



Doctoral Thesis

## Toluene removal from waste air by combined biological and non-thermal plasma techniques

**Author(s):**

Sjöberg, Anders

**Publication Date:**

1999

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-002093505> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 13092

# **Toluene Removal from Waste Air by Combined Biological and Non-Thermal Plasma Techniques**

Dissertation submitted to the  
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH) ZÜRICH**  
for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

Presented by

**Anders Sjöberg**

Dipl.-Chem. Ing., Lunds Tekniska Högskola, Lund

Born August 20, 1968

Citizen of Sweden

Accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. K. Hungerbühler, examiner  
Prof. Dr. E. Heinzle, co-examiner  
Dr. T. H. Teich, co-examiner

Zürich 1999

## Abstract

The bio-trickling filter and the non-thermal plasma are two oxidative treatment techniques for waste gas streams with low concentrations of volatile organic compounds (VOC). The low energy consumption of the bio-trickling filter and the high flexibility of the non-thermal plasma make a combination of the two techniques attractive, especially for the treatment of waste gas streams with fluctuating load and composition. The two systems were experimentally investigated using toluene as a model compound to gain an understanding of the governing physical, chemical and biological processes and to determine their energy efficiencies which have to be taken into account for the evaluation of full scale plants.

The elimination capacity of the bio-trickling filter was limited by the biological degradation rate. The measured CO<sub>2</sub> production under transient conditions could be described by a dynamic mathematical model including substrate inhibition kinetics and biofilm diffusion. The numerical simulation indicated that the biological activity is located in a thin upper layer of the biofilm and that the lower layers act as sorption volume for toluene.

Toluene was mineralised in a dibarrier discharge reactor via several intermediate products, mainly organic acids and aldehydes. Comparison with the ozonation products of toluene in aqueous solution strongly suggested that oxidation pathways known for organic compounds in the aqueous solution are also applicable for the gas phase oxidation. The energy efficiency of the dibarrier discharge reactor could be described by the  $\beta_e$ -value (Rosocha et al., 1993), which depended on the toluene concentration and the air humidity.

The economic and ecological evaluation of a full scale bio-trickling filter and a dibarrier discharge reactor showed that the bio-trickling filter is more efficient than the non-thermal plasma for purifying toluene-containing waste gas streams. The economic working range of the bio-trickling filter is limited to toluene concentrations lower than 1 g m<sup>-3</sup>. A combined bio-plasma system may be advantageous in some special cases for the purification of waste gas streams with fluctuations in load and composition or with mixtures of well and poorly biodegradable compounds.

## Zusammenfassung

Der Bio-Trickling Filter und das nicht-thermische Plasma sind zwei oxidative Abluftreinigungsverfahren für Abluftströme mit tiefen Konzentrationen flüchtiger organischer Stoffe (VOC). Der tiefe Energieverbrauch des Bio-Trickling Filters und die hohe Flexibilität des nicht-thermischen Plasmas macht eine Kombination der beiden Verfahren interessant, insbesondere für die Behandlung von Abluftströmen schwankender Zusammensetzung und Konzentration. Die beiden Verfahren wurden mit Toluol als Modellsubstanz experimentell untersucht, um die vorherrschenden physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge besser zu verstehen. Weiter wurden die Energieeffizienzen der beiden Verfahren bestimmt, die für die Evaluation im grossen Masstab notwendig sind.

Die Abbaukapazität des Bio-Trickling Filters ist durch die biologische Abbaugeschwindigkeit limitiert. Die gemessene CO<sub>2</sub>-Produktion konnte auch mittels eines dynamischen mathematischen Modells mit Substratinhibierungskinetik und Biofilmdiffusion beschrieben werden. Die numerische Simulation deutete auf die Existenz einer oberen Biofilmschicht mit hoher biologischer Aktivität und eine untere Sorptionsschicht für Toluol.

Toluol wurde im Barrieren-Entladungsreaktor auf dem Wege über mehrere Zwischenprodukte, hauptsächlich Aldehyde und organische Säuren, mineralisiert. Ein Vergleich zwischen diesen Zwischenprodukten und den Ozonierungsprodukten von Toluol in der wässrigen Phase lässt auf ähnliche Abbauege für die Oxidation organischer Stoffe in der Gasphase schliessen. Die Energieeffizienz des Barrieren-Entladungsreaktors konnte mittels des  $\beta_e$ -Wertes beschrieben werden (Rosocha et al., 1993). Der  $\beta_e$ -Wert war von der Toluolkonzentration und die Luftfeuchte abhängig.

Die ökonomische und ökologische Evaluation bei Anwendung in grossem Masstab zeigte, dass für die Reinigung toluolbeladener Abluftströme tiefer Konzentration der Bio-Trickling Filter effizienter war als das nicht-thermische Plasma. Der ökonomische Arbeitsbereich des Bio-Trickling Filters ist auf Toluol-Konzentrationen unter 1 g m<sup>-3</sup> beschränkt. Eine Kombination der beiden Verfahren kann für die Reinigung von Abluftströmen schwankender Konzentration sowie für Abluftströme mit Stoffgemischen unterschiedlicher biologischer Abbaubarkeit vorteilhaft sein.

## Sammanfattning

Biotricklingfilter och icke-termiskt plasma är två oxiderande metoder för rening av luft med låga koncentrationer av flyktiga organiska ämnen (VOC). Genom att kombinera de två luftreningsmetoderna kan man dra fördel av biotricklingfiltrets låga energiförbrukning och den icke-termiska plasmans höga flexibilitet, speciellt vid rening av luft, där sammansättning och koncentrationer av VOC fluktuerar. För att bättre förstå de styrande fysiska, kemiska och biologiska processerna undersöktes de två luftreningsmetoderna experimentellt med toluol som modellsubstans. Även luftreningsmetodernas energiförbrukning bestämdes, vilket gjorde det möjligt att bedöma förutsättningarna för anläggningar i full skala.

Biotricklingfiltrets nedbrytningskapacitet begränsades av den biologiska nedbrytningshastigheten. Produktionen av CO<sub>2</sub> mättes under dynamiska förhållanden och kunde beskrivas med hjälp av substratinhiberingskinetik och biofilmdiffusion i en dynamisk matematisk modell. Den numeriska simuleringen visade att biofilmen förmodligen bestod av ett tunt övre skikt med en hög biologisk aktivitet samt ett undre skikt som lagrade toluol och fungerade som en toluolbuffert för den biologiska nedbrytningen.

Toluol oxiderades till CO<sub>2</sub> och vatten i den icke-termiska plasman via flera organiska mellanprodukter, huvudsakligen aldehyder och organiska syror. En jämförelse mellan dessa mellanprodukter och de från ozonering av toluol i vattenfas visar, att nedbrytningsvägarna för toluol i vattenfas med största sannolikhet även gäller för nedbrytning av toluol i gasfas. Den icke-termiska plasmans energiförbrukning kunde beskrivas med  $\beta_e$  (Rosocha et al., 1993), vars värde berodde på toluolkoncentrationen och luftfuktigheten.

Den ekonomiska och ekologiska bedömningen av biotricklingfiltret och icke-termiska plasman i full skala visade, att biotricklingfiltret är mer effektivt än den icke-termiska plasman för rening av luft innehållande toluol. Biotricklingfiltrets ekonomiska arbetsområde är begränsad till toluolkoncentrationer lägre än 1 g m<sup>-3</sup>. Ett kombinerat bioplasmasystem kan i vissa fall vara fördelaktigt för rening av luft med fluktuerande sammansättningar och koncentrationer av VOC eller för rening av luft med blandningar av biologiskt lätt- och svårnedbrytbara ämnen.