

# ניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים - VOCs

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

# מוסד שמואל נאמן

למחקר מתקדם במדע ובטכנולוגיה

**ניטור ומניעת זיהום אויר**

**בחומרים אורגניים נדיפים - VOCs**

עורך: יעקב ממון

ספר מאמרי יום העיון שהתקיים ביום 27 ליוני 1996  
במוסד נאמן, הטכניון, חיפה.

**ניטור ומניעת זיהום אוויר  
בחומרים אורגנים נדיפים VOCs**

עורך: יעקב ממון

הדעות בפרסום זה אינן משקפות בהכרח את עמדתו של מוסד ש. נאמן

**Copyright © 1997, The Samuel Neaman Institute  
For Advanced Studies in Science and Technology**

פורסם - פברואר 1997

מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע ובטכנולוגיה  
קרית הטכניון, חיפה 32000  
טל. 04-8237145, פקס 04-8231889

## תוכן עניינים

מילות פתיחה

הבעת תודה

דברי ברכה  
תכנית יום העיון

1. מיכאל גרבר (המשרד לאיכות הסביבה)  
חוק האויר הנקי ותקני פליטה ל-VOC
  2. יעקב ממון, רמי חשמונאי (הטכניון) ויאיר בניהו (רפא"ל)  
שיטות מדידה באויר הפתוח לחומרים אורגניים נדיפים
  3. חיים מייזלס (אקוטופ)  
מתקנים לטיפול בפליטות VOC לתעשית הלבדים
  4. יהודה גולדשמיד (תב' לתכנון והנדסה סביבתית)  
סקירה על מתקנים ושיטות למנוע פליטת חומרים אורגניים
  5. רבקה קולטון שפירא (אגוד ערים לאיכות הסביבה - תחנת הכוח חדרה)  
שימוש בביופילטר לפירוק חומרים אורגניים
  6. וילי רגייניאנו (התעשייה האוירית)  
נסיון מעשי בשימוש בפחם פעיל למיחזור פרכלוראתילן.
  7. דברי סיכום - יהודה גולדשמיד
- Durr Erhard Vick - מנהל חברת Durr  
מבער אחורי (Afterburner) לשריפת חומרים אורגניים נדיפים (אנגלית)

## יום עיון בנושא ניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים (VOC)

המשרד לאיכות הסביבה נמצא בשלבים אחרונים לקראת פרסום תקני פליטה למזהמי אויר, אשר יקבעו את הרכוז המקסימלי המותר של מזהם בארובה, ובכך הם מאפשרים פקוח יעיל על הפליטות ממפעלים. התקנים מתייחסים לשלוש קבוצות של מזהמי אויר: חלקיקים, חומרים אורגניים וחומרים אנאורגניים. בקבוצת החומרים האורגניים נכללים כ-100 חומרים, חלקם נדיפים (ומכונים VOC קיצור של Volatile Organic Compounds) וחלקם לא. חומרים אלה מגיבים עם קרינת השמש ליצירת סמוג פוטוכימי, הידוע בכושר החמצון הגבוה שלו ובפגיעה בבריאות האדם, בצמחיה ובחומרים. דלקים נדיפים, שימוש בממסים אורגניים, וצביעת משטחים מהווים את המקור העיקרי לחומרים אורגניים נדיפים באויר.

יום העיון שנערך ב-27.6.1996 בטכניון עסק בשלושה הבטים עיקריים של הנושא:

- א. חוק האויר הנקי ותקני פליטה ל-VOC בעולם ובישראל (מ. גרבר, המשרד לאיכות הסביבה).
- ב. אמצעים ושיטות למדידה וניטור של חומרים אורגניים בארובות ובאויר הפתוח (ש. לרמן, אוניברסיטת בן-גוריון; י. ממון ור. חשמונאי, הטכניון).
- ג. מתקנים למניעת הפליטה של חומרים אורגניים לאויר (י. גולדשמיד, חברה לתכנון והנדסה סביבתית; ר. קולטון שפירא, איגוד ערים חדרה לאיכות הסביבה; ח. מייזלס, אקוטופ; ו. רגיניאנו, תעשייה אוירית, E. Vick, חברת Durr, גרמניה).

יום העיון נערך בחסות המשרד לאיכות הסביבה, מוסד שמואל נאמן בטכניון והאגודה הישראלית לאקולוגיה ומדעי איכות הסביבה. מארגני הכנס הם ד"ר י. גולדשמיד ופרופ' י. ממון ואינג' דוד כהן. השתתפו כ-100 מהנדסים ומדענים המייצגים את התעשייה הכימית, בתי הזיקוק, מתקני צביעה ואחרים. את באי הכנס ברכו פרופ' י. ממון, יו"ר האגודה הישראלית לאקולוגיה ואיכות הסביבה, פרופ' נועם גבריאלי, יו"ר איגוד ערים חיפה לאיכות הסביבה, מר א. וורדי, מנכ"ל המשרד לאיכות הסביבה, ופרופ' א. סגינר, מנהל מוסד שמואל נאמן. הרצאות יום העיון יפורסמו על ידי מוסד שמואל נאמן.

יום העיון הוא השני בסדרת ימי עיון העוסקים במדידה ומניעה של זיהום אויר. קדם לו יום שעסק בחומר חלקיקי באויר. יום זה הוא צעד נוסף בקרוב מדינת ישראל לעמידה בתקנים המקובלים בעולם המערבי שמטרתם שמירה על איכות הסביבה.

## הבעת תודה

מארגני יום העיון על חומרים אורגניים נדיפים באטמוספירה רוצים להודות  
למפעלים ולגופים הבאים על השתתפותם, תרומתם ותמיכתם בארגון יום  
העיון:

מוסד ש. נאמן

משרד לאיכות הסביבה

התעשייה האוירית

ולאגן - יצרני כימיקלים בע"מ



הנני מברך אתכם עם התכנסותכם במעונו החדש של מוסד שואל נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה.

מוסד שמואל נאמן נועד לסייע במציאת פתרון לבעיות לאומיות בתחומי המדע והטכנולוגיה, הכלכלה והחברה במדינת ישראל לשם שיפור איכות החיים של אזרחיה. מטרתנו העיקרית היא לבחון, תוך שימוש בכלים מדעיים, את הבעיות בעלות החשיבות הלאומית במדיניות הצבורית בישראל. אחת הבעיות הראשונות במעלה היא בעית איכות הסביבה והשפעתה על איכות החיים.

מוסד נאמן מרכז פעילות ענפה בתחום איכות הסביבה, בפרסום ובהפצת מידע, בארגון ימי עיון וסמינרים ובעריכת מחקרים בתחום חשוב זה. לפני שנתיים אורגן יום עיון על שינוי התקנים לחלקיקים באטמוספירה בעקבות המידע הרב שהתאסף המעיד על השפעות בריאותיות שליליות כבר בריכוזים נמוכים. יום עיון זה הוא שני בסדרה, ואני תקווה כי יתרום לליבון תקני פליטה למזהמי אויר אשר יקבעו את הריכוז המותר של מזהם בארובה ובכך יאפשרו פיקוח יעיל על פליטת מזהמים ממפעלים.

אני מאחל לכם יום עיון פורה ומעניין.

פרופ' ארן סגינר, מנהל מוסד ש. נאמן

26.6.96

לכל באי הכנס העוסק בניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים, שלום וברכה.

חברים יקרים,

לצערי נבצר ממני להשתתף עמכם ולפתוח את יום העיון כפי שהתכוונתי. אני מקווה כי אשתתף עמכם בימי עיון נוספים בעתיד שיעסקו בנושאים הקשורים בשמירה על איכות הסביבה.

ביום זה תדונו באחד הנושאים החשובים שמשרדנו עוסק בהם בשנתיים האחרונות והוא הכנת תקני פליטה לחומרים אורגניים במסגרת התקנות למניעת מפגעים והמסקנות הנובעות מיישום תקנים אלה. לא נוכל לעמוד בתקנים שקבענו ללא מתקנים מתאימים המונעים זיהום, ללא ניטור הפליטות מארובות המתקנים וללא ניטור רצוף של רכוז המזהמים באויר אותו אנו נושמים.

הדרישה להקטנת קצב פליטת חומרים אורגניים לאויר, נובעת מהצורך למנוע היווצרות אוזון בשכבת האויר הקרקעית, כפי שאנו מכירים באזורים שונים בעולם ולמנוע פליטת חומרים מסוכנים לבריאות האדם באזורים שונים בעולם ולמנוע פליטת חומרים מסוכנים לבריאות האדם ונזקים לסביבה. אנו מודעים לקושי ביישום התקנות הנובע מהמגוון הרחב של חומרים אורגניים נדיפים המלווים אותנו בכל שלב משלבי חיינו ובקושי במציאת יישום פתרונות מתאימים. אולם כאן איננו לבד ואיננו ראשוניים, אנתנו הולכים בעקבות המתקנות שבארצות העולם ומחייבים אמוץ טכנולוגיות קיימות שהוכיחו את עצמן בעשרות ומאות מפעלים ברחבי העולם.

ברצוני להדגיש את חשיבותו של יום העיון לקדום נושא ניטור ומניעת הפליטה של חומרים אורגניים לאויר וברצוני להודות למארגני הכנס, שטרחו ועמלו, למוסד נאמן על שנתן אכסנייה מתאימה ועל שהוא ממשיך במסורת שהתחיל בה בשנה שעברה ושאני מקווה שימשיך בה גם בעתיד ומעל לכל ברצוני להודות לכם המשתתפים שטרחתם ובאתם להאזין ולדון בנושא חשוב זה.

אני מאחל לכם יום דיון ממצה, מהנה ופורה.

בברכה,

אהרון ורדי



## תכנית יום העיון

מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם

במדע ובטכנולוגיה

יום עיון:

### **ניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים VOC**

**לקראת עידן חדש במניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים**

אודיטוריום בטלר, בנין מוסד נאמן

יום ה' - 27.6.1996

התכנסות	09:00-09:30
מושב פתיחה - יו"ר - פרופ' יעקב ממן	09:30-09:45
פרופ' ארנן סגינר, מנהל מוסד ש. נאמן	ברכות:
מר א. ורדי, מנכ"ל המשרד לאיכות הסביבה	
<b>מושב ראשון - יו"ר - פרופ' נעם גבריאל - יו"ר איגוד ערים חיפה לאיכות הסביבה</b>	
ד"ר מ. גרבר (המשרד לאיכות הסביבה) - חוק האויר הנקי ותקני פליטה ל-VOC	09:45-10:15
ד"ר ש. לרמן (המכונים למחקר שימושי-אוניברסיטת בן גוריון) - שיטות למדידת חומרים אורגניים בארובה	10:15-10:45
פרופ' י. ממן ור. חשמנואי (הטכניון) - שיטות מדידה באויר הפתוח לחומרים אורגניים נדיפים	10:45-11:15
חיים מייזלס (אקוטופ) - מתקנים לטיפול בפליטות VOC לתעשית הלבידים	11:15-11:30
הפסקה וכיבוד	11:30-12:30
<b>מושב שני - יו"ר ד"ר ש. ברנר, משנה למנכ"ל המשרד לאיכות הסביבה</b>	
ד"ר י. גולדשמיד (חב' לתכנון והנדסה סביבתית) סקירה על מתקנים ושיטות למנוע פליטת חומרים אורגניים	12:30-13:00
ד"ר ר. קולטון שפירא (איגוד ערים לאיכות הסביבה - תחנת הכוח חדרה) שימוש בביופילטר לפירוק חומרים אורגניים	13:00-13:30
<b>מושב שלישי - יו"ר - מר י. גורן, סמנכ"ל בכיר, המשרד לאיכות הסביבה</b>	
Erhard Vick - מנהל חברת Durr - מבער אחורי (Afterburner) לשריפת חומרים אורגניים נדיפים (אנגלית)	13:30-14:30
ו. רגיניאנו (התעשייה האווירית) - נסיון מעשי בשימוש בפחם פעיל למיחזור פרכלוראתילן.	14:30-15:00
דיון ודברי סיכום - ד"ר י. גולדשמיד	15:00-15:30

1

יום העיון בנושא: ניטור ומניעת זיהום אוויר בחומרים אורגניים נדיפים VOC  
מוסד שמואל נאמן, הטכניון חיפה, 27 ליוני 1996.

## תקני פליטה חדשים בישראל לתרכובות אורגניות נדיפות (VOC)

דר' מיכאל גרבר, ראש אגף איכות אוויר, המשרד לאיכות הסביבה

במאמר זה מוצגת סקירה של התקנות החדשות שהוצעו על ידי המשרד לאיכות הסביבה מכוח החוק למניעת מפגעים-1961, בדבר פליטת תרכובות אורגניות נדיפות (voc) לאוויר ממקורות ניחים.

תקנות אלה, המתבססות בעיקרן על ההנחיות הטכניות בנושא איכות אוויר משנת 1986 של משרד הסביבה הפדרלי של גרמניה, הוכנו בשיתוף פעולה עם נציגים מהתאחדות התעשיינים בישראל ומחברת החשמל לישראל.

### א. מבוא

נדבך ראשון בתשתית הדרושה לניהול משאבי האוויר של ישראל נבנה ב-1992, כשהתפרסמו התקנות למניעת מפגעים - איכות אוויר, הקובעות את הריכוז המירבי המותר של 21 מזהמים שונים באוויר שאנו נושמים (מ"י, 1992). התקנים הכלולים בתקנות אלה מאפשרים להעריך את תוצאות ריכוזי המזהמים באוויר המתקבלות מן המערכות לניטור איכות האוויר הפועלות בארץ, וכן את הממצאים של המודלים האטמוספריים הממוחשבים המופעלים בהיקף רחב במסגרת תסקירי השפעה על הסביבה במטרה להעריך את ההשלכות של זיהום האוויר שעלול להגרם בעתיד מפעילות מזהמת חדשה.

בימים אלה, כאשר יפורסמו התקנות למניעת מפגעים - פליטת מזהמים לאוויר, יתווסף למינהל הסביבתי נדבך שני וחשוב. תקנות הפליטה החדשות הללו מתייחסות לפן השני של בעיית איכות האוויר - למקורות מהם נפלטים המזהמים לאוויר, ומנחה כיצד יש להגביל ולצמצם את הפליטות האלה על ידי שמוש באמצעים התפעוליים והטכנולוגיים הדרושים.

בתקנות הישראליות המוצעות לפליטת מזהמים לאוויר, תקני הפליטה המתייחסים גם למתקנים גדולים לשריפת דלק (המתבססים בעיקרם על הדירקטיבה של הקהילה הארופית בדבר הגבלת פליטות מזהמים לאוויר ממתקנים גדולים לשריפת דלק - EC, 1988), וגם למתקנים תעשייתיים או למתקנים בינוניים וקטנים לשריפת דלק (המתבססים בעיקרם על התקנים וההוראות בנושא איכות אוויר של משרד הסביבה הפדרלי של גרמניה - TA Luft, 1986). הכנת התקנות החדשות נעשתה בשיתוף פעולה הדוק בין צוות המשרד לאיכות הסביבה (עם נציגים מאגף איכות אוויר, הלשכה המשפטית וסמנכ"ל חמ"ס ואיכות אוויר), לבין צוות התאחדות התעשיינים (חברי תת הוועדה לאיכות אוויר) וצוות חברת החשמל (נציגי המחלקה לאיכות הסביבה). במאמר זה נציג סקירה של התקנות הישראליות החדשות המתייחסות לפליטת תרכובות אורגניות נדיפות (voc) לאוויר.

## ב. מטרת התקנות

החוק למניעת מפגעים - 1961 (הידוע כ-"חוק כנוביץ") אוסר לגרום זיהום בלתי סביר של האוויר (ת"י, 1961, סעיף 4). המטרה המרכזית של התקנות החדשות היא להגדיר את הכמות המירבית של המזהמים לסוגיהם שמותר לפלוט לאוויר ממתקני ייצור תעשייתיים ומתקני שריפת דלק אשר לא יחשב כזיהום בלתי סביר של האוויר. בתקנות אלה, נקבעת כמות הפליטה המירבית בהתבסס על ריכוז המזהם הנדון בגז הפליטה, כפי שנמדד בארובת המתקן או בפתחי האוורור שלו. בהתאם לכך, כוללות התקנות גם הוראות באילו שיטות ותנאים ובאיזה מכשירים יש למדוד את ריכוזי המזהמים הנפלטים לאוויר.

מטרה נוספת של תקנות אלה הוא לכוון את מפעילי המתקנים השונים להשתמש באמצעים התפעוליים והטכנולוגיים הדרושים לשם מניעת גרימת זיהום בלתי סביר של האוויר.

המזהמים המבוקרים בתקנות אלה, כפי שהם מפורטים בתוספת הראשונה והשנייה לתקנות ובשני הנספחים לתוספת השנייה, מחולקים ל-7 קבוצות הנחלקות אף הן לסוגים ולסוגי משנה כלהלן:

1. תחמוצות גופרית (SO<sub>x</sub>):  
קבוצה זו כוללת בעיקר גופרית דו-חמצנית - SO<sub>2</sub>, ולעיתים גם גופרית דו-חמצנית עם גופרית תלת-חמצנית - SO<sub>3</sub> יחד.
2. תחמוצות חנקן (NO<sub>x</sub>):  
קבוצה זו כוללת חנקן חד-חמצני - NO יחד עם חנקן דו-חמצני - NO<sub>2</sub>.
3. פחמן חד חמצני (CO):  
תקן הפליטה לפחמן חד-חמצני חל רק על מיתקנים חדשים.
4. תרכובות אורגניות נדיפות (VOCs) (ראה גם: גרבר, 1993):  
זו קבוצה הכוללת כ-120 תרכובות שונות, המסווגת ל-3 סוגי משנה בהתאם לרעילותם, ולכל סוג משנה תקן פליטה נפרד.
5. חומרים אנאורגניים גזיים:  
קבוצה של כ-18 סוגי חומרים, המסווגים ל-4 סוגי משנה בהתאם לרעילותם, ולכל סוג משנה תקן פליטה נפרד.
6. חומר חלקיקי שאינו מסוכן
7. חומרים חלקיקיים אורגניים ואנאורגניים מסוכנים:  
קבוצה של כ-26 סוגי חומרים, המסווגים ל-3 סוגי משנה בהתאם לרעילותם, ולכל סוג משנה תקן פליטה נפרד.
8. חומרים מסרטנים:  
קבוצה של כ-27 סוגי חומרים, המסווגים ל-3 סוגי משנה בהתאם למידת הקרצינוגניות שלהם, ולכל סוג משנה תקן פליטה נפרד.

כל אחד מן החומרים הנ"ל, במטרה להגדירם באופן חד-משמעי, מוזכרים בשמם בעברית ובאנגלית, ומואפיינים גם (במידה ויש) במספר CAS שלהם כפי שפרסמה החברה האמריקאית לכימיה.

בנוסף למטרות שיושגו עם הפרסום והאכיפה של תקנות הפליטה החדשות, שצוינו לעיל, יש ציפייה כי תושג גם מטרה נוספת: הכמויות השנתיות של מרבית המזהמים למינהם הנפלטים לאוויר בישראל גדלות עם השנים, עם הגידול בהיקף הפעילות התעשייתית ועם צריכת הדלק (למ"ס, 1995, טבלאות 1.7, 1.8, 1.9). על פי כל התחזיות, צפוי כי כמויות המזהמים הנפלטים לאוויר ימשיכו ויגדלו בעתיד. צפוי כי יישום תקנות הפליטה החדשות תייצב את כמויות הזיהום הנפלט לאוויר בישראל עד שנת 2003 לערך ברמה שאינה עולה על הכמויות שנפלטו לאוויר בשנת 1990.

תחילתן של תקני הפליטה בתקנות החדשות הוא 12 חודשים מיום פרסומן, לגבי מתקנים חדשים. לגבי מתקנים קיימים, ניתנת אורכה של מספר שנים (בהתאם למה שנדרש בארצות הקהילה הארופית) להתאמתם של הפליטות לרמת הדרישות המתמירה יותר של התקנים החדשים. לגבי מתקני שריפה קיימים גדולים (למעשה, יחידות ייצור גדולות של חברת החשמל), יש התייחסות מיוחדת בתוספת השלישית לתקנות החדשות, המורות כי הכמות הכוללת של הזיהום הנפלטת בפועל מכל יחידות הייצור הללו לא תעלה תוך זמן קצוב של מספר שנים (שוב, בהתאם למה שנדרש בארצות הקהילה הארופית) על הכמות שהיתה נפלטת מיחידות הייצור הללו אילו עמדו בתקני הפליטה החדשים, זאת מבלי שכל יחידת ייצור תדרש לעמוד בנפרד בתקני הפליטה החדשים. באופן זה, מתקזזים יחידות הייצור הנקיות יותר (הפולטות בריכוז הנמוך מתקן הפליטה) עם יחידות הייצור הנקיות פחות (הפולטות בריכוזים שאינם עומדים בתקן הפליטה).

בנוסף, מוצע כי השר לאיכות הסביבה רשאי לפטור מתקנים קיימים שיש כוונה להפסיק פעולתם תוך שמונה שנים מתחילתן של התקנות האלה מלעמוד בתיקני הפליטה החדשים, והוא יורה לבעל המתקן על הצעדים האלטרנטיביים שעליו לנקוט עד מועד הפסקת פעולתו.

לבסוף, בכדי להקל על התעשייה לעמוד בתקני הפליטה החדשים, מפעיל המשרד לאיכות הסביבה תוכנית למתן סיוע למפעלי תעשייה הזקוקים למימון להקמתם של ההתקנים למניעת זיהום אוויר.

### ג. תקני פליטה

תקני הפליטה בתקנות אלה חלים על פעילויות תעשייתיות הפולטות זיהום לאוויר, הנחלקות לשלושה סוגים (לגבי ההגדרות, ראה סעיף ה' להלן):

- יחידות ייצור תעשייתיות
- יחידות שריפת דלק לסוגיו, לצורך ייצור חום, קיטור או חשמל
- טורבינות גז (מנועי דיזל בשלב זה לא נכללו בהצעת התקנות).

תקני הפליטה עבור קבוצות המזהמים השונות המוזכרות בסעיף ב' לעיל, כלולים כולם, להוציא התרכובות האורגניות הנדיפות, בתוספת הראשונה לתקנות הפליטה. תקני הפליטה לתרכובות אורגניות נדיפות כלולים בתוספת השנייה לתקנות הפליטה. רשימה מפורטת של התרכובות האורגניות הנדיפות

מחולקת לשלוש קבוצות סווג, כלולה בנספח לתוספת השנייה. תקני הפליטה לתרכובות האורגניות הנדיפות מוצגים בטבלה שלהלן.

**טבלה: תקני פליטה לתרכובות אורגניות נדיפות VOC(1)**

קבוצת סווג	תקן הפליטה	קצב הפליטה
א'	20 מיליגרם למטר מעוקב דוגמאות: 1,2 דיכלורואתאן, פורמאלדהיד	0.1 ק"ג לשעה
ב'	100 מיליגרם למטר מעוקב דוגמאות: טולואן, סטירן טריכלורואתילן	2.0 ק"ג לשעה
ג'	150 מיליגרם למטר מעוקב דוגמאות: דיכלורומתאן, אולפינים, פראפינים	3.0 ק"ג לשעה

(1) הערה: תקני הפליטה תלים רק על מזהמים שקצב הפליטה שלהם לאוויר גדול מזה הנקוב בטבלה.

התקנות החדשות כוללות דרישה מבעלי המפעלים לנקוט אמצעים לעמידה בדרישות התקנות כגון התקנים למניעת זיהום אוויר וארובות, להחזיק את ההתקנים הללו במצב תקין בכל עת, ולנקוט אמצעים הדרושים לתיקונם המיידים במקרה של קלקול.

יש לציין כי התקנות אינן מחילות את תקני הפליטה על ציוד ייצור תעשייתי, על ציוד שריפת דלק, על טורבינות גז או על מנועי דיזל המשמשים רק לגיבוי במקרה של תקלה בציוד העיקרי, והמופעל פחות מ-6% משעות העבודה הרגילות של המפעל בשנה קלנדרית.

**ד. שיטות, תנאים ומיכשור למדידות פליטות זיהום אוויר**

בתקנות הפליטה החדשות יש הבחנה בין מדידה מתמשכת ורציפה בזמן של המזהמים הנפלטים מן הארובה - מדידה המוגדרת כניטור, לבין מדידת הפליטה באופן מבודד, שאז המדידה קרוייה בשם דגימה. ניטור הפליטות חל על יחידות שריפת דלק גדולות, לגבי העשן (אטימות), הגופרית הדו-חמצנית ותחמוצות החנקן. דגימות נדרשות במתקני שריפת דלק בינוניים וקטנים וביחידות ייצור תעשייתיות. תדירות הדגימות שיש לבצע היא מופחתת לגבי יחידות שריפת דלק מיחידות ייצור קטנות. את הדגימות בארובה

יש ליטול בתנאי הפעלה אופייניים למתקן, ובהתאם לשיטות העדכניות ביותר שפירסמה הרשות הפדרלית לשימור הסביבה בארצות הברית (USEPA), או בשיטה שוות-ערך.

התקנות קובעות כי ריכוזי המזהמים בארובה, המבוטאים במיליגרם חומר מזהם למטר מעוקב אוויר (מ"ג/מ"ק) יחושבו לגבי תנאים תיקניים (המוגדרים בתקנות אלה כטמפרטורה של 20° צלסיוס ולחץ של 101.3 קילופסקל), לגבי אוויר יבש (נטול אידי מים) ולגבי אחוז חמצן בגזי הפליטה כפי שנמדדו בעת הדגימה, להוציא המיתקנים אשר לגביהם יש לבצע תיקון לתכולת חמצן קבוע (ביניהם, מיתקנים לשריפת דלק נוזלי ומוצק, טורבינות גז, תנורים להתכת זכוכית ומתקני ייבוש). המשוואה הקושרת את ריכוז המזהם בגז הפליטה בתנאים המדודים של תכולת חמצן לבין התנאים של תכולת חמצן קבועה, היא:

$$E_B = \frac{21 - O_B}{21 - O_M} \times E_M$$

באשר:

$E_M$  - הריכוז המדוד בגזי הפליטה

$E_B$  - הריכוז המתוקן, המיוחס לתכולת חמצן קבועה

$O_M$  - תכולת החמצן המדודה בגזי הפליטה

$O_B$  - תכולת החמצן הקבועה.

יודגש כי בחישוב ריכוזי המזהמים עבור יחידות ייצור תעשייתיות, חל איסור להתחשב באוויר חצוני המוזן לארובה במטרה לדלל את גזי הפליטה ולהציג בהם ריכוזי מזהמים נמוכים יותר. בנוסף, בהתבסס על הדירקטיבה של הקהילה הארופית (EC, 1988, סעיף 2 (7)), מתירות התקנות לבעל מפעל להציג את כמות הזיהום הנפלט לאוויר מארובותיו השונות באמצעות יחידה עיונית אחת, וזאת בתנאי שהדבר אושר על ידי המשרד לאיכות הסביבה.

לבסוף, יצויין כי בתקנות החדשות כלולות הוראות כלפי בעל המפעל לגבי חובת רישום תוצאות הדגימה והניטור, שמירת התוצאות והצגתם בפני הרשויות המפקחות על פי דרישתם.

## ה. הגדרות

מאמץ ומחשבה רבים השקיעו השותפים להכנת תקנות אלה בהגדרות הרבות הכלולות בסעיף הראשון של תקנות הפליטה. נציין כאן את ההגדרות החדשניות בתחיקה הישראלית בנושא איכות אוויר:

1. מפעל - מקום שיש בו מיתקן אחד לפחות, שבו מייצרים, מאחסנים או מעבדים טובין, עושים מלאכה או שורפים דלק, עורכים ניסויים ובדיקות או מספקים שרותים.
2. מיתקן - יחידת שריפה, יחידת ייצור, טורבינת גז, או אוסף של יחידות כאמור, הממלאת תפקיד מוגדר במסגרת המפעל (בשלב זה, כאמור, מנוע דיזל אינו כלול בהגדרה זו).
3. מיתקן חדש - מתקן שלא היה קיים ביום תחילתן של תקנות אלה ושטרם הוחל בהקמתו במועד האמור.

4. מיתקן קיים - מיתקן הקיים ביום תחילתן של תקנות אלה או שהוחל בהקמתו במועד האמור, ובכלל זה מיתקן שביום תחילתן של תקנות אלה כבר הוצאו לגביו כל ההיתרים הנדרשים על פי חוק התיכנון והבנייה - 1965, לשם הקמתו.
5. התקן למניעת זיהום אוויר - התקן המיועד לצמצם את ריכוז והכמות של מזהמי אוויר הנפלטים עם גז הפליטה.
6. יחידת שריפה - ציוד לשריפת דלק גזי, נוזלי, מוצק או שילוב שלהם, למעט מנוע דיזל וטורבינת גז.
7. יחידת שריפה גדולה - יחידת שריפה שההספק התרמי שלה עולה על 500 מגוואט תרמי.
8. יחידת שריפה בינונית - יחידת שריפה שההספק המירבי שלה בין 10 ל-500 מגוואט תרמי.
9. יחידת שריפה קטנה - יחידת שריפה שההספק המירבי שלה קטן מ-10 מגוואט תרמי.
10. יחידת ייצור - ציוד במפעל אשר ממנו נפלט או עלול להפלט מזהם אוויר, למעט יחידת שריפה, מנוע דיזל או טורבינת גז.
11. מזהם, או מזהם אוויר - כל אחד מהחומרים הבאים, בהפלטו לאוויר במצב צבירה מוצק, נוזלי או גזי: חומר חלקיקי, תחמוצות גופרית, תחמוצות חנקן, פחמן חד-חמצני, חומרים מסרטנים, חומרים אורגניים נדיפים, חומרים אנאורגניים גזיים, חומר חלקיקי אנאורגני מסוכן.
12. גז פליטה - גז הנפלט לאוויר מיחידת שריפת דלק, טורבינת גז, או יחידת ייצור, דרך פתח פליטה.
13. קצב פליטה - (Emission rate) כמות בקילוגרם של מזהם אוויר הנפלט במשך שעה אחת, מיחידת שריפה, יחידות ייצור, או טורבינת גז.
14. דגימה - נטילת דוגמה של גזי הפליטה, בדיקתה ורישום תוצאותיה באופן מבודד.
15. אזור רגיש - אזור המשמש כאזור למגורים, כאזור מעורב למבנה ציבורי, למיתקן תיירות או לנופש וכן 500 מטר בין קו הבניין בגבול האזור לקו הבניין של המפעל - לגבי מפעל חדש ו-100 מטר לגבי מפעל קיים, ובאזור תיירות או נופש - מגבול האזור לקו הבניין של המפעל.
16. אזור אחר - אזור שאינו אזור רגיש.
17. אזור מגורים - אזור מבונה המשמש למגורים על פי תוכנית בנין עיר בתוקף והמאוכלס בפועל וכדין, ושכונה חדשה הנמצאת בתהליך איכלוס - לאחר שלפחות 40% מיחידות המגורים הבנויות כבר מאוכלסות.
18. אזור מעורב - אזור מבונה המשמש למגורים ולשימושי קרקע אחרים על פי תכנית בנין עיר בתוקף.
19. אזור נופש - אזור שנקבע כאזור נופש בתוכנית לפי חוק התיכנון והבנייה, התשכ"ה-1965.

## 1. ספרות

1. מ"י 1961: חוק למניעת מפגעים, התשכ"א - 1961, ס"ח 332, התשכ"א, עמ' 58.
2. מ"י 1992: תקנות למניעת מפגעים (איכות אוויר), התשנ"ב - 1992, ק"ת 5435 (16.4.92), עמ' 972.
3. גרבר מ. 1993: איכות הסביבה ופליטת תרכובות אורגניות נדיפות (VOCs) לאוויר מתהליכים תעשייתיים בישראל, כימיה - הנדסת כימיית, גליון מס' 16, דצמבר, 1993: 9-18.
4. למ"ס, 1995: שנתון סטטיסטי לישראל, 1995 מס', 46 הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, ירושלים.



EC, 1988: Council Directive of 24/11/1988 On the Limitation of Emissions of Certain Pollutants into the Air From Large Combustion Plants, 88/609/EEC, Official Journal of the European Communities, OJ No L 336, 7.12.1988,p.1.

TA Luft, 1986: First Gneral Administrative Regulations Pertaning to the Federal Emission Control Law (Technical Instructions on Air Quality Control - TA Luft), as of 27 February 1986 (GMBT, P. 95, 202) Umweltbundesamt, Bonn.

USEPA: Standards of Performance for New Stationary Sources, 40CFR60, Appendix A-Test Methods.

2

## מדידת חומרים אורגניים נדיפים באטמוספירה באמצעות חישה מרחוק על-ידי מערכת OP-FTIR.

יעקב ממון ורם חשמונאי, הנדסה אזרחית, הטכניון, חיפה.  
יאיר בניהו, מערכות אלקטרו אופטיות - רפא"ל, חיפה.

### תקציר

מערכת ה- OP-FTIR (Open Path - Fourier Transform Infra Red Spectroscopy) הינה טכנולוגיה של חישה אופטית מרחוק בתחום התת-אדום. טכנולוגיה זו נמצאת בתקופה האחרונה בשלבים מתקדמים של פיתוח, לקראת מתן תשובה למדידת מזהמי אוויר מסוכנים ורכובות אורגניות נדיפות באוויר - VOC's (volatile organic compounds) כפי שנדרש לאחרונה מן התיקון לחוק בארצות הברית, חוק ה- CAA (Clean Air Act). לרוב הגזים מבין 189 הגזים המזהמים המופיעים בתיקון לחוק, חותמות בליעה בתחום התת-אדום של הספקטרום המתקבל במערכת ה- OP-FTIR. לכן ניתן לזהות ולכמת קווי בליעה אלה לריכוז טווחי מצטבר, עד לטווח של כ- 600 מטרים, בעזרת ספריה של ספקטרומי ייחוס שנדגמו בריכוזים ידועים במעבדה.

לאחרונה פותחו ונבחנו מספר שיטות להערכת קצבי הפליטה של תרכובות אורגניות נדיפות ממקורות שטח לא מוקדדים (Fugitive Sources), הפליטות במפעלים כימיים, אתרי פסולת, מתקנים לטיהור מי-שופכין וכדומה, באמצעות שימוש במערכת ה- OP-FTIR. בשיטות אלה נעשה גם שימוש במדידות מטאורולוגיות ומודלים לפיזור מזהמי אוויר לקבלת קצב הפליטה. עבודות אלה אינן מתיחסות לבעית האי-הומוגניות של מקור השטח, ולקביעת קצבי הפליטה של גז המטרה הנפלט מחלקים שונים של מקור השטח הלא מוקדי. שיטת "מדידות במורד הרוח" מתבססת על מדידה בקונפיגורציה של מערכת ה- OP-FTIR, בה טווח המדידה הראשי, הממוקם במורד הרוח ממקור השטח הלא-מוקדי הפולט ובניצב לכיוונה. טווח זה מחולק למספר טווחים מישניים על-ידי מספר מקורות קרינה הממוקמים לאורך טווח המדידה הראשי. טכניקות של אינוורסיה מתמטית, המסתייעות במודלים לפיזור מזהמים, הוצעו כדי לשחזר את קצבי הפליטה מחלקים שונים של מקור השטח הפולט.

שיטה זו נבחנה בטכניון במחקר משותף עם רפא"ל ויושמה גם בניסוי סימולציה בשדה. מקור השטח הלא-מוקדי הפולט הודמה על-ידי שלושה מוקדי פליטה מבוקרים של גז  $SF_6$  שמוקמו במעלה הרוח מן המקור המדומה. נערכו מדידות של ריכוזים טווחיים מצטברים, בשלושה טווחים מישניים, במורד הרוח באמצעות מערכת ה- OP-FTIR. קצבי הפליטה מן המוקדים המבוקרים שוחזרו. קצבי הפליטה המשוחזרים התאימו יפה, עד 30% סטיה במוקד הפליטה החזק, ברוב ההרצות שבוצעו בניסוי הסימולציה.

בשיטת "מדידות באתר" נמדדים טווחי מדידה רבים באמצעות מערכת ה- OP-FTIR, בניצב לכיוון הרוח במקומות שונים מעל מקור השטח הלא מוקדי. משיקולי שמירת מסת המזהמים בפלומה הנפלטת מן האתר, ובעזרת מודל פיזור מזהמים, נקבע גובה הפיזור האפקטיבי עבור מקומות שונים באתר ותנאים מטאורולוגיים

שונים. בעזרת גובה פיזור אפקטיבי זה, מדידת מהירות הרוח והמדידה של הריכוז באמצעות מערכת ה- OP-FTIR, ניתן לקבל את קצב הפליטה הממוצע ליחידת שטח של גז המטרה הנפלט מתלק המקור הנמצא במעלה הרוח מטווח המדידה. שיטה זו יושמה בהצלחה להערכת קצבי הפליטה של גז המתאן מחלקים שונים של האתר לסילוק פסולת בחיריה. בפועל שיטה זו יכולה לשמש הן למדידות הרגילות של VOC's באויר, והן להערכת קצבי הפליטות של מקורות שטחיים לא מוקדדים.

המחקר במערכות חישה מרחוק למדידה של חומרים אורגניים נדיפים באטמוספירה הואץ בשנים האחרונות מתוך מגמה לענות על הדרישות שהוצבו על-ידי הרשויות האמריקאיות והאירופיות. כיום, בנוסף למערכת ה-OP-FTIR (ספקטרומטר התמרת פורייה בתת-אדום), קימות עוד שתי מערכות עיקריות של חישה אופטית מרחוק כמערכות אפשריות למדידת ריכוזי מזהמים אטמוספיריים: מערכת המבוססת על עיקרון לייזר-ראדאר הקרויה DIAL (Differential Absorption Lidar), ומערכת ספקטרומטרית שכינויה DOAS Spectroscopy (Differential Optical Absorption Spectroscopy). המשותף ליישום של מערכות חישה אופטית מרחוק לאטמוספירה, היא העובדה שאין צורך בדגימה נקודתית של האויר המכיל את הגז הנמדד, לקבלת ריכוזו באותה נקודה באויר.

יתרונות מערכות החישה האופטית מרחוק מפורטות להלן:

1. כיסוי מרחבי של ריכוזי המזהמים. מדידה נקודתית לעיתים אינה מיצגת את המרחב המקיף אותה ואינה תמיד מלמדת על מקור הזיהום.
2. אין צורך בדגימה מיצגת של האויר מכיון שהריכוז הנמדד הינו אינטגרל הריכוזים לאורך טווח מדידה נתון.
3. זמן קבלת ריכוזים מהיר, תוך שניות או דקות ומתוך כך, אפשרות מדידת הניודים בזמן של ריכוזי הגזים.
4. אפשרות של מדידות באיזורים שהגישה אליהם קשה או בלתי אפשרית, כגון: פלומות של ארובות גבוהות או איזורים המזוהמים בחומרים מסוכנים כאתרי פסולת רעילה.
5. אפשרות של מדידות סימולטניות של מספר גזים.

כדאי לצין, כי מדידה באמצעות מערכות חישה אופטית מרחוק הינה מורכבת ודורשת מיומנות רבה של מפעילי המערכות. כמו-כן כרוכה המדידה במגבלות וחסרונות לא מעטים. מגבלות אלה הינן חלק מן הסיבה שה- EPA (הסוכנות האמריקאית הפדרלית להגנה על הסביבה) התקשתה לאשר שיטות של חישה אופטית מרחוק כאקווילנטיות לשיטות הקוונטציונליות, הנקודתיות. בנוסף לכך אישור האקווילנטיות בפני עצמו הינו תהליך מורכב, מכיון שקשה להשוות תוצאות נקודתיות שזמן הדגימה שלהן ארוך, למדידות אינטגרליות לאורך קו שזמן הדגימה שלהן קצר. בנוסף יש לציין את מחירי המערכות הגבוהים, אולם לעתים מדידה אחת באמצעות מערכת חישה אופטית מרחוק, מספקת מידע על מספר רב של מזהמים ושל מספר רב של מדידות נקודתיות, ולעתים גם מידע שלא ניתן להשיג באמצעים קוונטציונליים. לפיכך בתחשיב הכללי, המדידה בחישה אופטית מרחוק, אינה בהכרח יקרה יותר. מגבלות ויתרונות מערכת ה-OP-FTIR, כמו התאבכות ספקטרלית בין הגז הנמדד לאדי מים ולגזים אחרים, רגישות המדידה ודיוקה והשפעת התנאים האטמוספיריים על המדידה, יידונו בהמשך בהרחבה.

לאינטרפרומטר מייקלסון היסטוריה מכובדת של שימושים רבים וחדשים אשר פותחו לאורך יותר מ- 100 שנים. השימוש של האינטרפרומטר למדידות ריכוזים של גזים בתחום התת-אדום, התפתח במהירות מאז אמצע שנות הששים והוא המרכיב האופטי המרכזי בספקטרומטר התמרת

פורייה בתת-אדום (FTIR). עם המצאת המחשבים הקטנים ולייזר ההליום-ניאון, כאשר ההמצאה הראשונה איפשרה קבלה מיידית של הספקטרום במעבדה, ואילו השניה איפשרה מדידה מזויקת של הדרכים האופטיות, קיבלה הקהילה המדעית (Griffiths and deHaseth, 1986) את מערכת ה-FTIR ככלי מעבדתי לעריכת אנליזה כימית. בתחילת שנות השבעים ואחר-כך בתחילת שנות השמונים, הוצאה המערכת מן המעבדה ולאחר התאמתה מבחינת האביזרים האופטיים (Hanst, 1970; Herget and Brasher, 1980), החלו בנסיונות במדידות שדה של ריכוזי מזהמים באטמוספירה לאורך תווך מדידה נתון. בנסיונות אלה, נעשה מאמץ ליישם את המערכת למדידות כמותיות של ריכוזי גזים באטמוספירה בטווחים ארוכים ובאטמוספירה החופשית (Long-Path Open-Path FTIR). למרות שמאמץ זה נשא פרי, רוב חוקרי הניטור הסביבתי התעלמו ממנו. במהלך שנות השמונים היתה התקדמות איטית וקבועה של הטכנולוגיה, ובסוף שנות השמונים, החלה התחדשות חלקית של הנושא (Russwurm and McClenny, 1990; McClenny et al., 1991).

## **2. מערכות חישה מרחוק עיקריות למדידת ריכוזי גזים מזהמים**

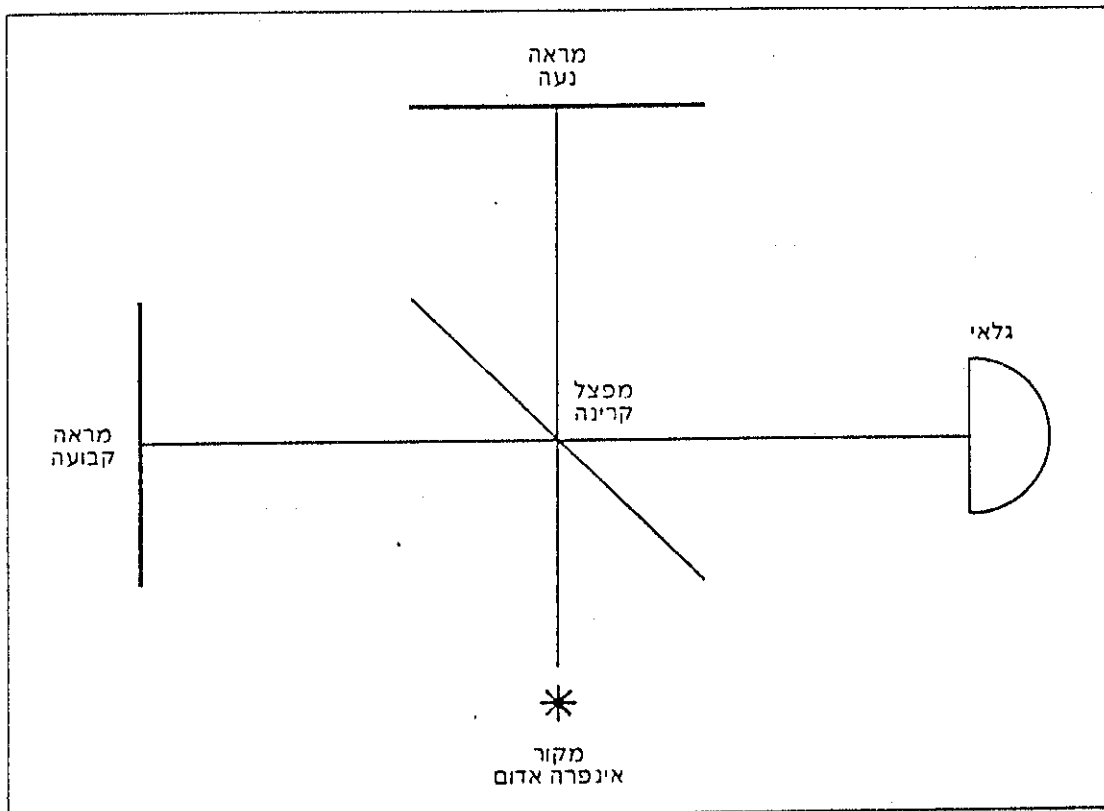
### **2.1 כללי**

לרוב המזהמים המופיעים ב-CAAA, חותמות בליעה בשני תחומים ספקטראליים בתת-אדום הקרוב, 4.2 - 3.3 ו- 13.3 - 8 מיקרומטרים, תחומים בהם הבליעה על-ידי אדי מים ו- $\text{CO}_2$  הינה מינימלית באופן יחסי. נתון זה מעמיד את מערכת ה-OP-FTIR, שהינה בעלת רגישות מכסימלית בתחומים האלה, בחזית המחקר של הניטור בחישה מרחוק (Grant et al., 1992), ביתד עם מערכות ה-DIAL וה-DOAS המודדות גם בתחומים אחרים של אורכי-גל. השוואה כללית בין שלוש מערכות החישה אופטית מרחוק, ניתנת בטבלה 1.

### **2.2 מערכת ה-FTIR**

המרכיב האופטי העיקרי במכשיר ה-FTIR הינו אינטרפרומטר מייקלסון אשר הוצג לראשונה בשנת 1881 (Russwurm and Childers, 1995). אינטרפרומטר מייקלסון הוא המפורסם ביותר מבין קבוצה של אינטרפרומטרים המפיקים התאבכות על-ידי חלוקת האמפליטודה של הקרינה הנכנסת. ארבע שנים מאוחר יותר הוכח כי מהתמרת פורייה של האינטרפרוגרמה מקבלים את הספקטרום, קרי עוצמת הקרינה האלקטרומגנטית כפונקציה של אורך הגל. יישומים רבים נמצאו לאינטרפרומטר מייקלסון בתחומים של: קביעת אורכים תקינים, מדידות אסטרונומיות, ובמדידות שהוכיחו את תורת היחסות. לאחרונה משמש, אינטרפרומטר מייקלסון למדידות של ריכוזי כימיקלים שונים הבולעים קרינה האלקטרומגנטית בתחום התת-אדום. בימים אלה נמצא האינטרפרומטר בשלבי פיתוח למדידות של ריכוזי מזהמי אויר בטווחים ארוכים ובאטמוספירה הפתוחה.

בתרשים 1 מתוארת באופן סכימטי הצורה הפשוטה ביותר של אינטרפרומטר מייקלסון. בתרשים מתואר מחלק קרינה ושתי מראות שאחת מהן קבועה והשנייה ניתנת לתזוזה במהירות קבועה לאורך הציר האופטי של האינטרפרומטר. שתי המראות חייבות להיות ניצבות אחת לשנייה.



**תרשים 1 -** תיאור סכימטי של אינטרפרומטר מייקלסון. הפרש הדרכים האופטיות בין שתי משרעות הקרינה מתפצלת בכניסה, נוצר על-ידי מראה אחת קבועה ומראה שנייה נעה במהירות קבועה, וכך מתרחשת ההתאבכות בין שתי המשרעות המתאחדות ביציאה.

הגלאי של מערכת ה- FTIR מודד את עוצמת הקרינה כפונקציה של הפרש הדרכים בין המראה הנעה והמראה הקבועה בתוך האינטרפרומטר. פלט זה נקרא האינטרפרוגרמה ועליה יש לבצע התמרת פורייה (Klein, 1986) על-מנת לקבל את הספקטרום הגולמי. תהליך זה מבוצע באופן נומרי על-ידי תוכנות המחשב המפעילות את מערכת ה- FTIR. הפתרון הנומרי של אינטגרל פורייה הגורם לקיטוע של האינטרפרוגרמה בגבול סופי, מחייב הכפלת האינטרפרוגרמה בפונקציה תיקון על-מנת להימנע מעיוותים בספקטרום המתקבל מחישוב זה. מקובלות כמה פונקציות

תיקון, ולאחרונה נמצא כי לבחירת הפונקציה ישנה חשיבות רבה (Richardson et al., 1995; Russwurm, 1996) לגבי ליניאריות התגובה של המערכת לתחום הריכוזים הנמדד. כמו-כן הוצע לוותר בכלל על התמרת פורייה ולבצע את ניתוח הנתונים ישירות מן האינטרפרוגרמה. למרות שגישה הזו הניבה תוצאות מרשימות, היא לא מקבלת את ההתייחסות הראויה, אולי עקב המהפיכה שתעורר בכל שוק התוכנות הנילוות למערכת ה-FTIR. תרשים 2 הינו תרשים זרימה של השלבים השונים עד לקבלת הריכוזים. הספקטרום הגולמי  $I(\nu)$ , שהוא עוצמת הקרינה כפונקציה של מספר הגל (wavenumber), מתקבל לאחר ביצוע התמרת פורייה, וזאת בכל קונפיגורציות המדידה שתוארו לעיל. ניתוח הנתונים לריכוזים נעשה בעזרת ספקטרום הבליעות (absorbance), המתאר את שיעור הבליעה כפונקציה של מספר הגל. הבליעות מתקבלת מחוק בר למברט הקובע כי קרינה אלקטרומגנטית העוברת בתווך בולע מרחק  $L$ , דועכת אקספוננציאלית עם ריכוז/צפיפות התווך הבולע  $C$  ותכונות הבליעה של התווך הבולע:

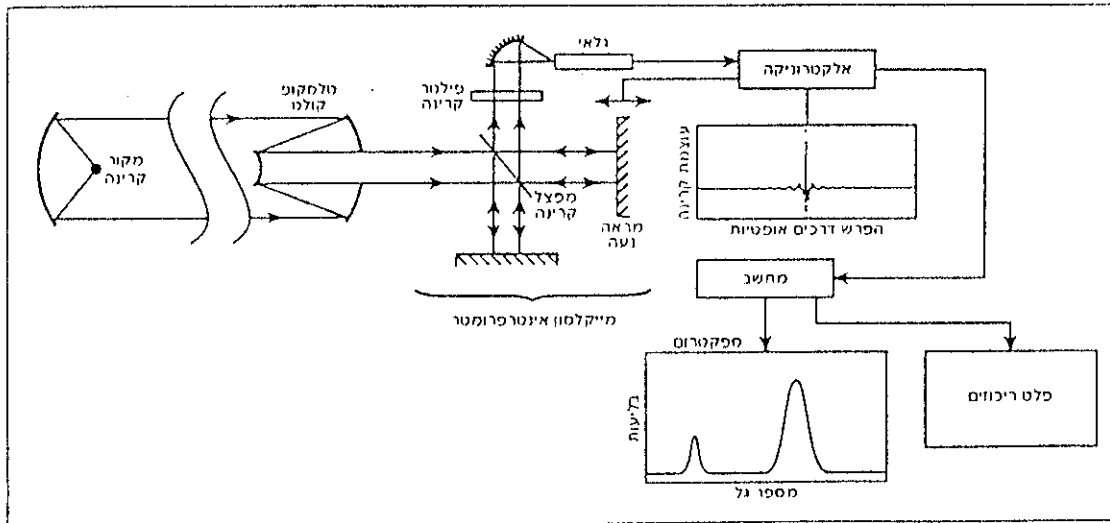
$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-\alpha(\nu)CL} \quad (1)$$

כאשר  $I_0(\nu)$  עוצמת הקרינה בתחילת המעבר בתווך,  $I(\nu)$  עוצמת הקרינה לאחר המעבר בתווך הבולע,  $\alpha(\nu)$  מקדם הבליעה של הגז במספר הגל הנתון  $\nu$ . הבליעות  $A$  מוגדרת כערך המוחלט בארגומנט של האקספוננט ולכן נרשמת:

$$A(\nu) = \alpha CL = -\ln\left(\frac{I(\nu)}{I_0(\nu)}\right) \quad (2)$$

ממשוואה 2 מתקבל כי על-מנת לקבוע את ספקטרום הבליעות יש למדוד או לחשב בדרך כלשהי את הספקטרום  $I_0(\nu)$ , שהינו עוצמת הקרינה של המקור ללא נוכחות של גזי המטרה בטווח המדידה. דגימת או קביעת הספקטרום ההתחלתי  $I_0$  מבוצעת בשלוש שיטות אפשריות, כשכל אחת מהן יתרונות וחסרונות. השיטה שהיתה מועדפת על-ידי הסוכנות האמריקאית, ה-EPA, (Russwurm and Childers, 1993) היא מדידת המזהמים האורגניים כאשר מקור הקרינה נמצא בקרבת המערכת, ואינטגרל הריכוזים על פני המרחק הקצר יהיה קטן בארבעה סדרי גודל מתחת לריכוז שימדד במרחק האמיתי של המדידה. הבעיה היחידה שהוצגה בעבר עם שיטה זו היא שלא ניתן להצמיד את המקור למערכת מכיון שנוצרת רוויה בגלאים של המערכת ודרוש למצוא את המרחק האופטימלי, העונה על דרישת ערכי הריכוזים. לאחר מכן (Russwurm and Childers, 1995) צוינה העובדה כי מדידות בטווחים שונים משנה במעט את כושר ההפרדה הספקטרלי וזאת כתוצאה מזוויות כניסה שונות של הקרינה עם הגעתה אל טלסקופ המערכת. שינויים קלים אלה גורמים לשינויים משמעותיים בעת התמרת הבליעות לריכוזים ולכן אינה מומלצת כיום על ידי ה-EPA.





**תרשים 2 - תרשים זרימה של קונפיגורציה המדידה הביסטטית הקוונציונלית, ושל תהליך קבלת הריכוזים לאורך טווח המדידה באמצעות מערכת ה- OP-FTIR.**

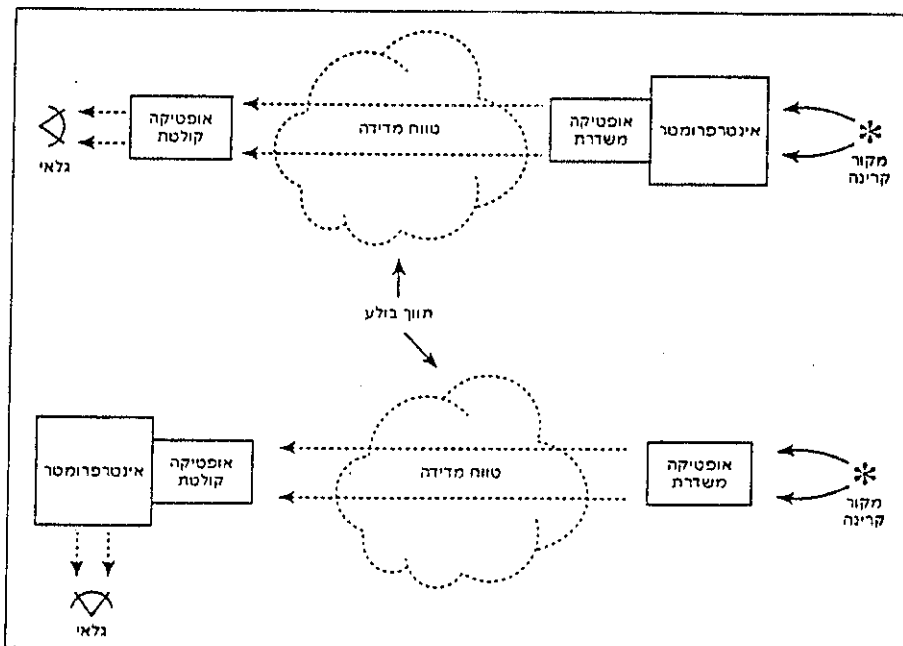
השיטות הנוספות הינן: מדידה במעלה הרוח, באיזור בו הריכוזים יהיו נמוכים ולמקור הזיהום לא יהיה השפעה על הריכוזים הנמדדים, ובנית ספקטרום סינטטי מתמטי ע"י בחירת נקודות לאורך ספקטרום גולמי, בהן הבליעה מינימלית ועריכת אינטרפולציה ביניהן. שיטה המבוססת על חילוץ ספקטרום הייחוס באופן סינטטי הוצעה על ידי קבוצתו של Kricks (1992). רעיון מקורי הנקרא שיטת ההזזה שהוצג לאחרונה (Giese-Bogdan, 1995), מציע קבלת ספקטרום הייחוס על-ידי הזזת כל ספקטרום נדגם והחסרת המוזן מן המקורי, ושיטה זו נבחנה עד עתה רק עם נתונים מלאכותיים. אם שיטה זו תתברר כיעילה עבור נתוני מדידה אמיתיים, זה עשוי לחסוך במיקרים מסוימים את הדיגום של ספקטרום הייחוס. שיטה זו אשר אינה כוללת בתוכה דיגום של ספקטרום הייחוס תוכל להתבצע באופן אוטומטי.

תהליך ניתוח הנתונים מתבסס על ההנחה כי הבליעות, שהינה פונקציה של הריכוז המצטבר הטווחי, הינה ליניארית עם הריכוז המצטבר הטווחי עד ערכים של 0.1-0.2 יחידות בליעות (Russwurm and Childers, 1995). השוואת ספקטרום הבליעות הנדגם עם ספקטרום בליעות שנדגם במעבדה בריכוז מצטבר טווחי ידוע, מספק את הריכוז המצטבר הטווחי. נדרשת זהירות בניתוח הספקטרום מעבר לערך הסף של הבליעות לעיל. במיקרים של חפיפה של כמה גזים ניתן באמצעות אנליזה מתמטית הנקראת, מיתאם הריבועים המינימלי (Least Square Fit) לקבל

ריכוזי הגזים שנמדדו בקווי בליעה שונים בספקטרום (Haaland and Esterling, 1982). אנליזה זו עברה שינויים ושיפורים במהלך שנות השמונים. במהלך השנים האלה נערכו מחקרים, לבחינת הגירסה המועדפת למטרות מדידה שונות, בעיקר למדידות בתנאי מעבדה מבוקרים. מחקרים אלה מראים את יתרון במעבדה של הגירסאות המאוחרות יותר, הריבועים המינימליים החלקיים (PLS-Partial Least Square, Haaland and Thomas, 1988) והריבועים המינימליים ההופכית (ILS-Inverse Least Square, Griffiths and DeHaseth, 1986), על-פני הגירסה הקלאסית (CLS-Classical Least Square) (Xiao et al., 1989).

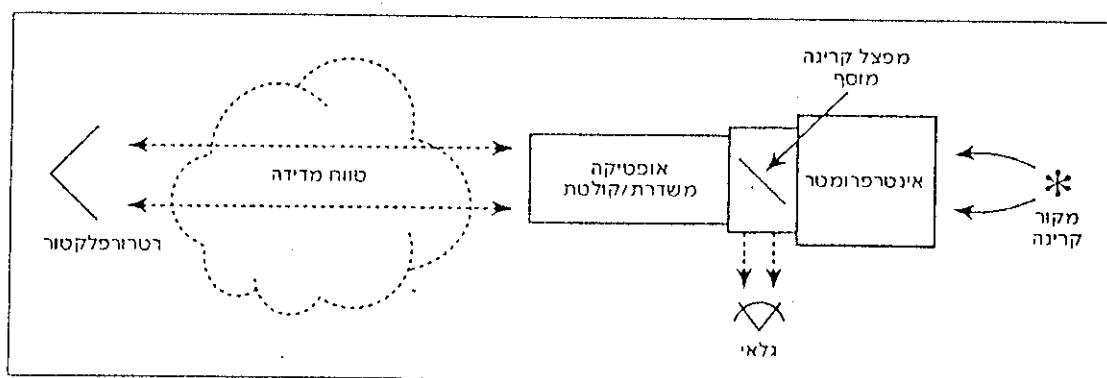
קיימות שתי קונפיגורציות עיקריות, להעברת הקרינה התת-אדומה לאורך טווח המדידה, המיושמות במדידות באמצעות מערכת ה- OP-FTIR, למדידות של ריכוזי גזים מזהמים באויר, המונוסטטית והביסטטית. קונפיגורציה נוספת המיושמת במידה מועטה הינה הקונפיגורציה הפאסיבית.

הקונפיגורציה הביסטטית - מקור קרינה תת-אדומה בעל ספקטרום רחב של אורכי-גל, והגלאי נמצאים משני קצותיו של טווח המדידה של המערכת. זו הקונפיגורציה המקובלת ביותר על חוקרים רבים העוסקים במדידות בשדה, מבחינת המערכות העומדות לרשותם. הקונפיגורציה הזו פשוטה יותר מבחינת הרכיבים האופטיים הנדרשים, אבל מוגבלת למעבר אחד לאורך טווח המדידה. משמעות הדבר כי טווח המדידה הינו גם הטווח שבין מקור הקרינה לאינטרפרומטר. עובדה זו מהווה לעיתים יתרון, בעיקר בטווחים ארוכים יותר של המדידה, בהם הבליעה של גדולה, ולעיתים חיסרון במיקרים בהם המדידה קרובה לסף רגישות המדידה של המערכת. בקצה הטווח בו ממוקמת מערכת הקליטה, חייבת להיות אופטיקה דומה, כגון טלסקופ ניוטוניאני או קסגריאני, על מנת לרכז את הקרן למימדים של האיטרפרומטר והגלאי של המערכת.



**תרשים 3 - a** התקן של קונפיגורציה מדידה בי-סטטית בה הקרינה מאופננת על-ידי האינטרפרומטר לפני המעבר בתווך הבולע; **b** התקן קונוונציונלי של קונפיגורציה מדידה בי-סטטית בה הקרינה מגיעה לאינטרפרומטר לאחר מעברה בתווך הבולע.

ישן שני התקנים שונים במערכת הביסטטית (Russwurm and Childers, 1995). באחד ההתקנים, מקור הקרינה נמצא בסמוך לאינטרפרומטר בקצה אחד של הטווח ואילו הגלאי בקצה השני של הטווח (ראה תרשים 3). בהתקן השני, מקור הקרינה נמצא בקצה אחד ואילו האינטרפרומטר והגלאי נמצאים יחדיו בקצהו השני של התווך הבולע, כמתואר בתרשים. בהתקן זה דרוש פתרון להפחתת סיגנל הרקע לפני יישום תהליך ניתוח הנתונים.

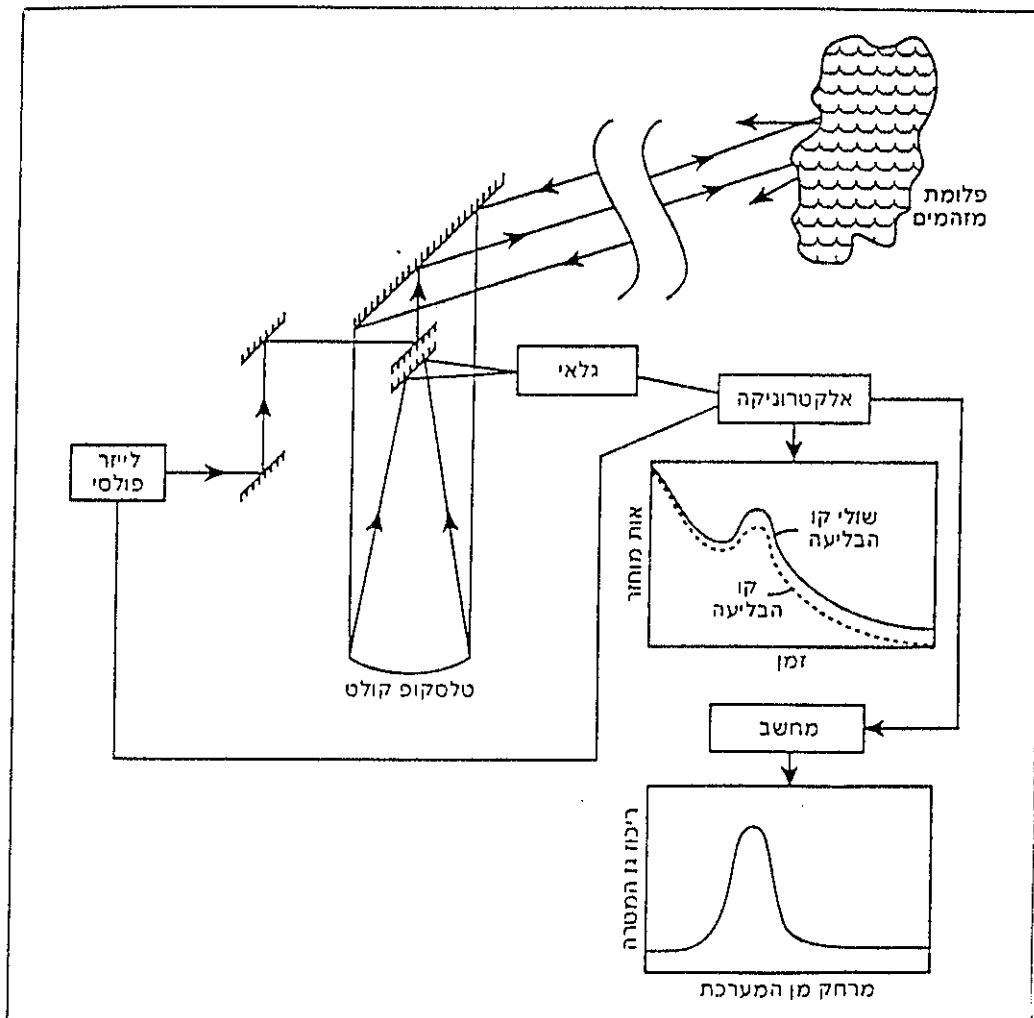


**תרשים 4 -** התקן של קונפיגורציה מדידה מונו-סטטית בה הקרינה מאופנת על-ידי האינטרפרומטר לפני המעבר בתווך הבולע, ומוחזרת אל הגלאי על-ידי רטורופלקטור המוצב בקצה האחר של התווך הבולע.

הקונפיגורציה המונוסטטית - במערכת המונוסטטית (ראה תרשים 4) נמצאים מקור הקרינה והגלאי באותו קצה של הטווח ורטורופלקטור (מחזיר קרינה לאחור) בקצה השני. הקרינה מוחזרת על-ידי הרטורופלקטור, המוצב מול המערכת, לאורך אותו טווח ולפיכך מכפילה את אורך התווך הבולע וגם את הבליעה הנמדדת של כל גז. מקור הקרינה צמוד למערכת ויוצא מתוך הטלסקופ של המערכת. יתרון הקונפיגורציה הוא ביכולת של כיסוי שטח, עיני הצבת מספר רב של רפלקטורים בגבולות השטח המכוסה ומעבר מהיר של המערכת בין הרפלקטורים. לקבלת קונפיגורציה זו, יש לתכנן אופטית (Grant et al., 1992), את המערכת כך שמקור הקרינה ומערכת הקליטה ישתמשו באותו טלסקופ, דבר מסובך שאינו קיים בכל המערכות.

### 2.3 מערכת ה-DIAL

מערכת ה-DIAL הינה שיטה המיועדת למדידת ריכוזי מזהמים גזיים, באמצעות מערכת לידר (Lidar = Laser-Radar), שהומצאה באמצע שנות הששים. השיטה מבוססת על מדידת שיעור הבליעה, של קרינת פולס הלייזר המונכרומטי המוחזרת, על-ידי גז המטרה והינו בעל קו בליעה באותו אורך גל. דבר זה נעשה ע"י השוואת שני הפולסים המוחזרים, כאשר אורך הגל של האחד מתאים לקו הבליעה של הגז הנמדד ואילו אורך הגל של השני, נמצא בשולי קו הבליעה. קיימות מערכות המודדות בתחום התת-אדום בעזרת לייזר פחמן דו-חמצני בעיקר, ומערכות המודדות בתחום העל-סגול והנראה בעזרת לייזר ניאודמיום-יאג (Nd-Yag). יתרונה הגדול של מערכת זו הוא ביכולת הייחודית שלה למדוד את ריכוז הגז כפונקציה של המרחק בכל נקודה במרחב הנמדד (תרשים 5).

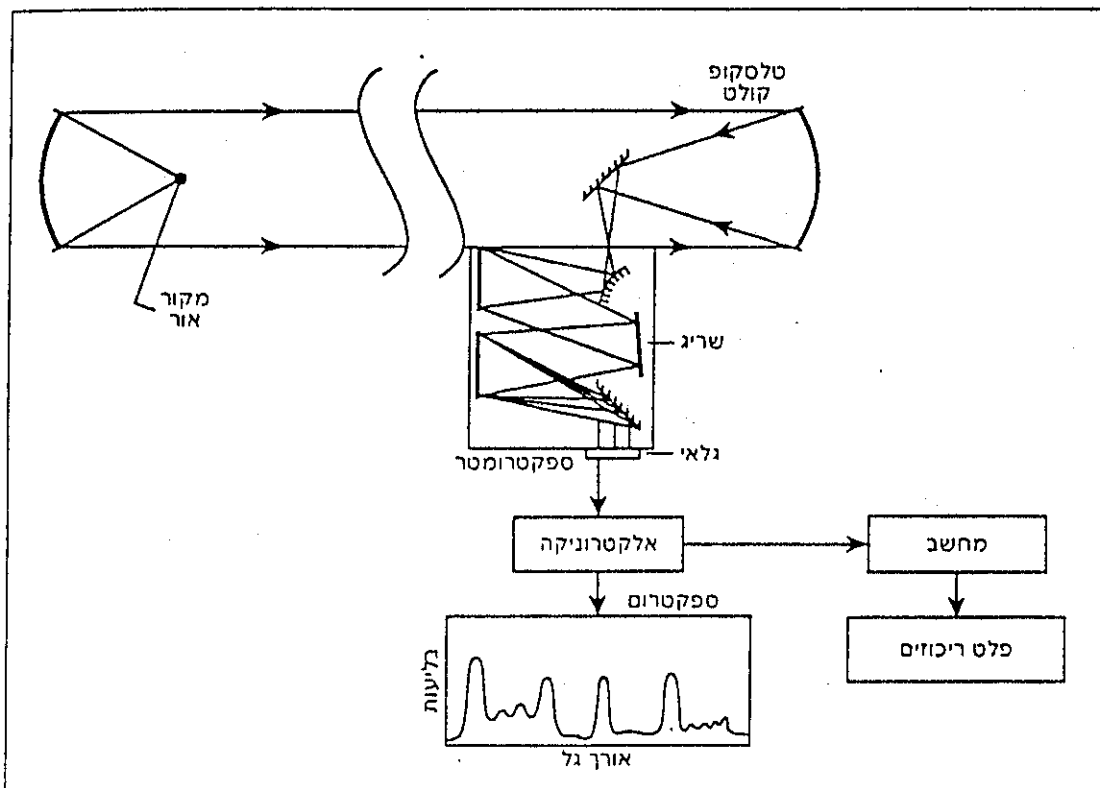


תרשים 5 - תרשים זרימה של קונפיגורציה המדידה ושל תהליך קבלת שדה הריכוזים במרחב באמצעות מערכת ה-DIAL.

הצלחתה הגדולה של המערכת היתה בתחומים העל-סגול והנראה, במדידת אוזון, גופרית דו-חמצנית, כלור, תחמוצות חנקן, ואדי כספית (Grant and Menzies, 1983). תסרוטותיה קשורים במחירה הרב, מורכבותה, רגישות גבוהה לתנאים אטמוספיריים כאשר המדידה נערכת בתחום הנראה, החזרה חלשה מתלקיקים בתחום התת-אדום, אי יכולת מדידה של מספר רב של גזים וקשיים של שילוח סימולטני לאטמוספירה של פולסי הלייזר בשני אורכי גל כפי שהוסבר לעיל.

#### 2.4 מערכת ה- DOAS

שיטת המדידה במערכת ה- DOAS הינה שיטה ספקטרלית, הדומה בתכונותיה ל-FTIR, אך קבלת ספקטרום אינו מבוסס על עיקרון התמרת פוריה של אינטרפרוגרמה, והינו בתחום אורכי הגל של הנראה והאולטרא סגול הקרוב. המערכת מהווה השלמה של הספקטרום ויכולה למדוד גזים אטומיים ודו-אטומיים שאין להם קווי בליעה בתחום האינפרא אדום וגזים אחרים כמו הגופרית הדו-חמצנית, תחמוצות החנקן, אוזון, בנזן, אלדהידים (Hartman and Leston, 1994), טולואן (Toluene), פנול, פורמלדהיד, אדי כספית, אמוניה ועוד (Wallin, 1994), שיש להם קווי בליעה גם באינפרא אדום, אך ברגישות גבוהה יותר (תרשים 6).



**תרשים 6 -** תרשים זרימה של קונפיגורציה המדידה ושל תהליך קבלת הריכוזים המצטברים לאורך טווח המדידה באמצעות מערכת ה- DOAS.

המערכת מורכבת מספקטרומטר סורק כלשהו, כאשר מולו בקצה האחר של תווך המדידה מוצבת מנורה בעלת ספקטרום ידוע כמקור הקרינה. למערכת ה- DOAS תסרונות כגון: השפעת התנאים האטמוספריים המשתנים בתחומים הנ"ל של אורכי גל, מחירה היקר יחסית בהשוואה למערכת ה- OP-FTIR, ואפשרות למדידה של מספר גזים קטן יחסית. לעומת זאת טווח המדידה של המערכת יכול להגיע ל-2 ק"מ, טווח הגדול יותר מפי שניים מטווח המדידה המוצהר של ה- OP-FTIR. בניגוד למערכת ה- OP-FTIR, אושרה על-ידי ה- EPA מערכת מסחרית הפועלת בשיטת ה- DOAS (מתוצרת OPSIS) כמערכת מדידה תיקנית של מזהמי אויר מסוימים, וזאת לאור הצלחת בדיקות השוואתיות רבות שנערכו בין המערכת לשיטות מדידה קונוונציונליות (Stevens et al., 1990; Hallstadius et al., 1994; Allegrini and Febo, 1994). גם בגרמניה אושרה מערכת ה- OPSIS באופן רשמי (Wallin, 1994) עבור מספר גזים כמו פנול, אמוניה, פורמלדהיד, ועוד. יש לזכור כי למרות יתרונה של מערכת ה- DOAS מבחינת רגישות המדידה ודיוק המדידה, המערכת אינה מסוגלת למדוד מספר רב של גזים סימולטנית כמו מערכת ה- OP-FTIR.

**טבלה 1 - השוואה בין שלוש מערכות חישה אופטית מרחוק אשר באמצעותן ניתן למדוד ריכוזי גזים מזהמים באטמוספירה, מבחינת פרמטרים שונים של המדידה ומבחינת הסטטוס המסחרי והחוקי הרלוונטי לעתה.**

שם השיטה	איזור ספקטרי [מיקרון]	כושר הפרדה ספקטרי	מספר גזים סימולטנית	סטטוס
FTIR	2-5 and 8-13.3	0.5-2 cm <sup>-1</sup>	many	commercially available standard method TO-16 in review
DOAS	0.24-0.68	1 nm	several	commercially available EPA approved systems
DIAL	0.2-11	not applicable	one or few	mostly research commercially available in Germany

### 3 חזית המחקר בפיתוח המדידות באמצעות מערכת OP-FTIR

#### 3.1 פיתוח קונפיגורציות גיאומטריות של מדידה במערכת FTIR בטווח פתוח

הקונפיגורציה הפאסיבית - משתמשת בשמש כמקור האור למדידת ריכוז מצטבר של גזים לאורך התווך שבין המערכת לשמש או למדידת מוקדי פליטה נקודתיים, או מתבססת על פליטת קרינה של הגזים הנמדדים בטמפרטורות שונות על פני רקע קר יותר. מדידות באמצעות השמש יכולות להעריך את השינויים בריכוזי גזי אפקט החממה (Vazquez, 1994) לאורך כל החתך האטמוספירי. במדידות של מקורות פליטה, השמש אינה זמינה תמיד בכיוון הנכון ואילו בשיטה השנייה יש לקבוע את הטמפרטורה של הגז הנמדד. קונפיגורציה זו, שהוצעה בתחילת שנות השמונים (Herget and Brasher, 1982), אינה מקובלת כיום מכיון שלא ניתן ליחס את הספקטרום הנמדד לספרית ספקטרומים של יחוס, והתוצאות המתקבלות הינן יותר איכותיות. זאת למרות זמינות ומהירות המדידה ויכולתה לקבוע ישירות את ריכוזי הגזים בסמוך למקורות מוקדיים (Demirgian et al., 1992; Chaffin et al., 1994).

#### 3.2 פיתוח רגישות המדידה באמצעות המערכת

בטבלה שלהלן, מידע על תחומים ספקטראליים של מדידה ועל רגישות המדידה של גזים רעילים, בתחום 8-13.3 מיקרומטרים (Grant et al., 1992). לגזים המופיעים בטבלה, קווי בליעה נוספים בתחום הנ"ל, עם מקדמי בליעה שונים. קווי הבליעה שנבחרו להופיע בטבלה, הינם אלה, שהריכוז המינימלי הנמדד באותם קווים יהיה הקטן ביותר עבור גזים אלה. רגישות מדידה זו כפי שמופיעה בטבלה, משתנה באופן משמעותי במערכות FTIR עם הקונפיגורציה שבה ממוקמת המערכת, כך שדרוש בכל מערכת ובכל מדידה לבדוק ולחשב את הריכוז המינימלי שהמערכת מסוגלת למדוד בתנאים המסוימים של המדידה. חישובי הרגישות כפי שנתקבלו בטבלה 2, נעשו בהנחה כי בטווח המדידה הנתון ובתחום הספקטראלי המדובר רעש המערכת הינו אלפית יחידת בליעות ואילו יחס האות לרעש המינימלי הניתן לניתוח הינו עשר, כלומר הבליעות של האות הינה מאית יחידת בליעות. לאחרונה פותחה שיטה (Pescatore et al., 1992) לבדיקת רגישות המדידה העדכני של המערכת, המתבססת על מדידת רעש הבליעות בכל סדרת מדידות וחישוב דומה לזה שנעשה עבור ערכים שבטבלה 2. עבור גזים מסוימים, כפי שרואים מן הטבלה, רגישות המדידה אינה מספקת ורצוי היה להגדיל את רגישות המערכת עד לחלקים לביליון (Russwurm et al., 1994) על-מנת שתוכל להבחין בריכוזים אופייניים של VOCs באטמוספירה.

טבלה 2 - נתונים על רגישות המדידה במערכת ה- OP-FTIR ועל תחומי הבליעה הספקטראליים של מבחר גזים רעילים בתחום הספקטראלי בתת-אדום 8-13.3 מיקרון.

Gas Name שם הגז	Spectral Range [cm <sup>-1</sup> ] תחום ספקטראלי	Minimal Detection Concentration [ppb in 200m] רגישות המדידה
1,1,2-Trichloroethane	726-758	80
1,4- Dioxane	857-906	32
1-3 Butadiene	909	24
Acetonitrile	1042	320
Acrolein	962	80
Acryonitrile	954	54
Allyl chloride	756.5	580
Analine	945	260
Benzene*	1040	80
Carbon tetrachloride*	1283	2
Carbonyl sulfide	1040	280
Chlorform*	1221	22
Chlorobenzene	1092	30
Chloromethane	1020	180
Chloroprene	974.6	56
Dichloromethane*	1268	48
Ethyl acrylate	1073.3	34
Ethyl chloride	975	200
Ethylene oxide	872	100
Hydrazine	941.4	66
m-Xylene*	768	22
Methanol	1033	10
Methyl bromide	981	640
Methyl chloroform	1090	168
Methyl ethyl ketone*	1170	40
Methyl isobutyl ketone*	1170	140
Methyl tert butyl ether	1096.9	44
Methylhydrazine	888.3	48
o-Xylene*	724-763	74
p-Xylene*	795	80
Phosgene	857	12
Phosphine	992	260
Propylene oxide	839	120
Styrene	910	60
Tetrachloroethylene*	782	140
Tetracycloethylene	897-931	16
Toluene*	729	94
Trichloroethylene	945	34
Vinyl acetate	1226	10
Vinyl bromide	942.4	120
Vinyle chloride	942	40
Vinylidene chloride	1086	19



הוכח כי חוק בר למברט, שומר על ליניאריות (Hanst and Hanst, 1992) בתחום ריכוזים מסוים וכי הסטיה גדלה עם הריכוזים, כך שקימת מגבלה של רגישות המערכת לגבי מדידה של ריכוזים גבוהים מידי. מגבלה זו מגדירה את הריכוז המכסימלי הנמדד, והמדידות חייבות להתבצע בתחום הריכוזים הנמצאים ביחס ישר לבליעות, עבור כל גו נמדד (Clark, 1993; Griffiths et al., 1994; Richardson et al., 1995).

### 3.3 כיוול המערכת לקראת אישורה על-ידי ה - EPA

עם חקיקת התיקון לחוק האויר הנקי ב-1990, מושקע מאמץ רב בכיוולן של המערכות (Russwurm and Childers, 1993) לקראת הוכחת האקוויוולנטיות של התוצאות הנמדדות במערכת, לאלה של השיטות המדידה הנקודתיות המוכרות והמאושרות ע"י ה - EPA. בעבודות שעסקו (Hommrich et al., 1992, Russwurm and McClenny, 1990, Draves et al., 1992) בכיוול מערכות ה-FTIR, הוצבו מספר קטן של דוגמים נקודתיים לאורך טווח המדידה של המערכת, והשוו ממוצעי הריכוזים של הדוגמים, שמתקבלים מאנליזה בגז-כרומוטוגרף, עם ממוצעי הריכוזים הממוצעים לאורך טווח המדידה ב-FTIR. התקבלו סטיות של עשרות אחוזים בודדים בין שתי שיטות המדידה. גם לשיטות המדידה המאושרות (שיטת TO-14 Canisters) בעיות וחסרונות רבים, כך שהופעת סטיות (McClenny et al., 1991) בבדיקות ההשוואה בין מערכת FTIR לשיטות קונונציונליות המאושרות על-ידי ה - EPA, יכולות לבוע מהסטיות בשתי השיטות גם יחד. עובדה זו לעיתים יכולה לגרום לסטיות גדולות מאוד ולפיזור גדול של התוצאות. בעיות נוספות בהשוואה בין השיטות קשורות באופן השונה. השיטות המאושרות מתבססות על דגימה נקודתית של האויר בפרק זמן ארוך, לעומתן מערכות החישה האופטית מרחוק כמו ה - OP-FTIR מתבססות על דגימה מהירה, מסדר גודל של שניה, ומדידת אינטגרל הריכוזים לאורך טווח המדידה. על-מנת שניתן יהיה לדמות אינטגרל קווי באמצעות דוגמים נקודתיים, דרושה צפיפות גבוהה של דוגמים לאורך קו המדידה של המערכת (Thomas et al., 1992). את בעית הזמן ניתן לפתור על-ידי מיצוע מספר רב של סריקות מערכת ה - OP-FTIR אשר נלקחו במשך דגימת הדוגמים הנקודתיים.

עקב הבעיות של ההשוואה בין השיטות השונות בתכלית, טוב היה לו היו נערכות בדיקות השוואתיות בין המערכות המסחריות הקיימות כיום בשוק. השוואה בין-מעבדתית (Intercomparability) נערכה בין שלוש מערכות OP-FTIR (Hudson et al., 1992). כמו-כן נערכו השוואות אקראיות בין מערכות OP-FTIR (Piccot et al., 1994), במטרה להעריך את הסטיות בין המערכות. השוואות אלה הניבו תוצאות עם סטיות של עשרות אחוזים בודדים, בדומה לבדיקות השוואתיות בין מעבדות שנתנו עבור שיטות המאושרות כיום על-ידי ה - EPA, כמו דגימה באמצעות קניסטרים ואנליזה על-ידי גז-כרומוטוגרף (Thomas

(Russwurm and et al., 1992). כמו-כן מתבצעת ברציפות על בסיס יומיומי ולאורך שנים (Childers, 1995) השוואה בין שתי המערכות המסחריות העיקריות הנסחרות בשוק לצרכי מדידת גזים בטווח פתוח (Midac ו- ETG). השוואה זו נערכת על ידי ה- EPA כחלק מפיתוח שיטה תקנית TO-16 (Standard Method TO-16, Russwurm, 1996). בבדיקות ההשוואתיות האלה אשר נעשות לא רק עבור התוצאה הסופית, שהיא הריכוז המצטבר לאורך הטווח, אלא גם עבור כל השלבים של ניתוח הנתונים, מתקבל כי הסטיות בין המערכות נובעות בעיקר מתהליך ניתוח הנתונים הגולמי ולא מן ההבדלים בחומרה שבין שתי המערכות שנבדקו. הבדלים בין התוכנות השונות, וקשיים ביישום התוכנות על-ידי מפעילים לא מיומנים, עלולים לגרום להבדלים משמעותיים בין המערכות. אין ספק כי לתוצאות השוואות הבין-מעבדתיות חשיבות רבה מבחינת אמינות הפלט של המערכת, וכי בדיקות כאלה חייבות להימשך ובמשנה מרץ, על-מנת לקבוע את יציבותן של מערכות ה- OP-FTIR לקראת אישור השיטה על-ידי ה- EPA והפיכתה לשיטה מומלצת. חובה לציין, כי עדיין לא הוכחה אקוויוולנטיות המדידות באמצעות המערכת לשיטות המאושרות, ומבחינת ה- EPA יש לצפות כי גם עבודות רבות נוספות, לא תבאנה שינוי בסטטוס הקיים. נראה כי הרשויות האמריקאיות יסתפקו בשלב זה באישור שיטה תקנית כללית (Russwurm, 1996) עבור תפעולן של מערכות כאלה, ולא תתייחס בצורה ישירה אל מערכת זו או אחרת או לגזים מסוימים שאפשר למדוד בצורה תקנית. דרושה אחידות בתפעול המערכות, בתוכנות הרלוונטיות (ספרית ספקטרומים של ייחוס אחידה, ותוכנות אחידות, מתמטיות להתמרות השונות ולקבלת הריכוזים) ובתהליך עיבוד הנתונים, על מנת להבטיח פרסום של שיטה תיקנית ועל מנת לעמוד בביקורת אבטחת האיכות של קבלת הנתונים מן המערכות. לקראת אישורה של השיטה התיקנית נערכו מחקרים רבים לבחינת השפעתם של פרמטרים שונים של המדידה בשדה, ושל אופן ניתוח הנתונים, על אמינות ואיכות הפלט המתקבל, קרי הריכוזים. מפעיל המערכת צריך לשקול את טווח המדידה, אופן ותדירות דגימת ספקטרום הייחוס, וכישר ההפרדה הספקטרלי (Russwurm, 1992; Kricks et al, 1992; Childers et al., 1994), על-מנת שתתקבל התוצאה אותה התכוון למדוד. כמו-כן על מנתח הספקטרומים להתמצא בהשפעות שיש לחזות הספקטרום (Russwurm, 1992), אור צדדי פנימי (Russwurm et al. 1994), ואדי מים (Russwurm, 1993; Webb et al., 1994), על הריכוזים אותם ברצונו לחלץ מתוך תהליך ניתוח הנתונים.

אין ספק, כי בעתיד ימצא הצורך לתקן (לערוך סטנדרטיזציה) תוכניות כאלה, על-מנת שניתן יהיה לקבוע אלו סטיות בנתוני בקרת האיכות פוסלות את התוצאות. התקן הנ"ל יכול דרישות רבות הנוגעות בתפעולן של המערכות, כמו בחירת האתר והקונפיגורציה בה תיערך המדידה, דרישות מינימליות ומכסימליות לגבי הפרשי הזמן הדרושים בין הדגימות, מדידה במקביל של פרמטרים מטאורולוגיים, ודרישה למדוד את ספקטרום הרקע ואופן החסרתו מן הספקטרום שנמדד (Russwurm and Childers, 1995).

### 3.4 מחקרים סביבתיים באמצעות מערכת ה- OP-FTIR

עד עתה פורטו לעיל, תחומי המחקר הנמצאים בחזית המחקר של מדידות שדה באמצעות מערכת ה- OP-FTIR ומחקרים אלה קשורים ב: שיפור יכולת המדידה בקונפיגורציות שונות של המערכת, שיפור בדיוק המדידה על-ידי קביעה חכמה יותר של ספקטרומי ייחוס, השלמת הספריות של ספקטרומי סטנדרט בתנאי מעבדה בתחומי ריכוזים נוספים, השפעות שונות על איכות הנתונים, בדיקת דיוק במדידה על-ידי כיול המערכת עם שיטות קונוציונליות מאושרות, שיפור ברגישות המדידה והצבת תנאים ומגבלות לשימוש אחיד במערכת ה- OP-FTIR בתנאי שדה. השלב הבא של מחקרים, שכבר החל, עוסק בשימוש בנתוני המדידה במערכת השלמה והמכוללת, לצרכים שונים של מחקר אטמוספירי וסביבתי.

אחד הנושאים הסביבתיים הדחופים ביותר הינו יישום הטכניקה של החישה האופטית בכלל ושל מערכת ה- OP-FTIR בפרט לצרכי ניטור ומיפוי של גזים אורגניים נדיפים רעילים (VOCs), בסביבת אתרי תעשייה כימית, בסביבת אתרי פסולת תעשייתית רעילה, ובסביבה העירונית בכלל (Kagan et al., 1993). נמצא כי עבור גזים רבים, ניתן למדוד את הריכוזים של הגזים הרעילים בו-זמנית, עד לריכוזים של חלקים לביליון. למרות שהשיטה עדיין לא אושרה לא באירופה ולא בארצות הברית, ועדיין לא אוחדה שיטת המדידה, החלו להתבצע מחקרים רבים של מדידות אטמוספיריות של ריכוזים מזהמים בכלל ובאזורי תעשייה בפרט. על המערכת המסחרית הראשונה שנרכשה למדידות לאורך גדר של מפעל פטרוכימי בטקסס (Kump and Hommrich, 1992), דווח על נוכחות כעשרים חומרים אורגניים נדיפים בריכוזים של פחות מחמישים חלקים לביליון. בעבודה זו לא לקחו בחשבון את כל הידוע היום על אדי המים, ולכן הדיווח לעיל היה יומרני, במיוחד כאשר דווח על מדידות לאורך טווח של למעלה מקילומטר. דיווח מפורט יותר ממפעל פטרוכימי אחר בטקסס (Spellicy et al, 1992) מאותה תקופה, מצביע על התאמה יפה בין מדידות מערכת ה- DOAS ומערכת ה- OP-FTIR למדידות ריכוזי SO<sub>2</sub>. מדידות אלה נעשו לאורך טווח של 250 מטרים ונמדדו השינויים היומיים של אמוניה, גופרית דו-חמצנית ואתילן בתחום ריכוזים של עשרות חלקים לביליון. פרופילן נמדד באותה עבודה בריכוזים של מאות בודדות של חלקים לביליון. בגרמניה יושמה מערכת ה- OP-FTIR למספר אתרי תעשייה (Lamp et al., 1994), ונמדד ריכוז האמוניה בתחום ריכוזים של עד מספר חלקים לביליון בודדים, ונמדדו בתחום ריכוזים של מאות חלקים לביליון במורד הרוח, אתילן ופרופילן. במדינת קנטקי שבארצות הברית, כבר בוחנים את מערכת ה- OP-FTIR למדידות של חמישה-עשר סוגי גזים, בתחום ריכוזים של עשרות חלקים לביליון (Ckkraborty, 1994). בברזיל נמדדו ריכוזים גבוהים של מאות חלקים לביליון ולעיתים יותר מחלק למיליון, של מספר רב של גזים אורגניים נדיפים באזור התעשייה הפטרוכימית הגדול ביותר במדינה (Neves et al., 1994). בסביבה העירונית נחקרו השינויים היומיים של כמה גזים אופייניים, כגון אוזון, מתאן וחד תחמוצת הפחמן,

(Russwurm et al., 1994; Weber et al., 1994). שימוש מענין אחר של המערכת הינו בחינת יעילות הבעירה בתחנות כוח המופעלות על-ידי פחם, ובאתרים תעשייתיים בהם מתבצעת שריפה של דלק. בחינת יעילות הבעירה נערכה על-ידי מדידת ריכוזי הפחמן הדו-חמצני והפחמן החד חמצני (Lindner et al., 1994) וקביעת היחס ביניהם. בקרת יעילות הבעירה לפי שיטה זו, עשויה לחסוך בזבז של דלקים להביא לצמצם פליטת המזהמים. באופן דומה יושם הדבר גם לגבי פליטות של רכבים (Gibbs et al., 1994) לבחינת תרומתם לזיהום האויר בסביבה העירונית. בנושא המיפוי של הגזים במרחב העירוני או באתרים תעשייתיים על-ידי מערכות חישה אופטית מרחוק ללא כושר הפרדה מרחבית כמו מערכת ה- OP-FTIR, הוצעה לאחרונה שיטת אינוורסיה מתמטית איטרטיבית, לשיחזור שדה הריכוזים באתר איחסון, ממדידות של ריכוזים מצטברים לאורך טווחי מדידה רבים, שסורקים את האתר (Wilkinson et al., 1995). בניסוי תקפות של השיטה המוצעת שוחרר באופן מבוקר גז  $SF_6$ , משני מוקדים, והשיחזור של מיקום המקורות וקצב הפליטה נראה משכנע, אך לא ברור כיצד התנאים המטאורולוגיים נלקחים בחשבון בחישוב קצבי הפליטה מתוך הריכוזים.

באופן דומה, שיטות דומות המיישמות טכניקות של טומוגרפיה ממוחשבת (Bennet et al., 1984) והמשחזרות את שדה הריכוזים במקומות עבודה סגורים, נמצאות כיום במחקר מואץ. קבוצת מחקר אחת ערכה סדרת ניסויי היתכנות בתאים גדולים עם תנאים מבוקרים של איורור, בגודל של חדר גדול. (Drescher et al., 1994; Yost et al., 1994; Park et al., 1994) החוקרים הללו הציבו את הדרישות והתנאים למעבר לקנה-מידה גדול יותר של עד 100 מטרים, (Fischer et al., 1994) אך עדיין בתנאי איורור מבוקרים. קבוצה זו מפתחת כלים ליישום הטכנולוגיה למיפוי מקורות זיהום אויר כמו באתרים לאיחסון דלקים (Yost, 1996). אותה קבוצה העוסקת בעקר בהגינה תעשייתית ובבריאות הצבור במקומות עבודה סגורים (indoor air pollution), פיתחה מערכת למעקב והתראה אחר חריגות מתנאי העבודה מקובלים על-ידי מדידת ריכוזים של גזים אורגניים נדיפים, בסביבת תהליך הייצור בתעשייה הכימית

(Malachowski et al., 1994; Xiao and Levine, 1993; Todd and Ramachandram, 1994;

Arindam and Todd, 1994; Bhattacharyya and Todd, 1994).

עד היום קשה היה באמצעי המדידה הקונוונציונליים לבחון את תקפותם של מודלים לפיזור מזהמי אויר. מדידות באמצעי חישה אופטית מרחוק לחקר פלומות מזהמים בעיקר ממקורות נקודתיים נערכו בעשרים השנה האחרונות (Moore et al., 1988), אך לא נבחנו מקורות שטח או מקורות פליטה לא מוקדיים. יתרון של מערכות הלידר בבחינת מודלים הוא ביכולתן לקבל את שדה הריכוזים במרחב, לעומת מערכות שמודדות ריכוזים טווחיים מצטברים (Ivancic et al., 1994), כמו ה- OP-FTIR. למרות זאת נעשה ניסיון לבחון את מודל פיזור המזהמים הגאוסיאני באמצעות מערכת ה- OP-FTIR על-ידי מדידת הריכוזים הממוצעים של חתכים החוצים את פלומת הפיזור. אי יכולתה של המערכת להפריד בין הריכוזים במרחב אינו מאפשר את בחינת המודל לפרטיו, ופיתוח טכניקת הטומוגרפיה הממוחשבת באמצעות מדידות של ריכוזים טווחיים מצטברים בתנאי שדה תאפשר בדיקה אמיתית יותר של המודלים לפיזור מזהמים. מודלים אלה

יכולים לסייע לקביעת קצבי הפליטה ממקורות לא מוקדניים באמצעות מדידות ריכוזים על-ידי מערכת ה- OP-FTIR.

#### **4. מטרת המחקר במערכת OP-FTIR בישראל**

במחקר משותף בין רפא"ל והטכניון פותחו שיטות להערכת קצב פליטת המזהמים ממקור שטחי לא הומוגני וקביעת החלוקה הפנימית של קצבי הפליטה של מקור שטחי, באמצעות קונפיגורציות חדשות של המערכת ומודל פיזור מזהמים. לשם כך הוכשרה מערכת OP-FTIR למדידה אופרטיבית וסימולטנית של אינטגרל ריכוזי מזהמים אטמוספריים, בתוך מדידה של עד כ-1 ק"מ וכל זאת, תוך כמה שניות. מערכת שכזו תאפשר ביצוע סקרים של ריכוזי מזהמי אויר גזיים ויישום השיטות שתפותחנה, להערכת קצבי הפליטה, באתרים לסילוק פסולת ביתית ותעשייתית וכדומה.

חשיבות המחקר במציאת דרכים להערכת קצבי הפליטה מחלקים שונים של מקור השטח הלא הומוגני, כמו אתר לסילוק פסולת. בעזרת הכיסוי המרחבי של המדידה, מדידה לאורך קוויים שונים, מתקבל מידע כמותי על קצבי פליטת הגזים המזהמים ממקורות הזיהום הלא מוקדניים, באופן מידי, ללא צורך בסריקה של המקור וללא מדידה במספר רב של נקודות בתוך המקור, באמצעות דוגמים נקודתיים. באופן מעשי, מדידת קצבי הפליטה של מקורות הזיהום הלא מוקדניים, אפשרית רק באמצעות מערכות חישה מרחוק כמו ה- OP-FTIR.

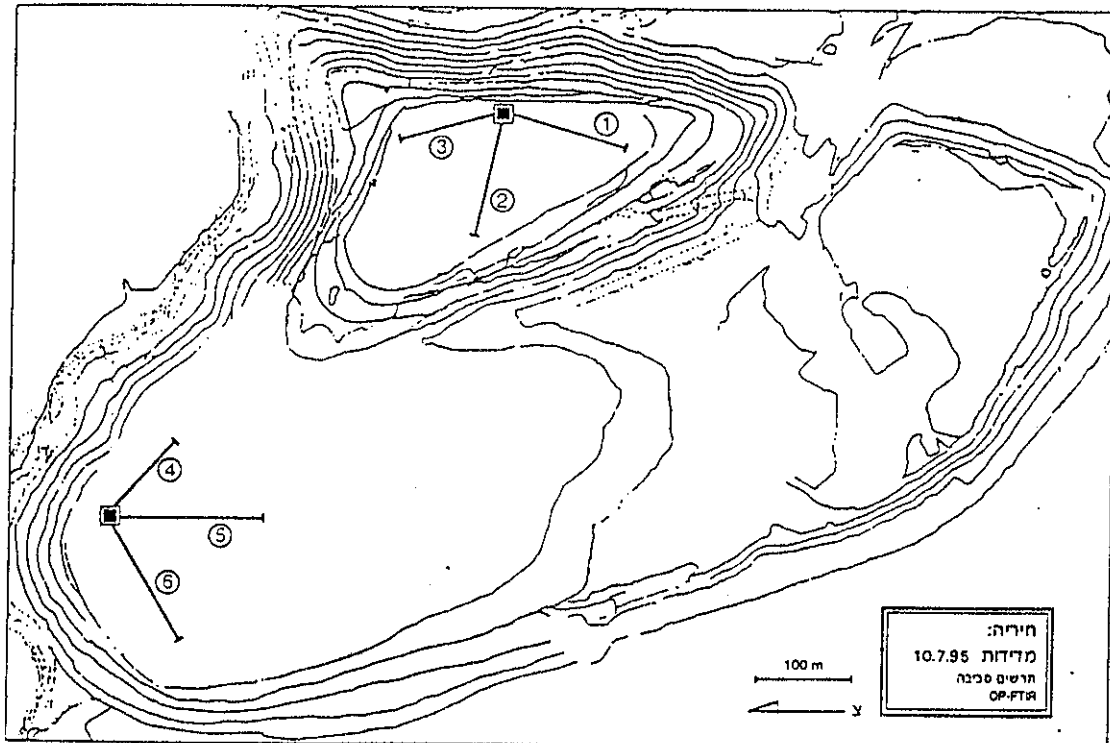
פיתוח יכולת מדידה עדכני באמצעות מערכות ה- OP-FTIR, יתרום לקידום מערך ניטור זיהום האויר בישראל בכלל ויאפשר לקבל תמונת זיהום אויר מרחבית של מזהמי אויר לא קונוונציונליים כגון VOC's, בסביבת אתרים לסילוק פסולת, שעד כה לא נמדדו בארץ (ראה חשמונאי, 1996).

#### **5. יישום OP-FTIR באתר לסילוק פסולת בחיריה**

##### **5.1 תיאור המדידות**

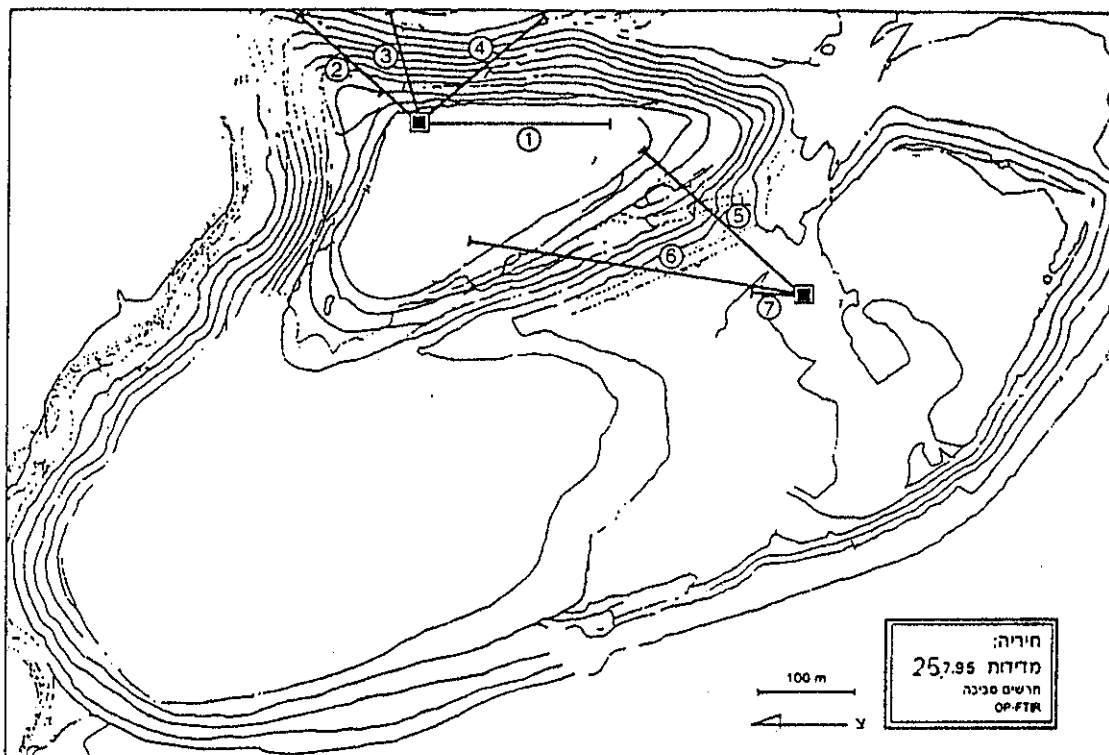
המדידות נערכו במשך יומיים, בתאריכים 10.7.95 ו- 25.7.95, על-ידי מערכת OP-FTIR מסוג BOMEM MB-155 של רפא"ל. באתר הוקמה תחנה מטאורולוגית רושמת על גבי תורן שגובהו כ- 2.5 מטר שמדדה כיוון ומהירות רוח בגובה זה. כמו-כן נמדדו ידנית הטמפרטורה והלחות בזמן המדידה. קווי המדידה נבחרו כך שיהיו ככל הניתן ניצבים לכיוון הרוח וכך שבתום שני ימי המדידות יתקבל כיסוי טוב של כל האתר (קווי המדידה מתוארים בתרשימים 1 ו- 8). כל מדידה מורכבת מ- 64 סריקות של המערכת המתבצעות במשך כ- 2 דקות ומתקבל

ספקטרום שהינו ממוצע של 64 הספקטרומים. טווחי המדידה נעו בין 50 ל- 200 מטרים וגובהם בין 0.3 ל- 1 מטר, מעל פני הקרקע. ביום הראשון ניתן לאפיין את המצב המטאורולוגי, על סמך המדידות בתחנה המטאורולוגית כקטגורית יציבות מסוג C או D של פסקויל-גיפורד ואילו ביום המדידות השני כ- A או B.



**תרשים 7 - קווי המדידה שנדגמו באמצעות מערכת ה- OP-FTIR באתר סילוק פסולת חיריה בתאריך 10.7.95 .**

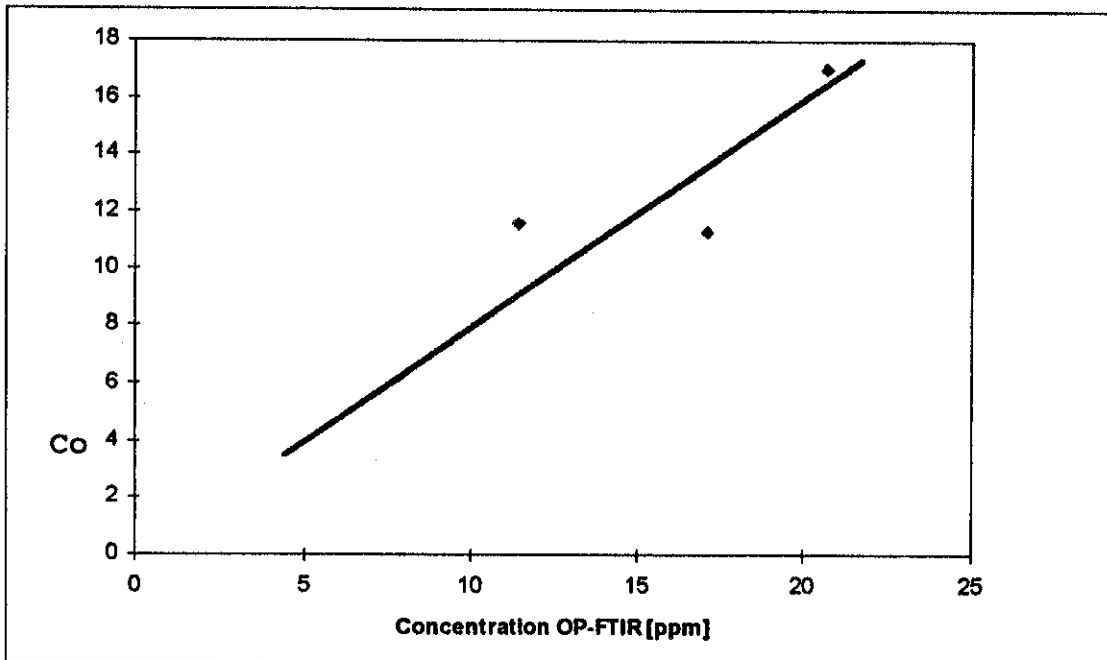
ביום המדידות השני נבחר אחד מקווי המדידה על שפת המצוק כאשר כיוון הרוח מן המדרון. לפי המדידות בקו, התקבל המידע הדרוש לגבי קצב הפליטה מן המדרונות של האתר וזאת מכיון שהריכוז שנמדד בקו זה מקורו בגז שהגיע מן המדרון בלבד. ביום המדידות השני בוצעה גם מדידה בגובה של כ- 3.5 מטר מעל הקרקע על-מנת לקבל מדד לגבי השתנות הריכוז עם הגובה.



**תרשים 8 - קווי המדידה שנדגמו באמצעות מערכת ה- OP-FTIR באתר סילוק פסולת חיריה בתאריך 25.7.95.**

### **5.2 תוצאות המדידות**

ביום הראשון נדגמו, לשם השוואה, דגימות אויר בשקיות מתאימות והועברו לאנליזה גז כרומטוגרפית (GC) במעבדה בטכניון. מדידות אלה בוצעו סימולטנית עם סריקת המערכת בארבע נקודות לאורך קו המדידה. מכיון שמדידות אלה הינן נקודתיות לעומת המדידה הקווית של מערכת המדידה, צפויה סטייה בין המדידות... תוצאות ה- GC ניתנות בתרשים 9 והן מצביעות על קורלציה טובה בין התוצאות של הריכוזים בשני סוגי המדידות. הפעלת המערכת, עריכת המדידות וניתוח הספקטרומים לריכוזי מתאן נעשו על-פי הנחיות ה-EPA (Russwurm and Childers, 1995). תוצאות המדידות כריכוזי מתאן כפי שנתחו עבור שני ימי המדידה מופיעות בטבלאות 3 ו- 4 בהתאמה. לצורך החישובים של קצבי הפליטה מחלקים שונים של אתר חיריה באמצעות שיטת "מדידות באתר" המוצעת, נבחרו קווי המדידה שבהם כיוון הרוח היה בקירוב טוב ניצב לקו המדידה (7 מתוך 10 קווי מדידה שנעשו; ראה חשמונאי 1996).



**תושים 9 -** קורלציה בין הריכוז הממוצע של גז המתאן לאורך טווח המדידה של מערכת ה- OP-FTIR והריכוז הממוצע בארבע נקודות לאורך אותו טווח שנדגם באותו זמן ונותח על-ידי גז כרומטוגרף.

**טבלה 3 -** סיכום ריכוזי מתאן שנמדדו במערכת OP-FTIR באתר חיריה בתאריך 10.7.95 .

שעה	קו מדידה	טווח [m]	ריכוז 1 [ppm]	ריכוז 2 [ppm]	ריכוז 3 [ppm]	ריכוז ממוצע [ppm]
08:45	3	130	21.3	14.9	-	18.1
09:45	3	130	21.5	-	-	21.5
10:00	1	130	15.7	17.4	-	16.6
10:15	1	130	17.8	18.2	-	18.0
11:15	2	105	16.5	20.1	-	18.3
11:35	2	105	14.9	16.7	-	15.8
13:00	4	100	26.6	25.3	25.7	25.9
13:25	5	155	19.3	21.1	21.8	20.7
14:00	6	145	12.6	11.3	10.3	11.4



**טבלה 4 - סיכום ריכוזי מתאן שנמדדו באמצעות מערכת המדידה באתר חיריה בתאריך 25.7.95.**

שעה	קו מדידה	טווח [m]	ריכוז 1 [ppm]	ריכוז 2 [ppm]	ריכוז 3 [ppm]	ריכוז ממוצע [ppm]
08:30	1***	210	53.5	43.6	53.3	50.2
09:00	1	210	23.8	15.6	13.3	17.6
09:45	1	210	11.7	18.7	13.8	14.7
10:30	1*	200	14.1	9.0	17.6	13.6
11:00	2	185	11.2	10.3	9.8	10.4
11:15	3	120	10.0	9.5	13.9	11.1
11:30	4	165	13.4	12.5	14.2	13.4
13:15	5**	220	17.6	19.1	16.8	17.8
13:45	6**	360	23.2	20.8	23.7	22.6
14:30	7	50	43.4	-	-	43.4

- \* מדידה בגובה של 3.5 מטר מעל פני הקרקע.
- \*\* מדידה ארוכת טווח כאשר חלקים גדולים של טווח המדידה נמצאים בגובה של עשרות מטרים מעל פני הקרקע.
- \*\*\* מדידת קצב הפליטה מן המדרון.

**5.3 סיכום ומסקנות המדידות בחיריה**

בטבלה 5 סוכמו נתוני המדידות העיקריים וחישובי הערכת קצבי פליטות המתאן באתר חיריה. קצב פליטת המתאן מן המדרונות של האתר הינו הגבוה ביותר ועומד על כ- 2300 מיקרוגרם לשניה למטר מרובע (חשמונאי, 1996). קצבי הפליטה שנתקבלו באזורים בהם הפסולת טרייה כמו האירוע השלישי והאירוע השביעי עמדו על למעלה מ- 2000 מיקרוגרם לשניה למטר מרובע.

על מנת להעריך את קצב הפליטה מראש גבעת הנוף (כיסוי עפר סופי), יש להעריך את יחסי השטחים המכוסים עפר, השטחים המכוסים בפסולת טריה ושטחי המדרונות הנאספים אל קו המדידה. יחסים אלה מוערכים כ- 40%, כ- 40%, וכ- 20% בהתאמה. קצב הפליטה הממוצע

מהשטחים המכוסים בפסולת טריה הינו כ - 1840 מיקרוגרם לשניה למטר מרובע. קצב הפליטה מן המדרונות הוערך כ- 2300 מיקרוגרם לשניה למטר מרובע. ולכן קצב הפליטה מהמשטח של גבעת הנוף ומשטחים מכוסים בעפר הינו 60 מיקרוגרם לשניה למטר מרובע. ערך זה של קצב הפליטה משטחים בעלי כיסוי עפר סופי הינו קטן ביותר מסדר גודל מכל קצבי הפליטה שחושבו עבור אזורי המידרונות ואזורי הפסולת הטריה. נתון זה, מצביע על כך שבאתר חיריה עיקר הפליטה הינה מאזורי המדרונות ומאזורי האשפה הטריה.

**טבלה 5 - סיכום הערכת קצבי פליטה של גז מתאן מאתר סילוק פסולת חיריה.**

תאריך	שעה	מצב יציבות	מרחק מגבול האתר [m]	גובה עירוב $Z_i$ [m]	ריכוז ממוצע $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$	קצב פליטה מוערך $[\mu\text{g}/\text{s} \cdot \text{m}^2]$
10.7.95	10:15	D	500	9.0	11300	1220
10.7.95	11:35	C	500	12.0	11200	1020
10.7.95	13:00	D	300	7.5	17000	2030
25.7.95	08:30	A	100	7.0	32900	2300
25.7.95	09:00	A	500	17.0	11500	400
25.7.95	09:45	A	500	17.0	9600	330
25.7.95	14:30	B	300	10.5	28400	2000

לצורך חישוב קצב הפליטה הכללי  $Q_{aT}$  מכל אתר חיריה חושב יחסי השטחים של:

$$1. \text{ אזורי מדרונות } A_1/A_T = 0.4$$

$$2. \text{ אזורי פסולת טריה } A_2/A_T = 0.4$$

$$3. \text{ אזורי כיסוי עפר סופי } A_3/A_T = 0.2$$

קצבי הפליטה מאזורים אלה בהתאמה הינם: 2300, 1840 ו - 260 מיקרוגרם לשניה למ"ר בהתאמה. השטח הכללי של האתר כולל השטח האמיתי של המידרונות הסתכם ל - 487,000 מ"ר. מכאן שקצב הפליטה הכללי  $Q_{aT}$  מכל האתר הינו 810 מיקרוגרם לשניה למ"ר. ערכים אלה תואמים תוצאות שנתקבלו בעבודות אחרות של הערכת קצב הפליטה של מתאן מאתרים לסילוק פסולת ביתית. בסקר שנעשה בכל אתרי סילוק פסולת בבריטניה באמצעות מערכת חישה אופטית מרחוק (Milton et al., 1995), נתקבל הערך הממוצע של 2 מיליגרם לשניה

למטר בריבוע, עבור אתרים פעילים (פסולת טריה) ערך הכמעט זהה לערך שנתקבל עבור פסולת טריה בעבודה זו. בסקר שנערך בבריטניה גם עבור אתרים סגורים ומכוסים בעפר, נתקבל ערך ממוצע דומה לערך של הפליטה מכיסוי סופי שנתקבל העבודה זו. שיטת המדידה והערכת קצב הפליטה, בעבודה הבריטית, הינם על בסיס של מדידות של שטף המתאן החלקי העובר דרך מישור הניצב לפני הקרקע, על-ידי מדידות בקווים משופעים בגבהים שונים, והשלמת השטף בכל המישור על-ידי מודל פיזור מזהמים. לכן מעודדת ההשוואה היפה בין הערכים, שנתקבלו בעבודה זו על-ידי הערכת גובה הפיזור האפקטיבי באמצעות מודל פיזור המזהמים והערכים שנתקבלו ממדידות מורכבות הרבה יותר.

## 6. סיכום ומסקנות

מערכת ה- OP-FTIR (Open Path - Fourier Transform Infrared) הינה מערכת חישה אופטית מרחוק בתחום התת-אדום, הנמצאת במרכז המחקר של נייטור בחישה אופטית מרחוק של מזהמי האויר המסוכנים ותרובות אורגניות נדיפות באויר, על-ידי ה- EPA בארה"ב. מאמץ מחקרי זה, שואף להבין לעומק ולאחד את טכנולוגית הדגימה וניתוח הנתונים באמצעות המערכת, לקבלת רגישות מדידה ואמינות של הריכוזים המתקבלים, הנדרשים בארצות הברית מן התיקון לחוק ה- CAAA.

המחקר בטכניון בנושא זה עסק בהערכת קצבי הפליטה של גזים מזהמים מחלקים שונים של מקורות שטח לא מוקדדים, באמצעות מדידות ריכוזי הגזים במערכת ה- OP-FTIR. כמו-כן יושמו בשיטות הערכת קצבי הפליטה, מודלים לפיזור מזהמי אויר וטכניקות של אינוורסיה מתמטית. המחקר כלל שלושה נדבכים עיקריים:

1. פיתוח יכולת המדידה של VOCs במערכת ה- OP-FTIR.
2. פיתוח תיאורטי של שתי שיטות להערכת קצבי הפליטה של VOCs ממקור שטח לא מוקדי.
3. בחינה ויישום של השיטות בשדה, ושל יכולת המדידה של VOCs במערכת ה- OP-

FTIR (סימולציה עם SF<sub>6</sub>; מדידות בחיריה)

אחד הנושאים הנוערים ביותר במדידה ובקרת הפליטה של גזים רעילים כמו תרכובות אורגניות נדיפות הינו הניסיון לאפיין את קצבי הפליטה, מבחינת עוצמתם מיקומם במקור והרכבם, של גזים אלה ממקורות שטח לא מוקדדים (Fugitive Sources). המחקר בטכניון עסק בפיתוח ובחינת שיטות להערכת קצבי הפליטה מחלקים שונים של מקורות שטח לא מוקדדים, כמו הפליטות ממוקדים שונים במפעלים כימיים, אתרי פסולת, מפעלים לטיהור שפכים וכדומה. שיטות אלה מתבססות על מדידה בקונפיגורציות חדשות של מערכת ה- OP-FTIR, יישום מודלים לפיזור מזהמים ויישום שיטות אינוורסיה מתמטיות.

שיטת "מדידות באתר" - בבסיס אחת השיטות המוצעות (ראה חשמונאי, 1996), שכונתה שיטת "מדידות באתר", דגימה של קווי מדידה רבים של מערכת ה- OP-FTIR בגובה פני הקרקע, בניצב לכיוון הרוח ובאיזורים שונים בתוך מקור השטח הפולט, ומכאן שמה. מודל פיזור מזהמים ושיקולים של שימור מסת המזהמים בפלומה, מסייעים בשיטה זו להעריך את גובה הפיזור האפקטיבי המופיע בנוסחה של מודל הקופסא המוכר. שיטה זו יושמה, במדידות מתאן באתר סילוק פסולת חיריה, ואכן מסתבר כי יתרונה מתבטא במקורות זיהום גדולים ובעלי טופוגרפיה מורכבת. מדידות אלה ויישום השיטה המוצעת, הראו כי הפליטה מאזורי פסולת טריה וממידרונות האתר הינה גדולה בסדר גודל מאזורי האתר שהינם בעלי כיסוי עפר סופי. התוצאות שהתקבלו בטכניון מתאימות לתוצאות עבודה בבריטניה שסקרה (Milton et al., 1995) אתרי פסולת רבים.

שיטת "מדידות במורד הרוח" - שיטה השניה שפותחה בטכניון היא שיטת "מדידות המורד הרוח". מיישום שיטה זו בניסוי סימולציה בשדה, על-ידי הדמית מקור השטח באמצעות שלושה מוקדי פליטה נקודתיים מבוקרים, עולה כי ניתן באופן מעשי, ממדידת הריכוזים הטווחיים המצטברים במערכת ה- OP-FTIR, לשחזר את קצבי הפליטה משטחים מישניים שונים בתוך מקור השטח הלא-מוקדי.

## 7. מקורות

Allegri I. and A. Febo, 1994: "Intercomparison between Gas-Chromatography and Long-Path UV DOAS Techniques for the Measurement of Benzene and Toluene in Urban Atmospheres", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 243-252.

Arindam S. and L.A. Todd, 1994: "Mapping Chemicals Indoors using Open-Path FTIR Spectroscopy and Computed Tomography: Chamber Studies", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 187-191.

Bennet K.E., Faires G.W. and R.L. Byer, 1984: "Experimental Optical Fan Beam Tomography", Appl. Opt., 23(18), 2678-2685.

Bhattacharyya R. and L.A. Todd, 1994: "Two-Dimensional Mapping of Air Contaminant Movement using an FTIR/Computed Tomography System", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 170-176.

Chaffin C.T., Marshall T.L., Combs R.J., Knapp R.T., Kroutil R.T., Fateley W.G. and R.M. Hammaker, 1994: "Passive Fourier Transform Infrared (FT-IR) Monitoring of SO<sub>2</sub> in Smokestack Plumes: A Comparison of Remote Passive Spectra of an Actual Hot Plume with Emission Spectra Collected with a Heatable Cell, Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 302-313.

Childers J.W., Russwurm G.M. and E.L. Thompson, Jr., 1994: "Quality Assurance Considerations in a Long-Term FTIR Monitoring Program", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 389-395.

Ckabrorty D.K., 1994: "Examination of the Long-Path Open-Path Technique for air Monitoring in the State of Kentucky", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 347-358.

Clark J.M., 1993: "Mercury-Cadmium-Telluride Cryocooled Detector Performance Parameters for FTIR Spectroscopy", International Specialty Conference on Optical Sensing for Environmental Monitoring, Atlanta, GA.

Demirgian J.C., Hammer C.L. and R.T. Kroutil, 1992: "The Potential of Passive-Remote Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy to Detect Organic Emissions under the Clean Air Act", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas.

Draves J.A., LaCrosse J.P., Hull D.M. and R.L. Spellicy, 1992: "A Comparison of Open-Path Fourier Transform Infrared Spectroscopy with Conventional Ambient Air Monitoring Methods", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas.

Drescher A.C., Yost M.G., Park D.Y., Levine S.P., Gadgil A.J., Fischer M. and W.W. Nazaroff, 1994: "Measurement of Tracer Gas Distributions Using an Open Path FTIR System Coupled with Computed Tomography", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 128-139.

Fischer M.L., Drescher A.C., Gadgil A.J. and M.G. Yost, 1994: "A System for Rapid Detection and Mapping of gas Plumes on 100 m Scales: Examination of some Technical and Economic Issues", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 151-159.

Gibbs D.P., Betty C.L., Dolaty M. and V.K. Argento, 1994: "Use of Infrared and Ultraviolet Spectrometers to Measure the Effect of Vehicle Emissions on Urban Air Quality, Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 84-93.

Giese-Bodgan S., 1995: "Optimization of the "Shifting Method" to Generate Absorbance Spectra in Open-Path FTIR with Artificial Data", Proceedings of

Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, San-Francisco, CA, In Press.

Grant W.B., Menzies R.T.,1983: "A Survey of Laser and Selected Optical Systems for Remote Measurement of Pollutant Gas Concentrations", JAPCA, 33, 187-194.

Grant W.B., Kagan R.H. and W.A. McClenny, 1992: "Optical Remote Measurement of Toxic Gases", J. Air Waste Manage. Assoc., 42, No. 1, 18-30.

Griffiths P.R. and J.A. DeHaseh,1986: "Fourier Transform Infrared Spectroscopy", Wiley and Sons, NY.

Griffiths P.R., Richardson R.L., Qin D. and C. Zhu, 1994: "Open-Path Atmospheric Monitoring with a Low Resolution FT-IR Spectrometer, Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring", VIP-37, Mclean, Virginia, 274-284.

Haaland D.M. and R.G. Esterling, 1982: "Application of New Least-Squares Methods for the Quantitative Infrared Analysis of Multicomponents Samples", Appl. Spec., 36, 665-673.

Haaland D.M. and E.V. Thomas, 1988: "Partial Least-Squares Methods for Spectral Analyses, 1. Relation to Other Quantitative Calibration Methods and the Extraction of Qualitative Information", Anal. Chem.,1193-1201.

Hallstadius H.S., Stevens R.K. and C.P. Conner,1994: 'OPSIS Open-Path Monitor Versus Conventional Point Samplers in a Field Study", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 218-229.

Hanst P.L., 1970: "Infrared Spectroscopy and Infrared Lasers in Air Pollution Research and Monitoring", Appl. Spectosc., 24(2), 161-174.

Hanst P.L. and S.T. Hanst, 1992: "Infrared Spectra for Quantitative Analysis of Gases", Volume II, Infrared Analysis Incorporated, Anaheim, CA.

Hartman R.M. and A.R. Leston, 1994: "Use of an OPSIS Open Path for Ambient Aldehyde Monitoring, Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring", VIP-37, Mclean, Virginia, 194-205.

Herget W.F. and J.D. Brasher,1980: "Remote Fourier Transform Infrared Air Pollution Studies", Optical Engineering, 19, 508-514.

Hommrich D.N., Kump R.L. and R.H. Kagan,1992: "An Evaluation of Remote Sensing FTIR vs. Point Source Sample Collection and Analysis", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 207-211.

Hudson J.L., Thomas M.J., Arello J., Helvig J.R., Fairless B.J., Carter Jr. R.E., Lane D.D. and G.A. Marotz,1992: "An Overview Assessment of the

Intercomparability and Performance of Multiple Open-Path FTIR Systems as Applied to the Measurement of Air Toxics", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 112-122.

Ivancic W.A., Sticksel P.R., Holdern M.W., Satola J.R., Barnes R.H., Mukund R. and C. Barker, 1994: "Infrared Open-path Monitoring for Studies of Atmospheric Dispersion of Gaseous Pollutants", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 262-272.

Kagan R.H., Jolley J.G., Shoop D.S., Hankins M.R. and J.M. Jackson, 1993: "Validation of Open-Path FTIR Data at Treatment, Storage, and Disposal Facilities", International Specialty Conference on Optical Sensing for Environmental Monitoring, Atlanta, GA, 437-442.

Klein M.V. and T.M. Furtak, 1986: "Optics", Second Edition, Wiley and Sons, NY.

Kricks R.J., Scotto R.L., Pritchett T.H., Russwurm G.M., Kagan R.H. and D.B. Mickunas, 1992: "Quality Assurance Issues Concerning the Operation of Open-Path FTIR Data", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 224-231.

Kricks R.J., Pescatore D.E., Kagan R.H. and C.L. McCauly, 1992: "A Technique to Derive Background Spectra ( $I_0$ ) from Sample Spectra ( $I$ ) for Open-Path FTIR Spectrometry Applications", Proceedings EPA/A&WMA International Symposium of Toxic and Related Air Pollutants, Raleigh, N.C., 582-594.

Kump R.L. and D.N. Hommrich, 1992: "Fenceline and Ambient Air Monitoring with Open-Path FTIR Optical Remote Sensing", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 269-272.

Lamp T., Weber K., Weidemann J. and G. van Haren, 1994: "Application of FTIR Spectroscopy to Open Path Measurements at Industrial Sites In Germany", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 6-14.

Lindner J.S., Hansheng Z. and R.L. Cook, 1994: "Non-Intrusive Determination of Combustion Efficiency Using FTIR Spectroscopy", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 285-302.

Malachowski M.S., Levine S.P., Herring G., Spear R.C., Yost M.G. and Y. Zhou, 1994: "Workplace and Environmental Air Contaminant Concentrations Measured by OP-FTIR Spectroscopy: A Statistical Process Control Technique

to Detect Changes from Normal Operating Conditions", *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 44, 673-682.

McClenny W.A., Russwurm G.M., Holdern M.W., Pollack A.J., Pleil J.D., Varns J.L., Mulik J.D., Oliver K.D., Berkley R.E., Williams D.D., Krost K.J. and W.T. McLeod, 1991: "Superfund Innovative Technology Evaluation, The Delaware SITE Study 1989", EPA 600/3-91/071, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

McClenny W.A., Pleil J.D., Evans G.F., Oliver K.D., Holdern M.W. and W.T. Winberry, 1991: "Canister-Based Method for Monitoring Toxic VOC's in Ambient Air", *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 41, No. 10, 1308-1317.

Milton J.T.M., Partridge R.H. and Goody B.A., 1995: "Minimum Emission Rates Detectable from Landfill Sites using Optical Integrated-Path Techniques", *Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring*, San-Francisco, CA, In Press.

Moore G.E., Milich L.B. and M.K. Liu, 1988: "Plume Behaviors Observed Using Lidar and SF<sub>6</sub> Tracer at Flat and Hilly Site", *J. Atmo. Environ.*, 22, 1673-1688.

Neves N., Couto E. and R. Kagan, 1994: "Use of an Open-Path FTIR Sensor at the Camacari Petrochemical Complex - Bahia Brazil, *Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring*", VIP-37, Mclean, Virginia, 426-435.

Park D.Y., Yost M.G., Drescher A.C., Gadgil A.J., Zhou Y. and S.P. Levine, 1994: "Evaluation of Beam Path Configurations for Use with a Monostatic OP-FTIR Capable of Rapid Beam Movement for Tomographic Reconstruction of Gas and Vapor Concentrations in Workplaces", *Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring*, VIP-37, Mclean, Virginia, 177-186.

Pescatore D.E., Kricks R.J. and T.H. Pritchett, 1992: "A Method to Determine Minimum Detection Limit for Site-Specific Target Compounds Using Open-Path FTIR Spectroscopy", *Proceedings EPA/A&WMA International Symposium of Toxic and Related Air Pollutants*, Raleigh, N.C., 595-600.

Piccot S.D., Masemore S.S., Ringler E.S., Srinivasan S., Kirchgessner D.A. and W.F. Herget, 1994: "Validation of a Method for Estimating Pollution Emission Rates from Area Sources Using Open-Path FTIR Spectroscopy and Dispersion Modeling Techniques", *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 44, 271-279.

Richardson R.L., Zhu C. and P.R. Griffiths, 1995: "Preliminary Results from a New Low-Resolution Open-Path FTIR System", *Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring*, San-Francisco, CA, In Press.



Russwurm G.M. and W.A. McClenny, 1990: "A Comparison of FTIR Open-Path Data with TO-14 Canister Data", Proceedings, EPA/AWMA International Symposium on the Measurement of Toxic and Related Air Pollution, Raleigh, NC.

Russwurm G.M., 1992: "Operational Considerations for the Use of FTIR Open-Path Techniques Under field Conditions", International Symposium on Measurement of Toxic and Related Pollutants, Durham, NC.

Russwurm G.M., 1992: "Quality Assurance and the Effects of Spectral Shifts and Interfering Species in FTIR Analysis", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 105-111.

Russwurm G.M. and J.W. Childers, 1993: "FTIR Open-Path Monitoring Guidance Document", SP-4423-93-09.

Russwurm G.M., 1993: "Quality Assurance, Water Vapor, and the Analysis of FTIR Data", Proceedings of the 85th Annual Meeting & Exhibition of the Air&Waste Management Association, Pittsburgh, Pa.

Russwurm G.M., Childers J.W. and E.L. Thompson, Jr., 1994: "Diurnal Variations of Some Atmospheric Gases as Measured By Fourier Transform Spectroscopy", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 47-57.

Russwurm G.M., Childers J.W. and E.L. Thompspn, Jr., 1994: "Effects of Stray Light in FT-IR Instruments on Open-Path Measurements", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 339-346.

Russwurm G.M. and J.W. Childers, 1995: "FTIR Open-Path Monitoring Guidance Document", SP-4420-95-04.

Russwurm G.M., 1996, Personal Communication.

Spellicy R.L., Draves J.D., Crow W.L., Herget W.F. and W.F. Buchholtz, 1992: "A Demonstration of Optical Remote Sensing in a Petrochemical Environment", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 273-285.

Stevens R.K., Drago R.J., McLeod W.T., Bell J.P., Ward R., Mamane Y. and H. Sauren, 1990: "Evaluation of a Differential Optical Absorption Spectrometer as an Air Quality Monitor", In Proceedings of the 1990 EPA/A&WMA International Symposium on Measurement of Toxic and Related Air Pollutants, Raleigh, NC.

Thomas M.J., Hudson J.L., Marotz G.A., Lane D.D. and R.E. Carter Jr., 1992: "Data Variability and Use Factors Compared Based on Open-Path FTIR and

Canister Sampling Techniques", SP-81 Optical Remote Sensing, Application to Environmental and Industrial Safety Problems, International Specialty Conference, Houston, Texas, 133-144.

Todd L.A. and N. Ramachandran, 1994: "Evaluation of Algorithms for tomographic Reconstruction of Chemicals Concentrations in Indoor Air", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 55(5), 403-417.

Vazquez G., 1994: "FT-IR Remote Sensing of Atmospheric Species: Application to Global Change and Air Pollution", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 438-463.

Wallin S., 1994: "Official German Approval of OPSIS UV DOAS for Measurement of Phenol, Formaldehyde, Mercury, and Ammonia for CEM Applications", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 366-371.

Webb J.D., Loos K.R., Reid S.A., Huges J.I. L. and S. Williamson, 1994: "The Matching of High Resolution Water Vapor Spectra with Open-Path FTIR Field Spectra", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 418-425.

Weber K., Weidemann J., van Haren G. and t. Lamp, 1994: "Open-Path FTIR Measurements at an Urban Area in Germany", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, VIP-37, Mclean, Virginia, 37-46.

Wilkinson R.J., Archibald I.G., Kuipers E.W. and J.I.L. Hughes, 1995: "Process Site Emission Quantification and Location from Optical Remote Sensing Measurements", Proceedings of Optical Sensing for Environmental and Process Monitoring, San-Francisco, CA, In Press.

Xiao H., Levine S.P. and J.B. D'Arcy, 1989: "Iterative Least-Squares Fit Procedures for the Identification of Organic Vapor Mixtures by Fourier Transform Infrared Spectrophotometry", Anal. Chem., 61, 2708-2714.

Xiao H. and S. Levine, 1993: "Analysis of Organic Vapor in the Workplace by Remote Sensing FTIR Spectroscopy", Am. Ind. Hyg. Assoc., 54.

Yost M.G., Gadgil A.J., Drescher A.C., Zhou Y., Simonds M.A., Levine S.P., Nazaroff W.W. and P.A. Saisan, 1994: "Imaging Indoor Tracer-Gas Concentrations with Computed Tomography: Experimental Results with a Remote Sensing FTIR System", Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 55(5), 395-402.

Yost M.G., 1996, Personal Communication.

חשמונאי, ר., "הערכת קצבי הפליטה של מקורות זיהום אוויר לא מוקדיים באמצעות חישה אופטית מרחוק - OP-FTIR." " חיבור לתואר דוקטור למדעים, יולי 1996, הפקולטה להנדסה אזרחית, הטכניון, חיפה.

Excerpt from the reference list of DÜRR abatement systems

Quantity	Company	Place	Country	Ind. branch	Product	Type of system	Exh. air quantity per system [Nm <sup>3</sup> /h]
1	Sandoz-Quinn	Leinfelden	D	Chem./pharm.	Paints + inks	RTO	21,000
2	Fiat	Arese	I	Paint finishing	Car	RTO	120,000
1	Freudenberg	Weinheim	D	Coating	Adhesive foils	RTO	35,000
1	Harley Davidson	York	USA	Paint finishing	Motorcycles	RTO	100,000
2	Sandoz	Basel	CH	Chem./pharm.	Paints + inks	RTO	25,000
1	Ebert	Wiesbaden	D	Printing	Foils	RTO	70,000
1	Mercedes Benz	Sindelfingen	D	Paint finishing	Small parts	RTO	25,000
1	Teich	Obergrafendorf	A	Printing	Packing	RTO	125,000
1	Mercedes Benz	Wörth	D	Paint finishing	Car	RTO	44,400
1	Nummi	Fremont	USA	Paint finishing	Car	RTO	32,000
1	Fiat	Rivalta	I	Paint finishing	Car	RTO	300,000
1	Fiat	Rivalta	I	Paint finishing	Car	CTO	20,000
1	Ford	Louisville, Kentucky	USA	Paint finishing	Car	RTO	140,000
1	Mehnert + Veeck	Nürnberg	D	Chem./pharm.	Paints + inks	RTO	25,000
1	Sunpor	St. Pölten	A	Chem./pharm.	Exp. polystyrene	RTO	22,000
1	Eurofloor	Wiltz	L	Coating	Foils	RTO	200,000
1	Ford	Norfolk, Virginia	USA	Paint finishing	Car	RTO	56,000
1	Ford	Norfolk, Virginia	USA	Paint finishing	Car	RTO	28,000
1	BMW	Spartanburg, S.C.	USA	Paint finishing	Car	RTO	7,000
1	Toyota	Long Beach, Calif.	USA	Paint finishing	Car	CTO	19,000
1	Florida Production	Dayton, Ohio	USA	Paint finishing	Small parts	CTO	18,000
1	Polychrome	Clark, New Jersey	USA	Others	Film	CTO	10,000
1	Clark-Schwebel	Sherborne	GB	Coating	Fibre glass	CTO	20,000
1	AKZO Coating	Stuttgart	D	Chem./pharm.	Paints + inks	RTO	40,000
1	Morton	Strullendorf	D	Chem./pharm.	Paints + inks	CTO	6,000
1	Sublstatic	Henin-Beau	F	Printing	Offset prod.	CTO	12,500
1	Metro Machine	Norfolk	USA	Paint finishing	Ship	CTO	20,000
1	Neste Resins Co.	Eugene	USA	Chem./pharm.	Paints + inks	CTO	23,000
1	Ford	Wayne	USA	Paint finishing	Car	RTO	32,000
1	BASF	Münster	D	Chem./pharm.	Paints + inks	RTO	30,000
1	Reichhold	Wien	A	Chem./pharm.	Paints + inks	CTO	7,500
1	Fiat	Termini Imerese	I	Paint finishing	Car	RTO	240,000
1	Fiat	Cassino	I	Paint finishing	Car	RTO	400,000
1	Jacobs Suchard	Lörrach	D	Others	Food	CTO	4,000
1	Peugeot	Coventry	GB	Paint finishing	Car	RTO	37,000
1	Fiat	Betis	BR	Paint finishing	Car	RTO	55,000
1	Haendler+Natermann	Hann. Münden	D	Printing	Packing mat.	RTO	100,000
1	Handtmann	Biberach	D	Others	Engine parts	RTO	25,000
2	RAM Engin.	Wane, New Jersey	USA	Others	Sludge incin.	CTO	21,000
1	Mich. Carm. Compr.	Parma, Michigan	USA	Paint finishing	Compressors	CTO	4,000
1	Merck	Darmstadt	D	Chem./pharm.	Medicines	CTO	8,000
2	Mercedes Benz	Sindelfingen	D	Paint finishing	Car	RTO	18,000
1	Ford	Ontario	CDN	Paint finishing	Car	RTO	140,000
1	Neste Resins	Louisiana	USA	Chem./pharm.	Resins	CTO	14,000
1	Neste Resins	Alabama	USA	Chem./pharm.	Resins	CTO	14,000
1	Neste Resins	North Carolina	USA	Chem./pharm.	Resins	CTO	14,000
1	Mercedes Benz	Vance, Alabama	USA	Paint finishing	Car	RTO	32,000
1	Ford	Loraine, Ohio	USA	Paint finishing	Car	RTO	56,000
1	Ford	Lorain, Ohio	USA	Paint finishing	Car	RTO	17,000
1	CMC	Yang Mei	ROC	Paint finishing	Car	RTO	54,000

## Summary

In air purification we have to distinguish clearly between two cases:

Will new production facilities be installed, that meet environmental legislation, or will existing production lines be equipped with end-of-pipe (EOP) air purification solutions?

New lines can be supplied more easily with optimum environmental equipment. Maybe the production facility can be modified so as to make EOPs unnecessary.

On existing lines, the solution is usually more difficult and more expensive.

We have seen that there are different methods of air purification, but always only one optimum way for one specific case.

For this reason it is especially important for the customer to have a partner who can supply all these methods, and who can judge the production - air purification system.

A supplier of single air purification components will always try to sell only this component, and cannot submit an optimum system to the customer.

We as DURR have supplied 1,200 systems for exhaust air purification through-out the world in the last few years, and will be pleased to solve your air purification problems.

3

יום העיון בנושא: ניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים VOC  
מוסד שמואל נאמן, הטכניון חיפה, 27 ליוני 1996.

## אספקטים של חיטון באנרגיה בטיפול בפליטות V.O.C בגזים מתהליכי ייצור

רח' המלאכה 33 ת.ד. 710 כרמיאל

מייזלס חיים - "אקוטופ" בע"מ

### מבוא

המודעות לטיפול בפליטות של גזים מתהליכי ייצור המכילים חומרים אורגניים נדיפים הולכת וגוברת בשנים האחרונות.

בשנת 1994 הוכנה הצעת תקן המגדירה את הערכים המותרים לפליטות של מזהמים מסוג זה לפי חלוקה לקבוצות לפי דרגת הסיכון הקיים בכל אחת מקבוצות החומרים הנ"ל.

התקנות הוכנו על ידי המשרד לאיכות הסביבה בהנחיית השר, מר יוסי שריד, והן מתבססות על התקנות הקיימות בגרמניה 86-TALUFT.

הבעיה של פליטת V.O.C קיימת במגוון רחב ביותר של תעשיות;

תעשיית הלבדים; תעשיית פורמיקה; תעשיית הצביעה והצבע; תעשיית הטקסטיל; תעשיית הדפוס; תעשיית האלקטרוניקה; ותעשיית הדלק.

מאפייני הבעיה בכל אחת מן התעשיות ודאי שונה בשל השימוש בחומרים שונים אך לכולם מכנה משותף והוא הצורך הדחוף בפתרון בעיית פליטת חומרי V.O.C בגזים הנפלים מתהליכי הייצור וכן משפכים הנוצרים כמוצר לוואי של תהליכי הייצור והמכילים אף הם מרכיבי V.O.C.

### שיטות מקובלות לטיפול במניעת פליטה של חומרי V.O.C בגזים:

קיימות מספר שיטות מקובלות לטיפול בפליטת חומרי V.O.C בגזים מתהליכי ייצור.

בין השיטות העיקריות ניתן לציין את הבאות:

- ספיחת חומרי V.O.C ע"י עמודות פחם פעיל.

- איסוף הגזים והזרמתם למשרפה לצורך שריפה והשמדת חומרי V.O.C.

- טיפול באמצעות פילטרים ביולוגיים.

- טיפול באמצעות שילוב בין עיבוי והפרדה בממברנות חצי חדירות.

יישומה של כל אחת מן השיטות מותנית כמובן בסוג המזהמים וכמות הגזים בהם יש לטפל, אולם הבעיות המשותפות המלוות את כל אחת מן הפתרונות הינן:

- עלות השקעה ראשונית גבוהה.

- עלות תפעולית גבוהה הנובעת בעיקר מצריכת אנרגיה גבוהה.

ברור כי הן ההשקעה הראשונית והן עלות התפעול השוטף הינן בהחלט בין הגורמים המרכזיים במערכת השיקולים של בחירת הפתרון, אולם לרוב הגורם המכריע בקביעת שיטת הטיפול הינה עלות התפעול השוטף של המתקן.

עקב כך החליטה חברת "אקוטופ" לבדוק אפשרויות נוספות לפתרון הבעיה כאשר תקו המנחה הינו הורדת עלויות, הן הראשוניות והן השוטפות.

### הרעיון המרכזי - מיזעור נפחים והקטנת עלות האנרגיה לטיפול ב-V.O.C

תקני הפליטה הקיימים לחומרי V.O.C מחייבים להגיע לריכוז נמוך למדי של חומרי V.O.C בגזים הנפליטים מתהליכי הייצור.

אמנם הריכוז הבסיסי של חומרי V.O.C בגזי הפליטה מהתהליך הינו בדרי"כ בגבולות של עד מספר גרמים למ"ק, אולם בשל הדרישות של תקני הפליטה מחייב הדבר כי מתקני הטיפול יהיו בעלי אחוז יעילות גבוה. בממוצע נדרשים המתקנים להיות בעלי יעילות כוללת של 98%-90%.

היות ומדובר בטיפול בגזים, המשמעות הינה טיפול באלמנט בעל נפח סגולי גבוה ומשקל סגולי נמוך. ואכן זאת הסיבה להשקעת האנרגיה הגבוהה הנדרשת בטיפול בחומרי V.O.C במצב צבירה גזי.

לצורך המחשה, ניקח לדוגמא מקרה בו יש לטפל בגזי פליטה בעלי ריכוז של  $2000 \text{ mg/m}^3$  פנול.

נפח הגזים בהם יש לטפל הינו  $30,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . כמות האנרגיה הדרושה להפעלת משרפה לטיפול בהשמדת הפנול הינה שוות ערך ל- $9.5 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ .

תרגום אנרגיה זו לצריכת דלק מראה כי להפעלת המשרפה הנ"ל יש להשתמש בכמות של כ-1200 ק"ג מזוט לשעת הפעלה או במונחים כספיים כ- $130\$/\text{h}$ .

משרפה זו, באם תופעל בתנאי הפעלה מקובלים בתעשייה, דהיינו כ-4500 שעות בשנה, תחייב הוצאה כספית של כ- $585,000 \$$  בשנה וזאת מלבד הוצאות תחזוקה.

ברור כי עלויות אלו הינן גבוהות ביותר.

הרעיון המרכזי בפיתוח של חברת "אקוטופ" התגבש סביב בדיקת האפשרות למזער את נפח הגזים המכילים V.O.C אותם יש להשמיד.

ביסודו הרעיון שנבדק היה ביצוע של שטיפת גזי הפליטה וספיגת חומרי ה-V.O.C באמצעות תמיסות כימיות וקטליזטורים שונים ובאופן זה למצות את חומרי ה-V.O.C מהגזים ולהעבירם למצב צבירה נוזלי בתוך תמיסות הספיגה.

לחברת "אקוטופ" ידע וניסיון בבניית והפעלת משטפים (WET SCRUBBERS) לטיפול ב- $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$

ו- $\text{NO}_x$  מגזי שריפה מדוודי קיטור ותהליכי שריפת דלקים.

חברת "אקוטופ" השתמשה בניסיון זה ויישמה אותו למקרה הנדון.

### משטף לספיגת חומרי V.O.C מגזי פליטה במפעל לבידום

לצורך בדיקת היתכנות הנושא נבנה מתקן הדמייה במפעל לבידום בו קיימת בעיית פליטה של V.O.C מסוג פנול, פורמלדהיד ומתנול.  
במתקן הייצור במפעל הנ"ל חמש ארובות פליטה והכמות הכוללת של הגזים הנפלטים הינה  $30,000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

ריכוזי V.O.C שנמדדו באופן ממוצע בארובות הפליטה היו כדלקמן:

פנול -  $500 \text{ mg}/\text{m}^3$

פורמלדהיד -  $350 \text{ mg}/\text{m}^3$

מתנול -  $500 \text{ mg}/\text{m}^3$

דרישות התקן לפליטת החומרים הנ"ל הינו כדלקמן:

פנול+פורמלדהיד -  $20 \text{ mg}/\text{m}^3$

מתנול -  $150 \text{ mg}/\text{m}^3$

נבחרה הארובה בעלת הפליטה הגבוהה ביותר של חומרי V.O.C ועליה הורכב מתקן ההדמיה.  
מתקן ההדמיה היה מורכב ממשטף רטוב בעל מבנה ציקלוני בו בוצע סיחרור של תמיסת הספגה. מתקן ההדמיה היה מצוייד במערכת בקרה באמצעותה הוזנה תמיסה כימית אשר הורכבה מחומרים מחמצנים, בסיסים וקטליזטור.

תמיסת ההספגה סוחררה באמצעות משאבה, ובאמצעות בקר מוליכות נשמרה תמיסת ההספגה ברמה המאפשרת ספיגה אופטימלית.

תהליך עבודתו של המשטף לווה בבקרה באמצעות האלמנטים הבאים:

בקרת ערך הגבה - לקביעת מינון החומר.

בקרת מוליכות - לביצוע ניקוזים.

בדיקות גזים - בדיקות הגזים בוצעו במערכת דיגום לפי שיטת E.P.A.

הגזים נדגמו, ותמיסות ההספגה מבקבוקי השטיפה נבדקו במעבדה באמצעות G.C ו-HPLC לקביעת ריכוזי ה-V.O.C בגזים הנפלטים.

לצורך השוואה וחישוב יעילות עבודתו של המשטף בוצעו דיגומי הגזים במקביל בארובת הכניסה למשטף וכן בארובת היציאה מן המשטף.



**תוצאות הטיפול באמצעות משטף הגזים**

להלן סיכום התוצאות שהתקבלו בדיגומים שבוצעו בארובת הכניסה והיציאה של מתקן ההדמיה:

ריכוזי V.O.C נדגמים במתקן הדמיה  $\text{mg/m}^3$

מתנול	פורמלדהיד	פנול	סוג V.O.C נדגם	מקום הדיגום
2580	354	518		ארובת כניסה למתקן ההדמיה
129	14.1	15.5		ארובת יציאה למתקן ההדמיה
95%	96.1%	97%		יעילות מתקן ההדמיה
	96.6%			יעילות כוללת פנול+פורמלדהיד
	95.4%			יעילות כללית

במקביל לבדיקות הגזים נמדדה כמות השפכים הנוצרת במתקן ההדמיה.

שפכי המשטף התקבלו בנתוני התפעול כדלקמן:

ערך הגבה - 10.5.

מוליכות -  $10500 \mu\text{mho}$

ריכוז פנול בשפכים - 26800 ppm

ריכוז פורמלדהיד בשפכים - 19450 ppm

ריכוז מתנול בשפכים - 282700 ppm

עבור נתוני השפכים דלעיל נמדדה כמות יומית של 640 ליטר ביממה.

**ניתוח תוצאות ומסקנות**

התוצאות שהתקבלו בהרצת מתקן ההדמיה מצביעות על יעילות גבוהה ואופטימלית לטיפול בחומרי V.O.C בגזי הפליטה במפעל הנדון.

ניתוח התהליך מבחינה אנרגטית מצביע על צריכת אנרגיה חשמלית כוללת של מתקן ההדמיה בסדר גודל של כ-12-15KWH וזאת כאמור לטיפול של 20% מהספיקה הכוללת של הגזים במפעל.

דהיינו, על בסיס נתון זה טיפול בכל כמות הגזים של המפעל תצריך אנרגיה חשמלית של 75KWH או עלות של  $4.5/\text{h}$  \$ שהינה שוות ערך לעלות שנתית של כ-21,000 \$ על בסיס 4500 שעות עבודה בשנה.

אולם, עדיין עלינו לטפל כאמור בכמות של כ-650 ליטר ליממה שפכים של מתקן ההדמיה או בכמות מעשית של  $3.25\text{m}^3/\text{DAY}$  שפכים מהמתקן המטפל במכלול הגזים של מתקן הייצור במפעל. בהנחה כי כמות זו של שפכים תטופל במשרפה להשמדת נוזלים בעלי תכולה גבוהה של V.O.C נערך חישוב של כמות האנרגיה הדרושה להפעלת משרפה מסוג זה. מן החישוב מתקבל כי צריכת הדלק להשמדת כמות יומית כאמור לעיל  $3.25\text{m}^3/\text{DAY}$  הינה כ- $375\text{ kg}/\text{DAY}$ . בהנחה של 280 ימי עבודה תהיה צריכת הדלק השנתית - 105 טון. עלות הדלק השנתית הצפויה - \$ 12,000.

לסיכום - העלות הכוללת של האנרגיה הנדרשת לטיפול בחומרי V.O.C מכמות של  $30,000\text{ m}^3/\text{h}$  בשיטת המזעור ע"י משטף ושריפת הנוזלים המרוכזים במשרפה הינה כמפורט מטה:

אנרגיה חשמלית -	\$ 21,000
אנרגיה טרמית -	\$ 12,000
סה"כ	\$ 33,000

חישוב שבוצע לקביעת עלות הטיפול השוטף הכולל כימיקלים, תחזוקה וחומרי עזר מראה כי עלות זו הינה כ- $8/h$ , \$, דהיינו עלות שנתית של - \$ 36,000.

סיכום סך כל העלויות מגיע להוצאה שנתית של \$ 69,000.

השוואת עלות זו לעלות המתחייבת במקרה של טיפול בבעיה בצורה המקובלת של שריפה במשרפה מראה חיסכון שנתי של \$ 516,000.

מנתון זה בלבד ברור מהי שיטת הטיפול המועדפת ובמיוחד כאשר תוצאות הפליטה של חומרי V.O.C בשיטה החדשה אשר פותחה ע"י "אקוטופ" עומדות בקריטריונים אשר נקבעו בתקני המשרד לאיכות הסביבה.

אולם, זאת ועוד, לא רק עלות התפעול השוטף בשיטה החדשה הינה בשיעור של כ-12% מהעלות בשיטה המקובלת, אלא מעבר לכך, השוואת עלויות הרכישה וההתקנה הראשוניים אף הם זולים לאין שיעור.

עלות המשרפה - \$ 750,000

עלות מתקן "אקוטופ" - \$ 350,000

דהיינו, עלות נמוכה בכ-50% מן העלות בפתרון הרגיל.

#### פיתוח הרעיון ויישומו לגבי מגוון חומרי V.O.C בגזי פליטה מתהליכים תעשייתיים:

חברת "אקוטופ" מספקת כיום שלושה מתקנים בקונפיגורציה שתוארה לעיל לתעשיית הלבידים עבור מזהמים מחסוג שתואר לעיל.

מעבר לכך השלימה חברת "אקוטופ" בדיקת היתכנות השיטה עבור פליטות במתקני ייבוש במצבעות טקסטיל וכן בתהליכים מסויימים בתעשיית הצביעה התעשייתית.

תוצאות הבדיקות חיוביות ביותר וחברת "אקוטופ" נמצאת בשלבים מתקדמים להצגת פתרונות דומים לתעשיות נוספות.

**סיכום**

השיטה שפותחה ע"י חברת "אקוטופ" הינה מבטיחה ביותר מבחינת יעילותה, נוחותה לתפעול, עלות נמוכה בהשקעה ראשונית ועלות זולה ביותר בתפעול שוטף.

חברת "אקוטופ" משקיעה מאמצים רבים לבדוק היתכנות השיטה במירב חומרי V.O.C האפשריים, אך גם התוצאות אשר התקבלו והושגו עד היום נותנות פתרונות טובים למספר ניכר ביותר של תעשיות. בשיטה זו ישנה תרומה משמעותית לאיכות הסביבה, למפעל המזהם ולמשק הלאומי לו היא חוסכת אנרגיה רבה ויקרה מלבד תרומתה לאיכות החיים של תושבי המדינה.

4

יום העיון בנושא: ניטור ומניעת זיהום אוויר בחומרים אורגניים נדיפים VOC  
מוסד שמואל נאמן, הטכניון חיפה, 27 ליוני 1996.

## מניעת זיהום אוויר בחומרים אורגניים נדיפים (VOC)

ד"ר יהודה גולדשמיד

י. גולדשמיד - חברה לתכנון והנדסה סביבתית בע"מ

### 1. מבוא

תרכובות אורגניות נדיפות, או בשמן האנגלי Volatile Organic Compounds ובקצור VOC כשמן כן הן. אלה חומרים אורגניים, בדרך כלל נוזלים, אולם יתכנו גם גזים ומוצקים שלחץ האדים שלהם בטמפרטורת החדר עולה על גודל גבולי שהוגדר באורת שרירותי כ- 1 מיליבר. באופן כללי אפשר לאומר שבהגדרה זו נכללים חומרים אורגניים שטמפרטורת הרתיחה שלהם נמוכה מכ- 250°C ויש להם בדרך כלל פחות מ- 12 אטומי פחמן במולקולה.

ה- EPA האמריקאי משייך תרכובות אורגניות לקבוצת ה- VOC אם היא ממלאת אחד משני תנאים או שניהם:

א. תרכובת אורגנית המשתתפת בראקציות פוטוכימיות שאחד מתוצריהן הוא אוזון, או מחמצן אחר.

ב. כל חומר אורגני שמגיב כ- VOC בשיטה האנליטית שהוגדרה למדידת VOC. (שיטות מס. 18, 24, 24A, 25, 25A, 25B).

מאחר ש- VOC אינו תרכובת מוגדרת לכן מגדירים את התוצאה באחת משתי דרכים:

א. חל"מ או חל"ב מבוטא כפחמן.

ב. חל"מ או חל"ב מבוטא כחומר ששמש בכיול המכשיר.

הענין שלנו בחומרים האורגניים הנדיפים נובע משתי סיבות עיקריות:

א. חלק גדול מהם מוגדרים כחומרים מסוכנים. (ברשימת ה- EPA של 189 חומרים מסוכנים נכללים חומרים אורגניים רבים).

ב. החומרים האורגניים תורמים לתופעת המחמצנים הפוטוכימיים. (חומרים אורגניים בצרוף תחמוצות חנקן ובהשפעת קרינת השמש יוצרים אוזון).

קיימות גם סיבות נוספות כגון: חלק מהם נכללים ברשימת החומרים המסרטנים, חלקם בולעי קרינה אינפרה אדומה וככאלה מגבירים את אפקט החממה ועוד.

השמושים העיקריים בחומרים האורגניים השייכים לקבוצת ה- VOC הם: דלק, ממיסים, טיהור שפכים ומוצרי ביניים ביצור כימיקלים. חומרים אורגניים נדיפים רבים מקורם בטבע ואינם קשורים בפעולות האדם.

המשרד לאיכות הסביבה עומד לפרסם תקני פליטה לקבוצה גדולה מאד של חומרים מקבוצת ה- VOC. תקני הפליטה שנקבעו נמוכים ולהם השלכה על סוג הציווד בו נבחר ועל עלות המתקנים הדרושים ועלות תפעולם. מטרת הרצאה זו לסקור בקצרה את השיטות והציווד העומדים לרשותנו כדי למנוע פליטת VOC לאויר. בהמשך היום תינתנה מספר הרצאות שתרחבנה נושאים

ספציפיים, לכן נצטמצם באותם נושאים ונרחיב בנושאים שלא ידונו בהרצאות נפרדות במסגרת כנס זה.

## 2. רשימת שיטות למניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים

מוכרות מספר שיטות למניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים החל מהחלפתם בחומרים שאינם מזהמי אויר ועד להרחקתם מזרם האויר. להלן רשימת שיטות בהן משתמשים להרחקת מזהמים אורגניים נדיפים מזרם אויר.

1. החלפת חומרים אורגניים נדיפים בחומרים אחרים שאינם נכללים בקבוצה זו.
2. מניעת פליטה של חומרים אורגניים נדיפים, אם ע"י אטימה ואם ע"י החלפת נפחים.
3. ספיחה ע"י חומר סופח (כגון פחם פעיל) עם או בלי רגנרציה.
4. שריפה רגילה, או קטליטית.
5. עיבוי בפני עצמו, או כחלק ממערך טיהור אויר.
6. ספיגה.
7. חמצון בפזה גזית.
8. שיטות אחרות.

## 3. לחץ אדים, שווי משקל ואיזוד

כל חומר נוזל, או מוצק, נמצא בשווי משקל עם אדיו. רכוז האדים הוא פונקציה של הטמפרטורה ואנו מודדים אותו ביחידות של לחץ חלקי. בטמפרטורת הרתיחה לחץ האדים שווה תמיד ללחץ האטמוספרי. אם נרחיק את האדים הנמצאים בשווי משקל, הנוזל יתאייד כדי להחזיר מחדש את מצב שווי המשקל. ככל שלחץ האדים של חומר נתון גבוה יותר בטמפרטורה נתונה החומר נדיף יותר. לחץ האדים של חומר נקי נתן לחשוב מתוך משוואת קלאוזיוס קלפירון אשר באופן כללי ניתנת להצגה בצורה:

$$\log p = A - \frac{B}{(T - C)}$$

הגדלים A, B ו-C קבועים נסיוניים.

כאשר החומר אינו נקי אלא בתמיסה, נתן לחשב את הלחץ החלקי שלו בפזה הגזית מתוך חוק ראול:

$$p_i = x_i \cdot p_i^*$$

במשוואה זו:

$p_i$  - הוא הלחץ החלקי של החומר i באדים.

$x_i$  - הוא שבר המולים של חומר i בתמיסה.

$\rho_i$  - לחץ האדים של החומר הטהור i.

משואות אלה מאפשרות לחשב את רכוז אדי חומר אורגני באויר הנמצא במגע עם החומר הטהור, או עם תמיסה. הערכים המתושבים מניחים שווי משקל. במציאות דרוש זמן אין סופי כדי להגיע לשווי משקל, לכן הרכוזים המתושבים הם גבול עליון ובמציאות הרכוז המדוד יהיה בדרך כלל נמוך מהמתושב.

מכל מה שאמרנו עד כה נתן להסיק את המסקנות הבאות:

- א. ככל שהחומר רותח בטמפרטורה נמוכה יותר רכוזו באויר גבוה יותר.
- ב. הרכוז באויר גדל ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר.
- ג. כאשר החומר נמצא בתמיסה הרכוז שלו באויר קטן בפרופורציה לרכוז שלו בתמיסה.
- ד. כאשר מסלקים את האדים הנמצאים בשווי משקל עם הנוזל, הנוזל יתאייד כדי לחזור וליצור מחדש את מצב שווי המשקל.
- ה. אם נעביר אויר חם מעל תמיסה חמה ואח"כ נקרר את האויר חלק מהאדים יתעבה כדי לחזור למצב שווי המשקל החדש המוכתב ע"י הטמפרטורה הנמוכה.

#### **4. החלפת חומרים אורגניים נדיפים באחרים**

שיטה זו למניעת זהום אויר בחומרים אורגניים נקוטה במספר תעשיות. דוגמה לכך היא תעשיית הצבעים בה נעשית היום עבודה רבה לעבור מצבעים על בסיס ממיסים אורגניים לצבעים על בסיס מים. למעשה צבעים על בסיס מים הם בד"כ צבעים מרוכזים על בסיס חומר אורגני שיצרו מהם אמולסיה במים. אחרי איוד המים נשארת כמות קטנה של ממס אורגני שגם הוא מתאייד. שיטה זו מתאימה למספר סוגי צבעים (בעיקר צבעים המשמשים לצביעת בתים) ופיתוחה נמשך לשמושים אחרים.

במקרים אחרים מחליפים ממס נדיף בממס פחות נדיף וכך מקטינים את פליטת החומר האורגני לאויר. בתהליכי יצור רבים החליפו ממיסים אורגניים באחרים בעלי טמפרטורת רתיחה גבוהה יותר, בחומרים שאינם מסכנים את הבריאות, או בחומרים אורגניים המגיבים בקושי בראקציות יצור האוזון.

ברור שככל שהדרישות להקטנת פליטת חומרים אורגניים לאויר הולכות ונעשות חמורות, כך מתפתח המחקר והישום של החלפת חומרים אורגניים נדיפים באחרים.

## 5. מניעת פליטה של חומרים אורגניים נדיפים

בשטח זה ברצוני להביא שתי דוגמאות:

- א. השמוש בגג צף במיכלי אחסון דלקים בעלי לחץ אדים גבוה.
- ב. ישום שיטת החלפת נפחים בתחנות דלק.

### **5.1 שמוש בגג צף**

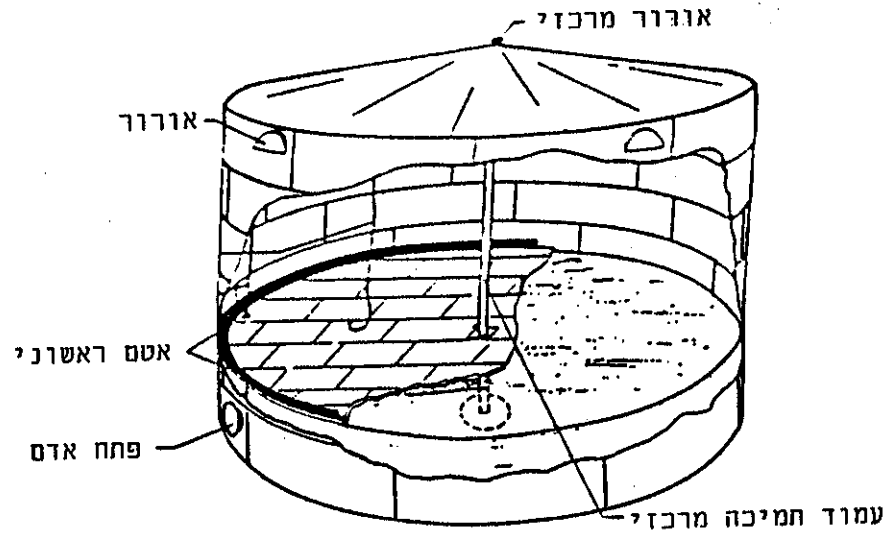
האוויר, במיכלים בהם מאחסנים חומרים נדיפים, רווי באדי החומר המאוחסן (לדוגמא בנזין). בעת הזרמת נוזל למיכל דוחפים החוצה אוויר, שהנוזל תופס את מקומו ואוויר זה רווי בחומר אורגני. כדי למנוע דחיפת אוויר רווי החוצה משתמשים בגג הצף על פני הנוזל, כך שבין הנוזל לגג אין רווח אוויר. בעת הכנסת נוזל הגג מתרומם תוך כדי עליית פני הנוזל ולהיפך. הרווח בין הגג לקירות סגור בעזרת סגר קפיצי המאפשר תנועה מעלה - מטה אולם אינו מאפשר לאוויר ולאדים לעקוף אותו. פתרון זה אינו מונע פליטת אדי חומר אורגני לחלוטין, אולם מקטין זאת באורח משמעותי והוא מחויב בבתי זיקוק ובחוות מיכלים בהן מאחסנים דלק. (ראה שרטוט מס. 1).

### **5.2 החלפת נפחים**

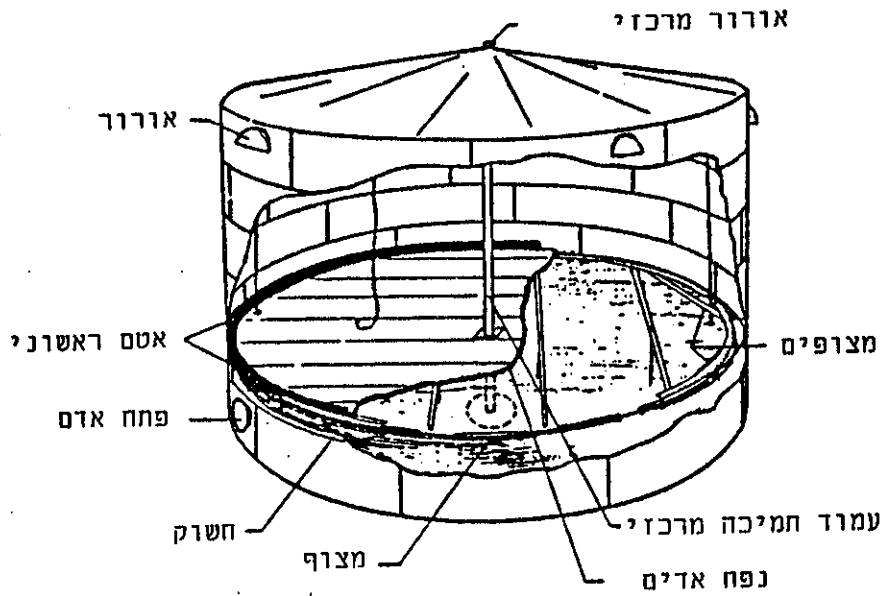
עקרון שיטת החלפת הנפחים פשוט. כאשר מזרימים נוזל ממיכל אחד לשני, אזי למיכל המתרוקן נכנס אוויר ואילו מהמיכל המתמלא יוצא אוויר. בשיטת החלפת הנפחים מחברים את שני המיכלים בצנור ומזרימים את האוויר מהמיכל המתמלא למיכל המתרוקן. דוגמא קלאסית לכך היא תחנת דלק. בתחנת הדלק מותקנים מיכלים תת קרקעיים בהם מאחסנים את הדלק. הדלק מגיע במיכלית הממלאה את המיכלים ונשאב למילוי מיכלי המכוניות. בשני השרטוטים הללו רואים:

- א. תחנת דלק בה מותקן צנור המחבר את מיכל הדלק למיכלית. (ראה שרטוט מס. 2).
  - ב. תחנת דלק בה מותקן בנוסף גם צנור נוסף המחזיר את אדי הבנזין ממיכל המכונית למיכל האחסון. (ראה שרטוט מס. 3).
- הראשון נקרא שלב א' ואילו השני שלב ב'. ברוב המדינות בעולם מיישמים רק את שלב א'. התקנת הצנור בשלב א' מקטינה ב- 95% את פליטת אדי הדלק בעת מלוי מיכל האחסון. שלב ב'





גג צף במגע



גג צף ללא מגע

שרטוט מס. 1: גגות צפים במיכלי דלק.

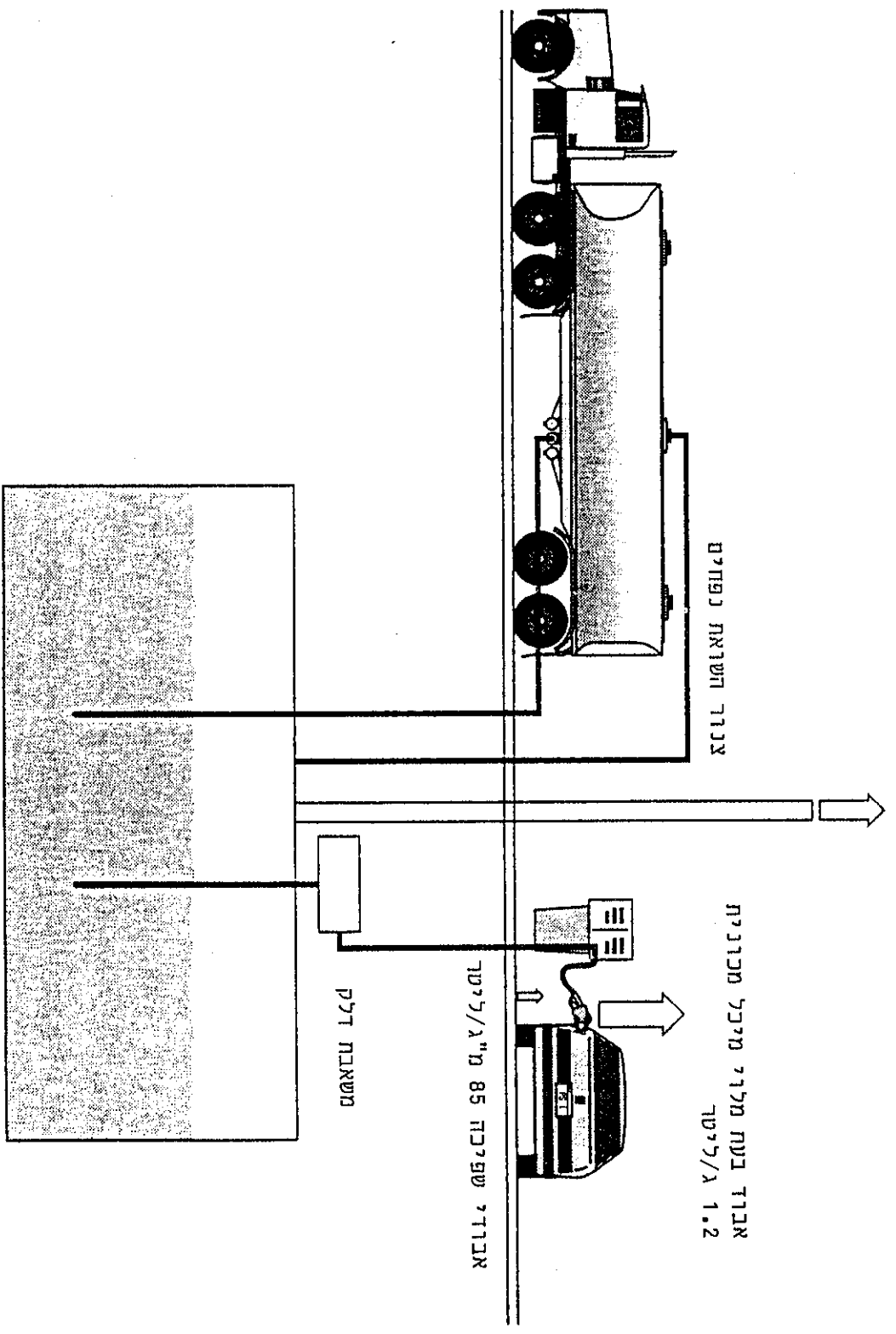
צנור אורזור : אבוד בעת מלוי מיכל 58 מ"ג/ליטר  
אבוד נשימה 119 מ"ג/ליטר

צנור השואת נפחים

אבוד בעת מלוי מיכל מכונת  
1.2 מ"ג/ליטר

אבודי שפיכה 85 מ"ג/ליטר

משאבת דלק



שטחים מס. 2 : החלפת נפחים בחתנת דלק (שלב א').

מלוי מיכל 58 מ"ג/ליטר  
הפסד 13 מ"ג/ליטר

אורור

צנור השואת נפחים

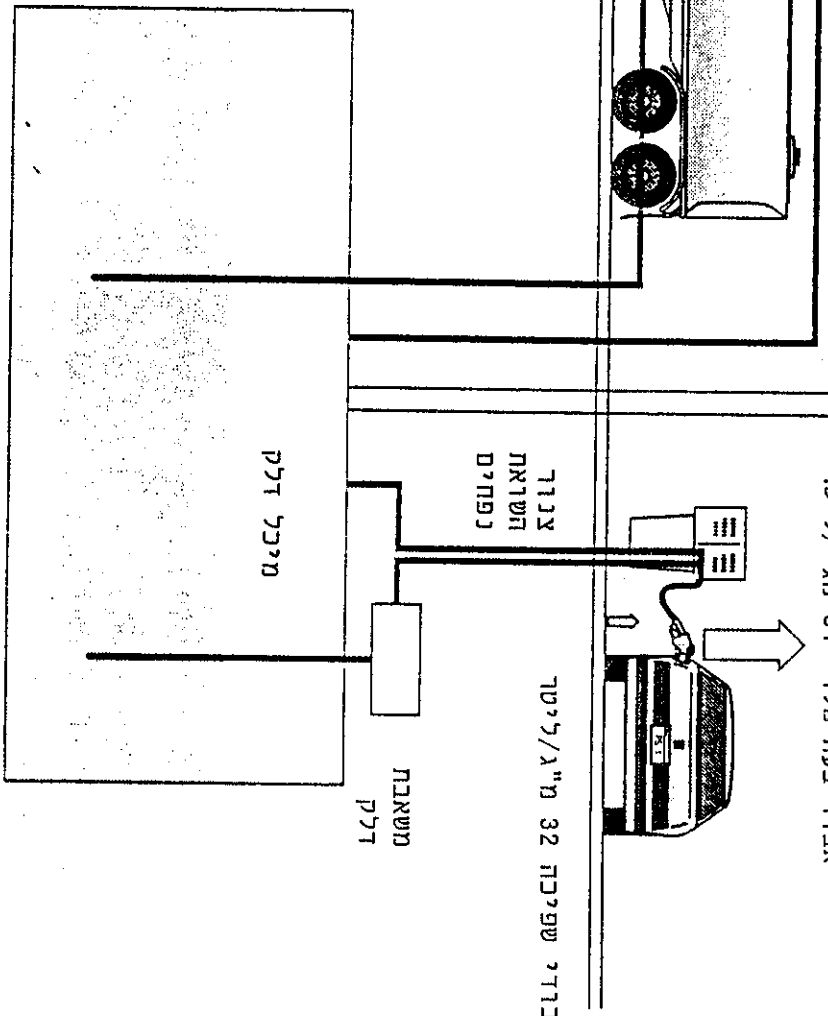
אבוד בעת מלוי 61 מ"ג/ליטר

אבודי שפיכה 32 מ"ג/ליטר

צנור השואת נפחים

משאבה דלק

מיכל דלק



שרטוט מס. 3: החלפת נפחים בחומת דלק (שלב ב').

מקטין את פליטת אדי הדלק ב- 95% ממילוי מיכלי המכונות וב- 62% את האיוד מדלק שנשפך על הרצפה.

נתן לסכם ולאמר כי אטימה, התקנת גג צף והחלפת נפחים מקטינים משמעותית את קצב פליטת אדי חומרים אורגניים נדיפים לאויר.

שיטת הגג הצף והחלפת נפחים, ניתנות לישום רק במקרים ספציפיים, אולם בהשוואה לשיטות אחרות הן בין הזולות ועדיפות על השיטות האחרות אותן נסקור בהמשך.

#### 6. שמוש בממברנות להפרדה

קיימות היום בשוק ממברנות בהן השכבה המפרידה מבוססת על סיליקון המאפשרות הפרדה בין אויר לבין אדי חומר אורגני. כלכלית ממברנות מתאימות כאשר רכוז החומר האורגני באויר גבוה (מעל 1%). במקרה כזה דוחסים את הגז ללחץ של 3-15 אטמ' ואח"כ מקררים ומעבים את החומר האורגני ומפרידים בין הגז לנוזל. את הגז שעדין עשיר בחומר אורגני מעבירים דרך ממברנות החדירות לחומר האורגני פי עשר עד פי מאה בהשוואה לאויר. מקבלים זרם אויר העומד בתקן הפליטה וזרם שני העשיר בחומר אורגני. את הזרם העשיר בחומר אורגני מחזירים למדחס והוא עובר מחדש את תהליך ההפרדה.

בשרטוט מס. 4 מוצג תהליך ההפרדה בצורה סכמתית.

בדרך כלל מתקנים מעבה לפני המדחס כדי להקטין את רכוז החומר האורגני באויר ומשאבת ואקום ביציאה מהממברנה, כדי להגדיל את הפרש הלחצים בין שני צידי הממברנה.

יתרון הבולט של הממברנות בהפרדת אדי חומרים אורגניים מוכלרים (לא קיימת סכנת קורוזיה הקיימת בספיגה על גבי פחם פעיל ורגנרציה ולא קיים הצורך בספיגת מימן כלורי אחר שריפה).

יתרון שני הוא בכך שאין צורך לעבות בטמפרטורות נמוכות מאד כדי לעמוד בדרישות תקני הפליטה. נתן להסתפק בעיבוי בטמפרטורה גבוהה יחסית. יתרון שלישי הוא בהשבת הממס

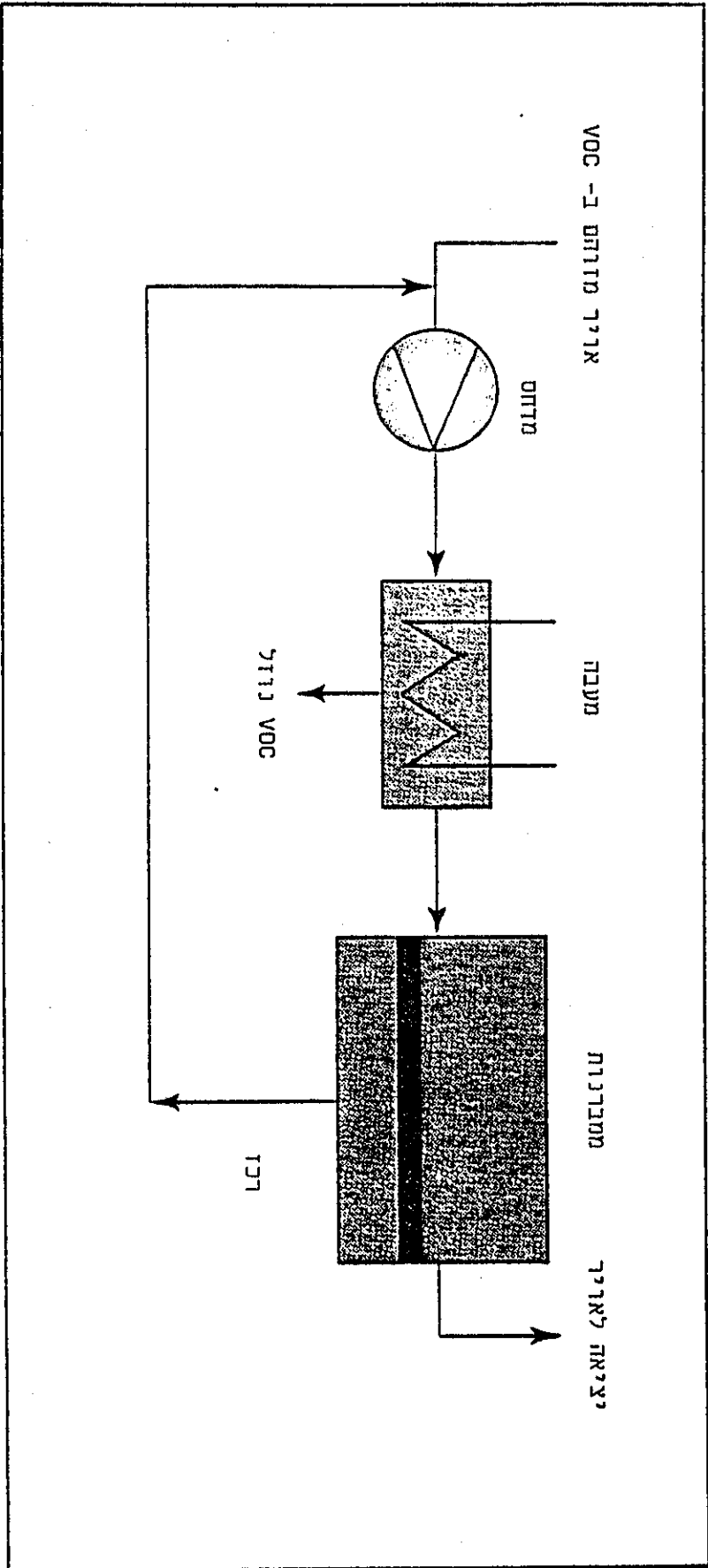
לשמוש חוזר. (בד"כ אחר טיהור נוסף). חומרים שלהשבתם השתמשו בתהליך זה הם: בנזן, מתנול, מתיל ברומיד, מתילן כלוריד, מתיל אתיל קטון, פרכלוריאתיילן, טולואן, 1.1.1

טריכלורואתן, טריכלורואתיילן, ויניל כלוריד וקסילן.

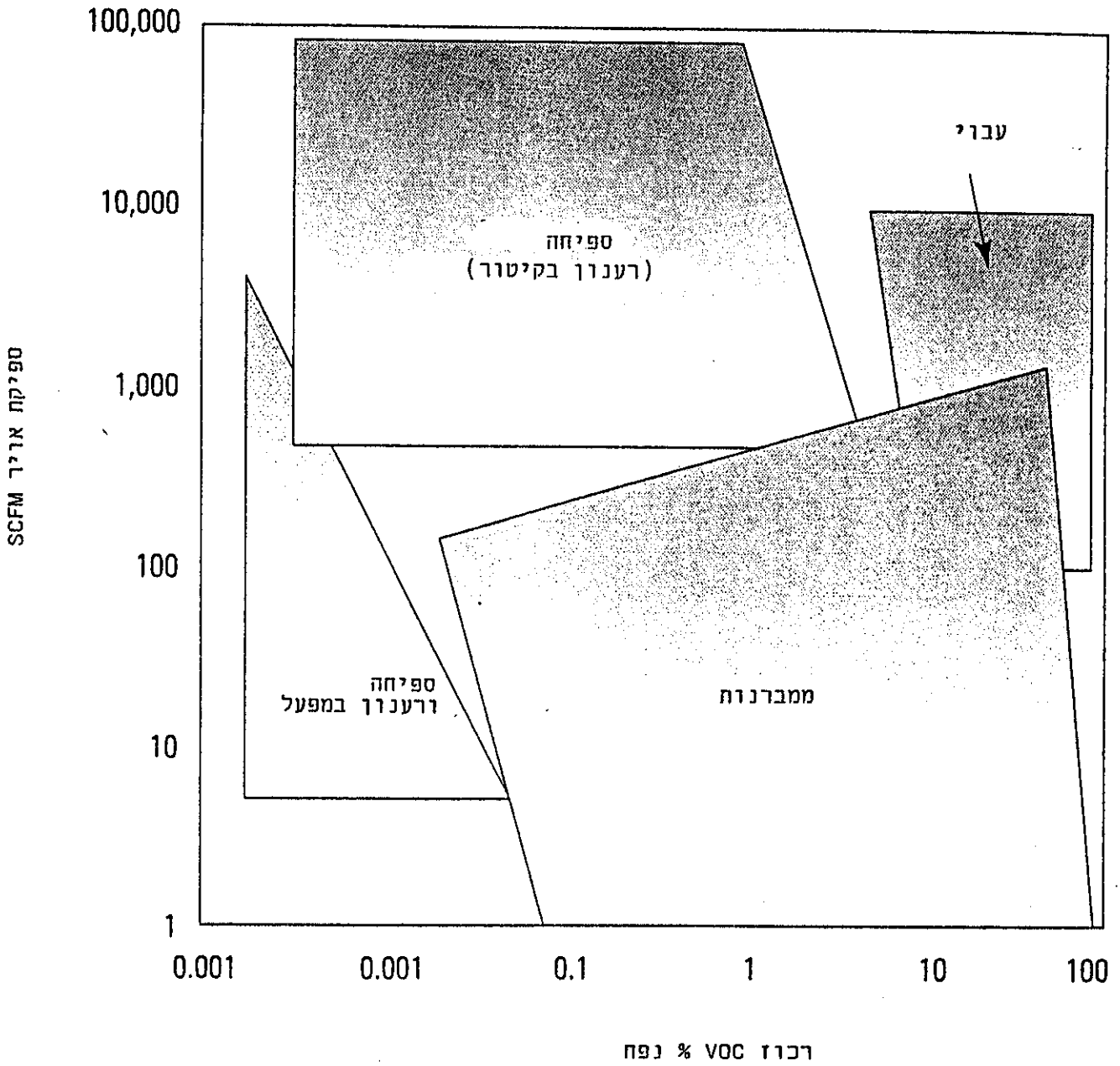
בשרטוט מס. 5 מוצגות טכנולוגיות שונות להפרדת חומרים אורגניים מאויר לבד משריפה וטווחי פעולתם.

דוגמא לשמוש בממברנות היא בטפול בזרם המכיל כ- 20% דיכלורומתן באויר. הגז בספיקה של 115 מק"ש עובר דרך מערך הטיהור והיצרן מבטיח שרכוז הדיכלורומתן ביציאה מהממברנה לא

יעלה על 20 מ"ג/מקט"י. שטח הממברנה הדרוש כ- 9.5 מ"ר, עלות הציוד כ- 520,000 מ"ג ועלות המתקן המורכב 2.4 מליון שקל.



שרטוט מס. 4: החזקת VCC מאריך בשיטת הממברנות - מוריים כללי.



שרטוט מס. 5: בחירת השיטה להרחקת VOC מאויר על בסיס הרכוז וספיקת האויר.

## 7. ספיחה על גבי חומר סופח

### 7.1 תאור כללי

שיטה מקובלת וידועה להרחקת חומר אורגני מאויר, היא ספיחה. החומר הסופח מאופיין בשטח פנים גדול מאד יחסית למשקלו כתוצאה מנקבוביות רבות והחומר האורגני נקשר לשטח הפנים של המוצק ומתעבה בתוך הנקבוביות.

ספיחה היא בדרך כלל פעולה פסיקלית - התחברות של מולקולה אורגנית למוצק בקשר ואן דר ולסי, או אחר, אולם מוכרת גם ספיחה כימית שבה הקשר בין הסופח למסופח הוא כימי. מבדילים בין ספיחה פסיקלית לכימית ע"י מדידת חום הספיחה. בספיחה כימית כמות החום המשתחררת גדולה יותר ונמצאת בתחום סדר הגודל של חום ראקציה. כמות החום המשתחררת בספיחה פסיקלית היא בד"כ פעמים עד שלוש פעמים חום העיבוי של החומר הנספח.

מוכרים היום חומרים רבים המשמשים כסופחים לחומרים אורגניים. הקבוצות העיקריות הן: פחם פעיל לסוגיו, זאוליטים הידרופוביים, אלומינוסיליקטים אלקליים וחומרים פלסטיים בד"כ על בסיס סטירן ודיוניל בנוזן. (קיימים בנפרד חומרים רבים לספיחת חומרים אנאורגניים). עד היום הזול מכלם הוא פחם פעיל שמחירו \$1-5/ק"ג.

מבטאים את הספיחה (היחס בין רכוז החומר הנספח באויר המבוטא בדרך כלל בשבר מולים, או בלחץ חלקי, לבין כמות החומר הנספחת ליחידת משקל של סופח במצב שווי משקל) באיזותרמת ספיחה. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר פחות חומר נספח ליחידת משקל של סופח. גודל נוסף המשפיע על יעילות הספיחה הוא הלחות היחסית. יעילות הספיחה יורדת כאשר הלחות היחסית עולה על 75%. הגבול המקובל לספיחה הוא  $40^{\circ}\text{C}$  ו-75% לחות יחסית. תחום הספיחה המקובל הוא 1-10% (משקל חומר ספוח למשקל חומר סופח). בתכנון מתקן פחם פעיל מעריכים את כמות החומר הנספח ליחידת משקל של חומר סופח, בכרבע מהכמות התאורטית שמתקבלת מאיזותרמת הספיחה.

פרט לתנאי העבודה (טמפרטורה, לחות, לחץ, רכוז וכד') גם לחומר עצמו יש השפעה על יעילות ספיחתו. חומרים אורגניים הנספחים גרוע לפחם הם חומרים שהמולקולה שלהם קטנה (חומרים אורגניים שיש בהם פחות משלושה אטומי פחמן), חומרים פולריים (בעלי דיפול מומנט גבוה) וחומרים בעלי מולקולות גדולות במיוחד העלולות להתקשות בדפוזה דרך הנקבוביות של החומר הסופח.

קינטיקת הספיחה היא פונקציה של הדיפוזיה של החומר הנספח בתוך נקבוביות החומר הסופח. דרושות בדרך כלל כשתי שניות של זמן מגע להבטיח ספיחה מלאה. יעילות ספיחה גבוהה, בדרך כלל מעל 95% ורכוז החומר האורגני באויר העוזב את מצע הפחם הפעיל נמוך בד"כ מ-20 חל"מ. הצטבר בעולם נסיון רב בספיחת החומרים האורגניים הבאים על פחם פעיל: טולואן, הפטן, הקסון, פחמן ארבע כלורי, אצטון, אתיל אציטת, מתיל אתיל קטון, נפתלן ומתילן כלוריד.

הספיחה אינה תהליך אחיד. החומר האורגני נספח בעיקר לפחם הפעיל איתנו בא במגע בתחילת דרכו. לכן לאחר זמן נגיע למצב בו הפחם בהתחלת מצע המספח רווי בחומר נספח ואילו בקצה המצע - במקום בו עוזב הגז הטהור את המצע טרם התחילה ספיחה והפחם נקי לגמרי מחומר אורגני. כאשר בוחנים את כמות החומר הספוח, יחסית לכושר הספיחה, לאורך מצע הפחם, מנקודת הכניסה ועד לנקודת היציאה, מוצאים שהחלק הראשון של המצע רווי ובנקודה מסוימת

היחס כמות חומר ספוח לכמות חומר סופת, הולך ויורד עד לאפס. לעקומה הרכוז צורת S הפוכה (אנו מכנים אותה בשם (S shape curve). התוצאה היא שלאחר זמן כשהמצע רווי בחלקו יתחיל החומר האורגני לצאת ברכוז נמוך ממצע הפחם ורכוז זה ילך ויגדל עד שכל הפחם יהיה רווי. לעקומה קוראים עקומת פריצה (Break through curve) ולנקודה בה יעילות הפחם מתחילה לקטון קוראים נקודת השבר (Break Point). כאשר רכוז המזהמים ביציאה מגיע לרכוז הגבולי המותר, יש צורך ברענון המצע.

להלן השלבים בבחירת פחם פעיל ובבדיקת מידת התאמתו לתפקיד:

1. ודא שהפחם מתאים לתפקידו ורכוז החומר האורגני ביציאה אינו עולה על הרכוז המותר. זאת נתן לבדוק בעזרת איזותרמת הספיחה בטמפרטורת העבודה המקסימלית.
2. ודא שנתן לרענון את הפחם ומהי שיטת הרענון המתאימה.
3. ודא שאין חומרים הנשארים ספוחים למרות הרענון. במדה ויש כאלה ברר האם נתן להרחיקם מזרם הגז לפני הספיחה (כגון ע"י עבוי, סנון או דרך אחרת).
4. ערוך נסיון כדי לוודא את אמינות ההנחות. (מתאים פילוט של חבית פחם פעיל). ספקים רבים מוכנים לספק מתקן נסיוני. שמור בצד כליטר פחם פעיל להשוואה עם הפחם אחרי הספיחה והרגנרציה. אחת השיטות הטובות להשוואה היא שיטת הבוטן - כלומר מדידת כמות החומר הנספחת.
5. בחן את שכבת הפחם שבאה ראשונה במגע עם האויר להצטברות משקעים.
6. אם בכוונתך להשתמש בממס לרענון בחן את יעילות הממס ע"י השהייה לשעה של הפחם הרווי בממס ואח"כ בדוק מה רכוז החומר האורגני בממס. האם מאזן החומר נסגר?
7. בדוק את השבת הממס (שיטת השבה, יעילות הרענון, הרחקת המזהם).
8. בחן את השפכים המתקבלים האם הם מתאימים להזרמה לביב עירוני, או שהם מתייבים טיפול נוסף? איזה טיפול ומה עלותו?
9. רצוי לחזור על הנסיון מספר פעמים כדי לוודא שהפחם אינו מאבד יעילות.

## 7.2 חומרים המשמשים לספיחה

פחם פעיל הוא המוכר מכלם. את חסרונותיו מנינו (מגבלת טמפרטורה, מגבלת לחות, מגבלת חומרים ועוד) יתרונותיו הגדולים הם: מחירו הזול והנסיון הרב שנצבר בעבודה אתו. זאוליטים הידרופוביים - יקרים מפחם פעיל, סופחים היטב גם בלחות יחסית גבוהה עד 90%, אולם יעילותם יורדת מהר מפחם ולכן הם מתייבים רענון לעיתים קרובות יותר. פולימרים - גם הם יקרים מפחם. יתרונם בכך שנתן לתפור אותם כדי להתאימם לחומר ותנאים ספציפיים. גם הם סופגים היטב בלחות יחסית גבוהה. סיבי פחם - לסיבים עדיפות על גרגרי פחם פעיל. שטח הפנים שלהם גדול יותר וזמן הרענון קצר. יתרונם הגדול בכך שהסיבים מכילים פחות "מתכות מעבר" מפחם פעיל ולכן נמנעות ראקציות פירוק קטליטיות של החומרים הנספחים. כך קטן יצור מימן כלורי ולכן לא קיימת סכנת קורוזיה ונתן לבנות את הכלים בהם מאוחסן הפחם מחומרים זולים. יש לזכור כי הראקציות הקטליטיות אקזותרמיות ועלולות לגרום להצתת הפחם. בסיבי פחם הסכנה פחותה.



### 7.3 מתקנים בהם משתמשים בחומר סופח

מוכרים מתקנים שונים בהם משתמשים בחומר סופח. להלן פירוט העיקריים שבהם.

#### 7.3.1 ספיחה ללא רגנרציה

כאשר רכוז החומר האורגני בגז לניקוי נמוך יחסית (עד כ- 10 חל"מ) משתמשים במצע פחם פעיל ללא רגנרציה ומחליפים את הפחם כשהוא רווי, דוגמאות לכך הן:

1. ניקוי אויר אולמות במערכות מזוג האויר.
2. מתקני ספיחה על פתחי אורור של מיכלי אחסון לחומר אורגני.
3. מניעת ריח מביבים ע"י סגירת פתח האורור בפחם פעיל.

נתן לסכם כי השמוש בפחם פעיל ללא רגנרציה הוא בד"כ במתקנים המיועדים למנוע מטרדי ריח ובכל מקרה שרכוז החומר האורגני באויר נמוך. מדובר בדרך כלל בכמויות קטנות של פחם - עד עשרות ק"ג ובהחלפה פעם בששה חדשים עד שנה.

בדרך כלל פחם זול משריפה כאשר רכוז החומר האורגני נמוך מכ- 100 חל"מ, נתן לרענן את הפחם בקיטור ונתן להפריד בקלות בין המים לחומר האורגני.

#### 7.3.2 ספיחה עם רגנרציה

רגנרציה, או רענון, של הפחם הפעיל נעשית ע"י חמום הפחם ונדוף החומר שנספח אליו. מפחד שריפה אין מרעננים באויר. החומר המקובל ביותר לרענון הוא קיטור, גז אחר הוא חנקן בטמפ' של  $100^{\circ}\text{C}$ , או חנקן ב-  $300^{\circ}\text{C}$ . רקופרציה, ויצור פחם פעיל נעשים ע"י חמום לכ-  $1000^{\circ}\text{C}$ .

כאשר מתכננים מתקן עם רגנרציה הוא בנוי בד"כ משנים, או שלושה מיכלים, אחד בעבודה והשני ברענון. אם הרענון נעשה בקיטור יש גם שלב של יבוש וקרור הפחם, לכן יש שבונים שלושה מיכלים. בהמשך נבחן את נושא הרענון ביתר הרחבה.

#### 7.3.3 שמוש בפחם פעיל לרכוז החומר האורגני

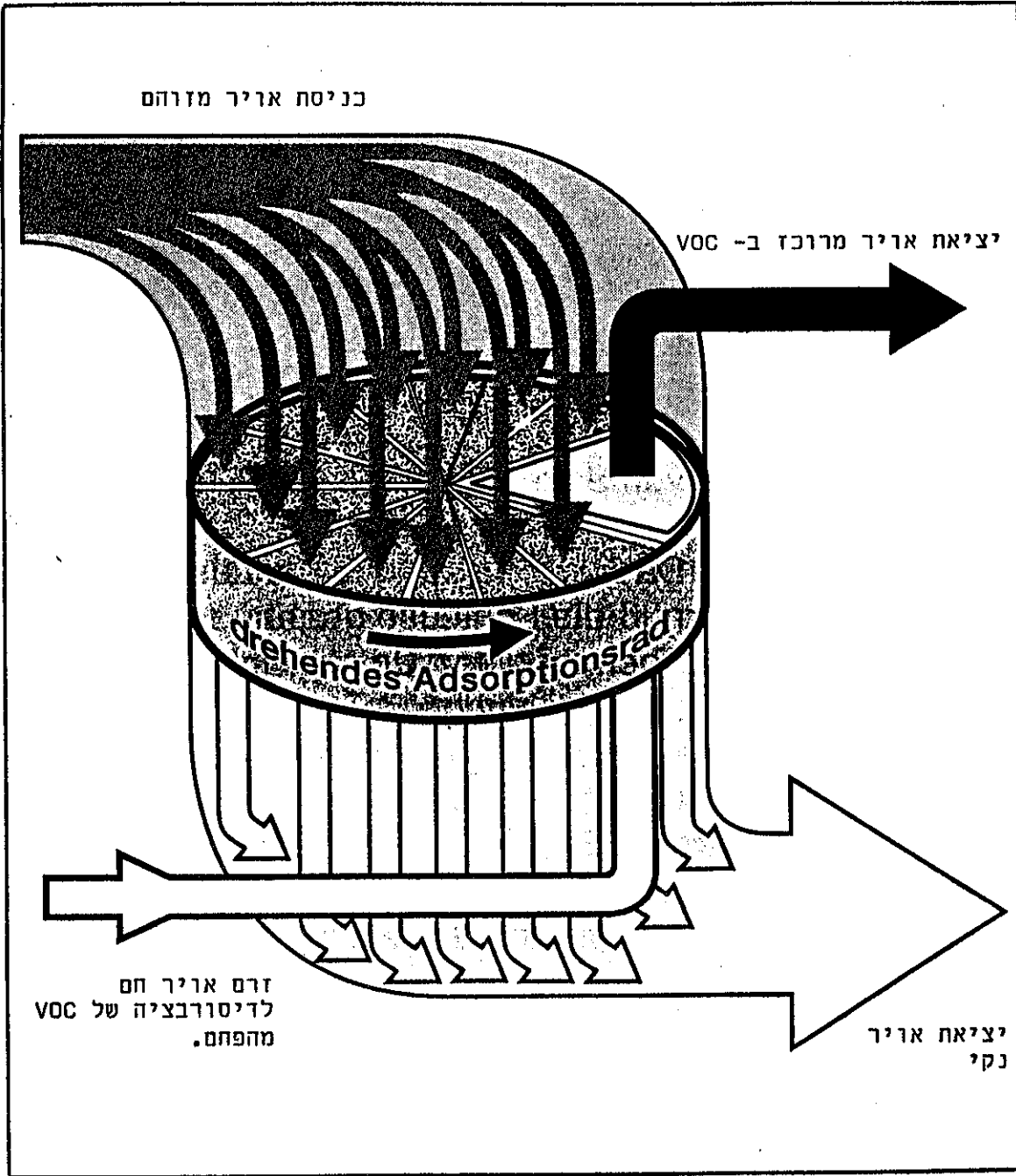
במקרים רבים מעוניינים לרכז את החומר האורגני בזרם הגז כדי להקטין את המתקן הסופי בו מטפלים בחומר האורגני. עושים זאת בעזרת גלגל סובב מלא בפחם פעיל (ראה שרטוט מס. 6). הגז זורם דרך הפחם והחומר האורגני נספח לפחם. הגז הנקי נפלט החוצה, הגלגל מסתובב ומגיע לשלב הרענון. מרעננים את הפחם בעזרת אויר חם. בשלב שלישי מקררים ועם תום הסיבוב הפחם חוזר לשלב הספיחה. את האויר המכיל חומר אורגני ברכוז הגבוה מהרכוז בכניסה (בדרך כלל מרכזים ביתס של 10:1) מזרימים למתקן הטיהור - מבער אחורי בדרך כלל.

משתמשים במתקן הרכוז כאשר הספיקה גבוהה והרכוז נמוך מ- 1,000 חל"מ. לגלגל מפל לתץ נמוך, כ- 25 מ"מ מים ולכן עלות הפעלתו נמוכה.

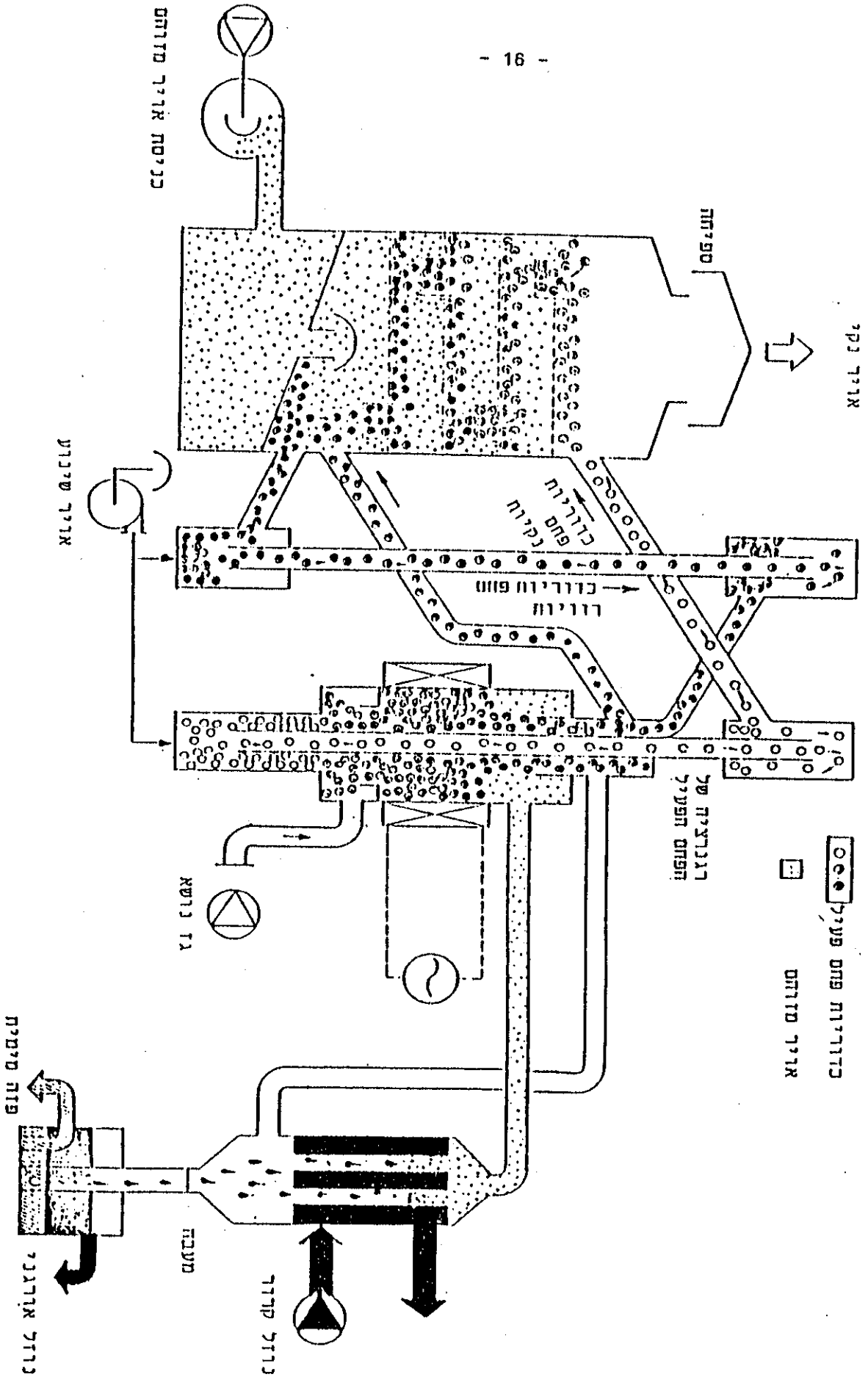
מתקנים כאלה פועלים במקומות רבים בעולם, אולם כנראה שהם סובלים מאטימה לא טובה בין חלק הניקוי לחלק הרענון וכמות מסוימת של חומר אורגני חוזרת לאויר ונפלטת החוצה.

## 7.3.4 מצע מרחף

כדי להפוך את הספיחה עם רענון מתהליך מנתי לרצוף, פותחו מתקני ספיחה במצע מרחף. שני יצרנים של מתקנים כאלה הם חברת Kreha בארה"ב וחב. Polyad בשוודיה. שתי החברות משתמשות בכדוריות קטנות של פחם פעיל, או פולימר, לספיחת החומר האורגני במצע מרחף. הכדוריות בקוטר 1-2 מ"מ. הכדוריות הרוויות זורמות למתקן שני בו מרעננים אותן בעזרת חנקן חס. את החנקן העשיר בחומר אורגני מעבירים דרך מעבה ואוספים את החומר האורגני במיכל נפרד. החנקן לאחר העיבוי מוזרם למצע המרחף ושם עודף החומר האורגני נספח על הכדוריות. גם הכדוריות לאחר הרענון חוזרות למצע המרחף והמעגל מתחיל מחדש. בשרטוט מס. 7 מוצג תזרים המתקן שמוכרת חברת Kreha.



שרטוט מס. 6: גלגל פחם פעיל לרכוז החומר האורגני בזרם האוויר



אוויר נקי

כדוריות פתם פעיל

אוויר סדומה

ספירה

כדוריות  
גומי

כדוריות

רונרציה של  
הפתם הפעיל

כניסת אוויר סדומה

אוויר שינוע

גז נושא

פוח מים

כדור ארדגני

מעבה

כדור קרדר

שרטוט מס. 7: ממקו לשהוד אוויר מתומרים ארדגניס מתוצרת חברת AREHA.

## 7.4 שיטות רענון

### 7.4.1 רענון בקיטור

בכל המקרים בהם רכוז החומר האורגני גבוה יחסית (עולה על כ- 100 חל"מ) ספיחה ללא רענון הופכת יקרה לאור המחיר הגבוה של פחם פעיל. כדי לרענן את הפחם יש לחמם אותו ואז החומר הספוח משתחרר, ברוב המקרים רענון נעשה בקיטור. דרושים 3-5 ק"ג קיטור לשחרור 1 ק"ג חומר אורגני ספוח. מפסיקים את הזרמת האויר למיכל עם הפחם הרווי, ומזרימים קיטור. הקיטור בתערובת עם החומר האורגני עוזב את המיכל וזורם למעבה. את מעט הקיטור שלא התעבה המכיל כמות קטנה של חומר אורגני מזרימים לאויר הנכנס למיכל הספיחה השני. הנוזל שהתעבה נאסף במיכל.

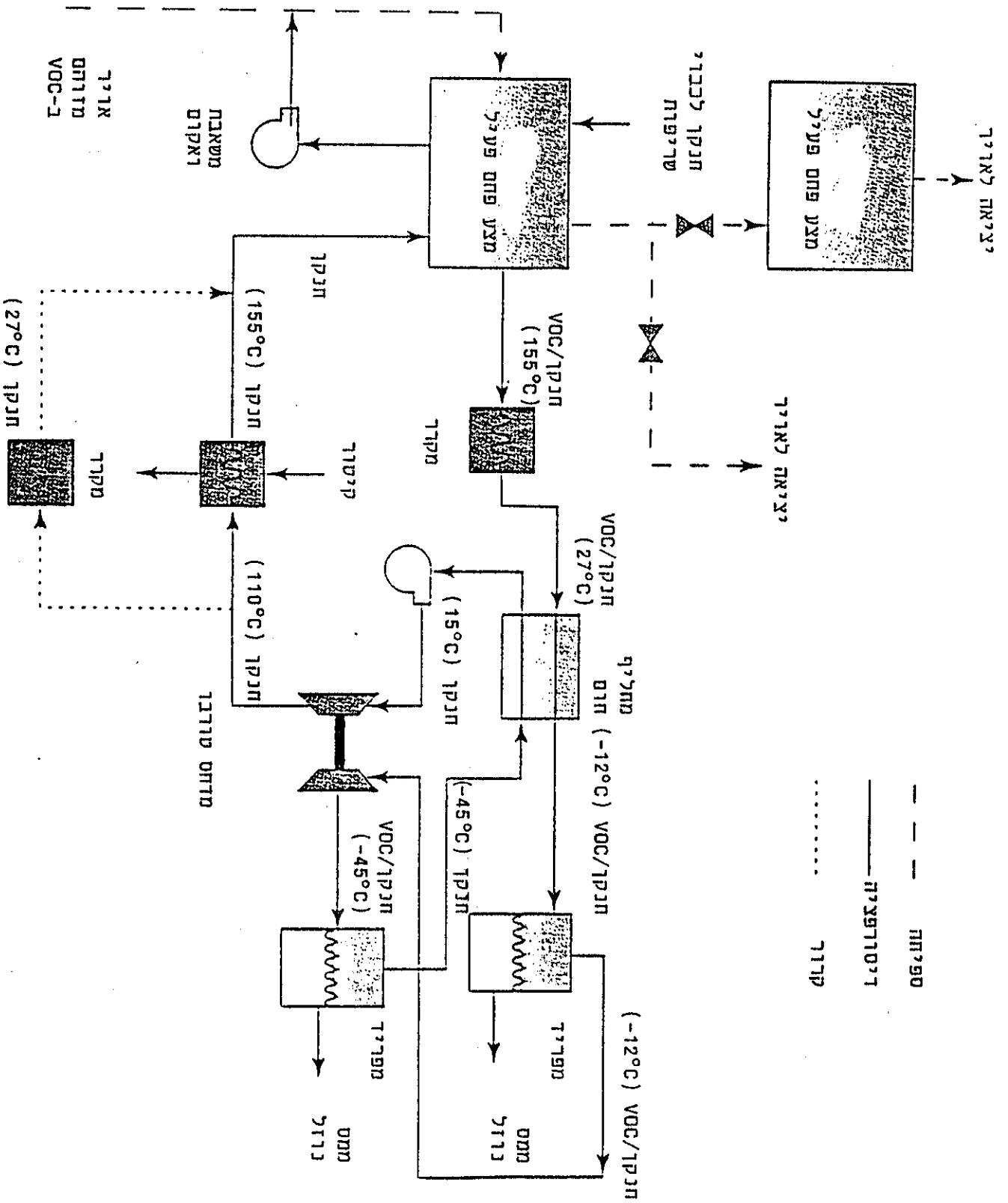
במקרים בהם החומר האורגני והמים יוצרים פזה אחת, מפרידים ביניהם בזיקוק. כאשר נוצרות שתי פזות מפרידים ע"י דקנטציה. לאחר ההפרדה בדקנטציה המים מכילים תמיד חומר אורגני ברכוז נמוך. מרחיקים את החומר האורגני מהמים ע"י בעבוע אויר, או קיטור ומורידים את הרכוז לרמה המותרת בהזרמה לביב עירוני.

לפני החזרת המיכל לעבודה מעבירים דרכו אויר ליבוש וקרור. את האויר העוזב מערבבים בזרם האויר הנכנס לטיהור במיכל השני, או כאשר יש שלושה מיכלים משתמשים באויר הנקי היוצא מהמיכל הסופח, ליבוש וקרור המיכל שעבר רגנרציה. לאחר קרור מיכל הפחם הפעיל מחליפים את הזרמים ומתחילים ברענון המיכל השני בעוד המיכל הרענן משמש לספיחת החומר האורגני. חסרונות הרענון בקיטור הם הבאים:

- א. לא נתן לחמם את הפחם מעל לכ-  $100^{\circ}\text{C}$ , לכן הקיטור אינו מרחיק חומרים אורגניים שלהם טמפי רתיחה גבוהה. בדרך זו הפחם הולך ונעשה רווי בחומר אורגני עד שלבסוף יש הכרח להחליפו. רענון בקיטור מתאים לחומרים שטמפרטורת הרתיחה שלהם נמוכה מכ-  $120^{\circ}\text{C}$ .
- ב. הקיטור המעובה מזוהם בחומר אורגני ולא נתן להזרימו לביב העירוני לפני טיהור נוסף.
- ג. בדרך כלל החומר האורגני שנאסף אינו טהור במידה המאפשרת להחזירו לתהליך ולכן יש לסלקו לרמת חובב, או לטהרו לרמה שנתן לעשות בו שמוש חוזר.

### 7.4.2 רענון בחנקן

כדוגמא לרענון בחנקן נביא תהליך המכונה "Reverse Brayton Cycle". תזרים התהליך מוצג בשרטוט מס. 8.



שרטוט מס. 8 : רענון פחם פעיל בחנקן Reverse Brayton Cycle

למיכל הפחם הרווי מזרימים חנקן בלחץ 1 אטמ' שחומם בקיטור לכ-  $155^{\circ}\text{C}$ . חנקן ובו תומר אורגני שהוסר מהפחם מקררים לכ-  $12^{\circ}\text{C}$  - במקרר מעבה. הנוזל שהתעבה מורחק במפריד והגז זורם למדחס טורבינה שם מאפשרים לו להתפשט בטורבינה תוך עשית עבודה והוא מתקרר ל-  $45^{\circ}\text{C}$ . הגז מוזרם למפריד שני ולאחר הפרדת הנוזל דוחסים אותו בעזרת משאבת ואקום לצד הדחיסה של מדחס הטורבינה, מחממים בקיטור מחדש ל-  $155^{\circ}\text{C}$  והחנקן מוכן להזרמה חוזרת למיכל הפחם. לאחר הרחקת הממס האורגני מהפחם מקררים את החנקן לכ-  $25^{\circ}\text{C}$  ומזרימים אותו לקרור המצע. לאחר הקרור, המצע מוכן לפעולה מחדש. יתרונה הגדול של שיטה זו בכך שמקבלים את התומר האורגני נקי וללא תוספת מים מעיבוי הקיטור. במפעל בו משתמשים בשיטה זו מדווחים על יעילות השבה העולה על 99.5%. בכך דומה שיטה זו לשיטת הממברנות.

אין בידינו נתונים כלכליים על עלות המתקן והתפעול ולא נוכל להשוות לשיטת הממברנות. בקווים כלליים נתן לאמר כי כאשר מדובר בממס יקר שיטה זו נעשית אטרקטיבית. נתן לרענן בחנקן גם במתקן פשוט כפי שמרעננים בקיטור. אין צורך בחנקן נקי לרענון ואפשר להשתמש גם בחנקן המכיל 3-5% חמצן. (חנקן בדרגת ניקיון כזו נתן לקבל ממתקני הפרדה על בסיס PSA ויתכן שהוא קיים במפעל בו משתמשים בחמצן המועשר לצרכים אחרים). מחממים את החנקן לטמפרטורה הדרושה  $100-300^{\circ}\text{C}$  ומעבירים אותו דרך מצע הפחם הפעיל. החנקן העמוס בתומר אורגני מוזרם למקרר מעבה וממנו למפריד. אחר הפרדת התומר האורגני מזרימים את החנקן עם שאריות אדי התומר האורגני לתוך זרם הגז המיועד לטיהור במתקן הפחם הפעיל. החסרונות העיקריים בשימוש בחנקן נעוצים בעלות הפקתו ובהחזק החום הנמוך שלו. יתרונותיו הם:

- א. נתן לחמם לטמפ. הדרושה ללא צורך בלחץ.
  - ב. מקבלים תומר אורגני מושב שאינו מזהם במים.
  - ג. אין מקבלים שפכים שיש לטהרם לפני שמזרימים אותם לביוב.
- אין בידינו נתונים כלכליים על עלות המערכת והמתקנים אולם סביר שיושפעו מעלות יצור החנקן.

### 7.4.3 רענון בעזרת ממס

קיטור אינו יעיל בהרחקת חומרים אורגניים שלהם טמפרטורת רתיחה גבוהה. במקרה כזה נתן לרענון את הפחם בשני צעדים. בצעד ראשון טובלים את הפחם בממס מתאים, כלומר תומר שממס היטב את החומרים שנספחו לפחם מתד ובעל טמפרטורת רתיחה נמוכה מאידך. לאחר מצוי התומר האורגני בעזרת הממס והרחקתו מהפחם מנקזים את הממס ושולחים אותו לרענון, בדרך כל ע"י זיקוק. בשלב זה מזריקים קיטור לפחם המאייד את הממס ומרחיק אותו מהפחם. מכאן ואילך הרענון זהה לרענון בקיטור. ממיסים מקובלים הם: אצטון, מתנול וטולואן.

היתרון הגדול בשיטת רענון זו, על פני הרענון בחנקן בטמפרטורה גבוהה הוא בהיותה זולה יותר. רענון בעזרת ממש עולה כעשירית הרענון בחנקן בטמפרטורה גבוהה ורק מעט יותר מרענון בקיטור. רענון בממש מוסיף 10-2 סנט לק"ג פחם בהשוואה לעלות של 2-1\$ לק"ג לרענון תרמי של פחם. נתן לאמר כי הרענון בעזרת ממש ממלא את החלל שבין רענון בקיטור לרענון בטמפרטורה גבוהה. השיקול הכלכלי מכתוב את סדר הרענון הבא: רענון בקיטור - זול ביותר, רענון בחנקן חם, רענון בממש, רענון בטמפ. גבוהה, ראקטיבציה של הפחם הפעיל.

## 8. שריפה

מתקנים בהם מחמצנים את החומר האורגני ל- CO<sub>2</sub> ומים הם מהותיים והידועים. ידועות ארבע קבוצות עיקריות של מתקני שריפה:

- א. שריפה בתנור, או בדוד קיטור.
  - ב. שריפה בלפיד.
  - ג. שריפה במבער אחורי רגיל.
  - ד. שריפה במבער אחורי קטליטי.
- שריפה בתנור, או בדוד קיטור היא הזולה מבין כלן, זאת אם מתקיימים התנאים הבאים:
- א. יש במפעל תנור, או דוד קיטור שנתן לשרוף בו את החומר האורגני.
  - ב. התנור, או דוד הקיטור, פועלים בכל זמן שהתהליך פולט VOC.
  - ג. ספיקת האויר המזוהם קטנה יחסית לאויר הבעירה ואינה פוגמת ביעילות השריפה.
  - ד. האויר המזוהם אינו סוחף אתו לחות גבוהה במיוחד (אויר רווי ב- C° 40 נחשב כגבול עליון).
  - ה. תנאי השריפה בדוד, או בתנור (טמפרטורה וזמן שהיה) מבטיחים הריסה מלאה של החומר האורגני. ה- EPA האמריקאי דורש 99.99% יעילות לחומר האורגני קשה השריפה ביותר כאשר מדובר בתרכובות אורגניות שאינן מכילות הלוגנים ו- 99.9999% כאשר התרכובות האורגניות מכילה הלוגנים.
- ו. המרחקים ממקורות הגז המזוהם לדוד הקיטור, או לתנור, סבירים. למרות המגבלות הרבות עושים שמוש רב בטכנולוגיה זו, לדוגמא במפעלי עבוד פסדים, בבתי זיקוק ועוד.

לפיד הוא מבער הנמצא בד"כ בראשו של צנור גבוה ובו דולקת אש תמיד. בכל פעם שמגיעים אדי חומר אורגני ללפיד הם נשרפים. כדי להבטיח שלא יגיע נוזל ללפיד מעבירים את הגז דרך מפריד לפני הלפיד. בדרך כלל מעבירים את הגז גם דרך מיכל מלא מים שמטרתו למנוע חזרת להבה מהלפיד למתקני היצור. לפידים מקובלים בבתי זיקוק, במפעלים פטרוכימיים ועוד. משתמשים בלפיד במקרים בהם ספיקת הגז אינה קבועה ועשויה להשתנות מאפס ועד לערך מקסימלי. לשיפור השריפה בלפיד נעזרים בקיטור, או באויר להגדלת הטורבולנציה. בדרך זו מונעים פיצוח החומר האורגני ויצור פית.

בלפיד הנעזר בקיטור מגיעים ליעילות שריפה של 98%. כאשר חורגים ממגבלות הלפיד מקבלים להבה אדומה ופית.



שריפה במבער אחורי המוכר בשם After burner מחלקים לשתי קבוצות: א. שריפה רגילה ב. שריפה קטליטית. במתקני שריפה רגילה דרושה טמפרטורה של  $800-1000^{\circ}\text{C}$  וזמן מגע של כשתי שניות כדי לקבל את היעילות המבוקשת. כאשר מדובר בפחממנים מוכלרים נדרשת טמפרטורה של כ-  $1200^{\circ}\text{C}$  להשגת אותה יעילות.

הוצאות התפעול העיקריות של המבער האחורי הן בדלק שיש לספק כדי להגיע לטמפרטורה הרצויה. חוסכים בדלק ע"י חמום הגז הנכנס ע"י קרור הגז היוצא. במתקנים חדישים מגיעים ליעילות של 85-95% בהשבת החום. מאחר שבתהליך השריפה מחמצנים את החומר האורגני, תהליך המייצר חום לכן במקרים רבים אין כלל צורך בהספקת דלק למבער האחורי.

בשריפה קטליטית יורדת טמפרטורת השריפה לכ-  $320-650^{\circ}\text{C}$  לכך השפעה קטנה על צריכת הדלק אולם חומרי הבניה והמבנה זולים יותר. מאידך יש לשלם עבור הקטליזטור ותקופתית (אחת לשנתיים שלוש) יש להחליפו, דבר המוסיף לעלות התפעול.

הגורמים המשפיעים על יעילות המבער האחורי הם שלושת ה- T: טורבולנציה, טמפרטורה וזמן. זמן שהיה הדרוש הוא פונקציה של הטמפרטורה והטורבולנציה. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר והטורבולנציה מלאה יותר דרוש פחות זמן.

היתרון העיקרי של המבער האחורי הוא שבתנאי העבודה שנקבעו (ספיקה וטמפרטורה) מובטחת יעילות המתקן. לעומת זאת החסרונות הם:

א. ככל שטמפרטורת השריפה גבוהה יותר וזמן המגע בטמפ.. הגבוהה ארוך יותר, נוצרות יותר תחמוצות חנקן. מתוך מדידות עולה שרכוז תחמוצות החנקן בגז העוזב את המבער האחורי הוא 200-8 חל"מ.

ב. אם החומר האורגני מכיל גופרית, הלוגן, מתכת וכד' יהיה צורך בסקרבר אחרי המבער כדי לטהר את גזי השריפה.

ג. תגובה איטית לשנויים וזמן תגובה ארוך. עד שאין מגיעים לטמפרטורה הדרושה אי אפשר להכניס את המבער לעבודה בגלל יעילות נמוכה.

לא ארחיב בנושא השריפה מעבר לכך מכיון שבהמשך נקדיש הרצאה שלמה לנושא זה, אולם נוסיף מעט בנושא השריפה הקטליטית. הקטליזטור המקובל הוא על בסיס פלטינה, או פלדיום ויש להיזהר שלא לפגוע בו. הנקודה הראשונה שיש להבטיח היא שהגזים המיועדים לשריפה אינם מכילים חומרים שהם רעל לקטליזטור, אינם מכילים חומרים כגון: חלקיקים, סיליקה, אפר וכד' שישקעו על פני הקטליזטור וימנעו את פעילותו ושלא יכילו חומרים המדכאים את הקטליזה - כגון הלוגנים, תרכובות גופרית וכד'. לכן כאשר עומדים בפני החלטה האם לבחור בשריפה קטליטית, או שריפה רגילה, מומלץ לערוך נסיון ולבדוק האם אין בגזים הנפלטים חומרים שיפגעו בקטליזטור.

## 9. ראקציות חמצון גזיות

ראקציות חמצון גזיות, בעיקר כשאוזון הוא המחמצן, נוסו במספר רב של מתקנים אולם אין בידנו נתוני תכנון ברורים וחד משמעיים על תמצון חומרים אורגניים בפזה גזית. החסרון

בתהליכים אלה הוא שהאוזון עצמו הוא מזהם אויר ויש להרוס אותו לפני שהאויר הטהור יוצא החוצה.

ראקציות חמצון שקבלו לאחרונה פרסום וכנראה שהצליחו במספר מקרים לחמצן באופן מלא חומרים אורגניים, הם חמצון בעזרת מחמצן מלווה בקרינה UV. אנו יודעים שקרינת UV ונוכחות חומרים אורגניים באויר מביאים להריסת החומר האורגני ויצור מתמצנים. תהליך זה הוא הגורם ליצור העשפל (Smog). מנצלים תופעה זו בדרך הבאה: מזרימים גז המכיל חומר אורגני (אחר סנון כדי להרחיק חלקיקים אם אלה נמצאים) לתוך ראקטור שלתוכו מזרימים גם אוזון. בראקטור מקרינים את הגז בקרינת UV בעלת אורך גל בתחום 200-280 nm (לכל חומר אורגני מתאים אורך גל אחר ויש להקרין באורך הגל המתאים). כתוצאה מכך החומר האורגני מתחמצן ומתפרק.

במידה ותהליך זה אינו מספק מזרימים את הגז לסקרבר וסופגים במים בהם מומס אוזון. בדרך זו ממשיכים בשבירת וחמצון מולקולות אורגניות שלא חומצנו בשלב ה-UV. לאחר הפרדת המים במפריד טיפות מזרימים את האויר למצע פחם פעיל שם נספח שאר החומר ונהרס עודף האוזון. הרגנרציה של הפחם הפעיל נעשית אף היא בזרם אוזון. בדרך זו מונעים יצירת שפכים שיש לטהרם בהמשך. בארה"ב נבנו מספר מתקנים כאלה לטפול בגזים היוצאים ממתקני צביעה. היעילות המדווחת 90-95%. אין בידנו נתונים על עלות המתקנים והטיפול.

### 10. ספיגה

ספיגה הוא תהליך בו מפגישים בין גז לנוזל, כדי להמיס את הגז בנוזל. ספיגה מתבצעת בקולטן (Scrubber) והיא תהליך מקובל בטיהור גזים. בפרק זה ברצוננו לברר שתי שאלות:

- א. באיזו מידה מתאים תהליך הספיגה להרחקת אדי חומרים אורגניים נדיפים מזרם גז.
- ב. באיזו מידה קולטנים מבטיחים עמידה בתקני הפליטה המוכרים ומהו המחיר שיש לשלם לשם כך?

מתוך המשפט הראשון ברור שכדי להרחיק חומר אורגני מזרם גז בעזרת נוזל, החומר האורגני חייב להתמוסס בנוזל, אחרת לא נוכל להרחיקו. מאחר שהנוזל המקובל לספיגה הוא מים, הרי שאינו מתאים לספיגת מרבית החומרים האורגניים. קיימת כמובן האפשרות להשתמש בשני קולטנים בטור, הראשון סופג בחומר אורגני שמסיס במים ובו מרחיקים את החומר האורגני מהגז, אולם מרוויים את הגז באדי הממס החדש ובעמוד השני סופגים במים את אדי הממס מהעמוד הראשון.

כדי להבין את ההשפעה שיש לתקני הפליטה על השמוש בקולטנים עלינו לבחון את תאוריות הספיגה. המנגנון הגורם לתנועת מולקולת החומר המומס מהגז לנוזל היא הדיפוזיה. נתן להביע את קצב הדיפוזיה בעזרת המשוואה:

$$N = K_g a (p_i - p_i^*)$$

במשוואה זו  $N$  הוא שטף החומר מהגז לנוזל ליחידת שטח וליחידת זמן.

$K_g a$  - הוא מקדם מעבר החומר.

$p_i$  - הוא הלחץ החלקי (או הרכוז) של חומר  $i$  בגז.

$p_i^*$  - הוא הרכוז של חומר  $i$  בגז הנמצא בשווי משקל עם הרכוז של חומר  $i$  בנוזל.

המשוואה שקושרת את הרכוז בגז הנמצא בשווי משקל עם הרכוז בנוזל נקראת חוק הנרי

$$p_i^* = P y_i = H_i x_i \quad \text{וצורתה:}$$

כאן:

$y$  ו- $x$  הם הרכוז של  $i$  בגז ובנוזל מבוטא כשבר מולים.

$H_i$  הוא מקדם הנרי לחומר  $i$ .

משתי המשוואות הללו נוכל להסיק שתי מסקנות:

א. קצב מעבר החומר האורגני  $i$  מהגז לנוזל גדל ככל שגדל הפרש הרכוזים בין הרכוז בגז לרכוז בנוזל.

ב. ככל שרכוז החומר המומס בנוזל גדול יותר כך קשה יותר להמיס בו חומר נוסף.

מכאן מגיעים מיד למסקנה שלישית והיא שאם אנו נדרשים לרכוז נמוך מאד של חומר אורגני

בגז העוזב את מתקן הטיהור ( $p_i$  קטן מאד) כפי שנדרש בתקני הפליטה לתומרים אורגניים (בדרך

כלל 150-20 מ"ג/מ"ק) עלינו להבטיח שהנוזל הסופג יכיל מעט מאד מהחומר הנספג כדי ש-  $p_i^*$

יהיה קטן מ-  $p_i$  אחרת לא נעמוד בתקני הפליטה.

אם נתרגם מסקנות אלה לשפת התכנון, אנו מחייבים את הנוזל הסופג להיכנס לעמודת הספיגה

במצב טהור, כלומר לא נתן לסחרר נוזל סופג, אלא יש להעביר אותו פעם אחת.

נסתכל בדוגמא קונקרטי, נניח שברצוננו לספוג מתיל כלוריד (מסיס היטב) בזרם מים. תקן

הפליטה למתיל כלוריד הוא 20 מ"ג/מ"ק שהם 8.9 חל"מ. מקדם הנרי למתיל כלוריד הוא 1.49

בר לכן נקבל שהרכוז בנוזל הנמצא בשווי משקל עם 20 מ"ג/מ"ק הוא 17 מ"ג מתיל כלוריד

בליטר מים, כלומר כדי להגיע ביציאה מהקולטן לרכוז של 20 מ"ג/מ"ק מתיל כלוריד באויר,

רכוז המתיל כלוריד במים הנכנסים לקולטן צריך להיות קטן מ- 20 מ"ג בליטר, כלומר מעשית

עלינו להזרים מים טהורים לראש עמוד הספיגה. מאחר שלא נתן להזרים לביוב מים המכילים

כמויות גדולות של מתיל כלוריד, יהיה עלינו לטהר כמויות גדולות של מים בהם מומס הממס

האורגני.

דרך מקובלת לעקוף בעיה זו היא לספוג את החומר האורגני בנוזל המגיב מיד ובאופן מלא עם

הגז הנספג. בדרך זו מסלקים למעשה את החומר הנספג מהתמיסה והלחץ הנגדי של החומר

הנספג הוא אפס.

מכל האמור לעיל נראה שמתקני ספיגה ל- VOC יהיו אולי זולים בהתקנה אולם יקרים בתפעול

בהשוואה למתקנים האחרים שסקרנו.

### 11. עבוי ופילטר ביולוגי

פילטר ביולוגי תואר ונדון בהרחבה בהרצאה קודמת לכן פרט לכך שנוכיר כי שיטה זו קיימת

ומתאימה לגז מזוהם בו רכוז המזהם נמוך מכ- 1-2 גר/מ"ק, קיימות בקטריות המפרקות את

החומר האורגני וה- VOC המוזרם אינו כולל פחממנים המותמרים בהלוגנים, לא נתייחס

לקבוצה זו של מתקנים.

מומלץ לבחור בפילטר ביולוגי רק עבור תהליכים וחומרים בהם קיים נסיון מוצלח בשמוש במתקן זה.

עבוי מחייב טמפרטורה נמוכה (לדוגמא בנוזן מחייב קרור אל מתחת ל-  $80^{\circ}\text{C}$  - אם רוצים לעמוד בתקני הפליטה) וגז יבש (מים יקפאו ויסתמו את המעבה) לכן משתמשים בד"כ בעבוי כשלב ראשון בדרך לטיהור הגז. יש יתרון למעבה כאשר רכוז החומר האורגני בגז הנישא גבוה, אלא שאז גדלה סכנת הפיצוץ, לכן כאשר בוחרים במעבה מחליפים את האויר בחנקן אם קיימת סכנת פיצוץ.

יתרון נוסף של העבוי הוא השבת החומר האורגני, לכן עבוי מתאים כקדם טיפול לממברנות, לפחם פעיל ולסקרברים, אין לו יתרון במתקני שריפה.

## **12. סיכום**

סקרנו מגוון שיטות להרחקת חומרים אורגניים נדיפים מגזים. אין ספק שהשיטות הפשוטות, הזולות והמתאימות ביותר הן אלה המונעות את פליטת החומר האורגני לאויר. במידה שהדבר אינו בר בצוע הרי שהמסקנה הבלתי נמנעת היא שמניעת פליטת חומר אורגני לאויר מחייבת מתקנים יקרים. מתקנים כאלה פועלים במקומות רבים בעולם בהצלחה ועונים לדרישות תקני הפליטה. בעת בחירת מתקן יש לוודא שהוא מתאים לחומרים הספציפיים הנפלטים לאויר ושאינו הופך מטרד אחד לאחר. כלומר אינו יוצר פסולת מסוכנת, שפכים מזוהמים, או פולט מזוהמים לאויר שלא היו בקבוצה המקורית אולם נוצרו בעת הטיפול.

5

יום העיון בנושא: ניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים VOC  
מוסד שמואל נאמן, הטכניון חיפה, 27 ליוני 1996.

## תכנון ושימוש בביופילטרים למניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים וריחות

### רבקה קולטון שפירא

איגוד ערים לשמירת איכות הסביבה (תחנת הכח תדרה)  
ת.ד. 3041 חדרה 38130

#### הקדמה

ביופילטרים משמשים להרחקת ריחות וחומרים אורגניים נדיפים מגזים שמקורם בתהליכים תעשייתיים. בעולם קיימים פילטרים ביולוגיים שונים להרחקת גזים אורגניים שמהווים מטרד ריחות או זיהום אויר, יעילות ההרחקה גבוהה ומורידה את ריכוזי החומרים המריחים עד לסף הריח ואף נמוך יותר.

העקרונות שעומדים מאחורי השיטה הם שימוש בתהליכי פרוק טבעיים שמבוצעים ע"י מיקרואורגניזמים הרחקת ריחות ולהקטנת ריכוז החומרים האורגניים הנדיפים באוויר. השיטה הייתה מקובלת שנים רבות בתקלאות ובטיפול בפסולת מוצקה. כיסוי פסולות שמדיפות ריחות רעים בשכבת קרקע היא שיטה לטיפול בריחות באמצעות המיקרואורגניזמים החיים בקרקע. זה הוא פילטר ביולוגי שפועל על הגזים הנוצרים בתהליכי הפרוק האנארוביים של הפסולת. בתעשייה יש זרמי גזים בכמויות גדולות מהם צריך להרחיק את הריחות. הפילטר הביולוגי בצורתו המודרנית הוא תיעוש של השיטה הישנה שבה כיסוי בקרקע נתן פתרון לבעיות הריח.

הרחקת תרכובות אורגניות שגורמות למטרדי ריחות מזרם גזים עד לרמה שלא יורגש הריח היתה תמיד בעייתית מאוד בתעשייה. השיטות המקובלות בתעשייה לטיפול במטרדי הריחות ביעילויות גבוהות דורשות השקעה קבועה גבוהה לכל ק"ב גזים מטופל.

שיטות החמצון, שריפה או חמצון קטליטי, נותנות פתרון טוב למטרדי הריחות, יעילות השיטות הללו מאוד גבוהה אבל הן יקרות מאוד בשל הצורך בהספקת אנרגיה קבועה לצורך שמירה על טמפרטורה גבוהה שמבטיחה חמצון מלא של התרכובות האורגניות.

שיטות החמצון, שריפה או חמצון קטליטי, נותנות פתרון טוב למטרדי הריחות, יעילות השיטות הללו מאוד גבוהה אבל הן יקרות מאוד בשל הצורך בהספקת אנרגיה קבועה לצורך שמירה על טמפרטורה גבוהה שמבטיחה חמצון מלא של התרכובות האורגניות.

שיטות השטיפה הכימית נותנות פתרון חלקי בלבד לתרכובות אורגניות שמגיבות עם חומצות או בסיסים, יעילות השיטות מגיעה לכ-70%. שיטות אלו אינן נותנות פתרון לתרכובות אורגניות שאינן מתמוססות במים ואינן מגיבות כימית בקלות.

ספיחה מתבצעת בעיקר על פחם פעיל, יעילות הספיחה למרבית התרכובות האורגניות מגיעה ל-99%, היעילות משתנה בהתאם לסוג הפחם הפעיל. לתרכובות קלות כדוגמת אמוניה, מימן גופרתי, פורמלין, אלכוהולים קלים היעילות יורדת. העלויות בשימוש במערכת ספיחה הן בעיקר במחיר הפחם הפעיל אותו יש להחליף לעתים קרובות אם רוצים לקבל יעילות גבוהה.

הביופילטר הוא השיטה היחידה שבה מגוון רחב ביותר של תרכובות אורגניות מטופל בשיטה אחת ביעילות שמתקרבת ל-99% ובעלויות יחסית נמוכות.

### מבנה פילטר ביולוגי

פילטר ביולוגי מורכב ממערכת חולכת גזים, מערכת ערפול לגזים, היומידיפייר או שוטפן, צנרת לפיזור הגזים בתחתית הפילטר, ומצע בגובה מטר עליו גדלים המיקרואורגניזמים. הפילטר יכול להיות טמון בקרקע, במבנה עילי, פתוח או סגור, המבנה נקבע בהתאם לשטח הנתון בחצר המפעל. החומרים המשמשים כמצע לפילטר הביולוגי הם בדרך כלל תערובות שונות של כבול, כבוץ, קומפוסט, שבבי עץ, אדמה שמכילה חומר אורגני, קש לסוגיו, ובמחקרים שהופיעו לאחרונה גם פחם פעיל שימש כמצע בפילטר ביולוגי.

התאמת המצע למפעל צריכה להתבצע בהסתמך על ידיעת סוגי התרכובות האורגניות בהן יש לטפל, ריכוזן, ויעילות ההרחקה הנדרשת. רצוי להפעיל מתקן חלוץ לתקופה של כשלושה חודשים כדי לבחון את יעילות המצע שנבחר לטיפול בגזים האורגניים.

### הפעלת ביופילטר

בהפעלת ביופילטר יש ליצור תנאים שמתאימים לקיום המיקרואורגניזמים על שטח פני המצע. באותה עת יש להבטיח שהגזים האורגניים העוברים דרך המצע יסתפחו על פני המצע או בלחות שבמצע ויהיו זמינים למיקרואורגניזמים.

התנאים האופטימליים לתכנון ביופילטר אופיני הם:

גובה הפילטר	100 - 60 ס"מ
חללים במצע	60% - 40%
זמן מגע	60 - 30 שניות
קצב זרימה	150 - 100 מ"קד/מ"ר
הגבה	8.5 - 6.0
טמפרטורה	40°C - 2°C
לחות	60% - 40%
תכולת חומרים אורגניים במצע	35% - 25%

בחירת המצע צריכה להבטיח כושר ספיחה מרבי, מינימום התפתחות לחץ בתוך המצע, וכמות מספקת של חומר אורגני לקיום אוכלוסיית החיידקים גם כאשר אין זרימת גזים דרך המצע. ביופילטר שמערכת פיזור הגזים שלו יוצרת זרימה אחידה של גזים דרך המצע ישיג הרחקה מרבית של חומר אורגני.

זמן המגע גז-מצע משתנה בהתאם למרכיבים האורגניים בהם יש לטפל וליעילות הנדרשת. זמן מגע של 15 שניות בד"כ מבטיח הרקחת ריח ביעילות של 95% ומעלה, אם הדרישות מחיבות יעילות של 99.9% הזמן מתארך לעתים עד כ-30 שניות. במתקן חלוץ ניתן לקבוע את זמן המגע האופטימלי.

המיקרואורגניזמים המתפתחים על גבי המצע זקוקים לתנאי לחות, טמפרטורה, הגבה, ולחומר אורגני. הרכב החומרים האורגניים או האי אורגניים בהם יש לטפל קובע את אוכלוסיית המיקרואורגניזמים המתפתחת על המצע. ניתן לזרז את התפתחות המיקרואורגניזמים ע"י תוספת קרקע מזון שמתאימה להרכב הגזים או ע"י זריעת מיקרואורגניזמים מתאימים.

ההגבה של המצע נקבעת ע"י הרכב המצע, והרכב הגזים הנכנסים למצע, ולעתים גם ע"י החיידקים. לדוגמה בטיפול במימן גופרתי המיקרואורגניזמים מיצרים חומצה גופרתית שגורמת לירידת ההגבה עד לרמה של 1.0 - 1.5. המצע חומצי מאוד ומתאים לאוכלוסיית המיקרואורגניזמים שמחמצנים גופרית מימנית. לעומת זאת אוכלוסיית החיידקים המעכלים אמוניה זקוקה להגבה ניטרלית ולכן לא תוכל להתקיים באותה שכבת מצע עם מיקרואורגניזמים המטפלים בגופרית מימנית כאשר זו מופיעה בריכוזים גבוהים.

הלחות במצע נקבעת ע"י תכולת הלחות של הגזים הנכנסים אל המצע. גזים שעוברים מערך ערפול או משטפה יגיעו למצע בלחות יחסית מרבית (עד 99%). בנוסף לכך מתוכננת מערכת השקיה עילית להבטחת הלחות בשכבות העליונות של המצע. בארץ הצללת המצע באמצעות רשת צל או גג מונעת התייבשות מהירה של שכבת המצע העליונה.

הטמפרטורה של המצע נקבעת ע"י טמפרטורת הגזים המגיעים אליו. הביופילטר פועל בתנאי אקלים שונים, מטמפרטורות קרות באקלים אירופאי ועד לטמפרטורות גבוהות באזורים החמים בארה"ב. קצב פעילות המיקרואורגניזמים משתנה עם הטמפרטורה, אולם לא ניתן להפעיל ביופילטר עם גזים שהטמפרטורה שלהם גבוהה מ-40°C. כאשר הגזים חמים יש לקררם לפני כניסתם למצע הביופילטר עד לטמפרטורה שתתאים לאוכלוסיית המיקרואורגניזמים שעל המצע.

### יעילות פילטר ביולוגי

יעילות הרהקה הריחות באמצעות פילטר ביולוגי משתנה באופן משמעותי עם קצב זרימת הגזים דרך המצע. ככל שקצב הזרימה עולה כלומר זמן המגע מתקצר יעילות ההרחקה יורדת. ניתן לקבל הרהקה של יותר מ-95% של החומרים האורגניים והריח באמצעות פילטר ביולוגי כאשר הוא מופעל בתנאים אופטימליים.

### יעילות ההרחקה של תרכובות אורגניות שונות כפי שמופיעה בספרות

מקור	אחוז הרהקה	תרכובות אורגניות
3,4	92-99%	אלדהידים
3,4,8,9	92-99.9%	אמינים, אמידים
4,9	92-95%	אמוניה
1	92%	בנזן
4	96%	קדברין
2	90%	פחמן חד חמצני
1,5	91%	דימתיל סולפיד
4	96%	אתנול, אצטון
1,6,10	98-100%	גופרית מימנית
4,5	92-95%	מרקפטנים
3	99.9%	חומצות אורגניות
2	95-100%	פוליאורומטיים
1	>98%	טרפן
7	99%	טולואן



**סיכום**

פילטר ביולוגי הוא אמצעי יעיל ופשוט להרחקת ריחות ו-VOC מתערובות של גזים. זרם אויר שמכיל תרכובות אורגניות עובר דרך מצע ביופילטר ויוצא משטח פניו חסר ריח ובריכוז נמוך של חומרים אורגניים. התרכובות האורגניות מסתפחות על המצע ומיקרואורגניזמים שחיים במצע מעכלים את החומרים האורגניים. תהליך העיכול מפנה את אתרי הספיחה לחומרים אורגניים נוספים שמגיעים עם האוויר המזוהם המוזרם לתוך המצע. יעילותו הגבוהה של הפילטר הביולוגי ויכולתו להתמודד בטיפול עם מגוון רחב של מרכיבים אורגניים ואנאורגניים שמגיעים כתערובת אל המצע ומטופלים עד לריכוז נמוך מסף הריח, עושה אותו אטרקטיבי למפעלים רבים.

1. Allen, E.R. & el. 1986. "Biofiltration: an odor control technology for a wastewater treatment facility". Environmental engineering Sciences Dept., University of Florida, Gainesville, Florida.
2. Bohn, H. & el. 1988. "Soil beds weed out air pollution." Chemical Engineering, 25 Apr. pp. 73-76.
3. Prokop, W.H. & el. "Soil bed system for control of rendering plant odors." JAPCA, 35:1332-1338.
4. VDI (1984), VDI - 3477, "biologische abluftung - biofilter (Biological waste air purification-biofilters)." VDI - Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 6, Dec. 1984, West Germany.
5. Parviz A. et al. 1995. "Biofilters and biosolids." Water Environ. and Tech. vol 7, no. 3 pp. 44-48.
6. Norman S. et al. 1995. "Grounds for odor removal" Water Environ. and Tech. vol 7. no. 6. pp 48-51.
7. Liu, P.K.T. et al. 1994. "Engineered biofilter for removing organic contaminants in air." Air and Waste vol 44, pp. 299-303.
8. Kolton Shapira R. 1995. "Carbon media in a biofilter for odor control." Proceeding of the Air and Waste Management Association, International Conference on Odors: Indoor and Environmental Air, Bloomington, Minnesota, USA.
9. Kolton Shapira R. 1994. "Biofilter in action." Proceeding of the Odor and VOC Compound Emission Control for Municipal and Industrial Treatment Facilities, Jacksonville, Florida, USA.
10. Kolton Shapira R. 1992. "Different approaches for eliminating H<sub>2</sub>S gas." Proceeding of the Fifth International Conference of the Israel Society for Ecology and Environmental Quality Sciences, Jerusalem, Israel.

6

## מיחזור "פרכלוראתילן" בתהליך מיסוד של חלקים תעופתיים

וילי רגינאנו, מינהל חומרים ופיתוח טכנולוגיות

התעשייה אוירית לישראל בע"מ

### 1. כללי

בתעשייה אוירית משתמשים בתהליך גיוץ כימי "Chemical Milling" לצורך הקטנת משקל של חלקים תעופתיים העשויים מפח אלומיניום ומיוצרים במפעל בתהליך של עיצוב (forming) תהליך גיוץ כימי של נתכי אלומיניום נעשה על ידי חשיפה של שטחים סלקטיביים לתמיסה מימית המכילה סודיום הידרוקסיד שצורבת את האלומיניום במקומות הנדרשים. החשיפה הסלקטיבית מתבצעת בשלב ראשון על ידי צביעת כל המשטח בצבע מיוחד בעל תכונות גמישות ועמידות בתמיסות אלקליות חזקות. בשלב שני מתבצע קילוף הצבע באזורים הספציפיים הדורשים גיוץ כימי.

שכבת הצבע משמשת למיסוך והגנה על המשטחים שאינם עוברים גיוץ כימי והיא חייבת להיות עבה ללא פגמים על מנת למנוע חדירת תמיסת הסודיום הידרוקסיד לפני השטח של האלומיניום. הצבע מיושם בעובי של 300 מיקרון. יישום הצבע מתבצע בתהליך של טבילה שהוא תהליך ידידותי יותר לסביבה לעומת שיטת ריסוס הצבע המקובלת.

הצבע המיוחד נרכש בחו"ל ויש צורך לדללו בפרכלוראתילן בלבד. אפשרויות למדללים אחרים היינו רעילות יותר כגון טולואן ובנזן. היקף היצור במפעל דורש תצרוכת של 250 ק"ג ליום של צבע וכמות מדלל פרכלוראתילן של 190 ק"ג ליום. כמות זו היא בהחלט כמות גדולה וכדי למנוע או לצמצם פליטות לאוויר הוחלט על טיפול אקולוגי של מיחזור הפרכלוראתילן.

### 2. מערכת המחזור

מערכת המחזור כוללת:

א. מערכת איסוף אשר מסוגלת לאסוף את כל אדי המדלל בזמן הטבילה וייבוש החלקים.

ב. מערכת מיחזור שתפקידה לספוג את המדלל, לטפל בו ולהחזירו לתהליך.

### 3. מערכת איסוף פרכלוראתילן

אמבט הטבילה וכל עמדות הייבוש רוכזו בחדר אחד אטום. בחדר הותקנו דלת כניסה ודלת יציאה אוטומטיות להכנסת והוצאת החלקים. אדי הפרכלוראתילן נשאבים מהחדר דרך תעלות ומפוח יניקה ליחידת מיחזור הנמצאת מחוץ לחדר.

עוצמת המפוח וכמות האוויר שיונקים מחדר הטבילה הינה קריטית ודורשת תכנון מדויק.

יש צורך בפשרה בין שתי הדרישות:

- א. אדי הפרכלוראתילן המגיעים למערכת המיחזור מחדר הטבילה צריכים להיות עשירים במדלל כדי לייעל את תהליך המיחזור.
- ב. שאריות האדים עלולים לצאת מחדר הטבילה לחדר העבודה הסמוך וצריכים לכלול כמות מינימלית של מדלל.

#### 4. מערכת מיחזור

מערכת המיחזור בנויה משתי יחידות זהות כך שתמיד אחת נמצאת בתהליך ספיגה (absorption), והשניה בתהליך רגנרציה (desorption). תהליך הספיגה נעשה בעזרת פחם פעיל, כאשר האוויר המכיל את אדי הפרכלוראתילן עוברים דרך שכבות של הפחם הפעיל, מולקולות המדלל נספחות על פני השטח של הפחם והאוויר נקי ללא מדלל יוצא דרך הארובה לאטמוספירה.

תהליך הספיגה נמשך עד ששכבות הפחם מגיעות לרוויה במדלל ואז יש צורך ברגנרציה של הפחם. קביעת הזמן לצורך רגנרציה נעשית או על בסיס זמן קבוע או בעזרת אנאליזה של כמות הפרכלוראתילן הנפלט מהארובה לאטמוספירה. תהליך הרגנרציה מתבצע בעזרת חימום הפחם עם קיטור הגורם לאידוי האדם מכילים פרכלוראתילן ומים מתקררים במעבדה, למצב נוזלי. הנוזל עובר למיתקן הפרדה בו הפרכלוראתילן ניפרד מהמים באופן גרבימטרי היות והפרכלוראתילן כבד יותר מהמים.

אופן פעילות מערכת המיחזור מפורטת בתרשים מס' 1.

נתוני יחידת המיחזור:

פחם פעיל 1700 ק"ג

כמות אויר 7000 ש"מ<sup>3</sup>

זמן תהליך ספיגה 6 ש"

זמן תהליך רגנרציה 2 ש"

הפרכלוראתילן הממוחזר משמש לדילול של צבע חדש, או למכירה.

#### 5. טיפול במי הקיטור

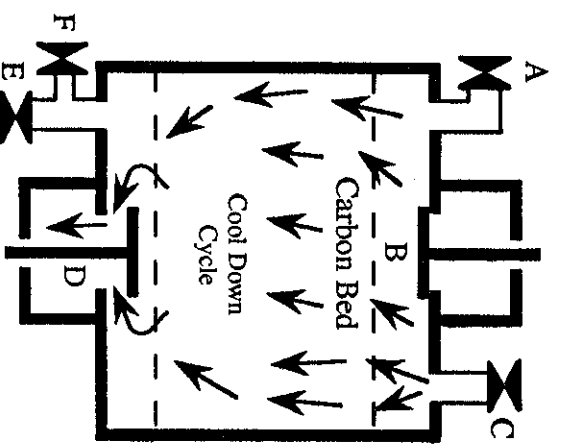
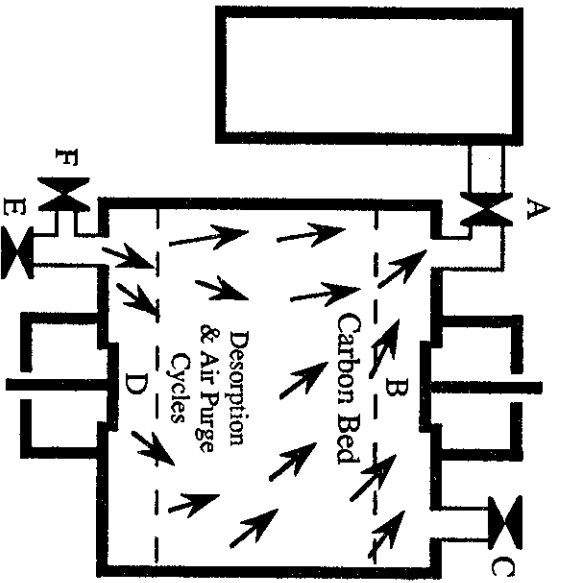
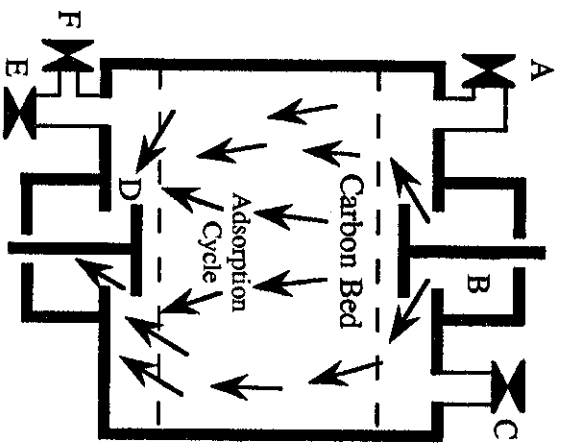
המים היוצאים מהמפריד מכילים פרכלוראתילן מומס בריכוז 220 מ"ג/לליטר לכן, לפני הזרמת המים לבויב, הם עוברים דרך מתקן מפריד המבוסס על עיקרון של חימום על מנת להגיע לריכוז הדרוש לפי התקן האמריקאי 0.1 מ"ג/לליטר.

#### 6. מערכת בקרה של האוויר היוצא לאטמוספירה

כמות הפרכלוראתילן הנפלטה לאוויר דרך הארובה נמדדת בצורה רציפה בשיטת: "Flame Ionization Detection". עיקרון המדידה מבוסס על שריפת תערובת מימן אוויר, כאשר התערובת הנייל מכילה חומרים אורגניים, כגון פרכלוראתילן, ריכוז היונים שיווצר בתהליך השריפה יהיה פרופורציונלי לכמות הפרכלוראתילן, ולכן שיטה זו משמשת כמדד לריכוז הפרכלוראתילן באוויר הניפלט מהארובה.

**7. פרכלוראתילן ממוחזר**

השילוב של מכירת פרכלוראתילן ממוחזר ושימוש בדילול של צבע חדש מאפשר לכסות הוצאות תפעול המיתקן ברווח. סיכום החישוב הכלכלי מפורט בתרשים מס' 2.



- A Steam and solvent vapor outlet valve
- B Solvent laden process air inlet damper
- C Fresh ambient air inlet valve
- D Process air outlet damper (after adsorption)
- E Steam inlet valve
- F Compressed air inlet

תרגילים מס' 1 : אופן פעולת מערכת המיחזור

**תרשים מס' 2: אספקה כללית של מערכת מיחזור פרכלוראתילן**

<u>הוצאות ל-1 ק"ג פרכלוראתילן ממוחזר</u>	
0.009	מי קירור
0.473	קיטור
<u>0.252</u>	איוורור
0.73 ש"ח	סה"כ
<u>הוצאות לשנה</u>	
36,475	שתי משמרות 4000 שעות, $49,000 \times 0.73$ ק"ג
3,000	תחזוקה
<u>18,000</u>	ריבית 6% על ההשקעה - $300,000 \times 6$
57,475 ש"ח	סה"כ הוצאות
<u>סיכום</u>	
88,920	הכנסות ממדלל ממוחזר $49,400 \times 1.8$
<u>57,475</u>	סה"כ הוצאות
31,445 ש"ח	רווח שנתי



7

## דברי סיכום

### ד"ר יהודה גולדשמיד

הרעיון של קיום יום עיון המוקדש כולו לזיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים עלה בראשי לפני כשנה. הסיבות לכך היו:

- א. הכנת תקנות הקובעות תקני פליטה למספר רב של חומרים אורגניים נדיפים.
- ב. העובדה שעד היום נושא זה לא זכה לטיפול נרחב, פרט למספר תעשיות כגון בתי הזיקוק, תחנות דלק, מתקנים לניקוי יבש ודומיהן.
- ג. הסיבוך הטכני והעלות הגבוהה של המתקנים המיועדים למנוע פליטת חומרים אורגניים.
- ד. הקושי בניטור חומרים אורגניים באויר, בעיקר בסביבת אזורי תעשייה.

פניתי לד"ר מיכאל גרבר, ראש אגף איכות אויר במשרד לאיכות הסביבה והוא הביע מיד את הסכמתו הנלהבת והבטיח גם עזרה כספית של המשרד.

מאחר ששנה לפני כן קיים מכון נאמן כנס שעסק במניעת זיהום אויר בחלקיקים, פנינו למוסד ובקשנו שיארח גם כנס זה והצענו שיהפוך את הדבר להרגל ויקיים כנס כזה מדי שנה או שנתיים. נענינו בחיוב ע"י מנהל המוסד פרופ' ארנן סגינר. בהמשך הצטרף גם פרופ' יעקב ממן לצוות שארגן את יום העיון וכך בא לעולם היום הזה.

השתדלנו במסגרת היום להשיג שני דברים:

- א. לחשוף את צבור העוסקים בנושא למשמעויות הטכניות והכספיות הכבדות של דרישת המשרד לאיכות הסביבה שישראל תעמוד בתקני הפליטה לחומרים אורגניים נדיפים המקובלים בעולם.
- ב. להציג מגוון פתרונות על ידי אנשים מנוסים (ולשם כך טרחנו לזמן ליום העיון מרצים מחו"ל) שצברו ניסיון מעשי ומחקרי בניטור, מדידת וטיהור אויר המזוהם בחומרים אורגניים נדיפים.

במסגרת יום העיון שמענו את דבריו של ד"ר מיכאל גרבר על המגבלות הצפויות בפליטת מזהמים אורגניים לאויר, את הרצאתו של פרופ' שמשון לרמן על מדידת רכוז חומר אורגני נדיף בארובות ועל העבודות שנעשו בטכניון בשיתוף רפא"ל בפתוח שיטות לשימוש במכשיר OP-FTIR למדידת רכוז חומרים אורגניים באתרי פסולת ובאזורי תעשייה. עבודות אלה הוצגו על ידי פרופ' יעקב ממן וד"ר רמי חשמונאי.

החלק השני של יום העיון הוקדש למתקנים ושיטות המיועדים למנוע פליטת מזהמים אורגניים לאויר. הוא נפתח בהרצאתו של מר חיים מייזלס מתברת אקוטופ, אשר תאר את נסיונו בספיגת חומרים אורגניים בתעשיית הלבידים והצעתו לשרוף את התמיסה המתקבלת במשרפה יעודית. לדבריו החסכון בהוצאת תפעול באותו מפעל יעלה על חצי מליון \$ בשנה והחסכון בהשקעה הראשונית מגיע לכ-400,000\$.

בסקירת מניתי את השיטות השונות העומדות לרשות המתכנן והמיועדות למנוע פליטת תומרים אורגניים לאויר והדגשתי כי השיטה הטובה והיעילה ביותר היא למנוע פליטה, אם ע"י החלפת החומרים הנדיפים בפחות נדיפים, או ע"י מניעת הפליטה לאויר בשיטות של החלפת נפחים ואחרות. רק אם כל אלה אינם מספקים יש מקום לבחון שיטות המבוססות על ספיגה, ספיחה, ביופילטריציה, חמצון, עיבוי, הפרדה בעזרת ממברנות ועוד.

המסקנות מהסקירה הן :

- א. השיטות הזולות ביותר ולכן גם העדיפות הן החלפה ומניעה ולכן המאמץ העיקרי והראשוני חייב להיות בכוון זה.
- ב. התקנות קבעו תקני פליטה נמוכים, דבר הפוסל את העיבוי אלא אם כן הוא בא בשילוב עם שיטות אחרות. מגבלה זו מקשה גם על מתקני ספיגה ומעדיפה ספיגה המלווה בראקציות כימיות.
- ג. המתקנים המיועדים למנוע פליטת VOC יקרים, אולם ההתפתחויות בשנים האחרונות הורידו באופן משמעותי את עלויות התפעול שלהם. לדוגמא במבער אחורי נתן היום להשיג יעילות של 94% בהשבת החום, כלומר באותם מקרים בהם שריפת החומר האורגני מספקת מעל 6% מהחום הדרוש, אין צורך בתוספת אנרגיה חיצונית.
- ד. כאשר מדובר בתומרים אורגניים המכילים במולקולה אטומים הלוגניים עדיף במקרים רבים לשקול פתרון של השבה בעזרת פחם פעיל או ממברנות על פני פתרון של שריפה וסקרבר. כאשר מדובר בחומר אורגני בודד, הממברנות עדיפות.
- ה. בכל מקום שנתן להשיג פתרון מלא בחמצון בפזה גזית או ע"י שמוש בביופילטר הם עדיפים על פני רוב השיטות האחרות.

בהרצאתה סקרה ד"ר רבקה קולטון שפירא את עקרונות פעולת ביופילטר ואת שידוע עד כה על יעילותו בפירוק תרכובות אורגניות. מדבריה עולה שהצטבר נסיון רב בשימוש בביופילטרים, אולם בכל מקרה רצוי להריץ מתקן פילוט לפני שמחליטים על ישום ביופילטר.

מר Erhard Vick מנהל חברת Durr שהיא אחת החברות המוליכות ביצור מבערים אחוריים (After Burners) בעולם ולה נציגות בישראל, סקר את הניסיון שרכשה חברתו. מר Vick סקר סוגים שונים של מבערים אחוריים תוך ציון השימושים השונים. בעיקר עמד מר Vick על המתקנים החדשים ביותר הקיימים היום והם :

- א. מבערים אחוריים עם מחליפי חום מלבנים קרמיות המאפשרות יעילות של 90% ויותר בהשבת החום.
- ב. מבערים אחוריים המבוססים על שני מחליפי חום במקום שלושה. אלה מנצלים את העובדה שהתקן הוא חצי שעתי ומאפשרים עליה לזמן קצר מאד ברכוז המזהמים הנפלטים בכל מחזור הנמשך 2-3 דקות. בדרך זו חוסכים כשליש מעלות המבער האחורי.
- ג. בכל מקרה שקיימת סכנה של יצור משקעים כתוצאה מהשריפה ממליץ מר Vick על שמוש במחליפי חום של מעיל וצנורות ולא במחליפי חום קרמיים.

יום העיון הסתיים בהרצאתו של מר וילי רגיניאני אשר תאר הפעלת מתקן פחם פעיל עם רגנרציה בקיטור ומתקן מיוחד לטיהור השפכים. המתקן נרכש והופעל בתעשייה האוירית והתוצאה, אוירה נקיה ונעימה באולמות העבודה והכנסה שנתית של כ-30,000 ש"ח ממכירת הממס המושב.

הצגנו בפניכם מגוון רחב של נושאים אשר המכנה המשותף שלהם הוא חומרים אורגניים נדיפים ואנו מקוים כי ההרצאות ששמעתם והחומר שהוצג יעזרו לכל המשתתפים במאבק עם האתגר שמעמיד בפנינו המשרד לאיכות הסביבה בקביעת תקני פליטה מחייבים לחומרים אורגניים נדיפים.

ברצוני לסיים בשתי הבעות תודה:

תודה וברכה לד"ר מיכאל גרבר המסיים את עבודתו כראש אגף איכות אויר במשרד לאיכות הסביבה ויוצא לתפקיד בכיר באו"ם. אנו מאחלים לו הצלחה בדרכו.

תודה למוסד נאמן, למנהלו פרופ' ארנן סגינר ולמר דוד כהן שפעל מטעמו. ברצוני לעודדכם להמשיך בדרך בה הלכו ולקיים גם בשנה הבאה יום עיון שיעסוק בנושאים הקשורים בזיהום אויר ומניעתו.

ולבסוף תודה לפרופ' יעקב ממן שעזר רבות בארגון יום העיון ולקח על עצמו את העבודה הקשה של הוצאת חוברת ההרצאות המונחת לפנינו.

TECHNION - ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# **THE S. NEAMAN INSTITUTE**

FOR ADVANCED STUDIES IN SCIENCE & TECHNOLOGY

## **Monitoring and Air Pollution Control of Volatile Organic Compounds (VOCs)**

**Editor: Yaacov Mamane**

**Proceedings of Workshop held at the S. Neaman Institute, Technion Haifa,  
on June 27, 1996**

**Air Purification for Coating, Printing, Painting and  
Chemical/Pharmaceutical Processes in Israel**

**Erhard Vick**

**DÜRR GmbH, Otto-Dürr Str. 9, D-70435,  
Stuttgart, Germany**

## **More Economy by more Ecology**

Even today the cost of purification of exhaust air and waste water and the management of wastes in production processes is expensive. These costs will continue to increase in coming years.

Environmental issues will be developing more and more into a major cost factor, and it is already now foreseeable that in future the only way to remain competitive is to incorporate both economical and ecological aspects in production.

### **The eco-concept for production: avoidance, recycling management of waste.**

Each eco-concept can be sub-divided into primary and secondary measures.

#### 1. Avoidance and recycling with primary measures

Primary measures include all methods for cutting the input of resources, and the avoidance of emissions produced during the production process, such as exhaust air, waste water, solid waste matter, noise and waste heat, or at least to reduce the same.

Such measures are for example:

- Optimisation of production by optimising the process technology and equipment.
- Utilisation of all recycling means.

#### 2. Waste management by secondary measures

The problem can be solved by means of specific processes and process combinations.

Secondary measures, e. g. include the following areas:

- Exhaust air purification
- Waste water treatment
- Waste treatment
- Noise reduction

## **DÜRR Ecopure - International quality standard for exhaust air purification plant and equipment**

A wide range of criteria are decisive for the selection of the processes and the use of individual process combinations in exhaust air purification.

The DÜRR range of adsorptive and thermal processes offers a wide variety of possible solutions for many different branches of industry.

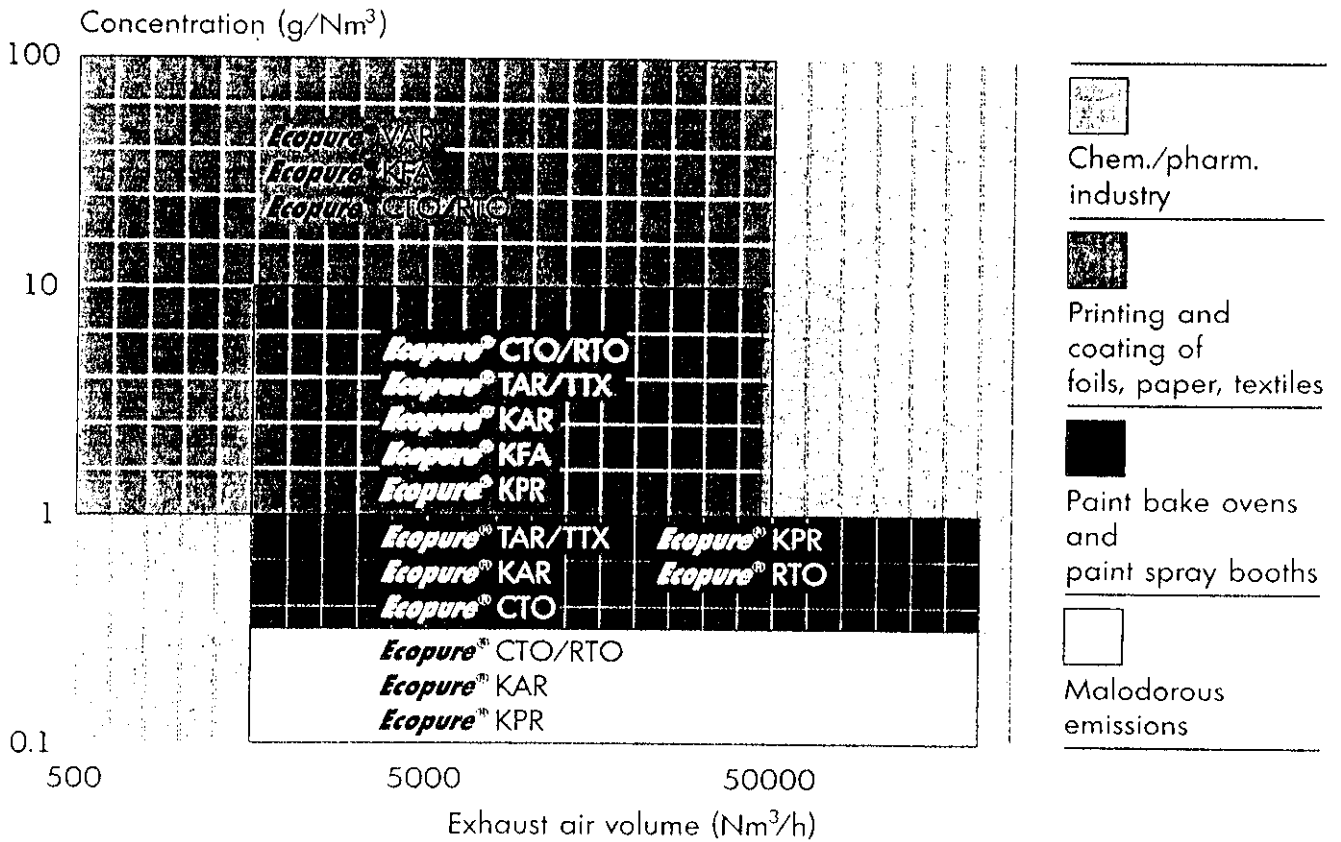
### System solutions for recycling of materials and waste management of residues and pollutants

In most cases the ecological and economical requirements can only be met by systems solutions. A combination of adsorptive and thermal processes, often with units for exhaust air conditioning and for heat recovery installed up- or downstream of the main processes provide the future-oriented solutions with high recovery rates of material and energy for recycling.

DÜRR's vast know-how gained from the construction of a wide variety of plants all over the world especially complex overall solutions - offer high reliability to the customer, and the best possible solution to the customer's individual problem.



# The most important fields of application for Ecopure exhaust air purification systems

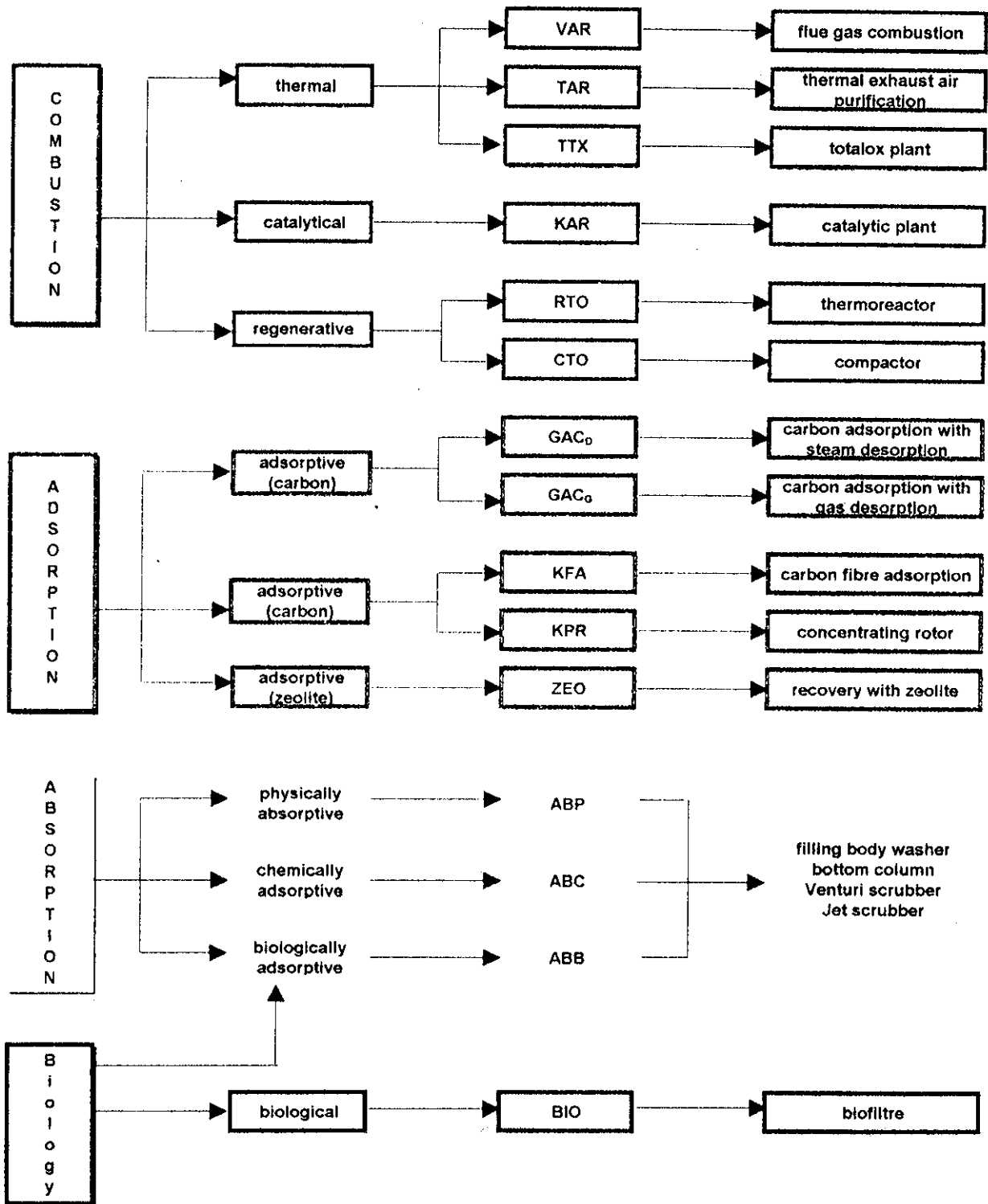


## Industrial exhaust air and flue gas problems

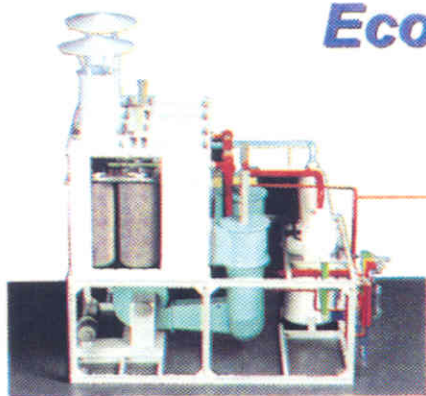
- a) Exhaust air with smell annoyance
- b) Exhaust air with CH up to  $1.5 \text{ g/Nm}^3$
- c) Exhaust air with CH 1.5 up to  $6.0 \text{ g/Nm}^3$
- d) Exhaust air with CH  $6.0 \text{ g/Nm}^3$  up to 50% LEL
- e) Exhaust air with CH or flue gas in the explosive range
- f) Exhaust air or flue gas with CO
- g) Exhaust air or flue gas with  $\text{NO}_x$
- h) Exhaust air or flue gas with S-contents
- i) Exhaust air or flue gas with Cl-contents
- j) Exhaust air or flue gas with dust contents
- k) Exhaust air or flue gas with particular solids  
(e. g. paint sticking risk, silicone obstruction risk)
- l) Exhaust air or flue gas with substances with polymerisation risk  
(e. g. phenol / formaldehyde / styrene)

Definition here:      Exhaust air:       $21 \div 17\% \text{O}_2$   
                                 Flue gas:             $17 \div 0\% \text{O}_2$

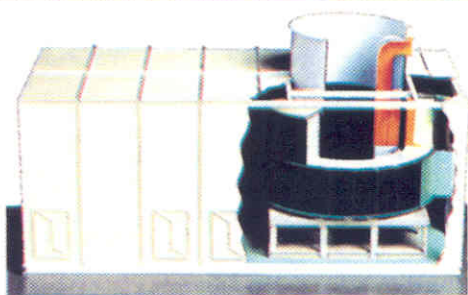
# Processes available



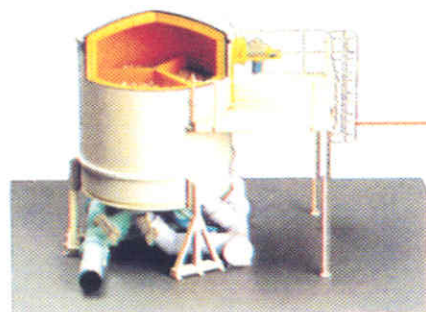
# Ecopure Air Purification Products



**1 Ecopure®-KFA** — Carbon fibre adsorption with activated carbon fibre for solvent recovery and liquification of solvent mixtures



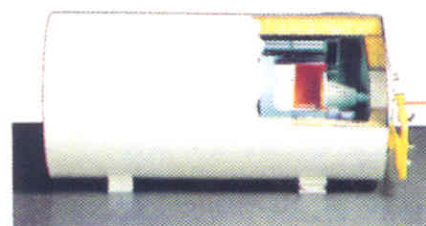
**2 Ecopure®-KPR** — Concentration by adsorption for large exhaust air volumes with low pollutant concentrations



**3 Ecopure®-CTO** — Regenerative thermal oxidation as compact unit for incineration of small to medium air volumes with medium pollutant concentrations



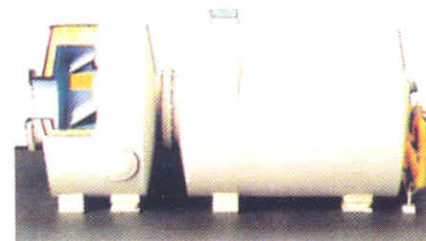
**4 Ecopure®-RTO** — Regenerative thermal oxidation for incineration of large air volumes with medium pollutant concentrations



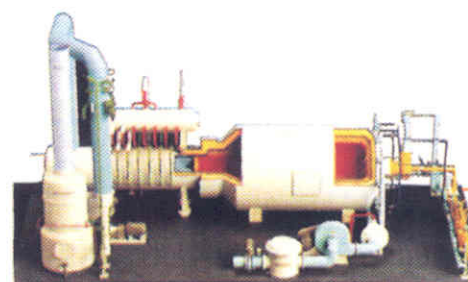
**5 Ecopure®-TAR** — Thermal exhaust air purification for incineration of exhaust air with medium to high pollutant concentrations



**6 Ecopure®-KAR** — Catalytic exhaust air purification for incineration of exhaust air with low to medium pollutant concentrations



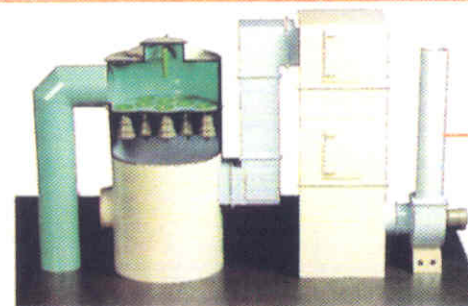
**7 Ecopure®-TTX** — Thermal exhaust air purification with total oxidation for incineration of exhaust air with medium to high pollutant concentrations



**8 Ecopure®-VAR** — Incineration of exhaust gases and residual liquids

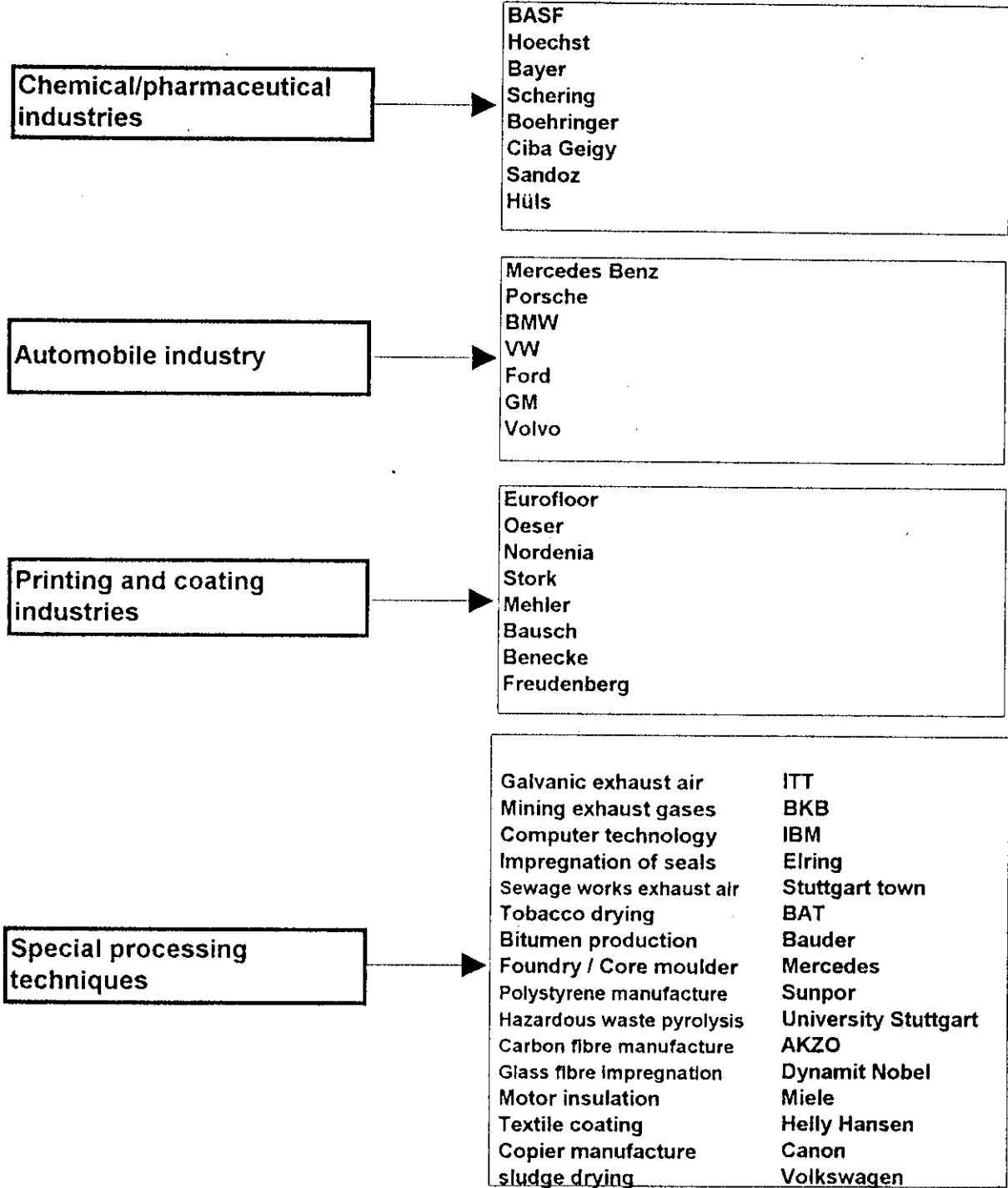


**9 Ecopure®-ENA** — Wet electrostatic precipitator for removal of solids from exhaust air streams



**10 Ecopure®-VNA** — Venturi wet precipitator for removal of solids from exhaust air streams

Since 1970  
 1,200 plants  
 in more than 30 countries  
 for more than 30 branches, e. g.:



## **Thermal recuperative air purification**

### **Objective**

In many production facilities gases, odours and vapours are produced which, if not purified, would pollute the environment. For this reason the exhaust air has to be cleaned before it is discharged into the atmosphere. The main tasks of such a purification (or abatement) process are:

- The removal of solvent vapours, crack products, and unpleasant smells from the exhaust a discharged by the production processes.

Today in many countries the directives and limits are imposed by legislation.

### **Demands on an abatement system for purification of exhaust air**

Such a system must meet numerous criteria such as:

- the ability to adapt to fluctuating exhaust air quantities, concentrations and compositions
- insensitivity to different temperatures
- it must be suitable for gases, vapours, aerosols
- it must have a high pollutant removal efficiency of as much as 99% and more
- investment and operating costs must be low

### **Methods and applications**

If the process exhaust air has to be cleaned, and process heating is also required then thermal exhaust air purification systems are the most suitable method of abatement, as they fulfill both tasks at the same time. The TAR-unit practically becomes a component of the production line.

This is the concept that would immediately be chosen for new lines. Existing lines would have be checked as to whether a modification of the production facility by integrating a thermal air purification system is cost-effective.

## **Thermal exhaust air purification - TAR**

Thermal exhaust air purification is a process in which the volatile organic compounds (VOCs) contained in the process exhaust air are destroyed. This takes place at temperatures of approx. 750- 800°C.

The combustion temperature depends on the requirements imposed by legislation and on the VOCs contained in the exhaust air. Gas or oil are used as additional fuel. Thermal energy from heat recovery systems specifically matched to the requirements of the production plant can be used for production of hot air, warm or hot water, saturated steam and/or for heating thermal oil.

Thermal exhaust air purification is one of the most universal methods of abatement; which is able to meet the strictest legal requirements. There are no secondary problems such as wastewater. The systems operate with the same high removal efficiency throughout their lifetime. These systems can operate fully automatically, and require minimum maintenance. The best solution is a heat recovery system that is well suited to the factory's demands, and which can be fully integrated in the production line.

TAR-units are used in many different industries, for example

- painting processes
- coating processes
- printing processes and
- generally for all VOC-emissions

The units are normally full steel constructions. As a result, TAR-units have a relatively low volumetric weight, and can be installed anywhere, on top of ovens or above roof.

Sometimes TAR-units are equipped with additional lances for combustion of combustible liquid wastes that are destroyed without leaving any residues.

TAR-units are not suitable for the treatment of e.g. halogenated pollutants or any other pollutants contained in the exhaust air that are not destroyed completely without leaving residues.

For these cases Dürr offer the **VAR-system**.

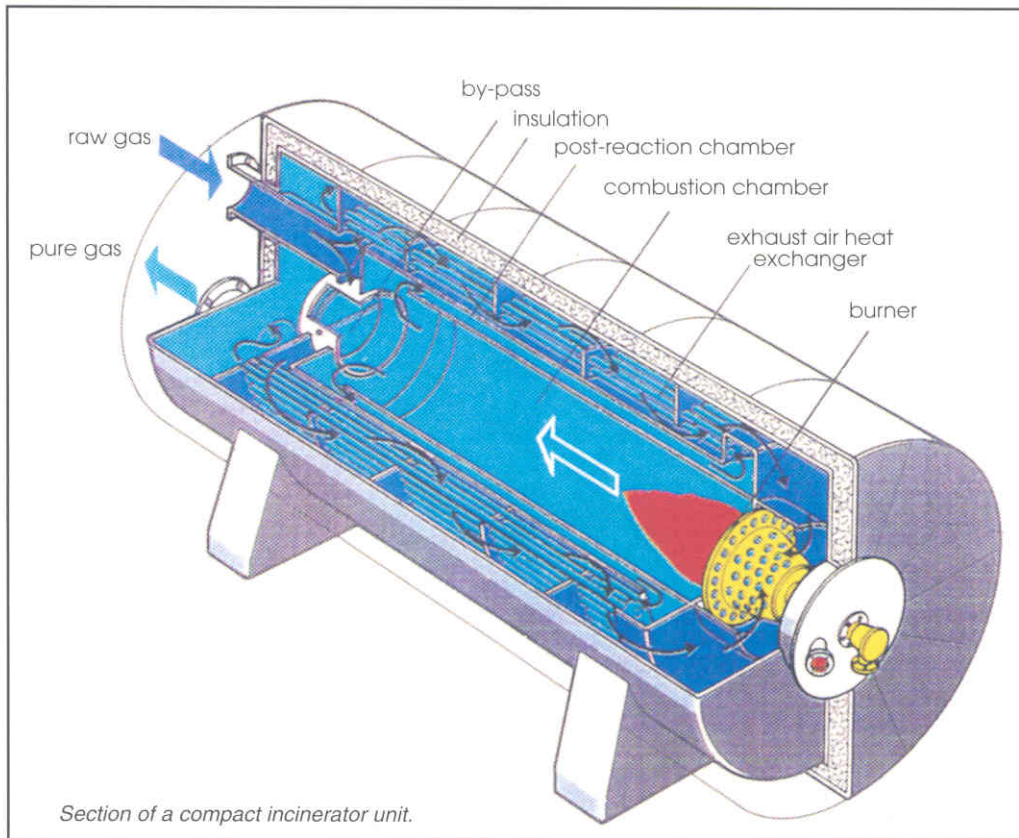
## The individual components of an *ECOPURE*<sup>®</sup>TAR-unit

The DÜRR-TAR-unit is a modular system, and is therefore flexible and easy to extend. Individual modules are combined to form custom-made abatement systems.

Standard components are used for this purpose:

### First component: compact unit

The basic module is the TAR compact unit. It represents the actual purification unit, and consists of combustion chamber, burner and integrated heat exchanger for pre-heating the exhaust air from production. DÜRR offer seven standard sizes, depending on the exhaust air volumes to be treated. For large regulation ranges, the system can also be supplied with a multi-function bypass.





The components subsequent to the compact unit are combined to suit the specific production process. The order is selected according to the sinking temperature of the thermal medium.

### **Second component: thermal oil boiler**

Thermal oil is frequently heated with hot pure gases. The production facility can in turn be heated with hot thermal oil. The thermal oil can, on the other hand, be routed to other production facilities, or it can partly be used for steam generation, i.e. in a separate oil-heated steam generator.

Linkage to an existing thermal oil network in the factory is possible any time.

### **Third component: steam boiler**

Steam can also be generated for heat recovery. The waste heat boiler is very similar in structure, in function and in instrumentation to a boiler with its own burner. However, steam is generated with the hot, cleaned exhaust air, in other words without a flame.

For some users the steam boiler is an alternative to the thermal oil boiler.

Here also linkage to an existing factory network is possible.

### **Fourth component: fresh air heat exchanger**

The user would like to cover as much of the heat contained in the cleaned exhaust air as possible. For this purpose fresh air is frequently heated-up in a heat exchanger, and is allowed to flow as hot supply air to the production facility.

### **Fifth component: water boiler**

This unit is similar in structure to the thermal oil boiler, and likewise contains the complete monitoring and safety system. If a factory requires warm or hot water throughout the year, then this module is a very cost-heat recovery system, considering that the capital investment costs are also very low. For this reason a water boiler is usually already profitable when the hot water heating is only required during the cold months of the year. Finally, the water boiler can also be used as an economiser if a steam boiler is included in the system, or when the factory has a boiler system of its own, and has to pre-heat its feed water.

For regulation purposes when performance varies etc. the heat recovery components can of course be equipped with bypasses.

Thus the DÜRR-TARR-system offers a series of combinations, depending on the demands of the individual user. A very efficient combination that is frequently applied is the following:

#### TAR

- thermal oil boiler / steam boiler
- fresh air heat exchanger
- water boiler

#### **Ancillary equipment**

In order to represent a complete system, the abatement unit also includes the following equipment:

- air-directing system
- exhaust air fan
- exhaust air stack
- emergency air fan, if required
- thermal insulation
- sound-proofing equipment

The electrical control system operates the system in fully automatic mode and keeps operating costs to a minimum by regulating the abatement system to adapt it to the fluctuating conditions of the production facility.

#### Production facility and TAR-unit = 1 system.

As a TAR-unit is used when heat recovery for heating the production facility is an interesting issue apart from VOC-reduction, the TAR must be well-matched to the production line. So the control system plays a leading role.

A solution for such a complex task can only be provided by a systems supplier who has the know-how for designing a combined system.

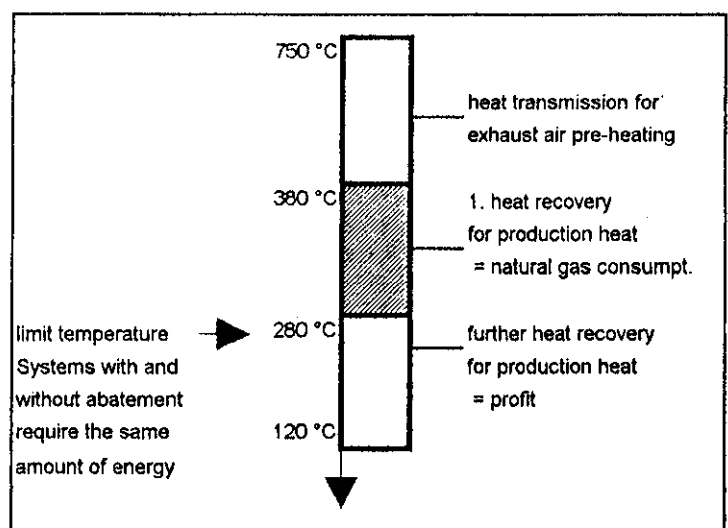
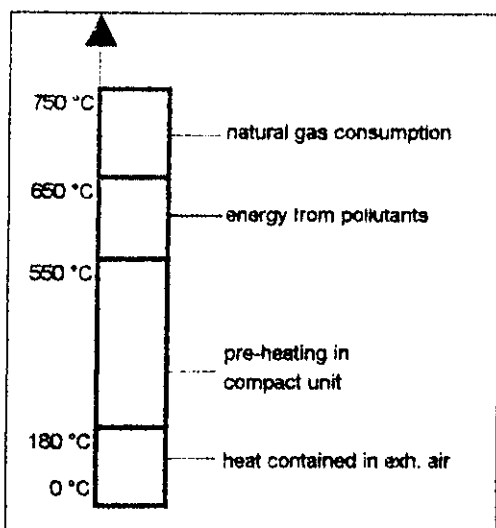
The task is too complex for a components supplier!

## Energy balance of the TAR-system

### Example of a PVC coating facility

The destruction process takes place at 750-800°C in the combustion chamber of the compact unit. The required energy to reach this temperature comes from 4 sources:

- The exhaust air from the coating facility arrives in the compact unit at about 160-200°C. An average of 180°C is assumed.
- In the heat exchanger of the compact unit, the air can be pre-heated by  $\Delta t = 370^\circ\text{C}$  to 550°C.
- The pollutants in the exhaust air, e.g. plasticizers or solvents can be rated at an average of 4 g/Nm<sup>3</sup>. This results in a temperature increase of the exhaust air of 100°C, i.e. an increase from 550 to 650°C.
- A  $\Delta t$  from 650°C to 750°C finally provides the energy that the burner must supply. Usually a standby flame is produced with natural gas. With a calorific power of the natural gas of 8,600 kcal/m<sup>3</sup> approx. 4 m<sup>3</sup>/h natural gas per 1,000 Nm<sup>3</sup>/h are equivalent to this  $\Delta t = 100^\circ\text{C}$ .



Energy requirement of the TAR-system  
Example: PVC coating

Saving of energy by heat recovery  
Example: PVC coating

The operation of a TAR abatement system can be absolutely economical, when large quantities of VOC (pollutants) are contained in the exhaust air. Only little short of 14% of the energy necessary for heating-up from 120°C to 750°C must be supplied by the burner.

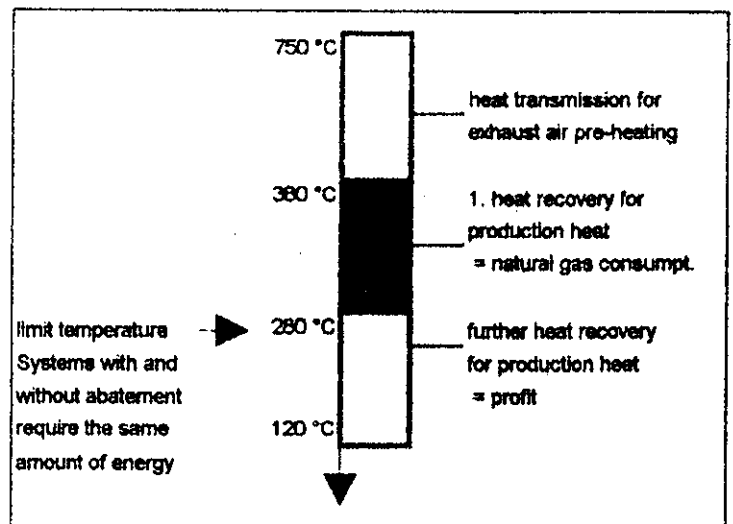
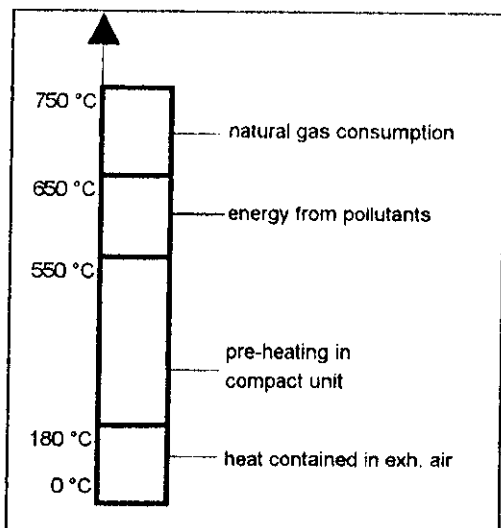
**What are the benefits of heat recovery?**

First of all the heat from the 750°C hot, clean exhaust air is withdrawn, which is required on the other hand for pre-heating the exhaust air from 180°C to 550°C. The consequence is, that the clean exhaust air leaves the compact unit with approx. 380°C.

Now, when a further 100°C are utilised, i.e. withdrawn in the thermal oil boiler, by e.g. supplying hot thimble oil to the production line, then this is equivalent precisely to the 4 m<sup>3</sup>/h natural gas per 1,000 Nm<sup>3</sup>/h that are consumed by the burner. This means we have 280°C in the clean air and altogether utilise exactly the amount of natural gas for the production line and the abatement system together, as would be required for a production line without an abatement system.

Each further reduction of the temperature by additional modules brings a profit!

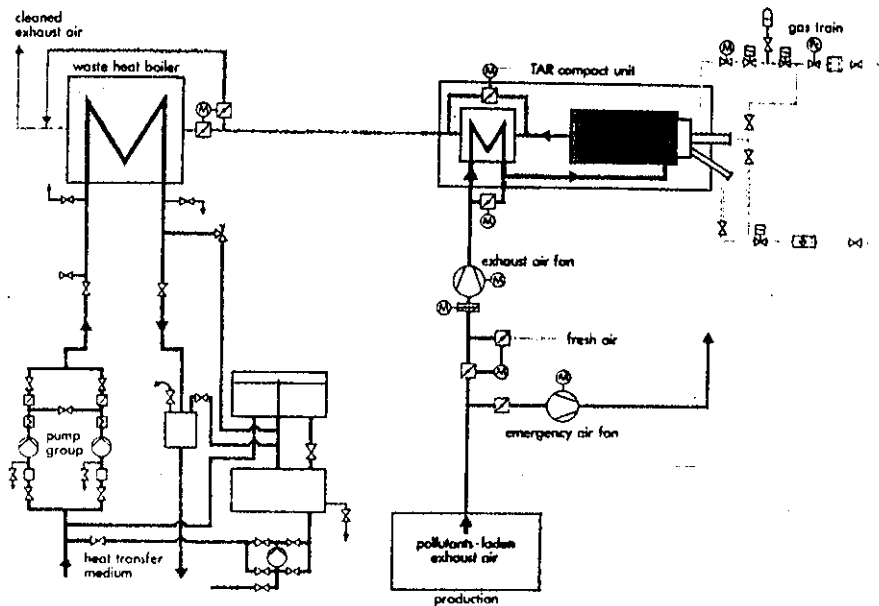
When the TAR-system supplies an optimum of 120°C of the clean air in the stack, this means that put together (production facility and abatement system) 6 m<sup>3</sup>/h of natural gas per 1,000 Nm<sup>3</sup>/h less are consumed than for a production line without abatement system.



*Saving of energy by heat recovery  
Example: PVC coating*

*Energy requirement of the TAR-system  
Example: PVC coating*

## RI flow chart of a TAR-system with compact unit and waste heat boiler



RI flow chart of a TAR-system with compact unit and waste heat boiler

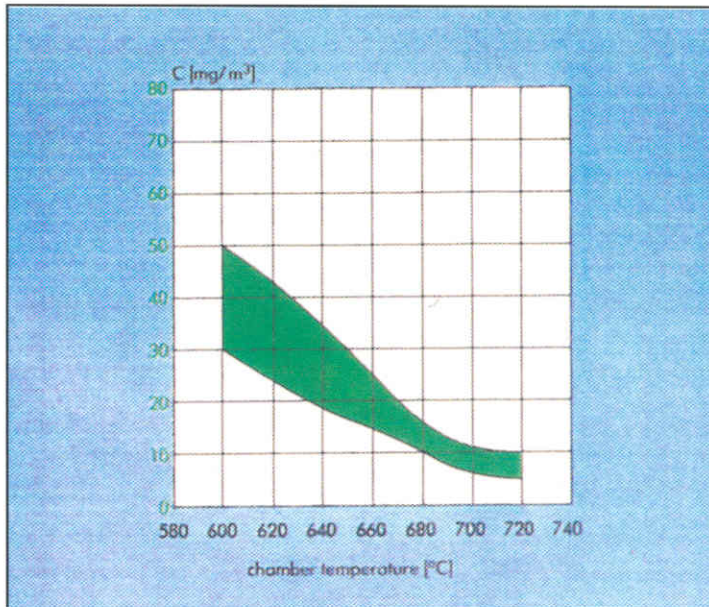
## The TAR standard range and location of equipment

### The standard range of Ecopure<sup>®</sup>-TAR abatement systems

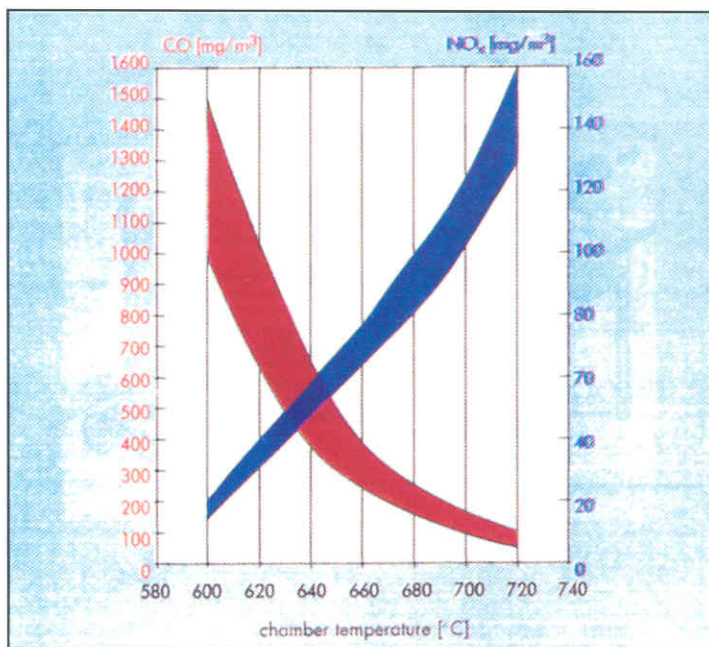
Model	1103	1105	1108	1112	1118	1125	1140
Exhaust air	1,000	3,000	5,000	8,000	12,000	18,000	25,000
Volume range	-	-	-	-	-	-	-
Nm <sup>3</sup> /h	3,000	5,000	8,000	12,000	18,000	25,000	40,000

The equipment can be located in the shop building, out-of-doors, or above roof. The space requirements cannot be generally given. On the one hand this depends on the exhaust air volume to be treated that determines which standard size will be suitable; on the other hand space requirements depend on which modules are chosen, and finally, it is possible to build the system in one line or in 2 levels or at an angle, depending on the structural constraints in the factory.

## Emission levels in the exhaust stack of a TAR-system



Emission levels of total carbon C depending on the combustion chamber temperature

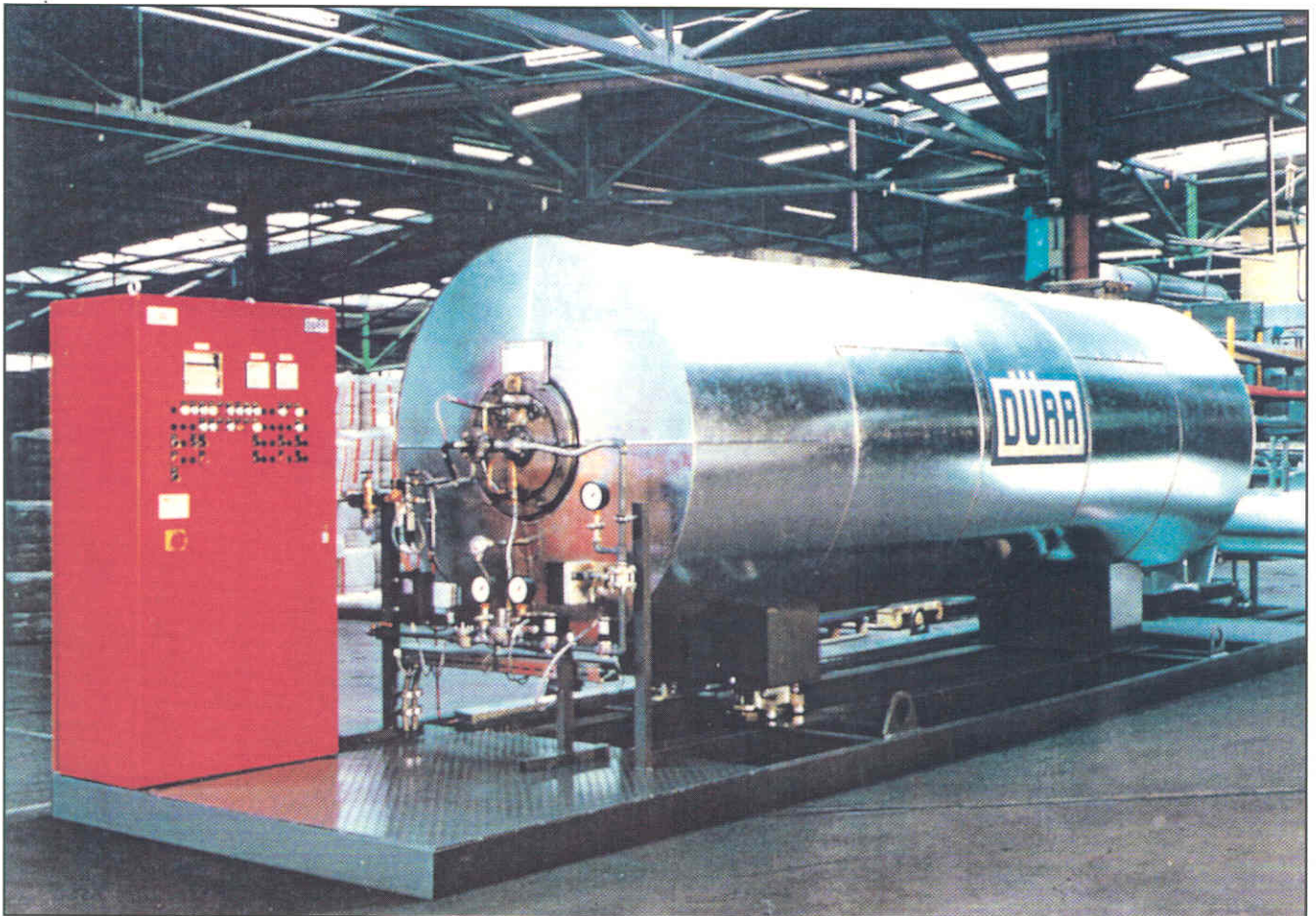


Emission levels of carbon monoxide CO and nitrogen oxides NO<sub>x</sub> depending on the combustion chamber temperature

## ***Ecopure®* TAR - application example**

### **Paint shop for small parts**

Process:	Paint curing
Exhaust air volume:	1,500 Nm <sup>3</sup> /h
Pollutants:	Paint solvents (approx. 1.5 g/Nm <sup>3</sup> )
Plant components:	Compact unit / water boiler
Special features:	100% pre-assembled and tested before delivery



*Pre-assembled compact TAR-unit with control panel*

## Offset printing press

Process:	Offset drying
Abluftvolumenstrom:	28,000 Nm <sup>3</sup> /h
Pollutants:	Mineral oils (1 - 4 g/Nm <sup>3</sup> )
Plant components:	Compact unit / water boiler
Special features:	Installed out-of-doors above roof 4 ovens connected



*Compact unit with thermal oil boiler*



Excerpt from the reference list - DÜRR-abatement systems

Qty.	Company	Place	Country	Ind. branch	Product	Type of system	Exh. air quantity per system [Nm <sup>3</sup> /h]
1	GM	Flint	USA	Paint finishing	Car	TAR	12,000
1	Klingspor	Haiger	D	Others	Abrasive paper	TAR	18,000
1	AWSZ	Zwickau	D	Paint finishing	Car	TAR	9,000
1	AWSZ	Zwickau	D	Paint finishing	Car	TAR	20,000
1	AWSZ	Zwickau	D	Paint finishing	Car	TAR	13,000
1	VEB / Stork	Spitzkunnersdorf	D	Coating	Wallpaper	TAR	14,000
4	Nummi	Fremont	USA	Paint finishing	Car	TAR	18,000
3	Nummi	Fremont	USA	Paint finishing	Car	TAR	7,000
1	Lucky	Chung-Ju	Korea	Coating	Wallpaper	TAR	8,800
1	Sprimag / Montaplast	Mohrsbach	D	Paint finishing	Small parts	TAR	18,000
1	Isola	Breitenbach	CH	Paint finishing	Paper	TAR	25,000
1	Grundig	Wien	A	Paint finishing	Small parts	TAR	24,000
1	Mercedes Benz	Wörth	D	Paint finishing	Car	TAR	5,000
4	MAN	Salzgitter	D	Paint finishing	Car	TAR	8,000
1	SEAT	Martorell	E	Paint finishing	Car	TAR	24,000
4	VAZ	Togliatti	GUS	Paint finishing	Car	TAR	26,000
2	Opel	Eisenach	D	Paint finishing	Car	TAR	8,000
2	Opel	Eisenach	D	Paint finishing	Car	TAR	6,000
1	Opel	Eisenach	D	Paint finishing	Car	TAR	10,000
1	Thyssen	Brackwede	D	Paint finishing	Small parts	TAR	10,000
1	Volkswagen	Kassel	D	Paint finishing	Car	TAR	9,000
2	GAYA Motors	Jakarta	PY	Paint finishing	Car	TAR	10,000
1	Nissan	Aguascalientes	Mexiko	Paint finishing	Car	TAR	9,000
3	Nummi	Fremont	USA	Paint finishing	Car	TAR	7,000
1	Gossnab / Stork	Ussurisk	GUS	Coating	Coil coating	TAR	14,000
1	bn international / Stork	Huizen	NL	Coating	Wallpaper	TAR	16,000
1	bn international / Stork	Huizen	NL	Coating	Wallpaper	TAR	23,000
1	Plannja	Lulea	S	Coating	Coil	TAR	27,000
1	Plannja	Lulea	S	Coating	Coil	TAR	24,000
1	Opel	Eisenach	D	Paint finishing	Car	TAR	6,000
1	FIAT	Pomigliano	I	Paint finishing	Car	TAR	5,500
1	Elektromotorenwerke	Thurm	D	Impregnation	E.-parts	TAR	3,000
1	Essef	Balagny s. Terr	F	Coating	Wallpaper	TAR	7,000
1	IVECO	Ulm	D	Paint finishing	Car	TAR	3,800
1	Landtechnik	Schönebeck	D	Paint finishing	Agricult. machines	TAR	6,000

## **Thermal regenerative air purification**

### **Problem to be solved**

Pollution causing gases and vapours are produced in many production facilities. The exhaust air must therefore be cleaned before it is discharged into the atmosphere.

The main task of the abatement system is:

- The removal of solvent vapours, crack products and malodorous emissions from the exhaust air generated by production processes.

To further complicate matters, directives and limits are imposed by legislation in many countries

### **Requirements for exhaust air abatement systems**

Such a system must meet numerous criteria:

- It must be insensitive to fluctuating exhaust air volumes and temperatures and to varying pollutant concentrations and compositions.
- It must be suitable for gases, vapours, and aerosols.
- It must have a high removal efficiency of 99 % and more.
- Capital investment and operating costs must be low.
- It must have a high reliability and long lifetime.

### **Application**

A close examination of the process exhaust air shows that the solvent composition, the dust load of the exhaust air, or the condensation due to substances contained in the air makes the use of such special procedures as catalytic, biological or adsorptive exhaust air treatment impossible, or at least very expensive.

In contrast, the RTO procedure is an especially reliable process with low operating costs. It is suitable for nearly all applications, irrespective of whether it is applied as an individual or an overall solution.

If the waste heat of an abatement system can be used to its full extent for heating the production lines during the whole production time, then the TAR thermal abatement system is a appropriate alternative.

## **Regenerative Thermal Oxidator- RTO**

The RTO system is one of the safest, most flexible and, above all, lowest cost solutions for nearly any exhaust air problem.

The RTO unit destroys volatile organic compounds (VOCs) contained in the process exhaust at temperatures above 800°C. Yet the regenerative heat exchanger requires only a small amount of primary energy such as gas or oil and sometimes none at all.

The system features exceptional combustion efficiency, without creating secondary problems, such as the production of waste water. Furthermore, the system operates at a steadily high efficiency throughout its lifetime. The resulting low concentrations of C, CO and NOx in the clean air are well below the limits imposed by legislation.

The available range of units treats exhaust air volumes from 1,000 to 400,000 Nm<sup>3</sup>/h and pollutant concentrations of from 0 to 8 g/Nm<sup>3</sup>.

RTOs are used in many different branches of industry for all VOC emissions, but particularly in the following industries:

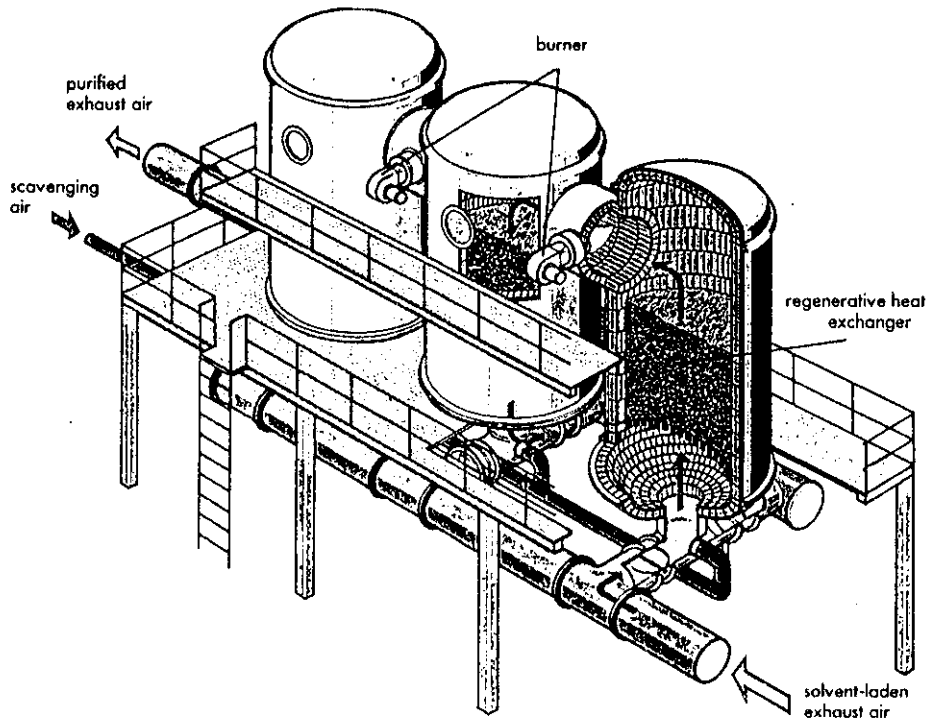
- painting and coating
- paint and ink production
- printing
- chemical

## **Structure and components of an Ecopure<sup>®</sup> RTO-unit**

The RTO-system consists of lined steel tanks installed in line, with a ceramic packed bed as heat exchanger. The type and size of the heat exchanger material is determined for each specific process after analyzing the exhaust air stream.

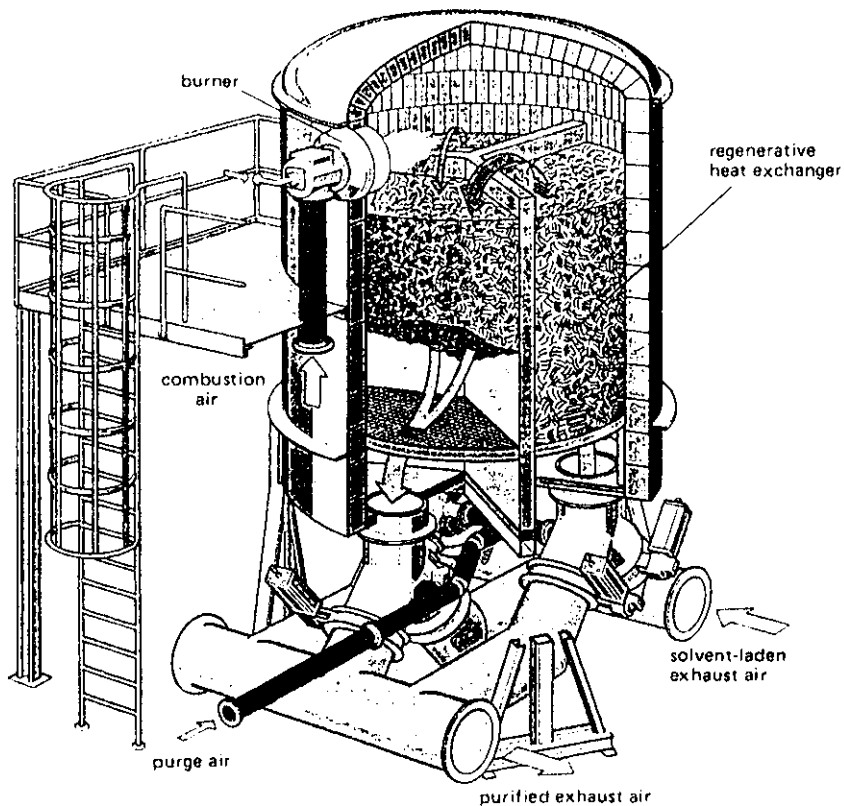
The joint combustion chamber and the burner system connect the tank groups in the hot top section of the system.

The air ducting system with the necessary valves and dampers, as well as the exhaust air fan can be located in the cold section of the system underneath the tanks.



The number of tanks depends on the air volume to be treated. As a rule, two or three tanks are used. For large air volumes, five to seven tanks are used.

For treatment of exhaust air volumes of less than 20,000 Nm<sup>3</sup>/h, Dürr has a range of five compact system variants that require less space. In these units, the tanks, which are otherwise installed separately, are combined to one unit and the ceramic heat exchanger is sub-divided into internal segments.



The RT0 system is also equipped with safety and measuring devices, a clean gas stack, and an operating platform for the burner system.

A wide variety of optional components are also available; for example, additional external heat recovery or burn-out (a self-cleaning process) that can be integrated into the system.

The electrical control system operating the system is full automatic, controlling the fluctuations of the production facility to keep operating costs at a minimum.

Due to their modular structure, the RT0 units can be pre-assembled to a great extent, so final assembly and commissioning are accomplished in a very short time.

**The RT0 compact units for smaller exhaust air volumes:**

Type	3004	3008	3012	3016	3020
Exhaust air	1,000	4,000	8,000	12,000	16,000
Volume range	-	-	-	-	-
Nm <sup>3</sup> /h	4,000	8,00	12,000	16,000	20,000

**The RT0-units for larger exhaust air volumes:**

Type	3130	3140	3150	3170	3190	31150	31300	31400
Exhaust air	20,000	30,000	40,000	50,000	70,000	90,000	150,000	300,000
Volume range	-	-	-	-	-	-	-	-
Nm <sup>3</sup> /h	30,000	40,000	50,000	70,000	90,000	150,000	300,000	400,000

## Functioning of the RTO-system

The system is designed to minimize fuel use for all operating points as far as possible.

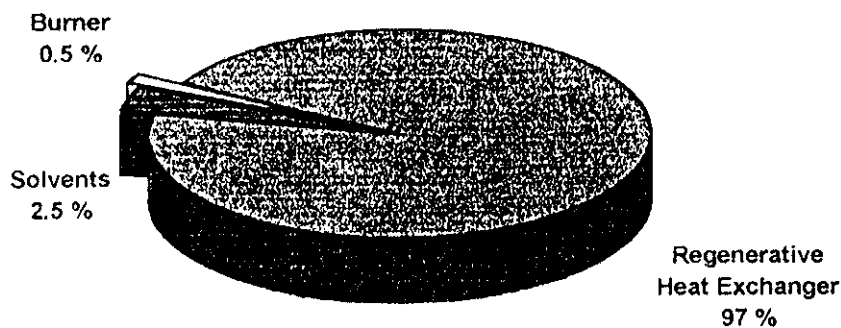
The energy required to heat the exhaust air to over 800° C is supplied to a large extent (up to 97%) by the ceramic heat exchanger, and to a lesser extent by the solvents in the exhaust air.

Autothermal operation of the system is possible from a pollutant concentration of 1.5 g/Nm<sup>3</sup> onwards.

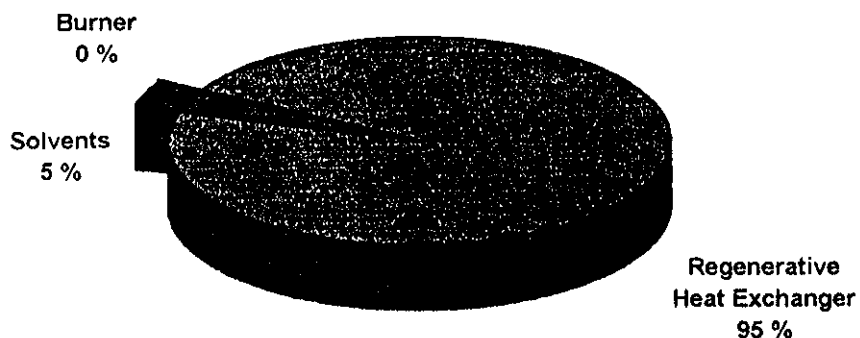
The exhaust air outlet temperature is only about 30° C above the exhaust air inlet temperature.

## Energy sources for heating the process exhaust air to reaction temperature

Example of an energy balance at 1g solvent per Nm<sup>3</sup>

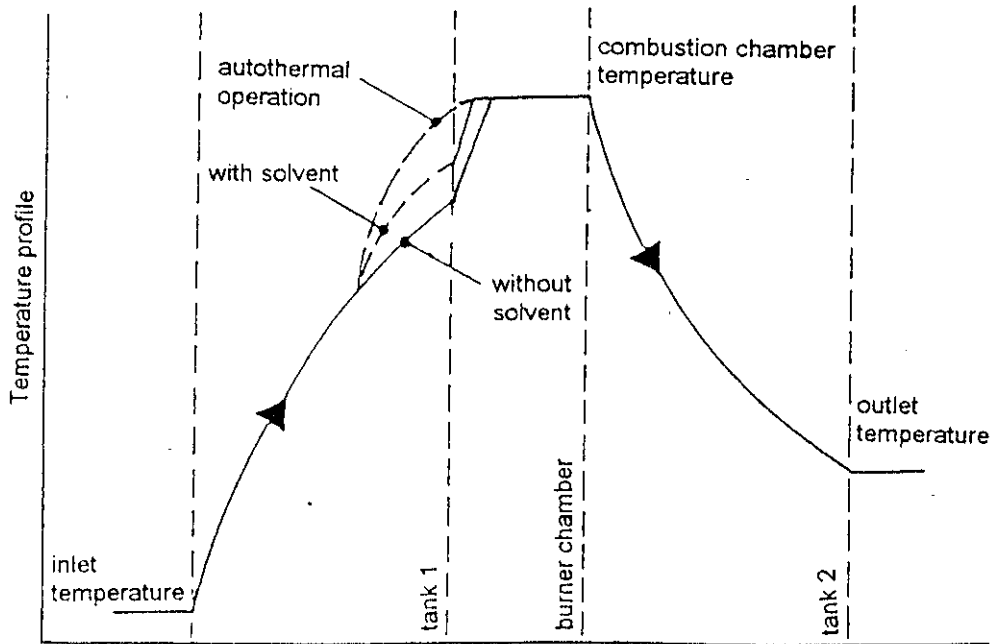


Example of an energy balance at 2 g solvent Per Nm<sup>3</sup>



## Description of the two tank / segment system

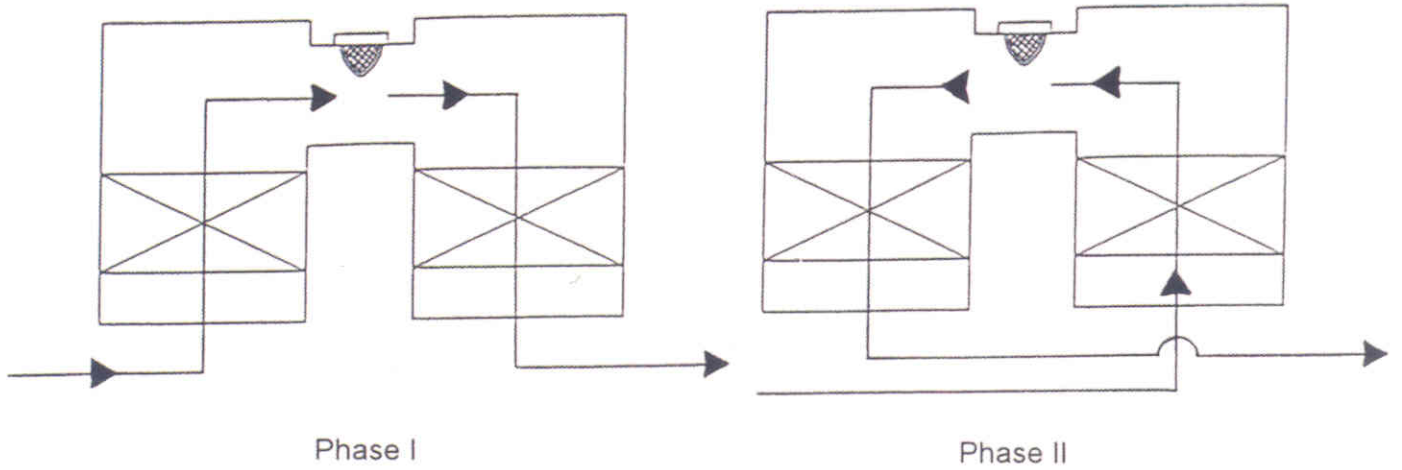
The raw gas flows through the heat exchanger in tank 1 from bottom to top, and while doing so is heated through heat transmission. In the top section of the ceramic bed, the oxidation of the pollutants begins, which leads to a further increase in the temperature.



If necessary, a burner heats the raw gas to final combustion temperature (approximately 820°C), and the pollutants are fully oxidated. The clean gas then flows through the heat exchanger in tank 2 from top to bottom, and while doing so transmits its heat to a second ceramic bed. When the ceramic packed bed has reached its optimum storage point and/or a certain temperature, the system is switched over. The raw gas then flows from bottom to top through tank 2, is oxidated in the combustion chamber, and leaves the system as clean gas via tank 1. This means that the system is constantly switching over to optimize the heat exchanger efficiency and for cleaning. The temperature of the clean gas is 25°C to 100°C higher, depending on the case of application.

The electrical control system determines the passage of the air through the system by switching the valves and dampers.

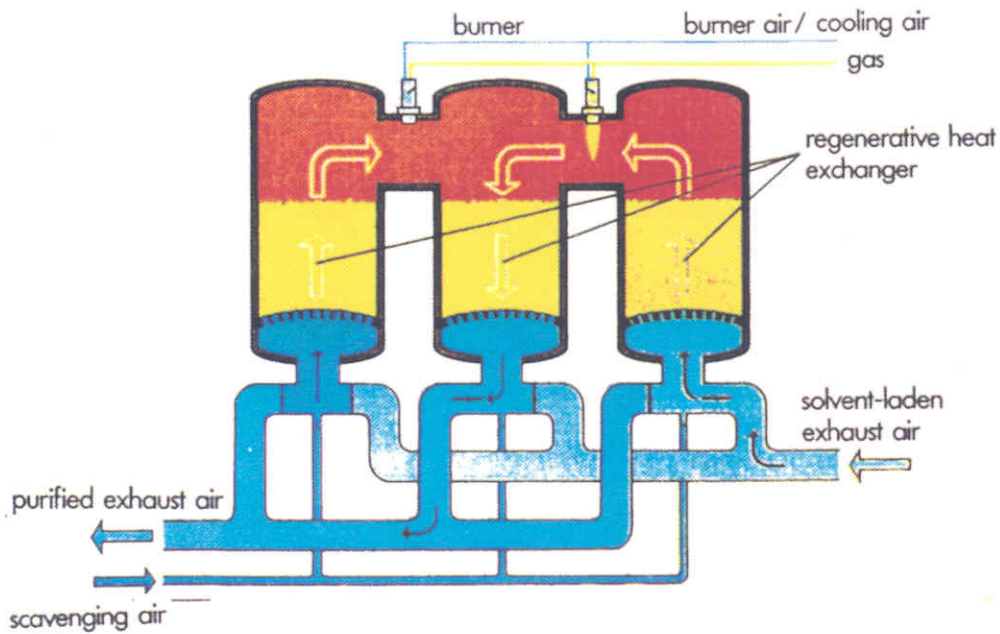
As a concentration peak occurs with two tank and / or two segment operations, these systems are used for the treatment of exhaust air streams with relatively low pollutant concentrations. If legislation allows for calculation of an average over a period of time, the half-hourly mean values can still be met, in spite of small clean gas peaks in the stack.



### Three tank / segment operation

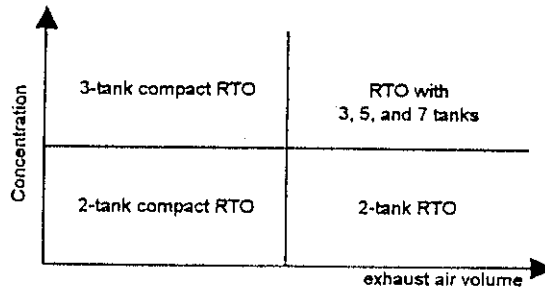
For higher inlet concentrations, it is absolutely necessary to use a system with three tanks or segments. Thus each tank can be purged with clean air before switch over from the raw gas to the clean gas phase for a few seconds, and short-term peaks in the stack can be avoided.

With very high concentrations, the excess heat can be fed-out, and used for secondary heat recovery.





To simplify matters, the use of RTO systems can be sub-divided into four areas:



Even air flow through the system, the intensive contact with the hot surface of the ceramic material, and sufficient residence time in the combustion chamber guarantee a good combusted efficiency and low clean gas concentrations of organically bound carbon (C) and carbon monoxide (CO).

As only a small amount of additional energy is required for RTO units to maintain operating temperature and due to the high heat exchanger efficiency, the burner flame is very small. As result, only a small amount of nitrogen oxide (NOx), which forms in the hot part of a flame, is created.

### Example of an energy balance of the Ecopure<sup>®</sup> RTO

An exhaust air flux of 40,000 Nm<sup>3</sup>/h is allowed to flow into the system at approximately 20°C and at a solvent concentration of 2 g/Nm<sup>3</sup>.

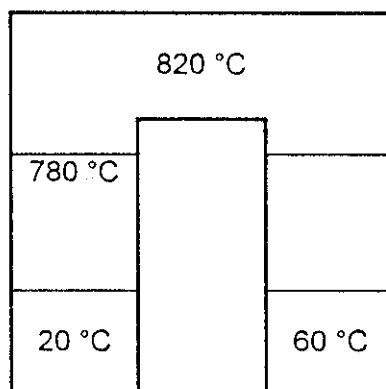
Taking into account the dissipation losses, the heat exchanger is designed in such a way that the energy released by the oxidation of the solvents is sufficient to operate the system without any additional fuel (autothermal operation).

combustion chamber temperature  
energy from solvent-  
reaction  $\Delta t = 40\text{ }^\circ\text{C}$

regenerative heat exchanger I

thermal efficiency = 95 %  $\Delta t = 760\text{ }^\circ\text{C}$

inlet temperature



regenerative heat exchan  
II  
energy store for next cycl  
 $\Delta t = 760\text{ }^\circ\text{C}$

outlet temperature

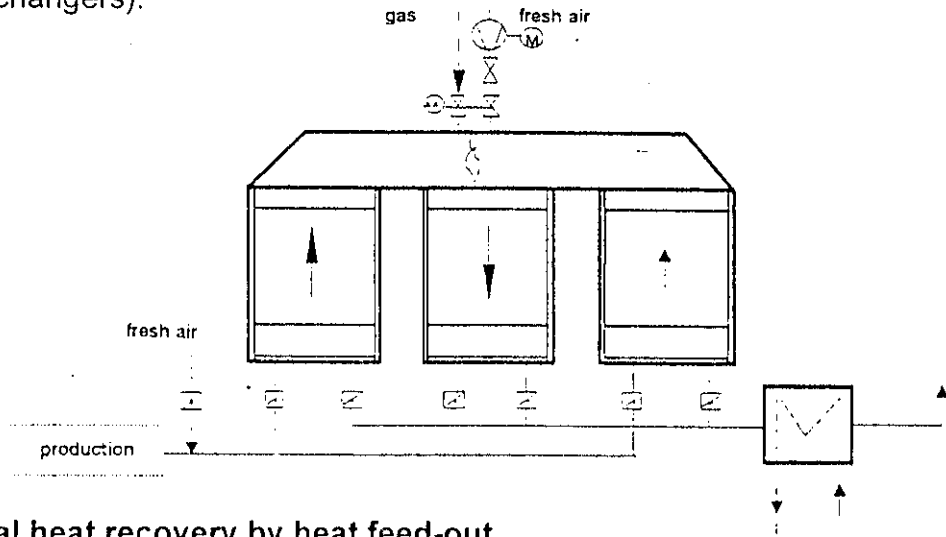
If the same exhaust air flux has a pollutant concentration of 5 g/Nm<sup>3</sup>, the autothermal system produces additional thermal energy of approx. 1,000 kW which can be used for an external heat recovery.

## Optional equipment

Ecopure<sup>®</sup> RTO systems are equipped with a series of components to match each specific project. The following is a short description of the main options:

### 1. External heat recovery installed after the RTO-unit

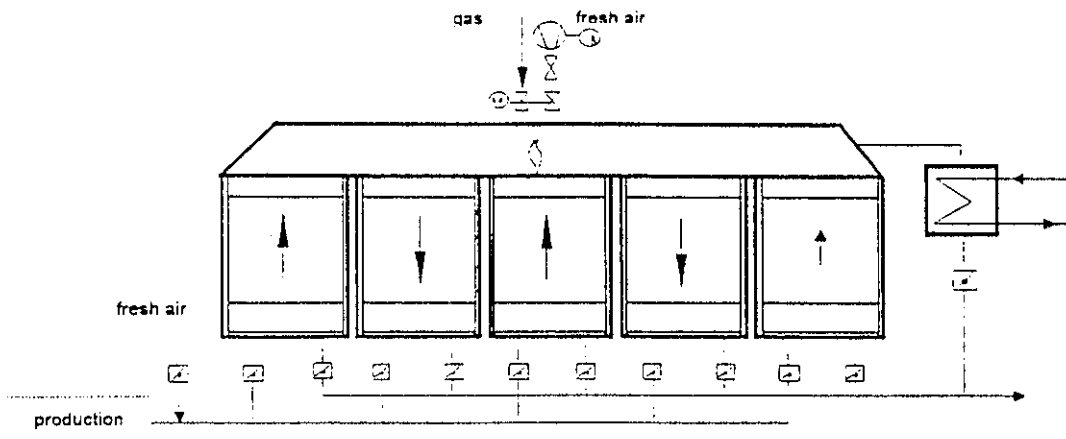
When the RTO unit treats exhaust air with higher inlet temperatures, (for example, 150°C from ovens), the excess heat of the cleaned air (190°C) can be used in subsequent heat exchangers (for example, warm water or air/air heat exchangers).



### 2. External heat recovery by heat feed-out

With high pollutant concentrations in the exhaust air, the of excess solvent energy is always worthwhile, especially with large exhaust air volumes.

A small partial stream of air is taken directly from the combustion chamber, and with this a thermal oil or a steam heat exchanger can be operated, for example.



### **3. System burn-out**

If the exhaust air contains pollutants or particles that may lead to deposits in spite of filter installation, the RTO-system should be equipped with a burn-out system.

In a burn-out system, the bottom, otherwise cold section, of the ceramic heat exchanger is operated at certain intervals or, if required, at a previously determined temperature (for example, 400°C), in order to remove the deposits in the bed.

### **4. Safety equipment**

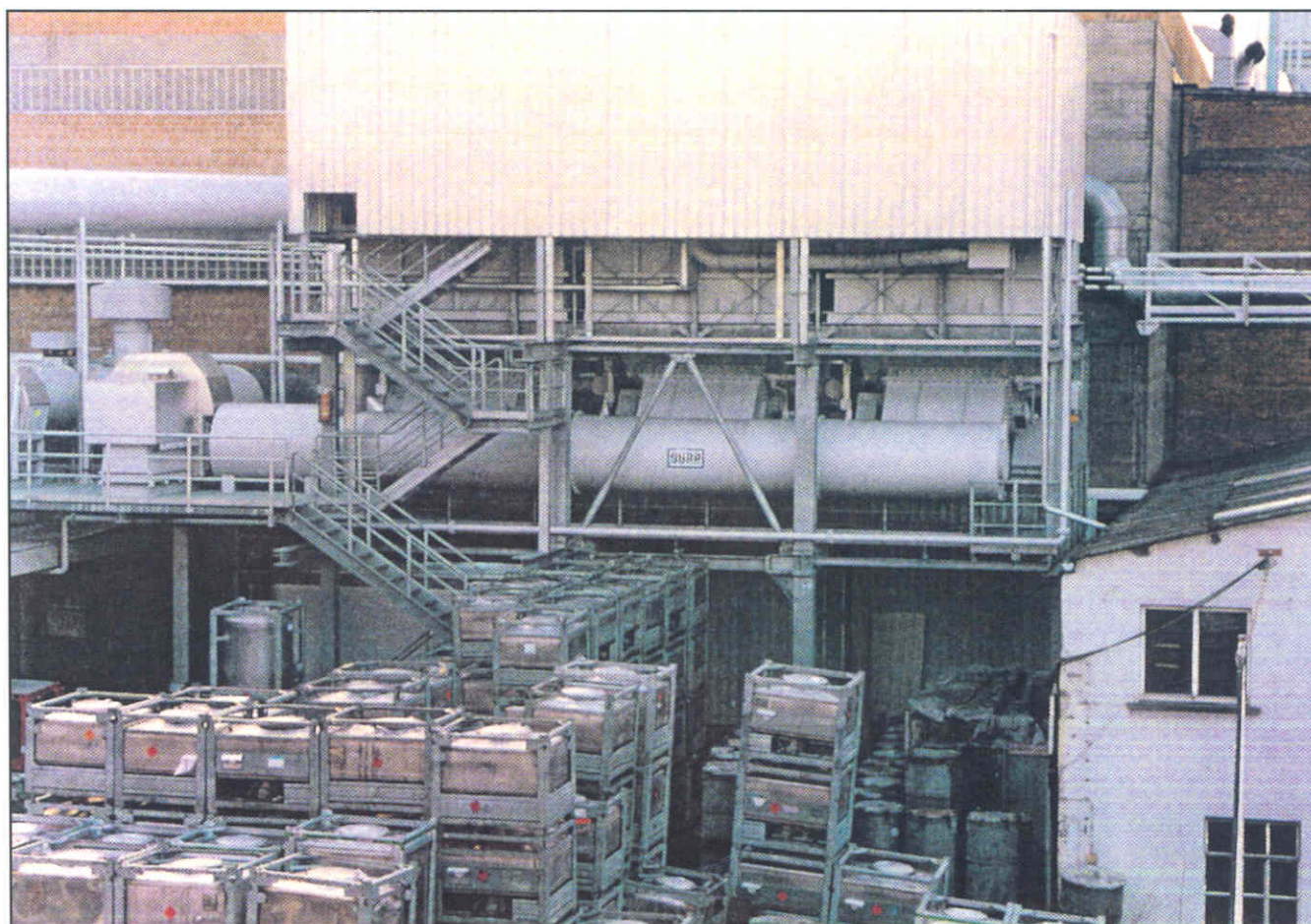
In compliance with regulations and after obtaining the agreement of the owner and the responsible authorities, the system is operated with the appropriate safety equipment.

## Field of application of the Ecopure® RTO system

Process: Paint manufacture

Exhaust air volume: 40,000 Nm<sup>3</sup>/h

Pollutants: Up to 3,000 different solvent mixtures



Process: Exhaust air from printing machines  
Exhaust air volume: 12,500 Nm<sup>3</sup>/h  
Pollutants: Various solvents, e.g. isopropyl alcohol



# יום עיון בנושא ניטור ומניעת זיהום אויר בחומרים אורגניים נדיפים (VOCs)

## Monitoring and Air Pollution Control of Volatile Organic Compounds (VOCs)

יום העיון שנערך ב-27.6.1996 במוסד נאמן עסק בשלושה הבטים  
עיקריים של הנושא:

- א. חוק האויר הנקי ותקני פליטה ל-VOC בעולם ובישראל  
(מ. גרבר, המשרד לאיכות הסביבה).
- ב. אמצעים ושיטות למדידה וניטור של חומרים אורגניים בארופות  
ובאויר הפתוח (ש. לרמן, אוניברסיטת בן-גוריון י. ממן  
ור. חשמונאי, הטכניון).
- ג. מתקנים למניעת הפליטה של חומרים אורגניים לאויר  
(י. גולדשמיד, חברה לתכנון והנדסה סביבתית; ח. מייזלס,  
אקוטופ; י. רגיניאנו, תעשייה אוירית, E. Vick, חברת Durr  
גרמניה).

יום העיון נערך בחסות מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע  
ובטכנולוגיה, המשרד לאיכות הסביבה, והאגודה הישראלית  
לאקולוגיה ומדעי איכות הסביבה. מארגני הכנס היו ד"ר י. גולדשמיד,  
פרופ' י. ממן ואינג' ד. כהן. השתתפו כ-100 מהנדסים ומדענים שייצגו  
את התעשייה הכימית, בתי הזיקוק, מתקני צביעה ואחרים. את באי  
הכנס ברכו פרופ' י. ממן, יו"ר האגודה הישראלית לאקולוגיה ואיכות  
הסביבה, פרופ' נועם גבריאלי, יו"ר איגוד ערים חיפה לאיכות  
הסביבה, מר א. וורדי, מנכ"ל המשרד לאיכות הסביבה, ואינג' ד. כהן  
ממוסד שמואל נאמן.

יום העיון הוא השני בסדרת ימי עיון העוסקים במדידה ובמניעה של  
זיהום אויר. קדם לו יום שעסק בחומר חלקיקי באויר. יום זה הוא  
צעד נוסף בקרוב מדינת ישראל לעמידה בתקנים המקובלים בעולם  
המערבי שמטרתם שמירה על איכות הסביבה.

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל



מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע ובטכנולוגיה  
קרית הטכניון, חיפה 32000, טל. 05/8292329 פקס. 04-8231889