

การกำจัดก๊าซไทรเมทิลอะมีนอะเซทลดีไฮด์และแอมโมเนีย  
โดยปฏิกิริยาการเติมอิเล็กตรอน



นาย ไพศาล คงประสานกาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-484-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF TRIMETHYLAMINE ACETALDEHYDE AND AMMONIA GASES  
USING ELECTRON ATTACHMENT REACTION

Mr. Paisarn Khongphasarnkaln

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

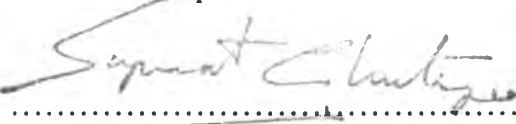
Academic Year 1998

ISBN 974-639-484-3


Thesis Title      Removal of Trimethylamine Acetaldehyde and Ammonia Gases  
                            Using Electron Attachment Reaction  
By                      Mr. Paisarn Khongphasarnkain  
Department        Chemical Engineering  
Thesis Advisor    Professor Wiwut Tanthapanichakoon

---


Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial  
Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree.

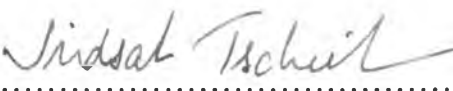
  
..... Dean of Graduate School  
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

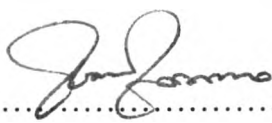
Thesis Committee

  
..... Chairman  
(Associate Professor Chirakarn Muangnapoh, Dr. Ing.)

  
..... Thesis Advisor  
(Professor Wiwut Tanthapanichakoon, Ph.D.)

  
..... Member  
(Assistant Professor Vichitra Chongvisal, Ph.D.)

  
..... Member  
(Jirdsak Tscheikuna, Ph.D.)

  
..... Member  
(Assistant Professor Tawatchai Charinpanitkul, Dr. Eng.)

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ไพศาล คงประสานกาล : การกำจัดก๊าซโทรเมทิลอะมีนอะเซทัลดีไฮด์และแอมโมเนียโดยปฏิกิริยาการเติมอิเล็กตรอน (REMOVAL OF TRIMETHYLAMINE ACETALDEHYDE AND AMMONIA GASES USING ELECTRON ATTACHMENT REACTION) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล : 150 หน้า, ISBN 974-639-484-3

งานวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการกำจัดโดยใช้ปฏิกิริยาเติมอิเล็กตรอนเพื่อกำจัดก๊าซมลพิษที่มีความเข้มข้นต่ำระดับ พีพีเอ็ม โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบปล่อยโคโรนา อิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่ผลิตขึ้นถูกจับไว้โดยโมเลกุลของก๊าซไม่บริสุทธิ์ชนิดอิเล็กโทรเนกาทีฟ เกิดไอออนประจุลบเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด (ผนังของเครื่องปฏิกรณ์) และถูกกำจัดออกที่ผนังนั้น ผู้เขียนได้ศึกษาถึงผลกระทบที่สำคัญหลายอย่าง ได้แก่ กระแสปล่อยออก ความเข้มข้นของก๊าซขาเข้า อัตราการไหลของก๊าซ ชนิดของก๊าซมลพิษ (โทรเมทิลอะมีน อะเซทัลดีไฮด์ และแอมโมเนีย) และปริมาณออกซิเจนไออน่า ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า โดยทั่วไปแล้ว ถ้ากระแสปล่อยออกยิ่งสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดก็จะยิ่งสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซและความเข้มข้นของก๊าซขาเข้ากลับให้ผลตรงกันข้าม อนึ่งการที่มีออกซิเจนผสมอยู่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซแต่ละชนิด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนและก๊าซมลพิษดังกล่าว แต่ไออน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซโทรเมทิลอะมีน และอะเซทัลดีไฮด์เท่านั้น

นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการมีส่วนผสมของก๊าซมลพิษตัวอื่น ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยศึกษาเป็นคู่ๆดังนี้ โทรเมทิลอะมีน-อะเซทัลดีไฮด์ แอมโมเนีย-อะเซทัลดีไฮด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์-โทรเมทิลอะมีน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์-อะเซทัลดีไฮด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์-อะเซทัลดีไฮด์ และคาร์บอนไดออกไซด์-อะเซทัลดีไฮด์ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า โดยทั่วไป ถ้ากระแสปล่อยออกยิ่งสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดก็จะยิ่งสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำจัดก๊าซมลพิษตัวเดียวพบว่า อิทธิพลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซโทรเมทิลอะมีน แต่ลดประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซอะเซทัลดีไฮด์ ในขณะเดียวกันก็เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการขึ้น ปัญหานี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการกำจัดก๊าซโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์สองตัวต่ออนุกรมกัน ในกรณีที่มีก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ผสมอยู่พบว่า ยิ่งความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และกระแสปล่อยออกยิ่งน้อย ผลการกำจัดยิ่งดีขึ้น แต่จะให้ผลตรงข้ามในการศึกษาผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการกำจัดก๊าซอะเซทัลดีไฮด์

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....  
ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

# # 397128202 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: GASEOUS POLLUTANT/GAS PURIFICATION/ ELECTRON ATTACHMENT/ CORONA DISCHARGE

PAISARN KHONGPHASARNKALN : REMOVAL OF TRIMETHYLAMINE ACETALDEHYDE AND

AMMONIA GASES USING ELECTRON ATTACHMENT REACTION. THESIS ADVISOR : PROF WIWUT

TANTHAPANICHAKOON. Ph.D. 150 pp. ISBN 974-639-484-3

Experimental investigation on the application of electron attachment to the removal of dilute gaseous pollutants has been carried out using a corona-discharge deposition-type reactor. The high selectivity of electron attachment to electronegative gas molecules is utilized to effectively remove the impurity gases at ppm and even ppb concentration levels. The effects of several factors, namely, discharge current, inlet gas concentration, space velocity and coexisting  $O_2$  or  $H_2O$  vapor on the individual removal efficiency of three kinds of gaseous pollutants, namely, trimethylamine  $((CH_3)_3N)$ , acetaldehyde  $(CH_3CHO)$  and ammonia  $(NH_3)$  have been investigated. The experimental results reveal that generally the higher the discharge current, the higher the removal efficiency, whereas the space velocity and inlet gas concentration yield the opposite effects. It has been found that the presence of  $O_2$  enhances the removal efficiency of each impurity gas. The enhancement is experimentally shown to be attributable to the ozone reaction in the removal of  $(CH_3)_3N$  from  $O_2-N_2$  mixed gas. Water vapor also enhances the removal efficiency of  $(CH_3)_3N$  and  $CH_3CHO$ .

Furthermore, the high selectivity of electron attachment to electronegative gas molecules is utilized to the simultaneous removal of dilute  $(CH_3)_3N-CH_3CHO$ ,  $NH_3-CH_3CHO$ ,  $SO_2-(CH_3)_3N$ ,  $SO_2-CH_3CHO$ ,  $NO_2-CH_3CHO$  and  $CO_2-CH_3CHO$  from air in the single reactor in order to find out the effect of discharge current on their removal efficiency. Since undesirable reaction by-products are produced on the removal of  $SO_2-(CH_3)_3N$  from air, a two-reactor system has been proposed and shown to remove the binary pair with negligible reaction by-product. The experimental results show that generally the higher the discharge current, the higher the removal efficiency. Compared to single impurity removal, it has been shown that the presence of  $SO_2$  enhances the removal efficiency but retards that of  $CH_3CHO$  in a single reactor, but some reaction by-products are generated. The problem can be avoided by using two independently operated reactors in series. In the case of coexisting of  $NO_2$ , it is noted that the lower the inlet  $NO_2$  concentration, the lower the discharge current that still yields beneficial effect. At higher discharge currents, the retarding effect of  $CO_2$  on  $CH_3CHO$  removal is obviously significant.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....

ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## ACKNOWLEDGEMENT

I am very grateful to my advisor, Prof. Wiwut Tanthapanichakoon, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, for his introducing me to this interesting subject, and for his helpful suggestion, deep discussion and encouraging guidance throughout the course of this work. I am also grateful to Assoc. Prof. Chirakarn Muangnapoh, Assist. Prof. Tawatchai Charinpanitkul, Assist. Prof. Vichitra Chongvisal and Dr. Jirdsak Tscheikuna for their stimulative comments and participation as the thesis committee.

I would like to acknowledge the National Research Council of Thailand (NRCT) and the Thailand Research Fund (TRF). The present work is part of a joint Thailand-Japan research project headed on the Thai side by Prof. Wiwut with research grant from NRCT and headed on the Japanese side by Prof. M. Okazaki. The research work also receives financial support from TRF given to Prof. Wiwut as TRF Senior Research Scholar in Particle Technology. I receive a 2-year scholarship from the National Science and Technology Development Agency. The scholarship covering the research materials and monthly expenses is gratefully acknowledged. In addition, I want to acknowledge the Exchange Scholarship provided by AIEJ.

I have had a wonderful year working in Prof. Morio Okazaki's and subsequently Prof. Hajime Tamon's Laboratory, Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Japan, under the above Exchange Program sponsored by The Association of International Education Japan. I would like to thank both of them, who have kindly permitted me to do the research work in their laboratory, subsidized me with additional financial support and made my stay in Japan more pleasant.

I want to thank Dr. Noriaki Sano for his useful guidance, hospitality, and educational suggestions, at all stages of my stay in Japan. It has been my great pleasure to share a good time with his nice friendship.

## CONTENTS

	Page
ABSTRACT IN THAI.....	IV
ABSTRACT IN ENGLISH.....	V
ACKNOWLEDGEMENT.....	VI
LIST OF TABLES.....	IX
LIST OF FIGURES.....	X
NOMENCLATURE.....	XIII
CHAPTER 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectives of research work.....	4
1.2 Scope of research work.....	4
CHAPTER 2 FUNDAMENTAL KNOWLEDG.....	5
2.1 Electron attachment reaction.....	5
2.2 Principle of gas purification.....	7
2.3 Types of reactor.....	10
CHAPTER 3 LITERATURE REVIEW.....	13
CHAPTER 4 EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION.....	27
4.1 Experimental setup.....	27
4.2 Experimental procedure and conditions gas.....	31
4.3 Experimental results.....	34
4.3.1 Removal efficiency.....	34
4.3.2 Removal of trimethylamine.....	34
4.3.2.1 Removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> .....	34
4.3.2.2 Removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	36
4.3.2.3 Influence of H <sub>2</sub> O on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> .....	39
4.3.2.4 Influence of SO <sub>2</sub> on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	42
4.3.2.5 Influence of SO <sub>2</sub> on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> .....	46
4.3.3 Removal of acetaldehyde.....	51
4.3.3.1 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> .....	51
4.3.3.2 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	51
4.3.3.3 Influence of H <sub>2</sub> O on removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> .....	54

	Page
4.3.3.4 Influence of gas flow rate on removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> .	56
4.3.3.5 Influence of NO <sub>2</sub> on removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	56
4.3.3.6 Formation of CH <sub>3</sub> CHO by-product with discharge current...	63
4.3.3.7 Influence of SO <sub>2</sub> on removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	66
4.3.3.8 Influence of CO <sub>2</sub> on removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	69
4.3.4 Removal of ammonia.....	71
4.3.4.1 Removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> .....	71
4.3.4.2 Removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	71
4.3.4.3 Influence of CO <sub>2</sub> on removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	74
4.3.4.4 Influence of H <sub>2</sub> O on removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	74
4.3.4.5 Ammonia-sulfur dioxide reaction to form solid particles....	77
4.3.5 Simultaneous removal of trimethylamine and acetaldehyde from. N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	78
4.3.6 Simultaneous removal of ammonia and acetaldehyde from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	80
4.4 Substantiation of ozone effect .....	83
4.5 Technique to reduce reaction by-products and improve..... removal efficiency	87
CHAPTER 5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....	91
5.1 Conclusions.....	91
5.2 Recommendations for future study.....	92
REFERENCES.....	94
APPENDICES.....	105



**LIST OF TABLES**

	Page
Table 4.1 Details of reactor.....	29
Table 4.2 Analytical condition for the derivative spectrophotometer.....	31
Table 4.3 Experimental conditions of malodorous gas components.....	31
Table 4.4 Measuring conditions of malodorous gas components for FID..... gas chromatograph•	32
Table 4.5 List of by-products generated on the removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from..... N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> mixed gas	39
Table 4.6 List of by-products on removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> mixture as..... interpreted from GCMS data	74

## LIST OF FIGURES

	Page
Figure 2.1 Principle of gas purification.....	8
Figure 2.2 Concepts of corona-discharge reactor.....	11
Figure 4.1 Arrangement of present experimental apparatus.....	27
Figure 4.2 Schematic diagram of experimental apparatus.....	28
Figure 4.3 Removal efficiency of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> .....	35
Figure 4.4 GCMS spectra on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> .....	37
Figure 4.5 Removal efficiency of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	38
Figure 4.6 GCMS spectra on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	40
Figure 4.7 Influence of H <sub>2</sub> O on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> ; .....	41
$C_{(CH_3)_3N} = 81 \text{ ppm, SV} = 75.9 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.8 Influence of SO <sub>2</sub> on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ;.....	43
$C_{(CH_3)_3N} = 34 \text{ ppm, } C_{O_2} = 17 \% \text{ and SV} = 80.9 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.9 Decrement of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N on removal of SO <sub>2</sub> and (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from.....	44
N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ; $C_{(CH_3)_3N} = 34 \text{ ppm, } C_{O_2} = 17 \% \text{ and SV} = 80.9 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.10 Concentration of SO <sub>2</sub> on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> .....	45
Figure 4.11 Influence of SO <sub>2</sub> on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> ; .....	47
$C_{(CH_3)_3N} = 34 \text{ ppm, SV} = 80.5 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.12 Decrement of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N on removal of SO <sub>2</sub> and (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> ;	48
$C_{(CH_3)_3N} = 34 \text{ ppm, SV} = 80.5 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.13 Outlet concentration of SO <sub>2</sub> on removal of (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> ;....	49
$C_{(CH_3)_3N} = 34 \text{ ppm, SV} = 80.5 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.14 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> .....	52
Figure 4.15 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> in presence of O <sub>2</sub> ;.....	53
$C_{CH_3CHO} = 20 \text{ ppm, SV} = 80.9 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.16 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> in presence of H <sub>2</sub> O: .....	55
$C_{CH_3CHO} = 20 \text{ ppm, SV} = 80.9 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.17 Influence of gas flow rate on removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> : .....	57
$C_{CH_3CHO} = 20 \text{ ppm, I} = 1 \text{ mA}$	

	Page
Figure 4.18 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> in presence of NO <sub>2</sub> ; .....	58
$C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\% \text{ and } \text{SV} = 76 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.19 Decrement of concentration of NO <sub>2</sub> against discharge current.....	59
during the removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	
Figure 4.20 Removal of CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> in presence of NO <sub>2</sub> ;.....	60
$C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\% \text{ and } \text{SV} = 75.8 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.21 Removal of NO <sub>2</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ; C <sub>O<sub>2</sub></sub> = 20%, SV = 75.6 hr <sup>-1</sup> .....	64
Figure 4.22 Concentration of by-product generated from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> mixture;.....	65
$C_{\text{O}_2} = 20\%, \text{SV} = 75.8 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.23 Removal of CH <sub>3</sub> CHO in presence of SO <sub>2</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ;.....	67
$C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\% \text{ and } \text{SV} = 76 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.24 Decrement of concentration of SO <sub>2</sub> during CH <sub>3</sub> CHO removal;.....	68
from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> $C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\% \text{ and } \text{SV} = 76 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.25 Removal of CH <sub>3</sub> CHO in presence of CO <sub>2</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ;.....	70
$C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\% \text{ and } \text{SV} = 75.3 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.26 Removal of NH <sub>3</sub> from inert gas (N <sub>2</sub> -He mixed gas);.....	72
$C_{\text{NH}_3} = 49 \text{ ppm}, \text{SV} = 188.5 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.27 Removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> mixed gas);.....	73
$C_{\text{NH}_3} = 96 \text{ ppm}, \text{SV} = 75.9 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.28 Influence of CO <sub>2</sub> on removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ;.....	75
$C_{\text{NH}_3} = 141 \text{ ppm}, \text{SV} = 75.7 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.29 Influence of H <sub>2</sub> O on removal of NH <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ;.....	76
$C_{\text{NH}_3} = 143 \text{ ppm}, \text{SV} = 75.6 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.30 Simultaneous removal of CH <sub>3</sub> CHO and (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ;.....	79
$C_{(\text{CH}_3)_3\text{N}} = 43 \text{ ppm}, C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 15 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\%, \text{SV} = 75.0 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.31 Removal of NH <sub>3</sub> and CH <sub>3</sub> CHO from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ; .....	81
$C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\%, \text{SV} = 75.6 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.32 Removal of NH <sub>3</sub> on removal of NH <sub>3</sub> and CH <sub>3</sub> CHO from.....	82
N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> ; $C_{\text{CH}_3\text{CHO}} = 16 \text{ ppm}, C_{\text{O}_2} = 20\%, \text{SV} = 75.6 \text{ hr}^{-1}$	
Figure 4.33 Apparatus to substantiate O <sub>3</sub> effect.....	84
Figure 4.34 Formation of O <sub>3</sub> from N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> mixed gas in the first reactor.....	86

	Page
Figure 4.35 Effect of ozonation reaction on removal of $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ in the..... second reactor	86
Figure 4.36 Removal of $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ and $\text{SO}_2$ from $\text{N}_2\text{-O}_2$ using two reactor..... system	88
Figure 4.37 Removal of $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ and $\text{SO}_2$ from $\text{N}_2\text{-O}_2$ in the first reactor;..... $C_{\text{O}_2} = 19\%$ , $C_{(\text{CH}_3)_3\text{N}} = 45 \text{ ppm}$ , $C_{\text{SO}_2} = 81 \text{ ppm}$ , $\text{SV} = 81.6 \text{ hr}^{-1}$	89
Figure 4.38 Removal of $\text{SO}_2$ in the second reactor; $C_{\text{O}_2} = 19\%$ ,..... $C_{(\text{CH}_3)_3\text{N}} = 0 \text{ ppm}$ , $C_{\text{SO}_2} = 81 \text{ ppm}$ , $\text{SV} = 81.6 \text{ hr}^{-1}$	89

## NOMENCLATURES

$C_{in}$  = inlet concentration [ppm]

$C_{out}$  = outlet concentration [ppm]

$\Psi$  = removal efficiency [ - ]

$I$  = discharge current [mA]

$P$  = power consumption [W]

$p$  = pressure [Pa]

$SV$  = space velocity [ $h^{-1}$ ]

$V$  = discharge voltage [V]

$GC_{in}$  = inlet FID area of gas chromatograph

$GC_{out}$  = outlet FID area of gas chromatograph