

Novel membrane based biological waste gas treatment system

Doctoral Thesis

Author(s):

Studer, Michael H.-P.

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005069883>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 16238

NOVEL MEMBRANE BASED BIOLOGICAL WASTE GAS TREATMENT SYSTEM

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Michael Hans-Peter Studer
Dipl. Verfahrens-Ing. ETH

born on the 24th Jun. 1974
citizen of Mühledorf and Rüttenen (SO), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ph. Rudolf von Rohr (ETH Zurich, Switzerland), examiner
Prof. Dr. M. Deshusses (UC Riverside, U.S.A.), co-examiner
Prof. Dr. S. Panke (ETH Zurich, Switzerland), co-examiner

2005

Abstract

Biological waste gas treatment is an attractive method for controlling air emissions of biodegradable volatile organic compounds (VOCs). Microorganisms degrade the VOCs into harmless products, such as carbon dioxide, biomass and water. Yet, in spite of these assets, unsolved challenges remain for biological waste gas treatments in comparison to conventional physico-chemical procedures. Fluctuating loads in waste gas streams, especially from VOCs with low water solubility, often cannot be satisfactorily removed. Concentration peaks leave the reactor virtually untreated, while periods without VOCs in the waste gas lead to a reduction in the activity of the biofilm. Furthermore, bioreactors are often subject to clogging due to excessive biomass accumulation.

The objective of the present work was to design and characterize a novel system, which is able to buffer fluctuating loads of toluene as example for poorly water soluble VOCs and continuously remove and discharge inactive, excessive biomass from the reactor.

A flat sheet membrane reactor was built and investigated with an absorption process introduced as a buffering step. The VOCs and oxygen are withdrawn from the waste gas and buffered in silicon oil prior to bacterial degradation. The absorption and the biodegradation are both membrane based. Dense, 50 μm thick, poly dimethyl siloxane (PDMS) membranes featuring an integrated stainless steel grid for mechanical stability are used to separate the distinct phases. A bacterial biofilm, which degrades the buffered VOCs, develops on the membrane, separating the aqueous phase from the absorbent. The culture medium is constantly passing along the biofilm introducing shear stresses on the

surface and thereby removing excess biomass. The feeding of the VOCs and oxygen through the membrane to the base of the biofilm creates an activity distribution with active biomass at the membrane and spent biomass towards the aqueous phase. Therefore, the discharge of biomass does not interfere with the degradation performance.

Experiments were performed to investigate the effects of toluene loading rate and gas residence time on the performance of a laboratory-scale membrane bioreactor under steady-state and dynamic conditions. The surface elimination capacity was virtually independent of the gas flow rate and increased with increasing surface loads to reach a maximum elimination capacity of $0.6 \text{ g/m}^2\text{h}$ for surface loads beyond $3 \text{ g/m}^2\text{h}$. Experiments with fluctuating inlet mass flow rates of toluene demonstrated the buffering capability of the set-up.

The biofilm was investigated with respect to the spatial distribution of bacterial activity and the composition of the microbial consortium. Oxygen concentration profiling, as well as live/dead confocal laser scanning microscopy (CFLSM) analyses of the biofilm indicated that microbial activity was limited to an $80 \mu\text{m}$ thick zone next to the membrane. Selective plate experiments showed that 50 days after inoculation the percentage of aerobic culturable cells in the biofilm, which were able to metabolize toluene, decreased to 40%. The toluene degraders consisted of a considerable fraction (between 40 and 70%) of bacteria that were different from the two originally inoculated strains *Pseudomonas putida* F1 and *Rhodococcus globerulus* PWD1.

In order to conduct sensitivity analyses and to perform scaling-up feasibility studies, a model of the process was developed. The four phases – gas, absorbent, biofilm, culture liquid – were modeled in equilibrium at their boundaries. For each phase, differential equations for the toluene and oxygen concentrations were derived (time dependent, locally one-dimensional). The model was numerically solved by applying an ODE solver using spatial discretization. The biofilm activity was modeled on a double Monod kinetic. The active biomass was distributed over the biofilm thickness according to the results of the CFLSM measurements. The sensitivity analysis of the model indicated that the removal capacity was strongly influenced by the yield coefficients Y_{XS} and Y_{XO_2} as well as by decreasing maximum specific growth rates μ_{max} .

Zusammenfassung

Biologische Abluftreinigung ist eine attraktive Methode, um Emissionen von biologisch abbaubaren flüchtigen organischen Substanzen (volatile organic compounds, VOCs) zu vermeiden. Mikroorganismen zersetzen die VOCs zu unschädlichen Produkten wie Kohlendioxid, Biomasse und Wasser. Trotz dieser Vorteile existieren immer noch ungelöste Herausforderungen für die biologische Abluftreinigung, wenn sie mit konventionellen physiko-chemischen Methoden verglichen wird. Schwankende Beladungen des Abgasstroms insbesondere mit schlecht wasserlöslichen VOCs können nicht zufriedenstellend behandelt werden. Hohe Konzentrationsspitzen verlassen den Reaktor weitgehend unverändert, während Perioden ohne VOCs im Abgasstrom zu einer Verminderung der Aktivität des Biofilms führen. Ferner sind Bioreaktoren wegen exzessiver Biomasseanreicherung oft Verstopfungen ausgesetzt.

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit war, ein neues System zu entwickeln und charakterisieren, welches in der Lage ist, schwankende Ladungen von Toluol als Modellsubstanz für schlecht wasserlösliche VOCs zu puffern und das überschüssige, inaktive Biomasse kontinuierlich aus dem Reaktor entfernt.

Ein Flachmembranreaktor wurde gebaut und untersucht. Ein Absorptionsprozess wird als Pufferungsschritt eingeführt. Aus dem Abgas stammende VOCs und Sauerstoff werden dem Gas entzogen und in Silikonöl gepuffert, bevor sie bakteriell abgebaut werden. Sowohl der Absorptions- als auch der bakterielle Zersetzungsprozess sind membranbasiert. Dichte, 50 μm dicke, selbsttragende Polydimethylsiloxan

(PDMS) Membranen werden benutzt, um die entsprechenden Phasen zu trennen. Auf der Membran, die die wässrige Phase und das Absorbens trennt, entsteht ein Biofilm, der Sauerstoff und gepufferte VOCs abbaut. Das Nährmedium strömt mit konstanter Geschwindigkeit entlang des Biofilms und erzeugt dadurch Scherkräfte auf die Oberfläche, die die Abtragung von überschüssiger Biomasse bewirken. Die Fütterung von VOCs und Sauerstoff zu dem Biofilm durch die Membran erzeugt eine Aktivitätsverteilung mit aktiver Biomasse auf der Membran und inaktiver Biomasse auf der Nährmediumsseite. Die Abtragung von Biomasse durch das strömende Medium hat daher keinen Einfluss auf die Abbauleistung.

Der Effekt der Toluol-Beladungsrate und der Verweilzeit des Modellgases auf die Leistung des Labormassstab-Reaktors unter konstanten und dynamischen Bedingungen wurde experimentell untersucht. Die Oberflächen-Eliminierungskapazität war weitgehend unabhängig von der Gasflussrate und stieg mit steigender Oberflächenbeladung, um eine maximale Eliminierungskapazität von $0.6 \text{ g/m}^2\text{h}$ für Beladungen kleiner als $3 \text{ g/m}^2\text{h}$ zu erreichen. Experimente mit schwankenden Toluol-Massenflüssen im Einlassgas zeigten die gute Pufferungskapazität des Reaktors.

Der Biofilm wurde hinsichtlich der örtlichen Verteilung der bakteriellen Aktivität und der Zusammensetzung des mikrobiellen Konsortiums untersucht. Das Sauerstoffkonzentrations-Profil als auch die Vitalitätsanalyse mit Hilfe der konfokalen Laserscanning-Mikroskopie demonstrierten, dass die mikrobielle Aktivität auf eine $80 \mu\text{m}$ dicke, direkt auf der Membran liegende Schicht beschränkt ist. Selektive Plattenexperimente zeigten, dass 50 Tage nach Animpfung des Reaktors der Anteil der aerob kultivierbaren Zellen, die fähig sind, Toluol zu metabolisieren, auf 40 % gesunken ist. Eine beträchtliche Fraktion dieser Toluolabbauer – zwischen 40 und 70 % – bestand aus Bakterien, die sich von den ursprünglich angeimpften Stämmen *Pseudomonas putida* F1 und *Rhodococcus globerulus* PWD1 unterscheiden.

Um Sensitivitätsanalysen und Massstabvergrößerungs-Betrachtungen durchführen zu können, wurde ein Modell des neuen Prozesses entwickelt. Die vier Phasen – Gas, Absorbens, Biofilm und Kulturmedium – wurden unter Annahme des Gleichgewichts an ihren Grenzen modelliert. Für jede Phase wurden Differentialgleichungen für die Sauerstoff-

und Toluolkonzentration abgeleitet (zeitabhängig, lokal 1-dimensional). Das Modell wurde numerisch unter Anwendung eines ODE-Solvers mit örtlicher Diskretisierung gelöst. Die Biofilmaktivität wurde mit einer Doppel-Monod-Kinetik modelliert. Die aktive Biomasse wurde anhand des mit konfokaler Laserscanning-Mikroskopie gemessenen Aktivitätsprofils über die Biofilmdicke verteilt. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die modellierte Abbauleistung des Reaktors stark abhängig ist von den Ausbeutekoeffizienten Y_{XS} und Y_{XO_2} sowie von sinkenden maximalen spezifischen Wachstumsraten μ_{\max} .