

다단 다운드래프트 가스화 시스템에서 페타이어 열분해 오일의 스팀 가스화를 통한 수소 가스 향상

윤주형^{ID} · 김종수 · 정수화[†]^{ID}

한국생산기술연구원 저탄소배출제어연구부

(2026년 3월 12일 접수, 2026년 5월 20일 수정, 2026년 5월 21일 채택)

Hydrogen-Rich Producer Gas from Steam Gasification of Waste Tire Pyrolysis Oil in a Two-Stage Downdraft Gasification System

Joo-Hyeong Yoon^{ID}, Jong-Su Kim, and Soo-Hwa Jeong[†]^{ID}

Low-Carbon Emission Control R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),

89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si 31056, Korea

(Received March 12, 2026; Revised May 20, 2026; Accepted May 21, 2026)

초록: 본 연구에서는 다단 다운드래프트 가스화 시스템을 이용하여 페타이어 열분해 오일(WTPO)의 스팀 가스화 특성을 평가하고, 운전 조건에 따른 프로듀서 가스 조성 및 타르 생성 거동을 분석하였다. WTPO는 bench-scale 유동층 반응기에서 생산된 액상 원료로, 고체 페타이어 대비 공급 안정성이 우수하다. 스팀 가스화 실험은 870 및 920 °C에서 수행하였으며, 스팀/탄소 비(S/C ratio)는 1–5 범위로 변화시켰고, 2차 반응기에 활성탄을 적용한 조건도 함께 검토하였다. 프로듀서 가스 조성 중 수소 함량은 조건에 따라 약 33–79 vol% 범위로 나타났다. 가스 내 타르 함량은 15–1071 mg/Nm³ 범위로 나타났으며, 활성탄 적용 시 수소 함량은 78–79 vol%로 증가하였고, C₂ 이상 탄화수소들은 대부분 제거되었다. 타르 함량은 약 12–13 mg/Nm³ 이하로 효과적으로 저감되었다. 본 연구 결과는 WTPO 기반 스팀 가스화 공정에서 다단 시스템과 활성탄 적용이 수소 함량이 높은 청정 가스 생산과 타르 저감에 효과적임을 보여준다.

Abstract: Steam gasification of waste tire pyrolysis oil (WTPO) was investigated using a multi-stage downdraft gasification system to evaluate producer gas composition and tar formation behavior. WTPO was produced in a bench-scale continuous reactor and supplied as a liquid feedstock to improve feeding stability compared with solid waste tires. Steam gasification experiments were conducted at temperatures of 870 and 920 °C with steam-to-carbon (S/C) ratios of 1–5, and the effect of activated carbon applied in the secondary reactor was examined. The hydrogen content of the produced gas ranged from approximately 33 to 79 vol% depending on the operating conditions. Increasing the reaction temperature enhanced hydrogen production and reduced methane content due to promoted steam reforming reactions. When activated carbon was applied, the hydrogen content reached 78–79 vol% and above C₂ hydrocarbons were almost completely eliminated. The tar content in the producer gas varied from 15 to 1,071 mg/Nm³. Higher reaction temperatures reduced tar formation, whereas excessive steam supply increased tar content. In contrast, activated carbon significantly reduced tar content to below 12–13 mg/Nm³.

Keywords: waste tire pyrolysis oil, steam gasification, hydrogen-rich gas, two-stage gasification system, activated carbon.

서론

전 세계적으로 자동차 보급 확대에 따라 페타이어 발생량은 지속적으로 증가하고 있다. 글로벌 자동차 타이어 시장은 2022년 약 2400억 달러 규모에서 2027년 약 3200억 달러 이상으

로 성장할 것으로 전망되고 있으며, 이에 따라 연간 페타이어 발생량 또한 전 세계적으로 약 10억 개 이상에 이르는 것으로 보고되고 있다.^{1,2} 국내에서는 자동차 보급 확대 및 사용 후 타이어 교체량 증가에 따라 페타이어가 지속적으로 다량 발생하고 있으며, 최근 통계 기준 연간 약 39–40만 톤 내외의 페타이어가 발생하는 것으로 보고되고 있다.³ 이러한 페타이어의 지속적인 증가는 적절한 처리 및 자원화 기술이 동반되지 않을 경우 토양, 수질 및 대기 환경에 심각한 부담을 초래할 수 있다.⁴ 페타이어는 탄소 함량이 80 wt% 이상이며 발

[†]To whom correspondence should be addressed.
pysoo80@kitech.re.kr, ORCID[®] 0000-0002-3524-9979
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

열량이 약 30–35 MJ/kg에 이르는 고에너지 밀도의 자원으로, 열화학적 전환을 통한 에너지 및 화학원료 회수가 가능한 물질로 평가받고 있다.⁵ 특히 가스화 공정은 고형 폐기물을 수소(H_2) 및 일산화탄소(CO)를 주성분으로 하는 합성가스로 전환할 수 있어, 저탄소 에너지 시스템으로의 전환 측면에서 주목받고 있다. 이 중 스팀 가스화는 수증기를 반응제로 사용하여 수증기 개질 반응($C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n+0.5m)H_2$)과 수성가스 전이 반응($CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$)을 촉진함으로써, 공기 가스화 대비 높은 수소 수율을 달성할 수 있는 장점을 가진다.⁶

이전에 페타이어를 대상으로 한 스팀 가스화 연구는 주로 원형 페타이어 또는 페타이어 열분해 char를 대상으로 수행되어 왔다. 기존 문헌에 따르면, 페타이어 char 또는 원료 페타이어를 이용한 스팀 가스화는 주로 700–1000 °C 범위의 반응 온도와 스팀/연료(S/F 또는 S/C) 비 0.3–1.2 조건에서 수행되었으며, 생성 가스 내 수소 함량은 일반적으로 40–65 vol% 수준으로 보고되고 있다.^{7,9} 예를 들어, Lee 등⁷은 고형 페타이어를 포함한 다양한 고형 폐기물을 대상으로 한 고온 스팀 가스화 연구에서 반응 조건에 따라 45–60 vol% 수준의 수소 함량을 보고하였다. 또한 Elbaba 등⁸은 페타이어 및 타이어 엘라스토머(Elastomer)를 대상으로 한 열분해-가스화 및 개질 공정을 통해 수소 생산 가능성을 제시하였다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 고형상 원료의 직접 가스화 또는 촉매 개질에 초점을 두고 있어, 열분해 공정에서 다량으로 생성되는 액상 부산물의 활용 가능성은 상대적으로 간과되어 왔다. 한편, 최근에는 페타이어 열분해 char를 촉매 또는 반응 매질로 활용하여 열분해 증기 또는 합성가스의 조성을 제어하려는 시도가 보고되고 있다.¹⁰ 이러한 연구들은 타이어 유래 고형 부산물의 기능성 활용 가능성을 제시하였다는 점에서 의미가 있으나, 페타이어 열분해 공정에서 다량으로 생성되는 액상 부산물의 직접적인 가스화 활용에는 한계가 있다. 페타이어 열분해 공정에서는 일반적으로 오일 약 55–65 wt%, 가스 20–25 wt%, char 15–20 wt%가 생성되며, 이 중 페타이어 열분해 오일(waste tire pyrolysis oil, WTPO)은 방향족 및 지방족 탄화수소를 다량 포함하고 약 0.8–1.5 wt% 수준의 황 성분을 함유하는 것으로 보고되고 있다.^{11,12} 이러한 WTPO는 점도 및 황 함량 문제로 인해 직접 연료로 활용하는 데 제약이 있으나, 가스화 공정을 통해 가스 연료로 전환할 경우 황 성분은 H_2S 형태로 분리되어 후단 정제 공정을 통해 제거가 가능하다는 점에서 고부가가치화 잠재력이 크다. 그럼에도 불구하고 WTPO를 단독 원료로 사용하여 스팀 가스화를 수행하고, 반응 조건 변화에 따른 가스 조성 및 타르 생성 특성을 체계적으로 분석한 사례는 매우 제한적인 실정이다. 특히 WTPO는 고분자 탄화수소 및 방향족 성분을 포함하고 있어 가스화 과정에서 타르 생성 가능성이 높으며, 이는 가스 정제 부담 증가 및 공정 안정성 저하로 이어질 수 있다.¹³ 이를 해결하기 위

한 방안으로 2단 가스화 시스템이 제안되어 왔으며, 1차 가스화 영역과 2차 타르 개질 영역을 분리함으로써 타르 저감과 가스 품질 향상을 동시에 달성할 수 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁴ 또한 활성탄과 같은 다공성 탄소 소재는 수백에서 수천 m^2/g 수준의 높은 비표면적을 바탕으로 고분자 탄화수소의 열분해 및 2차 개질 반응을 촉진할 수 있어, 타르 제거 및 수소 생산 증대에 효과적인 매질로 활용될 수 있다.¹⁵ 그러나 WTPO 스팀 가스화 공정에서 활성탄을 적용한 연구는 아직 매우 제한적인 수준에 머물러 있다. 이에 본 연구에서는 페타이어 열분해 공정에서 생성된 WTPO를 단독 원료로 하여, 다단 다운드래프트 가스화 시스템(two-stage downdraft gasifier)을 이용한 스팀 가스화 실험을 수행하였다. 반응 온도(870 및 920 °C), 스팀/탄소 비(S/C ratio = 1, 3, 5), 그리고 활성탄 적용 여부를 주요 운전 변수로 설정하여 생성 가스 조성, 수소 수율 및 타르 생성 특성을 정량적으로 분석하였다. 본 연구는 WTPO의 스팀 가스화 거동을 기존 페타이어 및 char 기반 연구와 비교·분석함으로써, WTPO 활용 가스화 공정의 가능성과 한계를 명확히 제시하고 수소 함량이 높은 청정 가스 생산을 위한 공정 설계 방향을 제안하는 데 목적이 있다.

실 험

원료의 특성. 본 연구에 사용된 페타이어는 (주)인코어텍으로부터 제공받았으며, 파쇄 공정을 통해 약 1–2 mm 크기로 전처리하였다. 페타이어 열분해 오일(waste tire pyrolysis oil, WTPO)은 한국생산기술연구원(KITECH)에 구축된 bench-scale 유동층 반응기 설비(2 kg/hr)를 이용하여 생산되었다. 열분해 반응은 540 °C에서 수행되었으며, 열분해 생성물로 오일, 가스 및 부산물인 char가 생성되었고, 이 중 오일인 WTPO의 수율은 약 30 wt% 수준이다. 투입 원료의 탄소 함량을 알아야 스팀과 물 비로 계산이 가능하기 때문에 원소분석을 진행하였다. 원소분석 결과는 Table 1에 나타냈다. 특히 WTPO는 약 1 wt% 내외의 황 성분을 포함하고 있어 직접 연료로 활용하기에는 한계가 있다.¹⁶ 그러나 액상 상태의 WTPO는 고체 페타이어에 비해 공급 및 주입이 용이하여 가스화 공정 적용 시 운전 안정성 측면에서 장점을 가질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 가진 WTPO를 스팀 가스화 원료로 적용하여, 반응 조건에 따른 프로듀서 가스 조성 및 특성을 비교해보고자 한다.

다단 가스화 장치 구성. 본 연구에서는 연속 공정이 가능

Table 1. Feedstock Properties of WTPO

Elemental analysis (wt%)				
C	H	N	S	O
89.6	8.7	1.7	1.0	-

∴ Oxygen content was not directly measured

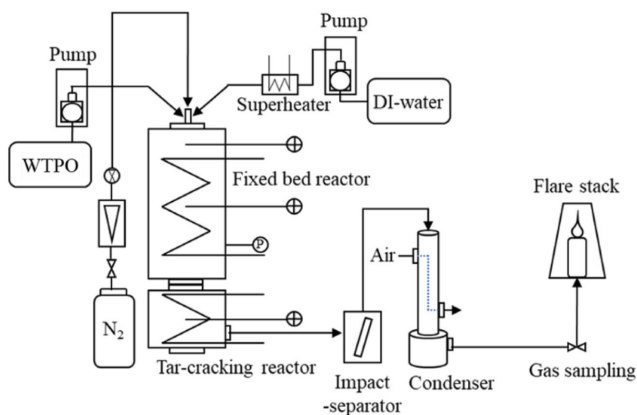


Figure 1. Schematic diagram of a two-stage down-draft gasification system.

한 다단식 다운드래프트 가스화 장치를 이용하여 수행하였다. 스팀 가스화 시스템은 WTPO 주입부, 스팀 공급 및 질소 퍼징 라인, 1차 가스화 반응기(내부 직경 103.5 mm, 높이 470 mm, 부피 3.9 L), 2차 개질 반응기(내부 직경 103.5 mm, 높이 250 mm), 그리고 생성 가스 냉각 장치로 물리충격장치(impact-separator), 컨덴서(condenser)로 구성되었다. WTPO와 스팀은 정밀 펌프(Eldex Optos, High pressure liquid metering pump, Model 3SM)로 공급되었으며, 스팀은 정밀 펌프 이후, 기화기(노즐 내부 직경: 2 mm)를 통해 약 350 °C 온도로 과열 증기 상태로 1차 가스화 반응기 상단에 주입되었다. 또한 반응기와 모든 냉각 장치는 스테인레스 재질로 구성되어 있으며, 반응기 가열 방식은 전기 히터 타입의 furnace로 구성되어 있다. 자세한 구성 요소는 Figure 1에 나타내었다. 1차 가스화 반응기에서는 WTPO의 크래킹(cracking reaction) 및 1차 가스화 반응이 진행되며, 2차 개질 반응기는 생성 가스 내 잔존하는

고분자 탄화수소 및 타르 성분의 2차 개질을 목적으로 구성되었다. 두 반응기는 전기로를 이용하여 각각 독립적으로 가열되었으며, 반응기 내부 온도는 열전대를 통해 실시간으로 측정하였다. 생성 가스는 반응기 후단에 설치된 물리충격장치 및 컨덴서를 거쳐 냉각된 후 가스 분석을 위해 샘플링하였다. 모든 실험은 대기압 조건(1 bar)에서 수행되었다.

스팀가스화 주요 반응. 페타이어는 주로 natural rubber (NR), styrene butadiene rubber(SBR), polybutadiene rubber (BR)로 구성되어 있다. 열분해 과정에서 고분자 사슬의 절단(scission), 고리화(cyclization), 탈알킬화(dealkylation) 및 탈수소화(dehydrogenation) 반응이 순차적으로 진행된다. 이 WTPO의 화합물들은 스팀 가스화 반응을 하게 되면 주로 수증기 개질 반응과 수성가스 전이반응이 작용하여, H₂ 및 CO가 생성될 것으로 판단된다. 이러한 페타이어가 열분해되어 WTPO로의 전환 과정과 스팀 가스화 주요반응들을 Figure 2에 나타내었다.

본 연구에서는 프로듀서 가스 내 타르를 저감하기 위해 2차 개질 반응기 영역에 활성탄을 충전하여 적용하였다. 활성탄은 높은 비표면적과 다공성 구조를 기반으로 타르 흡착에 기여할 뿐만 아니라, 스팀 존재 하에서 2차 thermal cracking 및 reforming 반응을 통해 타르 성분의 저분자 가스로의 전환을 유도할 수 있다. 또한, Jeong 등¹⁷은 two-stage gasifier에서 활성탄 적용 시 타르 저감과 수소 생성 향상 효과를 보고한 바 있다. 본 연구에 사용된 활성탄(activated carbon, AC)은 가아활성탄소(주)에서 구매한 상용 활성탄으로서 대기정화용도 목적의 활성탄이다. 비표면적 900-1200 m²/g, 입도는 12×20 mesh 크기이고 세공용적(pore volume)은 0.45-0.7 cc/g이다.

실험 조건. 본 연구에서 반응 온도 870 및 920 °C는 스팀 가스화 공정에서 수증기 개질 및 열적 cracking 반응이 활발하게

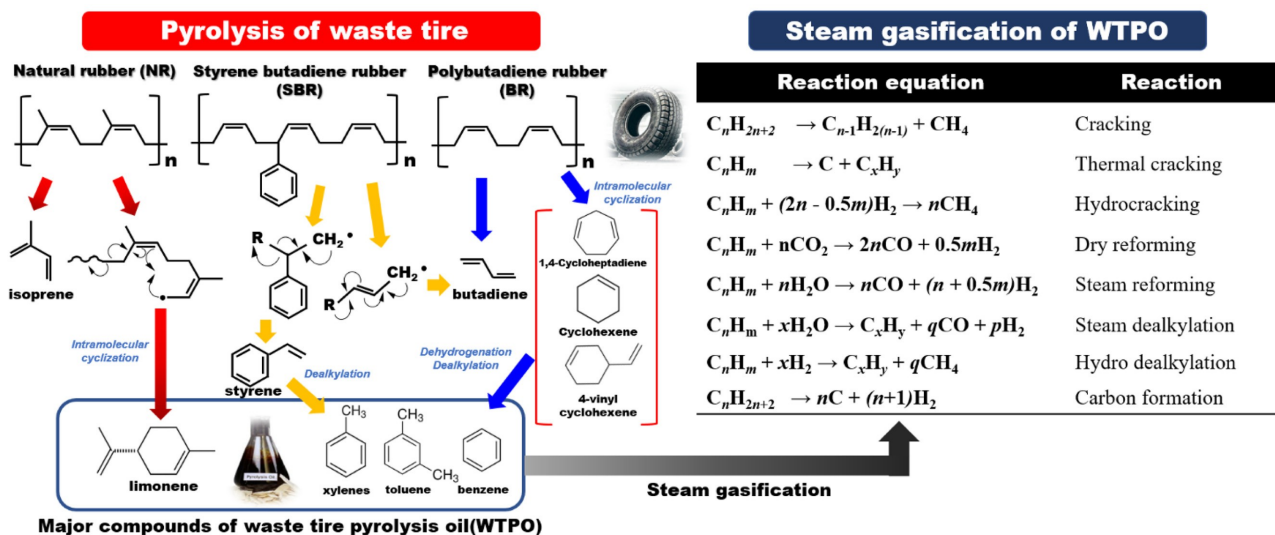


Figure 2. Major reactions of pyrolysis from waste tire and steam gasification of WTPO.

진행되는 온도 범위를 고려하여 선정하였다.¹⁸ 이는 Table 2에 요약하여 나타내었다. 주입되는 스팀의 양은 스팀/탄소 비(S/C ratio)로, 공급된 스팀의 몰 수 대비 WTPO에 포함된 탄소의 몰수로 정의하였다. S/C 비는 다음 Eq. 1과 같이 계산되었다.

$$\text{S/C ratio} = n\text{H}_2\text{O}/n\text{C} \quad (1)$$

여기서,

$n\text{H}_2\text{O}$: 공급된 스팀의 몰 수(mol)

$n\text{C}$: WTPO에 포함된 탄소의 몰 수(mol)

그리고 탄소 몰 수는 원소분석 기반으로 다음 Eq. 2로 계산되었다.

$$nC = m_{\text{WTPO}} \cdot w_{\text{C}} / M_{\text{C}} \quad (2)$$

m_{WTPO} : WTPO의 공급 질량(g)

w_{C} : WTPO 내 탄소 질량분율

M_{C} : 탄소의 몰 질량(g/mol)

스팀 가스화 반응 시간은 모든 조건에서 60분으로 고정하였다. 반응 전에는 질소 가스를 2 L/min의 유량으로 주입하여 산소 영향 제거를 위해 반응기 내부를 충분히 퍼지하였다. 또한 스팀 가스화 반응 동안에도 동일한 유량의 질소를 연속 주입하여 반응기 내에서 불활성 운반 기체(carrier gas) 및 내부 추적 가스(internal tracer)로 활용하였다. 주입된 질소는 정상상태에서의 프로듀서 가스 조성을 기반으로 가스 수율 및 실제 체적 유량을 산정하는 데 사용되었으며, 이를 통해 각 반응기 내 가스 체류시간을 계산하였다. 활성탄은 특정 조건에서 2차 개질 반응기에 충전하여 적용하였다. S/C 비 변화에 따른 영향을 최소화하고 활성탄 자체의 개질 효과를 독립적으로 평가하기 위하여 S/C 비를 1로 고정하였다. 그리고 가스화 온도는 각각 870 (AC-1) 및 920 °C(AC-2)로 변수를 두어 실험을 진행하였다. 가스 체류시간(residence time, τ)은 각 반응기 내에서 생성 가스가 체류하는 평균 시간을 의미하며, 실제 반응기 조건에서의 가스 체적 유량과 반응기 유효 부피를 기반으로 계산하였다. 체류시간은 다음 Eq. 3과 같이 계산되었다.

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}_T} \quad (3)$$

여기서, V 는 반응기의 유효 부피(m^3), $\dot{V}_T$ 는 반응 온도에서의 실제 가스 체적 유량(m^3/min)이다.

실제 가스 체적 유량은 질소(N_2)를 내부 추적 가스(internal

tracer)로 사용하여 계산된 표준상태 기준 가스 유량($\dot{V}_N$, Nm^3/min)을 이상기체 가정 하에 반응기 온도로 환산하여 Eq. 4와 같이 계산하였다.

$$\dot{V}_T = \dot{V}_N \cdot \frac{T}{273.15K} \quad (4)$$

여기서, T 는 반응기 온도(K)이다.

질소는 반응에 관여하지 않는 활성 가스로서, 반응 중 일정 유량으로 연속 주입되었으며, 정상상태에서 측정된 가스 조성을 이용하여 가스 유량을 산정하였다. 이에 따라 계산된 체류시간은 건조 가스 기준(dry gas basis)의 평균 체류시간을 의미한다. 본 연구에서 사용된 가스화 시스템은 1차 가스화 반응기와 2차 개질 반응기로 구성된 다단식 구조이므로, 활성탄을 적용한 조건(AC-1 및 AC-2)에서는 Eq. 5와 같이 전체 가스 체류시간을 각 반응기 체류시간의 합으로 정의하였다.

$$\tau_{\text{total}} = \tau_1 + \tau_2 \quad (5)$$

여기서, τ_1 은 1차 가스반응기 체류시간, τ_2 는 2차 개질 반응기 체류시간이다. 2차 개질 반응기의 경우, 활성탄이 충전되지 않은 자유 공간(void volume)을 기준으로 유효 부피를 산정하였다.

프로듀서 가스 분석 방법. 본 연구에서 타르(tar)는 프로듀서 가스 내 존재하는 gas-phase tar로 정의하였다. 타르 농도(mg/Nm^3)는 GC-TCD/FID 분석을 통해 정량하였으며, 벤젠보다 큰 분자량을 가진 탄화수소의 합계를 기준으로 산정하였다. 생성된 프로듀서 가스의 조성은 가스 크로마토그래피(gas chromatography, GC)를 이용하여 분석하였다.

프로듀서 가스 분석에는 열전도도 검출기(thermal conductivity detector, TCD) 및 불꽃이온화 검출기(flame ionization detector, FID)가 장착된 GC 시스템(GC-TCD/FID: Clarus 690, PerkinElmer Instruments)을 사용하였다. H_2 , CO , CO_2 의 정량 분석에는 GC-TCD를 사용하였으며, 모세관 컬럼은 Carboxen 1000 컬럼($15 \text{ ft} \times 1/8\text{-inch stainless steel}$)을 사용하였다. CH_4 및 C_2 이상 탄화수소 성분의 분석에는 GC-FID를 사용하였고, HP-AL/KCL 모세관 컬럼($50 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm I.D.}$, $8 \mu\text{m film thickness}$)을 사용하였다. 모든 분석에서 운반 기체로는 아르곤(Ar) 가스를 사용하였다. 프로듀서 가스 샘플은 스팀 가스화 반응이 안정적인 40분에 샘플링하였고, 분석 결과의 평균값을 최종 가스 조성으로 사용하였다.

Table 2. Experimental Conditions of Steam Gasification

Runs	1	2	3	4	5	6	AC1	AC2
Reaction temperature (°C)		870			920		870	920
Steam/carbon ratio (mol/mol)	1	3	5	1	3	5	1	
Residence time (s)	8.4	11	14.4	4.2	3.0	2.8	1.8	2.0
Activated carbon (g)				0				200

결과 및 토론

프로듀서 가스 조성. 스팀 가스화 실험을 통해 생성된 프로듀서 가스의 조성을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 모든 실험 조건에서 생성 가스의 주요 성분은 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2) 및 메탄(CH_4)이었으며, 소량의 C_2 이상 탄화수소가 함께 검출되었다. 반응 온도 870 및 920 °C와 S/C 비 1-5 범위에서 생성된 프로듀서 가스의 수소 함량은 약 33-79 vol% 범위로 나타났으며, 조건에 따라 큰 차이를 보였다. 특히 반응 온도가 920 °C로 증가함에 따라 수소 함량이 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, S/C 비 변화에 따라 수소, 일산화탄소 및 이산화탄소의 상대적인 조성이 달라졌다. 일산화탄소의 함량은 대체로 2-11 vol% 범위에서 분포하였으며, S/C 비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 반면, 이산화탄소의 함량은 상대적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 메탄의 경우 6-18 vol% 범위로 검출되었다. C_2 이상 탄화수소 성분은 전반적으로 낮은 함량을 보였으나, 활성탄을 적용하지 않은 조건에서는 일부 검출되었다. 활성탄을 적용한 조건(AC-1 및 AC-2)에서는 프로듀서 가스 내 수소 함량이 약 78-79 vol% 수준으로 가장 높게 나타났으며, C_2 이상 탄화수소 성분은 거의 검출되지 않았다. 이러한 결과는 활성탄 적용 여부에 따라 생성 가스의 조성이 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 프로듀서 가스 수율(producer gas yield)과 수소 수율(H_2 yield)을 정량적으로 평가하였다. 본 연구에서는

질소를 내부 추적 가스(internal tracer)로 사용하여 생성 가스의 체적 유량을 산정하였으며, 이를 WTPO 투입량 기준으로 환산하여 가스 수율을 계산하였다. 프로듀서 가스 수율은 WTPO 1 kg당 생성된 건조 가스의 체적(Nm^3)을 의미하며, 다음 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$Y_{\text{gas}} = \frac{\dot{V}_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{WTPO}}} \quad (6)$$

여기서, Y_{gas} 는 프로듀서 가스수율(Nm^3/kg_{WTPO}), $\dot{V}_{\text{gas}}$ 는 정상상태에서 생성된 건조 가스의 체적 유량(Nm^3/min), $\dot{m}_{\text{WTPO}}$ 는 WTPO의 질량 투입 유량(kg/min)이다.

건조 가스의 체적 유량은 반응 중 일정 유량으로 연속 주입된 질소(N_2)를 내부 추적 가스로 사용하여 계산하였다. 질소는 반응에 관여하지 않는 불활성 기체로서, 정상상태에서 측정된 가스 조성 중 질소의 몰 분율을 이용하여 전체 가스 유량을 역산하였다.

수소 수율은 WTPO 1 kg당 생성된 수소의 체적(Nm^3)을 의미하며, 다음 식 (7)과 같이 계산하였다.

$$Y_{H_2} = Y_{\text{gas}} \cdot \frac{Y_{H_2}}{100} \quad (7)$$

여기서, Y_{H_2} 는 수소 수율(Nm^3/kg_{WTPO}), Y_{gas} 는 프로듀서 가스 수율(Nm^3/kg_{WTPO}), Y_{H_2} 는 프로듀서 가스 내 수소의 부피 분율(vol%)이다. 본 연구에서 수소 조성은 GC-TCD 분석을 통해

Table 3. Compositions of Producer Gas From Steam Gasification

Runs	1	2	3	4	5	6	AC-1	AC-2
Compositions (vol%)								
H_2	45.2	37.8	33.6	63.0	65.9	62.5	79.7	78.7
N_2	29.7	45.5	50.8	17.4	10.4	11.3	5.5	6.5
CO	3.8	2.5	2.6	4.8	11.0	8.5	3.5	3.9
CO_2	0.8	0.8	0.4	1.6	3.5	3.4	4.3	4.2
CH_4	17.5	10.2	8.4	12.1	7.5	10.3	7.0	6.7
C_2	2.0	2.3	2.6	0.4	0.8	1.93	-	-
C_3	<0.1	0.2	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	-	-
C_4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	-	-
C_5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-	-
above C_6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-	-
Benzene	<0.1	<0.1	1.2	0.5	0.8	1.8	<0.1	<0.1
Toluene	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tar in gas (mg/Nm^3)	110	1,071	159	15	33	153	12	13
Heating Value ($kcal/Nm^3$)	2,111.1	1,306.7	1,302.9	1,587.8	1,582.5	1,893.1	1,460.6	1,437.8
Producer gas yield (Nm^3/kg fuel)	7.5	4.9	4.4	12.8	21.5	19.8	40.5	34.4
H_2 yield (Nm^3/kg fuel)	3.4	1.9	1.5	8.1	14.2	12.3	32.3	27.1

*(-): Not detected

정량되었으며, 계산된 수소 수율은 반응 조건에 따른 수소 생성 성능을 비교 평가하는 지표로 활용되었다. 수소 수율은 단순한 조성 변화뿐만 아니라 실제 수소 생성량을 반영하므로, 반응 온도, S/C 비 및 활성탄 적용 효과를 종합적으로 평가하는 데 유용하다.

프로듀서 가스 조성에 미치는 운전 변수 영향. 프로듀서 가스 조성에 미치는 운전 변수의 영향을 살펴보기 위해, 반응온도와 S/C 비 및 활성탄 적용이 프로듀서 가스 조성에 미치는 영향을 비교해보았다. Figure 3(a)와 (b)는 각각 870 및 920 °C 조건에서 S/C 비 1, 3, 5에 따른 프로듀서 가스 조성을 나타내었다. 반응 온도가 870에서 920 °C로 증가함에 따라 모든 S/C 비 조건에서 수소(H_2) 함량이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 예를 들어, S/C = 1 조건에서 수소 함량은 870 °C에서 45.2 vol%였으나, 920 °C에서는 63 vol%로 증가하였다. 유사하게 S/C = 3 조건에서는 37.8에서 65.9 vol%, 그리고 S/C = 5 조건에서는 33.6에서 62.5 vol%로 수소 함량이 크게 증가하였다. 이러한 결과는 반응 온도 상승에 따라

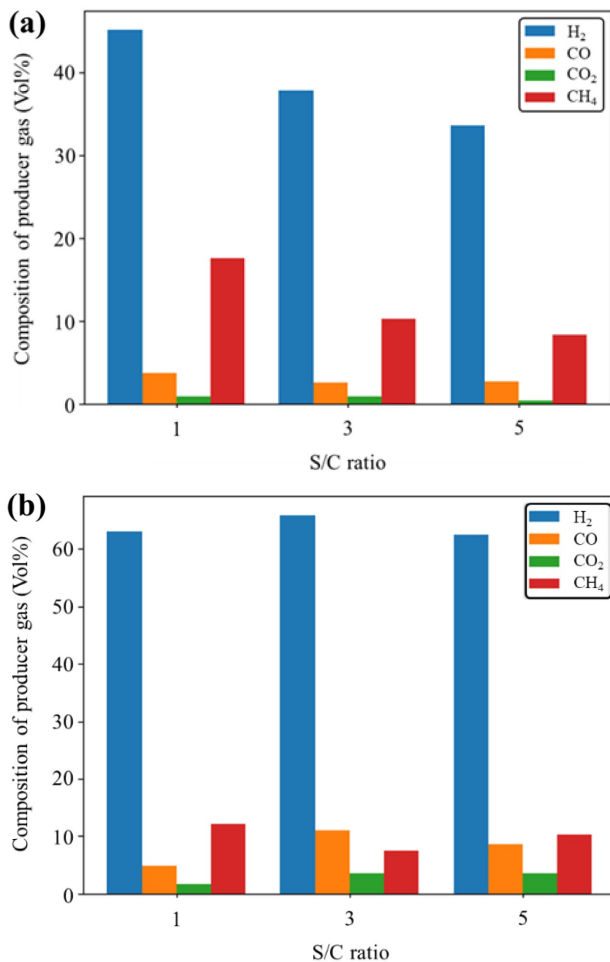


Figure 3. Effect of steam-to-carbon (S/C) ratio and reaction temperature on producer gas composition at (a) 870; (b) 920 °C.

WTPO 유래 탄화수소의 열분해 반응과 수증기 개질 반응이 촉진되었기 때문으로 해석된다. 특히 고온 조건에서는 메탄 및 고분자 탄화수소의 수증기 개질 반응이 활성화되며, 수성가스 전이 반응 또한 촉진되어 수소 생성이 증가하는 것으로 알려져 있다.¹⁹⁻²¹ 실제로 본 연구에서도 반응 온도가 증가함에 따라 메탄(CH_4) 함량은 전반적으로 감소하거나 상대적으로 낮은 값을 보였다. S/C 비 변화에 따른 영향을 살펴보면, 동일한 온도 조건에서 S/C 비가 1에서 3으로 증가할 경우 수소 함량은 증가하거나 최대값을 나타내는 경향을 보였다.

반응온도 920 °C 조건에서 수소 함량은 S/C = 1에서 3으로 증가할 시, 63에서 65.9 vol%로 약간 증가하였다. 이러한 경향은 스팀 공급량 증가에 따라 수증기 개질 반응과 수성가스 전이 반응이 촉진되었기 때문으로 판단된다.²² 그러나 S/C 비가 5로 증가한 조건에서는 수소 함량이 오히려 감소하는 경향이 관찰되었다. 870 °C에서 수소 함량은 33.6 vol%, 920 °C에서는 62.5 vol%로 감소하였다. 이는 과도한 수증기 공급으로 인해 반응기 내 국부 온도가 저하되고, 반응물 회석 효과가 증가하여 유효한 개질 반응이 제한되었기 때문으로 해석된다.^{23,24} 또한 수증기 과잉 조건에서는 가스 체류시간 감소로 인해 고분자 탄화수소의 충분한 분해가 이루어지지 못했을 가능성도 있다.

활성탄 적용 여부에 따른 프로듀서 가스 조성 변화는 Figure 4에 나타내었다. 활성탄을 적용하지 않은 조건(non-activated carbon, Non-AC)과 비교하여, 활성탄을 적용한 AC-1(870 °C) 및 AC-2(920 °C) 조건에서는 생성 가스 조성이 현저히 변화하였다. 먼저 수소 함량의 경우, non-AC 조건에서는 45.2-63 vol% 범위였으나, 활성탄을 적용한 조건에서는 79.7 vol% (AC-1) 및 78.7 vol% (AC-2)로 크게 증가하였다. 동시에 C_2

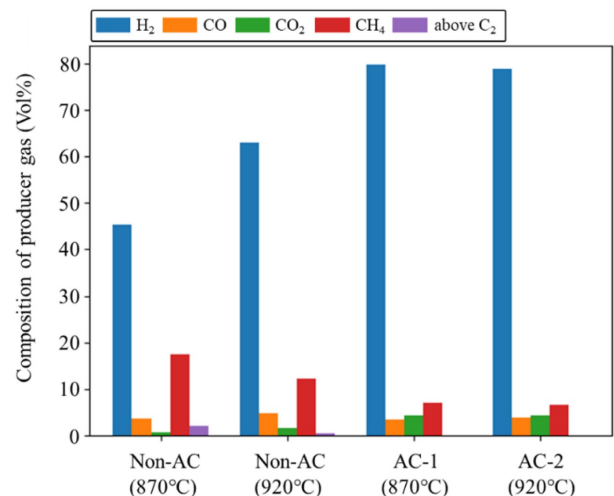


Figure 4. Effect of activated carbon on producer gas composition during steam gasification of WTPO.

이상 탄화수소 가스 함량은 non-AC 조건에서 최대 약 2 vol% 까지 검출된 반면, 활성탄 적용 조건에서는 거의 검출되지 않았다. 이러한 결과는 활성탄의 높은 비표면적과 다공성 구조가 타르 및 고분자 탄화수소 성분의 흡착과 열분해를 촉진하고, 고온 및 수증기 존재 하에서 2차 개질 반응을 유도했기 때문으로 해석된다.²⁵⁻²⁷ 특히 활성탄 적용 조건에서 메탄 함량이 12.1–17.5에서 6.7–7.0 vol% 범위로 감소한 점은 메탄 수증기 개질 반응이 활성화되었음을 간접적으로 보여준다. 중요한 점은 활성탄 적용에 따른 이러한 효과가 870 및 920 °C 반응 온도 조건 모두에서 유사하게 나타났다는 점이다. 이는 활성탄이 특정 온도 조건에 국한된 촉매 역할을 수행하기보다는, 다만 가스화 시스템 내에서 타르 저감 및 2차 개질을 안정적으로 유도하는 반응 매질로 작용했음을 시사한다.

프로듀서 가스 내 타르 함량. Figure 5는 WTPO의 스팀 가스화 모든 실험에서 생성된 프로듀서 가스 내 타르 함량(g/Nm³)을 나타내었다. 활성탄을 적용하지 않은 조건(Non-AC)에서 반응 온도가 870 °C에서 920 °C로 증가함에 따라 프로듀서 가스 내 타르 함량은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. S/C = 1 조건에서 타르 함량은 110에서 15 mg/Nm³로 약 86% 감소하였으며, S/C = 3 조건에서도 1,071에서 33 mg/Nm³로 크게 감소하였다.

이러한 결과는 반응 온도 상승에 따라 WTPO 유래 방향족 및 고분자 탄화수소의 열분해 및 2차 분해 반응이 촉진되었기 때문으로 해석된다. 고온 조건에서는 타르 성분이 열적으로 불안정해지며, 가스상에서 H₂, CO 등의 저분자 가스로 전환되는 경향이 보고된 바 있다.^{28,29} 특히 WTPO와 같이 방향족 성분을 다량 포함한 열분해 오일의 경우, 고온 조건에서 타르의 열적 크래킹 효과가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있다.³⁰

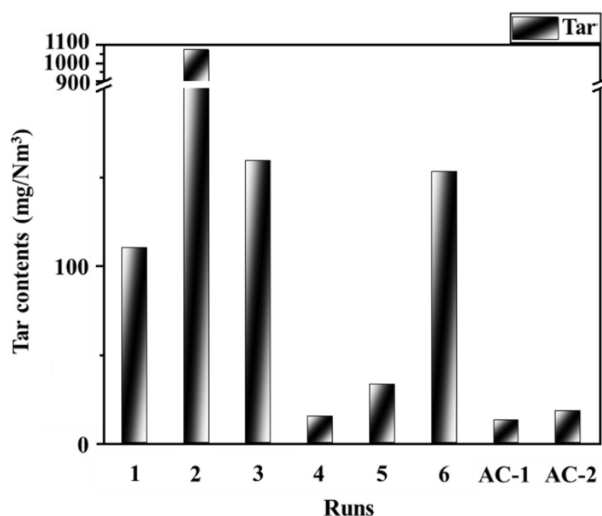


Figure 5. Effect of operating conditions on tar content in producer gas during steam gasification of WTPO.

S/C 비 변화 또한 타르 생성에 중요한 영향을 미쳤다. 870 °C 조건에서 S/C 비가 1에서 3으로 증가할 경우, 타르 함량은 110에서 1,071 mg/Nm³로 오히려 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 낮은 반응 온도에서 S/C 비를 증가시킬 경우, 수증기 개질 반응 활성화도 향상과 함께 반응기 내 체류시간 감소가 동시에 작용하여 타르 생성량이 다시 증가하는 경향이 보고된 바 있다. Zhu 등의³¹ 수치 모델링 연구에서는 S/C 비를 0.3에서 0.9로 증가시킬 때 전체 타르가 감소하였으나, 그 이후 S/C 비를 더 증가시키면 총 타르 및 중량급 타르 성분이 다시 증가하는 경향이 예측되었다. 따라서 870 °C, S/C = 3 조건에서 관찰된 높은 타르 농도는 응축수에 의한 영향보다는, 상대적으로 낮은 반응 온도에서 증가된 스팀 공급에 따른 체류시간 감소와 타르의 2차 분해 제한이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 반면, S/C 비가 5로 증가한 조건에서는 타르 함량이 159 mg/Nm³로 다시 감소하였다. 이는 충분한 수증기 존재 하에서 타르 성분이 수증기 개질 반응에 참여하거나, 수성가스 전이 반응과 연계되어 가스상 성분으로 전환되었기 때문으로 판단된다.³² 이러한 결과는 S/C 비에 따라서 타르 저감에 긍정적인 영향을 미칠 수 있으나, 그 효과는 반응 온도 및 체류 시간과 같은 다른 운전 조건과의 상호작용에 크게 의존함을 보여준다. 반응온도 920 °C 조건에서는 전반적으로 타르 함량이 낮은 수준을 유지하였으며, S/C 비 변화에 따른 영향도 상대적으로 완만하게 나타났다. 이는 고온 조건에서 타르 생성 자체가 억제되거나, 생성 즉시 분해되는 반응 경로가 우세했기 때문으로 해석된다. 활성탄을 적용한 AC-1 및 AC-2 조건에서는 타르 함량이 현저히 감소하였다. AC-1(870 °C) 조건에서 타르 함량은 12 mg/Nm³, AC-2(920 °C) 조건에서는 13 mg/Nm³로 측정되었으며, 이는 동일 온도의 Non-AC 조건 대비 90% 이상 감소한 수준이다. 이러한 결과는 활성탄의 높은 비표면적과 다공성 구조에 의해 타르 성분이 효과적으로 흡착되고, 고온 및 수증기 분위기 하에서 흡착된 타르가 2차 개질 및 크래킹 반응을 통해 저분자 가스로 전환되었기 때문으로 해석된다. 기존 연구에서도 활성탄 및 탄소 기반 소재(carbon-based materials)는 화학적 촉매의 활성이 아닌, 타르 흡착과 열적 개질을 동시에 유도하는 반응 매질로 작용함으로써 타르 제거에 효과적임이 보고된 바 있다.^{33,34} 특히 주목할 점은 활성탄 적용 효과가 870 및 920 °C 조건 모두에서 유사하게 나타났다는 점이다. 이는 활성탄이 특정 온도 조건에 한정된 역할을 수행하는 것이 아니라, 다만 가스화 시스템 내에서 안정적인 프로듀서 가스 내 타르 저감 기능을 제공할 수 있음을 시사한다. 다만, 본 연구에서는 반응기 내부 coke deposition 및 응축성 부산물 정량 회수가 수행되지 않아, 전체적인 carbon balance 분석에는 한계가 있었다. 향후 연구에서는 생성가스, 응축성 부산물 및 잔류 탄소를 포함한 정량적 carbon distribution 분석을 추가적으로 하고자 한다. 이상의 결과를 종합하면, WTPO 스팀 가스화 공정에서

타르 생성 및 저감은 반응 온도, S/C 비 및 활성탄 적용의 복합적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 반응 온도 상승은 타르의 열적 분해를 촉진하는 가장 직접적인 요인이었으며, S/C 비는 조건에 따라 타르 생성 또는 저감에 상반된 영향을 미칠 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 다단 다운드래프트 가스화 시스템을 이용하여 페타이어 열분해 오일(WTPO)의 스팀 가스화 특성을 평가하고, 반응 조건에 따른 프로듀서 가스 조성 및 타르 생성 거동을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다. 첫째, WTPO의 스팀 가스화 과정에서 생성된 프로듀서 가스는 수소(H_2), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2) 및 메탄(CH_4)을 주요 성분으로 하였으며, 반응 조건에 따라 수소 함량은 약 33–79 vol% 범위로 변화하였다. 특히 반응 온도가 920 °C로 증가함에 따라 수소 함량이 전반적으로 증가하고, 메탄 함량이 감소하는 경향을 보였다. 둘째, 스팀/탄소 물 비(S/C ratio)는 프로듀서 가스 조성에 중요한 영향을 미치는 인자로 확인되었다. S/C 비 증가에 따라 수증기 개질 반응과 수성가스 전이 반응이 촉진되어 수소 및 이산화탄소의 비율이 증가하였으나, 과도한 수증기 공급 조건(S/C = 5)에서는 열 손실 및 희석 효과로 인해 수소 생성 증가 효과가 제한되었다. 셋째, 다단 가스화 시스템 내 2차 개질 영역에 활성탄을 적용한 조건에서는 생성 가스의 품질이 현저히 향상되었다. 활성탄을 적용한 조건에서 수소 함량은 약 78–79 vol%로 가장 높게 나타났으며, C_2 이상 탄화수소 성분은 거의 검출되지 않았다. 이는 활성탄이 타르 및 고분자 탄화수소 성분의 흡착과 2차 개질 반응을 촉진하는 반응 매질로서 효과적으로 작용했음을 시사한다. 넷째, 프로듀서 가스 내 타르 함량은 반응 조건에 따라 15–1071 mg/Nm³ 범위로 나타났으며, 반응 온도 상승은 타르 저감에 효과적인 반면, 과도한 S/C 비 조건에서는 오히려 타르 생성이 증가하는 경향이 관찰되었다. 특히 활성탄을 적용한 조건에서는 타르 함량이 약 10 mg/Nm³에 근접하게 안정적으로 제어되었다. 이러한 타르 저감 수준은 후단에 간단한 흡착장치만 설치된다면, 가스엔진 및 연료전지나 합성공정 전단 수준에 활용 가능할 것으로 보인다. 또한 추가적인 정제 공정을 통해 수소 분리 공정의 전단가스로 활용될 수 있다고 판단된다. WTPO 기반 스팀 가스화 공정의 적용 가능성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 종합적으로, 본 연구는 페타이어 열분해 오일을 액상 원료로 활용한 스팀 가스화 공정에서 반응 조건과 다단 시스템 설계가 프로듀서 가스 품질 및 타르 저감에 결정적인 영향이 있음을 규명하였다. 본 연구 결과는 WTPO를 활용한 수소 함량이 높은 청정 가스 생산 공정의 설계 및 최적화에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 연구는 산업통상자원부 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 소재부품산업기술개발기반구축사업(No. RS-2025-1902973)의 일환으로 수행되었습니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Al-Qadri, A. A.; Ahmed, U.; Abdul Jameel, A. G.; Zahid, U.; Ahmad, N.; Shahbaz, M.; Nemitallah, M. A. Technoeconomic Feasibility of Hydrogen Production from Waste Tires with the Control of CO_2 Emissions. *ACS. Omega* **2022**, 7, 48075-48086.
- Formela, K. Sustainable Development of Waste Tires Recycling Technologies – Recent Advances, Challenges and Future Trends. *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.* **2021**, 4, 209-222.
- Lee, S. Sustainable Recycling of End-of-Life Tires. *Korea Inst. Ind. Econ. Trade Res. Pap.* **2024**, 24/IER/29/02/03, DOI:10.2139/ssrn.4868495.
- Moasas, A. M.; Amin, M. N.; Khan, K.; Ahmad, W.; Al-Hashem, M. N. A.; Deifalla, A. F.; Ahmad, A. Worldwide Development in the Accumulation of Waste Tires and Its Utilization in Concrete as a Sustainable Construction Material: A Review. *Case Stud. Constr. Mater.* **2022**, 17, e01677.
- Martínez, J. D.; Puy, N.; Murillo, R.; García, T.; Navarro, M. V.; Mastral, A. M. Waste Tyre Pyrolysis – A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, 23, 179-213.
- Demirbas, A. Hydrogen Production from Biomass via Supercritical Water Gasification. *Energy Sources, Part A* **2010**, 32, 1342-1354.
- Lee, U.; Chung, J. N.; Ingley, H. A. High-Temperature Steam Gasification of Municipal Solid Waste, Rubber, Plastic and Wood. *Energy Fuels* **2014**, 28, 4573-4587.
- Elbaba, I. F.; Wu, C.; Williams, P. T. Catalytic Pyrolysis–Gasification of Waste Tire and Tire Elastomers for Hydrogen Production. *Energy Fuels* **2010**, 24, 3928-3935.
- Santasnachok, M.; Nakayai, T. Exergetic and Environmental Assessments of Hydrogen Production via Waste Tire Gasification with Co-Feeding of CO_2 Recycled. *Energy Rep.* **2022**, 8, 859-867.
- Li, Y.; Nahil, M. A.; Williams, P. T. Pyrolysis–Catalytic Steam Reforming of Waste Plastics for Enhanced Hydrogen/Syngas Yield Using Sacrificial Tire Pyrolysis Char Catalyst. *Chem. Eng. J.* **2023**, 467, 143427.
- Hossain, M. N.; Choi, M. K.; Choi, H. S. A Review of the Desulfurization Processes Used for Waste Tire Pyrolysis Oil. *Catalysts* **2021**, 11, 801.
- Mello, M.; Rutto, H.; Seodigeng, T. Waste Tire Pyrolysis and Desulfurization of Tire Pyrolytic Oil – A Review. *J. Air Waste Manag. Assoc.* **2023**, 73, 159-177.
- Materazzi, M.; Lettieri, P.; Mazzei, L.; Taylor, R.; Chapman, C. Thermodynamic Modelling and Evaluation of a Two-Stage Thermal Process for Waste Gasification. *Fuel* **2013**, 108, 356-369.
- Brandt, P.; Larsen, E.; Henriksen, U. High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier. *Energy Fuels* **2000**, 14, 816-819.

15. Jeong, Y.-S.; Park, K.-B.; Kim, J.-S. Hydrogen Production from Steam Gasification of Polyethylene Using a Two-Stage Gasifier and Activated Carbon. *Appl. Energy* **2020**, 262, 114495.
16. Choi, S.-H.; Kim, J.-S.; Kim, H.-J.; Kim, C.-Y.; Joo, Y.-T.; Seo, M.-W.; Jeong, S.-H. Pyrolysis of Waste Tires in a Fixed Bed Reactor: Influence of Additive on Sulfur Content in Pyrolysis Oil. *Polym. Korea* **2025**, 49, 435-443.
17. Jeong, Y.-S.; Kim, J.-W.; Seo, M.-W.; Mun, T.-Y.; Kim, J.-S. Characteristics of Two-stage Air Gasification of Polystyrene with Active Carbon as a Tar Removal Agent. *Energy* **2021**, 219, 119681.
18. Pala, L. P. R.; Wang, Q.; Kolb, G.; Hessel, V. Steam Gasification of Biomass with Subsequent Syngas Adjustment Using Shift Reaction for Syngas Production: An Aspen Plus Model. *Renew. Energy* **2017**, 101, 484-492.
19. Khzouz, M.; Gkanas, E. I. Experimental and Numerical Study of Low Temperature Methane Steam Reforming for Hydrogen Production. *Catalysts* **2017**, 8, 5.
20. Markevich, M.; Coll, R.; Montané, D. Steam Reforming of Sunflower Oil for Hydrogen Production. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2000**, 39, 2140-2147.
21. Bayramoğlu, K.; Bayramoğlu, T. Integrated Modeling of Steam Methane Reforming and Carbon Capture for Blue Hydrogen Production. *Hydrogen* **2025**, 6, 94.
22. Alshareef, R.; Nahil, M. A.; Williams, P. T. Hydrogen Production by Three-Stage Pyrolysis, Catalytic Steam Reforming, and Water Gas Shift Processing of Waste Plastic. *Energy Fuels* **2023**, 37, 3894-3907.
23. Van Rossum, G.; Kersten, S. R. A.; Van Swaaij, W. P. M. Staged Catalytic Gasification/Steam Reforming of Pyrolysis Oil. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, 48, 5857-5866.
24. Remiro, A.; Valle, B.; Aguayo, A. T.; Bilbao, J.; Gayubo, A. G. Steam Reforming of Raw Bio-Oil in a Fluidized Bed Reactor with Prior Separation of Pyrolytic Lignin. *Energy Fuels* **2013**, 27, 7549-7559.
25. Wang, M.; Jin, L.; Li, Y.; Wang, J.; Yang, X.; Hu, H. In Situ Catalytic Upgrading of Coal Pyrolysis Tar over Carbon-Based Catalysts Coupled with CO₂ Reforming of Methane. *Energy Fuels* **2017**, 31, 9356-9362.
26. Machida, M.; Yoo, P.; Amano, Y. Adsorption of Nitrate from Aqueous Phase onto Nitrogen-Doped Activated Carbon Fibers. *SN Appl. Sci.* **2019**, 1, 323.
27. Zhao, H.; Yu, Q.; Li, M.; Sun, S. Preparation and Water Vapor Adsorption of "Green" Walnut-Shell Activated Carbon by CO₂ Physical Activation. *Adsorpt. Sci. Technol.* **2020**, 38, 60-76.
28. Dos Santos, R. G.; Rocha, C. L.; Felipe, F. L. S.; Cezario, F. T.; Correia, P. J.; Rezaei-Gomari, S. Tire Waste Management: An Overview from Chemical Compounding to the Pyrolysis-Derived Fuels. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2020**, 22, 628-641.
29. Čepić, Z.; Mihajlović, V.; Đurić, S.; Milotić, M.; Stojić, M.; Stepanov, B.; Ilić Mićunović, M. Experimental Analysis of Temperature Influence on Waste Tire Pyrolysis. *Energies* **2021**, 14, 5403.
30. Gao, N.; Quan, C.; Ma, Z.; Wu, C. Thermal Characteristics of Biomass Pyrolysis Oil and Potential Hydrogen Production by Catalytic Steam Reforming. *Energy Fuels* **2018**, 32, 5234-5243.
31. Hashemiohi, A.; Wang, L.; Shahbazi, A. Numerical Analysis of Tar and Syngas Formation during the Steam Gasification of Biomass in a Fluidized Bed. *Energies* **2023**, 16, 5283.
32. Sueyasu, T.; Oike, T.; Mori, A.; Kudo, S.; Norinaga, K.; Hayashi, J.-I. Simultaneous Steam Reforming of Tar and Steam Gasification of Char from the Pyrolysis of Potassium-Loaded Woody Biomass. *Energy Fuels* **2011**, 26, 199-208.
33. Xu, D.; Xiong, Y.; Zhang, S.; Su, Y. Influence of Preparation Method of Char Supported Metallic Ni Catalysts on the Catalytic Performance for Reforming of Biomass Tar. *Int. J. Energy Res.* **2019**, 43, 6922-6933.
34. Xu, M.; Liu, Z.; Zhang, X.; Di, J.; Zhao, L.; Li, M.; Lu, Q. Catalytic Steam Reforming of Benzene as a Bio-Tar Model Compound over Ni-Fe/TiO₂ Catalysts. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2022**, 10, 8930-8939.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.