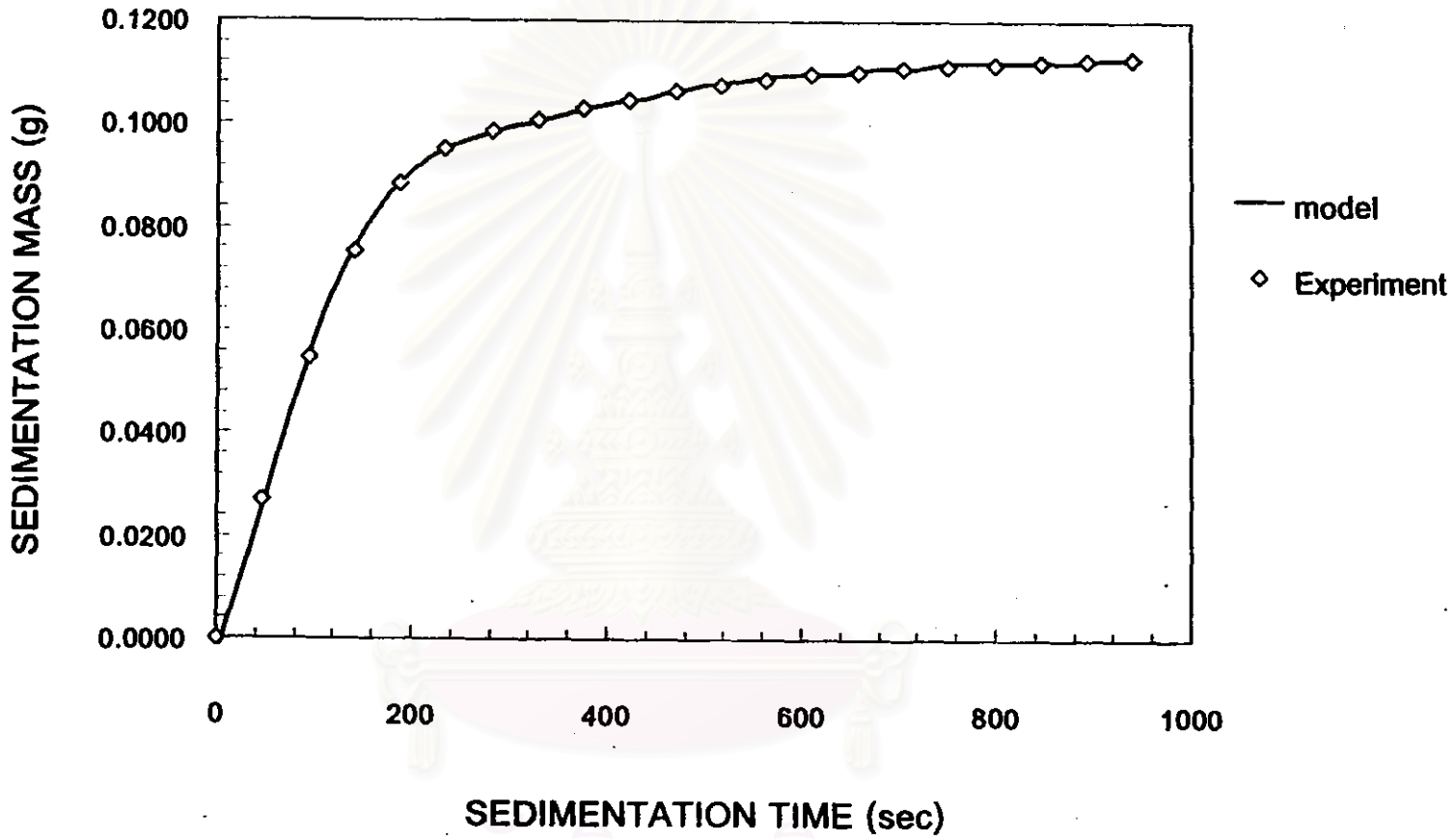


รูปที่ 3.8 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค BIMODAL 1

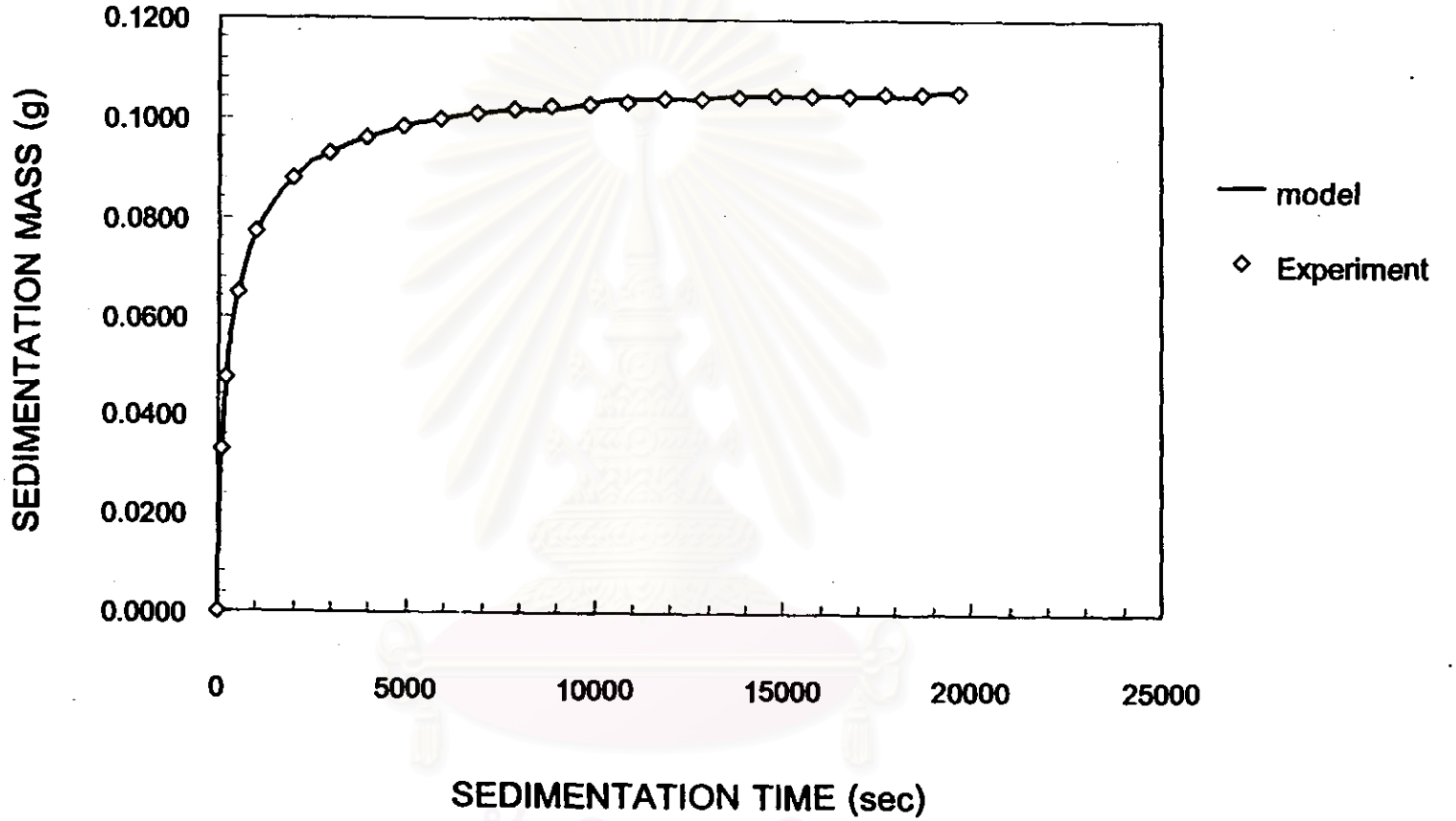
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



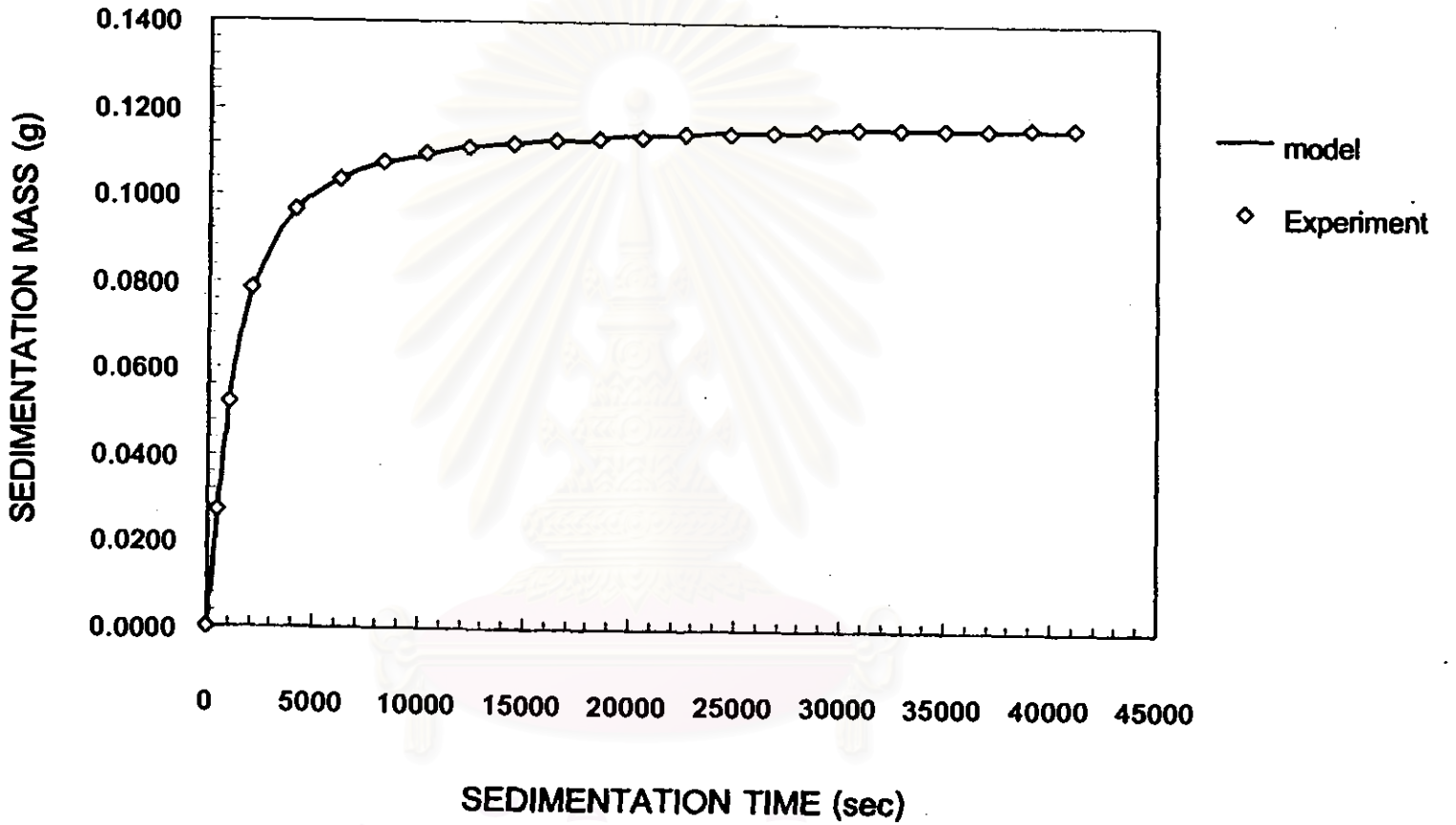
รูปที่ 3.9 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค BIMODAL 2



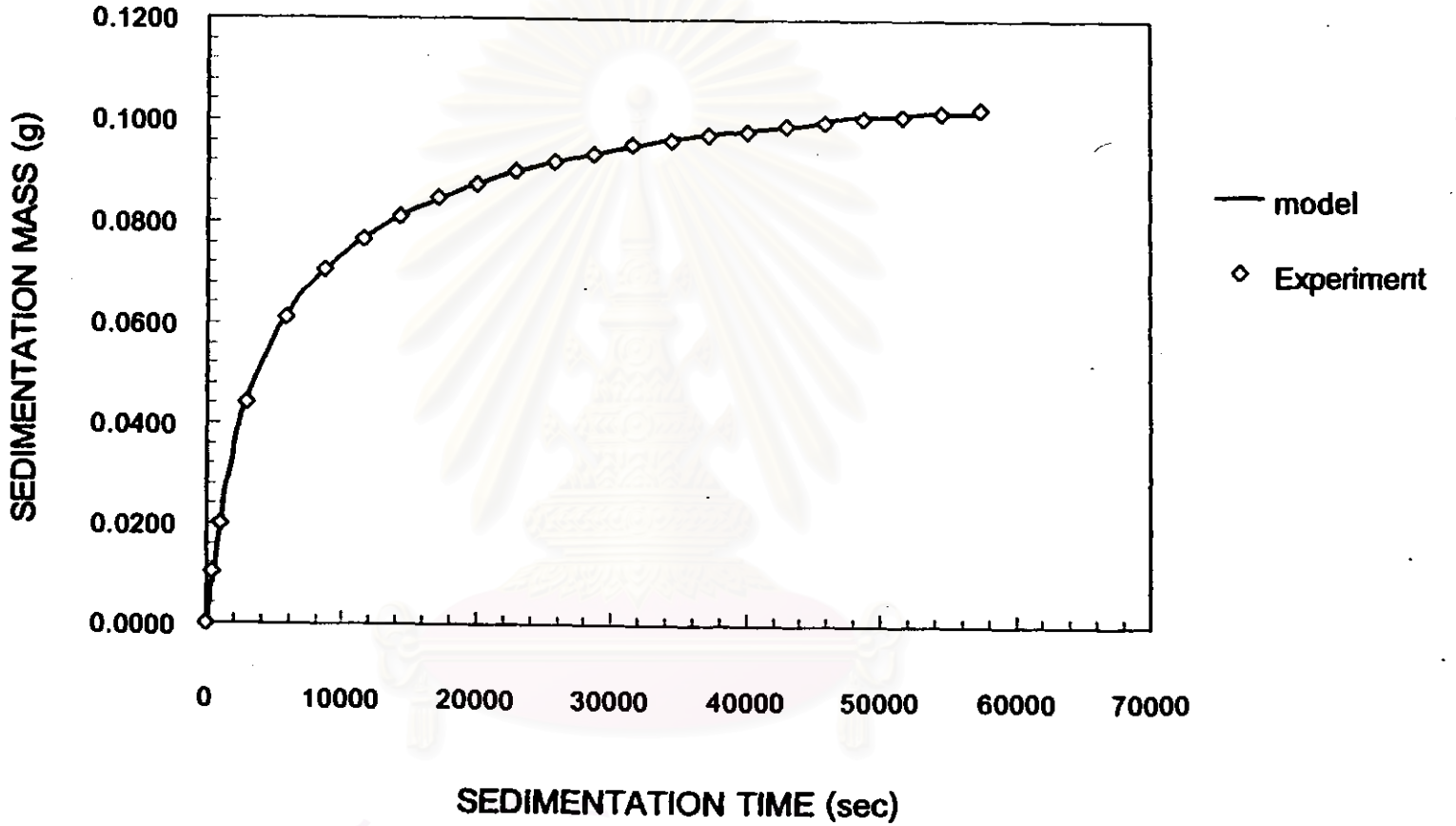
รูปที่ 3.10 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค BIMODAL 3



รูปที่ 3.11 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.5



<u>รูปที่ 3.12</u> ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักรองอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดรองอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนรองอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.10



รูปที่ 3.13 ผลการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าน้ำหนักของอนุภาคที่สะสมบนจานรับน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม AUTOCAL-JIS กับข้อมูลการทดลองวัดขนาดของอนุภาคโดยวิธีการตกตะกอนของอนุภาค JIS TEST POWDER I, No.11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย