

기체투과막을 이용한 암모니아성 질소 회수방안

이 상 훈[†] · 채 상 엽

계명대학교 환경학부

(2022년 6월 16일 접수, 2022년 6월 25일 수정, 2022년 6월 28일 채택)

Recovery of Ammonia Nitrogen using Gas-permeable Membranes

Sang-hun Lee[†] and Sang Yeop Chae

Department of Environmental Science, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

(Received June 16, 2022, Revised June 25, 2022, Accepted June 28, 2022)

요 약: 기체투과막 기술을 이용하여 가축분뇨 폐기물 등으로부터 암모니아성 질소를 효과적으로 회수할 수 있다. 이는 폐기물 내 암모니아 기체가 폐기물에 함침된 기체투과막의 미세공극을 투과하여 막반대편에 도달하게 된다. 투과된 암모니아 기체분자는 막 반대편에 존재하는 용액 내 황산 등 산에 의해 포획 및 회수된다. 막 유입부 내 암모니아성 질소 제거 효과를 높이기 위해서는 우선 유입 폐기물 내 pH를 높게 유지해야 하는데 pH 상승에 필요한 염기성 약품 투입비용이 문제가 될 수 있다. 기존 연구에서는 보다 저렴한 소석회 투입하거나 폭기 혹은 질산화억제를 통해 높은 pH를 효과적으로 유지시키는 방안이 거론되고 있다. 한편 암모니아성 질소 회수에 쓰이는 기체투과막의 재질은 적절한 내열성이나 내화학적 이외에도 소수성을 띠는 특징이 있으며 이를 통해 막기공을 통해 암모니아 기체를 선택적으로 투과시킬 수 있다. 향후 연구에서는 다양한 성상을 가진 현장 폐기물을 이용하여 실증 Test를 수행하고 이를 기반으로 최적 설계/운전 조건 규명 및 경제성 제고 방안을 수립하여야 한다.

Abstract: Ammonia nitrogen can be effectively recovered from livestock manure waste, etc. by using the gas permeable membrane technology. In this case, ammonia gas in the waste passes through the pores in one-side of membrane, impregnated in waste, and then reach the opposite side of the membrane. The permeated ammonia gas molecules are captured and recovered by acid (such as sulfuric acid) in the solution existing on the opposite side of the membrane. In order to improve ammonia nitrogen removals in the inlet part, high pH should be maintained in the feed waste including ammonia nitrogen to recover, which requires the cost of the chemical. To resolve this issue, previous studies tested various methods, for example, utilization of cheap calcium hydroxide or aeration together with inhibition of unwanted nitrification. The gas permeable membranes used for the recovery of ammonia nitrogen may be characterized, not only by proper heat and chemical resistance, but also by hydrophobicity, allowing selective ammonia gas permeation through the hydrophobic membrane pores. Future research should consider the relevant pilot or upscale processes using on-site wastes with various properties, and identify the optimal design/operation conditions as well as economic feasibility improvement plans.

Keywords: gas-permeable membrane; ammonia nitrogen, recovery, pH, hydrophobicity

1. 서 론

암모니아는 상온에서 주로 휘발성 기체로 존재하며 중성 혹은 산성 수용액에 용해될 경우 액 중 수소이온과 결합하여 암모늄 이온을 형성한다. 그리고 암모니아

가 액 중에 계속 유입되면 암모늄 형성에 필요한 수소 이온이 계속 소모되어 수용액의 pH를 상승시키게 된다. 암모니아는 약취와 유해성을 띄며 대기 중 저농도로 존재하더라도 인체에 자극을 준다. 또한 저농도 암모니아가 인체 내 장시간 존재할 경우 만성 기관지염 등을 초

[†]Corresponding author(e-mail: shlee73@kmu.ac.kr; <http://orcid.org/0000-0003-2577-1736>)

래하며 고농도일 경우에는 보다 심각한 피해를 야기할 수 있다. 이러한 악취 및 유해성 외에도 암모니아는 대기 중 황산 혹은 질산가스분자와 결합하여 (초)미세먼지 생성에 기여한다[1].

반면, 암모니아의 긍정적인 측면도 있는데 암모니아성 질소는 전통적으로 비료원료로 쓰이고 있으며, 최근에는 암모니아가 수소운반체 혹은 친환경 연료로도 각광받고 있다[2]. 이에, 다양한 연구를 통해 환경 중에 존재하는 암모니아를 효과적이며 친환경적으로 회수하는데 관심을 기울이고 있다. 전통적인 암모니아 합성은 환경오염과 에너지소모가 크다. 이에 최근에는 암모니아성 질소가 많이 함유된 가축 분뇨폐수나 폐기물에서 암모니아를 회수하는 방법이 대두되고 있다[3-4]. 암모니아 회수기술에는 여러 가지가 있는데[3-4] 이 중 하나인 기체 투과막 기술은 가축 분뇨에서 암모니아를 효과적으로 회수할 수 있는 비교적 새로운 기술이다[3]. 기존 연구자들은 기체 투과성 막 기술을 이용한 암모니아 회수의 높은 효과를 언급하였다. 예를 들어 한 기존 연구에 따르면, 기체 투과성 막에 의한 암모니아 제거 및 회수는 기존의 탈리기술보다 훨씬 신속하다고 언급하였다[5]. Molinuevo-Salces *et al.*은 가축(돈사 또는 가금류) 분뇨 내 거의 모든 암모니아성 질소를 회수하였다[6]. 또한 García-González와 Vanotti에 따르면 기체 투과막 방법은 (분뇨 내 암모니아성 질소 회수를 대상으로 할 경우) 별도의 전처리 과정 없이 유기물을 암모니아성 질소와 분리시킬 수 있다고 하였다[7]. 이는 기체투과막 표면이 소수성이어서 기체분자를 제외한

액중의 (대부분이 친수성인) 물질들은 공극을 통과하지 못하기 때문인 것으로 보인다. Daguerre-Martini *et al.*의 연구에서도 이와 유사하게 기체투과막을 이용한 폐기물(구체적으로 해당연구에서는 축산폐수) 내 암모니아성 질소의 회수효과는 유기물질(부식산)의 농도에 큰 영향을 받지 않는다고 보고하였다[8].

이러한 장점에도 불구하고 본 기술은 아직 여러 측면에서 연구 및 기술개발이 더 필요하다. 본 연구에서는 이 중 전달-반응 원리 기반 공정 최적화, 효과적인 pH 조절방안 및 다양한 막재질 적용 등 다양한 기존 연구 결과를 검토 및 논의하였다.

2. 기체투과막 기술을 통한 암모니아 회수의 원리

Fig. 1에서 도시된 바와 같이 유입부에 주입된 폐기물 내 암모니아성 질소는 우선 막의 한쪽 면과 접촉하게 된다. 이 후 기체투과막 내 미세공극을 통해 암모니아 기체가 투과되고, 투과된 암모니아 기체는 막 반대편(유출부 혹은 회수부)의 산성분자에 의해 포획된다[8-10]. 용액에 쓰이는 산은 그림과 나타난 바와 같이 가격이 저렴한 황산이 널리 쓰인다[11]. 물론 황산 외에도 질산, 인산, 구연산 및 젖산과 같은 다른 유/무기산도 사용될 수 있다[12]. 산용액은 막 내부를 순환하면서 투과된 암모니아에서 전환된 암모늄과 결합하여 황산 암모늄 염을 형성하는데, 이를 회수하는 것이다.

이러한 암모니아성 질소의 회수 효율은 여러 요인에 영향을 받는데 특히 분뇨의 pH에 크게 영향을 받는다.

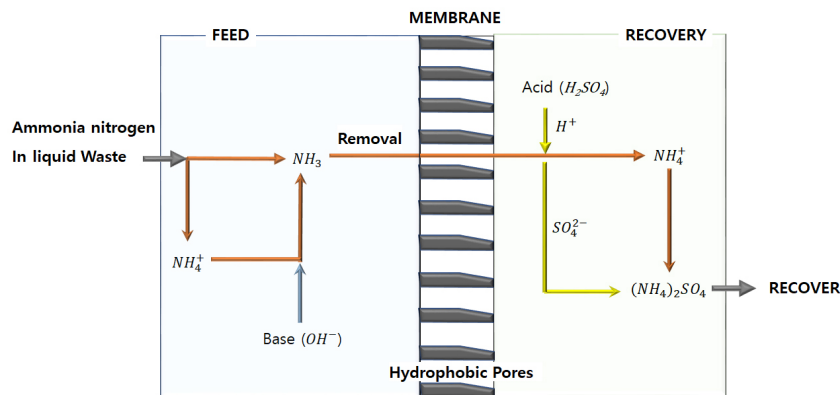


Fig. 1. A schematic demonstration of removal and recovery processes of ammonia nitrogen from liquid waste (i.e. livestock manure) by a gas-permeable membrane with hydrophobic pores, around which the solutions in the feed (left) and the recovery (right) sides were controlled to have high and low pH ranges for ammonia and ammonium dominance, respectively; this figure is modified from Daguerre-Martini *et al.* [8] and Darestani *et al.* [28].

분뇨의 암모니아성 질소는 암모늄 이온과 휘발성인 암모니아의 형태로 존재하는데[8-13], pH 8 미만에서 주로 암모늄 이온의 형태로 존재하며, 반면 pH 10 이상에서는 암모니아가 우세하다[14]. 따라서 그림에 표현된 바와 같이 유입부(Feed side)에서는 높은 pH를 유지하여 암모니아성 질소를 가능한 전부 암모니아로 전환시키는 것이 바람직하다. 그러면 휘발성이 강한 암모니아 분자가 물분자에서 빠져나와 기체투과막의 소수성 내부 기공을 투과하고 막 반대편(Recovery side)으로 원활하게 투과-확산될 수 있다[15-17]. 이 때 정상상태 가정 하에서 암모니아의 투과확산 과정은 총괄물질전달계수 Ko [m/hr]를 포함한 플럭스 N_{NH_3} [kg/m²/hr]으로 묘사되며 이 경우 관형투과막의 유입부 내 초기 암모니아 농도 C_0 에서 체류시간 t [hr]을 거쳐 일부 암모니아는 막을 투과하고 남은 농도 C_1 는 다음 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다[15].

$$\ln(C_1/C_0) = -\frac{\pi DLK_0}{V}t \quad (1)$$

여기서 V , D 및 L 은 각각 유입부의 부피(m³), (관형) 막의 직경(m) 및 막의 유효 길이(m)를 나타낸다.

상기 식 (1)에 나타난 바와 같이 시간에 따른 암모니아 농도를 파악하면 총괄물질전달계수 Ko 를 구할 수 있다. 예를 들어 Munasinghe-Arachchige *et al.*의 연구에서 반응온도 약 25°C에서 합성 염화암모늄 용액으로부터 암모니아성 질소 회수를 위한 최적 조건을 구하고 그에 따른 총괄물질전달계수를 구하였다[15]. 여기서 상세 반응 조건은 유출부측 pH는 2, 산용액 순환 속도는 25 mL/min, 및 유입부측 pH=10이었을 때 식 (1)에 의해 산정된 총괄 물질전달계수는 0.007 m/hr 정도였다[14]. 식 (1)을 보면 적정 시간에 따른 유입부에서의 질소제거 효과는 관형 막의 직경 D , 유효 길이 L 및 공급물의 부피 V 의 함수로 나타낼 수 있으며, $D'L/V$ 가 증가할수록 유입부에서의 시간당 질소 제거율이 증가된다고 볼 수 있다. Fig. 2에서는 식 (1)을 이용하여 기체투과막 유입부에서의 암모니아 제거율($1-C_1/C_0$)이 $D'L/Vt$ 의 증가에 따라 비선형적으로 증가함을 보였다. 또한 총괄물질계수가 높으면 낮은 $D'L/Vt$ 에서도 보다 높은 제거율을 보였다. 이와 같이 기체투과막의 질소제거 및 회수 효율은 상기 물리화학적 인자 외에도 막 제조 및 운전비용과 회수 질소의 가치 등을 고려하

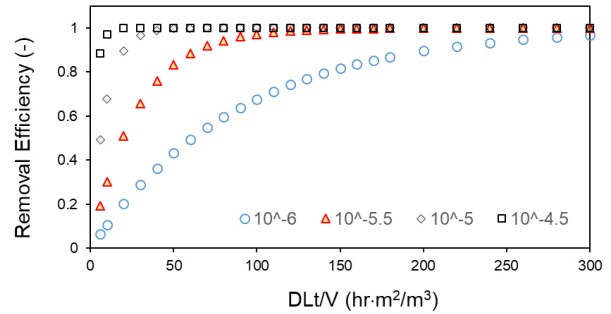


Fig. 2. An exemplary plot including ammonia removal efficiency from the feed side of a gas-permeable membrane as a function of DLt/V [D : membrane diameter (m); L : membrane length (m); t : ammonia residence time in the feed side (hr); V : volume of the feed side of the membrane (m³)] values and overall mass transfer coefficients ranging 10^{-6} - $10^{-4.5}$ m/s, which was calculated by Eq.(1) [15].

여 이루어져야 한다[15].

참고로, 총괄물질전달계수와 농도구배를 통한 모사 외에도 확산계수가 포함된 확산항(Diffusive Flux~ $D'dC/dx$; D 는 암모니아 확산계수)와 유체흐름을 통한 대류전달(Convective Flux~ $v'C$; v 는 막주위 폐기물매질 속도)을 토대로 암모니아의 막분리 과정을 모사할 수도 있다. Nostratinia *et al.*의 연구[17]에서는 방금 기술한 기체투과막을 통한 암모니아성 질소의 (비정상상태)대류 및 확산전달과정을 전산유체역학 모델링을 이용하여 모사하였으며 그 결과 막공정 유입부의 폐기물 주입속도가 증가할수록 암모니아 제거율은 감소한다는 결과를 얻었다. 이는 총괄물질전달계수를 이용한 식 (1)과 어느 정도 유사한 경향을 보인다. Nagy *et al.*의 기체투과막 기반 암모니아성 질소 회수 공정 최적화 모델링 결과에서도 산용액 부하량과 함께 체류시간이 회수율에 결정적인 영향을 끼치는 것으로 거론되었다[18].

3. 효율적 pH 제어방안

질소가 함유된 유입폐기물의 pH를 높이는 가장 일반적인 방안은 염기성 약품을 투입하는 것이다. 예를 들어 Rothrock *et al.*은 기체투과(관형)막 공정에서 저렴한 소석회로 pH (10~13)를 보정하여 가금류 축산폐기물 내 암모니아를 신속히 휘발시켰다[10]. 그리고 이후 연구에서 평막형태로 바뀌 가금류 축산폐기물에 존재하는 거의 모든 암모니아성 질소를 회수하였다[19]. García-

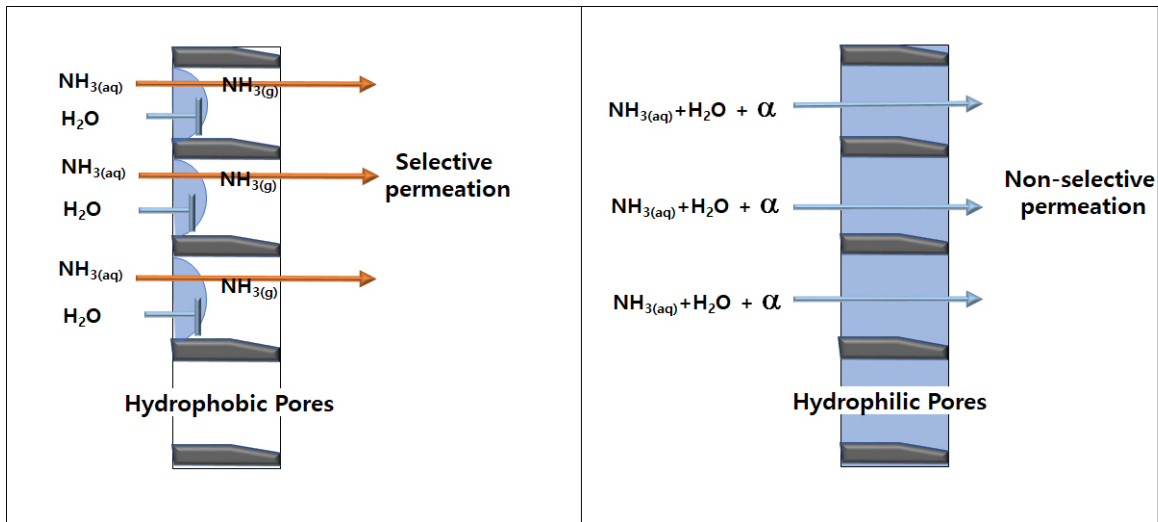


Figure 3. A schematic demonstration of the selective permeation of ammonia and the blocked permeation of water through a gas permeation membrane with hydrophobic pores (left) and the non-selective permeation through hydrophilic pores (right); this figure is modified from Daguerre-Martini *et al.*[8] and Darestani *et al.*[28].

González와 Vanotti는 액상 분뇨폐기물에 대한 기체 투과성 막 적용의 타당성을 연구하였다[7]. 이들은 관형막을 액상 돈분에 담가서 돈분 내 암모니아성 질소를 회수했는데 수산화나트륨을 사용하여 pH 9로 맞추었을 때 80% 이상 제거되었다. 반면, pH 보정을 미실시하였을 때는 제거율이 약 55% 정도에 불과하였다. García-González *et al.*[20]은 수산화나트륨을 활용하여 소화조 내 돈분의 pH를 8.5~9로 맞춰 함유된 암모늄의 약 91%를 제거하였다. 이들은 관형막보다 평막을 사용하는 것이 암모니아성 질소의 회수를 증가시킬 수 있다고 주장하였다. 이러한 모든 연구는 pH 보정이 가축 분뇨 내 암모니아성 질소 회수율 제거에 중요하다는 것을 보여준다. 물론 전술한 대로 이러한 pH 증가 방안은 아무리 저렴한 약품을 사용한다고 해도 별도의 운영비용이 소요된다. 사실상 암모니아성 질소 회수를 위한 기체 투과 막기술의 주요 단점 중 하나는 분뇨 폐기물의 pH 상승에 쓰이는 염기 화학 물질의 비용이다[21,22]. 물론 보다 낮은 pH (7~9)에서도 운전은 가능하지만 충분한 암모니아성 질소 회수를 위해서는 막공정 내 폐기물의 체류시간을 증가시켜야 할 것이다[18].

이러한 문제를 해결하기 위해, 약품투입 외 높은 pH 유지를 위한 다른 방안이 시도되었다. 예를 들면 García-González는 돈분의 암모니아 회수를 위한 기체 투과막 기술 적용 시 pH 보정을 위해 알칼리 대신 저속 폭기 및 (암모니아성 질소 전환 시 pH 하강을 초래하는 주요

원인인) 질산화 억제 방안을 제시하였다[23]. 암모니아성 질소(암모늄) 제거 효율은 폭기 처리 및 미처리시 30% 이상 큰 차이를 보였다. Dube *et al.*의 연구결과[24] 또한 전술한 García-González *et al.*의 연구[23]와 유사하였다. 해당 연구에서 저속 폭기 및 질소 억제방안을 적용한 침지된 관형 가스 막을 사용하여 돈분 소화조 유출수에서 암모니아성 질소(암모늄)를 거의 제거시키고 또 그 중 거의 100% 가까이 회수하였다. 다른 연구에서도 관형 기체투과막에 폭기를 사용하여 높은 암모니아 회수율(90% 이상)을 달성하였다[25-27]. 이러한 폭기+질산화 억제를 통한 pH 상승은 약품 투입에 비하여 회수공정 운영비용을 57% 혹은 70%까지 절감할 수 있다고 보고되었다[3,24,25]. 특히 돈분의 경우 대부분 상당량의 중탄산염 이온이 포함되어 있어 이를 폭기처리할 경우 수산화물이 형성되어 pH를 보다 쉽게 증가시키게 되며, 필요하다면 인위적인 탄산염이온 투입도 바람직한 것으로 언급되었다[8].

4. 기체투과막 재료의 영향

기체투과막은 PTFE (Polytetrafluoroethylene), PP (Polypropylene), PE (Polyethylene), PVDF (Polyvinylidene Fluoride) 등 다양한 재료로 구성될 수 있다. 이 막표면은 물분자 및 친수성 물질로부터 암모니아 기체분자를 선택투과 시키기 위해 소수성을 띄고 있으며(참고로

Fig. 3에 소수성 막공극을 통한 암모니아의 (물 및 친수성 분자에 대한) 선택투과와 반대로 친수성 공극을 통한 비선택성 투과를 나타내었다.) 적당한 내열성 및 (유기 용매와 산성 및 알칼리성 용액에 대해) 내화화성을 지니고 있다[3-5,28,29]. 그러나 상기 고분자 막의 내열성과 내화화성은 어디까지나 적당한 온도 및 반응조건에서 적용되며, 보다 고온 등의 극한 반응조건에서는 사용에 제한이 있을 수밖에 없다[4]. 이 경우 고분자 대신 세라믹 재질로 이루어진 막의 이용을 고려해 볼 수 있는데 이 경우 내열성과 내화화성은 더 우수하지만 비용이 문제일 수 있다. 따라서 보다 저렴한 세라믹 막을 생산할 수 있는 막재료를 찾기 위한 노력을 지속하고 있다. 예를 들어 Adam *et al.*는 세라믹 막의 생산비용의 상당부분을 차지하는 소결공정에서의 소결온도 (1050 °C)를 대폭 낮추고도 우수한 투수성과 높은 암모니아 회수율을 지닌 제올라이트 기반 세라믹 중공사막 재료를 개발하였다[30]. 이러한 세라믹 기반의 막은 매립지 침출수 같이 고농도 이물질이 존재하는 물질 내 암모니아성 질소도 100% 가까이 회수 가능하다. 이는 세라믹 재질의 장점인 높은 기계적 강도 등으로 막의 양면에 높은 압력 등을 가할 수 있어 암모니아성 질소의 투과 및 회수율을 높일 수 있기 때문일 것이다[30,31].

물론 모든 세라믹 기반 막이 암모니아성 질소의 투과 및 회수에 유리한 것은 아니다. 예를 들어, Linden *et al.*은 다공성 PTFE막, 친수성 하이브리드 실리카(Hybrid Silica) PV (Pervaporation, 투과증발)막 및 소수성 PDMS (Polydimethylsiloxane) PV막의 암모니아 투과효과를 서로 비교하였는데, 비교 결과 하이브리드 실리카 PV 막을 통한 (물분자 대비) 암모니아 기체분자의 선택적 투과가 그리 두드러지지 않았다[32]. 이는 암모니아와 물분자의 여러 측면(크기, 분자량 및 극성)에서의 유사성 때문으로 생각되는데 특히 실리카 재질의 친수성으로 인해 암모니아의 선택적 투과가 어려울 것으로 생각된다. 따라서 세라믹 막 표면을 PTFE 수준으로 소수성화하는 것이 중요할 것으로 생각된다. 또한 파일럿 또는 실증 단계에서 다양한 성상을 포함하는 폐기물을 대상으로 막 재질 선정 및 소재개발을 수행하여야 한다.

5. 결 론

기체투과막 기술을 이용하여 가축분뇨 폐기물 등으

로부터 암모니아성 질소를 효과적으로 회수할 수 있다고 최근 연구결과를 통해 보고되고 있다. 이는 기체투과막 공정의 유입부로 주입된 폐기물에 함유된 암모니아성 질소가 암모니아 기체의 형태로 막의 공극을 투과하여 막 반대편에 도달하면, 막 반대편에 존재하는 산 용액에 의해 포획 및 회수되는 방식이다. 암모니아 기체 투과 메커니즘은 총괄물질전달계수를 포함한 막으로의 유입부-유출부간 암모니아성 질소 농도구배로 설명될 수 있다. 이 경우 막으로의 유입폐기물 내 암모니아성 질소의 제거율을 모사하는 데 유용하다. 이를 관형 기체투과막에 적용할 경우, 투과막의 직경이 클수록 그리고 막의 유효길이당 유입물 부피가 낮을수록 유입부 내 암모니아가 신속히 제거될 수 있다고 예측되었다.

암모니아성 질소 회수를 증진시키기 위해서 폐기물의 pH를 높게 유지시켜 암모니아성 질소 중 암모늄을 가능한 많이 암모니아로 전환시켜야 한다. 이를 위해 pH 상승에 필요한 염기성 약품 투입비용이 문제가 될 수 있다. 따라서 저렴한 소석회를 투입하거나 폭기 및 질산화억제를 통해 pH를 높게 유지시키는 방안도 거론되고 있다. 또한 투과기체막과 유입부 내 암모니아성 질소의 접촉시간을 늘려 유입부 내 암모니아의 막투과를 증진시키는 방안도 있는데 이는 긴 접촉시간에 따른 운전비용과 회수율 증가에 따른 편익을 모두 고려하여야 한다. 암모니아성 질소 회수에 자주 쓰이는 기체투과막의 재질은 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 등 주로 고분자 재료로 구성된다. 이 막들은 적당한 내열성이나 내화화성 이외에도 소수성을 띤다는 특징이 있으며 이를 통해 막기공 내 물분자의 투과를 억제하는 반면 암모니아 기체분자의 투과를 상대적으로 높게 유지시킬 수 있다. 최근 연구에서는 기계적 강도 등을 강화한 세라믹 기반의 막을 제시하기도 하는데 이 경우 기공 내 물분자 대비 암모니아 기체의 선택적 투과를 강화하기 위해 막 표면을 소수성화하는 것이 중요하다.

Acknowledgements

본 연구는 대구녹색환경지원센터의 지원을 받아 수행되었다(2022년도 연구사업과제 환경기술개발연구과제명 - 분뇨 폐기물내 암모니아성 약취저감을 위한 현장 맞춤형 진단 및 관리 Software program 개발).

Reference

1. KEI (Korea Environmental Institute), "Management Strategies to Reduce PM_{2.5} Emission: Emphasis-Ammonia", KEI fundamental research report (Korean), 1-89 (2017).
2. A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen, "Ammonia for power", *Prog. Energy Combust. Sci.*, **69**, 63-102 (2018).
3. B. Pandey and L. Chen, "Technologies to recover nitrogen from livestock manure - A review", *Sci. Total Environ.*, **784**, 147098 (2021).
4. S. Xiang, Y. Liu, G. Zhang, R. Ruan, Y. Wang, X. Wu, H. Zheng, Q. Zhang, and L. Cao, "New progress of ammonia recovery during ammonia nitrogen removal from various wastewaters", *World J. Microbiol. Biotechnol.*, **36**, 144 (2020).
5. Y. T. Ahn, Y. H. Hwang, and H. S. Shin, "Application of PTFE membrane for ammonia removal in a membrane contactor", *Water Sci. Technol.*, **63**, 2944-2948 (2011).
6. B. Molinuevo-Salces, B. Riaño, M. B. Vanotti, and M.C García-González, "Gas-permeable membrane technology coupled with anaerobic digestion for swine manure treatment", *Front. Sustain. Food Syst.*, **2**, 25 (2018).
7. M. C. García-González and M. B. Vanotti, "Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: effect of waste strength and pH", *Waste Manag.*, **38**, 455-461 (2015).
8. S. Daguerre-Martini, M. B. Vanotti, M. Rodriguez-Pastor, A. Rosal, and R. Moral, "Nitrogen recovery from wastewater using gas-permeable membranes: Impact of inorganic carbon content and natural organic matter", *Water Res.*, **137**, 201-210 (2018).
9. P. J. Dube, M. B. Vanotti, A. A. Szögi, and M. C. García-González, "Enhancing recovery of ammonia from swine manure anaerobic digester effluent using gas-permeable membrane technology", *Waste Manag.*, **49**, 372-37 (2016).
10. M. J. Rothrock Jr., A. A. Szögi, and M. B. Vanotti, "Recovery of ammonia from poultry litter using gas-permeable membranes", *Trans. ASABE*, **53**, 1267-1275 (2010).
11. M. Soto-Herranz, M. Sánchez-Báscones, J. M. Antolín-Rodríguez, D. Conde-Cid, and M. B. Vanotti, "Effect of the type of gas-permeable membrane in ammonia recovery from air", *Environments*, **6**, 70 (2019).
12. A. A. Szögi, M. B. Vanotti, and M. J. Rothrock, "Gaseous Ammonia Removal System", U.S. Patent No. 8,906,332. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office (2014).
13. L. Zeng, C. Mangan, and X. Li, "Ammonia recovery from anaerobically digested cattle manure by steam stripping", *Water Sci. Technol.*, **54**, 137-145 (2006).
14. L. K. Wang, Y. T. Hung, and N. K. Shammass, "Advanced physicochemical treatment processes", Handbook of Environmental Engineering. vol. 4, The Humana Press Inc., Totowa, NJ, USA (2006).
15. S. P. Munasinghe-Arachchige, I. S. A. Abey Siriwardana-Arachchige, H. M. K. Delanka-Pedige, P. Cooke, and N. Nirmalakhandan, "Nitrogen-fertilizer recovery from urban sewage via gas permeable membrane: Process analysis, modeling, and intensification", *Chem. Eng. J.*, **411**, 128443 (2021).
16. A. Hasanöglu, J. Romero, B. Pérez, and A. Plaza, "Ammonia removal from wastewater streams through membrane contactors: experimental and theoretical analysis of operation parameters and configuration", *Chem. Eng. J.*, **160**, 530-537 (2010).
17. F. Nosratinia, M. Ghadiri, and H. Ghahremani, "Mathematical modeling and numerical simulation of ammonia removal from wastewaters using membrane contactors", *J. Ind. Eng. Chem.*, **20**, 2958-2963 (2014).
18. J. Nagy, J. Kaljunen, and A. J. Toth, "Nitrogen recovery from wastewater and human urine with hydrophobic gas separation membrane: experiments and modelling", *Chem.*, **73**, 1903-1915 (2019).
19. M. J. Rothrock Jr., A. A. Szögi, and M. B. Vanotti, "Recovery of ammonia from poultry litter using flat gas permeable membranes", *Waste*

- Manag.*, **33**, 1531-1538 (2013).
20. M. C. García-González, M. B. Vanotti, and A. A. Szogi, "Recovery of ammonia from anaerobically digested manure using gas-permeable membranes", *Sci. Agric.*, **73**, 434-438 (2016).
 21. A. Zarebska, D. Romero Nieto, K. V. Christensen, L. Fjerbæk Søtoft, and B. Norddahl, "Ammonium fertilizers production from manure: a critical review", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, **45**, 1469-1521 (2015).
 22. W. Lee, S. An, and Y. Choi, "Ammonia harvesting via membrane gas extraction at moderately alkaline pH: a step toward net-profitable nitrogen recovery from domestic wastewater", *Chem. Eng. J.*, **405**, 126662 (2021).
 23. M. C. García-González, M. B. Vanotti, and A. A. Szogi, "Recovery of ammonia from swine manure using gas-permeable membranes: effect of aeration", *J. Environ. Manage.*, **152**, 19-26 (2015).
 24. P. J. Dube, M. B. Vanotti, A. A. Szogi, and M. C. García-González, "Enhancing recovery of ammonia from swine manure anaerobic digester effluent using gas-permeable membrane technology", *Waste Manag.*, **49**, 372-377 (2016).
 25. M. B. Vanotti, P. J. Dube, A. A. Szogi, and M. C. García-Gonzalez, "Recovery of ammonia and phosphate minerals from swine wastewater using gas-permeable membranes", *Water Res.*, **112**, 137-146 (2017).
 26. J. de. S. O. Filho, S. Daguerre-Martini, M. B. Vanotti, J. Sáez-Tovar, A. Rosal, M. D. Pérez-Murcia, M. A. Bustamante, and R. Moral, "Recovery of ammonia in raw and codigested swine manure using gas-permeable membrane technology", *Front. Sustain. Food Syst.*, **2**, 30 (2018).
 27. B. Riaño, B. Molinuevo-Salces, M. B. Vanotti, and M. Cruz García-González, "Ammonia Recovery from Digestate Using Gas-Permeable Membranes: A Pilot-Scale Study", *Environments.*, **8**, 133 (2021).
 28. M. Darestani, V. Haigh, S. J. Couperthwaite, G. J. Millar, and L. D. Nghiem, "Hollow fibre membrane contactors for ammonia recovery: Current status and future developments", *J. Environ. Chem. Eng.*, **5**, 1349-1359 (2017).
 29. X. Tan, S. P. Tan, W. K. Teo, and K. Li, "Polyvinylidene fluoride (PVDF) hollow fibre membranes for ammonia removal from water", *J. Membr. Sci.*, **271**, 59-68 (2006).
 30. M. R. Adam, T. Matsuura, M. H. D. Othman, M. H. Puteh, M. A. B. Pauzan, A. F. Ismail, A. Mustafa, M. A. Rahman, J. Jaafar, and M. S. Abdullah, "Feasibility study of the hybrid adsorptive hollow fibre ceramic membrane (HFCM) derived from natural zeolite for the removal of ammonia in wastewater", *Process Saf. Environ. Prot.*, **122**, 378-385 (2019).
 31. I. A. Talalaj, "Removal of nitrogen compounds from landfill leachate using reverse osmosis with leachate stabilization in a buffer tank", *Environ. Technol.*, **36**, 1091-1097 (2015).
 32. N. van Linden, Y. Wang, E. Sudholter, H. Spanjers, and J. B. van Lier, "Selectivity of vacuum ammonia stripping using porous gas-permeable and dense pervaporation membranes under various hydraulic conditions and feed water compositions", *J. Membr. Sci.*, **642**, 120005 (2022).