

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

คันสนีย์ กำธนาทรัพย์. ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโพรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์, (2548)

สมชาย สวดยสะอาด. อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2547)

### ภาษาอังกฤษ

Basu P., and Fraser S.A. Circulating Fluidized Bed Boiler. Butterworth-Heinemann. (1991)

Bi H.T. and Grace J.R. Flow regime diagrams for gas-solid fluidization and upward transport. Int. J. Multiphase Flow 21(6) (1995), 1229-1236

Bai D., Shibuya E., Masuda Y., Nishio K., Nakagawa N. and Kato K. Distinction between upward and downward flow in circulating fluidized bed. Powder Technology 84 (1995), 75-81

Benyahia S., Arastoopour H., Knowlton T.M. and Massah H. Simulation of particles and gas flow behavior in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase. Powder Technology 112 (2000), 24-33

Choi J.-H., Park J.-H., Choung W.M., Kang Y. and Kim S.D. Hydrodynamic characteristics of fine particles in the riser and standpipe of a circulating fluidized bed. Korean Journal Chemical Engineering 12(2) (1995), 141-145

Grace J. R., Avedan A. and Knowlton T. M. Circulating Fluidized Beds London Chapman & Hall (1997)

Gidaspow D., Jung J. and Singh R.K. Hydrodynamics of fluidization using kinetic theory: an emerging paradigm 2002 flour-daniel lecture. Powder Technology 148 (2004), 123-141

Hirschberg B. and Werther J. Factors affecting solids segregation in circulating fluidized-bed riser. AIChE Journal 44(1) (1998), 25-34

- Huilin L., Yunhua Z., Zhiheng S., Ding J. and Jiying J. Numerical simulations of gas-solid flow in tapered riser. Powder Technology 169 (2006), 89-98
- Issangya A.S., Bai D., Bi K.S., Zhu J. and Grace J.R. Suspension densities in a high density circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Science 54 (1999), 5451-5460
- Kunii D. and Levenspiel O. Fluidization Engineering. New York John Wiley and Sons Inc (1969)
- Kunii D. and Levenspiel O. Circulating fluidized-bed reactors. Chemical Engineering Science 52 (1997), 2471-2482
- Kim S.H. and Han G.Y. An analysis of pressure drop fluctuation in a circulating fluidized bed. Korean Journal Chemical Engineering 16(5) (1999), 677-683
- Kim S.W., Kirbas G., Bi H., Lim J.C., and Grace J.R. Flow behavior and regime transition in a high-density circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Science 59 (2004), 3955-3963
- Li Z.Q., Wu C.N., Wei F. and Jin F. Experimental study of high-density gas-solid flow in a new coupled circulating fluidized bed. Powder Technology 139 (2004), 214-220
- Mastellone M.L. and Arena U. The Effect of particle size and density on solids distribution along the riser of a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Science 54 (1999), 5383-5391
- Monazam E.R., Shadle L.J., Mei J.S. and Spenik J. Identification and characteristics of different flow regime in a circulating fluidized bed. Powder Technology 155 (2005), 17-25
- Nieuwland J.J., Delnoij E., Kuipers J.A.M. and Swaaij W.P.M van. An engineering model for dilute riser flow. Powder Technology 90(2) (1997), 115-123
- Pugsley T.S. and Berruti F. A predictive hydrodynamic model for circulating fluidized bed riser. Powder Technology 89 (1996), 57-69
- Parssiene J.H. and Zhu J.-X. Particle velocity and flow development in a long and high-flux circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Science 56 (2001), 5295-5303

- Pandey P., Turton R., Yue P. and Shadle L. Non intrusive particle motion studies in the near wall region of a pilot-scale circulating fluidized bed. Industrial Engineering and Chemistry Research 43 (15) (2004), 4155-4165
- Schlichthaerle P. and Werther J. Axial pressure profiles and solid concentration distribution in the CFB bottom zone. Chemical Engineering Science 54(22) (1999), 5485-5493
- Smolders K. and Baeyens J. Gas fluidized beds operating at high velocities: a critical review of occurring regimes. Powder Technology 119 (2001), 269-291
- Tartan M. and Gidaspow D. Measurement of granular temperature and stresses in risers. AIChE Journal 50(8) (2004), 1760-1775
- Wang X., Gao S., Xu Y. and Zhang J. Gas-solid flow patterns in a novel dual – loop FCC riser. Powder Technology 152 (2005), 90-99
- Xu G. and Gao S. Necessary parameters for specifying the hydrodynamics of circulating fluidized bed riser- a review and reiteration. Powder Technology 13(1-2) (2003), 63-67
- Zhou J., Grace J.R., Jim C.J. and Brereton C.M.H. Particle velocity profile in a circulating fluidized bed riser of square cross section. Chemical Engineering Science 50 (1995), 237-244
- Zhang M., Qian Z., Yu H. and Wei F. The solid flow structure in a circulating fluidized bed riser/downer of 0.42-m diameter. Powder Technology 129 (2003), 46-52
- Calculations [online], available from: <http://www.filtration-and-separation.com>, [2006, June 1]

การไหลของเม็ดแก้วในช่วงความเร็วอากาศ 7-9 เมตรต่อวินาที ได้เช่นเดียวกับระบบของเม็ดแก้วที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก

- ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกพบรูปแบบความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์ลดลง

จากผลการทดลองในตอนที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ในระบบของเม็ดแก้วช่วยทำให้การไหลของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ (Cluster) ของเม็ดแก้ว

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัย ในขณะที่ใช้งานมีผู้ร่วมใช้หลายท่าน ซึ่งทำให้อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าสู่โรเตอร์ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการทดลองต้องคอยปรับอัตราการไหลของอากาศให้คงที่เสียก่อน จึงจะดำเนินการทดลองต่อไป
2. ควรปรับตำแหน่งความสูงของท่อส่งผ่านให้อยู่ใกล้กับตัวกระจายอากาศของท่อโรเตอร์มากขึ้นเพื่อให้มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคทางด้านล่างของโรเตอร์
3. อนุภาคขนาดใหญ่ที่นำมาเป็นวัสดุเบดควรที่จะให้ความหนาแน่นของอนุภาคที่ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเม็ดแก้วเพื่อที่จะได้ศึกษาถึงผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อรูปแบบการไหลของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณอัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้ว

การคำนวณอัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้ว ( $G_s$ )

$$G_s = \frac{W}{At} \text{ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)}$$

โดยที่  $W$  คือ ปริมาณของเม็ดแก้วที่สะสมบนวาล์วปีกผีเสื้อ โดยกำหนดให้เท่ากับ 1 กิโลกรัม (กิโลกรัม)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโรเตอร์ (ตารางเมตร)

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัม (วินาที)

#### ข้อมูลการทดลอง

เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อของระบบเม็ดแก้ว-อากาศ และระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก ที่สภาวะการทดลองดังนี้

- เปิดวาล์วที่ท่อส่งผ่านร้อยละ 50
- อัตราการไหลของอากาศในท่อป้อนกลับเท่ากับ 400 ลิตรต่อนาที
- ปริมาณเริ่มต้นในท่อป้อนกลับเท่ากับ 10 กิโลกรัม

1) เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อ ที่ความเร็วอากาศ ( $U_g$ ) ต่างๆ

ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ก.1

ตาราง ก.1 เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อในระบบ  
เม็ดแก้ว-อากาศ

ครั้งที่	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
	t (วินาที)	t (วินาที)	t (วินาที)
1	7.20	6.70	6.40
2	7.00	6.87	6.20
3	6.99	6.86	6.30



2) เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อ ที่ความเร็วอากาศ ( $U_g$ ) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก แสดงดังตาราง ก.2

ตาราง ก.2 เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อในระบบ  
เม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

ครั้งที่	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
	t (วินาที)	t (วินาที)	t (วินาที)
1	5.24	4.89	4.55
2	5.05	4.90	4.75
3	5.13	4.80	4.77

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการหมุนเวียนของของแข็งภายในโรเตอร์ ( $G_s$ )

$$\text{จากสูตรการคำนวณพื้นที่หน้าตัด (A)} = \pi D^2/4$$

$$\text{ท่อโรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D)} = 0.05 \text{ เมตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นท่อโรเตอร์มีพื้นที่หน้าตัด} &= \pi(0.05)^2/4 \\ &= 1.96 \times 10^{-3} \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

จากตาราง ก.1 การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที

$$G_s = \frac{W}{At} \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที}$$

กำหนดให้ปริมาณของเม็ดแก้วที่สะสมบนวาล์วปีกผีเสื้อ หรือ W เท่ากับ 1 กิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad G_s &= \frac{1}{0.00196 \times 7.20} \\ &= 70.77 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

### อัตราการผลิตของเม็ดแก้ว

1) อัตราการผลิตของเม็ดแก้วที่ความเร็วอากาศ ( $U_g$ ) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ก.3

ตาราง ก.3 อัตราการผลิตของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ครั้งที่	$G_s$ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที		
	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
1	70.77	76.05	79.61
2	72.79	74.17	82.19
3	72.89	74.28	80.88

2) อัตราการผลิตของเม็ดแก้วที่ความเร็วอากาศ ( $U_g$ ) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก แสดงดังตาราง ก.4

ตาราง ก.4 อัตราการผลิตของของแข็งในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

ครั้งที่	$G_s$ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)		
	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
1	97.30	104.34	106.07
2	101.03	104.12	107.41
3	99.45	105.85	106.96



**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว**

การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้วเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพมาใช้ในการคำนวณ โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณแสดงดังตาราง ข.1 ตัวอย่างข้อมูลระยะทางและมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ที่ความเร็วอากาศต่างๆ และที่สภาวะการทดลองเช่นเดียวกับภาคผนวก ก

ตาราง ข.1 ตัวอย่างข้อมูลระยะทางและมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ลำดับที่	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที		$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที		$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที	
	ระยะทาง (มม.)	มุม	ระยะทาง (มม.)	มุม	ระยะทาง (มม.)	มุม
1	1.31	140.57	1.24	175.84	1.83	172.96
2	0.74	154.98	1.82	166.47	1.86	172.35
3	0.83	159.62	1.62	151.92	1.93	160.30
4	1.01	177.45	1.80	175.71	1.61	167.12
5	1.28	173.99	1.42	173.65	1.76	155.07

\* คือ มุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ได้วัดจากแนวแกน (องศา)

การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว

การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมี และแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1 และ 3.2 ที่อธิบายไว้ในบทที่ 3

$$C_r = (L/t)\cos\theta \quad (3.1)$$

$$C_z = (L/t)\sin\theta \quad (3.2)$$

โดยที่  $C_r$  คือ ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี (radial velocity), เมตรต่อวินาที

$C_z$  คือ ความเร็วของของแข็งในแนวแกน (axial velocity), เมตรต่อวินาที

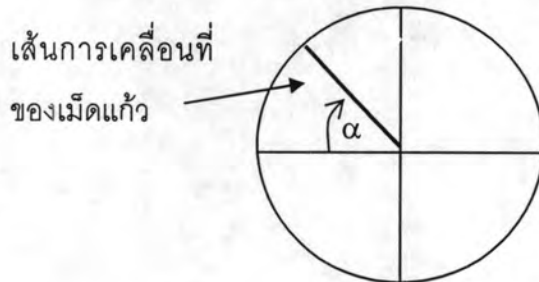
$L$  คือ ระยะทางที่ของแข็งเคลื่อนที่ได้, เมตร

$t$  คือ เวลาที่เม็ดแก้วใช้ในการเคลื่อนที่, วินาที หาได้จากส่วนกลับของความเร็วหน้ากล้อง

$\theta$  คือ มุมที่ของแข็งเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน (radian)

### ตัวอย่างการคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว

จากตาราง ข.1 ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ข้อมูลที่ 1 ระยะทางที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 1.31 มิลลิเมตร และมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวแกนเท่ากับ 140.57 องศา โดยใช้ความเร็วหน้ากล้องเท่ากับ 1/2000 หรือ 0.0005 วินาที ซึ่งตำแหน่งเส้นการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณอยู่ที่ Quadrant 2 แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ตำแหน่งของเส้นการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่นำมาเป็นตัวอย่าง

- คำนวณหามุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{มุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน } (\alpha) &= | \text{มุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวแกน} - 90 | \\ &= | 140.57 - 90 | \\ &= 50.57 \text{ องศา} \end{aligned}$$

$\alpha$  เป็นมุมที่วัดจากแนวนอนใน Quadrant 2 แสดงดังรูปที่ ข.2

- เปลี่ยน  $\alpha$  ที่มีหน่วยเป็นองศา ให้เป็น  $\theta$  ที่มีหน่วยเป็น radian โดยวิธีการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้

เมื่อ มุม 180 องศา เท่ากับ  $\pi$  radian

ดังนั้น มุม  $(180 - \alpha)$  องศา เท่ากับ  $\frac{(180 - \alpha) \times \pi}{180}$  radian

เมื่อแทนค่า  $\alpha$  จะได้

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{(180 - 50.5722) \times \pi}{180} \\ &= 2.25 \text{ radian} \end{aligned}$$

- แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการความเร็วของเม็ดแก้วดังแสดงในข้อที่ 1

$$\begin{aligned} C_r &= (1.3102 \times 10^{-3} / 0.0005) \cos 2.25 \\ &= 1.67 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_z &= (1.3102 \times 10^{-3} / 0.0005) \sin 2.25 \\ &= 2.02 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีและในแนวแกนมีค่าเท่ากับ 1.67 และ 2.20 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ความเร็วของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ และในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

- ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ข.2

ตาราง ข.2 ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ความสูง (ซม.)	ความเร็วของเม็ดแก้ว (เมตรต่อวินาที)		
	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
30	1.03	1.38	1.48
60	2.04	2.32	2.72
180	2.34	2.75	3.1
300	2.41	3.01	3.28
370	2.71	3.04	3.31

- ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาทีในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ข.3

ตาราง ข.3 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ตำแหน่งใน แนวรัศมี (r/R) (-)	ความเร็วของเม็ดแก้ว (เมตรต่อวินาที)				
	H = 30 ซม.	H = 60 ซม.	H = 180 ซม.	H = 300 ซม.	H = 370 ซม.
1	1.07	1.27	2.15	3.72	4.18
0.72	1.25	1.60	2.90	3.79	4.20
0.24	1.49	2.30	3.12	3.86	4.22
0	1.64	2.70	3.59	3.93	4.24

H = ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์จากตัวกระจายอากาศ (ซม.)

- ความเร็วของเม็ดแก้วที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นและลงตามแนวรัศมี และร้อยละของจำนวนเม็ดแก้วในทิศทางขึ้นและลง ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที และที่ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์ 180 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ข.4

ตาราง ข.4 ร้อยละของปริมาณของเม็ดแก้วและความเร็วของเม็ดแก้วในทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นและลงในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R), (-)	ความเร็วของเม็ดแก้วในแต่ละ ทิศทาง (เมตรต่อวินาที)		ร้อยละของจำนวนเม็ดแก้วใน แต่ละทิศทาง (%)	
	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง
1	3.39	-1.08	99	1
0.72	3.26	-1.48	97	3
0.24	2.74	-2.39	19	81
0	1.90	-2.16	5	95

- ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก แสดงดังตาราง ข.5

ตาราง ข.5 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

ตำแหน่งใน แนวรัศมี (r/R) (-)	ความเร็วของเม็ดแก้ว (เมตรต่อวินาที)				
	H = 30 ซม.	H = 60 ซม.	H = 180 ซม.	H = 300 ซม.	H = 370 ซม.
1	1.25	1.39	3.66	4.27	4.38
0.72	1.36	1.69	3.80	4.27	4.38
0.24	1.42	2.74	3.96	4.33	4.42
0	1.99	3.06	4.06	4.44	4.44

H = ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์จากตัวกระจายอากาศ (ซม.)

**ภาคผนวก ค**  
**การคำนวณสมบัติของของแข็ง**

ข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ ค.1

ตาราง ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ

ข้อมูลพื้นฐาน	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho_g$	1.16	kg/m <sup>3</sup>
ความหนืดของอากาศ	$\mu_g$	$1.84 \times 10^{-5}$	N.s/m <sup>2</sup>
ความหนาแน่นของเม็ดแก้ว	$\rho_s$	2200	kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติก	$\rho_s$	860	kg/m <sup>3</sup>
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	g	9.8	m/s <sup>2</sup>

1. การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้ว (Sauter mean diameter)

การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วในงานวิจัยนี้ได้คำนวณเป็น Sauter mean diameter, SMD เนื่องจากข้อมูลขนาดของเม็ดแก้วจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle analyzer พบว่าเม็ดแก้วมีขนาดอยู่ในช่วง 100-900 ไมครอน แสดงดังรูปที่ ค.2 Suater mean diameter คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่ารูปทรงกลม โดยคำนวณได้จากปริมาตรของอนุภาคต่อพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังแสดงในสมการ (1)

$$\text{Suater mean diameter, SMD} = \bar{d}_{32} = 6 \sum_i \frac{V_p}{A_p} \quad (1)$$

$$\text{โดย} \quad d_{32} = 6 \frac{V_p}{A_p} \quad (2)$$

โดยสามารถที่จะคำนวณได้จากโปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter, SMD ([www.filtration-and-separation.com](http://www.filtration-and-separation.com)) แสดงดังตารางที่ ค.2



**Analysis Result**

Sample Details		
Sample ID: GB 1	Run Number: 9	Measured: 30 Mar 2006 9:48PM
Sample File: OTHER24	Record Number: 238	Analysed: 30 Mar 2006 9:48PM
Sample Path: C:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Dry Analysis System Dispersing medium : None Tested by Kaew Kajornchaiyakul		

System Details			
Range Lens: 300 mm	Beam Length: 10.00 mm	Sampler: MS65	Obscuration: 6.4 %
Presentation: 3RHA	[Particle R.I. = ( 1.4500, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.0000]	Residual: 12.984 %
Analysis Model: Polydisperse Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1118 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0117 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 387.91 um	D (v, 0.5) = 536.92 um	D (v, 0.9) = 695.23 um
D [4, 3] = 540.76 um	D [3, 2] = 510.95 um	Span = 5.724E-01	Uniformity = 1.612E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.49	0.00	0.58	0.00	22.49	0.00	26.20	0.00
0.58	0.00	0.67	0.00	26.20	0.00	30.53	0.00
0.67	0.00	0.78	0.00	30.53	0.00	35.56	0.00
0.78	0.00	0.91	0.00	35.56	0.00	41.43	0.00
0.91	0.00	1.06	0.00	41.43	0.00	48.27	0.00
1.06	0.00	1.24	0.00	48.27	0.00	56.23	0.00
1.24	0.00	1.44	0.00	56.23	0.00	65.51	0.00
1.44	0.00	1.68	0.00	65.51	0.00	76.32	0.00
1.68	0.00	1.95	0.00	76.32	0.00	88.91	0.00
1.95	0.00	2.28	0.00	88.91	0.00	103.58	0.00
2.28	0.00	2.65	0.00	103.58	0.00	120.67	0.00
2.65	0.00	3.09	0.00	120.67	0.00	140.58	0.00
3.09	0.00	3.60	0.00	140.58	0.01	163.77	0.01
3.60	0.00	4.19	0.00	163.77	0.06	190.80	0.07
4.19	0.00	4.88	0.00	190.80	0.20	222.28	0.27
4.88	0.00	5.69	0.00	222.28	0.57	258.95	0.84
5.69	0.00	6.63	0.00	258.95	1.42	301.68	2.26
6.63	0.00	7.72	0.00	301.68	3.29	351.46	5.56
7.72	0.00	9.00	0.00	351.46	7.52	409.45	13.08
9.00	0.00	10.48	0.00	409.45	16.58	477.01	29.66
10.48	0.00	12.21	0.00	477.01	26.67	555.71	56.33
12.21	0.00	14.22	0.00	555.71	25.32	647.41	81.64
14.22	0.00	16.57	0.00	647.41	14.09	754.23	95.73
16.57	0.00	19.31	0.00	754.23	4.27	878.67	100.00
19.31	0.00	22.49	0.00				

รูปที่ ค.1 ข้อมูลขนาดของเม็ดแก้วจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle analyzer

ตาราง ค.2 โปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter ([www.filtration-andseparation.com](http://www.filtration-andseparation.com))

Index	Top of increment (microns)	Cumulative mass undersize (%)	Mid point (microns)	Mass fraction by grade (-)	Mass fraction by mid size	Mass fraction over mid point
1	878.67	100				
2	754.23	95.73	816.45	0.0154	12.5733	0.0002
3	647.41	81.64	700.82	0.0776	54.3836	0.0036
4	555.74	56.33	601.57	0.0551	33.1467	0.0035
5	477.01	29.66	516.37	0.0716	36.9724	0.0054
6	409.45	13.08	443.23	0.0863	38.2507	0.0076
7	351.46	5.56	380.45	0.0962	36.5997	0.0098
8	301.68	2.26	326.57	0.153	49.9652	0.0112
9	258.95	0.84	280.31	0.0893	25.0321	0.0124



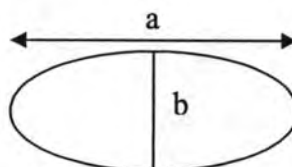
Index	Top of increment (microns)	Cumulative mass undersize (%)	Mid point (microns)	Mass fraction by grade (-)	Mass fraction by mid size	Mass fraction over mid point
10	222.28	0.27	240.61	0.0916	22.0403	0.0132
11	190.80	0.07	206.54	0.1230	25.4044	0.0134
12	163.77	0.01	177.28	0.0965	17.1080	0.0252
13	0.00	0.00	81.88	0.0444	3.6356	0.0208
	Total			1.0000	355.1125	0.1266

Mean size by mass:	355.11	micron
Specific surface area/volume	$11.71 \times 10^{-3}$	$\text{micron}^{-1}$
Specific surface area/volume	$11.71 \times 10^{-6}$	$\text{m}^{-1}$
Suater mean diameter	512	micron

โดยเมื่อใส่ข้อมูลในคอลัมน์ขนาดอนุภาค (Top of increment, micron) และในช่องของร้อยละการเพิ่มขึ้นของอนุภาคที่เล็กกว่ามาตรฐาน (Cumulative mass undersize, %) ของโปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter ข้างต้น จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย หรือ Sauter mean diameter ของเม็ดแก้วเท่ากับ 512 ไมครอน แสดงดังรูปที่ ค.2

## 2. การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติก

เม็ดพลาสติก HDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรูปร่างเป็นวงรี ดังนั้นจึงต้องทำการหาขนาดของอนุภาคด้วยการหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติก ( $d_e$ ) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการของ Heyt and Diaz



$$d_e = 1.55A^{0.625} / P^{0.25}$$

$$\text{โดย } A = \pi.b^2 / 4 + a.b - b^2$$

$$P = \pi.b + 2.a - 2.b$$

### การคำนวณ

ในการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกได้วัดขนาดของเม็ดพลาสติกทั้งหมด 10 อนุภาค แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยขนาดของเม็ดพลาสติกที่วัดได้แสดงดังตาราง ค.2

ตาราง ค. 3 ข้อมูลขนาดของเม็ดพลาสติก

อนุภาค	a (มิลลิเมตร)	b(มิลลิเมตร)
1	6.33	5.21
2	6.52	5.76
3	6.07	5.23
4	6.24	5.74
5	6.03	5.53
6	6.28	4.63
7	6.28	5.22
8	6.66	5.89
9	6.75	5.63
10	6.65	5.89
Average	6.42	5.51

จากตาราง ค.3 จะได้ ความยาวเฉลี่ยของเส้น a เท่ากับ 6.278 และ b เท่ากับ 5.373

ทำการแทนค่า a และ b ลงในสมการ

$$A = \pi \times 5.51^2 / (4 + (6.42 \times 5.51)) - 5.51^2$$

$$A = 11.06 \text{ มิลลิเมตร}$$

และ

$$P = (\pi \times 5.51) + (2 \times 6.42) - (2 \times 5.51)$$

$$P = 15.49 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น

$$d_e = 1.55 \times 11.06^{0.625} / 15.49^{0.25}$$

$$d_e = 4.477 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากการคำนวณข้างต้นจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยเท่ากับ 4477 ไมครอน

### 3. การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart (Geldart's Classification)

การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart สามารถจำแนกได้ตามรูปที่ 2.9 จากรูปตัวแปรที่ต้องการคือ ผลต่างความหนาแน่นของของแข็งและอากาศ และขนาดของของแข็ง

- เม็ดแก้ว

$$\rho_s - \rho_g = 2200 - 0.0000184 = 2.19999 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากข้อที่ 1 } d_p = 0.000512 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.10 เม็ดแก้วสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม B

- เม็ดพลาสติก

$$\rho_s - \rho_g = 860 - 0.0000184 = 0.85999 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากข้อ 2 } d_p = 0.004477 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.10 เม็ดพลาสติกสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม D

### 4. การคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ( $U_{mf}$ )

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wen and Yu

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left[ \left\{ (33.7)^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}^{0.5} - 33.7 \right]$$

จากตาราง ค.1 และ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วจากข้อ 1 แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันของเม็ดแก้วเท่ากับ 0.17 เมตรต่อวินาที

จากตาราง ค.1 และการคำนวณเส้นผ่านจากศูนย์กลางเทียบเท่าจากข้อ 2 แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันของเม็ดพลาสติกเท่ากับ 1.03 เมตรต่อวินาที

### 5. การคำนวณค่าความเร็วสุดท้าย ( $U_t$ )

- ความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วสามารถคำนวณได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel

$$U_t = \left[ \frac{4 (\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < \text{Re} < 500$$

จากตาราง ค.1 และ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วจากข้อ 1 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วเท่ากับ 3.71 เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re ว่าได้ตรงกับเงื่อนไขหรือไม่

$$\text{Re} = \rho_g U_t d_p / \mu_g$$

$$\text{Re} = (1.16 \times 3.71 \times 0.000512) / 0.000018$$

$$\text{Re} = 119.83$$

เมื่อแทนค่า  $U_t$  ที่คำนวณได้ ลงในค่า Re พบว่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วในงานวิจัยนี้เท่ากับ 3.71 เมตรต่อวินาที

- ความเร็วสุดท้ายของเม็ดพลาสติกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_t = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < \text{Re} < 20,000$$

จากตาราง ค.1 และ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกจากการข้อ 2 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วเท่ากับ 10.03 เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re ว่าได้ตรงกับเงื่อนไขหรือไม่

$$\text{Re} = \rho_g U_t d_p / \mu_g$$

$$\text{Re} = (1.16 \times 10.03 \times 0.000512) / 0.000018$$

$$\text{Re} = 2832.32$$

เมื่อแทนค่า  $U_t$  ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ในค่า Re พบว่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของเม็ดพลาสติกในงานวิจัยนี้เท่ากับ 10.03 เมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ง  
วิธีการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและ  
วิเคราะห์ความเร็วของอนุภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ



1. การบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูง

- การติดตั้งระบบการบันทึกภาพ มีขั้นตอนดังนี้
  1. ประกอบกล้องความเร็วสูงกับเลนส์เข้าด้วยกัน
  2. ต่อสายกล้องเข้ากับชุดคอมพิวเตอร์ที่เปิดโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ
  3. สอดโพรบเข้าไปในโรเตอร์โดยให้ปลายโพรบอยู่ที่ตำแหน่งที่ต้องการ และอีกด้านของโพรบที่อยู่ข้างนอกต่อโรเตอร์นำชุดกล้องความเร็วสูงมาวางให้หน้าเลนส์อยู่ติดกับหน้าโพรบ
  4. นำชุดแหล่งกำเนิดแสงมาวางด้านตรงข้ามกับกล้องความเร็วสูง และเปิดแสง
  5. เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศเข้าไปในท่อโรเตอร์ในอัตราการไหลที่กำหนด
  6. เปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่านในร้อยละการเปิดที่กำหนด
  7. ทำการปรับโฟกัส, กำลังขยายของเลนส์, ความเร็วหน้ากล้อง และความสว่างจนได้ภาพที่ชัดเจน
  8. ทำการบันทึกภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

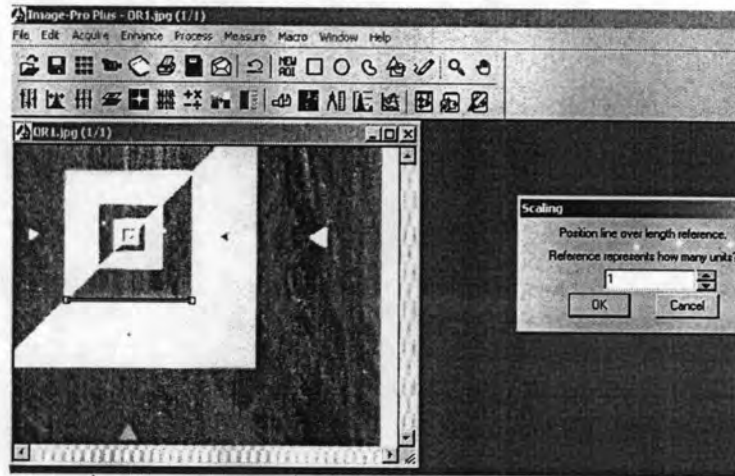
2. การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ในการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพต้องมีการปรับเทียบ (Calibrate) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหน่วยความยาวของภาพกับความยาวมาตรฐาน โดยในงานวิจัยได้ทำการปรับเทียบด้วยการถ่ายภาพกระจกที่ใช้ในการเทียบมาตรฐาน กระจกที่ใช้ปรับเทียบหน่วยความยาวแสดงดังรูปที่ ง.1

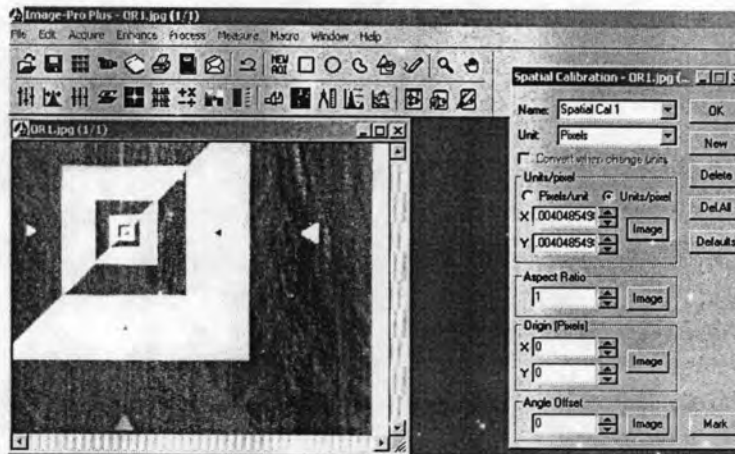
- การปรับเทียบความยาวมาตรฐานมีรายละเอียดดังนี้
  1. บันทึกภาพกระจกให้ชัดเจนมากที่สุด ในโฟกัส และกำลังขยายของเลนส์ที่ใช้ในการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาค แสดงดังรูปที่ ง.1
  2. เลือกเส้นที่ชัดเจนที่สุด แล้วลากเส้นเพื่อจะได้ความยาวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ แสดงดังรูปที่ ง.1
  3. นำความยาวเส้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพในข้อ 2 ไปปรับเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ ง.2



4. กำหนดชื่อไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ และทำการบันทึกไฟล์ไว้ดังแสดงใน แสดงดังรูปที่ ง.2



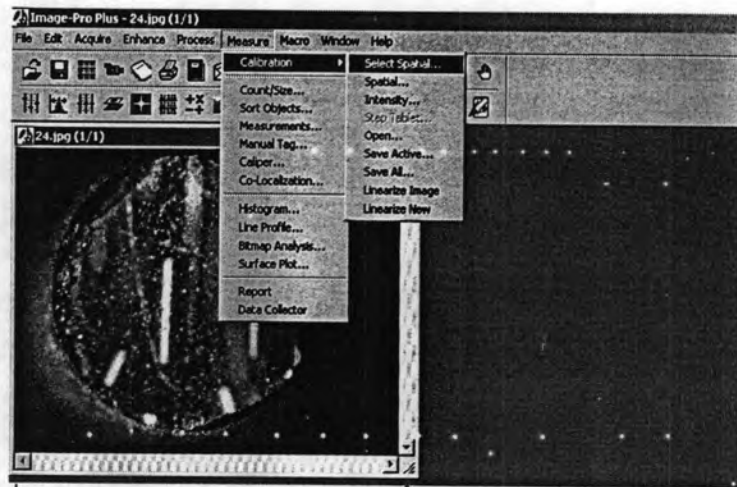
รูปที่ ง.1 ภาพกระจกที่ใช้ในการปรับเทียบและการลากเส้น



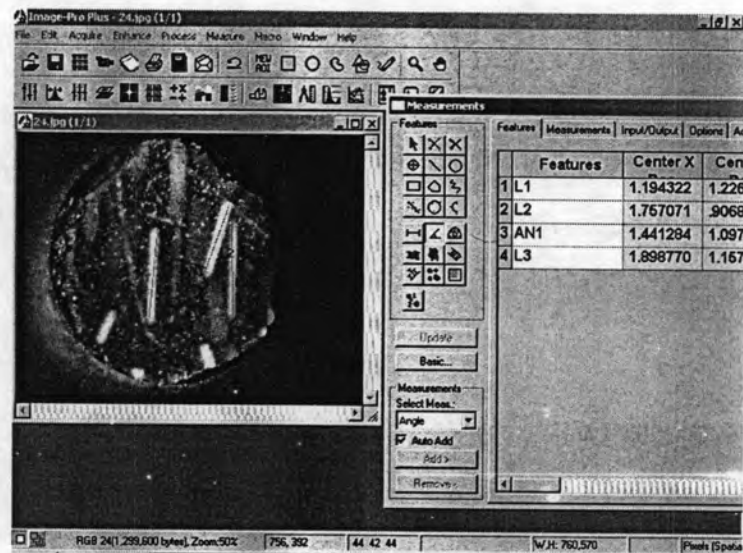
รูปที่ ง.2 การกำหนดชื่อไฟล์ และการบันทึกไฟล์ของหน่วยที่ได้ปรับเทียบแล้ว

- การวิเคราะห์ภาพที่บันทึกได้ มีรายละเอียดดังนี้
  1. เปิดแฟ้มภาพที่ทำการบันทึกไว้ แล้วทำการเปิดแฟ้มที่ทำการปรับเทียบไว้ แสดงดังรูปที่ ง.3
  2. เลือกฟังก์ชันในการวัดความยาวและมุมในการเคลื่อนที่ และทำการลากเส้น แสดงดังรูปที่ ง.4
  3. ส่งข้อมูลทีวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ไปยัง Excel ดังแสดงดังรูปที่ ง.5 และข้อมูลที่ปรากฏที่ Excel แสดงดังรูปที่ ง.6





รูปที่ ง.3 การเปิดเพิ่มภาพพร้อมเลือกทั้งการเลือกฟังก์ชันการปรับเทียบ



รูปที่ ง.4 การเลือกฟังก์ชันการลากเส้น และการลากเส้น



รูปที่ ง.5 การส่งข้อมูลไปยัง Excel

Microsoft Excel - Book1

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Arial 10 B I U

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2												
3		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
4		1 L1	1.186225	1.226711		0.802635		1.165992	1.627517	1.206468	0.825904	2.8912
5		2 L3	1.910916	1.182177		0.809872		1.902918	1.587032	1.919013	0.777322	1.1457E
6		3 L4	0.78137	1.663954		0.300576		0.712545	1.797556	0.850196	1.530352	27.255
7		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
8		1 L1	1.6761	0.947361		0.809872		1.669003	1.352216	1.684197	0.542506	1.1457E
9		2 L2	1.109303	1.064769		0.795586		1.101206	1.457478	1.1174	0.672059	1.1811E
10		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
11		1 L1	1.684197	0.86639		0.842098		1.684197	1.287439	1.684197	0.445341	
12		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
13		1 L1	0.951409	0.971652		0.744977		0.955458	1.344119	0.947361	0.599185	179.37
14		2 L2	1.611323	1.044526		0.568875		1.636814	1.327924	1.687032	0.761127	175.10
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												

Ready Sum=372.528683 NUM

Start Ad-Welch Image-Pro ... Calibration KINGSTON ... calibration ... Microsoft ... 0:45

รูปที่ ๓.6 ข้อมูลที่แสดงที่ Excel

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอ้ออำไพ ใจบุญ เกิดวันที่ 30 มิถุนายน 2525 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548

