

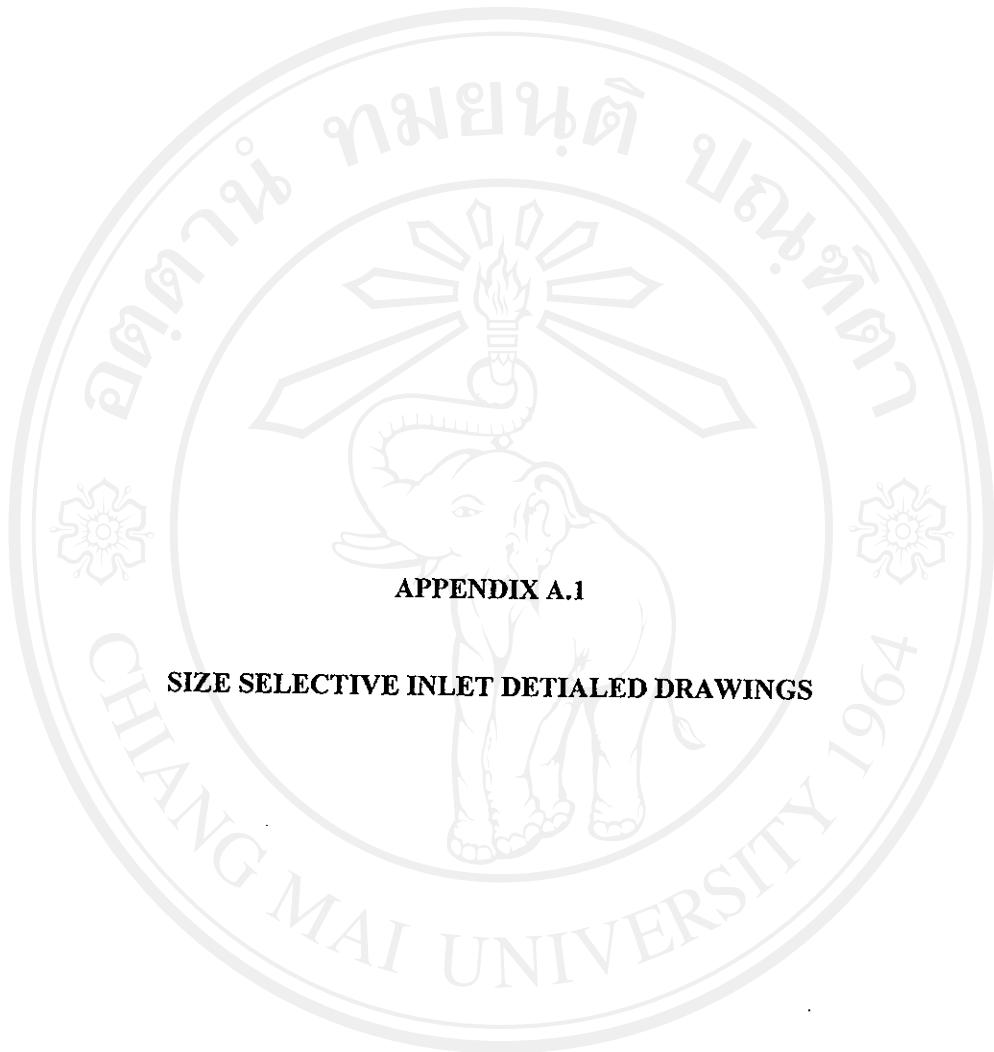
**APPENDIX A**

**TECHNICAL DRAWING FOR AN ELECTRICAL MOBILITY SPECTOMETER**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved



**APPENDIX A.1**

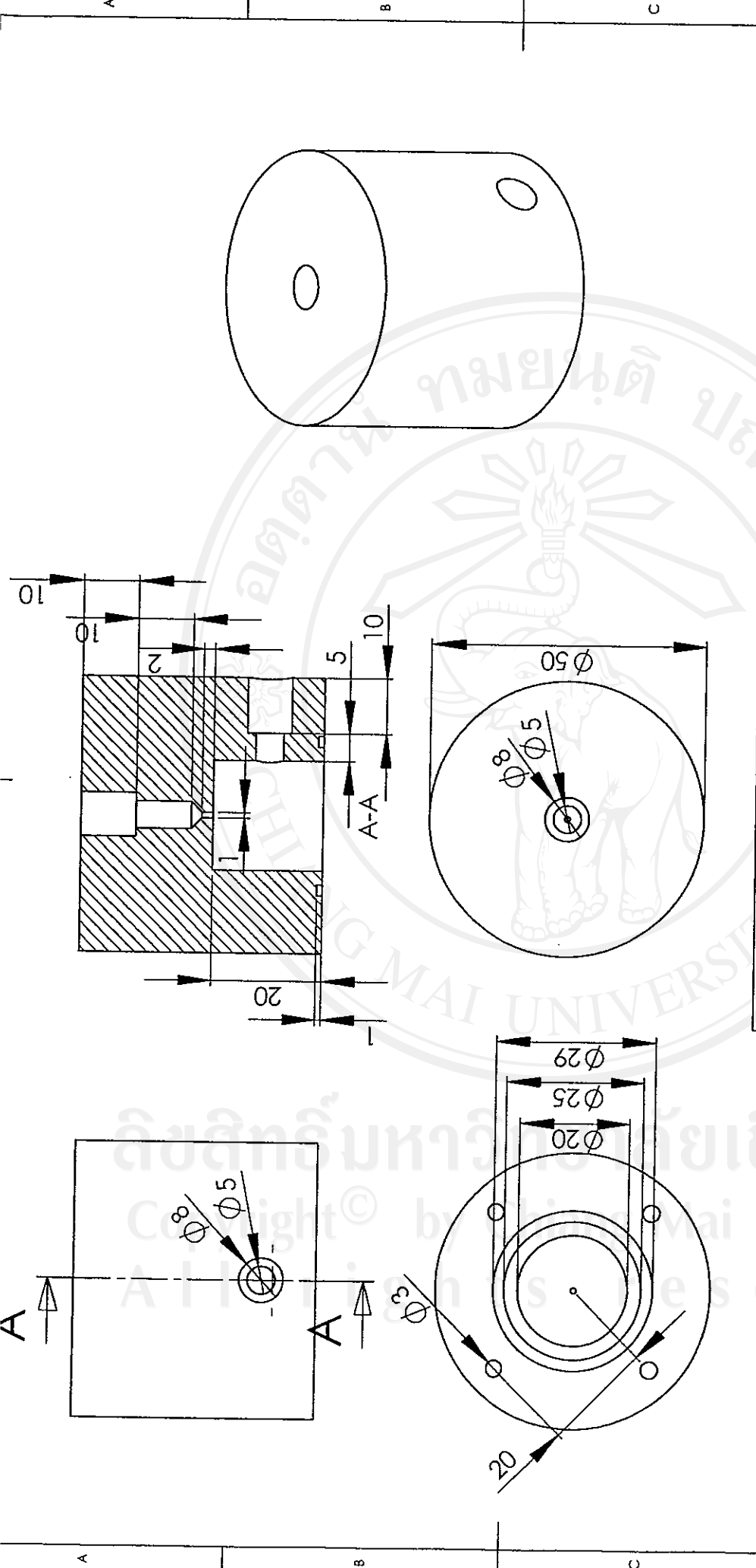
**SIZE SELECTIVE INLET DETAILED DRAWINGS**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

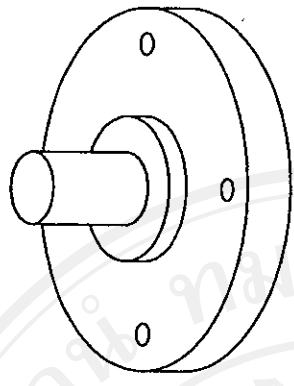
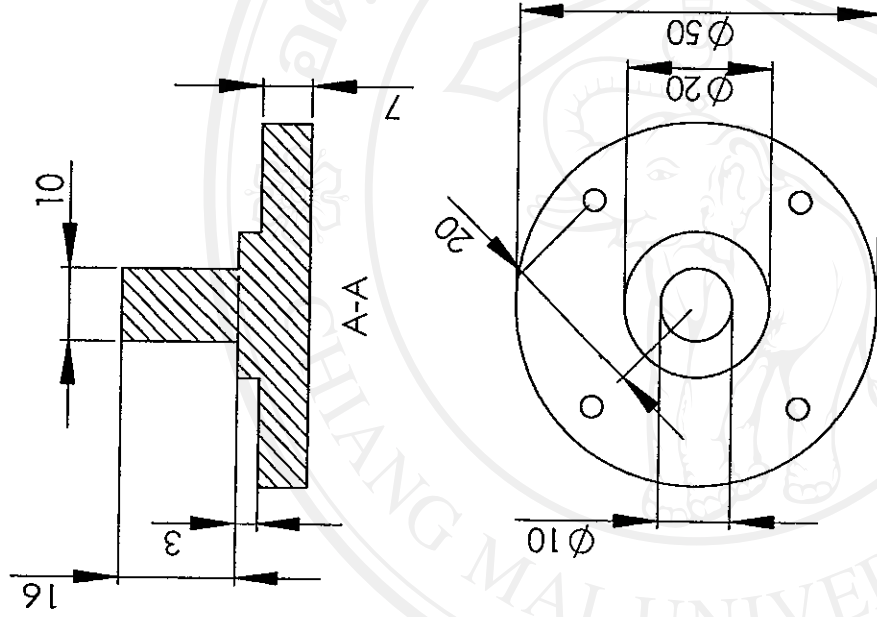
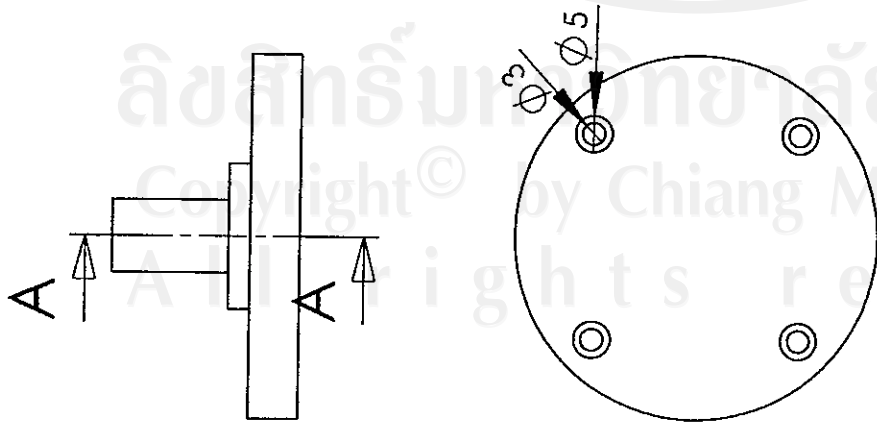
Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved





DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
<b>ME CMU</b>			
<b>Impactor</b>			
TITLE:		DWG NO. <b>1</b>	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		MATERIAL: <b>Stainless steel</b>	
FINISH: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		WEIGHT:	
NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
G.A			
SCALE: 1:1		SHEET 2 OF 3	

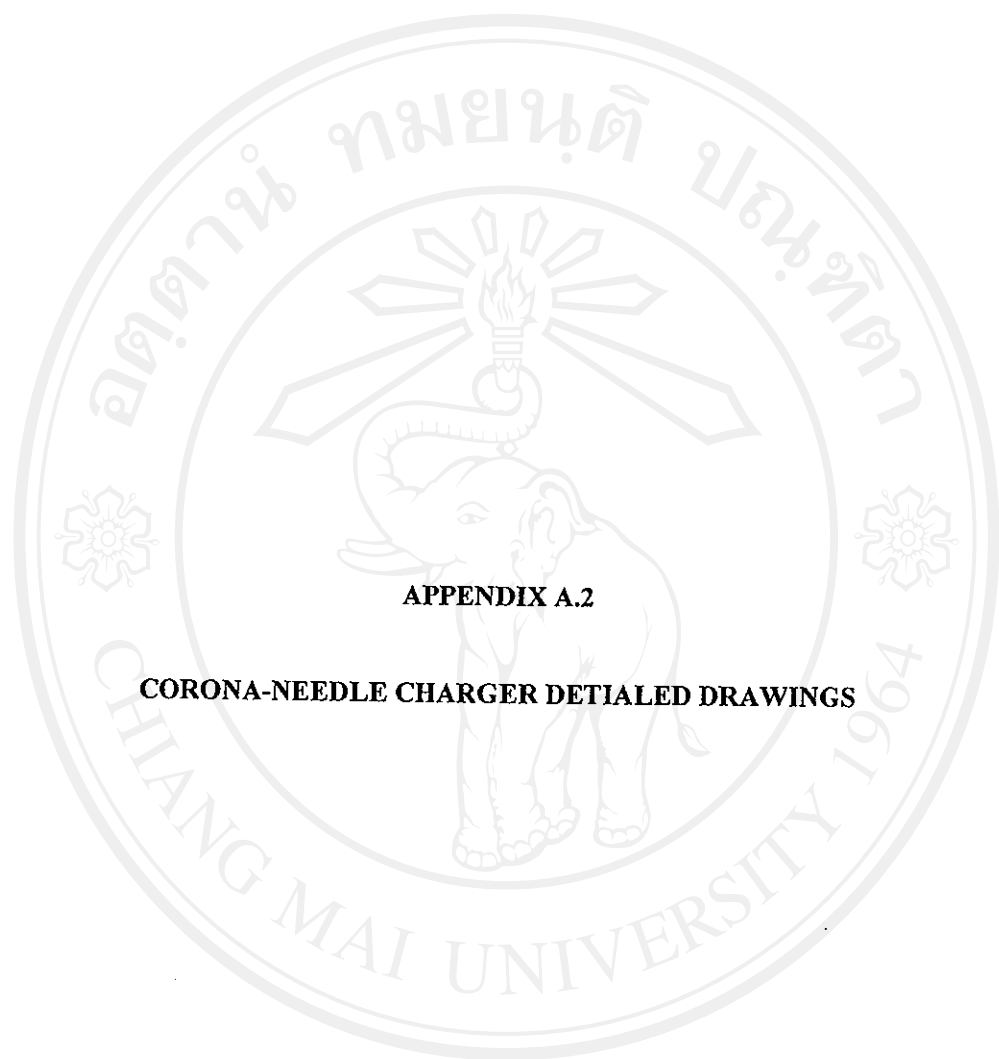


A B C

DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU		TITLE:	
Impactor		DWG NO. 2	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		SCALE: 1:1	
FINISH:		MATERIAL: Stainless steel	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		WEIGHT:	
SURFACE FINISH:		NAME	
TOLERANCES:		SIGNATURE	
LINEAR:		DATE	
ANGULAR:		DRAWN	
		CHKD	
		APPVD	
		MFG	
		Q.A	

ลิขสิทธิ์โดย Chiang Mai University  
 All rights reserved

A B C D



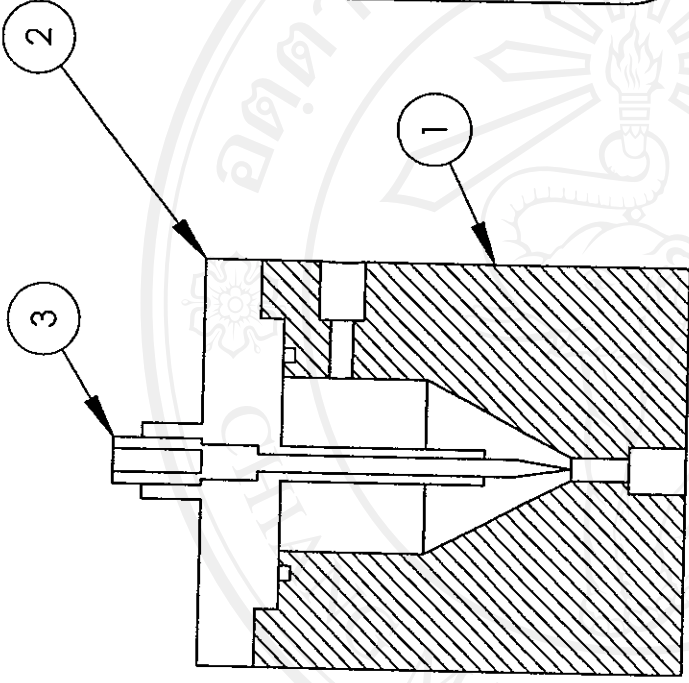
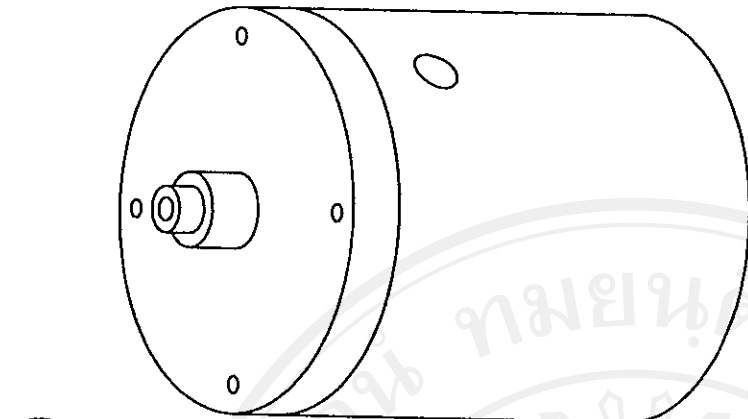
**APPENDIX A.2**

**CORONA-NEEDLE CHARGER DETIALED DRAWINGS**

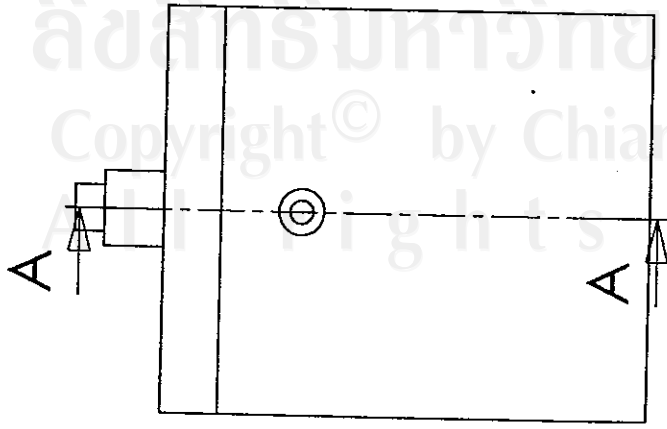
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved



A-A (1 : 1.25)



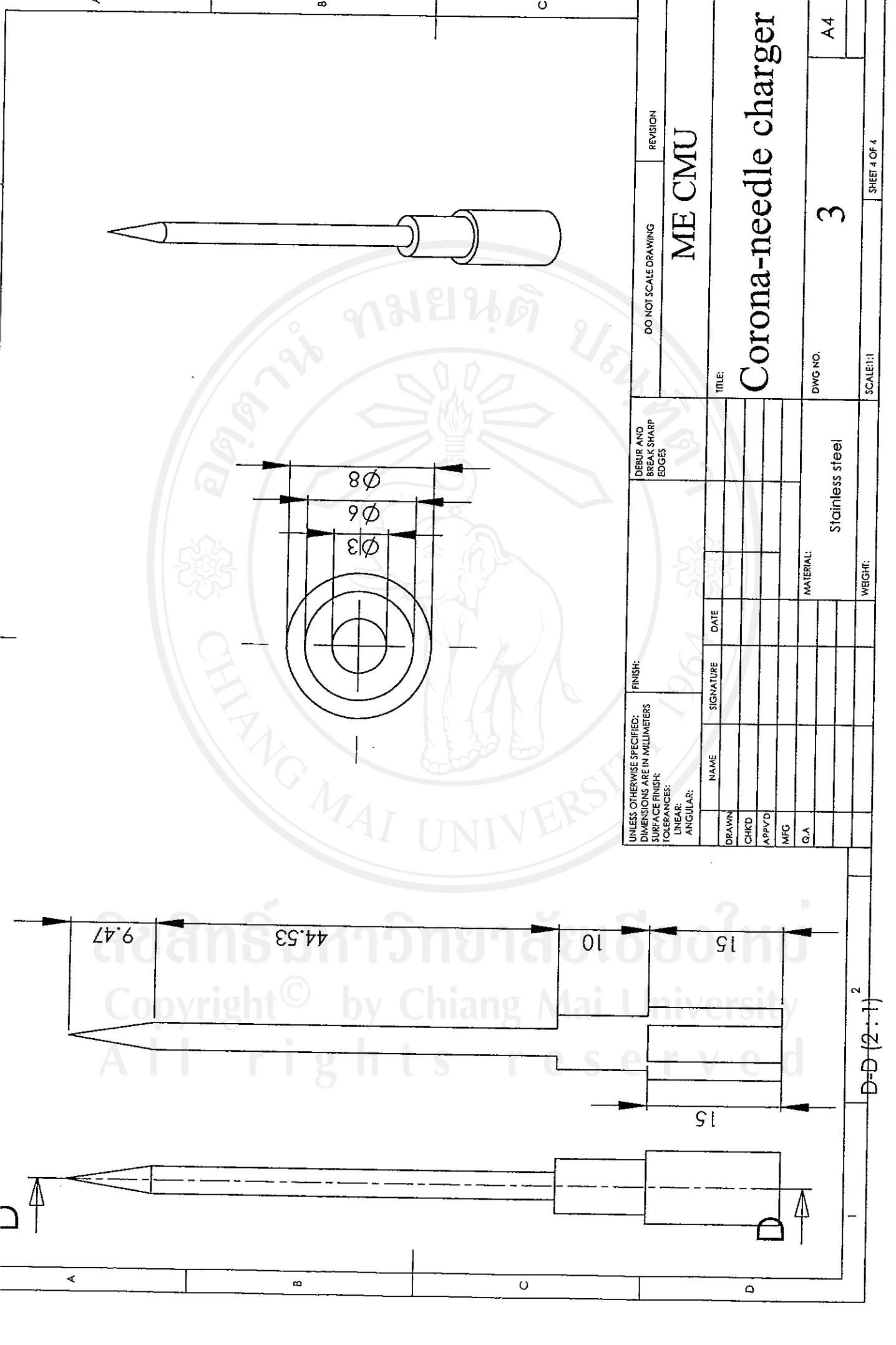
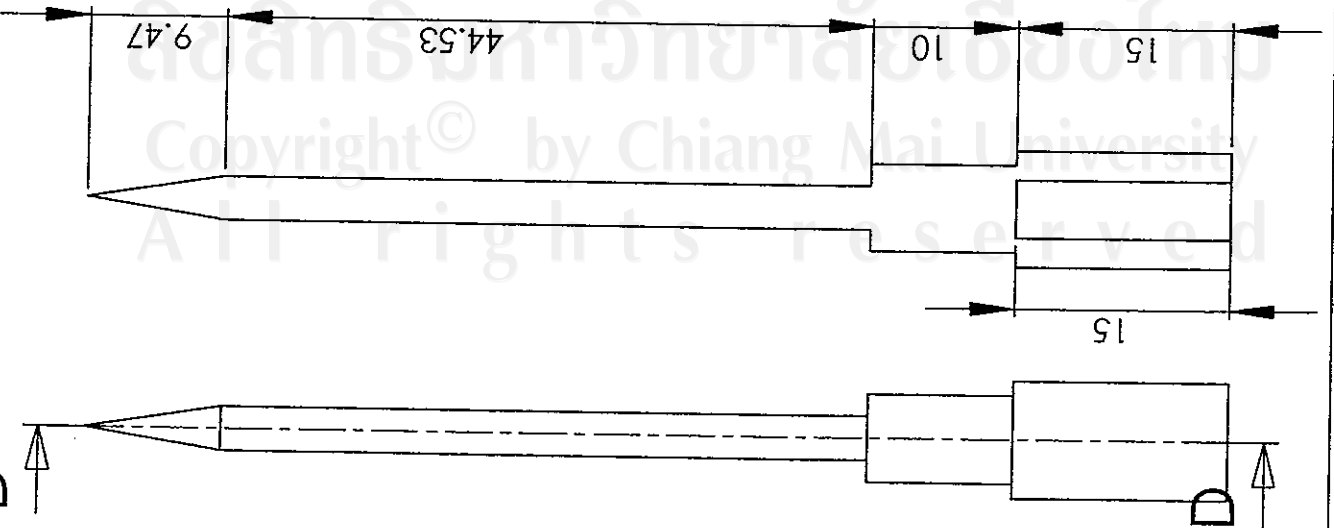
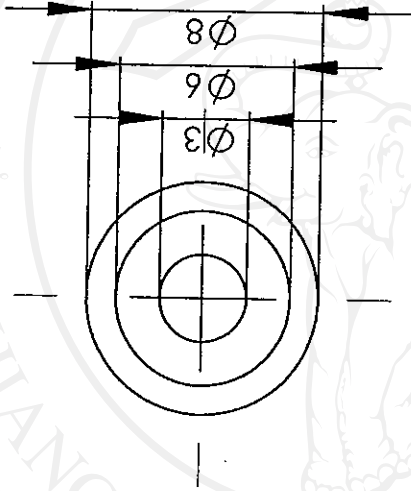
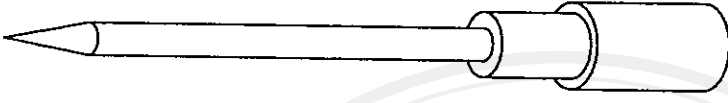
DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
<b>ME CMU</b>			
TITLE: <b>Corona-needle charger</b>			
DWG NO.		A4	
ASSEMBLY		A4	
SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 4	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	
SURFACE FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	
TOLERANCES:		NAME	
LINEAR:		SIGNATURE	
ANGULAR:		DATE	
DRAWN		MATERIAL:	
CHKD		WEIGHT:	
APPVD			
MFG			
G.A			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved



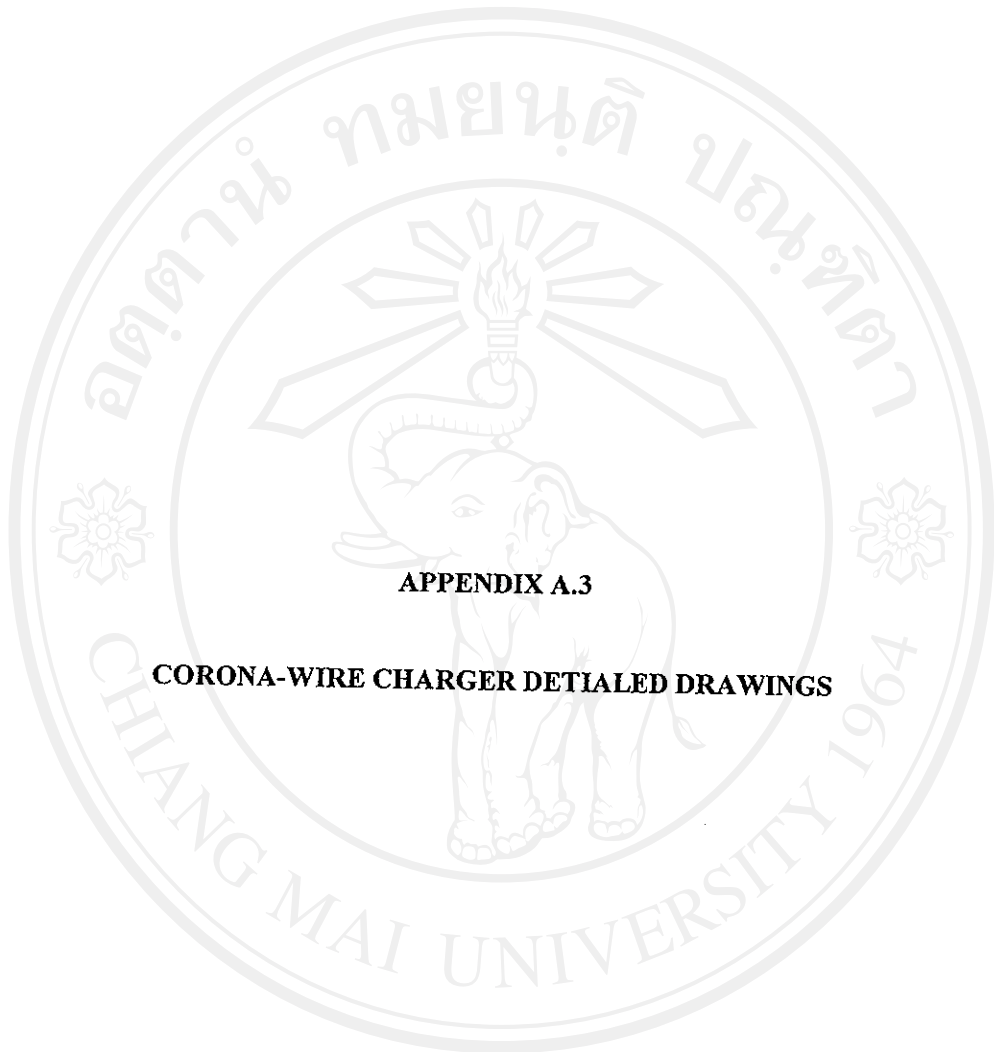






DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
<b>ME CMU</b>	
TITLE: <b>Corona-needle charger</b>	
DWG NO. <b>3</b>	A4
SCALE: 1:1	SHEET 4 OF 4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL: <b>Stainless steel</b>
DRAWN			
CHKD			
APP'D			
MFG			
Q.A			WEIGHT:



**APPENDIX A.3**

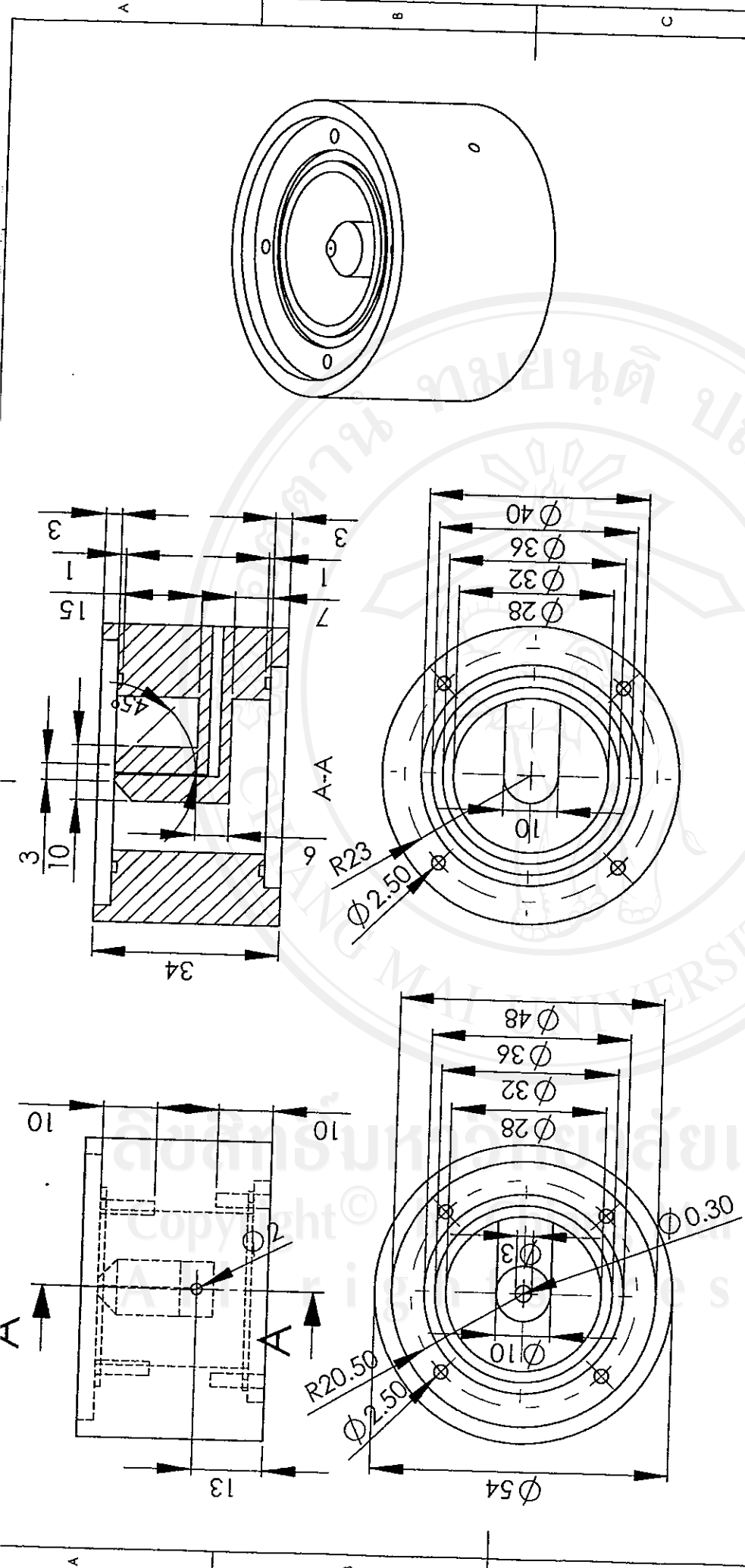
**CORONA-WIRE CHARGER DETAILED DRAWINGS**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

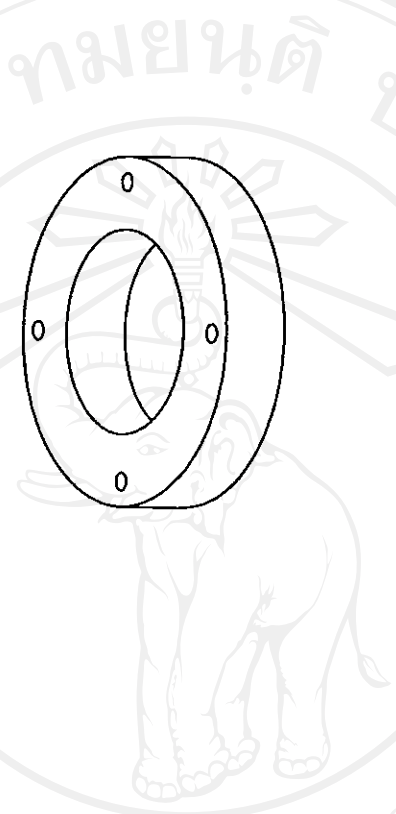
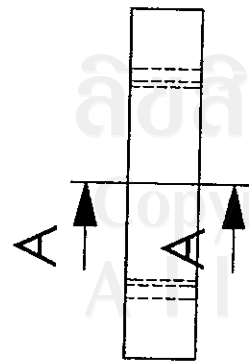
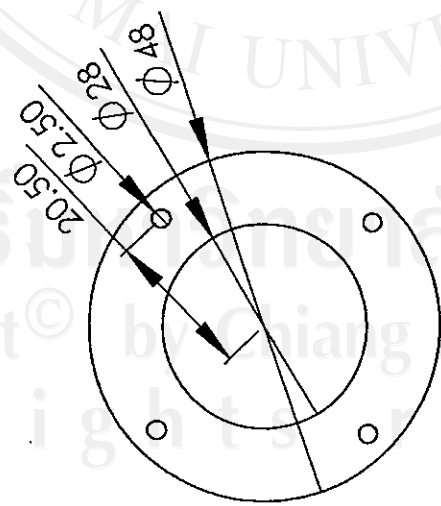
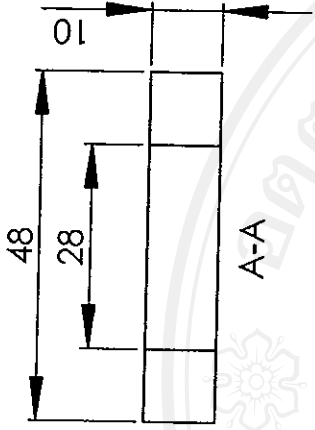
Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

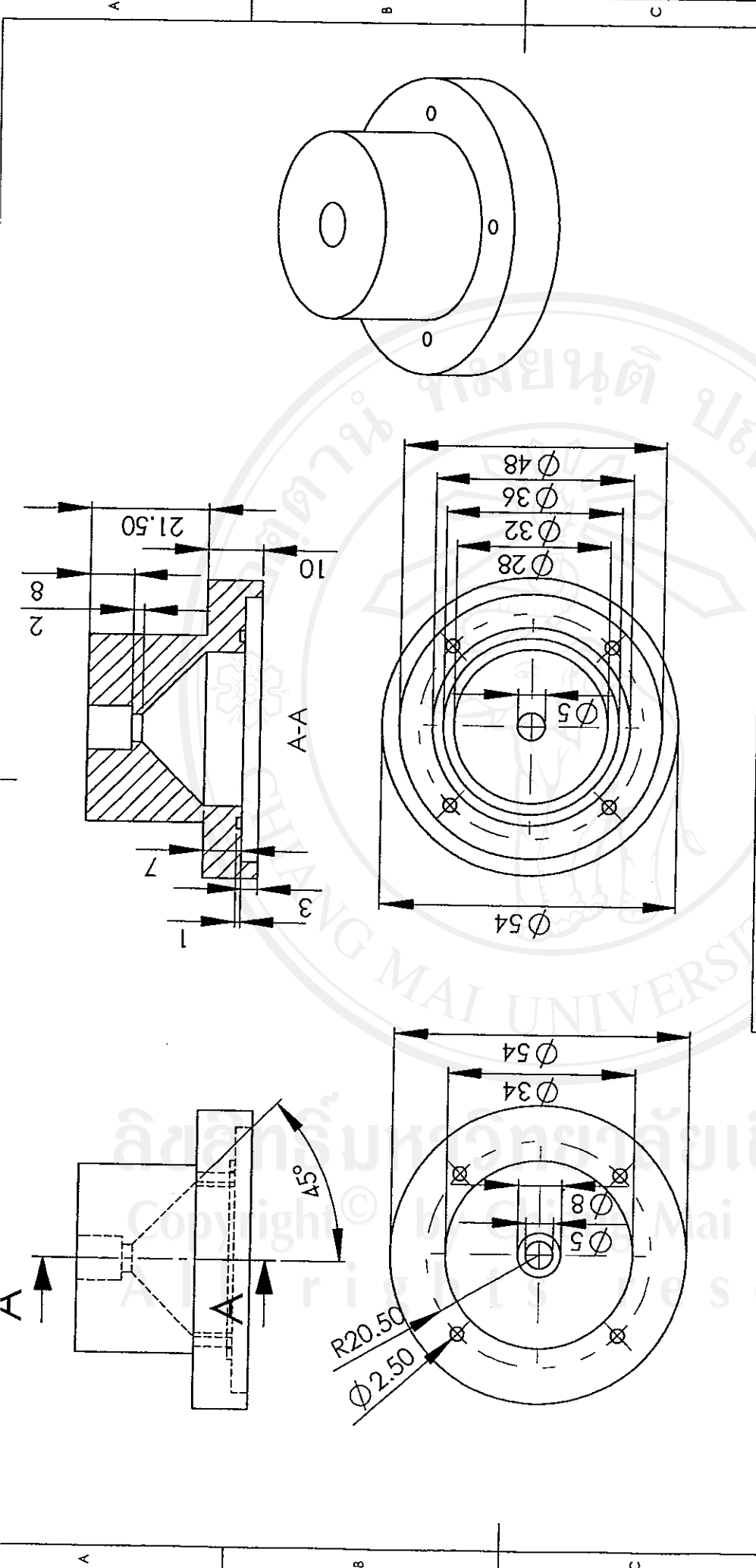




DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU			
TITLE: Corona-wire charger			
DWG NO.:		A4	
SCALE: 1:1		SHEET 2 OF 5	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		MATERIAL: DELRIN	
FINISH:		WEIGHT:	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	
SURFACE FINISH:		SIGNATURE	
TOLERANCES:		DATE	
LINEAR:		DRAWN	
ANGULAR:		CHKD	
		APPVD	
		MFG	
		Q.A	

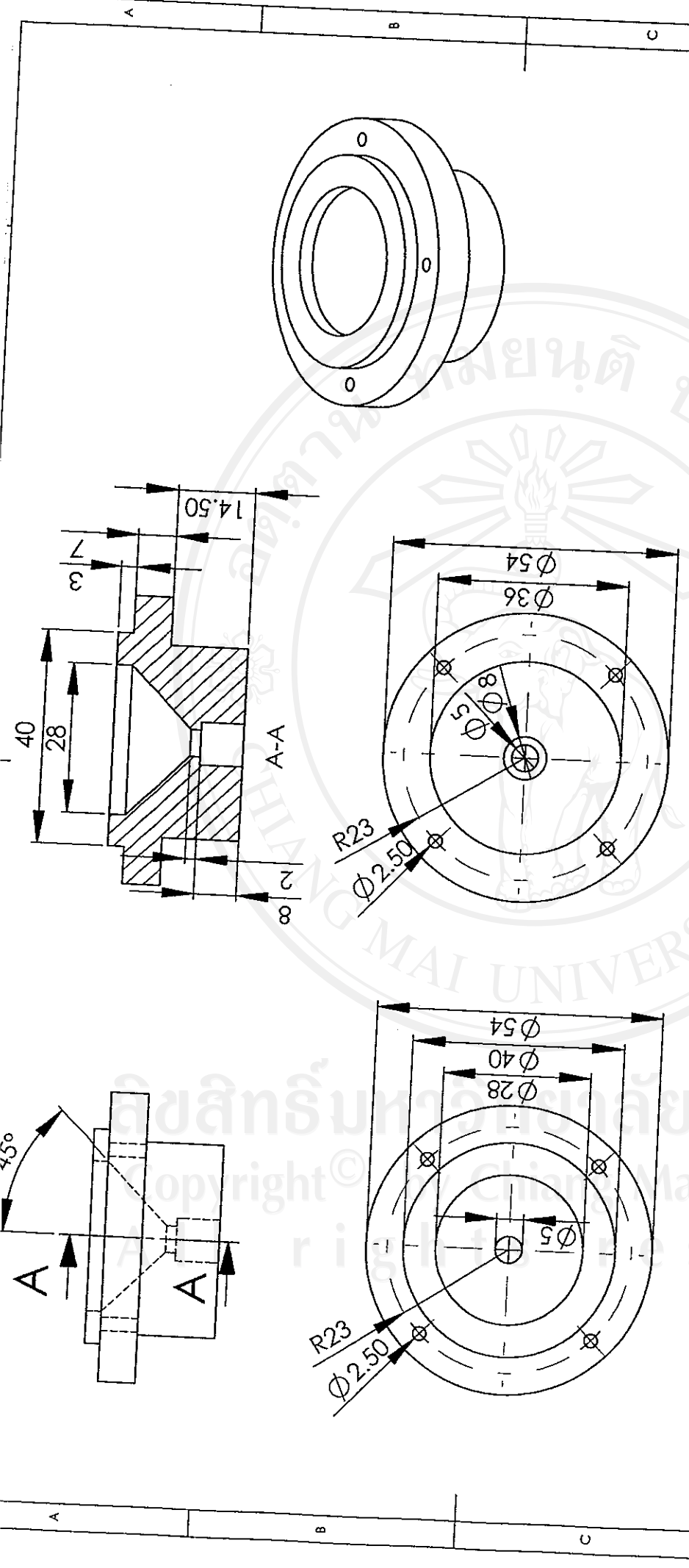


DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU			
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		TITLE:	
FINISH:		Corona-wire charger	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		DWG NO. Outer electrode	
SURFACE FINISH:		A4	
TOLERANCES:		SCALE: 1:1	
LINEAR:		SHEET 3 OF 5	
ANGULAR:		WEIGHT:	
NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:
DRAWN			Stainless steel
CHKD			
APPVD			
MFG			
G.A.			



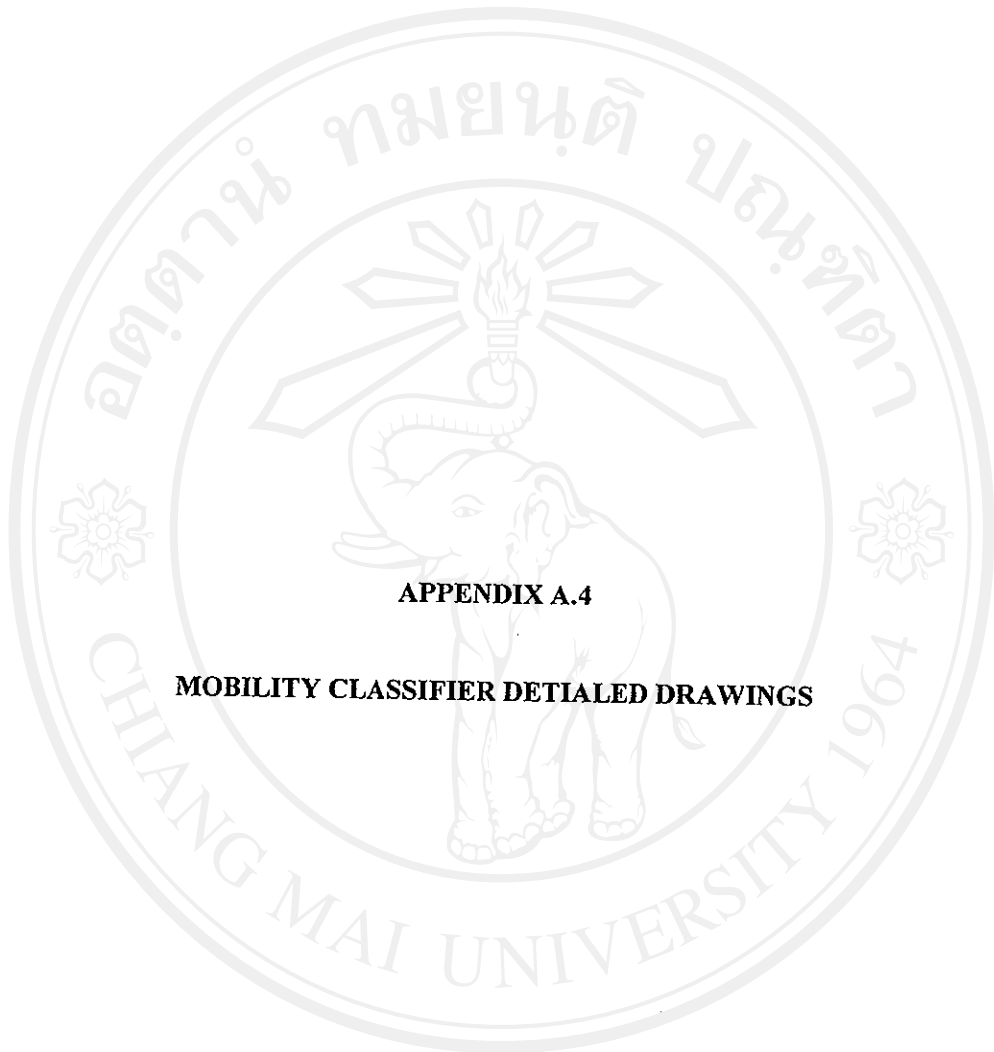
DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
<b>ME CMU</b>			
TITLE:			
<b>Corona-wire charger</b>			
DWG NO.		A4	
Aerosol outlet		DELIRIN	
MATERIAL:		DELIRIN	
WEIGHT:			
SCALE: 1:1		SHEET 4 OF 5	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES
NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
G/A			





DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
<b>ME CMU</b>			
TITLE: <b>Corona-wire charger</b>			
DWG NO. <b>A4</b>		A4	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		MATERIAL: <b>DELIRIN</b>	
FINISH:		WEIGHT:	
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		SCALE: 1:1	
SURFACE FINISH:		DRAWN	
TOLERANCES:		CHKD	
LINEAR:		APPVD	
ANGULAR:		MFG	
NAME		DATE	
SIGNATURE		MFG	
DATE		G.A	
MATERIAL: <b>DELIRIN</b>		G.A	
WEIGHT:		G.A	
SCALE: 1:1		G.A	
SHEET 5 OF 5		G.A	





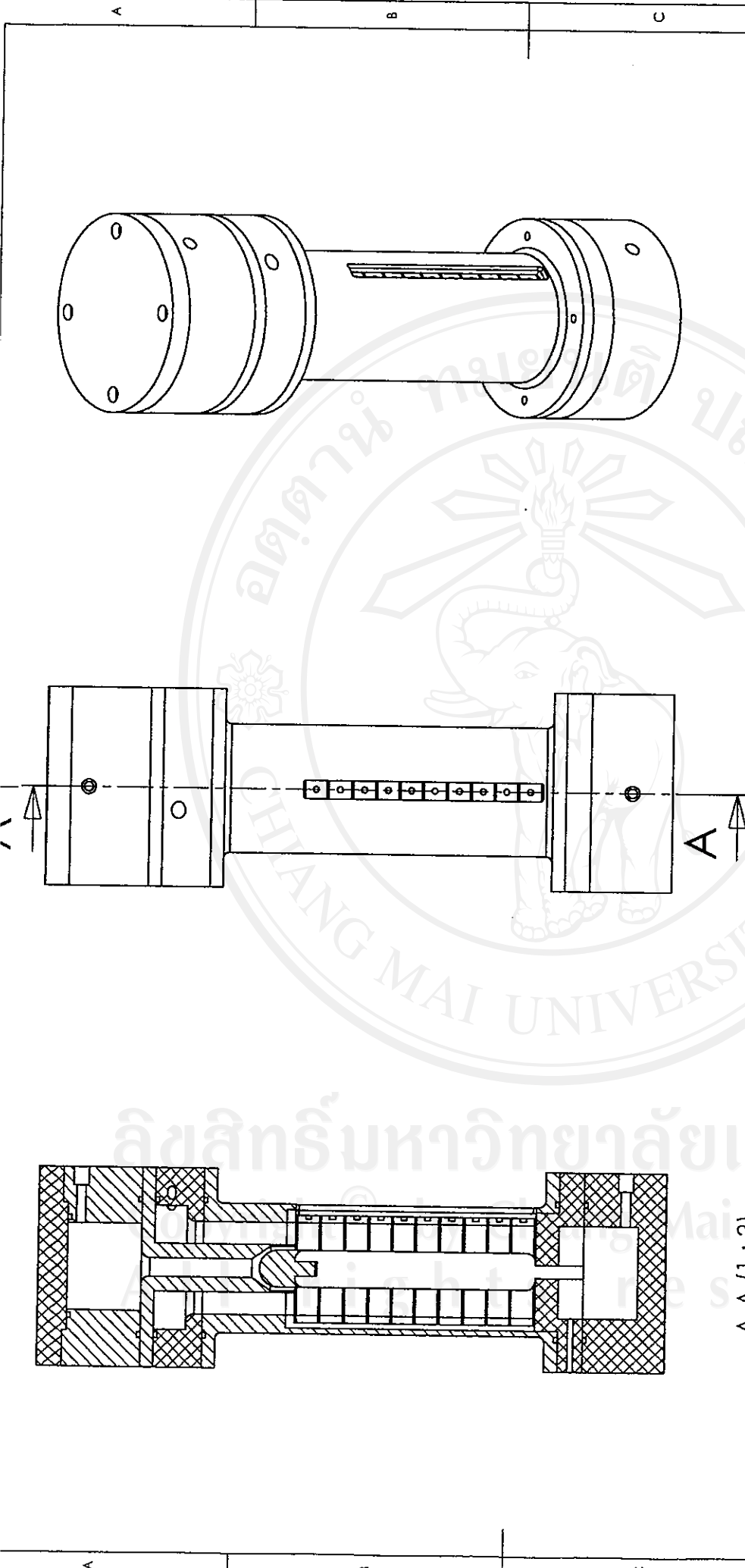
**APPENDIX A.4**

**MOBILITY CLASSIFIER DETIALED DRAWINGS**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

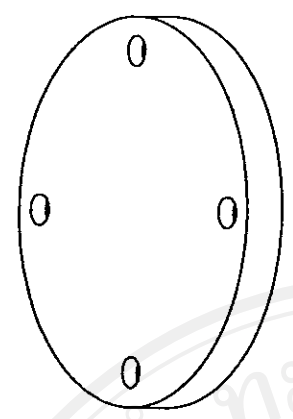
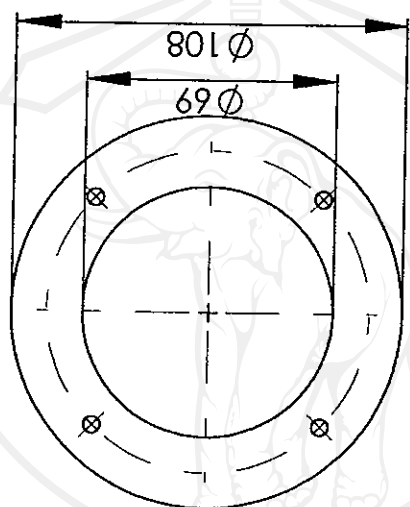
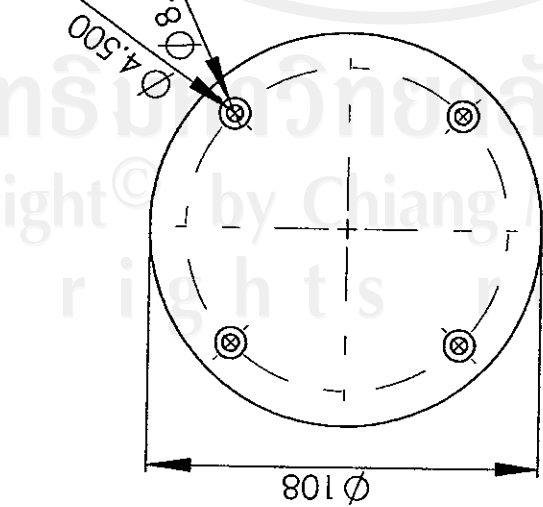
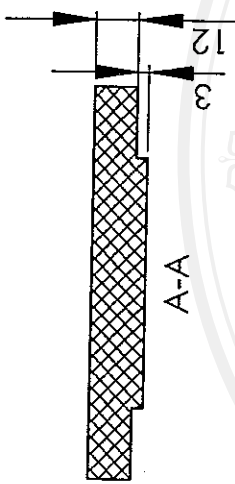
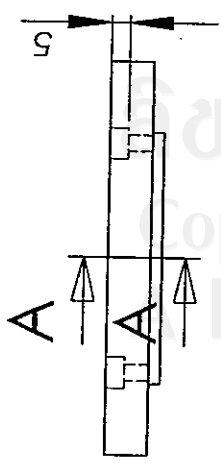
Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

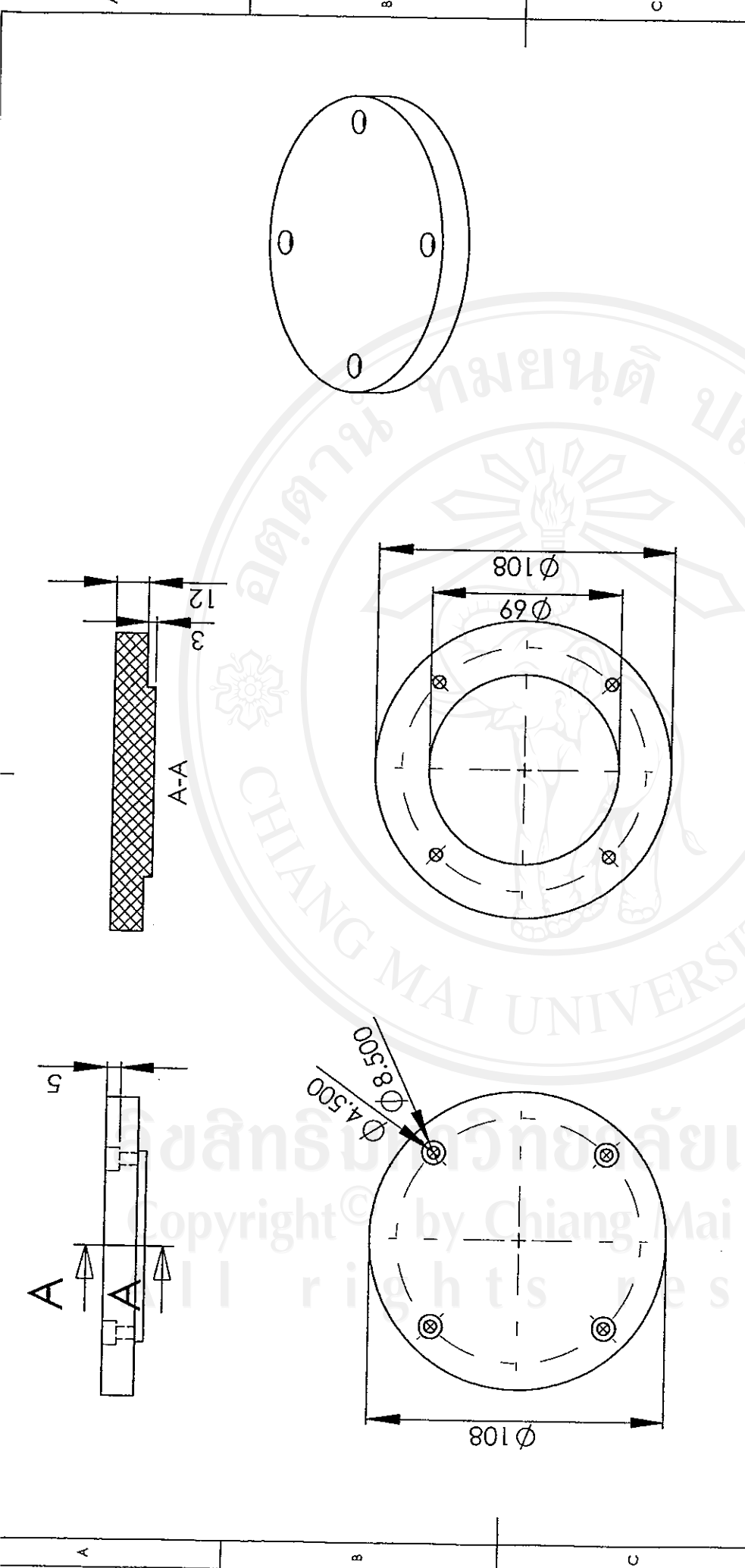


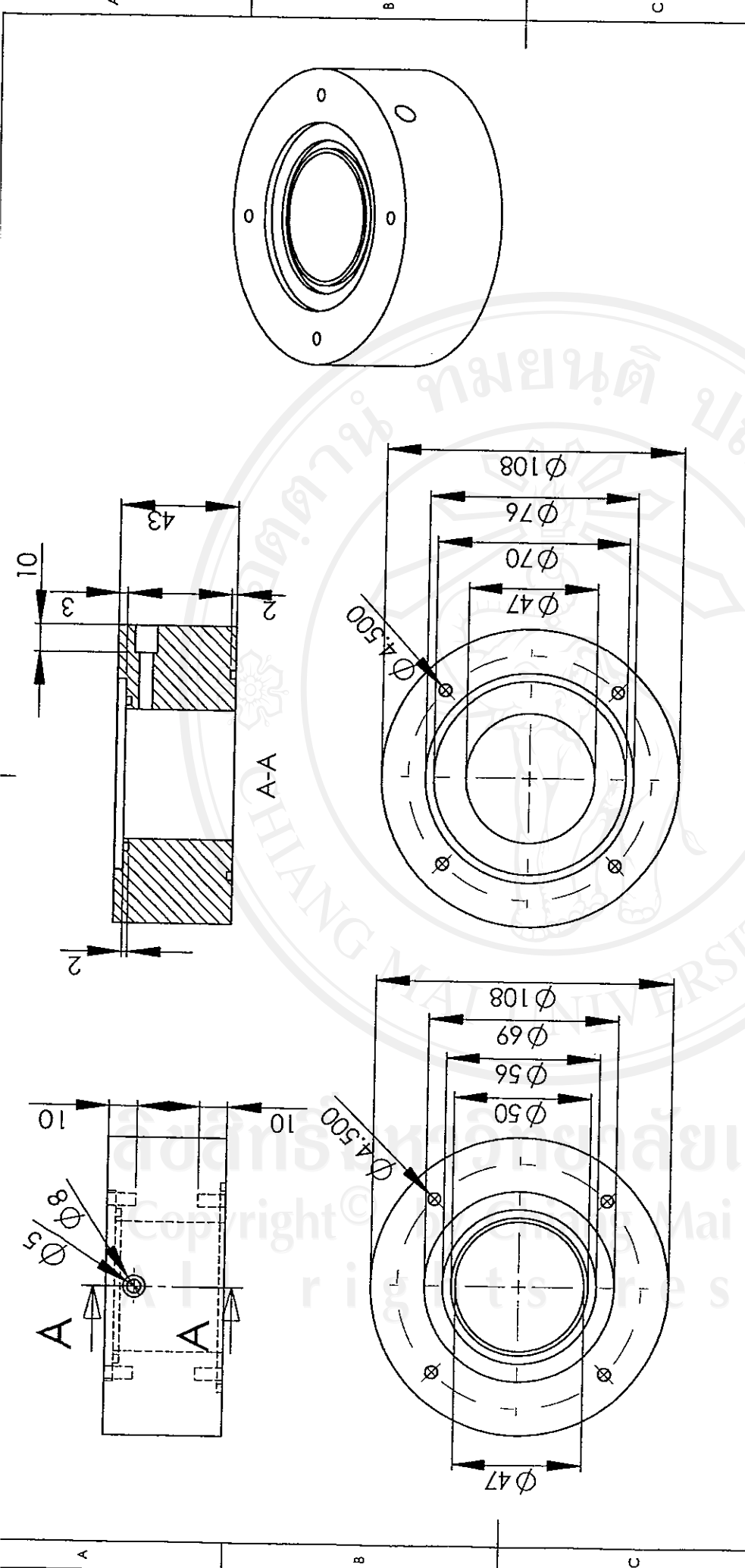
A-A (1:3)

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:						ME CMU			
TOLERANCES:						TITLE:		Aerosol Size Analyzer	
LINEAR:						DWG NO.		A4	
ANGULAR:						MATERIAL:		Assembly	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE						
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A									
				WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	

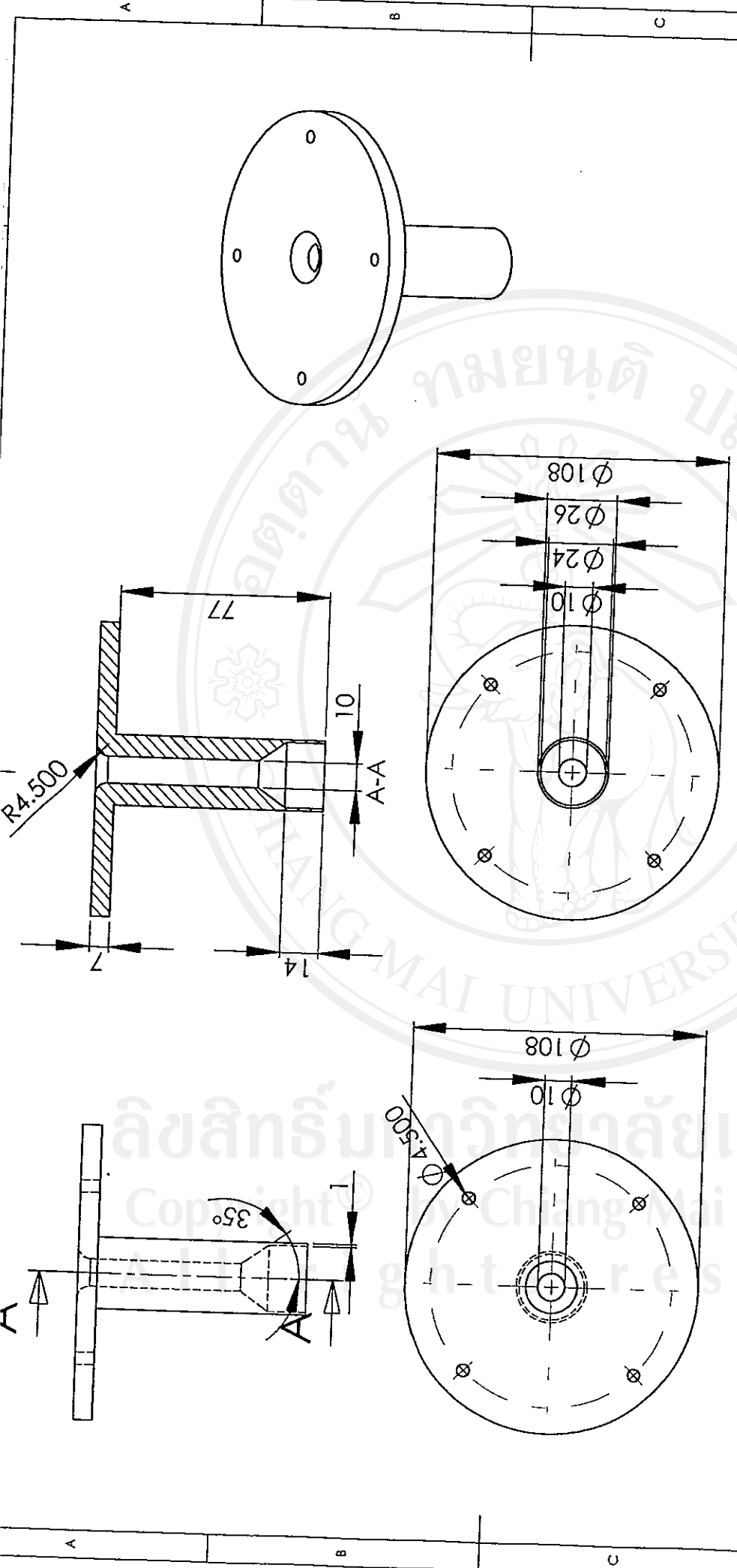


DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU			
TITLE: Aerosol Size Analyzer			
DWG NO. Top cover		A4	
SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	
SURFACE FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	
TOLERANCES:		NAME	
LINEAR:		SIGNATURE	
ANGULAR:		DATE	
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
G.A			
		MATERIAL: DELRIN or TEFLON	
		WEIGHT:	



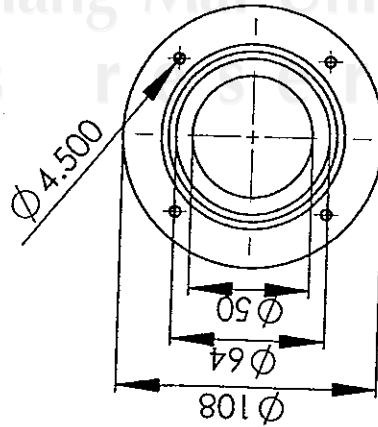
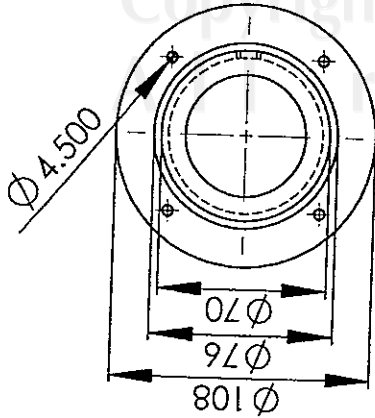
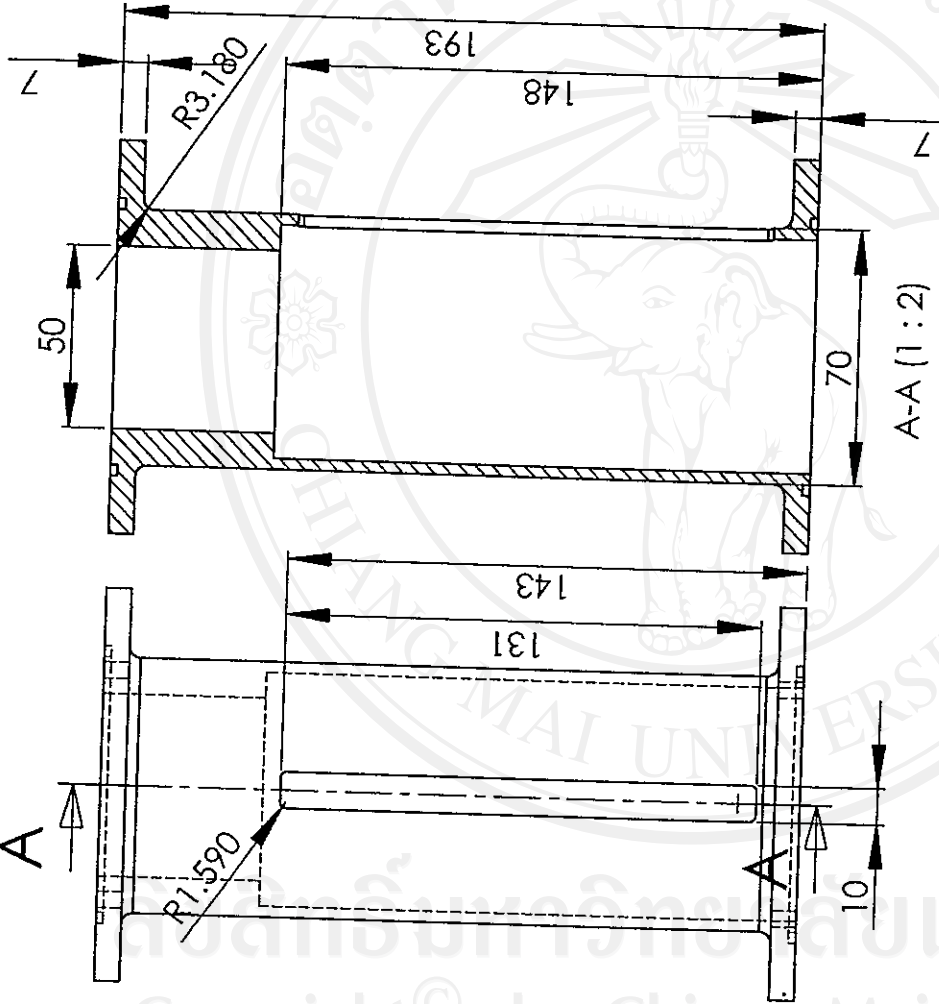
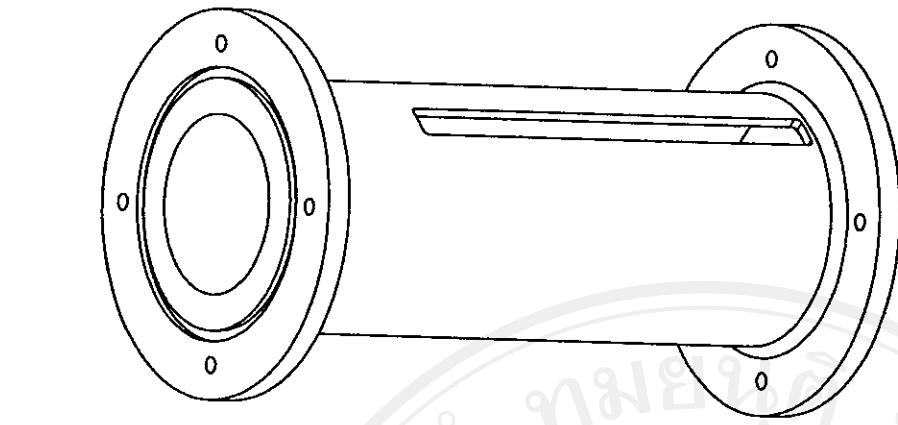


DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU			
TITLE: Aerosol Size Analyzer			
DWG NO.		A4	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		FINISH: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	
		SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	
NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL: AL
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
Q.A			
SCALE: 1:2		WEIGHT:	
SHEET 1 OF 1			



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
<b>ME CMU</b>			
TITLE:			
<b>Aerosol Size Analyzer</b>			
DWG NO.		A4	
MATERIAL:		DELRIN or TEFLON	
WEIGHT:		SCALE:1:2	
FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	
SURFACE FINISH:		SIGNATURE	
TOLERANCES:		DATE	
LINEAR:		DRAWN	
ANGULAR:		CHKD	
		APPYD	
		MFG	
		Q.A	

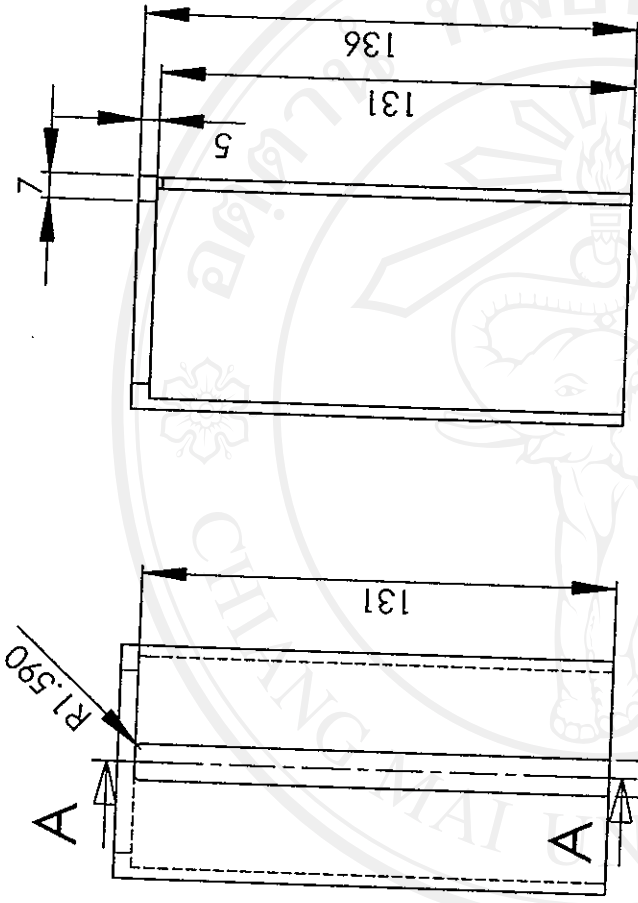
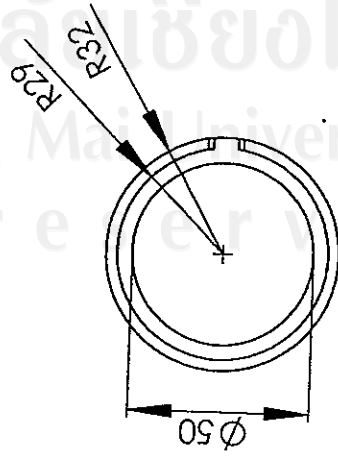
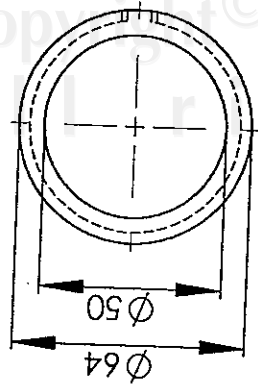




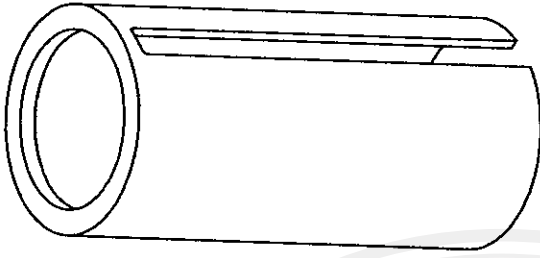
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
SURFACE FINISH:						ME CMU				
TOLERANCES:						TITLE:		Aerosol Size Analyzer		
LINEAR:						DWG NO.:		A4		
ANGULAR:						MATERIAL:		Housing		
						WEIGHT:		SCALE: 1 OF 1		
NAME	SIGNATURE	DATE								
DRAWN										
CHKD										
APPVD										
MFG										
G.A.										

Copyright © by Chiang Mai University  
rights reserved





A-A (1:2)



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

ME CMU

TITLE:

Aerosol Size Analyzer

DWG NO: Insulator housing A4

MATERIAL: DELRIN or TEFLON

WEIGHT:

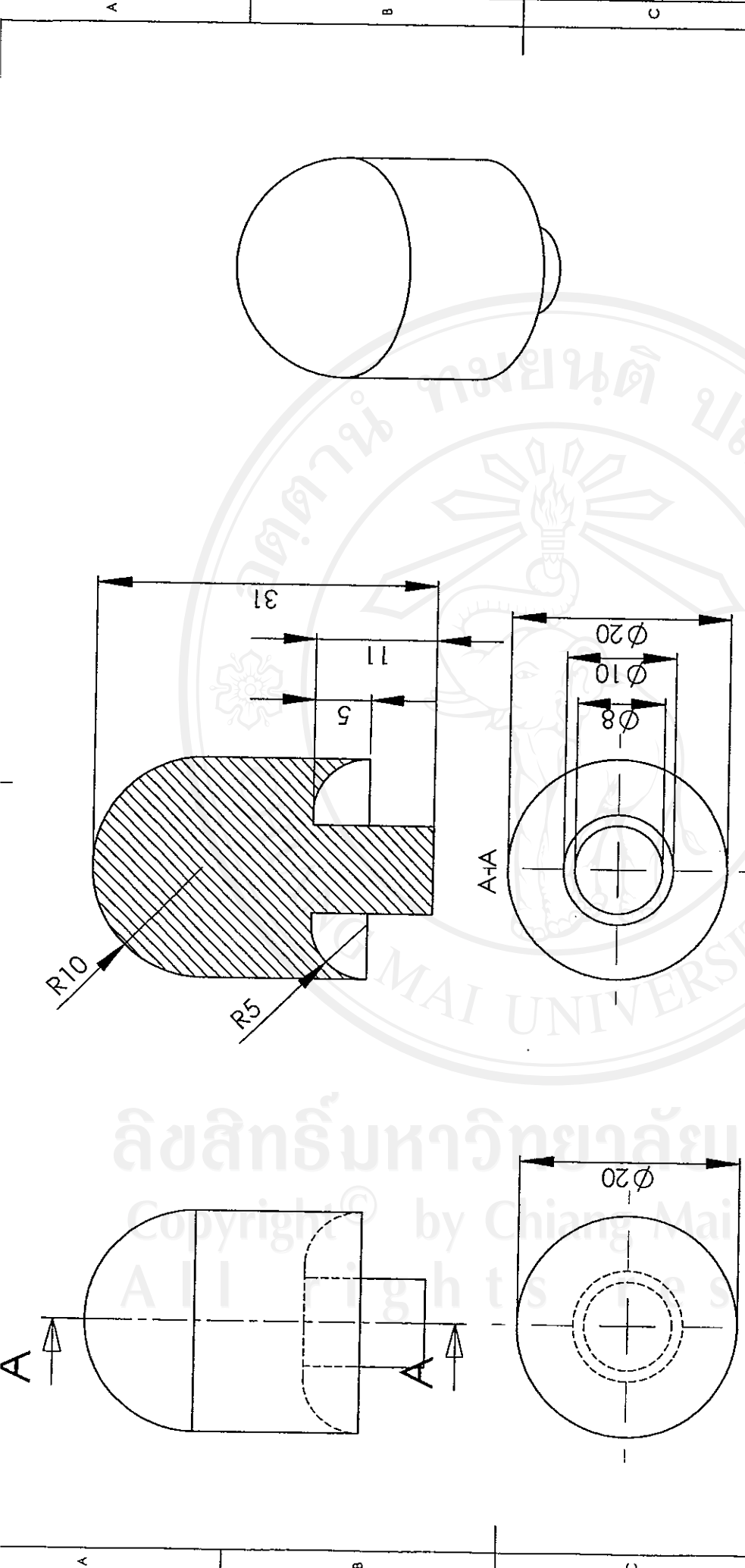
SCALE: 1:1

SHEET 1 OF 1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved

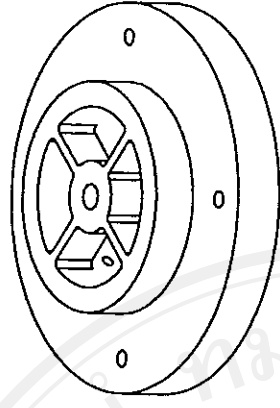
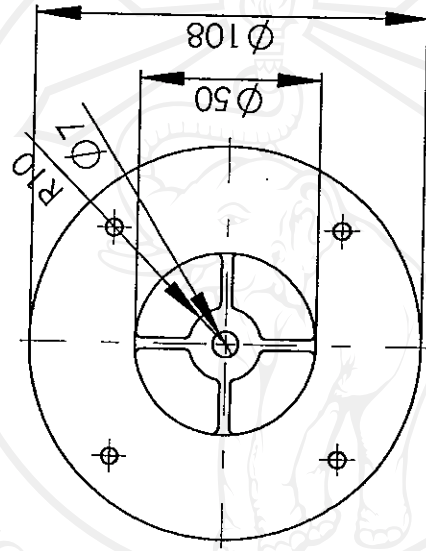
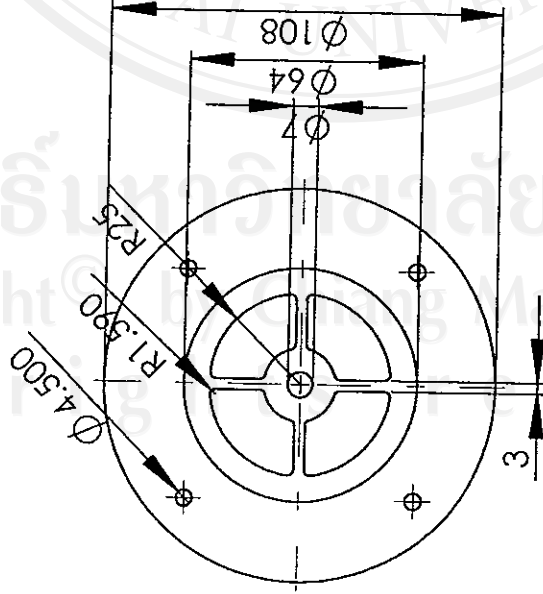
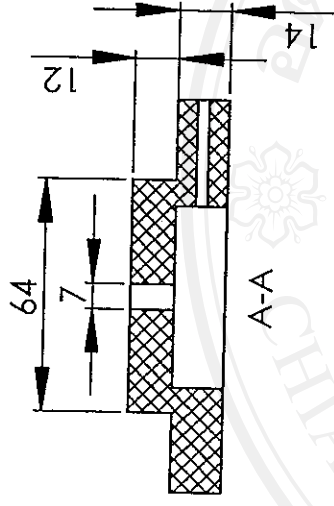
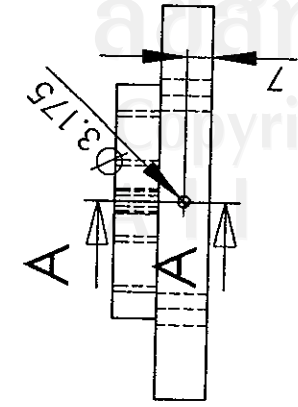






DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
<b>ME CMU</b>			
TITLE:		<b>Aerosol Size Analyzer</b>	
DWG NO.		<b>Spacer asst</b>	
SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		FINISH:	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		MATERIAL: <b>DELRIN or TEFLON</b>	
NAME	SIGNATURE	DATE	WEIGHT:
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
G.A			

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
 Copyright © by Chiang Mai University  
 All rights reserved



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

ME CMU

TITLE:

Aerosol Size Analyzer

DWG NO.

Outlet cover

A4

SCALE:1:2

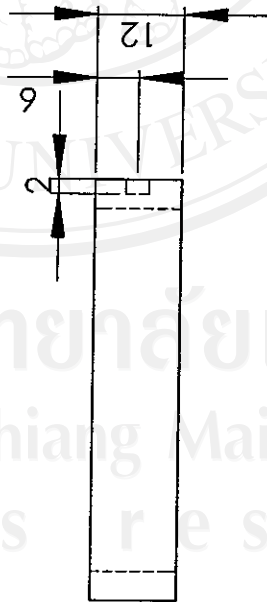
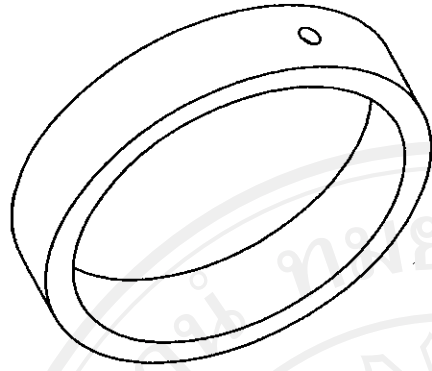
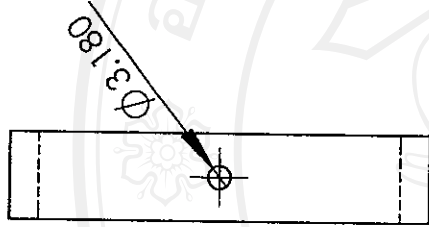
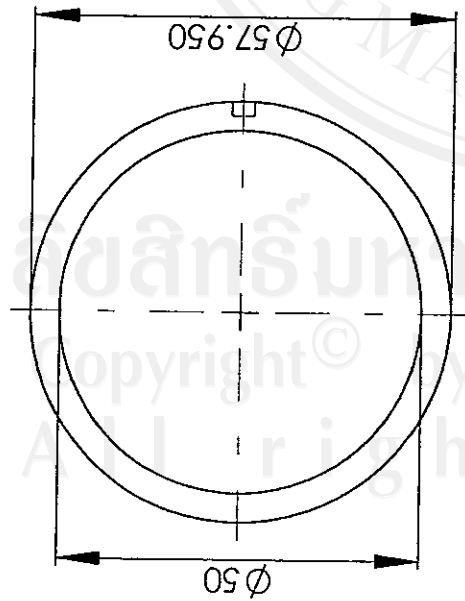
SHEET 1 OF 1

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHKD		
APPVD		
MFG		
G.A.		

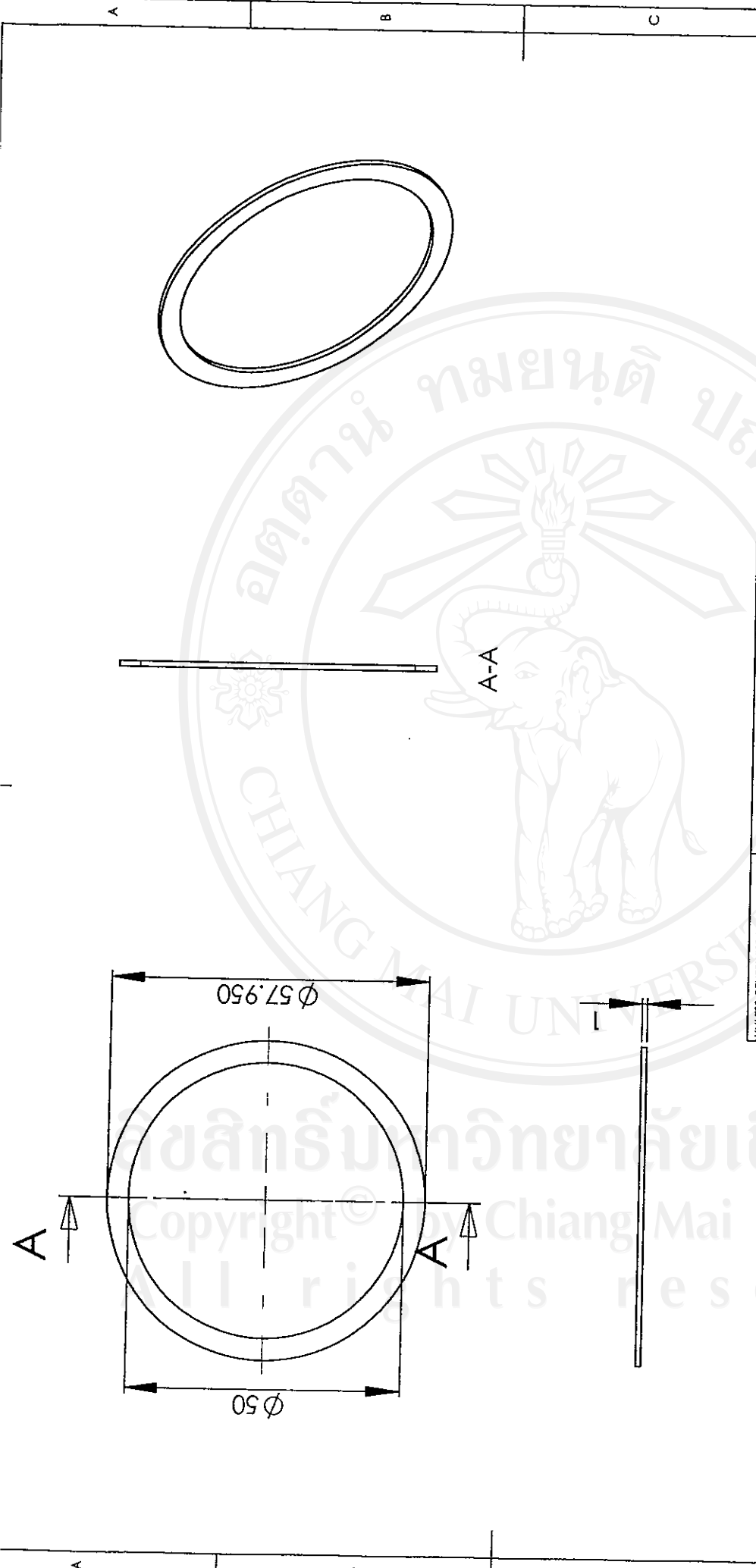
MATERIAL:

DELFIN or TEFLON

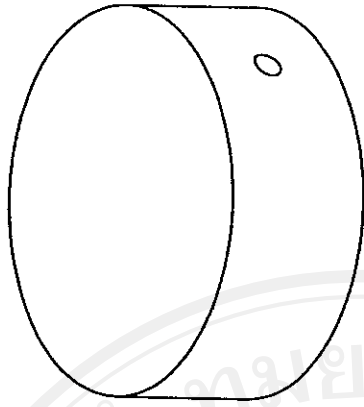
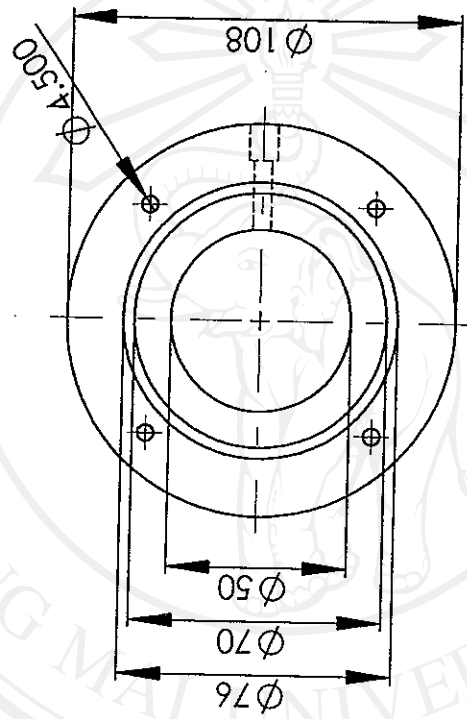
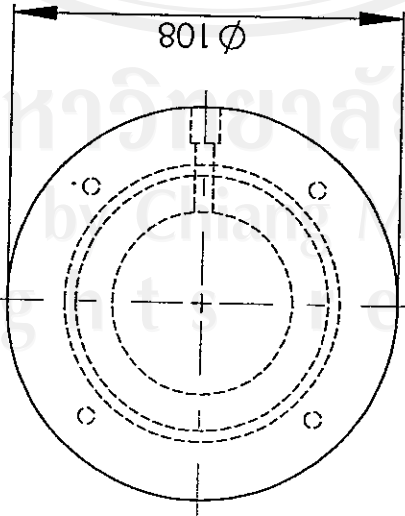
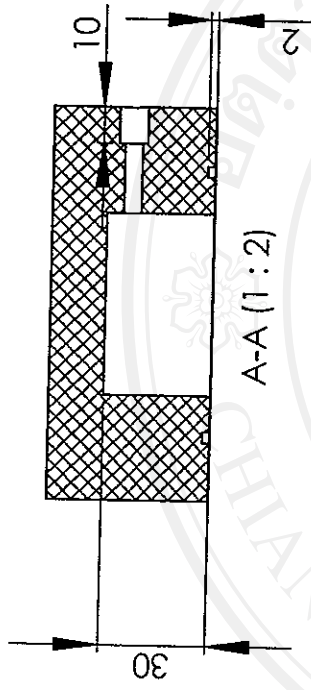
WEIGHT:



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU			
TITLE: <b>Aerosol Size Analyzer</b>			
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DWG NO: <b>Electrometer ring</b>	
FINISH:		MATERIAL: <b>316 SS</b>	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		WEIGHT:	
SURFACE FINISH:		SCALE: 1	
TOLERANCES:		SHEET 1 OF 1	
LINEAR:			
ANGULAR:			
NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN			
CHKD			
APPVD			
MFG			
G.A			



DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
ME CMU			
TITLE:		Aerosol Size Analyzer	
DWC NO.		Shielding ring	
SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	
DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		MATERIAL: DELRIN or TEFLON	
FINISH:		WEIGHT:	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	
SURFACE FINISH:		SIGNATURE	
TOLERANCES:		DATE	
LINEAR:		DRAWN	
ANGULAR:		CHKD	
		APPVD	
		MFG	
		Q.A	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND  
BREAK SHARP  
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

ME CMU

TITLE:

Aerosol Size Analyzer

DWG NO.

End cover

A4

SCALE:1:1

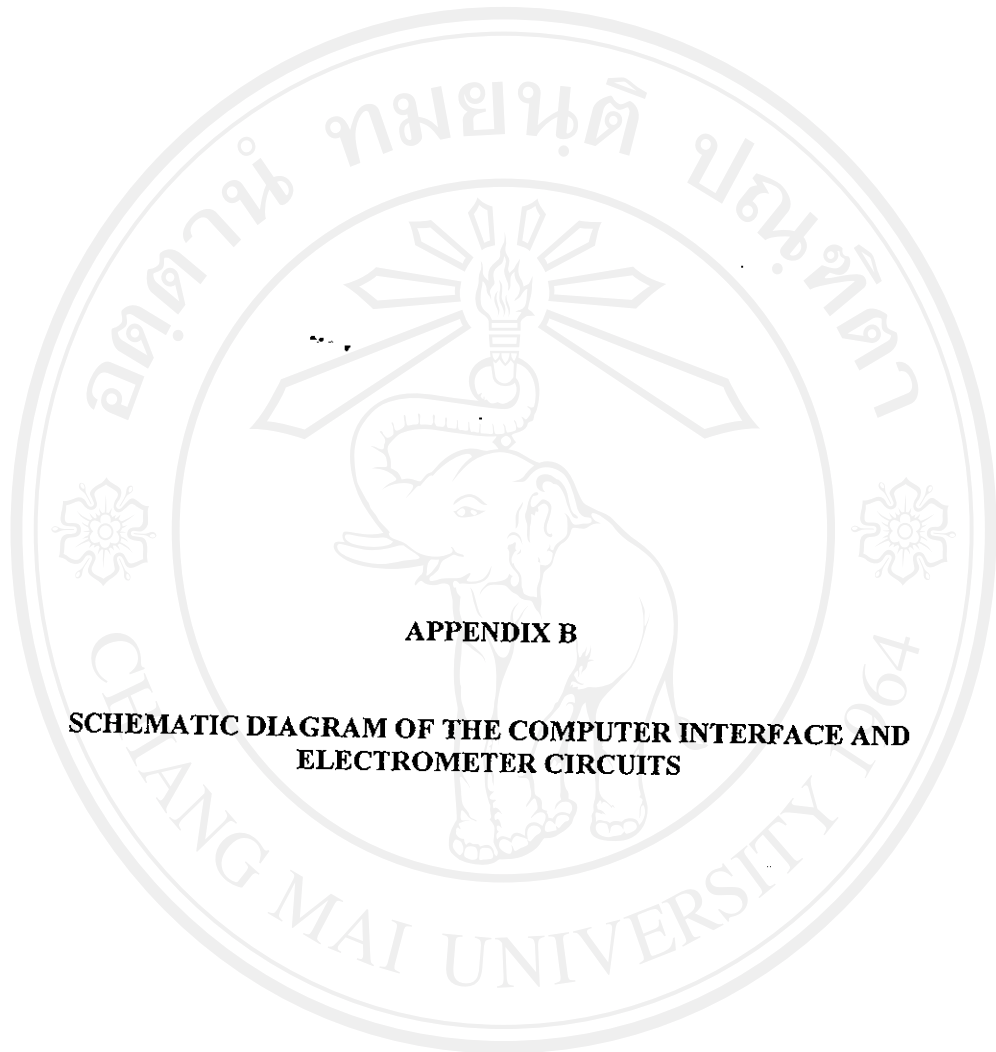
SHEET 1 OF 1

NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN		
CHKD		
APPVD		
MFG		
Q.A		

MATERIAL:

DELFIN or TEFLON

WEIGHT:



**APPENDIX B**

**SCHEMATIC DIAGRAM OF THE COMPUTER INTERFACE AND  
ELECTROMETER CIRCUITS**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

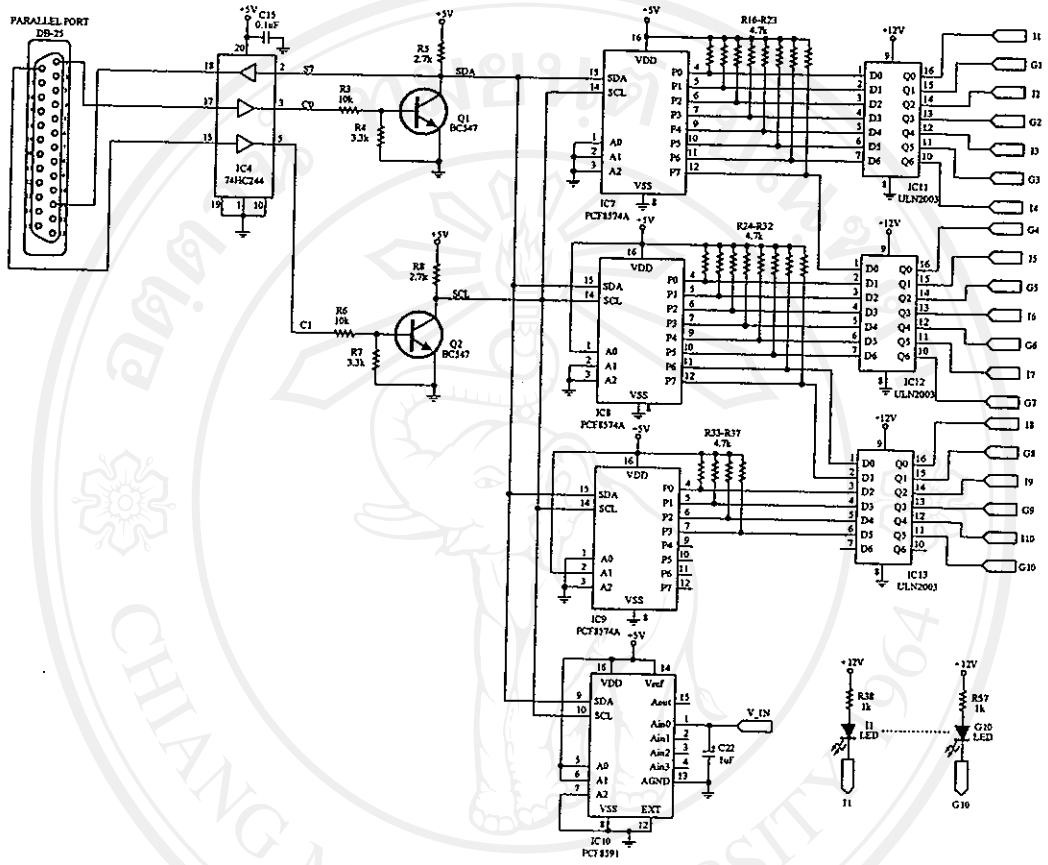


Figure B.1. I<sup>2</sup>C computer interface circuit schematic.

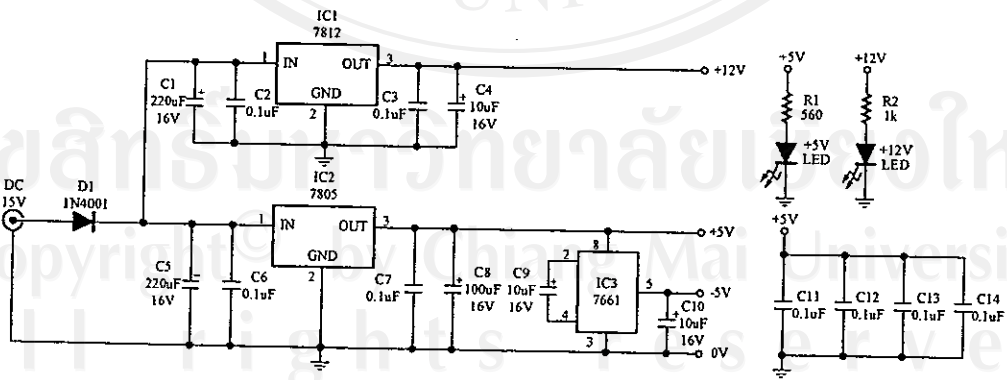


Figure B.2. DC power supply circuit schematic.



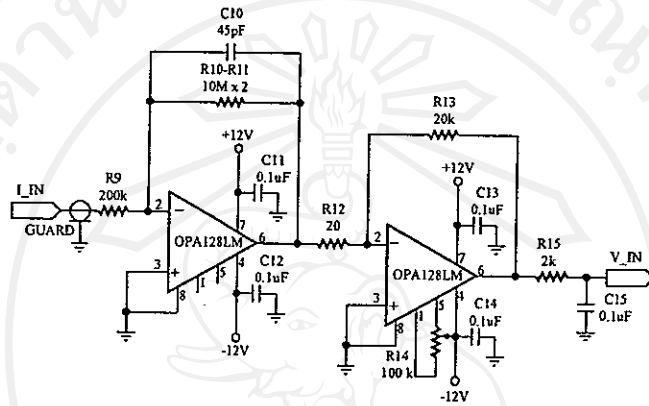


Figure B.3. Electrometer circuit schematic.

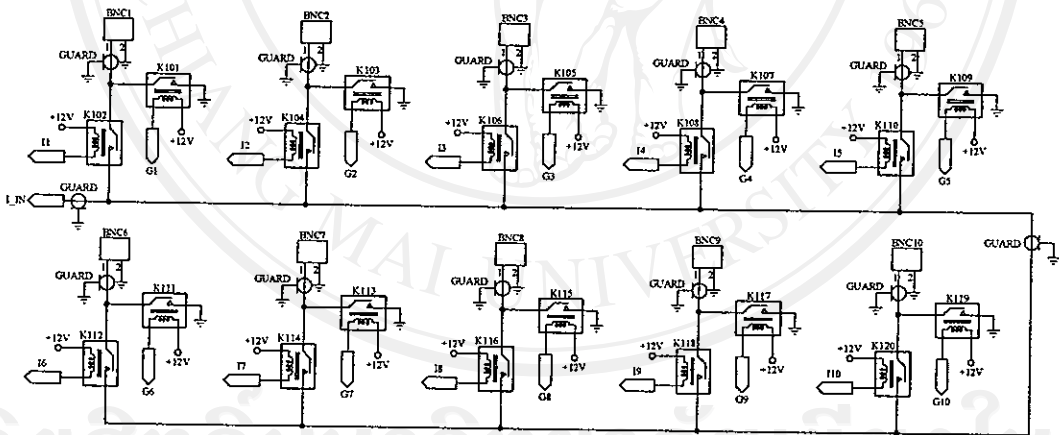
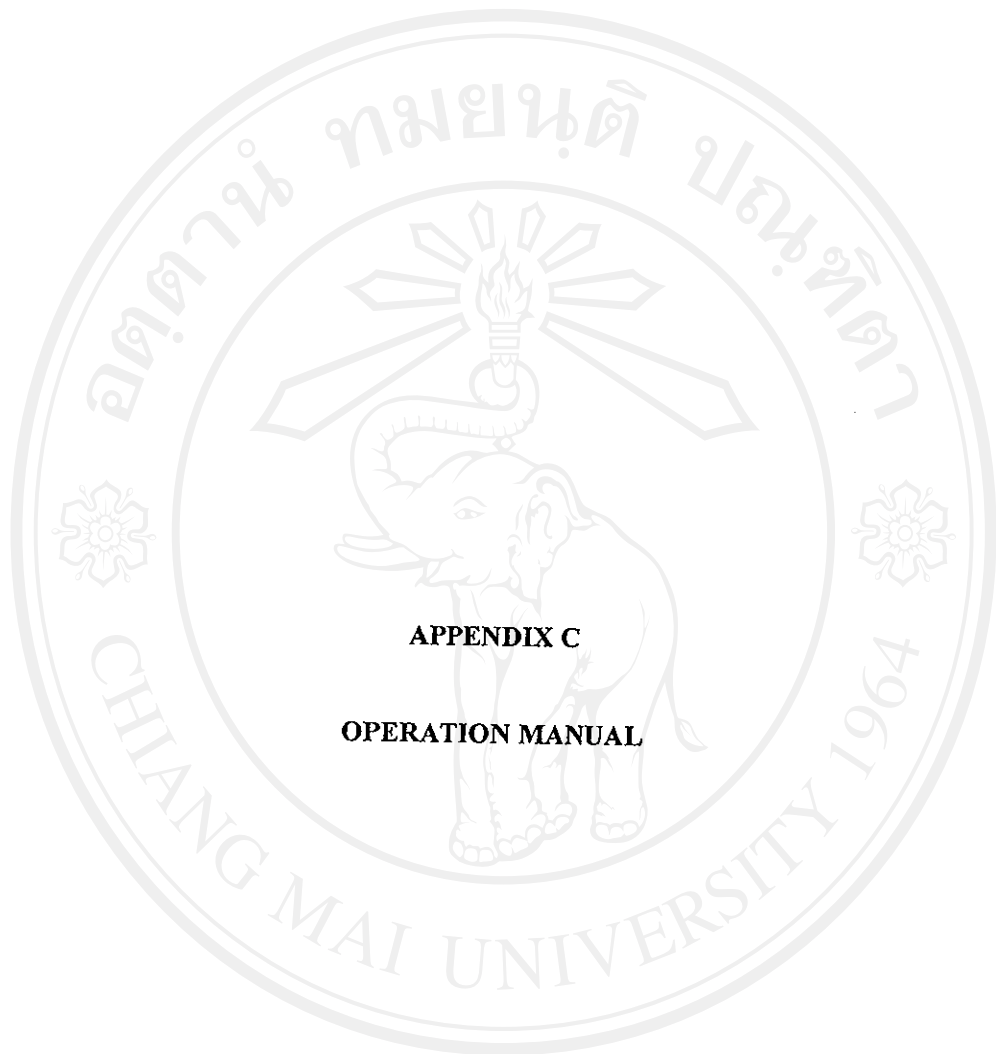


Figure B.4. Relay switching circuit schematic.

ลิขสิทธิ์โดย Chiang Mai University  
 Copyright © by Chiang Mai University  
 All rights reserved



**APPENDIX C**

**OPERATION MANUAL**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

## APPENDIX C

### OPERATION MANUAL

This Appendix provides the operation manual of the operation of the electrical mobility spectrometer (EMS). The first Section of the Appendix gives instructions to promote safe of the EMS, while the second Section provides an overview of how the EMS work. Installing the EMS software is described in the third Section of the Appendix. The fourth Section describes how to operate the EMS using the EMS data processing software. In the fifth and sixth Sections, maintenance procedure and troubleshoot for the EMS are provided. The specifications of the EMS are also presented in the last Section of the Appendix.

#### C.1 Safety

This Section gives instructions to promote safe of the EMS. Both the EMS and the external PC must be connected to the mains supply with an earth connector. The instrument has been wired to 220-240 V, 50-60 Hz mains voltage. To prevent problems, take these precautions:

##### C.1.1 Caution

- Do *not* remove any parts from the instrument unless you are specifically told to do so in this manual
- Do *not* remove the instrument housing or covers while power is supplied to the instrument.
- Do *not* touch the electrometer connections before making the ground contact. Static electricity may cause severe damage to the electrometer amplifiers.

##### C.1.2 Warning

- High voltage is accessible in several locations within this instrument. Make sure you unplug the power source before removing the cover or performing maintenance procedures.

#### C.2 Instrument Overview

##### C.2.1 Instrument Description

Figure C.1 shows the electrical mobility spectrometer (EMS), is a particle size spectrometer designed at the Chiang Mai University for measuring aerosol particle size distribution. The EMS measures particle size from 10 to 1000 nanometers with a sizing resolution of 10 channels. The EMS is composed of an aerosol generator, a flow system, a size selective inlet, a particle charger, a size classifier, a signal current detector and a computer controlled data acquisition and management system. In the EMS, aerosol sample pass through a charger that sets a charge on the particles and enter a classifier separately but together with sheath air flow through an annular and exit. Electric field is applied between the inner and outer electrodes and forces charged particles having specific mobility to deposit on a designated electrode ring.

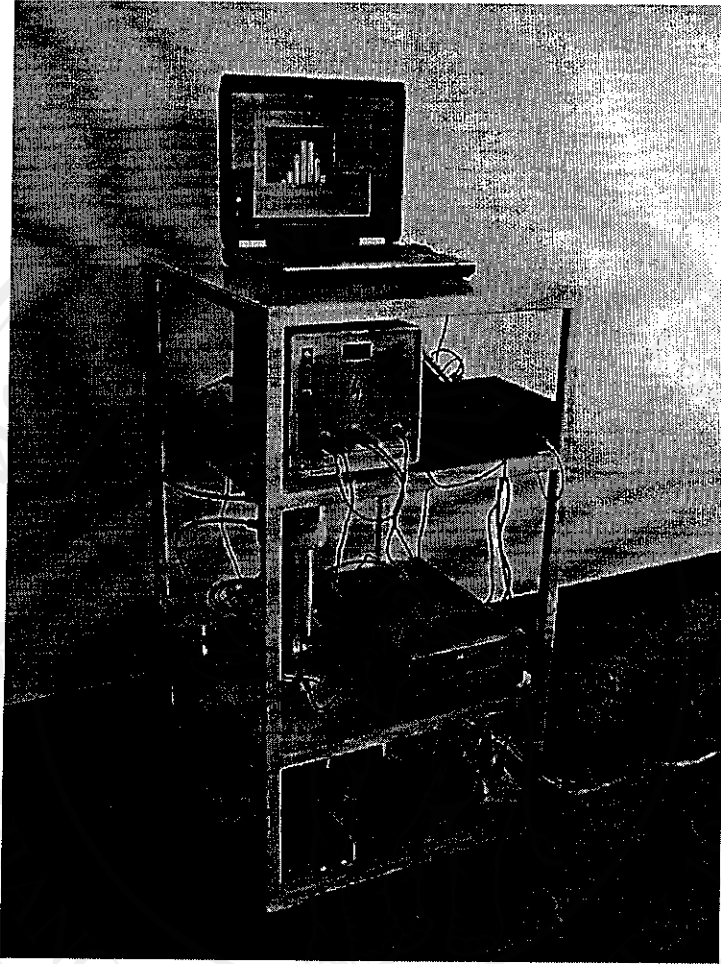


Figure C.1 Electrical Mobility Spectrometer

An array of electrode rings is connected to a series of sensitive electrometers where electrical current signals are detected and translated into size distributions. For the present study, a commercial multi-channel electrometer, a Keithley 6517A electrometer incorporating a Keithley 6522 low current scanner card, were used. The measurement is controlled and data sampled by an external personal computer via RS-232 serial port cable. Software running on an external computer was developed, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display both size distribution and number concentration.

### C.2.2 Applications

EMS is ideal for the analysis of unstable concentrations and size distributions. EMS's fields of applications include:

- Basic aerosol research
- Combustion aerosol studies
- Pollution studies
- Particle size distribution measurement in automobile exhaust.
- Characterizing sprays, powders, and other generated aerosols

### C.3 Installing the EMS Software

Install the EMS software as described below.

#### C.3.1 Computer Requirements

To use this software we recommend a personal computer with the following minimum features, components, and software:

- A Pentium®4, 2 GHz processor or higher.
- An SVGA color monitor.
- Windows XP or newer.
- A hard drive large enough to accommodate Windows, the EMS software, and data files.
- A CD-ROM drive.
- 512 MB or more of RAM.
- A mouse.
- An RS-232 serial interface port (in addition to the one that may be required for the mouse).
- A Microsoft Windows-compatible printer is optional.

#### C.3.2 Program Installation

1. Shut down (exit) all programs/applications on the Windows desktop.
2. With the computer on and Windows running, insert the EMS Software CD-ROM in your CD drive. To run the setup.exe from the CD.
3. Follow the instructions as the setup program runs.
4. When the installation program finishes, remove the CD-ROM and restart your computer. Store the CD-ROM in a safe place for later use.
5. The setup program creates a folder (directory) called “EMS” on your hard disk (assuming you accepted the default folder name). The folder contains the required program files and sample data files. The setup program also creates a new item in the Start Menu called “EMS” and an icon on your desktop for the EMS software.

### C.4 Operating the EMS

This Section presents the basics of Instrument operation. Turn the high voltage power supplies, electrometer, and flow controller on using the power switch. The instrument requires approximately 10 to 20 minutes to warm-up if the instrument has been in temperature conditions significantly different from room temperature. While the instrument is warming up, start the EMS software program. Before you begin, make certain the EMS is connected to the computer. To start the program, proceed as follows:

1. From the Windows desktop, press the Start button and select Programs | EMSv2 | EMS or select the EMS icon from the desktop. The EMS desktop appears as shown in Figure C.2.
2. Connect the EMS inlet to the desired sample line.
3. The EMS setup dialog appears as shown in Figure C.3.
4. Enter the charger and classifier conditions.
5. Enter the communications port.



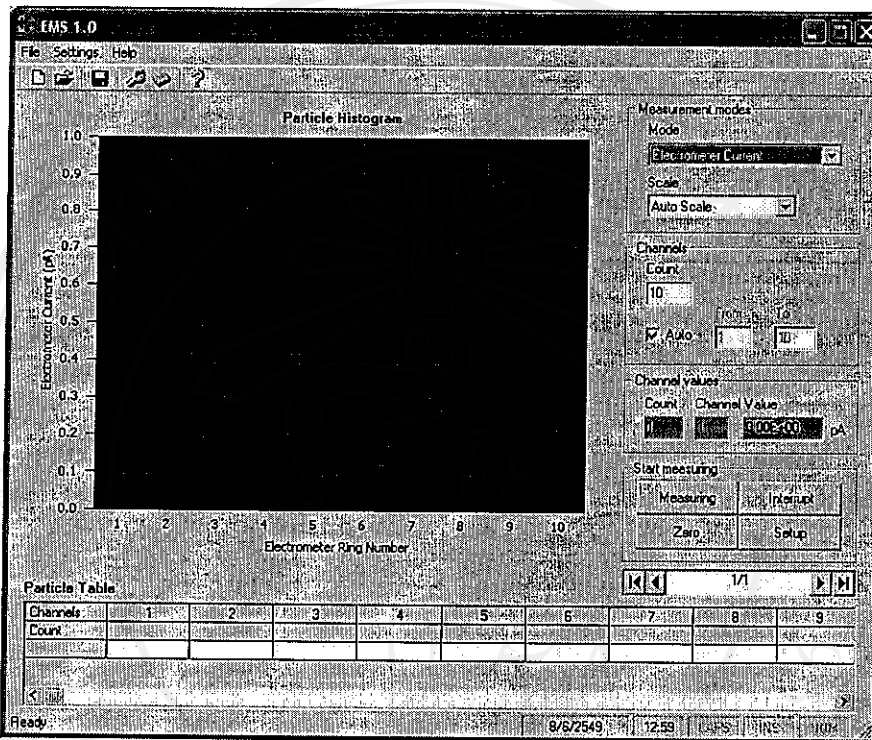


Figure C.2 EMS desktop.

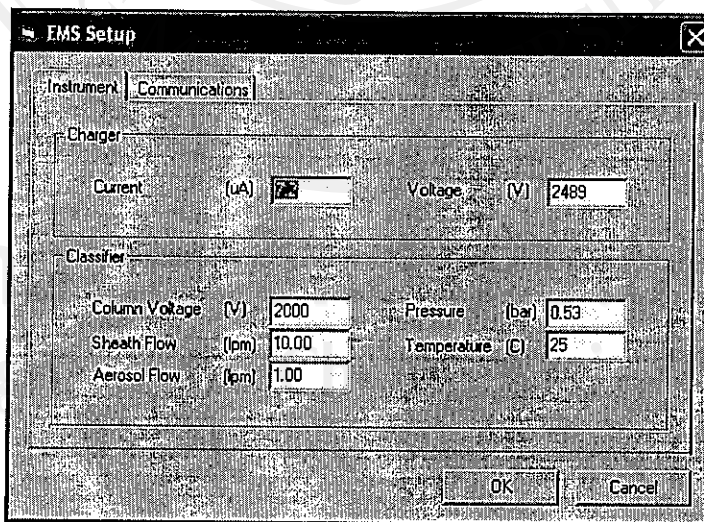


Figure C.3 EMS setup dialog.

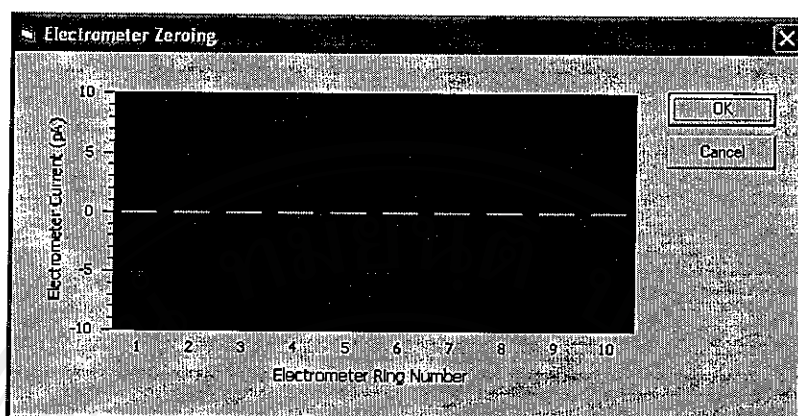


Figure C.4 Electrometer zeroing dialog.

6. Select the OK button.
7. Enter run count.
8. Check/adjust the high voltage power supply of the classifier.
9. In order to take account of temperature drifting and electrometer bias currents all electrometer rings are zeroed before actual measurement. Select the Zero button. Figure C.4 show electrometer zeroing dialog. As a precaution, a procedure the electrometer zero offset is measured and recorded at the beginning and end of the measurement.
10. After zeroing, turn the pump on. Check/adjust the flow rate at the sheath air of the classifier to 10 l/min and at the outlet of the classifier to 11 l/min.
11. Select the Measuring button to start measurement. As the program begins collecting sample data, it is displayed in the particle histogram on the desktop. Figure C.5 shows sample data. You can stop data collection before the selected run count is complete, by selecting the Interrupt button on the desktop.
12. To save sample data, select File | Save or Ctrl+S.
13. You can export the data to the Microsoft Excel file, by selecting File | Export. Figure C.6 shows sample export file.
14. To end the program, select File | Exit or Ctrl+Q



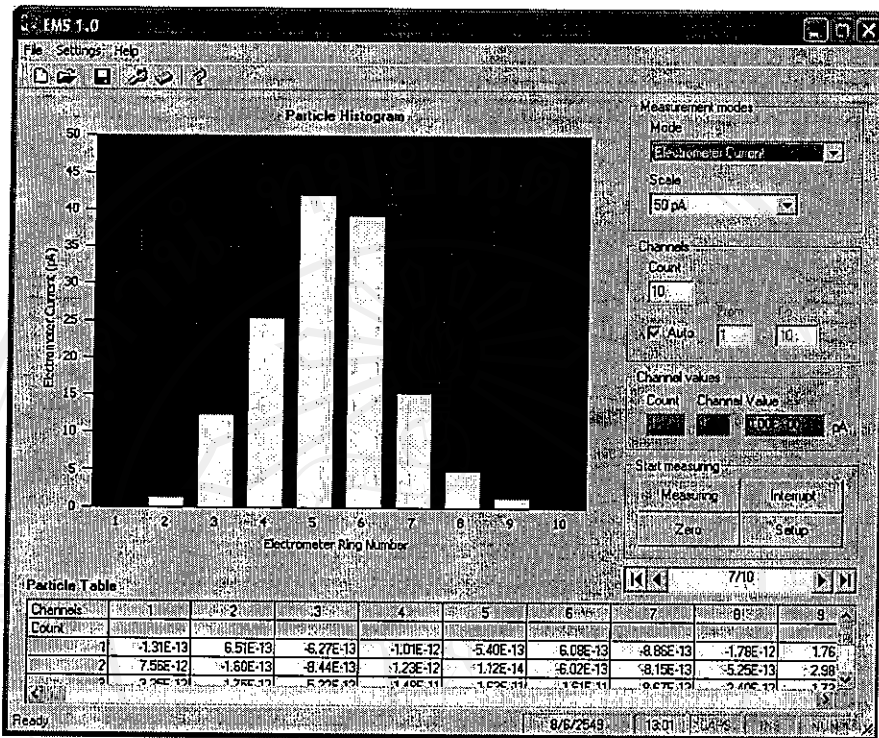


Figure C.5 Sample data.

**Microsoft Excel - Book1**

Electrometer Current

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Electrometer Current											
2	Counts:	10										
3												
4	Channels	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	Count											
6	1	-1.31E-13	6.51E-13	-6.27E-13	-1.01E-12	-5.40E-13	6.09E-13	-8.85E-13	-1.78E-12	1.76E-12	1.79E-11	
7	2	7.56E-12	-1.60E-13	-8.44E-13	1.23E-12	1.12E-14	-8.02E-13	-9.15E-13	-5.25E-13	2.98E-12	3.84E-13	
8	3	3.35E-12	1.75E-12	5.22E-12	1.48E-11	1.63E-11	1.61E-11	8.67E-12	2.40E-12	1.73E-12	-2.85E-12	
9	4	-5.42E-13	5.80E-12	1.55E-11	2.59E-11	3.65E-11	3.59E-11	2.20E-11	7.78E-12	5.24E-12	5.47E-12	
10	5	-4.20E-13	5.87E-12	1.46E-11	3.05E-11	3.96E-11	4.26E-11	2.65E-11	1.18E-11	1.79E-12	2.13E-13	
11	6	1.81E-12	4.93E-12	1.54E-11	3.06E-11	4.23E-11	4.49E-11	2.66E-11	1.27E-11	1.55E-12	4.94E-12	
12	7	-4.02E-13	1.16E-12	1.22E-11	2.53E-11	4.18E-11	3.90E-11	1.51E-11	4.80E-12	1.13E-12	-3.26E-13	
13	8	7.73E-14	4.28E-13	1.48E-12	1.93E-11	3.58E-11	4.05E-11	2.61E-11	9.98E-12	2.06E-13	-3.26E-12	
14	9	-1.16E-12	1.79E-13	-9.72E-13	1.49E-12	-4.54E-13	1.76E-12	1.50E-12	1.66E-12	6.39E-13	3.06E-12	
15	10	-6.73E-13	1.30E-12	-8.79E-14	1.96E-12	2.31E-13	-3.46E-13	1.31E-13	1.24E-12	8.25E-13	3.61E-12	

Figure C.6 Sample export file.



## C.5 Maintenance

This Section provides maintenance procedures for the EMS components. Table C.1 provides a general indication of the maintenance requirements. In applications where high concentration may be generated, maintenance is required more often.

Table C.1 Maintenance Schedule.

Maintenance Task	Hours of Operation
Check/clean the impactor	5 hours of operation or as needed
Check/clean the charger electrodes	5 hours of operation
Clean the high voltage column electrode and electrometer rings	10 hours of operation
Replace the sheath air filter cartridges	>6000 hours of operation or as needed
Replace the pump filter cartridges	100 hours of operation or as needed

### C.5.1 Cleaning the Impactor

To clean the impactor, follow these steps:

1. Disconnect the sample inlet/outlet tubes.
2. Remove the impactor screws.
3. Lift off the impaction plate.
4. Clean the impaction surface with a soft cloth soaked with isopropyl alcohol or water.
5. Allow the impaction surface and assembly to dry with compressed air.
6. Apply a very small amount of grease to the impaction surface.
7. Examine the nozzle orifice under a microscope or powerful magnifying glass. If the nozzle needs to be cleaned, squirt alcohol through the nozzle hole until clean. Repeat this for all nozzles.
8. Reassemble the impactor making sure that the O-ring is properly in place between the impactor nozzle and body.

### C.5.2 Cleaning the Corona Charger

To clean the corona charger, proceed as follows:

1. Power off the equipment and wait 30 minutes for the internal capacitors to discharge.
2. Disconnect the high-voltage connector on the top of the charger. Use caution (Note: You should never pull or tug on the high-voltage cable-always grip the plug to disconnect the cable. You should never use the cable to carry or move the instrument. If the cable breaks, you could be exposed to dangerous high voltage. A cut or damaged cable should be replaced immediately. Always switch the instrument off before connecting or disconnecting the high-voltage connector.).
3. Disconnect the sample inlet/outlet tubes.
4. Unscrew the needle holder assembly screws.
5. Carefully lift off the needle holder. Use caution (as you move the assembly, check that all cables, house, and screws have been disconnected).
6. Use compressed air to blow out the needle and outer chassis in isopropyl alcohol or water.

7. Examine the interior outlet orifice to make sure it is clear.
8. Reassemble and reinstall the charger making sure that the O-ring is properly in place between the needle holder and outer chassis.

### C.5.3 Cleaning the Mobility Classifier

To clean the mobility classifier, follow these steps:

1. Switch the equipment off and wait 5 minute for the internal capacitor to discharge.
2. Disconnect the high-voltage connector on the side of the classifier.
3. Disconnect the sample aerosol inlet tube at the top of the classifier assembly.
4. Disconnect the sheath air inlet tube at the top of the classifier assembly.
5. Disconnect the excess air outlet tube at the bottom of the classifier assembly.
6. Disconnect the electrometer spade lug connectors. As a precaution, note the use of an ESD wrist strap.
7. Loosen the four screws on the top of the flange that hold the base of the classifier column assembly.
8. Carefully pull up on the assembly above the flange.
9. Turn it over and then carefully lift the outer column straight up and out of the instrument chassis. Take care not to scrape the inner and outer columns together. Use caution (Note: Be careful to avoid scratching the inner electrode and the inside of the tubes as you remove it. A small scratch, nick, or burr can disrupt the electric field inside the classifier column, severely affecting its performance).
10. Move the column assembly to a clean work surface.
11. Although the inner column shouldn't be dirty since the electric field repels all particles, you can now clean the inner electrode using a soft, dry, lint-free cloth. Wipe the electrode using a clockwise motion, not up and down. If the accumulated particles cannot be removed with the cloth, try using a cloth dampened with isopropyl alcohol. It is noted that do not immerse the electrode in any solvent.
12. Clean the inside rings of the electrometer assembly using a soft, dry, lint-free cloth. Wipe the ring using a clockwise motion, not up and down. If the accumulated particles cannot be removed with the cloth, try using a wet cloth (distilled water first; if that does not remove the particulates, try isopropyl alcohol). Depending on the size of your hand, it may be necessary to clean half the assembly from the top and then turn it over and clean the other half from bottom. It is noted that do not immerse the rings in any solvent.
13. Allow the column and assembly to air dry if necessary.
14. Reassemble the column in the reverse order of disassembly. Use caution (Note: Be careful to avoid scratching the inner electrode and the inside of the tubes as you remove it. A small scratch, nick, or burr can disrupt the electric field inside the classifier column, severely affecting its performance).
15. After cleaning reassemble the classifier column and after warm-up, zero the electrometers. If the problem is still present, try zeroing the electrometers again. If this still doesn't help, you may have to clean the column again.

## C.6 Troubleshooting

### C.6.1 Electrometer Noisy Channels

As the electrometer channels become dirty or contaminated with material, the noise level on all channels may gradually drift up as shown in Figure C.7. This can be seen when there is a considerable signal even when sampling filtered air. This can be corrected using the “Zero Electrometers” function from the EMS software program.

1. Select Setting | Zero Electrometers.
2. Electrometer Zero window will be displayed.
3. In general, these values should be below 5 pA. However, it is also important that the values are stable.
4. Close the window and repeat the zero procedure.
5. Compare the values from this reading to the last values from the previous zero. They should be similar. If they are not, allow the instrument to warm up for another 1 hours and perform another zero. Repeat this until the readings are stable. If the reading does not become stable after repeated zero procedures, the classifier column may need to be cleaned again. Following cleaning, the values should look more like Figure C.8 with data fluctuating somewhere around 1 pA or less.

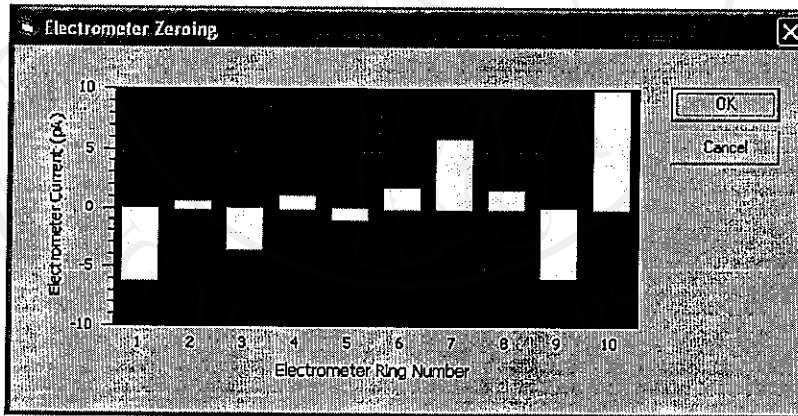


Figure C.7 Raw electrometer noisy channel.

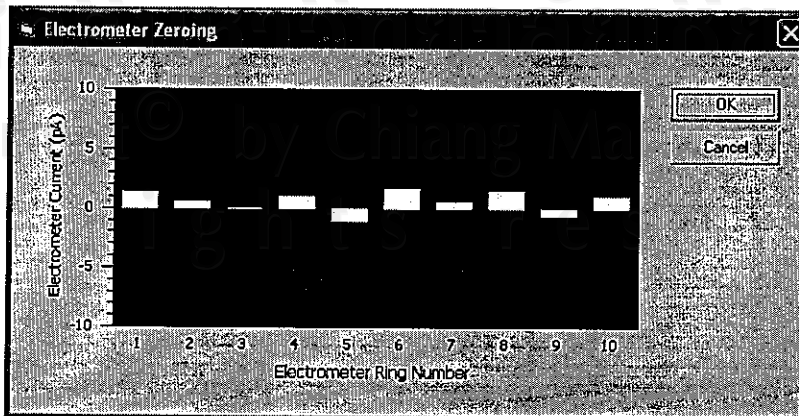


Figure C.8 Raw electrometer data after cleaning.

**C.6.2 Charger Current/Voltage Too Low/High**

1. Check that flowmeter connector did not come loose during shipping, or has a loose connection
2. The charger current is not stable or has hit a voltage limit to meet the required current.
3. Clean the charger assembly and clean or replace the charger corona electrode.

**C.6.3 Sheath Flowrate Too Low/High**

1. The sheath flow filters may be loaded. Try replacing the filters
2. Check that flowmeter connector did not come loose during shipping, or has a loose connection.
3. Disconnect the instrument from any external air flow. The vacuum pump may be off, but the flow is being forced through the flowmeter by an external source.

**C.6.4 Total Flowrate Too Low/High**

1. The total flow filters may be loaded. Try replacing the filters
2. Check that flowmeter connector did not come loose during shipping, or has a loose connection.
3. Disconnect the instrument from any external air flow. The vacuum pump may be off, but the flow is being forced through the flowmeter by an external source.

### C.7 Specifications

The EMS operating specifications are as follows:

Table C.2 Specifications of the EMS.

	Specifications
Particle size range	10 to 1,000 nm
Particle concentration range	$10^{11}$ to $10^{13}$ particles/m <sup>3</sup>
Time response	30 s
Charger type	Corona charger
Charging mode of operation	Unipolar diffusion and field charging
Particle detector	Electrometers
Electrometer channels	10
Inlet impactor 50% cutpoint	1 $\mu$ m
Aerosol flow rate	1 l/min
Sheath air flow rate	10 l/min
Operating pressure	34.5 kPa
Computer requirements	Pentium® 4 processor or better
Computer operating system	Windows XP or newer
Communications	9-pin RS-232
Electrode applied voltage	500 V to 3 kV
Aerosol inlet	R 3/8
Exhaust outlet	R 3/8
Operation conditions, instrument	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ambient temperature: 5° to 40° C</li> <li>Ambient humidity: 0 to 90% RH (non-condensing)</li> </ul>
Aerosol conditions	Gas temperature: < 60 °C
Electric power	220-240 V, 50 Hz



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

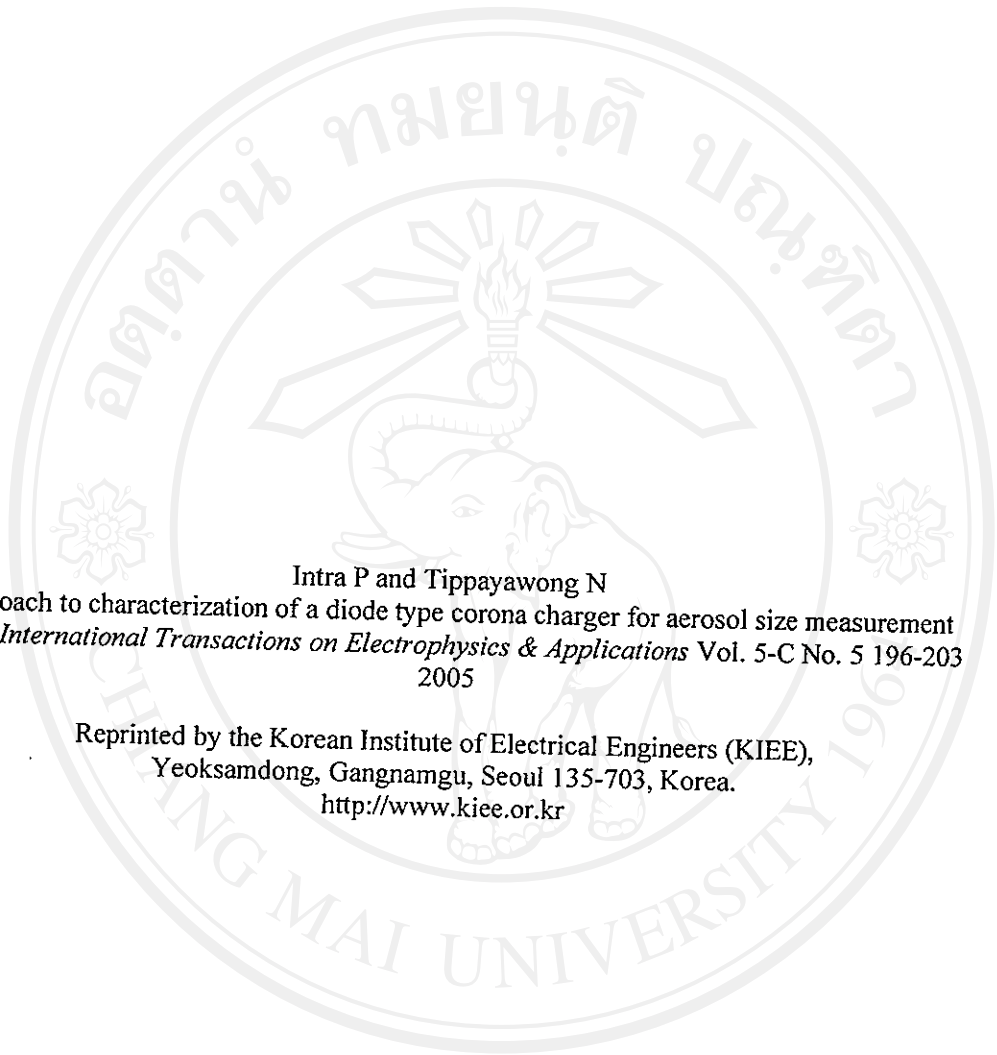


## APPENDIX D

## LIST OF PUBLICATIONS

This thesis results in the following papers:

1. Intra, P. and Tippayawong, N., "Particle size analyzers," *Journal of the Scientific & Technological Research Equipment Centre*, Vol. 11, 156-170, 2003. (in Thai)
2. Intra, P. and Tippayawong, N., "Analytical investigation of aerosol transport under electric field," *NSTDA Annual Conference (NAC2005)*, 27-30 March, Bangkok, Thailand, 2005. (in Thai)
3. Intra, P. and Tippayawong, N., "Numerical simulation of flow and electric fields in an electrical mobility spectrometer," *International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution (ISNEPP 2005)*, 12-14 January, Bangkok, Thailand, 2005.
4. Intra, P. and Tippayawong, N., "Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement," *KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications*, Vol. 5-C, No. 5, 196-203, 2005.
5. Intra, P. and Tippayawong, N., "An electrical mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement," *International Conference on Technology and Innovation for Sustainable Development (TISD2006)*, 25-27 January, Khon Kaen, Thailand, 2006.
6. Intra, P. and Tippayawong, N., "Aerosol size distribution measurement using multi-channel electrical mobility sensor," *Journal of Aerosol Research Japan*, under 2<sup>nd</sup> review.
7. Intra, P. and Tippayawong, N., "Comparative study on electrical discharge characteristics and operation of needle and wire-cylinder corona chargers," *KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications*, under review.
8. Intra, P. and Tippayawong, N., "On the performance of the electrical mobility spectrometer", in preparation.



Intra P and Tippayawong N  
Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement  
*KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications* Vol. 5-C No. 5 196-203  
2005

Reprinted by the Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE),  
Yeoksamdong, Gangnamgu, Seoul 135-703, Korea.  
<http://www.kiee.or.kr>

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved



# **ELECTROPHYSICS and APPLICATIONS**

General information at <http://www.kiee.or.kr>

## **Editorial Board**

For e-mail addresses, go to the URL <http://www.kiee.or.kr>

### **Editor-In-Chief**

*Dae-Hee Park*

Wonkwang University

344-2 Shinyong-dong, Iksan-si, Jeollabuk-do, 570-749, Korea

E-mail: [parkdh@wonkwang.ac.kr](mailto:parkdh@wonkwang.ac.kr)

TEL: +82-63-850-6349 FAX: +82-63-857-6890

### **Editors**

*Byung-Tai Kim*

Chongju University

E-mail: [btkim@chongju.ac.kr](mailto:btkim@chongju.ac.kr)

TEL: +82-43-229-8502

FAX: +82-43-229-8502

*Jung-Ho Pak*

Korea University, Korea

E-mail: [pak@korea.ac.kr](mailto:pak@korea.ac.kr)

TEL: +82-2-3290-3238

FAX: +82-2-921-1325

*Yearn-Ik Choi*

Ajou University, Korea

E-mail: [yearnik@madang.ajou.ac.kr](mailto:yearnik@madang.ajou.ac.kr)

TEL: +82-31-219-2363

FAX: +82-31-212-9531

### **Associate Editors**

*Won-Chae Jung*

Kyonggi University, Korea

*Young-Wook Choi*

KERI, Korea

*Masayuki Hikita*

Kyushu Institute of Technology, Japan

*Dong-Wook Kim*

LG Cable, Korea

*Hyun-Hoo Kim*

Doowon Institute of Korea

*Young-Kwan Kim*

Hongik University, Korea

*Jong-Ho Lee*

Kyungpook National University, Korea

*De LiuFu*

Piezotech, LLC, U.S.A

*Harry E. Orton*

Orton Co., Canada

*Yong-Kap Kim*

Wonkwang University, Korea

*Ki-jun Park*

KEPRI, Korea

*Jun-Sin Yi*

Sungkyunkwan University, Korea

*Young-Tae Lee*

Andong University, Korea

*Yong-Sung Choi*

Wonkwang University, Korea

*Kyo-Yong Han*

Yeungnam University, Korea

*Uk Kang*

KERI, Korea

*Yun-Mo Sung*

ADD, Korea

*Sang-Sig Kim*

Korea University, Korea

*Hyun-Seung Lee*

Samsung Electronics Co., Ltd, Korea

*Sang-Yeol Lee*

Yonsei University, Korea

*Ryosuke Matsuoka*

Chubu University, Japan

*Masanori Ozaki*

Osaka University, Japan

*Chung-Kun Song*

Dong-A University, Korea

*Guangning Wu*

Southwest Jiaotong University, China

*June-Ho Lee*

Hoseo University, Korea

### **Editorial Advisory Board**

*Chong H. Ahn*

University of Cincinnati, U.S.A

*Ravi S. Gorur*

Arizona State University, U.S.A

*Stan Grazybowski*

Mississippi State University, U.S.A.

*Ken Kimura*

Kyushu Institute of Technology, Japan

*Esashi Masayoshi*

Tohoku University, Japan

*Yoshimichi Ohki*

Waseda University, Japan

*Soli S. Bamji*

Institute for Nat'l Measurement Standards Ottawa, Canada

*Stanislaw Gubanski*

Chalmers University of Technology, Sweden

*Okubo Hitoshi*

Nagoya University, Japan

*Gil-Sik Lee*

University of Texas at Dallas, U.S.A

*William I. Milne*

Cambridge University, UK

*Frank G. Shi*

University of California, Irvine, U.S.A

# Approach to Characterization of a Diode Type Corona Charger for Aerosol Size Measurement

Panich Intra\* and Nakorn Tippayawong<sup>†</sup>

**Abstract** - A semi-empirical method to determine the electrostatic characteristics of a diode type corona aerosol charger based on ion current measurement and electrostatic charging theory was presented. Results from mathematical model were in agreement with those from experimental investigation of the charger. Current-voltage characteristics,  $N_i t$  product and charge distribution against aerosol size were obtained. It was shown that the space charge was significant and must be taken into account at high ion number concentration and low flow rate. Additionally, significant particle loss was evident for particles smaller than 20 nm in diameter where their electrical mobility was high. Increase in charging efficiency may be achieved by introducing surrounding sheath flow and applying AC high voltage. Overall, the approach was found to be useful in characterizing the aerosol charger.

**Keywords:** aerosol, corona, charger, unipolar charging

## 1. Introduction

Corona discharges are among the most common techniques to produce high ion concentrations and there have been numerous extensive studies in the past. The phenomenon is used in many industrial applications such as electrostatic coating and precipitation[1]. Electrostatic charging by the corona dischargers is also commonly used in determining aerosol size distribution by electrical mobility analysis. During this process, aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by random collisions between the ions and particles due to Brownian motion of ions in space. The amount of ion deposition on the particle surface depends on resident time, particle radius and shape, electric field, etc. The process can be characterized as unipolar or bipolar depending on the polarity of the ions in the gas. The technique has been applied successfully and several designs of wire-cylinder corona charger are employed and described in the published literature, both wire-cylinder corona[2-4] and needle chargers[5]. A number of particle sizing instruments employ unipolar corona chargers[6-10] as important upstream component to impart known charge to the aerosol system. The charger performance of these instruments depends on the stable operation of their chargers. Aerosol charging is a function of the ion concentration,  $N_i$ , and the mean residence time of the particles to the ions,  $t$ . For this reason, a well-designed corona charger should provide a stable  $N_i t$  product that can be accurately determined for any

given operating conditions.

In the present study, the diode type corona charger was chosen. The main advantages of this charger type are the high efficiency and the simple construction. The electrostatic characteristics of the corona charger were evaluated at different operating conditions. A semi-empirical method was used based on ion current measurement and electrostatic charging theory. Average and spatial distribution of ion concentrations in the charging region of the corona charger were calculated. The space charge effect was also considered. Distribution of the  $N_i t$  product as well as particle penetration and average elementary charge on particle against its diameter were computed and discussed.

## 2. Theory

### 2.1 Spatial Distribution of Ion Concentration

Derivation of the theoretical current-voltage relation proceeds from Poisson's equation which governs all electrostatic phenomena and is given as [11]

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

where  $V$  is the applied voltage,  $\rho$  is the space-charge density, and  $\epsilon_0$  is the dielectric constant of vacuum ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m). Assuming no axial variation, the above equation can be expressed in cylindrical coordinates as

$$\frac{1}{r} \frac{dV}{dr} \left( r \frac{dV}{dr} \right) + \frac{\rho(r)}{\epsilon_0} = 0 \quad (2)$$

<sup>†</sup> Corresponding Author: Dept. of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Thailand. (nakorn@dome.eng.cmu.ac.th)

\* Dept. of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Thailand. (panich\_intra@yahoo.com)

Considering that the ion current density is

$$\vec{j} = \rho \vec{u}_i \tag{3}$$

where  $u_i(r) = Z_i E(r)$  is the mean ionic velocity, the space-charge density for the cylindrical corona is given by

$$\rho(r) = \frac{I_{ion}}{2\pi r L Z_i E(r)} \tag{4}$$

where

$$E(r) = -\frac{dV}{dr} \tag{5}$$

Noting that  $j = I_{ion}/2\pi r L$ .  $I_{ion}$  is the measured ion current at distance  $r$  from the corona-wire in the charger with charging length  $L$ , and  $Z_i$  the electrical mobility of the ions. Substituting  $\rho(r)$  and  $E(r)$  into equation (2) gives

$$rE(r) \frac{dE(r)}{dr} + E(r)^2 - \frac{I_{ion}}{2\pi L \epsilon_0 Z_i} = 0 \tag{6}$$

This equation is readily integrated to

$$E(r) = \sqrt{\frac{I_{ion}}{2\pi L \epsilon_0 Z_i} + \frac{c}{r^2}} \tag{7}$$

This describes the electric field under space charge conditions where  $c$  is the integration constant which is constrained to the interval

$$\left( -\frac{I_{ion} r_1^2}{2\pi \epsilon_0 L Z_i} \right) \leq c \leq \left( \frac{V}{\ln(r_2/r_1)} \right)^2 \tag{8}$$

The space charge can, at most, compensate the electric field at the inner electrode to zero. The limiting case,  $E(r_1) = 0$ , corresponds to the lower limit for  $c$ . The other extreme of no space charge implies that  $I_{ion} = 0$  and the expression for the electric field in a concentric electrode gap, if the space charge effect is neglected, is determined by

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(r_2/r_1)} \tag{9}$$

Inserting  $E(r)$  in equation (7) gives the upper limit for  $c$ . The integral equation (7) along the radial distance in the

charging region of the charger is equal to the voltage difference

$$V = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr \tag{10}$$

The integration limits for the case of the ion generation zone are the corona-wire  $r_1$  and the outer electrode  $r_2$  radii, respectively. In the same way,  $V$  is the voltage difference between the corona-wire and the outer electrode of the charger. Integrating the above equation results in

For  $c > 0$

$$V = \left[ \frac{I_{ion}}{2\pi L \epsilon_0 Z_i} r^2 + 2c \right]^{1/2} + \frac{c}{\sqrt{2c}} \ln \left[ \frac{\sqrt{\frac{I_{ion}}{2\pi L \epsilon_0 Z_i} r^2 + 2c} - \sqrt{2c}}{\sqrt{\frac{I_{ion}}{2\pi L \epsilon_0 Z_i} r^2 + 2c} + \sqrt{2c}} \right] \Bigg|_{r_1}^{r_2} \tag{11}$$

For  $c < 0$

$$V = \left[ \frac{I_{ion}}{2\pi L \epsilon_0 Z_i} r^2 + 2c \right]^{1/2} + \frac{c}{\sqrt{-2c}} \arccos \frac{1}{r} \sqrt{\frac{4c\pi \epsilon_0 L Z_i}{I_{ion}}} \Bigg|_{r_1}^{r_2} \tag{12}$$

The electric field strength at the surface of the wire at corona discharge onset,  $E_0$ , has been experimentally evaluated by Peek [12] and fitted empirically by relation as

$$E_0 = E_s (\delta + A \sqrt{\delta/r_1}) \tag{13}$$

where

$$\delta = \frac{T_r P}{T P_r} \tag{14}$$

$E_s$  denotes the breakdown field in air at normal conditions ( $3.10 \times 10^6$  V/m for negative corona, and  $3.37 \times 10^6$  V/m for positive corona, at standard temperature and pressure),  $A$  is a dimensioned constant ( $0.0308 \text{ m}^{1/2}$  for negative corona, and  $0.0241 \text{ m}^{1/2}$  for positive corona),  $\delta$  is the relative density of air relative to normal conditions ( $1.205 \text{ kg/m}^3$  for air),  $T_r$  is the absolute temperature of room air,  $P_r$  is the normal atmosphere pressure, and  $T$  and  $P$  are the operating temperature and pressure of the air. If space-charge effect is neglected, the corona onset voltage  $V_0$  can be calculated from equation (9) as

$$V_0 = E_0 r_1 \ln(r_2 / r_1) \quad (15)$$

The average current density  $j$  at the outer electrode surface area as a function of the potential at the corona discharge electrode, can be expressed by:

$$j = \frac{4\epsilon_0 Z_i}{r_2^3 \ln(r_2 / r_1)} V(V - V_0) \quad (16)$$

This approximation was originally proposed by Townsend [13]. The current density in equation (16) can be expressed in term of the ion current  $I_{ion}$  toward the outer electrode wall surface area as

$$I_{ion} = \frac{8\pi\epsilon_0 Z_i}{r_2^2 \ln(r_2 / r_1)} V(V - V_0) \quad (17)$$

Assuming that the distortion of the field distribution due to the ion space charge effect is neglected, the corona current of equation (17) is equal to

$$I_{ion} = 2\pi r_2 n e Z_i E(r) \quad (18)$$

Hence, the density is expressed by

$$n = \begin{cases} \frac{4\epsilon_0}{e r_2^2} (V - V_0), & V > V_0, \\ 0, & V \leq V_0, \end{cases} \quad (19)$$

It is clear that calculation of the ion current from voltage difference at the corona discharge electrode depends on the assumption of the ion properties. Although the exact physicochemical mechanism of the formation of the ions in corona discharges is not well known, there is evidence that primary ions formed in the corona region undergo a process of clustering reactions to produce ions of higher molecular weight [14]. It has been suggested that the average value for the positive and negative ion electrical mobility at atmospheric pressure were  $Z_i^+ = 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$  and  $Z_i^- = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V s}$ , respectively [15]. These are the average mobilities used throughout the calculations presented in this paper.

## 2.2 Estimation of the $N_i t$ Product

The particle charging performance depends on the product of the ion concentration  $N_i$  and the mean residence time  $t$  of the particles to the ions in the charger. This  $N_i t$  product is the main charging parameter. Therefore, prior to any modeling of the charging process, it is necessary to

estimate the  $N_i t$  product established in the charging region under any operating conditions (corona voltages and sample flow rates). The ion concentration distribution is calculated by

$$N_i(r) = \frac{I_{ion}}{2\pi r L Z_i e E(r)} \quad (20)$$

The mean residence time of the particles in the charger is given by

$$t = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)L}{Q_a} \quad (21)$$

where  $L$  is the length of the charging region, and  $Q_a$  is the aerosol flow rate. For the standard aerosol flow of 5.0 liter/min, the mean residence time of the particle in the charger is 0.085 s at atmospheric pressure. In calculation of variation of the particle residence time along the radial distance in the charging region, the flow velocity profile has to be taken into account. The parabolic velocity profile  $u(r)$  for stationary laminar flow through the charger was assumed since the obstruction of the flow caused by the wire electrode is neglected due to the very thin ( $r_1 \ll r_2$ ) wire electrode. The expression for the velocity profile is given, using "flow in a pipe" approximation, as

$$u(r) = -\frac{dp}{dz} \frac{r_2^2}{4\mu} \left( 1 - \left( \frac{r}{r_2} \right)^2 \right) \quad (22)$$

where  $\mu$  is the viscosity of the gas, and  $dp/dz$  is the constant pressure gradient. The charging residence time with the parabolic velocity profile is given by

$$t(r) = \frac{L}{u(r)} \quad (23)$$

## 2.3 Estimation of the Penetration through the Charger

The particle loss inside the charger due to the electrostatic loss is defined as the ratio of the charged particles concentration at the outlet over the total concentration of uncharged particle at the inlet of the charger. The particle penetration through the charger can be calculated by Deutsch-Anderson equation as [16]

$$P = \exp\left(\frac{-2Z_p E t}{r_2}\right) \quad (24)$$

where  $Z_p$  is the electrical mobility of particle,  $E$  is the



electric field,  $t$  is the mean residence time, and  $r_2$  is the outer electrode radius. In this study, the particle loss inside the charger is primarily due to the strong electric field caused by the corona discharge. Diffusion and gravitational losses are not significant.

## 2.4 Estimation of the Average Charge per Particle

Upon entering a region of unipolar ions, the submicron particle will acquire some net charge within this region. The magnitude of the charge depends upon the size of the particle, the unipolar ion density encountered, and the time that particle spends within this region. In the absence of any appreciable electric field, this particle will be diffusively charged by the Brownian random motion of the ions with respect to the particle. This diffusion charging, first characterized by White[15] and more recently modified by Pui[14], can be expressed in a convenient analytic form. For an initially neutral particle immersed in a unipolar ion cloud, the flux of ions impinging on the particle surface area is given by

$$J = 4\pi a^2 \left( \frac{N_i \bar{c}_i}{4} \right) \quad (25)$$

where  $a$  is the particle radius,  $N_i$  is the concentration of ions above the surface and  $\bar{c}_i$  is the mean thermal speed of the ions. The spatial distribution of ions is given by the classical Boltzmann distribution for the equilibrium state. Neglecting the image force attraction between the ions and the particle, the Boltzmann distribution at the particle surface is given by

$$N_s = N_i \exp\left(-K_E \frac{n_p e^2}{akT}\right) \quad (26)$$

where  $N_i$  is the ion concentration at infinity,  $n_p$  is the particle charge,  $e$  is the elementary unit of charge,  $K_E = 1/4\pi\epsilon_0$  with the vacuum permittivity,  $k$  is the Boltzmann's constant ( $1.380658 \times 10^{-23}$  J/K), and  $T$  is the operating temperature of the system. Substituting equation (26) into equation (25) gives

$$J = \pi a^2 \bar{c}_i N_i \exp\left(-K_E \frac{n_p e^2}{akT}\right) \quad (27)$$

The above equation was originally derived by White[15]. The charging rate expression can be described by the system of differential equation as

$$\frac{dn_p}{dt} = J \quad (28)$$

With the initial condition that  $n_p = 0$  at  $t = 0$  for the charging of an aerosol (initially neutral), the average charge of particle can be integrated analytically to give

$$n_p = \int_0^t J dt \quad (29)$$

Thus, the average charge,  $n_{diff}$ , caused by the diffusion charging in a time period,  $t$ , by a particle diameter  $d_p$ , can be found from

$$n_{diff} = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln\left(1 + \frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT}\right) \quad (30)$$

where  $d_p$  is the particle diameter. The effect of the finite electric field used in the charging region can be estimated by the classical field charging equation derived by White [15], the saturation charge,  $n_s$ , of a particle (diameter,  $d_p$  and dielectric constant,  $\epsilon$ ) in an electric field  $E$  is given by

$$n_s = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e}\right) \quad (31)$$

The charging rate,  $dn_p/dt$ , is

$$\frac{dn_p}{dt} = n_s K_E e Z_i N_i \left(1 - \frac{n_p}{n_s}\right)^2 \quad (32)$$

If the particle is initially neutral, the average number of charge,  $n_{field}$ , acquired in an average electric field  $E$  is given by

$$n_{field} = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \left(\frac{Ed_p^2}{4K_E e}\right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t}\right) \quad (33)$$

where  $\epsilon$  is the particle dielectric constant. In this study,  $\epsilon = 3.0$  is arbitrarily assumed for the dielectric constant of the particle. Both field and diffusion charging occur at the same time. This is known as continuum charging where particle charge is the sum of the contributions from combined field and diffusion charging[17].

### 3. Experimental Setup

The charger in the present study is based on an electrical discharge generated between a corona-wire and an outer electrode. A schematic diagram of the unipolar corona charger is illustrated in Fig. 1. Its geometrical configuration is similar to the charger used by Lethtimaki[18] and Keskinen *et al.*[8]. It consists of a coaxial corona-wire electrode placed along the axis of a metallic cylinder (28 mm in diameter and 10 mm in length). The wire electrode is made of stainless steel, 150  $\mu\text{m}$  in diameter and 10 mm long. DC high voltage is used to produce the corona discharge on the wire electrode while the outer metallic cylinder is grounded. An adjustable DC high voltage power supply (Leybold Didactic model 521721, 500 mV peak-to-peak ripple) is used to maintain this voltage difference, generally in the range between 1–25 kV. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field ( $>10^3\text{V/m}$ ) toward the outer electrode wall. Aerosol flow is regulated and controlled by means of a mass flow meter and controller. The flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions. This process is called diffusion charging which provides good resolution for submicron sized particles. If the ions are subjected to a strong electrical field, they will move rapidly in response to the field, greatly increasing the rate of collision between particle and ions. This is referred to as field charging which is significant for supermicron sized particles. The performance of the charger is a function of the ion concentration in

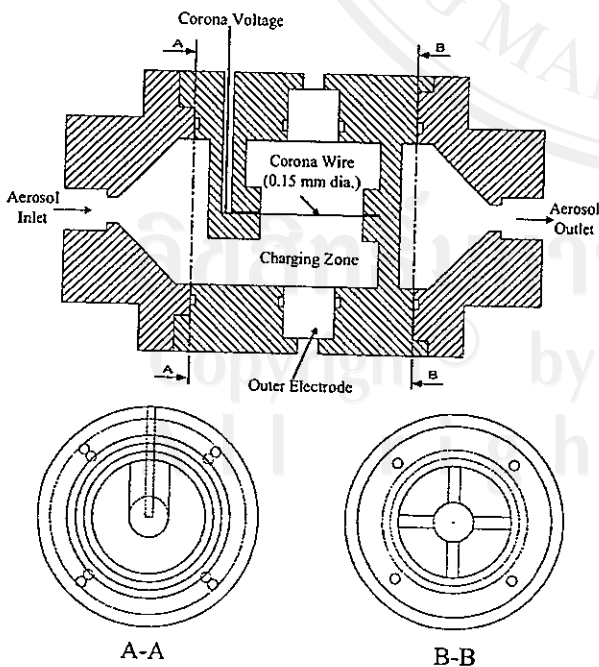


Fig. 1 Schematic diagram of the diode type corona charger

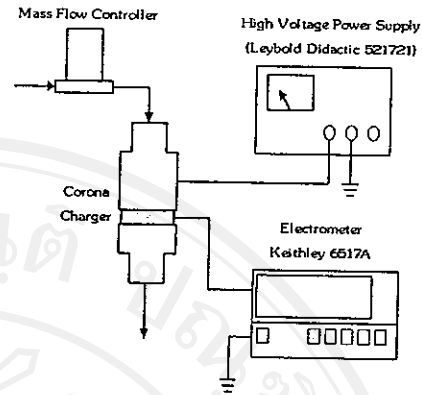


Fig. 2 Experimental setup of the ion-current measurement

the charging zone, therefore continuous monitoring of the ion current from the corona-wire to the outer electrode is necessary. The electrometer (Keithley model 6517A) is used to measure the ion current from the corona-wire via the outer electrode. Fig. 2 shows a typical experimental setup. The current measurements are translated into ion concentrations given the mean ionic mobility and the electric field strength in the charging zone. The ionic concentration is then used as an input for the charging models.

### 4. Results and Discussion

Fig. 3 shows the relationship between ion current and the applied voltage for the charger for both positive and negative ions. Theoretical prediction was also plotted along side the ion current measurement results. Similar patterns for both positive and negative ions were produced, showing higher current for negative ions due to their higher mobility than that of positive ions. A good match of theory to the experimental curve was obtained from corona onset voltage up to about 8 kV. Large discrepancy was evident

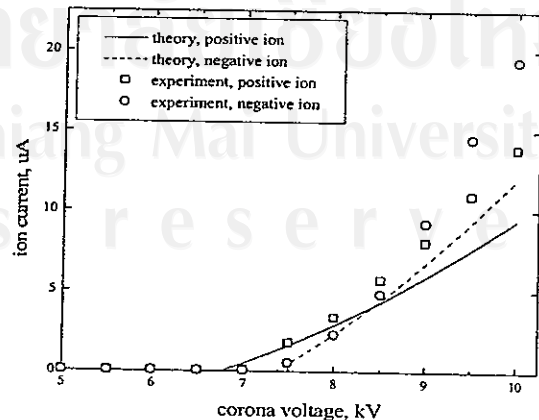


Fig. 3 Current-voltage characteristic of the positive and negative ions in the charging zone

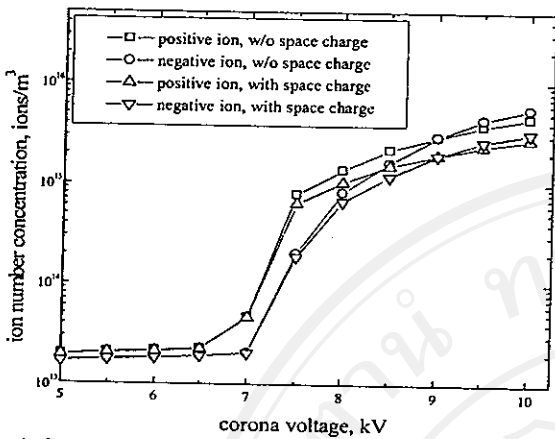


Fig. 4 Comparison of ion number concentration as a function of the corona-wire voltage

beyond this value of corona voltage where ion number concentration was high, in the region of  $5 \times 10^5$  ions/m<sup>3</sup>. The main reason may be explained by the fringe and the space charge effects.

The space charge effect on the ion number concentration as a function of the corona-wire applied voltage was depicted in Fig. 4. Slight differences in ion number concentration with and without considering the space charge effect were found. The difference appeared to increase with increasing applied corona voltage. Similarly, spatial distribution of electric field strength and ion number concentration was shown in Fig. 5. Increase in radial distance away from the central wire resulted in marked discrepancy in the field strength and ion concentration with and without the space charge effect. It was clear that space charge effect was significant in the corona discharge region. If the space effect was neglected, a significant error was produced. It should be noted that the influence of aerosol particles can be neglected because the particle number concentration was assumed to be much smaller than the ion number concentration.

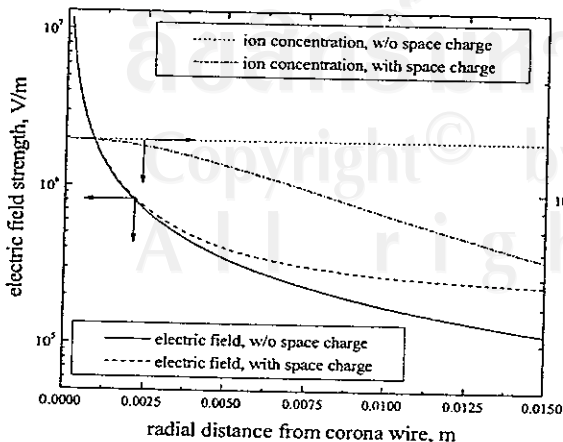


Fig. 5 Radial variation of the electric field strength and ion concentration in the charging region

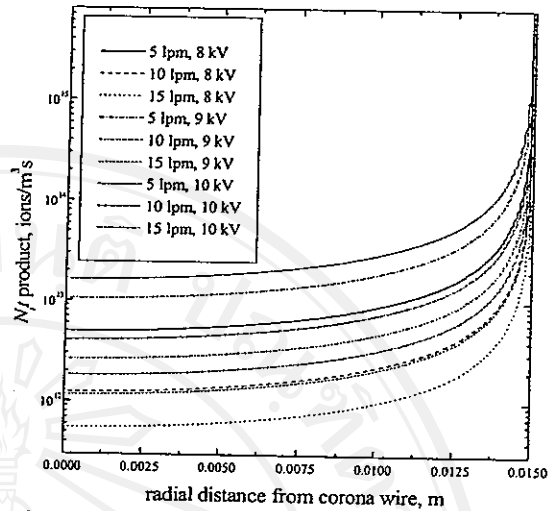


Fig. 6 Radial variation of the  $N_t t$  product in the charging region at different operating aerosol rate and applied corona voltage

Particle charging depends on the product of the ion concentration and the average time the aerosol particles spend in the charger. Fig. 6 shows the radial variation of the  $N_t t$  product for different operating aerosol flows and applied corona voltages. The resultant products were evaluated for 5 – 15 liter/min and 8 – 10 kV, considering the space charge effect. The obtained results were expected for the effects of aerosol flow and corona voltage. The higher flow rate, hence the shorter residence time gave rise to lower  $N_t t$  product. Increase in corona voltage produced a monotonic increase in ion concentration, hence the  $N_t t$  product. Overall, the  $N_t t$  product did not show strong radial variation except at very close to the outer wall. The identical operating conditions were used to compute particle electrical mobility distribution and penetration

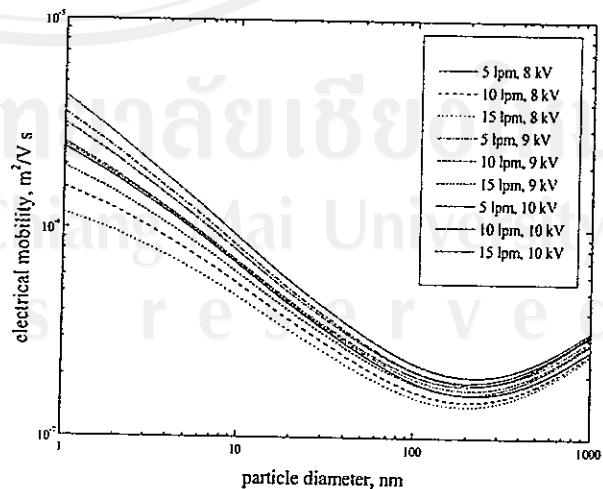


Fig. 7 Variation of particle electrical mobility with particle diameter at different operating aerosol flow rate and applied corona voltage

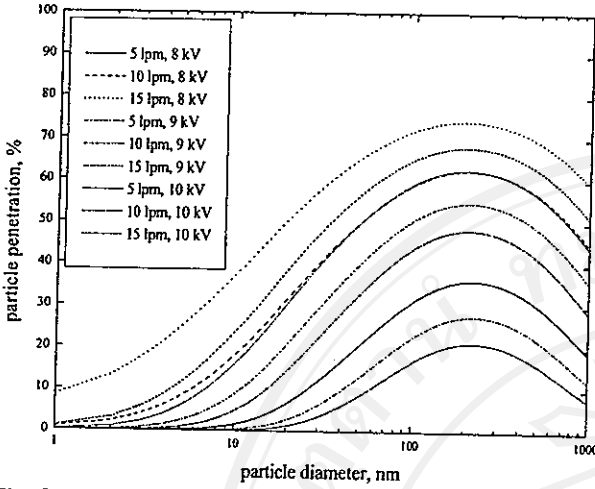


Fig. 8 Variation of particle penetration with particle diameter at different operating aerosol flow rate and applied corona voltage

through the charger as a function of particle size, shown in Figs. 7 and 8.

Long residence time and high voltage appeared to cause high level of charging, hence high electrical mobility and high deposition rate. Significant particle loss to the wall of the charger was found. Ways to overcome this high precipitation may be by (i) introduction of surrounding sheath flows at the boundary between the aerosol stream and the wall to allow more space for particle random paths, (ii) application of an AC high voltage to the electrode instead of DC voltage. The AC field was shown to produce high charging efficiencies due to lower particle losses [2, 19].

Fig. 9 shows number of elementary charge acquired versus particle size at different operating conditions. The curves were already corrected for space charge effect and particle penetration. It was clear that the number of charge increases monotonically with particle size. However, the relationship was not a linear ( $d$ ) or quadratic ( $d^2$ ) function of particle size as described by field and diffusion charging, respectively. In the size range considered, the combined field and diffusion charging are operating in a complicated manner. The value of charge distribution on particle is used to evaluate particle concentration and the information is useful in determining aerosol size distribution.

## 5. Conclusions

In this study, a diode type, wire-cylinder corona aerosol charger was built and tested. Experimental investigation of the voltage-current characteristics of the charger was compared with theoretical prediction. Results were used to characterize the electrostatic properties of the charger. A

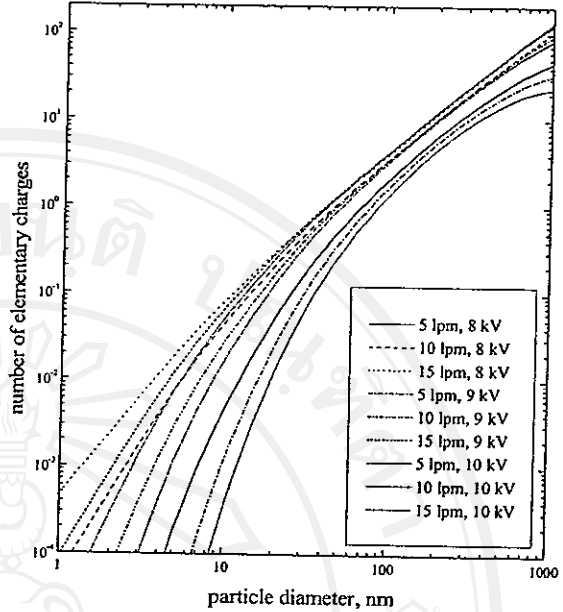


Fig. 9 Variation of number of charge with particle diameter at different operating aerosol flow rate and applied corona voltage

semi-empirical method to calculate ion concentrations in the aerosol charger based on the ion current measurements was presented. Analytical expressions were derived to yield the radial distribution of the  $N_t$  product, the corresponding particle penetration and average charge on particle of different sizes for the chosen charger geometry.

Ion number concentration and electric field strength as a function of corona voltage were evaluated. The  $N_t$  product and resulting particle size - charge distribution were presented. It was also shown that the ionic space charge has a significant influence on the electrostatic properties of the charger and particle loss due to electrostatic attraction was not negligible. The needs for surrounding sheath flows to the aerosol stream and AC high voltage supply to increase charging efficiency were also discussed. Overall, the approach proved to be useful in characterizing the electrostatic characteristics of the aerosol charger.

## Acknowledgements

This work was supported by the National Electronic and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Thailand.

## References

- [1] P. A. Lawless and L. E. Sparks, "Modeling Particulate Charging in ESPs," *IEEE Trans. Industry Applications*,



vol. 24, pp. 922-925, 1988.

- [2] P. Buscher, A. Schmidt-Ott, and A. Wiedensohler, "Performance of a unipolar square wave diffusion charger with variable  $nt$ -product," *Journal of Aerosol Science*, vol. 25, pp. 651-663, 1980.
- [3] L. Unger, D. Boulaud, and J. P. Borra, "Unipolar field charging of particles by electric discharge: effect of particle shape," *Journal of Aerosol Science*, vol. 35, pp. 965-979, 2004.
- [4] A. Hernandez-Sierra, F. J. Alguacil, and M. Alonso, "Unipolar charging of nanometer aerosol particle in a corona ionizer," *Journal of Aerosol Science*, vol. 34, pp. 733-745, 2003.
- [5] G. Biskos, K. Reavell, and N. Collings, "Electrostatic characterization of corona-wire aerosol charges," *Journal of Electrostatics*, vol. 63, pp. 69-82, 2005.
- [6] B. Y. H. Liu and D. Y. H. Pui, "On the performance of the electrical aerosol analyzer," *Journal of Aerosol Science*, vol. 6, pp. 249-264, 1975.
- [7] H. Tamm, A. Mirme, and E. Tamm, "Electrical aerosol spectrometer of Tartu university," *Atmospheric Research*, vol. 62, pp. 315-324, 2002.
- [8] J. Keskinen, K. Pietarinen, and M. Lehtimäki, "Electrical low pressure impactor," *Journal of Aerosol Science*, vol. 23, pp. 353-360, 1992.
- [9] K. Reavell, T. Hands, and N. Collings, "Determination of real time particulate size spectra and emission parameter with a differential mobility spectrometer," *6<sup>th</sup> Intl. ETH Conf. Nanoparticle Measurement*, Zurich, 18-20 August, 2002.
- [10] J. Kulon, S. Hrabar, W. Machowski, and W. Balachandran, "The bipolar charge measurement system for aerosol classification," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 37, pp. 472-479, 2001.
- [11] J. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker, New York, 1995.
- [12] F. W. Peek, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, McGraw Hill, New York, 1929.
- [13] J. S. Townsend, *Electricity in Gases*, Oxford University Press, Oxford, 1915.
- [14] D. Y. H. Pui, "Experimental study of diffusion charging of aerosols", Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis, MN, 1976.
- [15] H. J. White, *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1963.
- [16] W. C. Hinds, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [17] B. Y. H. Liu and A. Kapadia, "Combined field and diffusion charging of aerosol particles in the continuum regime," *Journal of Aerosol Science*, vol. 9, pp. 227-242, 1978.
- [18] M. Lehtimäki, "New current measuring technique for

electrical aerosol analyzers," *Journal of Aerosol Science*, vol. 18, pp. 401-407, 1987.

- [19] M. Lackowski, A. Jaworek, and A. Krupa, "Current-voltage characteristics of alternating electric field charger," *Journal of Electrostatics*, vol. 58, pp. 77-89, 2003.



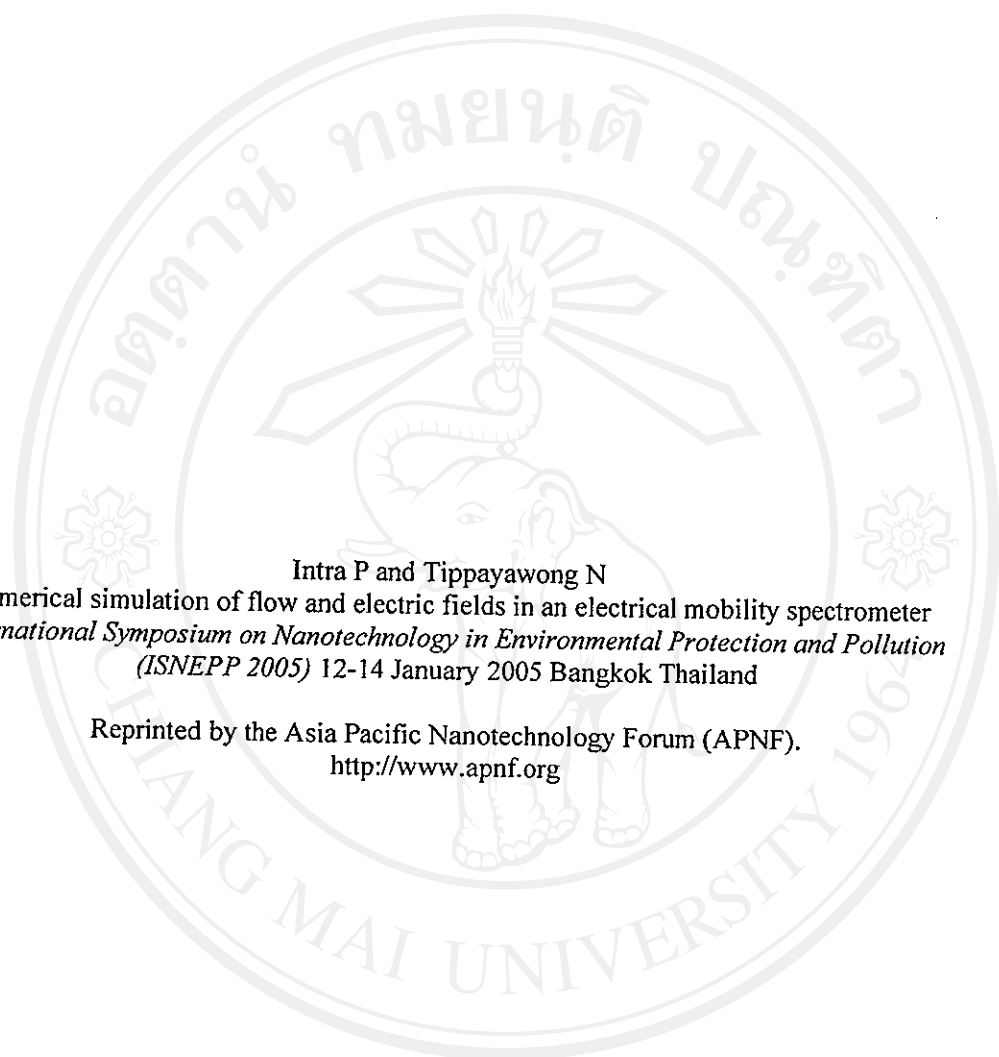
#### Panich Intra

He received BEng degree in electrical engineering from Rajamangala Lanna University of Technology in 2001 and MEng degree in energy engineering from Chiang Mai University in 2003. He is currently a doctoral student in mechanical engineering at Chiang Mai University. His interests include aerosol measurement technology, control and instrumentation.



#### Nakorn Tippayawong

He received BEng and PhD degrees in mechanical engineering from Imperial College, UK in 1996 and in 2000, respectively. He is currently an assistant professor at Chiang Mai University. His research interests are HV applications in aerosol system, renewable energy.



Intra P and Tippayawong N  
Numerical simulation of flow and electric fields in an electrical mobility spectrometer  
*International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution*  
(ISNEPP 2005) 12-14 January 2005 Bangkok Thailand

Reprinted by the Asia Pacific Nanotechnology Forum (APNF).  
<http://www.apnf.org>

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved

**REMI  
NSTDA**

**NANOTEC**

**MTEC**  
National Metal and Materials Technology Center

**ARNF**

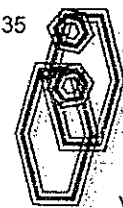


**Abstract Proceedings for**  
**ISNEPP 2005**

**International Symposium on  
Nanotechnology in  
Environmental  
Protection and Pollution**

**January 12-14, 2005  
Miracle Grand Convention Hotel  
Bangkok, Thailand**

Application of Stain Etched Porous Silicon in Solar Cells and Light Emitting Diodes <b>DORIANA DIMOVA-MALINOVSKA</b> <i>Central laboratory for solar energy and new Energy Sources, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria</i>	26
Fe-based Amorphous Materials for Bipolar Plate Applications <b>ERIC FLEURY</b> <i>Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea</i>	27-28
On the Characterization of Nanoporous Materials by Means of Empirical and Intrinsic Transport Coefficients <b>TILL FRANK</b> <i>Institute for Theoretical Physics, University Muenster, Germany</i>	29
Ecomaterials are Developing into the Next Generation, and how Nano-Technologies are. <b>KOHMEI HALADA</b> <i>Director-General, The Ecomaterials Center, NIMS, Japan</i>	30
Fabrication of Micro Gas Sensors Using Nano-Sensing Materials, and its Application to the Auto Ventilation System <b>SANG-DO HAN</b> <i>Sensors and Materials Research Center, Korea Institute of Energy Research, Korea</i>	31
Gas Sensing with Porous Nanoparticle Films Using Resistance Modulation and Resistance Fluctuation (noise) Spectroscopy <b>PETER HESZLER</b> <i>Dept. of Engineering Sciences, The Ångström Laboratory, Uppsala University, Sweden</i>	32
Designed Organic-Inorganic Nanoparticles May Enter into Living Cells <b>JÖNS HILBORN</b> <i>Polymer Chemistry, Uppsala University, Sweden</i>	33
Numerical Simulation of Flow and Electric Fields in an Electrical Mobility Spectrometer <b>PANICH INTRA</b> <i>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand</i>	34
Nanotechnology (Applications and Implications) and Environmental Policy <b>SULAY JHAVERI</b> <i>US Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Research, Office of Research and Development, USA</i>	35







---

## Numerical Simulation of Flow and Electric Fields in an Electrical Mobility Spectrometer

---

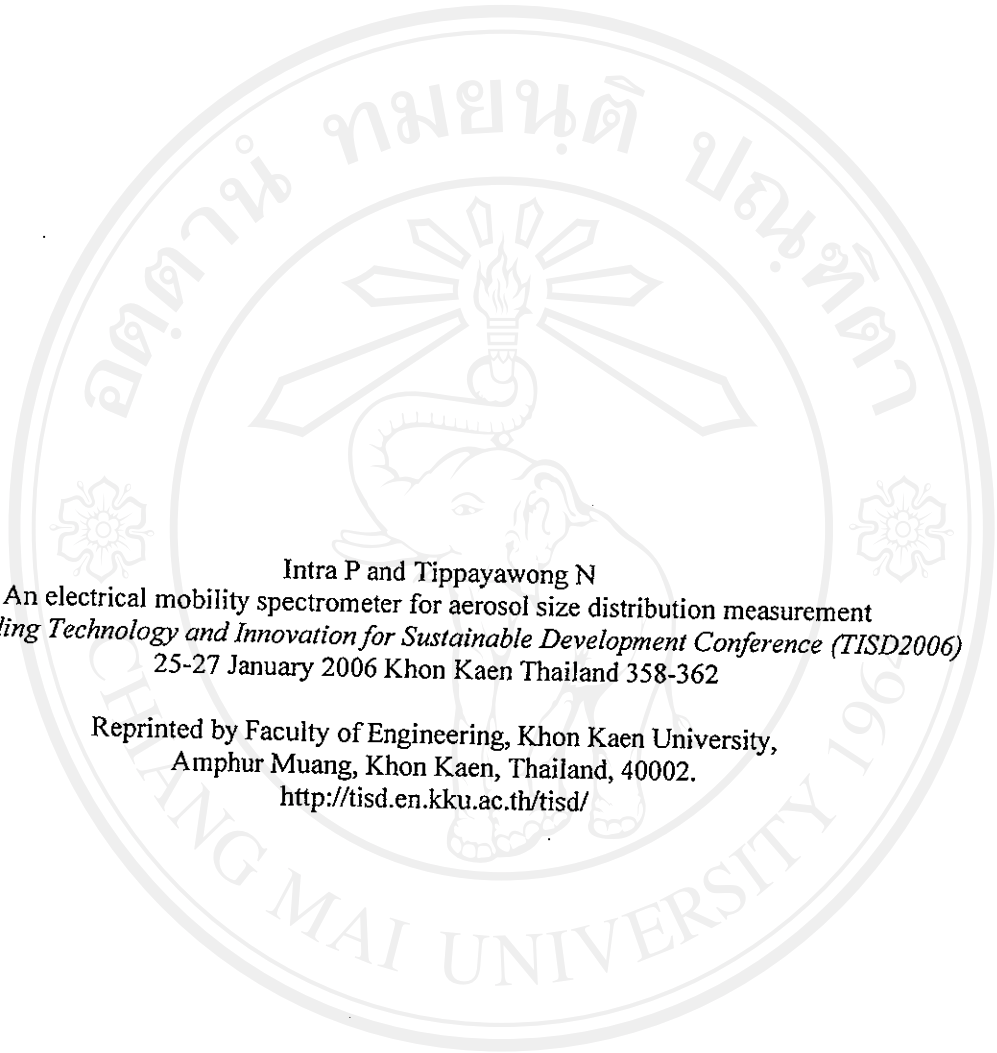


**Panich Intra**  
*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
Chiang Mai 50200, Thailand*

**Nakorn Tippayawong**  
*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
Chiang Mai 50200, Thailand*

### Abstract

An electrical mobility spectrometer (EMS) is used to classify airborne, electrically charged particles in nanometer ranges. It is capable of measuring the electrical mobility of the particles ranging from 10 – 700 nanometers, under the influence of an electric field. The EMS design can be described as an assembly of two concentric cylindrical electrodes with an air gap between the walls. In the EMS, air and aerosol flows enter from one end, pass through the annular and exit the other end. Electric field is applied between the inner and outer electrodes. Particles having specific mobility are collected on a designated electrode ring where electrical signals are measured to obtain size distributions. Flow condition and electric field pattern are important factors influencing accurate particle size distribution measurements. In this study, a computational model of the instrument was developed to predict the behavior of the flow and electric fields under various design parameters, including ratios of sheath air and aerosol flow rates, Reynolds numbers, electrode ring width, ring separation and arrangement and type of flow guide materials. The incompressible Navier-Stokes equation and the Maxwell's equation are numerically calculated for the flow and the electric fields, respectively, with a commercial computational fluid dynamic software package, CFDRC™. The software was based on finite volume method. It was found that the numerical simulation results exhibited a qualitatively well-agreed trend with the published results in the literature. Prediction of flow and electric field conditions was particularly useful in the instrument design. A prototype of the particle size spectrometer is planned to be built and tested, based on the results of this model.



Intra P and Tippayawong N

An electrical mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement

*Proceeding Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006)*

25-27 January 2006 Khon Kaen Thailand 358-362

Reprinted by Faculty of Engineering, Khon Kaen University,  
Amphur Muang, Khon Kaen, Thailand, 40002.

<http://tisd.en.kku.ac.th/tisd/>

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved



# TISD2006

Technology and Innovation

Sustainable Development Conference

25-26 January 2006

## PROCEEDING



Faculty of Engineering,  
Khon Kaen University



EGAT Public Company Limited



North-Eastern Engineering Institute of Thailand  
Under H.M. the King's Patronage



Energy Management and Conservation Office (EMCO)  
Khon Kaen University



Sustainable Infrastructure Research and  
Development Center (SIRDC)



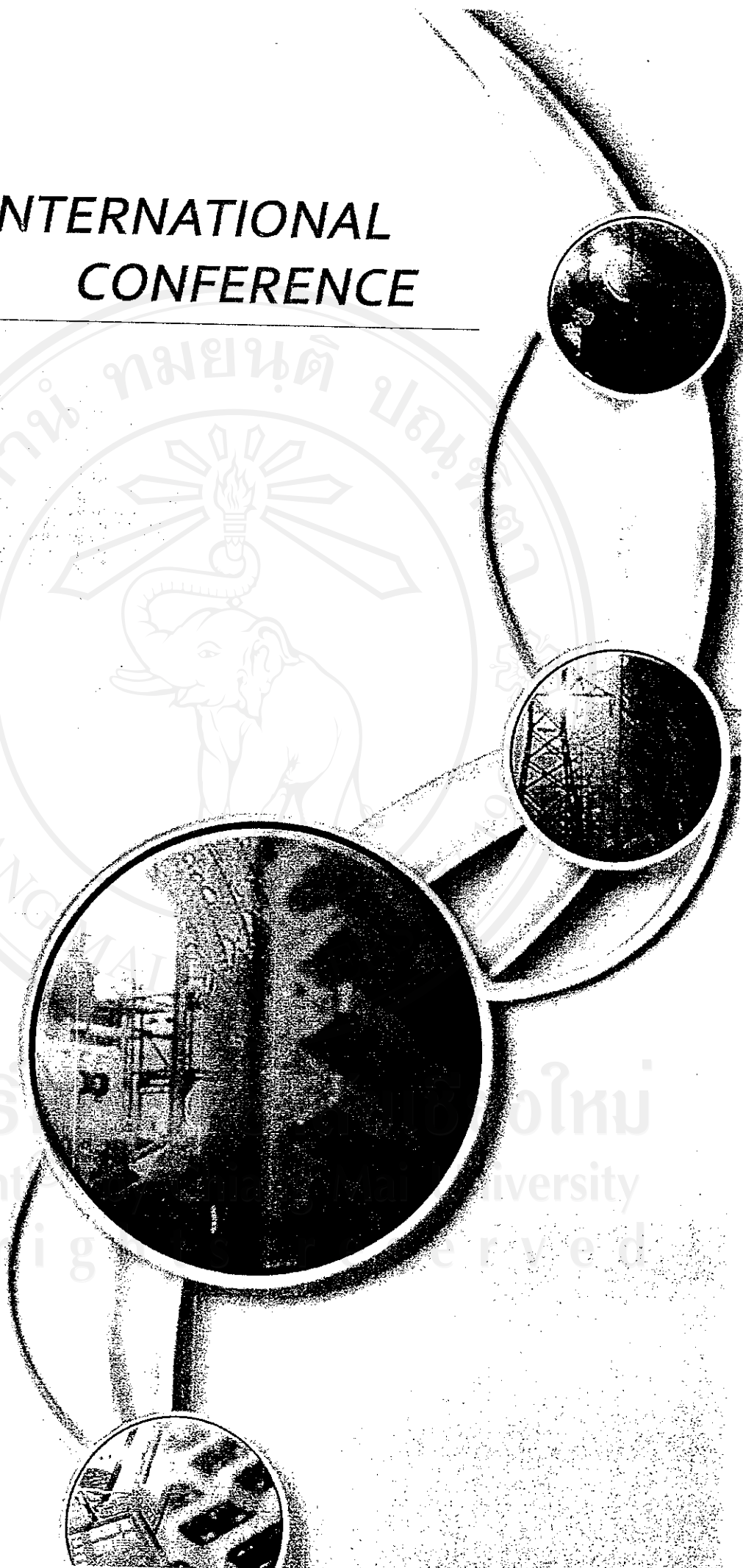
Research Centre for Environmental and  
Hazardous Substance Management

Agricultural Machinery and Postharvest  
Technology Center

# INTERNATIONAL CONFERENCE



ลิขสิทธิ์ © ๒๕๖๓ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © 2020 Chiang Mai University  
All rights reserved



# TISD2006

## Technology and Innovation for Sustainable Development Conference

25-26 January 2006

### Aims and Scope

The development of a nation as well as of those in the Greater Mekong Subregions (GMS) largely relies on the advancement of various engineering technologies and innovation. It is imperative that the engineering technologies and innovation should be in close interrelationship with the concept of sustainable development and simultaneously retain good quality of life and friendly environment. The academic accomplishment, professional expertise and efficient applications of advanced technologies and innovation greatly play important roles in economic and social development of Thailand and other GMS countries.

**TISD2006** will be an opened forum for active and dynamic researchers and engineers in multidisciplinary engineering fields to exchange and disseminate new knowledge, research experiences and professional expertise and create mutual linkages among the participants.

### Topics

- |                                    |                             |                          |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| ❖ Agricultural Engineering         | ❖ Artificial Intelligence   | ❖ Civil Engineering      |
| ❖ Chemical Engineering             | ❖ Computer Engineering      | ❖ Electrical Engineering |
| ❖ Energy and Environmental Aspects | ❖ Environmental Engineering | ❖ Industrial Engineering |
| ❖ Mechanical Engineering           | ❖ Others                    |                          |

### Organized by



Faculty of Engineering, Khon Kaen University

### In Collaboration with



EGAT Public Company Limited



The Engineering Institute of Thailand  
Under H.M. The King's Patronage



Energy Management and  
Conservation Office  
Khon Kaen University



Sustainable Infrastructure Research  
Development Center



Research Center for Environment  
and Hazardous Substance Management



Agricultural Machinery  
Postharvest Technology  
Center

ENE_4I: Effect of Solar Radiation on a Roof form	265
ENE_6I: Structural and Thermoelectric Properties of Beta-FeSi <sub>2</sub> Prepared by the Mechanical Alloying Technique	271
ENE_8I: Energy and exergy analysis applied to the built environment	276

### **Environmental Engineering**

ENV_2I: Assessment on Physico-Chemical Properties for Granite Residual Soil as Landfill Liner Material at Batu Pahat, Johor, Malaysia	282
ENV_6I: Thailand's Community Forests: Current Status and What They have Contributed to Sustainable Development	286
ENV_7I: Putting Ecosystem into Water-Management Equations	292
ENV_8I: The Need for Reduce Level of Carbon Dioxide Emission	297
ENV_9I: The Understanding and Managing of Hazardous Waste of People in Khon Kaen Municipality	304

### **Industrial Engineering**

IND_1I: Electric Load Forecasting for Thailand's Northeastern Region Using Committee Networks	308
IND_11I: Effect of Methanogenic Effluent Recycle on Fermentative Hydrogen Production	312

### **Mechanical Engineering**

MEC_1I: Finite Element Simulation of the Cold Forward Bar Extrusion of Particulate Reinforced MMCs	316
MEC_2I: The Mechanical-Strength Investigation of Pisang-Awak Banana-Peel Briquettes	322
MEC_3I: A Study of Vacuum Freeze Drying: Case Study on Lime Powder Production	327
MEC_4I: Diamond-Like Carbon - A New Generation of Coatings for Tribological Applications	331
MEC_7I: The Effect of Filler Loading and Silane Coupling Agent on Cure Characteristics and Mechanical Properties of Rice Husk Powder Filled Natural Rubber Compounds	337
MEC_8I: Vibration Suppression of a Single-Cylinder Engine by used the Modified Normalized Normal Constraint	342
MEC_11I: Heating Water by a Split-type Air Conditioner	350
MEC_12I: An Electrical Mobility Spectrometer for Aerosol Size Distribution Measurement	358
MEC_26I: Minimal Models for the Explanation of Disk Brake Squeal	363
MEC_30I: Exponential Interpolation in Boundary Layer for Sliding Mode Control	369
MEC_31I: Structural Topology Optimization Using Design Variable Filtering	376
MEC_32I: Passive Vibration Control of a Structure Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms	383

### **Others**

ETC_10I: Ethanol Production from Sweet Sorghum Juice in Batch and Fed-Batch Fermentation by <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> TISTR 5048	389
ETC_11I: Ethanol Production from Sweet Sorghum Juice by Free and Immobilized <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> Cells Using Batch Culture	394



## An Electrical Mobility Spectrometer for Aerosol Size Distribution Measurement

Panich Intra and Nakorn Tippayawong  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
Chiang Mai 50200 Thailand  
E-mail: nakorn@dome.eng.cmu.ac.th

### Abstract

Accurate measurements of aerosol size distribution are desirable in order to investigate atmospheric aerosol processes. In the present paper, an electrical mobility spectrometer for measurement of number-weighted particle size distribution in sub-micrometer size range is described. The spectrometer consists of a size selective inlet, an aerosol charger, an electrostatic classifier, a signal detection system, a flow arrangement system and a computer controlled interface system. Particle charging is accomplished by exposing aerosol sample to the cloud of unipolar corona ions, and then charged via ion-particle collisions. The charged aerosol passes into the electrostatic classifier, configured as coaxially cylindrical electrodes. There are two separate streams, aerosol and sheath air flows. The charged aerosols enter the analyzer column. They are then deflected radially outward and collected on electrically isolated electrometer rings, positioned at the inner surface of the outer electrode. Electrometers connected to these electrode rings measure currents corresponding to the number concentration of particles of a given mobility which is related to the particle size. Signal currents are then recorded and processed by a data acquisition system. A prototype of the spectrometer was built and experimentally tested. From preliminary test results, the spectrometer has been found to be promising for determining particle size distribution.

**Keywords:** aerosol, electrical mobility, size analyzer

### 1. Introductory Remarks

Development of aerosol measurement methods has been primarily motivated by the need to find better means of monitoring and controlling indoor and outdoor aerosols for pollution and process control industry. A number of different methods are able to provide information about the size spectrum of these fine particles in sub-micrometer size range [1]. However, electrical mobility analysis is one of most efficient and widely used techniques. Flagan [2] offers a good review of the historical development of this technique. Developments in the past several decades have led to the electrical aerosol analyzer [3],

the scanning mobility particle sizer [4], the bipolar charge aerosol classifier [5], the electrical aerosol spectrometer [6] and the differential mobility spectrometer [7]. These instruments are based on electrical mobility analysis and designed to measure airborne particle size distribution. Nonetheless, they are different in terms of specific applications, construction, cost, measurement range, as well as time response and resolution.

The present paper reports a continuation from previous works [8, 9] whose aim was to design and develop an in-house, sub-micrometer aerosol instrument. This paper focuses on description and construction of a prototype for an electrical mobility spectrometer. Preliminary laboratory test results were also presented.

### 2. Principle of Operation

In an electrical mobility spectrometer (EMS), aerosol sample pass through a charger that sets a charge on the particles and enter a classifier separately but together with sheath air flow through an annular and exit. Electric field is applied between the inner and outer electrodes and forces charged particles having specific mobility to deposit on a designated electrode ring. An array of electrode rings is connected to a series of sensitive electrometers where electrical current signals are detected and translated into size distributions.

### 3. Components and Description

Figure 1 depicts schematically an experimental setup of the EMS, developed in this study. The setup is composed of an aerosol generator, a flow system, a size selective inlet, a particle charger, a size classifier, a signal current detector and a computer controlled data acquisition and management system.

#### 3.1 Flow system

In the present study, aerosol and sheath air flows are regulated and controlled by means of mass flow meters and controllers with a vacuum pump. The upstream air flow was conditioned by a perforated screen to ensure uniform laminar flow, prior to its entrance to the classifying column.

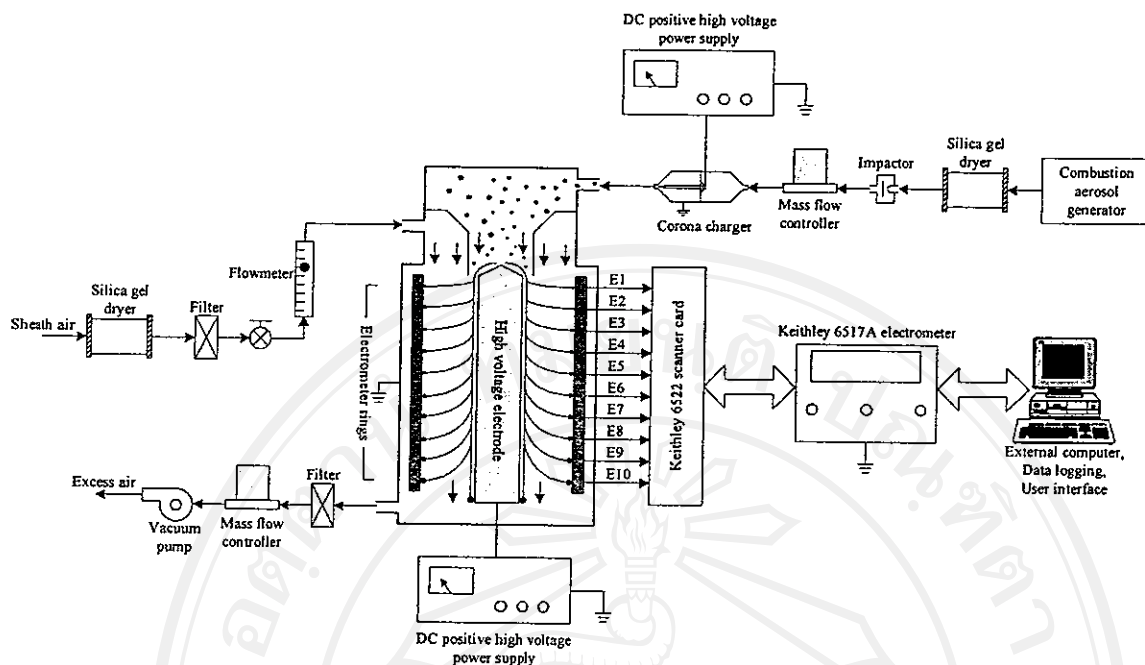


Figure 1. Experimental setup of the electrical mobility spectrometer system.

### 3.2 Particle generator

The combustion aerosol generator was used to produce a polydisperse carbonaceous diffusion flame aerosol in this investigation. Polydisperse aerosols are generated by a laminar diffusion burner with paraffin fuel in the nominal "pre-sooting" condition. Aerosol sampling was carried out isokinetically and fed to the EMS. Stable polydisperse aerosols with particle number concentrations of approximately  $10^{12}$  particles/ $m^3$  were obtained. The mean particle size obtained by electron microscopy was in the range between 10 – 500 nm.

### 3.3 Size selective inlet

The inertial impactor was used to remove particles larger than a known aerodynamic size, upstream of the EMS. The aerodynamic particle size at which the particles are separated is called the cut-point diameter. In the impactor, the aerosol flow is accelerated through a nozzle directed at a flat plate. The impaction plate deflects the flow streamlines to a  $90^\circ$  bend. Particles with sufficient inertia are unable to follow the streamlines and impact on the plate. Smaller particles are able to follow the streamlines and avoid contact with the plate and exit the impactor.

### 3.4 Particle charger

The particle charger in the present study consists of a coaxial corona-needle electrode placed along the axis of a cylindrical tube with tapered ends. The needle electrode is made of a stainless steel rod 3 mm in diameter and 49 mm length, ended in a sharp tip. The angle of the needle cone was about  $9^\circ$  and the tip radius was about  $50 \mu m$ , as estimated under a microscope. The outer cylindrical is made of aluminum tube 30 mm in diameter and 25 mm length with conical shape. The angle of the cone was about

$30^\circ$  and the orifice diameter was about 4 mm. The distance between the needle electrode and the cone apex is 2 mm. The corona electrode head is connected to a DC high voltage supply, while the outer electrode is grounded. An adjustable DC high voltage power supply is used to maintain the corona voltage difference, typically of the order of 1.0 – 5.0 kV. The corona discharge generates ions which move rapidly in the strong corona discharge field toward the outer electrode wall. Aerosol flow is directed across the corona discharge field and is charged by ion-particle collisions via diffusion charging and field charging mechanisms. The mean charging current from the corona electrode tip was measured with the sensitive electrometer via the outer electrode. A wire-cylinder charger configuration has been tried [10]. But, the needle charger was later adopted due to its higher charging efficiency.

### 3.5 Mobility classifier

The aerosol size classifier has one short column which consists of coaxially cylindrical electrodes. The outer electrode is made of a stainless steel tube with 50 mm diameter and the central electrode is made of aluminum rod with 20 mm diameter and 131 mm in length. The advantage of cylindrical geometry is that distortion of electric field between electrodes is minimal due to the absence of corners and edges. There are two streams which are the aerosol and sheath air flows. Inner walls of flow paths and curvature at the transition into the classifying section were designed such that smooth and turbulence free merging of the two gas flows were obtained. The central rod of the classifier is maintained at a positive voltage while the outer chassis of the classifier is grounded. An adjustable



DC high voltage power supply (Leybold Didactic model 521721, 500 mV peak-to-peak ripple voltage) is used to maintain this voltage difference, generally in the range between 1.0 – 10 kV. It should be noted that the applied high voltage is maintained at a lower value than the corona onset voltage to avoid unintentional charging of the particles within the classifier. The charged particles enter the analyzer column near the central rod by a continuous flow of air. Since the central rod is kept at a positive high voltage, the charged particles are deflected outward in a radial direction. They are collected on a series of 10 electrically isolated metallic rings positioned at the inner surface of the outer electrode of the column. Table 1 shows the positions and their corresponding mobility diameters of deposited aerosols for a typical operating condition. The particle mobility diameter deposit on each electrometer ring can be calculated by the following equation

$$d_{p,i} = \frac{2VL_i n_p e C_c}{3\mu Q_t \ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

where  $V$  is the central rod voltage,  $L_i$  is the axial position between the aerosol entry location and the midpoint of the electrometer ring,  $n_p$  is the net number of charges per particle,  $e$  is the elementary charge on an electron,  $C_c$  is the Cunningham slip correction factor,  $\mu$  is the air viscosity,  $Q_t$  is the total flow rate through the classifier column (sum of aerosol flow,  $Q_a$  and sheath air flow,  $Q_s$ ),  $r_1$  is the central rod electrode radius, and  $r_2$  is the outer electrode radius.

Table 1. Electrode positions along the classification column and their corresponding particle electrical mobility diameter, ( $Q_a = 1.5$  lpm,  $Q_s = 10$  lpm,  $V = 2.0$  kV,  $P = 0.342$  bar)

Electrode ring number	Midpoint location (mm)	Mobility diameter (nm)
1	7	5.67
2	20	32.15
3	33	61.86
4	46	93.89
5	59	128.4
6	72	165.7
7	85	206.4
8	98	251.1
9	111	300.7
10	124	356.4

Electrometers connected to these electrodes measure currents corresponding to the number concentration of particles of a given mobility which is related to the particle size. Electrical current detection method was considered to be easier and faster than direct particle detection measurements. The size range and resolution of particle collected on the electrometer rings can be varied by adjusting the sheath air and aerosol flow rates, the voltage applied to the inner electrode, and the operating pressure.

### 3.6 Sensitive electrical current meter

An electrometer is used to measure the electric signal current from deposited charged particles on each electrometer ring along the inner surface of the outer electrode of the classifier column. These measure currents corresponding to the total number concentration of particles. The aerosol number concentration,  $N_{p,i}$ , of particles in related to the signal current,  $I_i$ , at each electrometer ring is given by

$$N_{p,i} = \frac{I_i}{P n_p e Q_a} \quad (2)$$

where  $P$  is the particle penetration thru the charger.

For the present study, a commercial multi-channel electrometer, a Keithley 6517A electrometer incorporating a Keithley 6522 low current scanner card, were used. The Keithley 6517A electrometer has a special low current input amplifier with an input bias current of  $< 3$  fA with just 0.75 fA p-p (peak-to-peak) noise,  $< 20$   $\mu$ V burden voltage on the lowest range, and the current measurement range of 1 fA to 20 mA. For the multi-channel measurement, the Keithley 6522 low current scanner cards for a Keithley 6517A was used. This scanner card is a 10-channel multiplexer, has a offset current on each channel is  $< 1$  pA and high isolation is maintained between each channel ( $> 10^{15} \Omega$ ).

### 3.7 Data acquisition and processing system

The measurement is controlled and data sampled by an external personal computer via RS-232 serial port cable. Software running on an external computer was developed, based on Microsoft Visual Basic programming for all data processing. The software is able to display both size distribution and number concentration.

## 4. Size Calibration and Testing

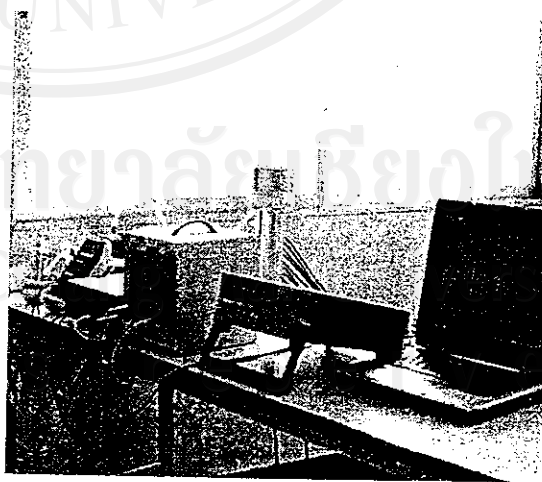


Figure 2. Laboratory setup for testing of the electrical mobility spectrometer.

A laboratory test facility was developed and constructed to evaluate performance of a prototype EMS. Its picture was taken and shown in Figure 2. In this study, thin copper plates were placed on surfaces of those electrode rings. The deposited particles inside the spectrometer at each electrometer ring were later analyzed for their sizes using a scanning electron microscope (SEM). Particle imaging was carried out using a JEOL JSM-6335F Field Emission Scanning Electron Microscope. The SEM projected surface area distribution was obtained first, by thresholding the original SEM image and next, by calculating the projected surface area of each particle. Image processing was carried out using ImageJ, a public domain image analysis software which was developed at the National Institute of Health, USA [11].

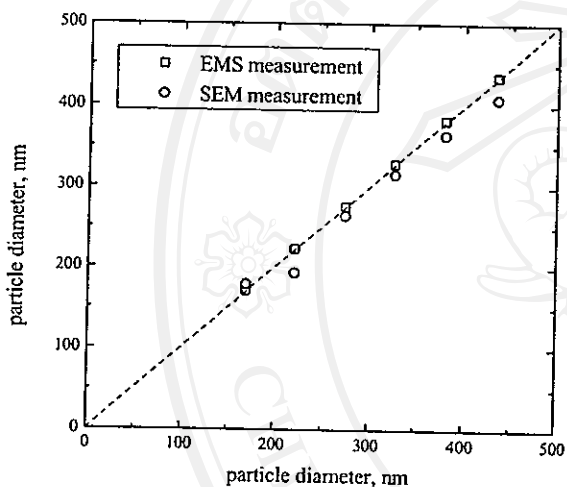


Figure 3. Comparison of resultant mean particle diameters between the EMS and SEM measurements.

Figure 3 provides comparison of geometric midpoint mobility diameter from EMS measurement with geometric mean equivalent sphere projected area diameter from SEM measurement at each electrometer ring. Similar methods of particle size comparison have been conducted and reported by Ku and Maynard [12] and Rogak and coworkers [13]. It was suggested that valid comparison can be made between electrical mobility diameter and mean equivalent sphere projected area diameter from SEM in the size range below about 500 nm. The data presented in Figure 3 covers particles in the size range between 150 – 450 nm. Combustion aerosols were used as test particles. It was found that the diameters derived from projected surface area of agglomerates analyzed by the SEM agreed very well with those mobility diameters given by the EMS. The largest difference observed was about 15 % at 190 nm. At other sizes, the differences were within 5 %. Finer size comparison experiments (< 150 nm) have been planned to carry out shortly. It is expected to reveal similar trend and degree of agreement, as previously.

Preliminary experimental test runs with combustion aerosol were obtained and one typical result was depicted in Figure 4. The spectrometer was operated at central electrode voltage of 2.0 kV, aerosol flow rate of 1.5 lpm, pre-filtered sheath air flow of 10.0 lpm, and operating pressure of 0.342 bar. Signal current for the distribution of the test aerosol size spectrum for each electrode was clearly shown, their values of the signal current was in similar order of magnitude to those reported in the literature [14] for similar type of aerosol. The signal current was then used to evaluate number concentration and size distribution. An example of processed data, representing size distribution of combustion aerosol measured by the EMS was shown in Figure 5. The log normal nature of distribution was clearly illustrated.

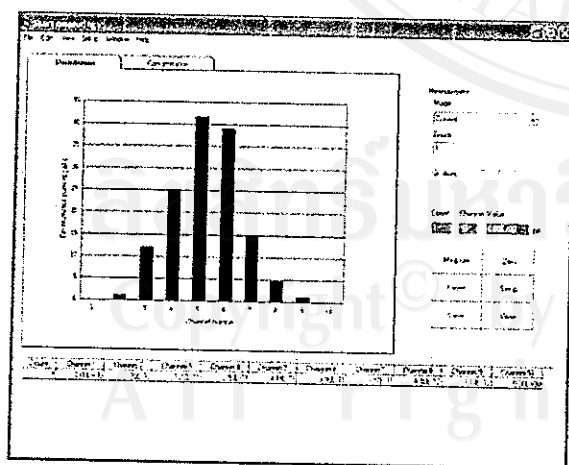


Figure 4. Typical measured electrical signals from each electrode ring at a given operating condition, registered by the EMS data processing system.

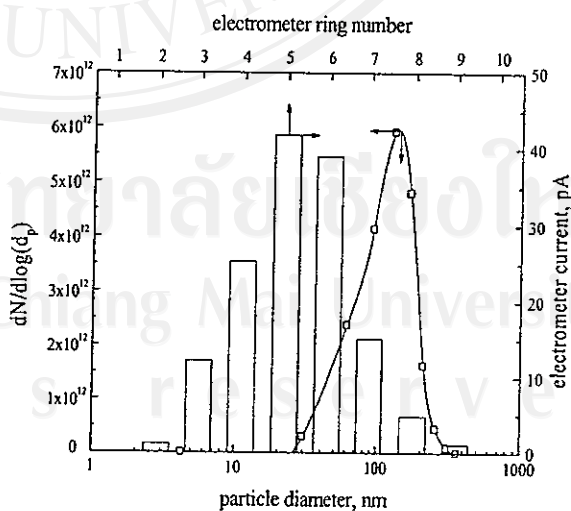


Figure 5. Typical log normal size distribution of combustion aerosols measured by the EMS.

## 5. Concluding Remarks

The electrical mobility spectrometer developed at Chiang Mai University has been presented and described in this paper. The measuring method was based on electrical mobility analysis and it has multiple size detection channels' capability. It was able to measure particles in the sub-micrometer size range.

A prototype of the spectrometer has been constructed and calibrated against standard electron microscopic measurements. Results obtained were very promising. It was demonstrated that the spectrometer can be used successfully in obtaining aerosol size distributions. Future ongoing research will put emphasis on field testing of the instrument in actual environment, possibly along side a standard aerosol sizing instrument.

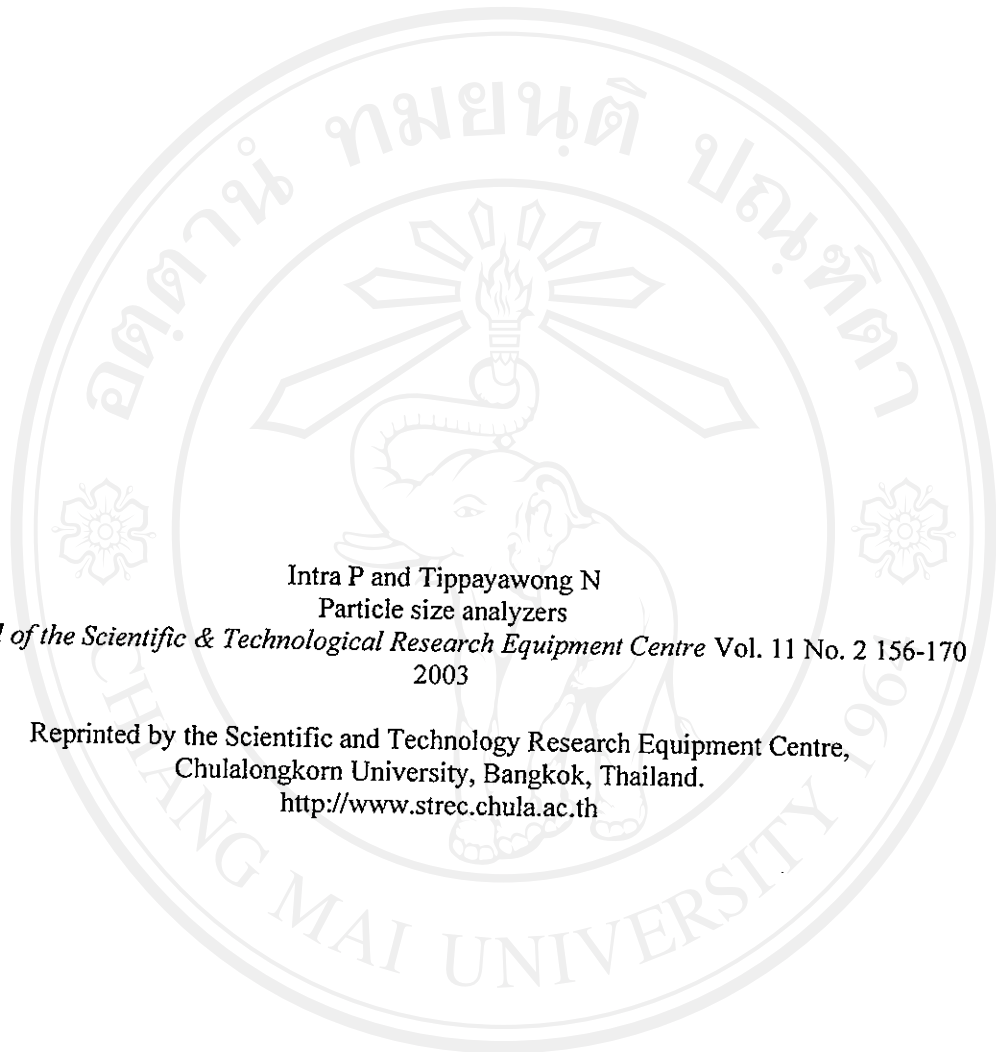
## Acknowledgments

Financial support from the National Electronic and Computer Technology Center (NECTEC), National Science and Technology Development Agency, Thailand is gratefully acknowledged.

## References

- [1] Intra, P. and Tippayawong, N. 2003. Particle Size Analyzers. *Journal of the Scientific & Technological Research Equipment Centre*, 11: 156-170. (in Thai)
- [2] Flagan, R. C. 1998. History of Electrical Aerosol Measurement. *Aerosol Science & Technology*, 28: 301-380.
- [3] Liu, B. Y. and Pui, D. Y. H. 1975. On the Performance of the Electrical Aerosol Analyzer. *Journal of Aerosol Science*, 6: 249-264.
- [4] Wang, S. C. and Flagan, R. C. 1990. Scanning Electrical Mobility Spectrometer. *Aerosol Science & Technology*, 13: 230-240.
- [5] Kulon, J., Hrabar, S., Machowski, W. and Balachandran, W. 2001. The Bipolar Charge Measurement System for Aerosol Classification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37: 472-479.
- [6] Tammet, H., Mirme, A. and Tamm, E. 2002. Electrical Aerosol Spectrometer of Tartu University. *Atmospheric Research*, 62: 315-324.
- [7] Biskos, G., Reavell, K. S. and Collings, N. 2005. Description and Theoretical Analysis of a Differential Mobility Spectrometer. *Aerosol Science & Technology*, 39: 527-541.
- [8] Intra, P., and Tippayawong, N. 2005. Numerical Simulation of Flow and Electric Fields in an Electrical Mobility Spectrometer. *International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution*, January 12 - 15, Bangkok, Thailand.
- [9] Intra, P. and Tippayawong, N. 2005. Aerosol Size Distribution Measurement using Multi-Channel Electrical Mobility Detector. *Journal of Aerosol Research Japan*, submitted.
- [10] Intra, P. and Tippayawong, N. 2005. Approach to Characterization of a Diode Type Corona Charger for Aerosol Size Measurement. *KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications*, 5-C: 196-203.
- [11] Rasband, W. S. 2004. ImageJ. National Institute of Health, Bethesda, Maryland, USA, available online at <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>>, access on Dec 2004.
- [12] Ku, B. K. and Maynard, A. D. 2005. Comparing Aerosol Surface-Area Measurements of Monodisperse Ultrafine Silver Agglomerates by Mobility Analysis, Transmission Electron Microscopy and Diffusion Charging. *Journal of Aerosol Science*, 36: 1108-1124.
- [13] Rogak, S. N., Flagan, R. C. and Nguyen, H. V. 1993. The Mobility and Structure of Aerosol Agglomerates. *Aerosol Science & Technology* 18: 25-47.
- [14] Graskow, B. R. 2001. Design and Development of a Fast Aerosol Size Spectrometer. Ph.D. Thesis, Department of Engineering Sciences, University of Cambridge, UK.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright © by Chiang Mai University  
All rights reserved



Intra P and Tippayawong N  
Particle size analyzers

*Journal of the Scientific & Technological Research Equipment Centre* Vol. 11 No. 2 156-170  
2003

Reprinted by the Scientific and Technology Research Equipment Centre,  
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.  
<http://www.strec.chula.ac.th>

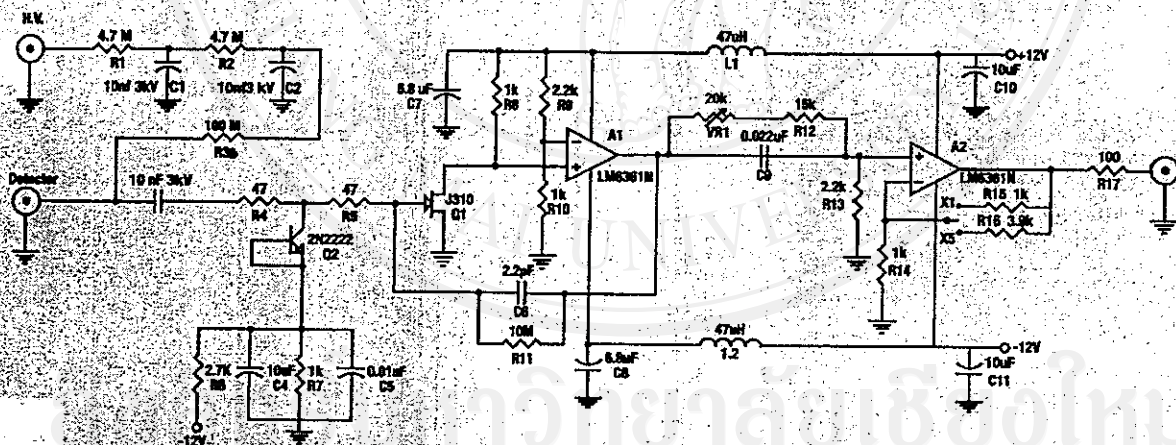
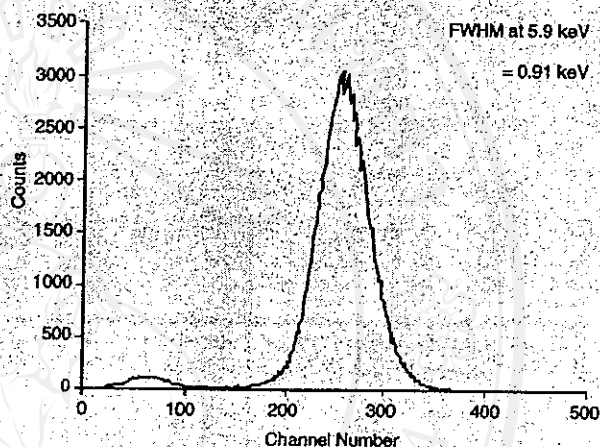
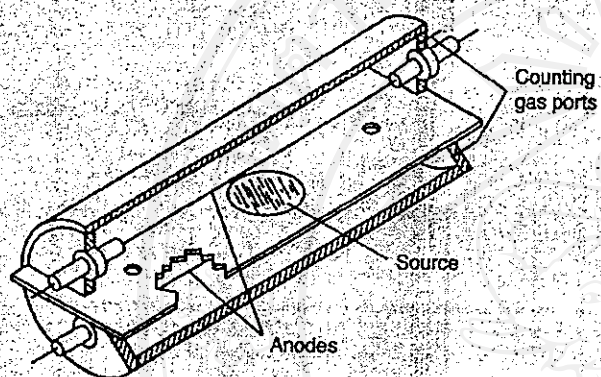
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved





# วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 ธันวาคม 2546



# JOURNAL OF STREC

1 No. 2 December 2003

- ★ SCIENTIFIC NEWS
- ★ TECHNICAL REPORTS
- ★ RESEARCHES-REVIEWS
- ★ EQUIPMENT REPORTS
- ★ COMPLEMENTS & NEWS FROM CENTRE

ISSN 0858-1452

## สารบัญ

### Scientific news

- ผลงานรางวัลโนเบลสาขาเคมีปี 2003

117

### Technical notes

- การเตรียมไอโซไซด์เพื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

122

- การเปรียบเทียบกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์

126

### Researches Reviews

- การแยก R/S-กรดไขมันแอลฟาไฮดรอกซีเอสเทอร์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟี : เปรียบเทียบการแยกเมทิลเอสเทอร์กับเอสเทอร์ของอะลิเฟติกไครัลแอลกอฮอล์บนอะไคริลคอลัมน์

132

- การพัฒนาอุปกรณ์ขยายส่วนหน้าสำหรับหัววัดรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนล

141

### Equipment reports

- เครื่องวิเคราะห์อนุภาคจุลสารในอากาศ

156

### Complement & news from Centre

- ชีวิตที่สุขเย็น
- อุปกรณ์เป่าชิ้นงานให้แห้ง

171

180

All rights reserved



พานิช อินต๊ะ \* และนคร ทิพย์วงศ์ \*\*

## บทนำ

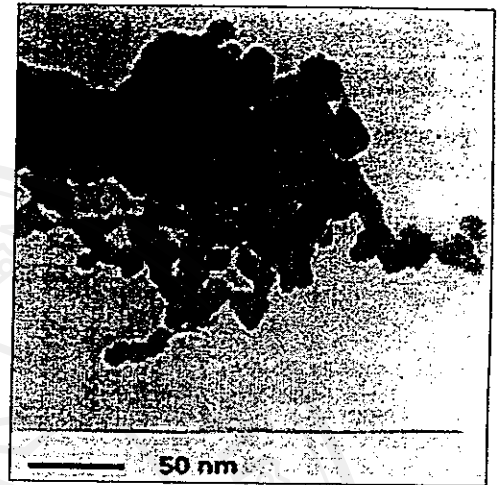
อนุภาคจุลสารขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในบรรยากาศมีผลกระทบต่อทัศนวิสัย อากาศตามฤดูกาล สุขภาพ และคุณภาพชีวิตของประชากร และในกระบวนการในอุตสาหกรรมมากมาย เช่น อาหาร ห้องประกอบอาหาร ประงยา หรือพื้นที่ในโรงพยาบาล อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสารกึ่งตัวนำ และการปนเปื้อนในพื้นที่และผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลไม่ดีต่อคุณภาพและผลการผลิตได้ คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศคือ ขนาด รูปร่าง จำนวน มวล พื้นที่ผิว และความหนาแน่น การรู้ถึงคุณสมบัติของอนุภาคนั้นมีความสำคัญมากในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการของอนุภาค (aerosol science) การควบคุมมลพิษทางอากาศ และกิจกรรมอนามัย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคจุลสารขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศเพื่อทำการตรวจสอบวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพอากาศและปนเปื้อนจากอนุภาคขนาดเล็ก โดยคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคที่จะทำการศึกษานั้นขึ้นอยู่กับขนาดและความเข้มข้นของการกระจายตัวของอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศ

การศึกษาคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่จะทำการวัดนั้น ค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับ การและชนิดของเครื่องมือวัด คุณสมบัติทั่วไปที่สนใจได้แก่ ความเข้มข้นเชิงมวลและจำนวนของอนุภาคที่ผิวและการกระจายของขนาดของอนุภาค เป็นต้น ซึ่งค่าที่วัดได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าพื้นฐานเพื่อทำการควบคุมปริมาณของอนุภาคไม่ให้มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ หรือมีผลกระทบต่อที่สุด เครื่องวัดขนาดอนุภาคที่มีอยู่ในปัจจุบันมีวิธีการและหลักการทำงานอยู่หลายอย่าง เช่น วิธีแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitation) วิธีจากแรงเฉื่อย (inertial method) วิธีการทางอากาศพลศาสตร์ (dynamic method) วิธีการกระจายแสง (light scattering method) และวิธีการทางไฟฟ้า (electrical method) ซึ่งทุกวิธีการมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำและมีเสถียรรวดเร็วในการวัดและเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับวัดขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กในช่วง 1 - 1000 ไมครอน โดยเฉพาะวิธีการทางไฟฟ้าที่มีความสามารถในการวัดขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.1 ไมครอนในช่วงขนาดอนุภาคที่มีผลกระทบต่อสุขภาพและคุณภาพชีวิตของมนุษย์มากที่สุด เพราะมันสามารถจะลดลงไปถึงบริเวณส่วนลึกที่สุดของปอดในการหายใจได้ ในบทความฉบับนี้จะนำเสนอรายละเอียด หลักการทำงานและลักษณะโครงสร้างของเครื่องวิเคราะห์อนุภาคขนาดเล็กแบบใช้หลักการทางเป็นหลัก

ภาษาปริญญาเอก \*\* อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
อง จ. เชียงใหม่ 50200

## ลักษณะเฉพาะของอนุภาค

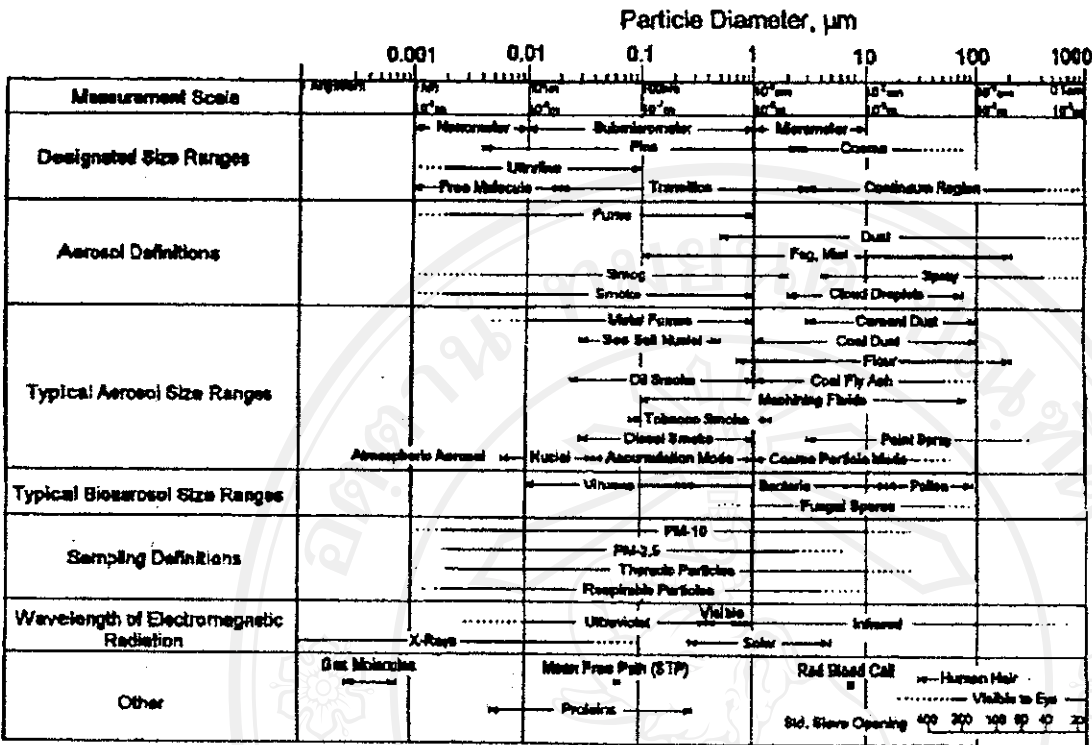
อนุภาคที่ล่องลอยอยู่ในอากาศหรือก๊าซมีอยู่ 2 สถานะคือ ของแข็งและของเหลว โดยมีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลอากาศแต่มีขนาดเล็กกว่า 1000 ไมโครเมตร อนุภาคที่กระจายอยู่ในอากาศเรียกรวมๆ ว่าละออง (aerosol) และมีชื่อเรียกต่างๆ กันไปอีกเช่น ฝุ่น (dust) คว้น (smoke) หมอก (fog) ไอ (fume) ตามประเภทหรือชนิดของอนุภาคซึ่งเป็นไปตามขนาด รูปร่าง และลักษณะอื่นๆ ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างลักษณะของอนุภาคในอากาศแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะตัวอย่างของอนุภาคจุลสารที่แขวนลอยในอากาศ

ในการแยกประเภทของละอองโดยทั่วไปมักใช้ค่าขนาดของอนุภาคและความเร็วในการตกตะกอน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตรจะมีการตกตะกอนค่อนข้างเร็วมาก (ระดับวินาทีถึงนาที) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรจะมีการตกตะกอนค่อนข้างช้าถึงช้ามาก (ระดับชั่วโมงถึงวัน) จนในบางครั้งถือว่าเป็นประเภทลอยถาวร ส่วนการแยกประเภทของละอองที่แบ่งตามรูปลักษณะ ได้แก่ คว้น (ละอองที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1 ไมโครเมตรถึง 1 ไมโครเมตรปกติถ้าเป็นของเหลวจะมีรูปร่างกลม ถ้าเป็นของแข็งจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากอนุภาคคว้นมีขนาดเล็กจึงแขวนลอยอยู่ได้นาน และมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน) ฝุ่น (ละอองที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรถึง 100 หรือ 200 ไมโครเมตรหรือใหญ่กว่า มีรูปร่างไม่แน่นอน ค่าขนาดจึงเป็นค่าเฉลี่ยของด้านต่างๆ ของแต่ละอนุภาค) ไอระเหย (ละอองที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1 ไมโครเมตรถึง 1 ไมโครเมตร เกิดจากกระบวนการเช่น การระเหิด การกลั่นตัว มีการตกตะกอนช้ามากและเคลื่อนที่แบบบราวเนียน) และหมอก (ละอองที่มีขนาดระหว่าง 2 - 200 ไมโครเมตร ส่วนละอองน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่า 200 ไมโครเมตรจะจัดอยู่ในประเภทของเม็ดฝน) คุณสมบัติที่สำคัญของละอองที่ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคแสดงไว้ในรูปที่ 2

ปกติฝุ่นละอองจะมีอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ กันกระจายอยู่และการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของฝุ่นละอองมักจะเปลี่ยนแปลงตามการกระจายของขนาดอนุภาค ดังนั้นการประมาณค่าคุณสมบัติของฝุ่นละอองนั้นสามารถทำได้โดยการประมาณค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาค (particle size distribution) ความหนาแน่นของอนุภาค (particle density) เป็นค่าที่อธิบายถึงมวลของอนุภาคต่อปริมาตรของแต่ละอนุภาค ความเข้มข้นเชิงมวล (mass concentration) เป็นค่าที่อธิบายถึงมวลของอนุภาคต่อปริมาตรอากาศ และความเข้มข้นเชิงจำนวน (number concentration) เป็นค่าที่อธิบายถึงจำนวนของอนุภาคที่กระจายอยู่ในฝุ่นละอองต่อปริมาตรอากาศ การกระจายของขนาดอนุภาคเป็นการวัดจำนวนของอนุภาคในแต่ละขนาด ตั้งแต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ จนถึงอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ๆ ที่กระจายอยู่ทั่วทั้งระบบของฝุ่นละออง ซึ่งได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกับขนาดของอนุภาค การกระจายของขนาดอนุภาคจะถูกอธิบายโดยฟังก์ชันการกระจายแบบ lognormal ( $f_k$ ) และ  $k^{\text{th}}$  ช่วงขณะของฟังก์ชันการกระจายแบบ lognormal โดย  $f_k$  หาได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของอนุภาคและขนาด [1]

$$f_k(d_p)dd_p = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g} \exp \left[ \frac{-(\ln d_p - \ln \bar{d}_{pg,k})^2}{2(\ln \sigma_g)^2} \right] d(\ln d_p) \quad \dots \dots \dots (1)$$

เมื่อ  $d_p$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค,  $\bar{d}_{pg,k}$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่ากลางเรขาคณิตช่วงของ  $k^b$  [ถ้า  $k = 0$  สำหรับการกระจายเชิงจำนวน (number weighting distribution)  $k = 1$  สำหรับการกระจายเชิงพื้นที่พื้นผิว (surface area weighting distribution) และ  $k = 2$  สำหรับการกระจายเชิงปริมาตรหรือมวล (volume or mass weighting distribution)] และ  $\sigma_g$  คือการเบี่ยงเบนมาตรฐานเรขาคณิต หาได้จากสมการที่ 2

$$\sigma_g = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (\ln d_i - \ln d_g)^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ  $d_g$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเรขาคณิตเชิงจำนวนหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยการนับ,  $n$  คือจำนวนอนุภาคในช่วงขนาดหนึ่งๆ และ  $N$  เป็นจำนวนช่วงขนาดที่พิจารณา

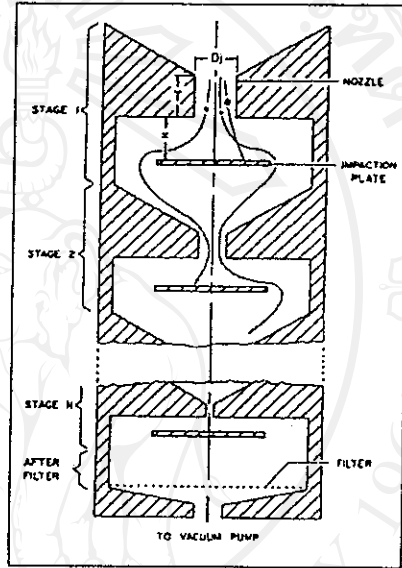




อุปกรณ์นี้สามารถทำงานโดยการต่อแบบอนุกรมหรือขนานกันเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการกระจายขนาดอนุภาคทั้งหมด

2) การตกกระทบเนื่องจากความเฉื่อย

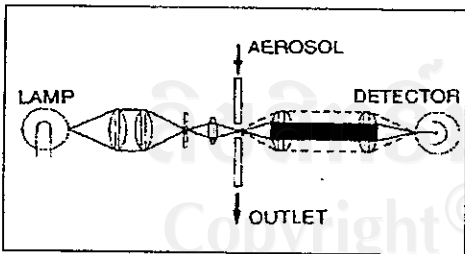
Cascade impactor แสดงไว้ในรูปที่ 5 การทำงานจะอาศัยความเฉื่อยของการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยจะให้อากาศไหลผ่านเข้าช่องเล็กและมีแผ่นแบนวางขวางตรงทางออก อนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีความเฉื่อยสูงจะตกกระทบที่แผ่นแบนเพราะไม่สามารถเคลื่อนที่อ้อมผ่านแผ่นแบนไปได้ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กพอจะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นแบนไปได้พร้อมกับกระแสการไหลของของไหล การทำงานของ Cascade impactor สามารถนำมาต่อกันเป็นหลายๆ ชั้นได้ถ้าต้องการแยกขนาดอนุภาคต่างๆ Cascade impactor เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมการไหลของอากาศได้ง่าย ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน แต่ถ้าใช้งานไปนานๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องลดลงเนื่องจากการตกตะกอนที่แผ่นแบนมากขึ้น จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดเป็นช่วงๆ



รูปที่ 5 Cascade impactor

3) การกระจายแสง

เครื่องมือที่ใช้เทคนิคการกระจายแสงมีความไวในการวัดมากที่สุดสำหรับการวัดความเข้มข้นของละอองและขนาดอนุภาค อนุภาคเดี่ยวขนาดเล็กเท่ากับ 1 ไมโครเมตรจะผลิตสัญญาณแสงรังสีหักเหที่สามารถตรวจจับได้ เทคนิคการกระจายแสงมีข้อดีคือ มีการรบกวนระบบการไหลของอนุภาคน้อยมาก และจะให้ข้อมูลทันทีทันใดซึ่งเหมาะสำหรับการวัดอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6 Optical measurement

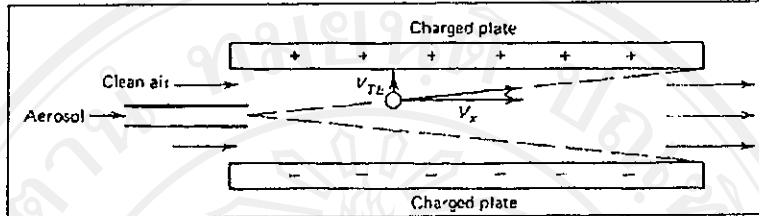
ข้อเสียของเครื่องวัดประเภทนี้คือ การกระเจิงแสงอาจจะมีควมไวในการเปลี่ยนแปลงน้อยในดัชนีการหักเห เช่นมุมการกระเจิงแสง ขนาดอนุภาค หรือรูปร่างอนุภาค ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ได้อาจจะไม่ชัดเจนหรือผลการวัดที่ไม่ถูกต้อง วิธีการวัดแบบการกระจายแสงจะมีความแตกต่างจากวิธีใช้กล้องจุลทรรศน์คือ อนุภาคจะไม่ถูกรบกวนและไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำการถ่ายภาพของอนุภาค และเทคนิคนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่ 0.03 - 20 ไมโครเมตร ลักษณะโครงสร้างและการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 6

4) การเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า

วิธีการนี้ใช้พื้นฐานคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับละออง โดยเฉพาะในย่านขนาดอนุภาคน้อยกว่า 1 ไมโครเมตร [3] เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนที่ตัวทางไฟฟ้า (Electrical mobility analyzer, EMA) อย่างง่ายแสดงไว้ในรูปที่ 7 อนุภาคละอองจะถูกนำเข้าไปตามท่อที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นขนานและแผ่นทั้งสองมีประจุตรงข้ามกัน โดยจ่ายแรงดัน

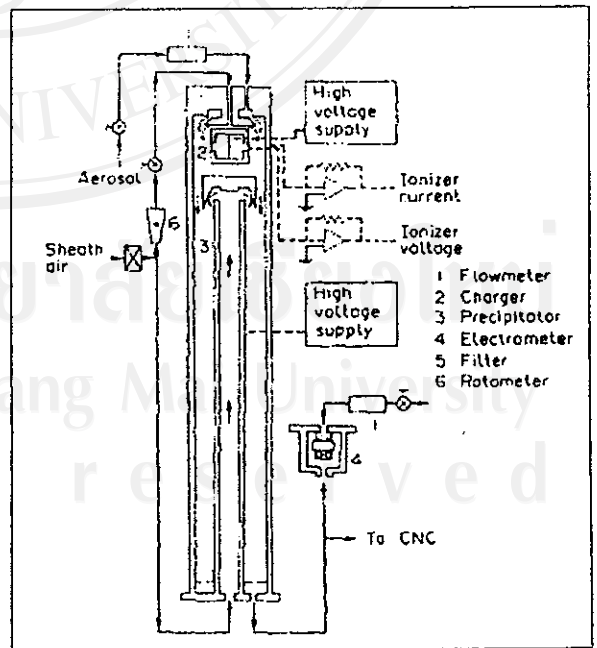


ไฟฟ้าให้ทั้งสองแผ่น อนุภาคที่มีประจุบวกและลบทั้งหมดจะเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นและสะสมตัว ส่วนอนุภาคที่ไม่มีประจุจะเคลื่อนผ่านออกไปโดยไม่มีกระแสสะสมตัวบนแผ่นใดๆ การเปรียบเทียบมวลตัวอย่างเมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าแตกต่างกัน จะสามารถหาสัดส่วนของอนุภาคที่ไม่ได้รับการอัดประจุ ขนาดของอนุภาคสามารถถูกวิเคราะห์หาได้จากสมการที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้า ความเร็วของกระแสการไหล และระยะทางการเคลื่อนตัวของอนุภาค



รูปที่ 7 เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของทางไฟฟ้าอย่างง่าย [1]

ถ้าอนุภาคได้รับประจุโดยวิธีการอัดประจุแบบแพร่ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมที่แน่นอน ประจุบนอนุภาคที่รูขนาดและการเคลื่อนตัวของทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฉพาะจะสอดคล้องกับขนาดอนุภาคทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้การกระจายของขนาดอนุภาคสามารถหาได้โดยการวัดการกระจายของการเคลื่อนตัวของทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นหลักการของเครื่องวิเคราะห์ที่ละอองด้วยไฟฟ้า (Electrical aerosol analyzer, EAA) ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Whitby และคณะ [4, 5] EAA ประกอบด้วยเครื่องอัดประจุละออง (aerosol charger) เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัว (mobility analyzer) และ เครื่องวัดกระแสอิเล็กโทรมิเตอร์ (electrometer current sensor) ลักษณะโครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 8 การวัดจะทำโดยให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในเครื่องด้วยอัตราการไหลคงที่และผ่านเข้าไปในเครื่องอัดประจุด้วยวิธีการแพร่แบบไอออนขั้วเดียว (unipolar ion diffusion charger) จากนั้นการวัดการเคลื่อนตัวของอนุภาคจะกระทำโดยเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัว การกระจายขนาดจะได้ออกมาจากการกระจายการเคลื่อนตัวที่วัดได้ เครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่ใช้จะมีลักษณะคล้ายกับที่ Liu and Pui [6] ได้ อธิบายไว้ คืออนุภาคที่ได้รับการอัดประจุจะเคลื่อนที่เป็นมุมหักเหผ่านเข้าไปในกระแสวนแบบราบเรียบในคอนเดนเซอร์รูปทรงกระบอก (cylinder condenser) และอนุภาคเหล่านั้นที่ไม่ตกตะกอนหรือสะสมตัวจะถูกตรวจสอบ หรือวัดโดยใช้เครื่องวัดกระแสอิเล็กโทรมิเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างของคอนเดนเซอร์ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า การตกตะกอนของอนุภาคบนอิเล็กโทรมิเตอร์ (collector rod) และการวัดกระแสจะสอดคล้องกับกระแสอิเล็กโทรมิเตอร์ ซึ่งจะสามารถแปลงสัญญาณออกมาเป็นการกระจายการเคลื่อนตัวได้ อิเล็กโทรมิเตอร์สามารถวัดกระแสจาก  $2 \times 10^{-15} - 10^{-10}$



รูปที่ 8 เครื่องวิเคราะห์ที่ละอองด้วยไฟฟ้า (Electrical aerosol analyzer) [6]

แอมแปร์ เครื่องมือนี้สามารถวัดขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.003 ถึง 1 ไมโครเมตร และใช้เวลาประมาณ 2 นาทีในการวัด เครื่องมือนี้ถูกใช้ในการศึกษาการกระจายขนาดอนุภาคในย่านขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร วิธีการวัดทางไฟฟ้าเป็นวิธีที่ถูกใช้อย่างกว้างขวางและยอมรับว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับการวัดขนาดอนุภาคระดับเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร [7]

**อุปกรณ์และเครื่องวิเคราะห์อนุภาคจุลสาร**

เครื่องมือที่ออกแบบสำหรับการวัดขนาดของอนุภาคที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์โดยทั่วไปจะมีวิธีการวัดที่แตกต่างกัน วิธีการและเครื่องมือสำหรับการวัดขนาดอนุภาคได้มีการกล่าวถึงในหลายงานวิจัย [8, 9, 10, 11, 12] ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการวัดอนุภาคจุลสารจะมีความแตกต่างกันในการบ่งบอกถึงขนาดอนุภาคที่สามารถวัดได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

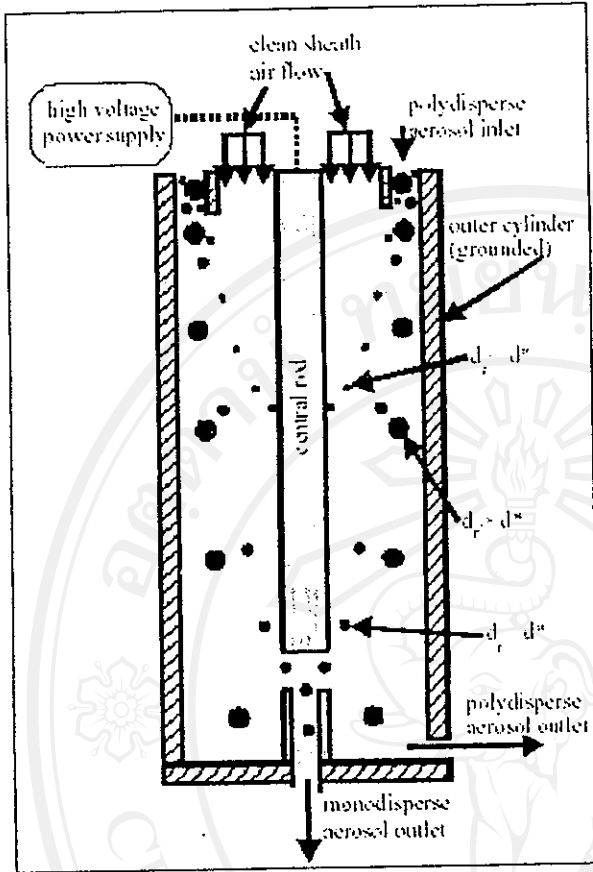
จะเห็นว่าการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคในช่วงขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรควรจะใช้วิธีการวัดทางไฟฟ้าจะเหมาะสมและรวดเร็วกว่าวิธีการอื่นๆ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือวัดคุณสมบัติของอนุภาคที่มีอยู่ในปัจจุบันมีลักษณะโครงสร้าง วิธีการและการทำงานที่เกี่ยวข้องกับวิธีการทางไฟฟ้ามีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่จะยกมากล่าวเฉพาะบางชนิดที่สำคัญที่มีการใช้อย่างแพร่หลายและบางอุปกรณ์อยู่ระหว่างการวิจัยพัฒนา ได้แก่

ตารางที่ 1 วิธีการวัดอนุภาคจุลสารและย่านขนาดที่สามารถวัดได้

วิธีการวัด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (นาโนเมตร)				
	1	10	100	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
1. Diffusion	----	+++	+++	+++	+
2. Electric, bipolar	----	----	---	+++	+++
3. Electric, diffusion	----	+++	+++	+++	+++
4. Electric, field				+++	+++
5. Electron microscopy	++	+++	+++	+++	+++
6. Optical microscopy					---
7. Photoelectric counter				---	+++
8. Ultramicroscopic trajectory				---	+++
9. Inertial impacts			---	+++	+++
10. Aerodynamic sizing			---	+++	+++

1) Differential mobility analyzer

Differential mobility analyzer (DMA) หรือเรียกว่าเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า คือเมื่ออนุภาคที่มีประจุเป็นลบหรือบวกผ่านเข้ามาในสนามไฟฟ้า จะทำให้อนุภาคที่เป็นบวกเคลื่อนที่โค้งเข้าหาขั้วลบและอนุภาคที่เป็นลบจะเคลื่อนที่โค้งเข้าหาขั้วบวก DMA เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกขนาดของอนุภาคที่กระจายอยู่ในอากาศ มีลักษณะโครงสร้างและการทำงานแสดงไว้ดังรูปที่ 9 อุปกรณ์นี้เป็นทรงกระบอกกนร่วม (two concentric cylinders) ทรงกระบอกด้านในเป็นขั้วบวกและทรงกระบอกด้านนอก



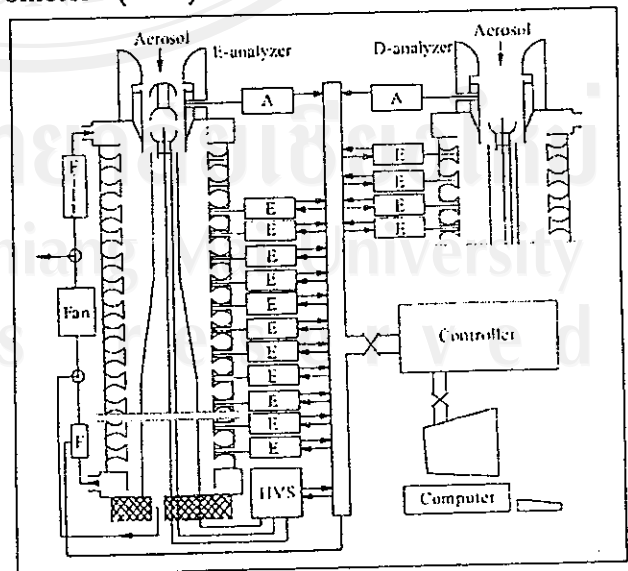
รูปที่ 9 ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ DMA

เป็นขั้วกราวด์ ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วบวกหรือทรงกระบอกด้านในจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตรงบริเวณช่องว่างระหว่างทรงกระบอก ในการทำงานจะเริ่มต้นด้วยการอัดประจุลบให้กับอนุภาคตัวอย่าง ดังนั้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาในสนามไฟฟ้างดรูปที่ 9 จะเคลื่อนที่โค้งเข้าหาขั้วบวกซึ่งอยู่ตรงกลางอนุภาคที่มีขนาดเหมาะสม ( $d^*$ ) กับแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคก็จะเคลื่อนที่เข้าช่องเก็บตัวอย่างซึ่งต่อกับเครื่องนับจำนวนอนุภาค ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ( $d < d^*$ ) จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวกและตกกระทบที่ผิวขั้วบวกก่อนที่จะถึงช่องเก็บตัวอย่าง และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ( $d > d^*$ ) จะเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยของตัวอนุภาคเองผ่านช่องเก็บตัวอย่างออกไปพร้อมกับอากาศสะอาด การคัตขนาดอนุภาคจะทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วบวกทำให้แรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออนุภาคเปลี่ยน

ไป ดังนั้นอนุภาคที่ผ่านเข้าช่องเก็บตัวอย่างจะมีขนาดต่างๆ กันแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วบวก ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาประมวลผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและจำนวนของอนุภาคได้ ซึ่งเรียกว่ากราฟของการกระจายขนาดของอนุภาค

2) Electrical aerosol spectrometer (EAS)

Electrical aerosol spectrometer (EAS) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการวัดแบบหลายช่องขนานไปพร้อมกัน (multi-channel หรือ parallel) ใช้สำหรับการวัดอนุภาคที่มีลักษณะการกระจายขนาดแบบไม่เสถียร (unstable size spectrum) ในช่วงตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ซึ่งได้พัฒนาขึ้น โดยมหาวิทยาลัยดารัฐประเทศเอสโตรเนีย [13] ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ EAS แสดงไว้ในรูปที่ 10 EAS ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสองส่วนที่ต่างกัน ซึ่งจะ

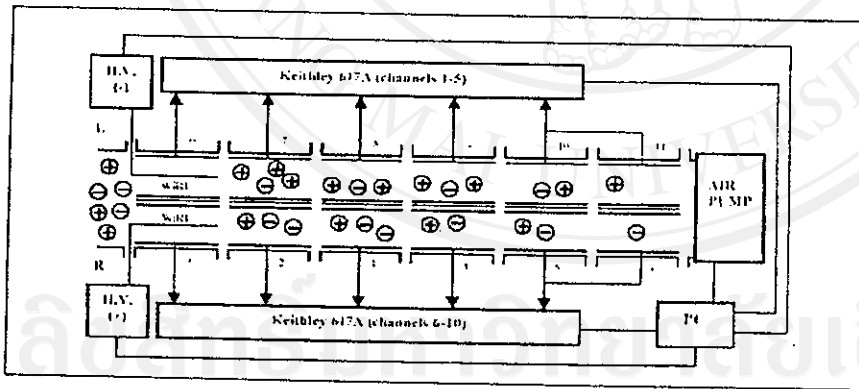


รูปที่ 10 ลักษณะโครงสร้างของ EAS [13]

ทำงานคู่ขนานกัน การอัดประจุของอนุภาคจะทำโดยผ่านการอัดประจุไอออนขั้วเดียว (unipolar ion charging) EAS ถูกออกแบบสำหรับการวัดขนาดอนุภาคในบรรยากาศ ดังนั้นการออกแบบทั้งหมดและหลักการการทำงานของ EAS จะมีลักษณะโครงสร้างและการทำงานคล้ายกับ DMA แต่จะต่างกันตรงที่อนุภาคที่ถูกประจุเข้าไปในเครื่องวิเคราะห์ EAS ใกล้เคียงบวกและอนุภาคเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งเข้าทางทรงกระบอกด้านนอกและตกกระทบบลงบนวงแหวนหัววัด (electrode ring) โดยวงแหวนหัววัดจะติดที่ผิวด้านในของทรงกระบอกด้านนอกใช้ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่ตกกระทบบและสะสมบนวงแหวน ความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาคจะสามารถหาได้โดยการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสะสมของอนุภาคที่มีประจุอยู่แล้วโดยใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และแปลงค่าสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่ได้เป็นจำนวนของอนุภาคสำหรับขนาดนั้นๆ ย่านความเข้มข้นเชิงจำนวนอนุภาคสามารถวัดได้ตั้งแต่  $10^2 - 10^5$  อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตรสำหรับช่องขนาดที่ต่ำกว่า 100 นาโนเมตร และ  $10^1 - 10^4$  อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตรในช่องขนาดระหว่าง 100-1000 นาโนเมตร เวลาที่ใช้ในการวัดจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาค แต่จะมีค่าน้อยที่สุดคือ 4 วินาที เครื่อง EAS ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยจอร์จมีขนาด 440 x 490 x 900 มิลลิเมตร และน้ำหนักประมาณ 70 กิโลกรัม ราคาประมาณ 50,000 ยูโร

3) Bipolar charge aerosol classifier

Bipolar charge aerosol classifier (BCAC) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการกระจายการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้าของอนุภาค (electrical mobility distribution) โดยใช้หลักการของเครื่องตกตะกอนแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator technique) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยบูรณะประเทศอังกฤษ [14] ลักษณะการทำงานของ BCAC แสดงไว้ในรูปที่ 11



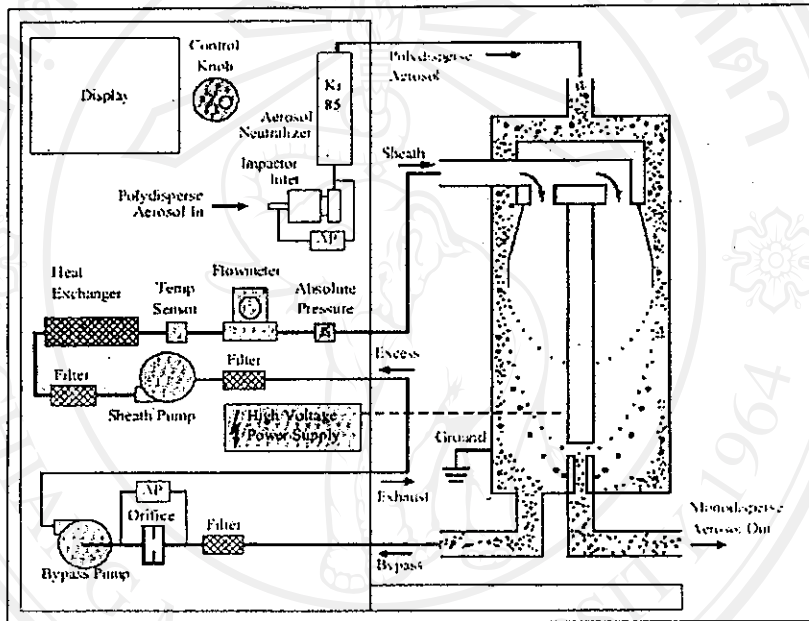
รูปที่ 11 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ BCAC [14]

อุปกรณ์นี้จะประกอบด้วยส่วนตกตะกอนที่มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นทรงกระบอกแกนร่วม 5 อันมาต่อกันแล้วคั่นด้วยฉนวนไฟฟ้าและจ่ายไฟฟ้าแรงสูงให้กับขั้วทรงกระบอกด้านใน โดยหลักการการทำงานและโครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์นี้จะมีลักษณะเหมือนกับ EAS แต่จะต่างกันตรงที่ BCAC ไม่ใช้วงแหวนหัววัดแต่ใช้เป็นลักษณะทรงกระบอกมาต่อกันหลายอัน ในแต่ละอันจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร และมีความยาว 20 เซนติเมตร อิเล็กโทรดแกนกลางจะใช้เส้นลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร โดยในแต่ละทรงกระบอกจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วด้านในของทรงกระบอกไม่เท่ากันโดยมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าเป็นขั้นๆ เป็นแบบโพลีโนเมียล ในการวัดอันดับแรกจะทำการอัด



ประจุให้กับอนุภาคตัวอย่างด้วยวิธีการอัดประจุแบบสองขั้ว (bipolar charging) อนุภาคที่ได้รับการอัดประจุจะเคลื่อนเข้าไปในส่วนการตกตะกอน (precipitator section) โดยอนุภาคที่มีประจุลบจะถูกดึงเข้าอิเล็กโทรดแกนกลางและสะสมตัวอยู่บนเส้นลวด ส่วนอนุภาคที่มีประจุบวกจะถูกผลักออกไปตกกระทบและสะสมตัวอยู่บนอิเล็กโทรดของผนังด้านในของทรงกระบอกด้านนอก ประจุจะถูกวัดโดยอิเล็กโทรมิเตอร์ร่วมกับสแกนเนอร์การวัดกระแสต่ำหลายช่องวัด อุปกรณ์ทั้งหมดถูกต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งควบคุมโดยโปรแกรมจากการป้อนข้อมูลแบบอัตโนมัติและมีการวิเคราะห์ข้อมูลทดลองสำหรับใช้แสดงผลแบบกราฟฟิค

4) Scanning mobility particle sizer



รูปที่ 12 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ SMPS

Scanning mobility particle sizer (SMPS) ยังเป็นที่รู้จักในชื่อว่า Scanning differential mobility analyzer (SDMA) ทำงานด้วยหลักการของการคัดแยกการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า [4, 7, 15, 16] เหมือนกับ DMA และถูกใช้เพื่อวัดการกระจายขนาดอนุภาคเชิงจำนวน (number-weighted size distribution) ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ SMPS แสดงไว้ในรูปที่ 12 มีลักษณะการทำงานคืออนุภาคตัวอย่างในอันดับแรกจะถูกส่งผ่านเข้าไปใน Single-stage inertial impactor เพื่อคัดแยกอนุภาคขนาดใหญ่ออกเหนี่ยวนำนำวัดออก ต่อจากนั้นอนุภาคจะผ่านเข้าไปใน Bipolar ion neutralizer เพื่อทำให้ระดับประจุของอนุภาคมีการกระจายประจุสมดุลแบบ Boltzmann equilibrium จากนั้นอนุภาคที่ได้รับการอัดประจุจะผ่านเข้าไปในเครื่องวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าโกลีอิเล็กโทรดด้านนอก ซึ่งประกอบด้วยทรงกระบอกแกนร่วมที่อิเล็กโทรดแกนกลางจ่ายไฟฟ้าแรงสูงขั้วบวกและด้านนอกเป็นขั้วกราวด์ (0 ถึง 10,000 VDC) การไหลแบบราบเรียบของอากาศสะอาด (ปกติที่อัตราส่วน 10:1 กับอัตราการไหลของอนุภาค) จะผ่านเข้าไปใน DMA โกลีอิเล็กโทรดแกนกลาง สนามไฟฟ้าภายใน DMA จะมีอิทธิพลต่อวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุ อนุภาคที่มีประจุบวกจะถูกผลักออกไปและถูกสะสมตัว

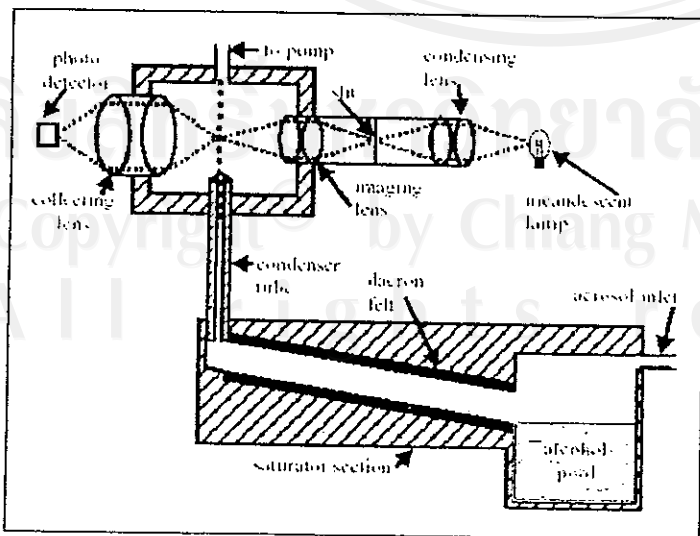


อยู่บนผนังอิเล็กโทรดด้านนอก ส่วนอนุภาคที่มีประจุลบจะถูกดึงเข้าหาแกนกลางที่อัตราที่ต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วเคลื่อนที่ของตัวพาไฟฟ้าของแต่ละอนุภาค อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสม ( $d^*$ ) ผ่านเข้าไปในช่องเก็บในอิเล็กโทรดแกนกลาง อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่ากันเมื่อถูกคัดแยกในเทอมของการเคลื่อนที่ตัวพาไฟฟ้า จากนั้นอนุภาคในช่วงขนาดนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องนับจำนวนอนุภาค (Condensation particle counter, CPC) เพื่อวัดจำนวนความเข้มข้นของอนุภาค ซึ่งรายละเอียดของเครื่องนับจำนวนอนุภาคจะอธิบายในหัวข้อต่อไป ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่าง ( $dp < d^*$  หรือ  $dp > d^*$ ) จะถูกสะสมตัวอยู่บนแกนกลางหรือผ่านออกไปทางข้างล่างของ SMPS ตามลำดับ โดยการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง (หรือ "Scanning") แรงดันแกนกลางจะเลือกอนุภาคของการเคลื่อนที่ตัวพาไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การกระจายขนาดอนุภาคทั้งหมดสามารถที่จะวัดได้แม่นยำด้วยความละเอียดสูง

บริษัท TSI ที่มีนิโซดา ประเทศสหรัฐอเมริกาได้ผลิต SMPS ออกมาหลายรูปแบบที่แตกต่างกันที่ครอบคลุมย่านขนาด 3-150 นาโนเมตร และ 7-1000 นาโนเมตร ด้วยย่านความเข้มข้นจำนวนอนุภาคโดยประมาณ  $10^4$ - $10^9$  อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และสามารถที่จะวัดการกระจายขนาดอนุภาคในเวลา 30 วินาที แต่โดยปกติจะมากกว่าคือ 60-120 วินาที SMPS เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดการกระจายขนาดอนุภาคและถูกพิจารณาเป็นมาตรฐานเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ โดยที่ SMPS เหมาะสำหรับการวัดในห้องทดลองจึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานในภาคสนามเนื่องจากมีขนาดที่ใหญ่ น้ำหนักมากและในการทำงานจะต้องต่อใช้งานร่วมกับเครื่องนับอนุภาคซึ่งอาจจะมีแนวโน้มทำให้เกิดการชำรุดเสียหายได้หากไม่ระวังเป็นพิเศษ SMPS โดยปกติจะมีราคาจำหน่ายประมาณ 70,000-100,000 เหรียญสหรัฐ

### 5) Condensation particle counter

เครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบการควบแน่น (Condensation particle counter, CPC) โดยทั่วไปถูกใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวัดความเข้มข้นเชิงจำนวนของอนุภาครวมทั้งหมดโดยไม่คำนึงถึง



รูปที่ 13 ลักษณะหลักการทำงานของเครื่องนับจำนวนอนุภาคแบบการควบแน่น (CPC)

ขนาดอนุภาค ดังนั้นจึงไม่ให้ข้อมูลที่เกี่ยวกับขนาดอนุภาค ลักษณะโครงสร้างของ CPC แสดงไว้ในรูปที่ 13 ขณะที่อนุภาคตัวอย่างเข้าไปใน CPC จะมีการเปลี่ยนสัญญาณเป็นความร้อนจ่ายให้กับอ่างแอลกอฮอล์จนทำให้แอลกอฮอล์กลายเป็นไอลอยผ่านขึ้นไปยังท่อความแน่น ไอร์เหยแอลกอฮอล์จะเกาะตัวลงบนอนุภาคและควบแน่นเป็นหยดอิมิตัวซึ่งมีขนาดประมาณ 12 ไมโครเมตร หยดของอนุภาคที่มีแอลกอฮอล์ควบแน่นอยู่จะถูกส่งให้เคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์ และใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณการกระจายของแสงเพื่อนำไปแปลงค่าเป็นจำนวนของอนุภาคต่อไป ตัวอย่าง CPC ที่นิยมมากคือโมเดล TSI 3025A สามารถตรวจสอบอนุภาคได้เล็กถึง 3 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 105 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนอง 1 วินาที และโมเดล 3022A สามารถวัดอนุภาคได้เล็กถึง 7 นาโนเมตรที่ความเข้มข้นจำนวนถึง 107 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยเวลาการตอบสนอง 12 วินาที CPC โมเดล 3022A จะมีราคาประมาณ 40,000 เหรียญสหรัฐ

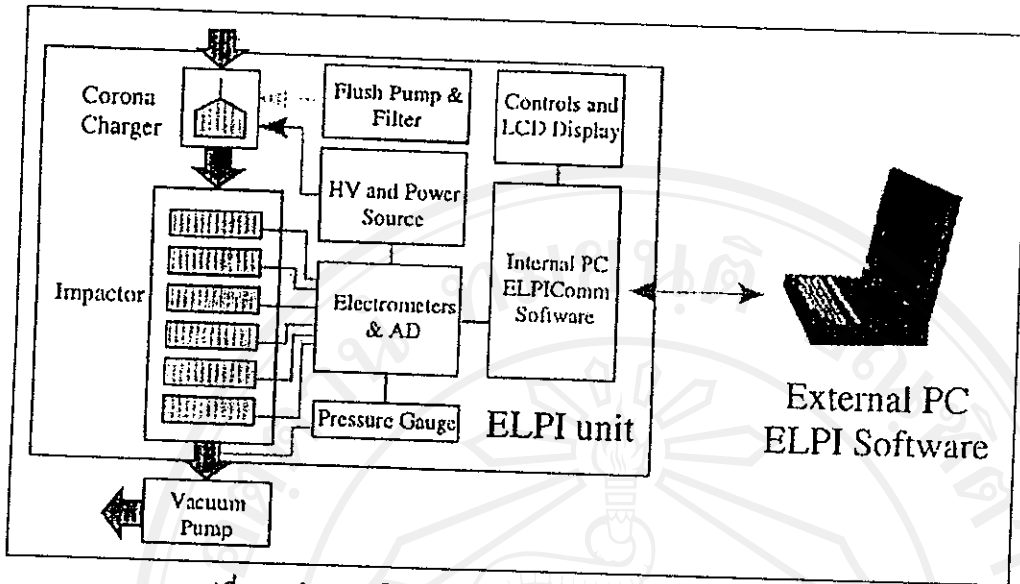
#### 6) Electrical low pressure impactor

Electrical low pressure impactor (ELPI) คือ Automated multi-stage impactor เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดการกระจายขนาดอนุภาคในเวลาสั้นกว่า SMPS [17] ลักษณะโครงสร้างของ ELPI แสดงไว้ในรูปที่ 14 ELPI ใช้ impactor 12 ชั้นซึ่งสอดคล้องกับวิธีการ "ตัด" ขนาดที่ 8.4, 5.3, 3.2, 2.0, 1.3, 0.81, 0.51, 0.33, 0.21, 0.14, 0.081 และ 0.042 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยอันดับแรกของอนุภาคที่เข้ามาจะได้รับการอัดประจุจาก Unipolar corona charger อนุภาคที่ได้รับการประจุแล้วจะเคลื่อนที่เข้าไปในส่วนของ impactor การทำงานของส่วนนี้จะอาศัยความเฉื่อยในการกักขนาดของอนุภาค โดยในแต่ละชั้นจะให้อนุภาคตัวอย่างที่ต้องการวัดไหลผ่านเข้าช่องเล็กๆ เพื่อเร่งความเร็วของกระแสการไหลของอากาศและวางแผ่นแบนขวางตรงทางออก ซึ่งทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือมีความเฉื่อยมากตกกระทบกับผิวของแผ่นแบน ไม่สามารถเคลื่อนที่อ้อมผ่านแผ่นแบนได้ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือมีความเฉื่อยน้อยจะสามารถเคลื่อนที่อ้อมแผ่นแบนไปได้ ในการวัดการกระจายของขนาดอนุภาคนั้นจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าจากแผ่นแบนที่เกิดจากการตกกระทบและสะสมตัวของอนุภาคที่มีประจุบนแผ่นแบนด้วยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ โดยในแต่ละชั้นจะให้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน เมื่อนำกระแสไฟฟ้าที่ได้ไปแปลงค่าจะได้ค่าของน้ำหนักของอนุภาคในช่วงขนาดนั้นๆ

โดยปกติแล้ว ELPI ถูกพัฒนาเป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดอนุภาคในไอเสียในงานอุตสาหกรรมและปล่องควันของโรงไฟฟ้า ดังนั้นย่านขนาดและความละเอียดของเครื่องมือจะไม่ค่อยดีนักสำหรับการวัดขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ELPI สามารถวัดขนาดอนุภาคที่มีความเข้มข้นเชิงจำนวนในย่านโดยประมาณ 102-107 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตรในเวลาภายใน 5 วินาที เครื่อง ELPI ของบริษัท Dekati ประเทศฟินแลนด์ สามารถวัดขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 30 นาโนเมตรถึง 10 ไมโครเมตร และสามารถที่จะขยายย่านวัดได้ต่ำถึง 7 นาโนเมตร มีขนาดของเครื่อง 570 X 400 X 230 มิลลิเมตร น้ำหนัก 35 กิโลกรัม และราคาประมาณ 70,000 เหรียญสหรัฐ

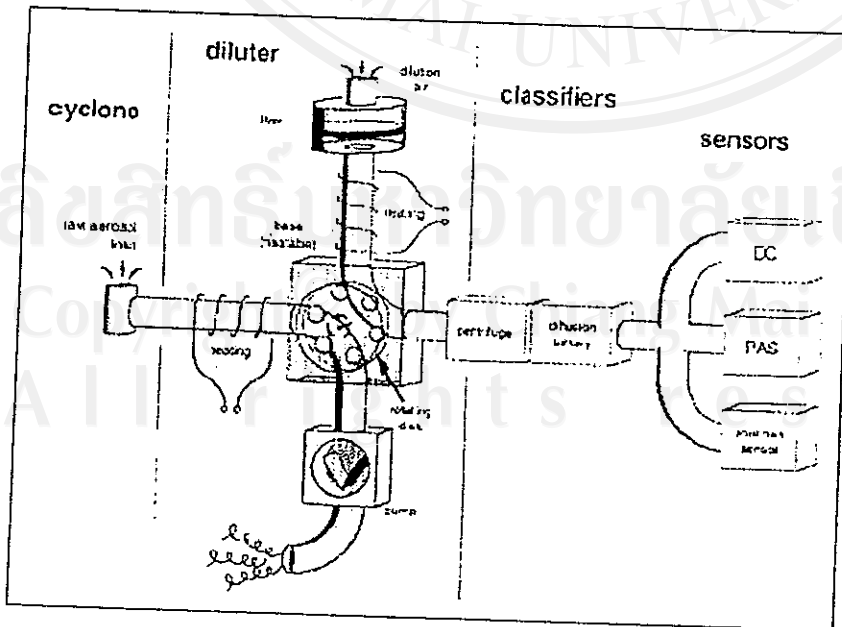
#### 7) NanoMet

NanoMet แสดงไว้ในรูปที่ 15 เป็นเครื่องมือที่ถูกเผยแพร่เมื่อเร็วๆ นี้ซึ่งให้ข้อมูลตอบสนองค่อนข้างเร็วเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นผิวของอนุภาค [18] NanoMet ประกอบด้วยสองส่วนแยกออกจากกัน



รูปที่ 14 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของ ELPI [17]

แต่ละช่องวัดจะเหมือนกันทุกอย่างและจะทำงานไปพร้อมๆ กัน อนุภาคที่เข้าไปในทั้งสองช่องวัด จะถูกอัดประจุด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ในกรณีของช่องวัดแรกจะใช้วิธีการ corona discharge เพื่อให้การอัดประจุแบบแพร่กับอนุภาค ขณะที่ในช่องวัดที่สองจะใช้หลอด excimer เพื่อให้การอัดประจุแบบ photoelectric กับอนุภาค อนุภาคทั้งสองช่องวัดที่ได้รับการอัดประจุแล้วจะถูกดักและสะสมตัวบนแผ่นกรองกระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมดจากอนุภาคที่มีประจุสะสมตัวอยู่บนแผ่นกรองจะถูกวัดออกมาโดยการกระจายประจุของอนุภาคจากการอัดประจุแบบแพร่ ซึ่งจะเป็นสัดส่วนเฉพาะกับ active surface area รวมทั้งหมดของอนุภาค ส่วนการกระจายประจุที่เป็นผลมาจากการอัดประจุแบบ photoelectric จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์วัสดุ (material coefficient) ของวัสดุแต่ละชนิด ฉะนั้นการกระจายประจุของทั้งสอง



รูปที่ 15 ลักษณะโครงสร้างของ NanoMet

ของวัดการไหลจะมีความแตกต่างกัน สัมประสิทธิ์ของวัสดุนี้จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุพื้นผิวของอนุภาคและจะบ่งบอกชนิดของแหล่งที่มาของอนุภาคที่แตกต่างกัน เช่น อนุภาคจากไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซล อนุภาคจากควันบุหรี่ สารพิษ และอื่นๆ ดังนั้น NanoMet สามารถจำแนกได้ทั้งคุณสมบัติพื้นผิวทั่วไปของอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงภายในคุณสมบัติพื้นผิวของอนุภาคที่รูชนิดมาก่อน NanoMet ยังสามารถวัดค่าสัมบูรณ์ของ active surface area ทั้งหมดของอนุภาคได้ ระบบของ NanoMet สามารถวัดอนุภาคในช่วงขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร ด้วยเวลาประมาณ 1 วินาที NanoMet ที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบันจะมีราคาประมาณ 65,000 เหรียญสหรัฐ

### บทสรุป

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศมีความสำคัญมากในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการของอนุภาค การควบคุมมลพิษทางอากาศ และกิจกรรมอนามัย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคมวลสารขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศเพื่อทำการตรวจสอบวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพอากาศและสิ่งปนเปื้อนจากอนุภาคขนาดเล็กและเพื่อทำการควบคุมปริมาณของอนุภาคไม่ให้มีผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม เครื่องวัดขนาดอนุภาคเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นในการศึกษาคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของอนุภาค เครื่องมือระดับสูงที่ใช้วิเคราะห์อนุภาคมีหลายชนิดและหลายแบบ ที่นิยมกันได้แก่ Differential mobility analyzer, Electrical aerosol spectrometer, Bipolar charge aerosol classifier, Scanning mobility particle sizer, Condensation particle counter, Electrical low pressure impactor และ NanoMet เป็นต้น

สำหรับในประเทศไทยการวิเคราะห์อนุภาคจุลสารขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และอุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์ยังไม่มีหรือนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งยังไม่มีการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับเครื่องวัดลักษณะดังกล่าวอย่างจริงจังซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากราคาเครื่องมือที่แพงมาก เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่มีการใช้งานและจำหน่ายเป็นส่วนมากภายในประเทศ ส่วนใหญ่ล้วนนำเข้ามาจากต่างประเทศแทบทั้งสิ้นและเป็นเครื่องมือที่วัดขนาดได้ความละเอียดระดับหนึ่งเท่านั้น ทั้งยังมีราคาสูงประมาณหลายแสนถึงหลายล้านบาทต่อชุดอุปกรณ์เมื่อเทียบกับราคาวัสดุที่ใช้ บทความนี้เป็นสรุปรายงานผลสถานภาพเทคโนโลยีและแนวทางในการศึกษาหลักการท างานและโครงสร้างของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์อนุภาคขนาดเล็กต่อไปได้

### เอกสารอ้างอิง

1. Hinds W. C. *Aerosol technology*. New York : John Wiley & Sons, 1999.
2. Whitby K. T. and Cantrell B. Atmospheric aerosols: characteristics and measurements. Intl. Conf. Environmental Sensing and Assessment, 14-17 September, Los Vegas, Nevada, 1975.
3. Liu B. Y. H. *Fine particles: aerosol generation, measurement, sampling and analysis*. New York : Academic Press, 1976: 581-624.
4. Whitby K. T. and Clark W. E. Electric aerosol particle counting and size distribution



- measuring system for the 0.015 to 1  $\mu\text{m}$  size range. *Tellus*. 18 (1966): 573-586.
5. Lundgren D. A. and et al. **Aerosol measurement**. Gainesville : University Presses of Florida, 1979.
  6. Liu B. Y. H. and Pui D. Y. H. On the performance of the electrical aerosol analyzer. *J. Aerosol Sci.* 6 (1975): 249-264.
  7. Knutson E. O. and Whitby K. T. Aerosol classification by electric mobility: apparatus, theory, and applications. *J. Aerosol Sci.* 6 (1975): 443-451.
  8. Davies R. Rapid response instrumentation for particle size analysis, part 2. *Am. Lab.* (1974): 73.
  9. Liu B. Y. H. **Fine particles: aerosol generation, measurement, sampling and analysis**. New York: Academic Press, 1976: 467-481.
  10. Fuchs N. A. Methods for determining aerosol concentration. *Aerosol Sci. & Tech.* 5 (1986): 123-143.
  11. Sinclair D. Measurement of nanometer aerosol. *Aerosol Sci. & Tech.* 5 (1986): 187-204.
  12. Schmidt-Ott A. New developments in aerosol characterization from the physical point of view. *Part. & Part. Sys. Charact.* 8 (1991): 35.
  13. Tammet H., Mirme A. and Tamm E. Electrical aerosol spectrometer of Tartu University. *Atmos. Res.* 62 (2002): 315-324.
  14. Kulon J., Malyan B. and Balachandran B. The bipolar charge aerosol classifier. *IEEE Trans. Ind. App.* 4 (2001): 2241-2248.
  15. Rosell-Llompart J., Loscertales I., Bingham D. and Fernandez J. Sizing nanoparticles and ions with a short differential mobility analyzer. *J. Aerosol Sci.* 27 (1996): 695-719.
  16. Wang S. C. and Flagan R. C. Scanning electrical mobility spectrometer. *J. Aerosol Sci.* 20 (1989): 1485-1488.
  17. Keskinen J., Pietarinen K. and Lehtimaki M. Electrical low pressure impactor. *J. Aerosol Sci.* 23 (1992): 353-360.
  18. Kasper M., Matter U. and Burtscher H. NanoMet: on-line characterization of particle size and composition. *Society of automotive engineers paper series 2000-01-1998*, 2000.





Intra P and Tippayawong N  
Analytical investigation of aerosol transport under electric field  
*NSTDA Annual Conference (NAC2005)*  
27-30 March 2005 Bangkok Thailand

Reprinted by National Science and Technology Development Agency,  
Bangkok, Thailand.  
<http://www.nstda.or.th/nac/>

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  
Copyright© by Chiang Mai University  
All rights reserved

**NAC2005**  
NSTDA Annual Conference  
S&T in Thailand: Towards the Molecular Economy

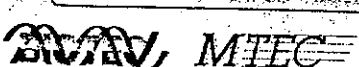
เอกสารประกอบการนำเสนอความวิชาการ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยสู่เศรษฐกิจยุคโมเลกุล  
S&T in Thailand: Towards the Molecular Economy

การประชุมประจำปี สวทช. 2548  
NSTDA Annual Conference 2005

28-30 มีนาคม 2548

ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย  
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ





<i>MEMS/NEMS Technology</i>	
Ion-assisted E-beam Evaporated Thin Film Gas Sensor .....	121
การศึกษาเทคนิคการพ่นอนุภาคเพื่อการประยุกต์ใช้ใน Microfluidic .....	122
Study of Powder blasting technique for Microfluidic Application	
Simulation of Curl Compensation in MEMS Micromirror .....	123
Bulk-Etched Surface Micromachined Process for Suspended MEMS Structure .....	124
การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์มบางเพชรด้วยวิธี MPCVD (ระยะที่ 1) .....	125
การออกแบบคานยึดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนิวเมติกไมโครวาล์วชนิดทำงานด้วยไฟฟ้าสถิต .....	126
Design Optimization of Tethers in Electrostatic Actuating Pneumatic Microvalves	
ตัวตรวจวัดความชื้นราคาถูกแบบใหม่โดยใช้เทปกาวโพลีอิมิดเป็นวัสดุไวความชื้น .....	127
Novel Low-Cost Humidity Sensors Based on Moisture Sensitive Polyimide Adhesive Tape	
Development of Polyaniline Based Gas Sensor .....	128
โครงการ การออกแบบวงจรรวมสำหรับวัดค่าความเก็บประจุและความต้านทาน เพื่อทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์ .....	129
ที่ใช้เทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค	
การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาดเล็กจากแอลกอฮอล์ .....	130
The Synthesis of Carbon Nanotubes with a Small Diameter Using Alcohol	
ขั้วไฟฟ้าโปร่งใสอินเดียมทินออกไซด์สำหรับจอแสดงผลไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์บนพลาสติก .....	131
Indium Tin Oxide Transparent Electrode for OLED display on Plastic	
โครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์ CuPc ปลูก โดยเทคนิคการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน .....	132
Structure and Optical Properties of CuPc Organic Thin Film Grown by Electron-Beam Evaporation	
การศึกษาพื้นผิวฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Alq3 โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมเพื่อประยุกต์ .....	133
สร้างเป็นไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์	
Study of Surface Morphology on Alq3 Organic Semiconductor Thin Films by Atomic Force	
Microscopy for Organic Light Emitting Diode Application	
การออกแบบประยุกต์ Electrostatic Comb drive สำหรับเครื่องกลจุลภาค .....	134
<i>Industrial Electronics</i>	
สำรวจเทคโนโลยีมอเตอร์ชนิดสวิตช์รีลัคแตนซ์ และการควบคุม .....	135
Survey on Switched Reluctance Motor and Control Technology	
ระบบตรวจวัดสิ่งแวดล้อมระยะไกล .....	136
Remote environmental monitoring system	
การนำตัวสังเกตทำนายค่าไปใช้บนตัวประมวลผลสัญญาณดิจิทัลแบบเต็มจำนวน .....	137
Implement the Prediction Observer on a fix point DSP	
การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แขนกลในอุตสาหกรรมโดยพิจารณาแบบ Two-inertia .....	138
ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์และการควบคุมอัตราส่วนการกำหนด	
การวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์วัดแรงปฏิกิริยาของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ .....	139
Analysis and Design of a Reaction Force Sensors for a Humanoid Robot	
ระบบนิวโรฟัซซีเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ .....	140
Neuro-Fuzzy System for Motion Control of a Humanoid Robot	
การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า .....	141
Analytical Investigation of Aerosol Transport under Electric Field	



## การวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า

### Analytical Investigation of Aerosol Transport under Electric Field

พานิช อินตรา และ นกร ทิพยาวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 อ. ห้วยแก้ว ต. ดุสิต อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50200

โทรศัพท์ 0-5394-4146, โทรสาร 0-5394-4145

E-mail: panich\_intra@yahoo.com, nakom@dome.eng.cmu.ac.th

#### บทคัดย่อ

เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้าเป็นเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่สามารถวัดความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในช่วง 1 - 1000 นาโนเมตร ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า เครื่องวัดแบบนี้มีลักษณะข้อดีคือโครงสร้างที่ง่ายแรงดันไฟฟ้าให้และมีการไหลของอากาศผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด การไหลของอนุภาคที่มีประจุจะถูกนำเข้าไปใกล้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านใน โดยมีการไหลของอากาศสะอาดเป็นตัวแยกการไหลของอนุภาคออกจากขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก สนามไฟฟ้าภายในจะทำให้อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าหาขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกข้ามช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและสะสมตัวอยู่บนวงแหวนหัววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคจะถูกวัดและเปลี่ยนแปลงไปเป็นการกระจายขนาดของอนุภาค พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือวัด ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยในอากาศภายใต้สนามไฟฟ้า โดยใช้หลักการความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อทำนายผลกระทบเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นขั้วอิเล็กโทรดซ้อนกันที่มีช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้านในและด้านนอกเท่ากับ 15 มิลลิเมตร การวิเคราะห์ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคในช่วง 1 - 1000 นาโนเมตร แรงดันไฟฟ้าในช่วง 1 - 10 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของไหลในช่วง 11 - 15 ลิตร ต่อ นาที และตำแหน่งทางเข้าของอนุภาค 1 - 15 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ แรงดันไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคขึ้น ความเร็วของของไหลภายในท่อจะแปรผันตรงกับระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาค และตำแหน่งระยะรัศมีทางเข้าของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ระยะการเคลื่อนที่ของอนุภาคลดลง การทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคนี้จะใช้เป็นประโยชน์ในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยต้นแบบของเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคจะถูกสร้างและทดสอบโดยอาศัยผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้

คำสำคัญ: อนุภาคแขวนลอยในอากาศ การเคลื่อนที่ของอนุภาค ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้า

#### Abstract

An Electrical mobility analyzer (EMA) is used to measure the electrical mobility of the particles in size range from 1 - 1000 nanometer, under influence of an electric field. The EMA design can be described as an assembly of two concentric electrodes which a potential is applied and gas flows. An aerosol flow containing charged particles is introduced adjacent to one of the electrode. A clean sheath air flow initially separates the aerosol flow from the outer electrode. Electric field causes charged particles to move toward the outer electrode across the gap between the electrodes. Particle having specific mobility are collected on the electrode ring where electrical signals are measured to obtain size distributions. Behavior of the particle motion under electric field is important factor influencing accurate particle size distribution measurements. In this study, the behavior of the particle motion under influence of the electric field based on the electric mobility of particle was investigated. The mathematical model was developed to predict the





particle trajectory in the coaxial electrodes with a gap of 15 mm between the inner and outer electrodes. The analysis was carried out for the particle diameter of 1 – 1000 nm, electrode voltage of 1 – 10 kV, total flow rate of 11 – 15 lpm, and particle inlet location of 1 – 15 mm. It was found that smaller particles have higher electrical mobility than larger particles. Higher electrode voltage, higher electrical mobility of particle is obtained. Higher fluid velocity results in higher axial distance of particle trajectory. Increasing the particle inlet diameter results in reduction of the axial distance of the particle trajectory. Prediction of particle trajectory was particularly useful in the instrument design. A prototype of the particle size analyzer is planned to be built and tested, based on the results of this model.

Keywords: aerosol, particle, particle trajectory, electrical mobility, electric field

### 1. บทนำ

อนุภาคจุดสารขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในบรรยากาศมีผลกระทบต่อทัศนวิสัย อากาศตามฤดูกาล สุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชากร และในกระบวนการในอุตสาหกรรมมากมาย เช่น อาหาร ห้องประกอบอาหาร ปรงชา หรือพื้นที่ในโรงพยาบาล อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสารกึ่งตัวนำ และการปนเปื้อนในพื้นที่และผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลไม่ดีต่อคุณภาพและผลการผลิตได้ คุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศ คือ ขนาด รูปร่าง จำนวน มวล พื้นที่ผิว และความหนาแน่น การรู้ถึงคุณสมบัติของอนุภาคนั้นมีความสำคัญมากในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการของอนุภาค (Aerosol science) การควบคุมมลพิษทางอากาศและกิจกรรมอนามัย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของอนุภาคจุดสารขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศ เพื่อทำการตรวจสอบวิเคราะห์ และควบคุมคุณภาพอากาศและตั้งปนเปื้อนจากอนุภาคขนาดเล็ก การศึกษาคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของอนุภาคที่จะทำการวัด ค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับวิธีการ และชนิดของเครื่องมือวัด โดยคุณสมบัติทั่วไปที่สนใจ ได้แก่ ความเข้มข้นเชิงมวลและจำนวนของอนุภาค พื้นที่ผิว และการกระจายของขนาดของอนุภาค เป็นต้น และค่าที่วัดได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน เพื่อทำการควบคุมปริมาณของอนุภาคไม่ให้มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ หรือ มีผลกระทบน้อยที่สุด เครื่องวัดขนาดอนุภาคเป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นในการศึกษาคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของอนุภาค

โดยเครื่องมือวัดขนาดอนุภาคที่มีอยู่ในปัจจุบันมีวิธีการและหลักการทำงานอยู่หลายอย่าง เช่น วิธีการแพร่ของอนุภาค (Diffusion method) เช่น Diffusion Battery วิธีการจากแรงเฉื่อย (Inertial method) เช่น Cascade Impactor วิธีการการเคลื่อนตัวตามหลักการอากาศพลศาสตร์ภายใต้แรงโน้มถ่วง (Aerodynamic method) เช่น Aerodynamic Particle Sizer วิธีการกระจายแสงของอนุภาค (Light scattering method) เช่น Optical Particle Sizer แต่วิธีการเหล่านี้สามารถวัดได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 1 ไมโครเมตร หรือ ได้ผลช้าและยาก สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร หรือ นาโนอนุภาค วิธีการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า (Electrical mobility method) เช่น Differential Mobility Analyzer หรือ DMA เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการพื้นฐานของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูง ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยเกี่ยวกับวิทยาการและเทคโนโลยีอนุภาค โดยเฉพาะในช่วงขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร เมื่อมีความสะดวกรวดเร็วในการทำงานและให้ความถูกต้องมากที่สุดวิธีหนึ่ง จึงทำให้เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคแบบใช้วิธีการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้านี้ใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบเครื่องมือวัดขนาดอนุภาค ในช่วงขนาด 1 – 1000 นาโนเมตร ปกติแล้วเครื่องมือวัดแบบนี้จะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว โดยขั้วหนึ่งเป็นมีดักขีไฟฟ้าเป็นบวก และอีกขั้วหนึ่งมีดักขีไฟฟ้าเป็นลบ และการไหลของแก๊สผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 การไหลของอนุภาคที่มีประจุ (Particle charged) จะถูกนำเข้าไปใกล้กับขั้วอิเล็กโทรดด้านใน โดยมีกระแสของอากาศสะอาด (Clean sheath air) เป็นตัวแยกการไหลของอนุภาคออกจากขั้วอิเล็กโทรดด้านนอก สนามไฟฟ้าภายในจะทำให้อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าหาขั้วอิเล็กโทรดด้านนอกข้ามผ่านช่องว่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าของอนุภาคที่สัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค เครื่องวัดขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้าได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่องในต่างประเทศ [1 - 9] และได้มีการผลิตออกมาเป็นเครื่องมือมาตรฐานในการวัดขนาดอนุภาค สำหรับในการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดขนาดอนุภาคแบบใช้หลักการเคลื่อนตัวเชิงไฟฟ้า การรู้ถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้สนามไฟฟ้า เป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากสำหรับการออกแบบ เนื่องจากจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือวัด





## CURRICULUM VITAE

- Name and Surname:** Mr. Panich Intra
- Date of birth:** 4 September 1978
- Education:**  
 BS.Tech.Ed. degree in Electrical Engineering  
 from Rajamangala Lanna University of Technology in 2001  
 M.Eng degree in Energy Engineering  
 from Chiang Mai University in 2003
- Specialist:** Electrical aerosol measurement, Instrumentation and control,  
 Energy engineering
- Research Interest:** Design of instrumentation for electrical mobility aerosol size  
 distribution measurement
- Publications:**
- Intra, P. and Rerkkriangkrai, P., "Semi-automatic report system for energy audit in buildings," *Engineering Journal Chiang Mai University*, Vol. 11, No.1-2, 90-95, 2003. (in Thai)
  - Intra, P. and Tippayawong, N., "Particle size analyzers," *Journal of the Scientific & Technological Research Equipment Centre*, Vol. 11, 156-170, 2003. (in Thai)
  - Intra, P. and Tippayawong, N., "Analytical investigation of aerosol transport under electric field," *NSTDA Annual Conference (NAC2005)*, 27-30 March, Bangkok, Thailand, 2005. (in Thai)
  - Intra, P. and Tippayawong, N., "Numerical simulation of flow and electric fields in an electrical mobility spectrometer," *International Symposium on Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution (ISNEPP 2005)*, 12-14 January, Bangkok, Thailand, 2005.
  - Intra, P. and Tippayawong, N., "Approach to characterization of a diode type corona charger for aerosol size measurement," *KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications*, Vol. 5-C, No. 5, 196-203, 2005.
  - Intra, P. and Tippayawong, N., "An electrical mobility spectrometer for aerosol size distribution measurement," *Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006)*, 25-27 January, Khon Kaen, Thailand, 2006.

- Intra, P. and Tippayawong, N., "Aerosol size distribution measurement using multi-channel electrical mobility sensor," *Journal of Aerosol Research Japan*, under 2<sup>nd</sup> review.
- Intra, P. and Tippayawong, N., "Comparative study on electrical discharge characteristics and operation of needle and wire-cylinder corona chargers," *KIEE International Transactions on Electrophysics & Applications*, under review.
- Intra, P. and Tippayawong, N., "On the performance of the electrical mobility spectrometer", in preparation.



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved