Thesis Title Aerosol Size Measurement System Using Electrical Mobility Technique

Author Mr. Panich Intra

Degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Asst. Prof. Dr. Nakorn Tippayawong	Chairperson
Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat	Member
Prof. Dr. Wiwut Tanthapanichakoon	Member
Assoc. Prof. Dr. Khajornsak Sopajaree	Member
Assoc. Prof. Thawan Sucharitakul	Member

ABSTRACT

The main objective of this work is to develop a prototype of an instrument capable of measuring aerosol size distribution in the sub-micrometer size range using electrical mobility technique. In this work, an electrical mobility spectrometer (EMS) was designed, constructed and tested. The EMS 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 classifier column close to the inner electrode by a continuous flow of air, surrounded by a sheath air flow. Because the inner electrode is kept at a positive voltage, the charged particles are then deflected outward radially according to the electrical mobility and they are collected on a series of electrically isolated electrometer rings along the outer wall of the classifier. 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. Finally, signal currents are then recorded and processed by a data acquisition system.

The theoretical work of this thesis includes modeling of the performance of the unipolar corona charger, size classification column and electrometer detection separately. The electrostatic properties in terms of voltage-current relationships of both needle and wire-cylinder corona chargers were compared and discussed for positive and negative coronas in the charging zone. Experimental investigation of the voltage-current characteristics of both chargers was compared with theoretical prediction. Results were used to characterize the electrostatic properties of both chargers. A semi-empirical method to calculate ion concentrations in the aerosol charger based on the ion current measurements was presented. Numerical models were successfully developed to investigate flow and electric field patterns in the charging zone of the charger. Analytical and numerical models were developed to predict the particle trajectories along the classification column, mobility and size classification ranges of the column, and to investigate flow and electric field patterns inside

the EMS classifier. Finally, analytical model was developed to calculate the output voltage of the electrometer circuit.

A number of experiments were conducted to evaluate the performance of the EMS prototype. These experiments include experimental investigation of the charger, the size classification column and the electrometer detection separately. The combustion aerosol generator was used to generate a polydisperse carbonaceous diffusion flame aerosol in this investigation. Experiments with the charger were conducted to measure its ion concentration and charging efficiency. Results from mathematical model were in agreement with those from experimental investigation of the charger. 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. Experimental characterization of the classifier was validated using the scanning electron microscope (SEM). Size determination from the EMS classifier was compared with that obtained from SEM analysis and good agreement was found from the comparison. Signal current from the detector was also analyzed to give number concentration of particles. Experimental results obtained agreed well with the theoretical predictions. It was shown that the EMS was capable of measuring aerosol size distribution in the size range approximately 50 – 600 nanometers. The proposed model proved to be useful in designing the detector and testing of a prototype of the detector showed promising results for aerosol size measurement. Finally, the overall performance of the electrometer circuit was calibrated with a high impedance current source, and compared with a commercial electrometer, Keithley model 6517A. Experimental results were found to be in good agreement with theoretical predictions.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	ระบบการวัดขนาดละอองลอยในอากาศโดยใช้เทคนิคการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า
ผู้เขียน	นายพานิช อินต๊ะ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์			
	ผศ.ดร. นคร	ทิพยาวงศ์	ประธานกรรมการ
	ศ.ดร. ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	กรรมการ
	ศ.ดร. วิวัฒน์	ตัณฑะพานิชกุล	กรรมการ
	รศ.ดร. ขจรศักดิ์	โสภาจารีย์	กรรมการ
	รศ. ตะวัน	สุจริตกุล	กรรมการ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาต้นแบบของเครื่องมือสำหรับการวัดการกระจายตัวขนาดละอองลอยในอากาศที่มีช่วงขนาดที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร โดยใช้เทคนิคการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้เครื่องมือวัดต้นแบบได้ถูกออกแบบ สร้าง และทดสอบ โดยเครื่องมือวัดต้นนี้แบบประกอบด้วย ชุดคัดแยกสิ่งปนเปื้อนขนาดใหญ่ขาเข้า ชุดให้ประจุไฟฟ้ากับอนุภาค ชุดวัดแยกขนาดอนุภาค ชุดตรวจวัดและเรียบเรียงลำดับการประมวลสัญญาณ ชุดจ่ายไฟฟ้าแรงสูง และชุดประมวลและควบคุมข้อมูลเข้าออกด้วยคอมพิวเตอร์ การให้ประจุอนุภาคละอองถูกทำโดยการปล่อยให้ละอองตัวอย่างผ่านเข้าไปในกลุ่มควันของไอออนโคโรนาบวก จากนั้นอนุภาคละอองจะได้รับการประจุโดยการชนกันระหว่างไอออนกับอนุภาค ต่อจากนั้นละอองที่มีประจุถูกผ่านเข้าไปยังเครื่องวัดแยกขนาดที่มีลักษณะเป็นขั้วอิเล็กโทรดซ้อนแกนร่วม โดยแบ่งกระแสการไหลออกเป็นสองกระแส คือ การไหลของอนุภาคละอองและการไหลของอากาศสะอาด โดยอนุภาคละอองถูกนำเข้าไปในเครื่องวัดแยกขนาดใกล้กับขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านในด้วยการไหลของอากาศอย่างต่อเนื่องและถูกล้อมรอบด้วยการไหลของอากาศสะอาด เนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ด้านในมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก อนุภาคที่มีประจุจะถูกผลักออกให้เคลื่อนที่ในแนวรัศมีโดยจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการเคลื่อนตัวทางไฟฟ้าของอนุภาคแต่ละขนาด อนุภาคจะตกกระทบและถูกสะสมตัวอยู่บนอนุกรมของวงแหวนอิเล็กโทรมิเตอร์ ที่ติดตั้งอยู่ที่ผนังด้านในของทรงกระบอกด้านนอกของเครื่องวัดแยกขนาด เครื่องวัดกระแสต่ำอิเล็กโทรมิเตอร์ถูกต่อเข้ากับวงแหวนเพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการสะสมตัวของอนุภาคที่สอดคล้องกับความเข้มข้นจำนวนและขนาดของอนุภาค โดยสัญญาณกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่วัดได้จะถูกบันทึกและประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องมือวัดนี้ประกอบด้วย แบบจำลองสมรรถนะของเครื่องให้ประจุไฟฟ้าแบบโคโรนาขั้วเดี่ยว เครื่องวัดแยกขนาดอนุภาค และเครื่องวัดกระแสต่ำอิเล็กโทรมิเตอร์ โดยได้ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องให้ประจุแบบโคโรนาเข็ม และแบบโคโรนาสายในความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าทั้งประจุบวกและประจุลบ ในส่วนพื้นที่การประจุของเครื่องให้ประจุ และได้ทำการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง ผลที่ได้ถูกนำไปใช้เพื่อกำหนดคุณลักษณะทางไฟฟ้าสถิตของเครื่องให้ประจุทั้งสอง และได้นำเสนอระเบียบวิธีการกึ่งการทดลองที่ใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นจำนวนของไอออนในเครื่องใช้ประจุ โดยวิธีการวัดกระแสการไหลของไอออนแบบจำลองเชิงตัวเลขได้ถูกสร้างขึ้น เพื่อใช้ในการทำนายลักษณะสนามการไหลของของไหลและลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเครื่องให้ประจุ สำหรับเครื่องวัดแยกขนาด ได้ทำการสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์และเชิงตัวเลขขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องวัดแยกขนาดอนุภาค การประมาณช่วงการคัดแยกขนาดและความสามารถในการเคลื่อนตัว และทำนายลักษณะการไหลของของไหลและลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในเครื่องวัดแยกขนาด และยังได้สร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์เพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณอิเล็กโทรมิเตอร์

ได้ทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องมือวัดต้นแบบ โดยผลการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบการทำงานของเครื่องให้ประจุ เครื่องวัดแยกขนาด และเครื่องวัดกระแสต่ำอิเล็กโทรมิเตอร์ เครื่องสร้างละอองตัวอย่างแบบเผาไหม้ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างละอองคาร์บอนในการทดสอบนี้ ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องให้ประจุได้ทำการโดยการวัดความเข้มข้นจำนวนไอออนและประสิทธิในการให้ประจุ ซึ่งผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และยังแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของประจุค้างในเครื่องอัดประจุต้องนับรวมถึงเมื่อความเข้มข้นจำนวนไอออนสูงและอัตราการไหลต่ำ และยังพบว่าอนุภาคขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 20 นาโนเมตร มีการสูญเสียภายในเครื่องให้ประจุมาก เนื่องจากมีความสามารถในการเคลื่อนทางไฟฟ้าสูง การทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องวัดแยกขนาดอนุภาคได้ทำการโดยการสอบเทียบกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดอนุภาคที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองถูกเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสัญญาณกระแสจากหัววัดอิเล็กโทรมิเตอร์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์แปลงเป็นความเข้มข้นจำนวนของอนุภาค จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือวัดนี้สามารถวัดการกระจายตัวละอองได้ในช่วงขนาดประมาณ 50 – 600 นาโนเมตร สมรรถนะของวงจรขยายสัญญาณอิเล็กโทรมิเตอร์ได้ถูกวัดเทียบกับแหล่งจ่ายกระแสแบบอิมพีแดนซ์สูง และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับเครื่องอิเล็กโทรมิเตอร์มาตรฐานและแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved