

EDITORIAL

바이오매스로부터 생산한 바이오차에 의한 수질오염물질 흡착

박윤¹ · 정수연¹ · 정은서¹ · 신윤정^{1,2} · 이은주^{1,2} · 이재원^{1,2,*}

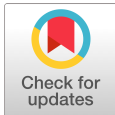
¹전남대학교 임산공학과, ²전남대학교 IT-Bio 융합시스템전공

Adsorption of Water Pollution by Biochar Produced from Biomass

Yoon Park¹, Suyeon Jung¹, Eunseo Jung¹, Yoon-Jung Shin^{1,2}, Eun-ju Lee^{1,2}, and Jae-Won Lee^{1,2,*}

¹Department of Wood Science and Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea

²Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Chonnam National University, Gwangju, Korea



Received: November 7, 2022
Revised: December 6, 2022
Accepted: December 13, 2022

*Corresponding author :
 Jae-Won Lee
 Department of Wood Science and
 Engineering, Chonnam National
 University, Gwangju, Korea
 Tel : +82-62-530-2098
 E-mail : ljw43376@chonnam.ac.kr

Copyright © 2022 Institute of Agricultural Science
 & Technology, Chonnam National University.
 This is an Open Access article distributed
 under the terms of the Creative Commons
 Attribution Non-Commercial License
 (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)
 which permits unrestricted non-commercial
 use, distribution, and reproduction in any
 medium, provided the original work is
 properly cited.

ORCID

Yoon Park
<https://orcid.org/0000-0002-1290-1709>
 Suyeon Jung
<https://orcid.org/0000-0002-6848-6620>
 Eunseo Jung
<https://orcid.org/0000-0001-6994-2379>
 Yoon-Jung Shin
<https://orcid.org/0000-0001-6299-5128>
 Eun-ju Lee
<https://orcid.org/0000-0001-8085-6674>
 Jae-Won Lee
<https://orcid.org/0000-0003-2528-1905>

Abstract

Biochar is produced from lignocellulosic biomass (wood, agricultural and forestry waste, etc.) through thermal decomposition at high temperature. Water pollution (pesticides, dyes, heavy metals, and volatile organic compounds [VOCs]) can be efficiently removed by biochar. In particular, waste biomass is typically used as fuel or thrown away; thus, it is necessary to determine a valuable utilization for it. The process of biochar production is simple and suitable for the production of porous structures. In this paper, 1) biochar production and its characteristics based on biomass types, 2) research trends on the adsorption of water pollution (pesticides, dyes, heavy metals, VOCs) on biochar, and 3) expected effects are discussed.

Keywords

biomass, biochar, water pollution, adsorption

서론

급격한 산업발전과 경제성장으로 인해 대기, 수질, 토양오염 등 환경오염이 발생하고 있다. 우리나라에서는 하루 197,000톤의 폐수가 발생하고 있어 수질오염에 대한 관심이 집중되고 있다. 배출되는 폐수에는 농약, 중금속, 염료, 휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOCs) 등의 오염 물질이 포함되어 심각한 수질오염을 일으키게 된다. 수질 오염물질은 독성, 비 생분해성, 발암성 등을 가지고 있어 사람, 동물, 식물 등에 영향을 미친다. 기존에는 이러한 수질오염을 해결하기 위해 고급 산화공정(advanced oxidation process, AOPs), 역삼투압, 흡착, 이온교환, 오존처리, 침전, 여과 등과 같은 다양한 방법들이 사용되었다. 하지만 기존의 수질 정화 방법은 시설설비 비용이 많이 들고 상당한 양의 화학 잔류물을 생성하여 2차 환경오염을 발생시키며 사용 시 전문 기술을 요구하는 등의 단점을 가지고 있다[1]. 최근에는 흡착을 이용한 수질 정화 방법에 많은 관심이 집중되고 있으며, 대표적인 흡착 소재에는 활성탄, 제올라이트, 실리카겔, 알루미늄하이드록사이드 등이 있다. 이 중 높은 비표면적과 다공성 구조를 가지는 활성탄이 많이 이용되고 있다. 하지만 활성탄의 경우 제조 공정이 복잡하고 높은 시설설비 비용, 활성화 과정에서 화학물질이 사용된다는 단점을 가지고 있다[2]. 바이오차는 산소가 제한된 환경에서 화학 공정 없이 바이오매스를 300℃-800℃로 열분해시켜 얻는 고체 물질이다[3]. 바이오차의 생산비용은 톤당 \$246, 활성탄의 비용은 톤당 \$1,500으로 약 6배 정도 차이가 난다[4]. 또한, 높은 흡착효율, 에너지 소비 감소, 양호한 수율, 폐수에서의 사용 용이성으로 바이오차

에 대한 관심이 증가하고 있다. 최근 연구에서는 바이오차를 이용하여 농약, 염료, 항생제/약물, 산업용 화학물질, 휘발성 유기 화합물(VOCs) 등 오염물질뿐 아니라 중금속과 같은 무기 오염물질의 제거에도 이용할 수 있다는 것을 확인하였다[5]. 본 논문에서는 바이오매스의 종류에 따른 바이오차 생산과 생산된 바이오차를 활용한 농약, 염료, 중금속, 휘발성 유기 화합물(VOCs)의 흡착과 관련하여 흡착제의 효율을 비교 분석하고자 한다.

연구 개발 현황

1. 바이오차 생산

바이오차는 농업부산물, 산림부산물, 동물 분뇨, 과일 껍질 등으로 생산한다. 생산된 바이오차의 구성성분은 바이오매스의 종류와 열분해 온도 및 반응시간에 따라 다르다[5]. 바이오차의 O/C와 H/C 비율은 흡착 소재의 방향족, 생분해성, 극성과 직접적인 관련이 있으며, 일반적으로 열분해 후 O/C와 H/C 비율은 감소한다. 이것은 흡착 소재로 바이오차의 안정성이 향상된 것을 의미한다[6]. 원소 비율 이외에도 pH 및 탄화 온도, 반응시간과 같은 인자도 바이오차 특성에 영향을 미친다. 고온의 열분해 온도에서 생산된 바이오차는 높은 비표면적, 미세기공, 소수성을 가진다[7]. 다양한 바이오매스 및 반응조건으로부터 생산된 바이오차 특성을 Table 1에 제시하였다.

2. 바이오차에서 흡착

1) 농약 흡착

국내농업에서는 해충방제, 잡초제거, 질병 예방을 위해 제초제, 살충제, 살균제 등의 농약을 사용한다. 농약은 목적과 관계없이 사용하거나 과도하게 사용하면 토양이나 작물에 잔류하게 된다. 잔류농약은 후작물에 피해, 생태계 파괴, 토양 황폐화 등을 초래한다[22].

농약으로 인한 문제를 해결하기 위해 PLS(positive list system) 제도가 만들어져 운영되고 있다. PLS 제도란 국내 농약잔류허용기준이 설정된 농약과 그 밖에 농약은 일률기준(0.01 mg/kg 이하)으로 관리하는 제도를 말한다. 과도한 농약사용으로 인한 농약의 잔류는 PLS 기준을 위반하게 되고 국내 농산물 유통에 문제점을 일으킬 수 있다. 기존에는 이러한 잔류농약 제거를 위해 세정제를 이용해 제거하는 토양세척법, 화학적 산화/환원을 이용한 방법, 미생물 분해법, 유기물질을 토양 속에 섞어 분해하는 퇴비화법 등을 사용해 왔다. 위와 같은 방법들은 비용이 많이 들고, 토양의 비옥도를 손실시키고 화학약품 사용으로 2차 환경오염의 위험이 있다. 흡착 소재의 활용으로 기존 농약 제거 기술의 단점을 보완할 수 있다[23].

농업 폐기물(벼짚, 옥수수숙대, 왕겨 등)과 임업 부산물(대나무 칩 등)로부터 바이오차를 생산하여 살충제의 흡착 특성 및 탄화물 특성을 분석하였다. 벼짚 바이오차가 살충제 제거에 적합한 소재로 저비용의 농약 흡착제로 사용할 수 있다[10]. 포도 찌꺼기를 이용하여 350°C, 550°C, 750°C로 탄화하여 살균제인 사이목사닐(cymoxanil)의 흡착 특성 및 탄화물 특성을 분석하였다. 350°C에서 탄화한 포도 찌꺼기 바이오차의 경우 가장 높은 흡착률을 나타냈고, 바이오차 비표면적보다 표면의 작용기가 흡착에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다[18]. 코코넛 껍질을 이용하여 700°C에서 탄화하고 인산, 수산화나트륨을 이용한 화학적 산화를 통해 바이오차를 생산하여 다이아지논(diazinon) 흡착 특성 및 탄화물 특성 분석을 하였으며, 다이아지논 흡착에 적합한 소재임을 확인하였다[17].

옥수수부산물물을 탄화 전에 인산 용액에 침지시켜 활성화한 후 400°C에서 탄화하여 바이오차를 생산하고 아트라진(atrazine) 흡착 특성 및 탄화물 특성을 분석하였고 제작한 바이오차가 아트라진 흡착에 효과적인 것을 확인하였다[24]. 땅콩껍질을 이용하여 300°C, 450°C, 600°C 온도별 탄화를

Table 1. Characteristic of biochar produced from various biomass and reaction conditions

Feedstock	Carbonization temperature (°C)	Carbonization time (h)	Elemental composition (%)				Ash (%)	pH	SSA (m ² /g)	Ref.	
			C	H	O	N					
Wood and waste wood	Eucalyptus	400	77.80	5.38	18.30	0.41		7.47	10.35	[8]	
		500	83.11		16.89				253.25	[9]	
	Eucalyptus bark	600	79.10	3.30	12.17	4.20		9.37	188.20	[10]	
	Pine wood sawdust	300	57.71	4.54	36.29	1.46			0.68		
		500	70.24	2.62	25.60	1.55			30.07	[11]	
		700	73.13	1.75	23.99	1.13			230.43		
	Hickory wood	300	69.10	4.65	25.60	0.39		7.10	0.80		
		450	76.30	3.53	14.10	0.30		7.90	9.80	[12]	
		600	83.30	2.51	6.08	0.29		8.40	221.50		
	Bamboo chips	600	81.20	2.83	8.27	4.55		9.59	246.70	[10]	
Wattle bark	500	2					7.16	8.92	393.15	[13]	
Agricultural byproducts	Sugarcane bagasse	500	75.94	1.77	21.89	0.40			78.15	[14]	
		600	84.35	2.69	8.89	1.36	7.23		97.20		
	Corn straw	800	86.14	1.34	8.25	1.11	10.79		93.70	[15]	
		350	47.70	3.62		1.47	27.40	8.43	3.10		
	550	45.70	2.13		1.17	42.90	10.30	4.15	[16]		
	Corn cob	600	79.10	2.87	8.86	4.25		10.10	242.10	[10]	
	Coconut shell	700	2						434.83	[17]	
	Palm bark	400	0.5	68.90	5.30	20.80	0.88		7.10	2.46	[8]
	Grape skins	350	47.25	5.07	21.17	2.09	4.42		0.25		
		550	78.22	2.73	12.94	2.22	3.89		2.57	[18]	
750		78.68	1.36	13.49	2.26	4.21		137.37			
Others	Switchgrass	600	82.80	1.70	6.70	1.3	5.27	10.90	255.80		
		900	85.50	0.60	2.60	1.5	7.54	10.70	641.60	[19]	
	Macroalga	400	40.40	1.92	7.05	4.33	46.29	8.34			
		600	40.25	1.37	6.97	3.11	48.30	10.13		[20]	
		800	42.39	0.46	2.13	1.43	53.59	12.31			
	Mimosa plants	500	2				7.48	10.09	2.62	[13]	
	Wakame	800	2	63.13	2.83	14.87	2.80		69.70	[21]	
	Anaerobic digestion residue	400	0.5	63.50	5.28	18.10	0.94		8.83	7.60	[8]
	Coffee husks	500	2				2.79	6.66	285.53	[13]	

SSA, specific surface area.

하고 염산을 이용해 산 처리하여 바이오차를 생산하였고 아트라진과 니코설푸론(nicosulfuron)에 대한 흡착 특성과 탄화물 특성을 분석하였다. 아트라진과 니코설푸론 모두에 대해 높은 흡착력을 나타냈으며 특히, 아트라진에 대해 높은 흡착력을 보였다[25]. 다양한 바이오매스 유래 바이오 차에 대한 농약 흡착 메커니즘을 Table 2에 나타냈다.

2) 염료흡착

국내 섬유산업의 발전으로 인해 유기염료의 사용이 증가하고 있다. 유기염료는 염색과정에서 5% 정도 사용되고 나머지는 배출된다. 배출되는 염료폐수는 독성을 가지고 있어 수계로 유입되면 사람의 건강에 악영향을 미칠 수 있다[8]. 이를 해결하기 위해서는 염료폐수가 수계로 유입되기 전에 제거해야 한다. 기존 염료폐수 처리 방법으로는 응집처리, 용매추출, 전기화학적 산화, 광촉매 분해, 막 분리 등을 사용했다. 하지만 높은 비용, 불완전한 제거 등 단점이 있어 기존의 방법을 대체할 방법으로

Table 2. Isothermal adsorption model of pesticides on biochar

Feedstock		Carbonization temperature (°C)	Pesticide	Isothermal adsorption model	Adsorption capacity (mg/g)	Ref.
Wood and waste wood	Eucalyptus bark	600	Atrazine	Modified Elovich model	511.3	[10]
			Imidacloprid		395.7	
	Bamboo chips	600	Atrazine	Modified Elovich model	320.0	[10]
			Imidacloprid		280.4	
Agricultural byproducts	Corn cob	600	Atrazine	Modified Elovich model	538.7	[10]
			Imidacloprid		183.1	
	Rice husk	600	Atrazine	Modified Elovich model	448.0	[10]
			Imidacloprid		742.5	
	Rice straw	600	Atrazine	Modified Elovich model	1363	[10]
			Imidacloprid		1706	
	Grape skins	350	Cymoxanil	Pseudo-second order model Freundlich model	161.02	[18]
		550			77.57	
		750			45.64	
	Coconut shell	700	Diazinon	Freundlich model	5.85	[17]
	Corn straw	400	Atrazine	Langmuir model	26.9	[24]
	Peanut shell	350 450 600	Atrazine	Freundlich model	364.22	[25]
332.52						
462.23						
Nicosulfuron			19.27			
			70.45			
			322.77			

흡착제를 활용한 염료 제거 기술에 관한 관심이 증가하고 있다.

하수 찌꺼기, 유칼립투스, 야자나무껍질을 200°C에서 탄화하여 메틸렌블루(methylene blue) 흡착 특성을 분석하였다. 연구 결과 유칼립투스 바이오차가 메틸렌블루 제거에 우수한 소재임을 확인하였다[8]. 스위치그래스를 600°C, 900°C에서 탄화하여 메틸렌블루, 오렌지 G(orange G), 콩고레드(congo red)에 대한 흡착 특성을 연구하였다. 900°C에서 탄화한 스위치그래스가 가장 높은 비표면적을 가지고 있으며, 염료흡착에 있어 우수한 것을 확인하였다[19]. 거대조류를 400°C, 600°C, 800°C에서 탄화하여 콩고레드, 말라카이트 그린(malachite green), 크리스탈 바이올렛(crystal violet) 흡착에 대한 특성을 분석하였다. 800°C에서 탄화된 바이오차가 모든 염료에 대해 높은 흡착 효과를 나타냈다[20].

와틀 나무껍질, 미모사 식물, 커피 껍질 등을 활용하여 500°C에서 탄화하여 메틸오렌지에 대한 흡착 특성을 연구하였다. 모든 바이오차가 메틸오렌지(methyl orange) 제거에 적합한 소재임을 확인하였다[13]. 미역을 이용하여 800°C에서 탄화한 바이오차와 KOH를 이용하여 활성화한 바이오차를 제작하여 메틸렌블루, 로다민 B(rhodamine B), 말라카이트 그린에 대한 흡착 특성 분석하였으며, 모든 염료에 대해 우수한 흡착 능력을 확인하였다[21]. 다양한 바이오매스 유래 바이오차를 통한 염료흡착 메커니즘은 Table 3에 나타났다.

3) 중금속 흡착

중금속은 수중 생태계에 유출 시 자연적으로 생분해되는 것이 아니라 지속해서 잔류하거나, 먹이사슬을 통해 계속 축적되어 어류와 사람에게 해로운 영향을 준다[26]. 중금속은 비중이 4.5 이상인 금속류로서, 대표적으로 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 납(Pb), 구리(Cu), 수은(Hg), 아연(Zn) 등이 있다. 기존의 중금속 제거 기술에는 이온 교환방법, 전기화학적 처리 방법, 용매추출, 증발법 등이 있다. 하지

Table 3. Isothermal adsorption model of dye on biochar

Feedstock		Carbonization temperature (°C)	Dye	Isothermal adsorption model	Adsorption capacity (mg/g)	Ref.
Wood and waste wood	Eucalyptus	400	Methylene blue	Langmuir model	2.06	[8]
	Palm bark	400	Methylene blue	Langmuir model	2.66	[8]
	Wattle bark	500	Methyl orange	Bangham model	12.26	[13]
	Switchgrass	600	Methylene blue	Langmuir model	196.1	[19]
		900	Orange G		38.2	
			Congo red		22.6	
	Macroalgae	400	Malachite green	Freundlich model	1,384.8	[20]
		600	Congo red	Pseudo-second-order model	557.2	
		800	Crystal violet		106.5	
Others	Mimosa plants	500	Methyl orange	Bangham model	12.33	[13]
	Wakame	800	Methylene blue	Pseudo-second-order model	840.34	[21]
			Rhodamine B		574.71	
			Malachite green		4,304.72	
	Anaerobic digestion residue	400	Methylene blue	Langmuir model	9.50	[8]
	Coffee husks	500	Methyl orange	Bangham model	12.34	[13]

만 이러한 방법은 높은 비용, 조작의 어려움 등의 단점이 있어, 최근에는 중금속을 제거하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다. 흡착법은 간단하고, 적절한 탈착 공정을 사용하여 재사용할 수 있는 장점이 있어 중금속 제거에 효과적인 방법으로 주목받고 있다. 최근 중금속 흡착제로 다양한 종류의 바이오차에 대한 연구가 진행되고 있다[27]. 유칼립투스를 500°C에서 10°C/min의 속도로 1시간 동안 열분해하여 바이오차를 생산하고 평균 기공크기, 비표면적 등의 특성을 분석하였다. 또한 크롬에 대한 흡착 등온선, 열역학 및 흡착 동역학에 대한 흡착실험으로 흡착 거동 및 메커니즘을 파악하였다. 흡착온도에 따라 크롬에 대한 흡착률이 증가하였으며, 이를 통해 크롬 흡착 시 온도가 중요한 인자임을 확인할 수 있었다[9].

망고스틴 껍질을 400°C에서 2시간 열분해하여 바이오차를 생산하고 크롬에 대한 흡착실험을 진행하여 재사용 평가하였다. 연구 결과, 높은 흡착률을 나타내어 크롬 제거 소재로 적합함을 확인하였다[28]. 땅콩껍질을 이용하여 700°C에서 2시간 동안 열분해하여 바이오차를 생산하고 산화, 알칼리 처리를 한 후 철과 크롬의 제거효율을 비교하였다. 상대적으로 크롬에 대한 제거율이 높게 나타났다[26]. 또한, 옥수수 폐기물을 600°C, 800°C에서 2시간 탄화하여 바이오차를 생산하였으며, 카드뮴에 대한 흡착실험으로 흡착 메커니즘을 분석하였다. 800°C에서 탄화한 바이오차가 상대적으로 높은 흡착률을 나타냈다[15]. 벚짚을 350°C, 550°C에서 2시간 동안 탄화하여 바이오차를 생산하고 납과 아연에 대한 흡착실험을 진행하였다. 550°C에서 탄화한 벚짚 바이오차의 경우, 납에 대한 흡착률이 가장 높게 나타났다[16]. 다양한 바이오매스 유래 바이오차에 대한 중금속 흡착 메커니즘을 Table 4에 나타냈다.

4) 휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOCs) 흡착

휘발성 유기 화합물은 독성이 강하고 발암성이 있어 신체의 면역력을 저하시키고 내분비계 장애 및 대사 장애를 일으킨다[11]. 또한, 알레르기, 두통, 기침 및 구토와 같은 건강에 심각한 영향을 준다. 최근 몇 년 동안 페인트, 자동차산업, 석유산업 등에서 발생하는 휘발성 유기 화합물의 일부가 수질로 유출되면서 수질오염 문제가 심각해지고 있다[29]. 휘발성 유기 화합물에는 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 염화메틸(methyl chloride), 자일렌(xylene), 클로로포름(chloroform) 및 사염화

Table 4. Isothermal adsorption model of heavy metal on biochar

Feedstock		Carbonization temperature (°C)	Heavy metal	Isothermal adsorption model	Adsorption capacity (mg/g)	Ref.
Wood and waste wood	Eucalyptus	500	Cr (VI)	Freundlich model	160.93	[9]
					195.49	
					258.11	
Agricultural byproducts	Mangosteen shells	400	Cr (VI)	Sips model	212.40	[28]
				Pseudo-second-order model		
	Peanut shell	700	Fe (III)	Pseudo-second-order model	7.03	[29]
			Cr (VI)	Freundlich model	9.09	
	Rice straw	350	Pb	Langmuir	0.80	[16]
		550			0.85	
		550			0.61	
	Corn waste straw	600	Cd (II)	Freundlich	0.57	[15]
		800			1.75	

탄소(carbon tetrachloride)가 포함된다. 이러한 휘발성 유기 화합물을 제거할 방법에는 흡착, 축열식 촉매 산화(regenerative catalytic oxidation, RCO), 축열식 열 산화(regenerative thermal oxidization, RTO) 등이 있다[11]. 휘발성 유기 화합물 제어 기술 중에서 흡착은 높은 효율성과 재활용 가능성이 있어 광범위하게 사용된다[30].

옥수수대, 왕겨, 소나무 톱밥을 300°C, 500°C, 700°C에서 3시간 동안 열분해하여 원소분석, 비표면적 등을 분석하고 아세톤(acetone)과 톨루엔에 대한 흡착실험으로 흡착 동역학 및 흡착 메커니즘을 분석하였다. 연구 결과, 아세톤에 대한 흡착률이 높게 나타났다[11]. 히코리 나무를 300°C, 450°C, 600°C로 2시간 동안 열분해하여 생산된 바이오차로 아세톤, 에탄올(ethanol), 클로로포름, 사이클로헥세인(cyclohexane), 톨루엔에 대한 흡착 능력을 평가하였다. 바이오차 열분해 온도에 따라 흡착 효과가 다르게 나타났다. 이것은 휘발성 유기화합물 흡착에 바이오차 탄화 온도가 중요한 인자임을 시사한다[12]. 옥수수대를 600°C에서 3시간 열분해하여 바이오차를 생산하고, 휘발성 유기화합물에 대한 흡착 능력을 분석하였다. 연구 결과, 벤젠 흡착 효과가 가장 높게 나타났다[30]. 다양한 바이오매스 유래 바이오차에 대한 휘발성 유기화합물의 흡착 메커니즘을 Table 5에 나타냈다.

결론

농약, 염료, 중금속, 휘발성 유기 화합물은 수질오염을 일으키는 주요물질이다. 기존에는 수질오염을 해결하기 위해 고급산화공정(AOPs), 역삼투압, 흡착, 이온교환, 오존처리, 침전, 여과 등과 같은 다양한 방법들이 사용되었다. 하지만 이러한 방법은 높은 시설 설비비용, 전문 지식 필요 등의 단점을 가지고 있어 이를 보완하는 방법으로 바이오차를 활용한 흡착에 많은 관심이 집중되고 있다. 바이오차는 낮은 비용, 취급의 용이성, 에너지 사용 저감 측면에서 장점이 있어 수질오염 문제를 해결할 수 있다.

급격한 산업화와 경제발전으로 인해 증가하는 바이오매스 폐기물은 바이오차 생산에 적합한 소재가 될 수 있다. 다양한 물리, 화학적 처리로 바이오차의 특성을 조절할 수 있으며, 이러한 결과는 흡착에 관여하는 인자들(비표면적, 기공크기, 기공부피, 화학적 결합, 전하전위 등)의 특성을 향상시킬 수 있다[31]. 바이오차는 특성에 따라 흡착 메커니즘이 다르므로 흡착하고자 하는 물질에 따라 적절한 방법을 선택하여 생산하는 것이 중요하다.

Table 5. Isothermal adsorption model of VOCs on biochar

Feedstock	VOCs	Carbonization temperature (°C)	Isothermal adsorption model	Adsorption capacity (mg/g)	Ref.
Wood and waste wood	Pine wood sawdust	300 500 700	Pseudo-second-order model	218 116 210 47 86 121	[11]
				7.49 70.20 44.91	
				11.55 47.06 51.40	
				6.96 13.42 21.14	
				8.15 6.97 9.88	
	Hickory wood	300 450 600	Pseudo-first-order model	60.22 14.50 34.51	[12]
				39.10 13.97 11.24 21.50	
				44.50 19.73 32.45 51.09	
				110.09 36.82 45.17 24.76	
Agricultural byproducts	Corn stalk	300 500 700	Pseudo-second-order model		[11]
	Rice husk	300 500 700	ELM model		[14]
	Wheat straw	500	ELM model		[14]
	Bagasse sugarcane	500	ELM model		[14]

VOCs, volatile organic compounds.

요약

바이오차는 농업, 임업 폐기물 등의 바이오매스를 활용하여 고온에서 열분해를 통해 생성되는 물질로 수질오염 물질(농약, 염료, 중금속, VOCs 등)을 효율적으로 제거할 수 있다. 특히 미이용 바이오매스는 연료로 사용되거나 버려지고 있어 가치 있는 활용방안을 제시할 필요가 있다. 바이오매스로부터 바이오차 생산은 공정이 단순하고 효율적으로 다공성 구조를 만든다. 본 논문에서는 1) 바이오매스의 종류에 따른 바이오차 생산 및 특성, 2) 수질오염 물질(농약, 염료, 중금속, VOCs) 흡착에 관한

연구 동향, 3) 바이오차 활용에 대한 기대 효과를 설명한다.

Conflict of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

References

1. Ali I, Asim M, Khan TA. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *J Environ Manage.* 2012;113:170-183.
2. Cheng N, Wang B, Wu P, Lee X, Xing Y, Chen M, et al. Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: a review. *Environ Pollut.* 2021;273:116448.
3. Pourhashem G, Hung SY, Medlock KB, Masiello CA. Policy support for biochar: review and recommendations. *GCB Bioenergy.* 2019;11:364-380.
4. Thomas Klasson K, Wartelle LH, Lima IM, Marshall WE, Akin DE. Activated carbons from flax shive and cotton gin waste as environmental adsorbents for the chlorinated hydrocarbon trichloroethylene. *Bioresour Technol.* 2009;100:5045-5050.
5. Inyang M, Dickenson E. The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review. *Chemosphere.* 2015;134:232-240.
6. Chen T, Luo L, Deng S, Shi G, Zhang S, Zhang Y, et al. Sorption of tetracycline on H_3PO_4 modified biochar derived from rice straw and swine manure. *Bioresour Technol.* 2018;267:431-437.
7. Zhang P, Sun H, Min L, Ren C. Biochars change the sorption and degradation of thiachloprid in soil: insights into chemical and biological mechanisms. *Environ Pollut.* 2018;236:158-167.
8. Sun L, Wan S, Luo W. Biochars prepared from anaerobic digestion residue, palm bark, and eucalyptus for adsorption of cationic methylene blue dye: characterization, equilibrium, and kinetic studies. *Bioresour Technol.* 2013;140:406-413.
9. Zeng H, Zeng H, Zhang H, Shahab A, Zhang K, Lu Y, et al. Efficient adsorption of Cr (VI) from aqueous environments by phosphoric acid activated eucalyptus biochar. *J Clean Prod.* 2021;286:124964.
10. Mandal A, Singh N, Purakayastha TJ. Characterization of pesticide sorption behaviour of slow pyrolysis biochars as low cost adsorbent for atrazine and imidacloprid removal. *Sci Total Environ.* 2017;577:376-385.
11. Zhuang Z, Wang L, Tang J. Efficient removal of volatile organic compound by ball-milled biochars from different preparing conditions. *J Hazard Mater.* 2021;406:124676.
12. Xiang W, Zhang X, Chen K, Fang J, He F, Hu X, et al. Enhanced adsorption performance and governing mechanisms of ball-milled biochar for the removal of volatile organic compounds (VOCs). *Chem Eng J.* 2020;385:123842.
13. Cuong Nguyen X, Thanh Huyen Nguyen T, Hong Chuong Nguyen T, Van Le Q, Yen

- Binh Vo T, Cuc Phuong Tran T, et al. Sustainable carbonaceous biochar adsorbents derived from agro-wastes and invasive plants for cation dye adsorption from water. *Chemosphere*. 2021;282:131009.
14. Rajabi H, Mosleh MH, Prakoso T, Ghaemi N, Mandal P, Lea-Langton A, et al. Competitive adsorption of multicomponent volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere*. 2021;283:131288.
15. Khan ZH, Gao M, Qiu W, Islam MS, Song Z. Mechanisms for cadmium adsorption by magnetic biochar composites in an aqueous solution. *Chemosphere*. 2020;246:125701.
16. Zhao M, Dai Y, Zhang M, Feng C, Qin B, Zhang W, et al. Mechanisms of Pb and/or Zn adsorption by different biochars: biochar characteristics, stability, and binding energies. *Sci Total Environ*. 2020;717:136894.
17. Baharum NA, Nasir HM, Ishak MY, Isa NM, Hassan MA, Aris AZ. Highly efficient removal of diazinon pesticide from aqueous solutions by using coconut shell-modified biochar. *Arab J Chem*. 2020;13:6106-6121.
18. Yoon JY, Kim JE, Song HJ, Oh KB, Jo JW, Yang YH, et al. Assessment of adsorptive behaviors and properties of grape pomace-derived biochar as adsorbent for removal of cymoxanil pesticide. *Environ Technol Innov*. 2021;21:101242.
19. Park JH, Wang JJ, Meng Y, Wei Z, DeLaune RD, Seo DC. Adsorption/desorption behavior of cationic and anionic dyes by biochars prepared at normal and high pyrolysis temperatures. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2019;572:274-282.
20. Chen Y, Lin YC, Ho SH, Zhou Y, Ren NQ. 2018. Highly efficient adsorption of dyes by biochar derived from pigments-extracted macroalgae pyrolyzed at different temperature. *Bioresour Technol*. 2018;259:104-110.
21. Yao X, Ji L, Guo J, Ge S, Lu W, Chen Y, et al. An abundant porous biochar material derived from wakame (*Undaria pinnatifida*) with high adsorption performance for three organic dyes. *Bioresour Technol*. 2020;318:124082.
22. Liu Y, Lonappan L, Brar SK, Yang S. Impact of biochar amendment in agricultural soils on the sorption, desorption, and degradation of pesticides: a review. *Sci Total Environ*. 2018;645:60-70.
23. Morillo E, Villaverde J. Advanced technologies for the remediation of pesticide-contaminated soils. *Sci Total Environ*. 2017;586:576-597.
24. do Nascimento CT, Vieira MGA, Scheufele FB, Palú F, da Silva EA, Borba CE. Adsorption of atrazine from aqueous systems on chemically activated biochar produced from corn straw. *J Environ Chem Eng*. 2022;10:107039.
25. Wang P, Liu X, Yu B, Wu X, Xu J, Dong F, et al. Characterization of peanut-shell biochar and the mechanisms underlying its sorption for atrazine and nicosulfuron in aqueous solution. *Sci Total Environ*. 2020;702:134767.
26. Seo HL, Yin TY, Kwon OI, Chon K. Effects of oxidative and alkaline post-treatments on removal of trivalent iron and hexavalent chromium using peanut shell biochars. *J Korean Soc Environ Eng*. 2020;42:55-65.
27. Jeon HG, Cheong KH, Lee JW, Lee JS, Moon DH. Adsorption of heavy metals in an aqueous solution using starfish (*Asterina Pectinifera*) biochar. *J Korean Soc Environ*

- Eng. 2020;42:267-279.
28. Shan R, Shi Y, Gu J, Bi J, Yuan H, Luo B, et al. Aqueous Cr(VI) removal by biochar derived from waste mangosteen shells: role of pyrolysis and modification on its absorption process. *J Environ Chem Eng.* 2020;8:103885.
 29. Jin X, Wu Y, Santhamoorthy M, Le TTN, Le YT, Yuan Y, et al. 2022. Volatile organic compounds in water matrices: recent progress, challenges, and perspective. *Chemosphere.* 2022;308:136182.
 30. Zhang X, Miao X, Xiang W, Zhang J, Cao C, Wang H, et al. Ball milling biochar with ammonia hydroxide or hydrogen peroxide enhances its adsorption of phenyl volatile organic compounds (VOCs). *J Hazard Mater.* 2021;403:123540.
 31. Tan XF, Liu YG, Gu YL, Xu Y, Zeng GM, Hu XJ. Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: a review. *Bioresour Technol.* 2016;212:318-333.