

Wood Vinegars: Production Processes, Properties, and Valorization

Ouattara, Hakim & Niamké, Florence & Yao, Jean & Nadine, Amusant & Garnier, Benjamin. (2023). Wood Vinegars: Production Processes, Properties, and Valorization. *Forest Products Journal*. 73. 239-249. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00021>.

Giấm gỗ: Quy trình sản xuất, đặc tính và tiềm năng ứng dụng

Hakim Abdel Aziz Ouattara, Florence Bobélé Niamké, Jean Claude Yao, Nadine Amusant, Benjamin Garnier

- Hakim Abdel Aziz Ouattara – Nghiên cứu sinh Tiến sĩ, Giảng viên và Nhà nghiên cứu, Phòng thí nghiệm Quy trình Tổng hợp Công nghiệp và Năng lượng Mới, Viện Bách khoa Quốc gia Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Yamoussoukro, Bờ Biển Ngà. ✉ haa.ouattara48@gmail.com / hakim.ouattara21@inphb.ci
- Florence Bobélé Niamké – Giảng viên, Viện Bách khoa Quốc gia Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Yamoussoukro, Bờ Biển Ngà. ✉ bobele.niamke@inphb
- Jean Claude Yao – Nhà nghiên cứu, Viện Bách khoa Quốc gia Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Yamoussoukro, Bờ Biển Ngà. ✉ yajc3@yahoo.fr
- Nadine Amusant – Nhà nghiên cứu, Tổ chức CIRAD, Ban Phát triển Bền vững (ED), Đơn vị Nghiên cứu Hỗn hợp EcoFoG, Guiana thuộc Pháp. ✉ Nadine.Amusant@EcoFog.gf
- Benjamin Garnier – Kỹ sư nông nghiệp, Trường Quốc gia Nông nghiệp Toulouse (ENSAT), Pháp. ✉ b.garnier@nitidae.org

Tóm tắt

Khi sinh khối có nguồn gốc từ lignocellulose (như gỗ và phế phẩm nông lâm nghiệp) được nhiệt phân, quá trình này sẽ tạo ra ba sản phẩm chính: than củi, dung dịch giấm gỗ (hay còn gọi là pyroligneous acid), và khí không ngưng tụ. Cả ba đều là những vật liệu có giá trị gia tăng, được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Trong khuôn khổ bài nghiên cứu tổng quan này, chúng tôi tập trung vào ba nội dung chính: quy trình sản xuất giấm gỗ, đặc tính lý hóa của nó, và các ứng dụng tiềm năng trong nông nghiệp và môi trường.

Giấm gỗ là một dạng chất lỏng được thu hồi từ quá trình ngưng tụ các khí và hơi sinh ra khi gỗ được cacbon hóa (biến đổi thành than củi). Thành phần của giấm gỗ rất phức tạp, bao gồm nhiều nhóm hợp chất khác nhau như hydrocarbon mạch thẳng, vòng thơm, naphtenic, cùng các chất chứa oxy như alcohol, aldehyde, ketone, furan, acid hữu cơ, phenol và ether. Nhờ sở hữu khả năng chống oxy hóa và trung hòa gốc tự do, giấm gỗ được sử dụng như một chất diệt khuẩn, diệt nấm, xua đuổi côn trùng và hỗ trợ nảy mầm – phát triển cây trồng. Ngoài nông nghiệp, nó còn có mặt trong bảo quản thực phẩm, y học và các giải pháp bảo quản gỗ thân thiện với môi trường. Bài viết này cũng điểm lại các kỹ thuật sản xuất hiện có và phân tích những yếu tố có thể ảnh hưởng đến chất lượng giấm gỗ trong thực tế.

1. Giới thiệu

Mỗi phút trôi qua, có khoảng 2.400 cây xanh bị chặt hạ trên toàn thế giới để phục vụ cho các mục đích công nghiệp hóa, năng lượng và nhiều nhu cầu khác (Authentic Material 2018). Theo Cơ quan

Năng lượng Quốc tế (2014) và Madon (2017), năng lượng từ gỗ chiếm trung bình khoảng 70% tổng nhu cầu năng lượng tại châu Phi. Tại Bờ Biển Ngà, diện tích rừng tự nhiên đã giảm mạnh từ 16 triệu ha vào năm 1960 xuống còn chưa đầy 2 triệu ha vào đầu thế kỷ 21, tương đương tốc độ mất rừng khoảng 300.000 ha mỗi năm (Lanly 1969; FAO 2003). Phần lớn hoạt động khai thác gỗ diễn ra ở các vùng nông thôn – nơi cung cấp tới 90% lượng gỗ được sử dụng trong công nghiệp (Zobi et al. 2009).

Cùng với sự gia tăng dân số tại Bờ Biển Ngà (từ 16,4 triệu người năm 2000 lên 29,3 triệu người năm 2022; Kamgate 2022), nhu cầu sử dụng gỗ trong sinh hoạt cũng ngày càng tăng cao, đặc biệt là dưới dạng củi đốt và than. Để đáp ứng nhu cầu đó, một số tổ chức như Hiệp hội Phát triển Rừng (Society of Forest Development), REDD+ (Sáng kiến giảm phát thải do mất rừng và suy thoái rừng), tổ chức Nitidae, Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc (FAO), và Trung tâm Hợp tác Quốc tế về Nghiên cứu Nông nghiệp Phát triển (CIRAD) đã bày tỏ sự quan tâm đến việc tận dụng phụ phẩm từ gỗ. Mục tiêu chính là cải tiến quy trình cacbon hóa nhằm tăng hiệu suất thu hồi than (sản phẩm rắn). Tuy nhiên, trong cùng quy trình này còn tạo ra hai sản phẩm khác – chất lỏng và khí – vốn từ trước đến nay chưa được khai thác hiệu quả.

Dù than củi là một loại nhiên liệu lý tưởng và có khả năng hấp thụ CO₂ rất tốt (Creamer et al. 2014), thì sản phẩm chất lỏng – còn gọi là dầu sinh học (bio-oil) – cũng có tiềm năng lớn. Dầu sinh học là hỗn hợp gồm nước và các hợp chất hữu cơ có oxy, thu được từ quá trình ngưng tụ khói và hơi sinh ra khi nhiệt phân. Sau khi được tinh chế, nó có thể được sử dụng trong mỹ phẩm, y học, nông nghiệp và nhiều lĩnh vực khác (Kan et al. 2016). Cuối cùng, phần khí không ngưng tụ có thể tận dụng để sấy gỗ hoặc phát điện nhờ các lò phản ứng nhiệt (Creamer et al. 2014).

Trong khuôn khổ bài viết này, chúng tôi tập trung phân tích riêng phần chất lỏng – cụ thể là giấm gỗ.

Dầu sinh học, ở trạng thái ban đầu là dịch khói ngưng tụ thô từ quá trình nhiệt phân, có thể chuyển hóa thành giấm gỗ sau khi được lưu trữ trong điều kiện kín tối thiểu 3 tháng và gạn bỏ phần hắc ín lắng xuống đáy (Theapparath et al. 2018). Giấm gỗ là chất lỏng sẫm màu, chủ yếu là nước (chiếm khoảng 80–90%), chứa hơn 200 hợp chất hòa tan tự nhiên, trong đó quan trọng nhất là acid acetic, methanol, phenol và formaldehyde (Laemsak 2010). Bảng 1 trình bày danh mục thành phần chi tiết, được phân tích bằng phương pháp sắc ký khí – khối phổ (GC–MS) trong mẫu giấm gỗ từ gỗ dương (Zhu et al. 2021). Giấm gỗ là sản phẩm chịu ảnh hưởng mạnh bởi loại nguyên liệu đầu vào cũng như phương pháp cacbon hóa được sử dụng – điều này được minh chứng trong nghiên cứu của Sutrisno và cộng sự (2014), khi nhóm tác giả sử dụng các kích thước mùn cưa khác nhau từ cây *Macaranga* sp. và ghi nhận sự khác biệt rõ rệt về hiệu suất, thành phần hóa học (pH, hàm lượng phenol, tổng acid), cũng như màu sắc của giấm gỗ tạo thành.

Trong hơn hai thập kỷ qua, giấm gỗ đã trở thành đối tượng nghiên cứu tại nhiều quốc gia Đông Á như Thái Lan, Trung Quốc, Nhật Bản, Hàn Quốc và Campuchia, với ứng dụng đa dạng trong y học, dược phẩm, thực phẩm và nông nghiệp (Amen-Chen et al. 2001; Loo et al. 2007; Tiilikkala et al. 2010). Tuy nhiên, tại nhiều quốc gia khác – bao gồm cả các nước châu Phi – giấm gỗ vẫn là một sản phẩm ít được biết đến và khai thác.

Giấm gỗ là sản phẩm tự nhiên được sử dụng để cải tạo đất, kích thích sự phát triển của rau màu, khử mùi nông sản, xua đuổi côn trùng, cải thiện chất lượng và tăng độ ngọt của trái cây, thúc đẩy quá trình ủ phân hữu cơ, đồng thời giúp cây trồng tăng khả năng chống chịu với các điều kiện bất

lợi (Uddin et al. 1995; Shibayama et al. 1998; Yatagai et al. 2002; Mu et al. 2006; Baimark và Niamsa 2009; Masum et al. 2013; Mungkunkamchao et al. 2013; Mmojieje và Hornung 2015).

Bài tổng quan này sẽ tập trung trình bày các phương pháp sản xuất giấm gỗ, đặc tính lý hóa của chúng, các yếu tố ảnh hưởng đến thành phần và chất lượng, cùng với những lĩnh vực ứng dụng đã được nghiên cứu cho đến nay.

Bảng 1 – Các thành phần chính của giấm gỗ từ gỗ dương.

Thời gian lưu (phút)	Hợp chất	Hàm lượng tương đối (%)	Công thức hóa học	Khối lượng phân tử (g/mol)
	Organic acids	26.97		
1.93	Formic acid	0.39	CH ₂ O ₂	46
3.16	Acetic acid	22.99	C ₂ H ₄ O ₂	60
4.76	Propanoic acid	0.38	C ₃ H ₆ O ₂	74
5.59	2-Hydroxy-2-met-propanoic acid	0.11	C ₅ H ₁₀ O ₃	118
9.93	Butyric acid	2.55	C ₄ H ₈ O ₂	88
7.21	2-Oxo-n-valeric acid	0.55	C ₅ H ₈ O ₃	116
	Ketones	10.53		
2.24	2-Butanone	0.37	C ₄ H ₈ O	72
3.58	Acetoin	0.30	C ₄ H ₈ O ₂	88
4.8	1-Hydroxy-2-butanone	0.28	C ₄ H ₈ O ₂	88
5.31	Cyclopentanone	0.62	C ₅ H ₈ O	84
6.15	1-Hydroxy-3-methyl-2-butanone	0.21	C ₅ H ₁₀ O ₂	102
6.5	2-Cyclopentene	1.61	C ₅ H ₆ O	82
8.81	2-Methyl-2-cyclopenten-1-one	1.44	C ₆ H ₈ O	96
12.47	2,5-Dihydro-3,5-dimeth-2-furanone	0.66	C ₆ H ₈ O ₂	112
13.8	2,3-Dimeth-2-cyclopenten-1-one	1.25	C ₇ H ₁₀ O	110
13.96	3-Methyl-1,2-cyclopentanedione	1.14	C ₆ H ₈ O ₂	112
15.85	3-Ethyl-2-methyl-2-cyclopenten-1-one	0.22	C ₇ H ₁₀ O ₂	126
20.48	2-Hydroxy-3-propyl-2-cyclopenten-1-one	0.38	C ₈ H ₁₂ O ₂	140
29.38	1-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-ethanone	0.48	C ₉ H ₁₀ O ₃	166
30.66	1-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-2-propanone	1.29	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	180
36.34	1-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-ethanone	0.28	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	196
	Esters	3.85		
2.37	Ethylacetate	0.67	C ₄ H ₈ O ₂	88
9.24	Gamma-butyrolactone	2.34	C ₄ H ₆ O ₂	86
11.32	Methy-l2-furoate	0.09	C ₆ H ₆ O ₃	126
14.73	2,6-Dimethyl-1-cyclohexen-1-ylacetate	0.75	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	168
	Furan derivatives	1.48		
5.51	Tetrahydro-2-furanol	0.41	C ₄ H ₈ O ₂	88
4.33	2-Methoxytetrahydrofuran	0.19	C ₅ H ₁₀ O ₂	102
8.98	1-(2-Furanyl)-ethanone	0.88	C ₆ H ₆ O ₂	110
	Alkane compounds	3.36		
5.79	Methoxymethyl-oxirane	0.07	C ₄ H ₈ O ₂	88
9.17	3-Bromo-pentane	0.59	C ₅ H ₁₁ Br	150
15.63	Bicyclo-[2.2.2]-octane	2.7	C ₈ H ₁₄	110
	Aldehydes	1.72		
10.85	5-Methyl-2-furancarboxaldehyde	0.19	C ₆ H ₆ O ₂	110
26.77	Vanillin	1.53	C ₈ H ₈ O ₃	152
	Phenols and derivatives	43.19		
11.95	Phenol	5.91	C ₆ H ₆ O	94
14.64	O-cresol	2.41	C ₇ H ₈ O	108
15.48	3-Methylphenol	3.74	C ₇ H ₈ O	108
15.73	Guaiacol	2.75	C ₇ H ₈ O ₂	124
18.03	2,4-Dimethylphenol	0.89	C ₈ H ₁₀ O	122

Thời gian lưu (phút)	Hợp chất	Hàm lượng tương đối (%)	Công thức hóa học	Khối lượng phân tử (g/mol)
18.11	2,5-Dimethylphenol	0.39	C ₈ H ₁₀ O	122
18.65	4-Ethyl-phenol	0.47	C ₈ H ₁₀ O	122
18.82	3,5-Dimethylphenol	0.37	C ₈ H ₁₀ O	122
19.03	2,3-Dimethylphenol	0.22	C ₈ H ₁₀ O	122
19.5	2-Methoxy-4-methylphenol	2.04	C ₈ H ₁₀ O ₂	138
19.6	3,4-Dimethylphenol	0.27	C ₈ H ₁₀ O	122
20.01	Catechol	8.95	C ₆ H ₆ O ₂	110
22.07	4-Methyl-1,2-benzenediol	4.81	C ₇ H ₈ O ₂	124
22.51	4-Ethyl-2-methoxyphenol	1.32	C ₉ H ₁₂ O ₂	152
25.14	2,6-Dimethoxy-phenol	3.56	C ₈ H ₁₀ O ₃	154
25.23	2,5-Dimethyl-1,4-benzenediol	0.90	C ₈ H ₁₀ O ₂	138
25.37	3,4-Dimethoxy-phenol	0.29	C ₈ H ₁₀ O ₃	154
26.29	4-Ethylcatechol	1.80	C ₈ H ₁₀ O ₂	138
28.13	1,2,4-Trimethoxybenzene	1.65	C ₉ H ₁₂ O ₃	168
30.44	1,2,3-Trimethoxy-5-methyl-benzene	0.45	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	182
	Nitrogen compounds	1.46		
21.93	Pyridine	1.46	C ₅ H ₅ N	79

2. Thành phần hóa học của giấm gỗ

Phần lỏng thu được từ quá trình nhiệt phân là một hỗn hợp phức tạp gồm nước và pha hữu cơ, chứa nhiều hợp chất hóa học như acid, alcohol, aldehyde, ketone, ether, ester, phenol, đường, alkene, dẫn xuất furan và các hợp chất chứa oxy khác (Kan et al. 2016). Thành phần hóa học của sản phẩm nhiệt phân thay đổi đáng kể tùy theo thành phần nguyên liệu đầu vào. Hàm lượng nước trong giấm gỗ cũng phụ thuộc vào độ ẩm ban đầu của sinh khối và lượng nước được hình thành trong quá trình nhiệt phân, dao động từ khoảng 15% khối lượng đến mức cao nhất khoảng 30–50% (Mohan et al. 2006).

Giấm gỗ có màu từ vàng nhạt đến nâu sẫm, chủ yếu là nước (chiếm 80–90%) và chứa hơn 200 hợp chất hòa tan trong nước có nguồn gốc tự nhiên – trong đó quan trọng nhất là acid acetic, methanol, phenol và formaldehyde (Laemsak 2010). Với nguyên liệu có độ ẩm cao, hàm lượng nước trong giấm gỗ có thể vượt quá 90%.

Thành phần hóa học chi tiết của giấm gỗ từ gỗ dương được trình bày trong Bảng 1 cho thấy còn nhiều hợp chất khác, được phân loại thành các nhóm chính như: acid hữu cơ, ketone, ester, dẫn xuất furan, hợp chất alkane, aldehyde, phenol và các dẫn xuất, cùng với một số hợp chất chứa nitơ.

Giấm gỗ có thể được xem là một dạng vi nhũ tương (microemulsion) – tức là một hỗn hợp một pha ổn định. Trong đó, dung dịch nước (đặc biệt từ quá trình phân hủy holocellulose) đóng vai trò là pha liên tục, giúp ổn định pha không liên tục của các đại phân tử lignin nhiệt phân thông qua các cơ chế như liên kết hydro (Mohan et al. 2006; Bridgwater 2012).

Trong các tài liệu khoa học, phần lỏng này còn được gọi bằng nhiều tên khác nhau như dầu nhiệt phân (pyrolysis oil), dầu sinh học (bio-oil), khói lỏng (liquid smoke), chưng cất gỗ (wood distillates), hắc ín pyroligneous (pyroligneous tar) hay axit pyroligneous (pyroligneous acid) (Bridgwater 2003).

Thành phần và tính chất của giấm gỗ cũng có thể bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố như: thời gian lưu (residence time), tốc độ gia nhiệt, nhiệt độ, kích thước hạt nguyên liệu và nguồn gốc sinh khối (Mohan et al. 2006; Mathew và Zakaria 2015).

3. Công nghệ sản xuất giấm gỗ

Giấm gỗ được hình thành khi khói sinh ra từ quá trình đốt than được làm nguội bởi không khí bên ngoài trong lúc đi qua ống khói hoặc ống dẫn khói. Sự giảm nhiệt của các khí và hơi này khiến chúng ngưng tụ lại, tạo thành dung dịch pyroligneous (Chalermson và Peerapan 2009). Theo khuyến nghị của Laemsak (2010), dung dịch này có thể được tinh lọc bằng một phương pháp đơn giản: để lắng trong chai kín từ 2 đến 4 tháng, sau đó sẽ thu được giấm gỗ (Burnette 2013).

Hiện có nhiều phương pháp để thu được dung dịch pyroligneous, phổ biến nhất là:

- Sử dụng lò thùng 200 lít
- Hệ thống lò Casamance
- Phương pháp thủy nhiệt (hydrothermal)

3.1. Sản xuất giấm gỗ bằng lò thùng 200 lít

Lò thùng thông thường là một thùng phuy 200 lít dùng làm buồng nhiệt phân (pyrolyzer), được nối với một ống tre có chức năng làm ngưng tụ khói. Trên ống tre này có khoan một số lỗ nhỏ để thu hồi giấm gỗ dạng khói lỏng, và ở phần cuối đường ống, các khí không ngưng tụ như CO, CO₂, CH₄... được xả ra ngoài. Quy trình này được mô tả chi tiết trong nghiên cứu của Burnette (2013).



Hình 1. Sản xuất giấm gỗ bằng lò thùng 200 lít

Hình 1 minh họa quy trình sản xuất axit pyroligneous bằng lò thùng 200 lít. Các bước thực hiện bao gồm:

1. Đưa nguyên liệu gỗ vào trong lò và tiến hành đốt.
2. Sau khi bắt lửa, ngưng tiếp nhiên liệu và quan sát sự thay đổi màu khói – từ trắng đục chuyển dần sang vàng và có mùi hăng.
3. Gắn một ống tre rỗng (đầu xa nâng cao khoảng 45°C) vào ống dẫn khói.
4. Tại vị trí cách điểm nối khoảng 30 cm, khoan 1–2 lỗ nhỏ đường kính khoảng 2 cm để gắn bình hứng giấm gỗ ngưng tụ.

Phần dịch khối ngưng tụ thu được sau đó được để lắng trong chai kín tối thiểu 3 tháng. Sau thời gian này, dịch phân thành ba lớp rõ rệt:

- Lớp dưới cùng: màu đen, chứa hắc ín gỗ (wood tar).
- Lớp giữa: là phần giấm gỗ có thể sử dụng, có màu vàng nhạt đến nâu đỏ.
- Lớp trên cùng: là dầu nhẹ (light oil), thường có một lớp hắc ín mỏng nổi lên bề mặt.

Quy trình này đã được nhiều tác giả áp dụng với các loại sinh khối khác nhau. Ví dụ, Ratnapisit và cộng sự (2009) sử dụng gỗ cao su; Nurhayati et al. (2005) sử dụng gỗ keo tai tượng (*Acacia mangium*). Công nghệ này cũng được Phineath phát triển vào năm 2018 (Keerati 2019). Tương tự, Jain và Chavan (2013) đã sử dụng lò thùng để sản xuất than và giấm gỗ từ các đoạn tre dài 15 cm được chẻ dọc. Với tổng cộng 16 khúc tre (trọng lượng 90 kg), họ thu được 22,3 kg than và 2,24 lít giấm gỗ – tức tỷ lệ thu hồi giấm chỉ khoảng 2,5% theo khối lượng. Điều này cho thấy hiệu suất sản xuất giấm gỗ của phương pháp này tương đối thấp (Jain và Chavan 2013).

3.2. Sản xuất giấm gỗ bằng lò Casamance

Lò Casamance là một phiên bản cải tiến từ loại lò than truyền thống. Mẫu lò này lần đầu tiên được lắp ráp tại Casamance – một thị trấn ở Senegal – vào giai đoạn 1979–1980, trong khuôn khổ dự án 78/002 do Chương trình Phát triển Liên Hợp Quốc (UNDP), FAO và Văn phòng Liên Hợp Quốc vùng Sudan-Sahel tại Senegal phối hợp thực hiện. Cái tên "Casamance" cũng bắt nguồn từ đây.



Hình 2. Sản xuất giấm gỗ bằng lò Casamance

Lò Casamance được trang bị thêm một ống khói giúp tạo ra dòng đối lưu ngược. Nhờ thiết kế này, các luồng khí nóng sinh ra trong quá trình đốt sẽ lưu thông bên trong khối gỗ, giúp làm nóng sơ bộ và tách ẩm nguyên liệu trước khi các khí này quay ngược trở xuống đáy lò và thoát ra ngoài qua ống khói. Ở giai đoạn này, các sản phẩm phụ từ quá trình cacbon hóa sẽ tái kết hợp với than tạo thành sản phẩm than cố định có hàm lượng carbon cao (khoảng 80–90%).

Trong bối cảnh dân số các nước Tây Phi ngày càng tăng, nhiều quốc gia đã quan tâm đến việc phát triển công nghệ lò Casamance tại địa phương nhằm tối ưu hiệu quả sản xuất than. Một số ví dụ tiêu biểu là: Bénin (Akouehou et al. 2012; Issifou et al. 2020), Rwanda (Nyampeta 2004), và Bờ Biển Ngà (REDD+ và Nitidae 2019). Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu tại các quốc gia này chưa công bố dữ liệu cụ thể về lượng dung dịch pyroligneous thu được khi sử dụng lò Casamance, ngoại trừ tại Bờ Biển Ngà – nơi đã tổ chức các khóa đào tạo cho thợ làm than tại vùng Mé (thị trấn Adzopé) về cách sử dụng lò cải tiến có ống khói.

Nhiều ưu điểm của lò Casamance đã được ghi nhận, trong đó nổi bật là khả năng duy trì nhiệt độ cao và ổn định bên trong lò, cũng như hiệu suất thu hồi giấm gỗ cao hơn nhờ thiết kế có ống khói. Hình 2 mô tả mẫu lò Casamance được chế tạo tại Togo. Quy trình sản xuất giấm gỗ bằng loại lò này được mô tả như sau (REDD+ và Nitidae 2019):

1. Lắp đặt hệ thống lò bằng cách xếp các thanh chịu lực (stringer) dọc theo chiều dài lò, đặt gỗ lên nền đất, sau đó gắn ống khói và phủ lò bằng đất.
2. Tiến hành bước đốt mồi (gia nhiệt ban đầu) bằng cách dùng củi nhỏ, cành cây hoặc than hồng đặt ở giữa lò, sau đó bịt kín hố đốt mồi.
3. Nhiệt độ bên trong lò có thể đạt đến 600°C; dung dịch pyroligneous được thu tại đáy ống khói ở nhiệt độ dao động từ 80°C đến 150°C.
4. Sau khi hoàn tất quá trình nhiệt phân, để nguyên liệu nguội dần rồi tiến hành lấy than ra khỏi lò.

3.3. Sản xuất giấm gỗ bằng phương pháp cacbon hóa thủy nhiệt

Trong quá trình xử lý sinh khối bằng công nghệ thủy nhiệt, hai sản phẩm chính được tạo ra là hydrochar (than sinh học dạng ướt) và giấm gỗ. Các nghiên cứu của Sztancs và cộng sự (2020, 2021) cho thấy hydrochar, khi được đồng đốt với than đá, có thể giúp giảm phát thải khí nhà kính CO₂ và góp phần thúc đẩy sản xuất điện năng có lượng carbon thấp.

Cacbon hóa thủy nhiệt được thực hiện ở nhiệt độ cao (từ 120°C đến 350°C) và áp suất lớn (từ 2 MPa đến 16 MPa) trong môi trường có nước (González et al. 2005). Trong quy trình này, nhiệt độ xử lý đóng vai trò then chốt. Nghiên cứu của Wang và cộng sự (2020) đã chỉ ra mối liên hệ giữa nhiệt độ và hiệu suất thu hồi giấm gỗ. Cụ thể, hiệu suất thu giảm từ 70,6% xuống 68,8% khi tăng nhiệt độ từ 200°C lên 230°C, nhưng lại tăng lên 72,4% ở 260°C – cho thấy 260°C là mức nhiệt tối ưu để thu được lượng giấm gỗ cao nhất bằng phương pháp thủy nhiệt.

Quy trình sản xuất hydrochar và giấm gỗ bằng phương pháp thủy nhiệt đã được Hernandez-Soto và cộng sự (2019) chứng minh là có thể tạo ra vật liệu hữu cơ giàu carbon, phù hợp để cải tạo đất hoặc dùng làm thành phần của giá thể.

Các bước tiến hành như sau:

1. Tính toán tỷ lệ phối trộn giữa sinh khối và nước sao cho hàm lượng nước chiếm từ 70% đến 85% khối lượng hỗn hợp.
2. Cân và cho nguyên liệu vào bình phản ứng áp suất (autoclave) theo đúng tỷ lệ đã tính.
3. Nén khí nitơ vào bình phản ứng ở áp suất 2 MPa.
4. Bắt đầu khuấy và gia nhiệt lên 215°C trong 30 phút và duy trì nhiệt độ này. Quá trình cacbon hóa có thể kéo dài từ 4 giờ đến qua đêm, sau đó được để nguội về nhiệt độ phòng.
5. Thu hồi hydrochar thô: Sau khi đảm bảo xả áp an toàn, mở nắp bình để lấy phần hydrochar ra, rồi tách khỏi pha lỏng bằng cách lọc chân không qua phễu Büchner. Hydrochar được làm khô trong tủ sấy ở 105°C trong 2 giờ.
6. Xử lý pha lỏng: Phần dịch lỏng còn lại được để lắng trong nhiều tháng để thu hồi giấm gỗ.

4. Tính chất vật lý và hóa học của giấm gỗ

4.1. Chất lượng của giấm gỗ

Chất lượng của giấm gỗ phụ thuộc vào nhiều thông số, bao gồm: độ pH, màu sắc, mùi, hàm lượng hắc ín hòa tan, lượng tro sau khi đốt, độ trong và tỷ trọng riêng (Wada, 1997). Giấm gỗ thường có pH dao động từ 2 đến 4, chủ yếu do sự hiện diện của acid acetic, acid formic và acid propionic. Hàm lượng hắc ín hòa tan trong giấm gỗ nằm trong khoảng 0,23% đến 0,89% theo khối lượng. Tỷ trọng riêng và độ Brix lần lượt dao động từ 1,005 đến 1,016 g/mL và từ 1,7 đến 6,6 (Mun et al. 2007). Giấm gỗ có mùi khói đặc trưng. Ngoài ra, các yếu tố như độ nhớt và khối lượng riêng cũng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định đặc tính lý hóa của giấm.

Để tiêu chuẩn hóa chất lượng sản phẩm, Hiệp hội Giấm Pyroligneous Nhật Bản – tổ chức công nghiệp chuyên về thương mại giấm pyroligneous – đã ban hành bộ tiêu chuẩn gồm 7 chỉ số (Wada, 1997):

1. Độ pH khoảng 3.
2. Tỷ trọng riêng tiêu chuẩn nằm trong khoảng 1,010–1,050 g/mL.
3. Màu sắc từ vàng nhạt, nâu nhạt đến nâu đỏ.
4. Có mùi khói đặc trưng, rõ rệt.
5. Hàm lượng hắc ín hòa tan nhỏ hơn 3%.
6. Lượng tro sau khi đốt nhỏ hơn 0,2%.
7. Dung dịch phải trong, không có cặn lơ lửng.

Một nghiên cứu của Theapparatt và cộng sự (2014) đã khảo sát các tính chất vật lý và hóa học của tám mẫu giấm gỗ được sản xuất từ năm loại cây khác nhau trồng tại Thái Lan: keo dậu (*Leucaena leucocephala*), neem Ấn (*Azadirachta indica*), bạch đàn đỏ (*Eucalyptus camaldulensis*), cây cao su (*Hevea brasiliensis*) và tre gai (*Dendrocalamus asper*). Các mẫu gỗ được nung đến nhiệt độ 400°C. Bảng 2 trong nghiên cứu này trình bày các thông số dùng để đánh giá chất lượng giấm gỗ. Chỉ có hai loại giấm gỗ – từ gỗ cao su và tre – đáp ứng đầy đủ tất cả các tiêu chuẩn của Hiệp hội Giấm Pyroligneous Nhật Bản.

Độ pKa khoảng 4,7 được xem là chỉ dấu cho sự hiện diện chiếm ưu thế của acid acetic trong dịch chiết, yếu tố chính ảnh hưởng đến pH của giấm. Tỷ trọng riêng cho thấy mối tương quan chặt chẽ với cả hàm lượng hắc ín hòa tan và độ Brix (hệ số tương quan $R = 0,87$ cho cả hai). Đồng thời, độ Brix cũng có tương quan cao với hàm lượng hắc ín hòa tan ($R = 0,87$; Theapparatt et al. 2014). Do đó, độ Brix – một chỉ số dễ xác định – có thể được sử dụng như thước đo tổng quát cho lượng hắc ín hòa tan trong giấm gỗ.

Hàm lượng hắc ín này cũng phản ánh mức độ hiện diện của các hợp chất phenolic. Sự hiện diện của nhóm chất này còn được xác nhận bằng đỉnh hấp thụ cực đại trong phổ UV (λ_{max} nằm trong khoảng 268–274 nm; Theapparatt et al. 2014).

Bảng 2. Tính chất vật lý và hóa học của 8 loại giấm gỗ

Mẫu	pH	Tỷ trọng riêng (g/mL)	Tổng hàm lượng acid (% theo khối lượng)	pKa	Hàm lượng hòa tan (% theo khối lượng)	Độ Brix	k _{max} (nm)	A _{max}	Hàm lượng nước (% theo khối lượng)
<i>Leucaena leucocephala</i> 1	3.40	1.006 ± 0.000	4.47 ± 0.01	4.70	0.37 ± 0.02	3.80 ± 0.10	274.50	154.00 ± 5.00	91.13 ± 0.27
<i>L. leucocephala</i> 2	3.10	1.007 ± 0.000	4.61 ± 0.02	4.70	0.57 ± 0.01	4.60 ± 0.10	270.80	375.50 ± 6.20	84.54 ± 0.02
<i>Azadirachta indica</i> 1	3.40	1.004 ± 0.000	3.28 ± 0.03	4.70	0.37 ± 0.02	3.00 ± 0.10	273.40	150.50 ± 5.00	91.50 ± 0.06
<i>A. indica</i> 2	3.20	1.005 ± 0.000	3.16 ± 0.04	4.70	0.58 ± 0.03	3.40 ± 0.10	271.00	298.00 ± 6.50	93.48 ± 0.15
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> 1	3.10	1.006 ± 0.000	4.62 ± 0.04	4.70	0.57 ± 0.02	4.60 ± 0.10	272.60	221.00 ± 5.00	89.44 ± 0.25
<i>E. camaldulensis</i> 2	3.50	1.008 ± 0.000	3.62 ± 0.03	4.70	0.49 ± 0.02	3.40 ± 0.10	270.80	393.00 ± 8.00	90.37 ± 0.20
<i>Hevea brasiliensis</i>	2.90	1.012 ± 0.000	4.92 ± 0.02	4.70	0.96 ± 0.03	6.00 ± 0.20	268.00	467.00 ± 7.00	85.30 ± 0.50
<i>Dendrocalamus asper</i>	2.90	1.010 ± 0.000	4.92 ± 0.02	4.70	0.71 ± 0.01	5.60 ± 0.20	269.20	470.00 ± 6.00	81.44 ± 0.26

4.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng giấm gỗ

Giấm gỗ là một sản phẩm có thành phần gồm nhiều phân tử mang các nhóm chức hóa học khác nhau. Do đó, chất lượng của giấm gỗ chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố, bao gồm nguyên liệu đầu vào, phương pháp nhiệt phân (loại pyrolysis) và quy trình gạn tách.

4.2.1. Nguyên liệu đầu vào

Nhiều loại sinh khối có thể được sử dụng để sản xuất giấm gỗ, nhưng phổ biến nhất vẫn là các vật liệu lignocellulose – vốn chứa ba loại polymer chính: cellulose, hemicellulose và lignin, cùng với một số khoáng chất vô cơ và các chất chiết hữu cơ như alkaloid, nhựa cây, đường, tinh bột, lipid, protein và tinh dầu (Balat et al. 2009). Trong đó, các thành phần cấu trúc có khối lượng phân tử lớn chủ yếu gồm cellulose và hemicellulose (chiếm khoảng 65–75%) và lignin (18–35%). Ngoài ra còn có các hợp chất vô cơ và các chất chiết hữu cơ có khối lượng phân tử thấp. Tỷ lệ các thành phần này khác nhau tùy theo loài thực vật, giải thích sự khác biệt trong thành phần hóa học của giấm gỗ.

Thông thường, sinh khối nông nghiệp chứa khoảng 40–50% cellulose, 20–30% hemicellulose và 10–25% lignin (Iqbal et al. 2011). Trong các tài liệu, rất nhiều loại sinh khối đã được sử dụng để sản xuất axit pyrolygneous. Bao gồm:

- Sinh khối gỗ: gỗ bạch đàn (*Eucalyptus globulus* – Mungkunkamchao et al. 2013), gỗ bulô (*Betula sp.* – Murwanashyaka et al. 2001), sồi (*Quercus accutissima* – Lee et al. 2011), dẻ gai (*Fagus sp.* – Beaumont 1985), trắc lá lông (*Vitex pubescens* – Oramahi & Yoshimura 2013), gỗ cao su (*Hevea brasiliensis* – Ratanapisit et al. 2009), tuyết tùng Nhật (*Cryptomeria japonica* – Young-Hee et al. 2005), cành óc chó (*Juglans sp.* – Wei et al. 2010), anh đào Đông Á (*Prunus jamaskura*), dẻ Nhật (*Castanea crenata* – Kimura et al. 2002), và một số loài thuốc (*Rhizophora sp.* – Loo et al. 2007; Zulkarami et al. 2011).
- Sinh khối nông nghiệp: thân bông (*Gossypium hirsutum* – Pütün et al. 2005), vỏ hickory (*Carya sp.*), rơm rạ (*Oryza sativa* – Lee et al. 2005), vỏ hạnh nhân (*Prunus dulcis* – Sztancs et al. 2021), vỏ phỉ (*Corylus avellana*), vỏ lúa mì (*Triticum aestivum* – Demirbas 2004), phế phụ phẩm từ mía (*Saccharum officinarum*) và dứa (*Ananas comosus* – Mathew & Zakaria 2015), bã mía (*García-Pérez et al. 2002*), vỏ quả óc chó (*Wei et al. 2010*) và phụ phẩm chè (*Camellia sinensis* – Demirbas 2007).

4.2.2. Loại nhiệt phân

Các phương pháp nhiệt phân được phân loại dựa trên tốc độ gia nhiệt (tính bằng °C/giây) và thời gian lưu khí. Về cơ bản, nhiệt phân truyền thống có thể là chậm hoặc nhanh, được sử dụng để tạo than sinh học, sản phẩm lỏng và khí. Trong đó, nhiệt phân nhanh được ưu tiên khi cần tối ưu hóa hiệu suất thu hồi chất lỏng và khí. Các yếu tố ảnh hưởng đến sản phẩm nhiệt phân bao gồm nguyên liệu, tốc độ gia nhiệt, nhiệt độ và công nghệ sản xuất (Mathew & Zakaria 2015). Ở nhiệt độ cao, các phân tử lớn trong sản phẩm lỏng và chất rắn còn lại sẽ bị phân hủy thành các phân tử nhỏ hơn, giàu khí (Demirbas 2007).

Hai dạng nhiệt phân chính gồm:

- **Nhiệt phân chậm (slow pyrolysis)**

Phương pháp truyền thống này thường sử dụng các loại lò như lò hố, lò ụ, lò đất, sau này được thay thế bằng các loại lò cố định (Theapparatus et al. 2018). Trong quá trình này, nhiệt độ nhiệt phân sinh khối vào khoảng 300°C. Hơi sinh ra không thoát ra nhanh như trong nhiệt phân nhanh, với thời gian lưu dao động từ 5 đến 30 phút (Bridgwater 2008). Nguyên liệu được xếp quanh một kênh trung tâm trong lò, được gia nhiệt từ từ để tách ẩm, sau đó nâng nhiệt để nhiệt phân. Miệng lò được bịt kín một phần để tránh cháy hoàn toàn. Khí sinh ra được dẫn qua hệ thống ống ngưng tụ để làm mát, sau đó để lắng tự nhiên trong ít nhất 3 tháng. Dung dịch sau lắng chia thành ba lớp: lớp trên là dầu nhẹ, lớp giữa là axit pyroligneous thô có màu nâu, và lớp dưới cùng là hắc ín gỗ. Phương pháp này thường cho tỷ lệ thu hồi gần như cân bằng: 35% than, 30% chất lỏng, và 35% khí (Bridgwater 2008).

- **Nhiệt phân nhanh (fast pyrolysis)**

Đây là quá trình nhiệt phân hiệu quả cao, diễn ra ở nhiệt độ lớn, trong đó sinh khối được gia nhiệt nhanh và chuyển hóa thành nhiên liệu sinh học. Sinh khối được đưa vào buồng phản ứng ở nhiệt độ khoảng 500°C với thời gian lưu khí rất ngắn (< 5 giây). Cuối quy trình, các hơi và khí được làm lạnh nhanh để tạo ra dầu sinh học (Tiilikka et al. 2010). Do yêu cầu về tốc độ truyền nhiệt cao, nguyên liệu cần được nghiền mịn trước khi xử lý (Bridgwater 2003). Phương pháp này tạo ra: 60–75% bio-oil, 15–25% than sinh học, và 10–20% khí theo khối lượng (Mohan et al. 2006).

Trước đây, axit pyroligneous được sản xuất từ các lò đốt than truyền thống, nhưng ngày nay đã được sản xuất trong các lò phản ứng chuyên dụng. Các hợp chất khí sinh ra được ngưng tụ bằng hệ thống làm lạnh để tạo thành giấm gỗ.

4.2.3. Các phương pháp gạn tách giấm gỗ

Để giấm gỗ – vốn là hỗn hợp giàu các hoạt chất tự nhiên – có thể trở thành nguồn hóa chất sinh học ổn định và có hoạt tính rõ ràng trong tương lai, cần phát triển các phương pháp phân tách hiệu quả nhằm thu được các thành phần bán tinh khiết có hoạt tính sinh học. Việc phân tách giấm gỗ thành các phần bán tinh khiết giúp kiểm soát tốt hơn tính chất sản phẩm. Điều này có thể được thực hiện thông qua nhiều kỹ thuật khác nhau như lắng tự nhiên, lọc, sắc ký, chưng cất hoặc chiết lỏng-lỏng.

- **Phương pháp lắng tự nhiên (Natural settling method)**

Đây là phương pháp phổ biến và đơn giản nhất để thu giấm gỗ từ dầu sinh học thô hoặc dịch pyroligneous. Cách làm rất đơn giản: để dầu sinh học thô trong bình kín trong thời gian dài. Qua

thời gian, các thành phần không ổn định trong giấm gỗ sẽ bị oxy hóa hoặc trùng hợp, kết tủa, lơ lửng hoặc bám vào thành bình chứa. Một lớp màng dầu mỏng sẽ hình thành trên bề mặt chất lỏng, và bên dưới là phần dịch giấm gỗ. Tất cả các chất lơ lửng sẽ được loại bỏ để thu được giấm gỗ trong. Khi quy trình lắng và lọc được lặp lại nhiều lần, sẽ thu được một loại giấm gỗ trong suốt, ổn định (Fagernäs et al. 2012).

- **Phương pháp chưng cất (Distillation method)**

Chưng cất là một kỹ thuật phân tách phổ biến trong công nghiệp hóa chất, dựa trên sự khác biệt về độ bay hơi của các thành phần trong hỗn hợp. Có hai dạng chưng cất chính: chưng cất ở áp suất thường và chưng cất chân không. Cả hai đều hoạt động bằng cách tách các hợp chất dựa vào điểm sôi của chúng.

Giấm gỗ thường chứa 80–90% là nước, trong khi 10% còn lại là các hợp chất hữu cơ có điểm sôi gần nhau. Do đó, quá trình sôi bắt đầu dưới 100°C và tiếp tục đến 250–280°C, sau đó còn lại khoảng 35–50% cặn (Czernik & Bridgwater 2004). Chưng cất là phương pháp hiệu quả để làm đậm đặc giấm gỗ và loại bỏ các hợp chất có điểm sôi quá thấp hoặc quá cao. Tuy nhiên, nó không thể loại bỏ hoàn toàn các polymer không mong muốn. Do đó, tốt nhất nên kết hợp phương pháp này sau khi đã lắng sơ bộ bằng phương pháp tự nhiên. Ngoài ra, cần cẩn trọng khi gia nhiệt đến điểm sôi vì điều này có thể kích hoạt quá trình oxy hóa và trùng hợp, làm mất hoạt tính sinh học của một số thành phần.

- **Chiết lỏng–lỏng (liquid–liquid extraction)**

Chiết lỏng–lỏng là kỹ thuật phân tách dựa trên khả năng phân bố khác nhau của một chất tan giữa hai pha lỏng không trộn lẫn. Thông thường, dung dịch mẫu trong nước sẽ được chiết với một dung môi hữu cơ không tan trong nước. Chất cần tách sẽ phân bố giữa hai pha – một phần trong dung môi nước, phần còn lại trong dung môi hữu cơ.

Kỹ thuật này được áp dụng để bán tinh chế các hợp chất có hoạt tính sinh học trong giấm gỗ. Việc lựa chọn dung môi phù hợp (dựa theo độ phân cực) là yếu tố then chốt – ví dụ như hexane, ether, ethyl acetate, acetone, nước... Việc chiết từng bước theo độ phân cực tăng dần cũng có thể giúp nâng cao độ tinh khiết của hoạt chất sinh học, như đề xuất của Oasmaa et al. (2003).

Một số nghiên cứu đã cho thấy các hợp chất phenolic và acid hữu cơ có thể được chiết từ giấm gỗ bằng ether và dichloromethane (Sipilä et al. 1998; Bedmutha et al. 2011; Fagernäs et al. 2012). Tuy nhiên, trong quá trình làm khô dung môi, một lượng đáng kể các hợp chất bay hơi hoặc có độ phân cực cao đã bị mất do hiện tượng bay hơi đồng thời (co-evaporation).

Ngoài ra, hiệu quả sinh học của giấm gỗ không chỉ đến từ từng hợp chất đơn lẻ mà còn từ cơ chế **tương tác hiệp đồng** giữa các thành phần – điều này được xem là đặc trưng trong cách giấm gỗ phát huy tác dụng. Các tài liệu cho thấy phenol và acid hữu cơ là những hoạt chất chính, nhưng cũng có bằng chứng cho thấy một số hợp chất chưa xác định khác cũng có thể đóng vai trò sinh học quan trọng (Bedmutha et al. 2011).

Một ví dụ tiêu biểu là caffeine, một loại alkaloid có tính chất trừ sâu tự nhiên tương tự phenol và dẫn xuất của nó (Bedmutha et al. 2011). Trong quá trình sản xuất dầu sinh học, một phần caffeine có thể bị phân hủy thành dẫn xuất pyridine – cũng là một chất có thể có hoạt tính trừ sâu.

5. Các lĩnh vực ứng dụng của giấm gỗ

Giấm gỗ đã và đang được nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực khác nhau như nông nghiệp, y học, bảo quản gỗ và bảo quản thực phẩm.

5.1. Ứng dụng của giấm gỗ trong nông nghiệp

Việc sử dụng phân bón hóa học trong thời gian dài có thể làm suy thoái đất do làm cạn kiệt chất hữu cơ, giảm khả năng giữ nước và dưỡng chất, đồng thời làm suy giảm cấu trúc đất. Bên cạnh đó, dư lượng hóa chất còn tồn lưu trong rau quả sau thu hoạch, gây ảnh hưởng đến chất lượng và độ an toàn thực phẩm. Do đó, việc tìm kiếm một giải pháp thay thế có nguồn gốc tự nhiên là rất cần thiết. Giấm gỗ – với các đặc tính phù hợp – là một trong những lựa chọn đầy hứa hẹn. Trong hai thập kỷ qua, giấm gỗ đã được nghiên cứu nhiều tại các nước Đông Nam Á như Thái Lan, Trung Quốc và Campuchia.

• Giấm gỗ như một chất kích thích sinh trưởng

Giấm gỗ được cho là có khả năng kích thích sự phát triển tế bào, thúc đẩy sự phát triển của vi sinh vật có lợi và kích hoạt các enzyme thiết yếu cho các quá trình sinh lý và sinh hóa của cây như quang hợp, hấp thu dưỡng chất và tăng trưởng tế bào. Dù cơ chế cụ thể chưa được nghiên cứu đầy đủ, nhiều tác giả ghi nhận rằng việc phun giấm gỗ lên lá có thể làm tăng hàm lượng diệp lục và độ bóng của lá – từ đó nâng cao hiệu suất quang hợp, tổng hợp đường và acid amin. Một số este như methyl acetate và methyl formate – có trong giấm gỗ – cũng được cho là thúc đẩy quá trình tăng trưởng của cây.

Giấm gỗ đã cho thấy hiệu quả rõ rệt trên nhiều loại cây trồng như: lúa (Tsuzuki et al. 2000), cao lương, khoai lang (*Ipomoea batatas* – Shibayama et al. 1998), dưa lưới (*Cucumis melo*), cúc vạn thọ (*Tagetes erecta*), cúc zinnia (*Zinnia elegans*), hoa xác pháo (*Salvia splendens*) và cà chua (*Solanum lycopersicum*). Mungkunkamchao et al. (2013) cho biết giấm gỗ làm tăng khối lượng khô toàn cây, số quả và khối lượng tươi/khô của cà chua, đồng thời làm tăng tổng hàm lượng chất hòa tan trong quả. Masum et al. (2013) cũng ghi nhận việc bón giấm gỗ làm tăng sản lượng lúa nhờ số nhánh nhiều hơn, tăng khối lượng 1.000 hạt và số hạt chắc. Ngoài ra, giấm gỗ còn giúp tăng năng suất đậu nành (*Glycine max* – Traverro & Mihara 2016), cải thiện sinh trưởng và năng suất của xà lách, dưa leo và bắp cải (Mu et al. 2006). Zulkarami et al. (2011) cho thấy giấm gỗ làm tăng đường, trọng lượng và đường kính quả dưa lưới giống cantaloupe.

• Giấm gỗ như một loại phân bón hữu cơ

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả cải thiện đất của giấm gỗ khi được sử dụng như một loại phân bón hữu cơ – trên lúa (Tsuzuki et al. 2000), mía (Uddin et al. 1995) và khoai lang (Shibayama et al. 1998). Tỷ lệ pha loãng 20% axit pyroligneous cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc tăng trưởng và năng suất dưa hấu trồng không đất (Zulkarami et al. 2011). Trong nghiên cứu trên cây chè, việc sử dụng giấm gỗ giúp tăng gấp ba lần hàm lượng phosphoric acid dễ hấp thu.

Các chất hữu cơ tiết ra từ rễ cây thường có khả năng làm tan phosphat, giúp cây dễ dàng hấp thụ. Các acid hữu cơ trong giấm gỗ được cho là cũng tạo ra hiệu ứng tương tự trong đất.

• Giấm gỗ như một chất trừ sâu sinh học

Trước xu thế phát triển nông nghiệp bền vững, nhu cầu hạn chế sử dụng thuốc hóa học ngày càng được quan tâm. Thành phần phenol trong giấm gỗ giúp nó có đặc tính kháng nấm và trừ sâu tự

nhiên (Baimark & Niamsa 2009). Ngoài ra, giấm gỗ còn làm tăng khả năng thẩm thấu của thuốc trừ sâu vào mô lá, đặc biệt khi dùng ở pH 4–5. Tuy nhiên, giấm gỗ không nên trộn với các chất kiềm mạnh do phản ứng bất lợi với acid.

Mmojieje và Hornung (2015) đã ghi nhận hiệu quả trừ sâu của giấm gỗ chiết từ hỗn hợp gỗ, cho kết quả tiêu diệt hơn 90% rệp đào xanh (*Myzus persicae*) và nhện đỏ (*Tetranychus urticae*) tại Anh. Tại Thái Lan, giấm gỗ cũng được sử dụng rộng rãi làm thuốc trừ sâu. Ví dụ, dầu hắc ín từ gỗ bulô là chất xua đuổi hiệu quả đối với sên (*Arion lusitanicus*) và ốc sên (*Arianta arbustorum* – Tiilikkala et al. 2010). Khi phun dung dịch giấm gỗ pha loãng 1% lên cây cà tím (*Solanum melongena*), có tới 95% số rệp bị tiêu diệt (Regnault-Roger 1997). Yatagai et al. (2002) cũng ghi nhận hiệu quả diệt mối Nhật (*Reticulitermes speratus*). Một số nghiên cứu khác còn cho thấy giấm gỗ có thể tiêu diệt ruồi nhà (Pangnakorn et al. 2012, 2014).

Ngoài ra, giấm gỗ còn có tiềm năng thay thế thuốc diệt cỏ tổng hợp. Thành phần phenol, acid hữu cơ, carbonyl, alcohol và các acid khác trong giấm gỗ là yếu tố chính tạo nên hoạt tính diệt cỏ (Kim et al. 2001). Acid acetic – thành phần chính trong giấm gỗ – đã được sử dụng trong nông nghiệp để kiểm soát cỏ dại. Một nghiên cứu cho thấy giấm gỗ có hiệu quả với các loại cỏ thủy sinh như *Hydrilla* spp., *Potamogeton pectinatus* và *Spartina alterniflora* (Spencer & Ksander 1999).

- **Giấm gỗ như một chất kháng khuẩn**

Dù chưa được nghiên cứu sâu rộng, giấm gỗ đã được ghi nhận là có khả năng kháng khuẩn nhờ hàm lượng cao các hợp chất phenolic và acid hữu cơ (Lee et al. 2011; Mmojieje & Hornung 2015).

Nhiều nghiên cứu đã cho thấy giấm gỗ có tác dụng ức chế một số loài vi khuẩn gây bệnh thực vật. Ví dụ, Chalermisan và Peerapan (2009) ghi nhận rằng axit pyroligneous có khả năng ức chế *Xanthomonas campestris* pv. *Citri* và *Erwinia carotovora* pv. *Carotovora* – hai tác nhân có thể gây thiệt hại nghiêm trọng cho cây trồng làm vườn. *Ralstonia solanacearum* – nguyên nhân gây bệnh héo vi khuẩn trên nhiều loại cây trồng – cũng bị ức chế bởi phenol và các dẫn xuất guaiacol trong giấm gỗ tổng hợp từ tuyết tùng Nhật (*Cryptomeria japonica*; Young-Hee et al. 2005).

Các nghiên cứu khác cũng ghi nhận hiệu quả ức chế sinh trưởng của giấm gỗ pha loãng 10% đối với *Agrobacterium tumefaciens* và *X. campestris* (Mmojieje & Hornung 2015). Ngoài ra, giấm gỗ sản xuất từ bã dứa rắn cũng được chứng minh có khả năng ức chế vi khuẩn gây bệnh vàng gân *Corynebacterium agropyri* (Mahmud et al. 2016).

Không chỉ có tác dụng kháng khuẩn, giấm gỗ còn có hiệu quả rõ rệt trong việc kháng nấm gây bệnh cây trồng. Hàm lượng acid hữu cơ và phenol cao giúp ức chế nhiều loài nấm gây hại (Mourant et al. 2005; Chalermisan & Peerapan 2009; Tiilikkala et al. 2010; Wei et al. 2010). Wei et al. (2010) đã ghi nhận hiệu quả kháng nấm của giấm gỗ với các loài như *Helminthosporium sativum*, *Cochliobolus sativus*, *Valsa mali* và *Colletotrichum orbiculare*. Giấm gỗ sản xuất ở nhiệt độ thấp có hoạt tính kháng khuẩn yếu hơn so với sản phẩm từ nhiệt độ cao. Tỷ lệ pha loãng cũng ảnh hưởng đến hiệu quả: Jung (2007) cho biết giấm gỗ pha loãng 1:32 vẫn ức chế được nấm *Alternaria mali* gây bệnh đốm lá trên táo. Sự hiện diện của furaldehyde và phenol được cho là yếu tố chính tạo nên hoạt tính kháng nấm. Tiilikkala & Setälä (2009) còn ghi nhận hiệu quả của dầu hắc ín từ gỗ bulô trong kiểm soát *Phytophthora infestans*.

Tất cả những ứng dụng và chức năng này cho thấy giấm gỗ là một giải pháp tiềm năng thay thế các hóa chất tổng hợp trong vai trò chất kháng khuẩn tự nhiên.

5.2. Ứng dụng của giấm gỗ trong y học

Giấm gỗ thu được từ quá trình nung gỗ đã được ứng dụng trong sản xuất miếng dán giải độc (detoxification pad), hiện đang phổ biến tại Nhật Bản, Hoa Kỳ, Hàn Quốc và Trung Quốc. Người dùng thường dán miếng này dưới gan bàn chân trước khi ngủ, nhằm tác động lên các huyết đạo phản xạ. Người ta tin rằng phương pháp này có thể giúp cân bằng và hỗ trợ quá trình phục hồi của cơ thể.

Giấm gỗ là nguồn cung cấp các acid béo chuỗi ngắn – những chất giúp tăng độ acid trong đại tràng, từ đó ức chế sự phát triển của vi khuẩn có hại, vi khuẩn gây bệnh đường ruột (*enteropathogenic bacteria* – Nakai & Siebert 2003), và các động vật nguyên sinh như *Cryptosporidium parvum* (Kniel et al. 2003). Đồng thời, nó còn kích thích sự phát triển của các vi khuẩn có lợi như *Enterococcus faecium* và *Bifidobacterium thermophilum* (Tana et al. 2003).

Ngoài ra, giấm gỗ còn giúp giảm hấp thu các hợp chất gây ung thư có tính kiềm, cải thiện khả năng hấp thu khoáng chất như canxi và magie, đồng thời hỗ trợ lưu thông máu. Một số nghiên cứu cũng chỉ ra rằng giấm gỗ đã qua chưng cất có khả năng ức chế phản ứng dị ứng type I khi sử dụng qua đường uống, từ đó góp phần ngăn ngừa các bệnh lý dị ứng như viêm mũi dị ứng, sốt mùa cỏ, viêm kết mạc dị ứng, viêm da cơ địa, hen suyễn, mề đay và dị ứng thực phẩm (Imamura & Watanabe 2007).

5.3. Ứng dụng trong bảo quản thực phẩm

Tình trạng ngộ độc thực phẩm không được báo cáo đầy đủ vẫn là một vấn đề nghiêm trọng, ảnh hưởng đến hàng triệu người trên toàn cầu (Vattem et al. 2004). Trong ngành thực phẩm, phụ gia được sử dụng nhằm kéo dài thời hạn sử dụng, cải thiện giá trị dinh dưỡng, điều chỉnh màu sắc, hương vị, kết cấu hoặc hỗ trợ quá trình chế biến (Branen et al. 2002).

Tuy nhiên, nhận thức ngày càng cao của người tiêu dùng về sức khỏe đã khiến nhu cầu sử dụng phụ gia tổng hợp giảm mạnh trong những năm gần đây. Thay vào đó, các phụ gia có nguồn gốc tự nhiên đang ngày càng được ưa chuộng (Deba et al. 2008). Những chất bảo quản tự nhiên như gia vị, thảo mộc, tinh dầu thực vật và giấm gỗ đang trở thành lựa chọn phổ biến trong chế biến thực phẩm.

Giấm gỗ là sản phẩm có nguồn gốc tự nhiên, thu được từ quá trình nhiệt phân sinh khối thực vật, chứa nhiều hợp chất phenolic và acid hữu cơ chuỗi ngắn có khả năng ức chế vi sinh vật. Nhờ đó, nó có thể được dùng như một phụ gia bảo quản an toàn trong thực phẩm chế biến (Kahl & Kappus 1993).

Bên cạnh đó, các hương vị khói chiết xuất từ giấm gỗ cũng được sử dụng để tạo mùi đặc trưng cho thực phẩm – một giải pháp được xem là an toàn thay thế cho khói trực tiếp (Mohan et al. 2006). Cục Quản lý Thực phẩm và Dược phẩm Hoa Kỳ (FDA) đã cho phép sử dụng axit pyroligneous làm chất tạo hương khói và bảo quản thực phẩm như giấm bông, thịt xông khói, xúc xích, cá và phô mai.

5.4. Ứng dụng của giấm gỗ trong bảo quản gỗ

Gần đây, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng dầu sinh học (bio-oil) và giấm gỗ thu được từ quá trình nhiệt phân nhanh có tiềm năng lớn trong việc sử dụng làm chất bảo quản gỗ. Các hợp chất phenolic – có khả năng thẩm thấu sâu vào mô gỗ – được cho là đóng vai trò quan trọng trong việc ức chế sự phát triển của nấm và tăng khả năng chống mục cho gỗ (Kartal et al. 2004; Mohan et al. 2006; Nakai et al. 2007).

Cụ thể, các khối gỗ được xử lý bằng dung dịch lọc từ bùn nhiên liệu của một số loại gỗ như tuyết

tùng Nhật (*Cryptomeria japonica*) và keo tai tượng (*Acacia mangium*) đã cho thấy khả năng kháng tốt với nấm mục nâu (*Fomitopsis palustris*) và nấm mục trắng (*Trametes versicolor*). Tuy nhiên, các dung dịch lọc này không cải thiện đáng kể khả năng kháng mối đất ngầm (*Coptotermes formosanus* – Kartal et al. 2004).

Kết luận

Quá trình cacbon hóa sinh khối lignocellulose đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao giá trị sử dụng của các phụ phẩm nông – lâm nghiệp. Quá trình nhiệt phân này tạo ra ba sản phẩm có thể khai thác gồm: than sinh học (biochar) dùng để cải tạo đất, khí phục vụ sấy nhiệt, và giấm gỗ (axit pyroligneous) – một sản phẩm với thành phần hóa học phong phú và đa dụng.

Giấm gỗ sở hữu các đặc tính chống oxy hóa và kháng khuẩn, từ đó trở thành một giải pháp sinh học tiềm năng trong nhiều lĩnh vực như: thuốc trừ sâu sinh học, phân bón hữu cơ, chất kích thích tăng trưởng cây trồng, chất bảo quản thực phẩm, chất bảo quản gỗ và thậm chí là ứng dụng trong y học.

Với nguồn gốc tự nhiên, không cần sử dụng các chất hóa học độc hại, giấm gỗ được xem là một giải pháp sinh thái và bền vững – không chỉ hỗ trợ sản xuất nông nghiệp thân thiện với môi trường mà còn mang lại lợi ích sức khỏe và kinh tế cho người nông dân và người tiêu dùng.

Việc mở rộng ứng dụng giấm gỗ trên phạm vi toàn cầu có thể góp phần quan trọng vào việc xây dựng một hệ sinh thái lành mạnh hơn, giảm thiểu tác động môi trường và thúc đẩy phát triển bền vững.

Tài liệu tham khảo

Akouehou, S. G., V. J. Mama, L. C. Hounsounou, A. C. Goussanou, T. F. Ogouvide, E. Gbozo, and G. A. Mensah. 2012. Technical Sheet: Use of the Casamance-type chimney grinder—Casa GV—for charcoal production in Benin–Slire. http://www.slire.net/document/2165?_locale=fr. Accessed March 21, 2023.

Amen-Chen, C., H. Pakdel, and C. Roy. 2001. Production of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: A review. *Bioresour. Technol.* 79(3):277–299. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00180-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00180-2)

Authentic Material. 2018. Key figures, September 1. Materials for recovery. <https://www.authentic-material.com/newsroom/materials/material-a-value-key-figures/>.

Baimark, Y. and N. Niamsa. 2009. Study on wood vinegars for use as coagulating and antifungal agents on the production of natural rubber sheets. *Biomass Bioenergy* 33(6–7):994–998. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.04.001>

Balat, M., M. Balat, E. Kirtay, and H. Balat. 2009. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Convers. Manag.* 50(12):3147–3157. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.014>

Beaumont, O. 1985. Flash pyrolysis products from beech wood. *Wood Fiber Sci.* 17(2):228–239.

Bedmutha, R., C. J. Booker, L. Ferrante, C. Briens, F. Berruti, K. K.-C. Yeung, I. Scott, and K. Conn. 2011. Insecticidal and bactericidal characteristics of the bio-oil from the fast pyrolysis of coffee grounds.

J. Anal. Appl. Pyrolysis 90(2):224–231. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.12.011>

Branen, A. L., P. M. Davidson, S. Salminen, and J. H. Thorngate III (Eds.). 2002. Food Additives. 2nd ed. Marcel Dekker, New York. 938 pp. https://www.academia.edu/24832107/A_Larry_Branen_P_Michael_Davidson_Seppo_SalmiBookFi_org_FOOD_ADDITIVES

Bridgwater, A. V. 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chem. Eng. J. 91(2):87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)

Bridgwater, A. V. 2008. Progress in Thermochemical Biomass Conversion. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 1744 pp.

Bridgwater, A. V. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass Bioenergy 38:68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Burnette, R. 2013. August 1. TN #77 An Introduction to Wood Vinegar. ECHO community. <https://www.echocommunity.org/resources/072afac2-aa13-41bf-b3b3-3c00ff967a19>

Chalermisan, Y. and S. Peerapan. 2009. Wood vinegar: By-product from rural charcoal kiln and its role in plant protection. Asian J. Food Agro- Ind. 2:S189–S195.

Creamer, A. E., B. Gao, and M. Zhang. 2014. Carbon dioxide capture using biochar produced from sugarcane bagasse and hickory wood. Chem. Eng. J. 249:174–179. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.105> Czernik, S. and A. V. Bridgwater. 2004. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. Energy Fuels 18(2):590–598. <https://doi.org/10.1021/ef034067u>

Deba, F., T. D. Xuan, M. Yasuda, and S. Tawata. 2008. Chemical composition and antioxidant, antibacterial and antifungal activities of the essential oils from *Bidens pilosa* Linn. Var. *Radiata*. Food Control 19:346–352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.04.011>

Demirbas, A. 2004. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. J. Anal. Appl. Pyrolysis 72(2):243–248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>

Demirbas, A. 2007. Effect of temperature on pyrolysis products from biomass. Energ. Source. Part A 29(4):329–336. <https://doi.org/10.1080/009083190965794>

Fagernas, L., E. Kuoppala, K. Tiilikkala, and A. Oasmaa. 2012. Chemical composition of birch wood slow pyrolysis products. Energy Fuels 26(2):1275–1283. <https://doi.org/10.1021/ef2018836>

Food and Agriculture Organization (FAO). 2003. FOSA Document national de prospective—Côte d'Ivoire. <https://www.fao.org/3/X6780F/X6780F04.htm#TopOfPage>. Accessed March 16, 2023.

García-Pérez, M., A. Chaala, and C. Roy. 2002. Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. J. Anal. Appl. Pyrolysis 65(2): 111–136. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00184-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00184-X)

González, J. F., A. Ramiro, C. M. González-García, J. Ganán, J. M. Encinar, E. Sabio, and J. Rubiales. 2005. Pyrolysis of almond shells. Energy applications of fractions. Ind. Eng. Chem. Res. 44(9):3003–3012. <https://doi.org/10.1021/ie0490942>

Hernández-Soto, M. C., M. Hernández-Latorre, B. Oliver-Tomas, E. Ponce, and M. Renz. 2019. Transformation of organic household leftovers into a peat substitute. J. Vis. Exp. 149:e59569.

<https://doi.org/10.3791/59569>

Imamura, E. and Y. Watanabe. 2007. Anti-allergy composition comprising wood vinegar- or bamboo vinegar-distilled solution. United States Patent No. US20050136133A1. <https://patents.google.com/patent/US20050136133A1/en>. Accessed June 22, 2023.

International Energy Agency (IEA). 2014. Sustainable Energy for All 2013-2014: Global Tracking Framework Report. The World Bank, Washington, D. C.

Iqbal, H. M. N., I. Ahmed, M. A. Zia, and M. Irfan. 2011. Purification and characterization of the kinetic parameters of cellulase produced from wheat straw by *Trichoderma viride* under SSF and its detergent compatibility. *Adv. Biosci. Biotechnol.* 2:149-156. <https://doi.org/10.4236/abb.2011.23024>

Issifou, A. Y., J. F. M. F. Tonouewa, S. S. H. Biaou, T. D. Houehanou, and Y. Idrissou. 2020. Technique de carbonisation du bois au Nord- Ouest du Bénin, Afrique de l'Ouest. *Afr. Sci.* 16(2):49-58.

Jain, S. K. and P. P. Chavan. 2013. Development of oil drum kiln for production of bamboo vinegar. *Int. J. Agric. Eng.* 6(2):438-443.

Jung, K.-H. 2007. Growth inhibition effect of pyroligneous acid on pathogenic fungus, *Alternaria mali*, the agent of *Alternaria blotch* of apple. *Biotechnol. Bioproc. Eng.* 12(3):318.

Kahl, R. and H. Kappus. 1993. Toxikologie der synthetischen Antioxidantien BHA und BHT im Vergleich mit dem natürlichen Antioxidans Vitamin E. *Z. Lebensm. Unters. Forsc.* 196(4):329-338. <https://doi.org/10.1007/BF01197931>

Kamgate, I. 2022. July 7. Côte d'Ivoire: Population estimated at 29.3 million. *Financial Afrik.* <https://www.financialafrik.com/2022/07/07/cote-divoire-le-ps-gouv-a-lepreuve-dune-population-de-293-millions-dhabitants-en-2022/>. Accessed March 16, 2023.

Kan, T., V. Strezov, and T. J. Evans. 2016. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 57:1126-1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>

Kartal, S. N., Y. Imamura, F. Tsuchiya, and K. Ohsato. 2004. Preliminary evaluation of fungicidal and termiticidal activities of filtrates from biomass slurry fuel production. *Bioresour. Technol.* 95(1):41-47. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.005>

Keerati, S. 2019. Phineath Than experiment on parameters for wood vinegar burning process. <https://www.semanticscholar.org/paper/Phineath-Than-experiment-on-parameters-for-wood/4dd5158272a6c1966bb811585c4cec6e516d1d65>. Accessed March 21, 2023.

Kim, J. S., J. C. Kim, J. S. Choi, T. J. Kim, S. Kim, and K. Y. Cho. 2001. Isolation and identification of herbicidal substances from wood vinegars. *Korean J. Weed Sci.* 21:357-364.

Kimura, Y., S. Suto, and M. Tatsuka. 2002. Evaluation of carcinogenic/ co-carcinogenic activity of chikusaku-eki, a bamboo charcoal by-product used as a folk remedy, in BALB/c 3T3 cells. *Biol. Pharm. Bull.* 25(8):1026-1029. <https://doi.org/10.1248/bpb.25.1026>

Kniel, K. E., S. S. Sumner, D. S. Lindsay, C. R. Hackney, M. D. Pierson,

- A. M. Zajac, D. A. Golden, and R. Fayer. 2003. Effect of organic acids and hydrogen peroxide on *Cryptosporidium parvum* viability in fruit juices. *J. Food Prot.* 66(9):1650–1657.
- Laemsak, N. 2010. Wood vinegar. Wood and Pulp Research Program, Coordinating Office TRF, Faculty of Forestry, Kasetsart University. <http://www.authorstream.com/Presentation/Cannes-50452-Woodvinegar-Background-Product-Carbonization-Cont-Recover-Pyroligneous-Liquor-Collector-Procedure-Im-as-Education-pptpowerpoint/>. Accessed September 25, 2010.
- Lanly, J.-P. 1969. Dense forest decline in Côte d'Ivoire. *Trop. Woods Forests* 127:45–59. <https://doi.org/10.19182/bft1969.127.a19064>
- Lee, C. S., E. H. Yi, H.-R. Kim, S.-R. Huh, S.-H. Sung, M.-H. Chung, and S.-K. Ye. 2011. Anti-dermatitis effects of oak wood vinegar on the DNCB-induced contact hypersensitivity via STAT3 suppression. *J. Ethnopharmacol.* 135(3):747–753. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.04.009>
- Lee, K.-H., B.-S. Kang, Y.-K. Park, and J.-S. Kim. 2005. Influence of reaction temperature, pretreatment, and a char removal system on the production of bio-oil from rice straw by fast pyrolysis, using a fluidized bed. *Energy Fuels* 19(5):2179–2184. <https://doi.org/10.1021/ef050015o>
- Loo, A. Y., K. Jain, and I. Darah. 2007. Antioxidant and radical scavenging activities of the pyroligneous acid from a mangrove plant, *Rhizophora apiculata*. *Food Chem.* 104(1):300–307. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.11.048>
- Madon, G. 2017. Le bois, énergie de première nécessité en Afrique. Une ressource trop souvent négligée. *Afr.ique cContemp.oraine*, 261–262(1–2):201–222. <https://doi.org/10.3917/afco.261.0201>
- Mahmud, K. N., M. Yahayu, S. H. M. Sarip, N. H. Rizan, C. B. Min, N. F. Mustafa, N. Sulaiman, S. Ujang, and Z. Zakaria. 2016. Evaluation on efficiency of pyroligneous acid from palm kernel shell as antifungal and solid pineapple biomass as antibacterial and plant growth promoter. *Sains Malays.* 45(10):1423–1434.
- Masum, S. M., M. Malek, M. S. H. Mandal, M. N. Haque, and Z. Akther. 2013. Influence of plant extracted pyroligneous acid on transplanted aman rice. *World J. Exp. Biosci.* 4:31–34.
- Mathew, S. and Z. A. Zakaria. 2015. Pyroligneous acid—The smoky acidic liquid from plant biomass. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 99(2):611–622. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6242-1>
- Mmojieje, J. and A. Hornung. 2015. The potential application of pyroligneous acid in the UK agricultural industry. *J. Crop Improv.* 29(2):228–246. <https://doi.org/10.1080/15427528.2014.995328>
- Mohan, D., C. U. Pittman Jr., and P. H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/ biomass for bio-oil: A critical review. *Energy Fuels* 20(3):848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Mourant, D., D.-Q. Yang, X. Lu, and C. Roy. 2005. Anti-fungal properties of the pyroligneous liquors from the pyrolysis of softwood bark. *Wood Fiber Sci.* 37(3):542–548.
- Mu, J., Z. Yu, W. Wu, and Q. Wu. 2006. Preliminary study of application effect of bamboo vinegar on vegetable growth. *Forestry Stud. China* 8(3):43–47. <https://doi.org/10.1007/s11632-006-0023-6>

- Mun, S.-P., C.-S. Ku, and S.-B. Park. 2007. Physicochemical characterization of pyrolyzates produced from carbonization of lignocellulosic biomass in a batch-type mechanical kiln. *J. Ind. Eng. Chem.* 13(1):127–132.
- Mungkunkamchao, T., T. Kesmala, S. Pimratch, B. Toomsan, and D. Jothityangkoon. 2013. Wood vinegar and fermented bioextracts: Natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Sci. Hort.* 154, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.020>
- Murwanashyaka, J. N., H. Pakdel, and C. Roy. 2001. Step-wise and one- step vacuum pyrolysis of birch-derived biomass to monitor the evolution of phenols. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 60(2):219–231. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00206-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00206-0)
- Nakai, S. A. and K. J. Siebert. 2003. Validation of bacterial growth inhibition models based on molecular properties of organic acids. *Int. J. Food Microbiol.* 86(3):249–255. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00551-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00551-2)
- Nakai, T., S. N. Kartal, T. Hata, and Y. Imamura. 2007. Chemical characterization of pyrolysis liquids of wood-based composites and evaluation of their bio-efficiency. *Build. Environ.* 42(3):1236–1241. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.022>
- Nurhayati, T., H. Roliadi, and N. Bermawie. 2005. Production of mangium (*Acacia mangium*) wood vinegar and its utilization. *Indones. J. Forestry Res.* 2(1):13–25. <https://doi.org/10.20886/ijfr.2005.2.1.13-25>
- Nyampeta, L. 2004. La filière bois d'eucalyptus spp. dans la Province de Butare, au Rwanda (Rwanda) Master's thesis. École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Paris. <https://agritrop.cirad.fr/524764/>. Accessed March 21, 2023.
- Oasmaa, A., E. Kuoppala, and Y. Solantausta. 2003. Fast pyrolysis of forestry residue. 2. Physicochemical composition of product liquid. *Energy Fuels* 17(2):433–443. <https://doi.org/10.1021/ef020206g>
- Oramahi, H. A. and T. Yoshimura. 2013. Antifungal and antitermitic activities of wood vinegar from *Vitex pubescens* Vahl. *J. Wood Sci.* 59(4):344–350. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1340-8>
- Pangnakorn, U., S. Kanlaya, and C. Kuntha. 2012. Effect of wood vinegar for controlling on housefly (*Musca domestica* L.). *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 6(5):291–294.
- Pangnakorn, U., and S. Kanlaya. 2014. Efficiency of wood vinegar mixed with some plants extract against the housefly (*Musca domestica* L.). *Inter. J. of Biological, Biomolecular, Agr., Food and Biotech. Eng.* 8(9):1038–1042.
- Pütün, A. E., N. Ozbay, E. P. Onal, and E. Pütün. 2005. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. *Fuel Process. Technol.* 86(11):1207–1219. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.12.006>
- Ratanapisit, J., S. Apiraksakul, A. Rerngnarong, J. Chungsiriporn, and C. Bunyakarn. 2009. Preliminary evaluation of production and characterization of wood vinegar from rubberwood. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 31:343–349.

REDD+ & Nitidae. 2019. Formation de charbonniers à la carbonisation améliorée. https://www.nitidae.org/files/1f0b34ea/190702_rapport_formation_charbonniers_projet_redd_me_.pdf. Accessed March 21, 2023.

Regnault-Roger, C. 1997. The potential of botanical essential oils for insect pest control. *Integr. Pest Manag. Rev.* 2:25–34. <https://doi.org/10.1023/A:1018472227889>

Shibayama, H., K. Mashima, M. Mitsutomi, and S. Arima. 1998. Effects of application of pyroligneous acid solution produced in Karatsu city on growth and free sugar contents of storage roots of sweet potato. *Marine and Highland Bioscience Center Report - Saga University (Japan).* 7:15–23.

Sipila, K., E. Kuoppala, L. Fagerna's, and A. Oasmaa. 1998. Characterization of biomass-based flash pyrolysis oils. *Biomass Bioenergy* 14(2):103–113. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)10024-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)10024-1)

Spencer, D. F. and G. G. Ksander. 1999. Influence of dilute acetic acid treatments on survival of monoecious hydrilla tubers in the Oregon House Canal, California. *J. Aquat. Plant Manag.* 37:67–71.

Sutrisno, L., R. Sulaeman, and E. Sribudiani. 2014. Utilization of wood waste mahang (*Macaranga* sp.) from sawmill industry for making wood vinegar. *Mahasiswa Fakult. Pertanian Univ. Riau* 1(1):1–8.

Sztancs, G., L. Juhasz, B. J. Nagy, A. Nemeth, A. Selim, A. Andre, A. J. Toth, P. Mizsey, and D. Fozér. 2020. Co-hydrothermal gasification of *Chlorella vulgaris* and hydrochar: The effects of waste-to-solid biofuel production and blending concentration on biogas generation. *Bio- resour. Technol.* 302:122793. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122793>

Sztancs, G., A. Kovacs, A. J. Toth, P. Mizsey, P. Billen, and D. Fozér. 2021. Catalytic hydrothermal carbonization of microalgae biomass for low-carbon emission power generation: The environmental impacts of hydrochar co-firing. *Fuel* 300:120927. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120927>

Tana, S., W. Watarai, L. H. Kodama, and Y. Iwakiri. 2003. Eliminating the carriage of *Salmonella enterica* serovar Enteritidis in domestic fowls by feeding activated charcoal containing wood vinegar liquid (Nekka-rich). *Proc. Jan. J. Vet. Sci.* 135–140.

Theapparatt, Y., A. Chandumpai, and D. Faroongsarng. 2018. Physicochemistry and utilization of wood vinegar from carbonization of tropical biomass waste. In: *Tropical Forests—New Edition*. P. Sudarshana, M. Nageswara-Rao, and J. R. Soneji (Eds.). InTechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77380>

Theapparatt, Y., A. Chandumpai, W. Leelasuphakul, N. Laemsak, and C. Ponglimanont. 2014. Physicochemical characteristics of wood vinegars from carbonization of *Leucaena leucocephala*, *Azadirachta indica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Hevea brasiliensis* and *Dendrocalamus asper*. *Agric. Nat. Resour.* 48(6):916–928.

Tiilikkala, K., L. Fagernas, and J. Tiilikkala. 2010. History and use of wood pyrolysis liquids as biocide and plant protection product. *Open Agric. J.* 4(1):111–118. <https://doi.org/10.2174/1874331501004010111>

Tiilikkala, K. and H. Setälä. 2009. Birch tar oil—A new innovation as biological plant protection product. NWBC-2009. The 2nd Nordic Wood Biorefinery Conference. Finlandia Hall, Helsinki,

Finland, September 2–4, 2009.

Travero, J. T. and M. Mihara. 2016. Effects of pyroligneous acid to growth and yield of soybeans (Glycine max). *Int. J. Environ. Rural Dev.* 7(1):50–54. https://doi.org/10.32115/ijerd.7.1_50

Tsuzuki, E., T. Morimitsu, and T. Matsui. 2000. Effect of chemical compounds in pyroligneous acid on root growth in rice plant. Report of the Kyushu Branch of the Crop Science Society of Japan, No. 66, pp. 15–16.

Uddin, S. M. M., S. Murayama, Y. Ishimine, E. Tsuzuki, and J. Harada. 1995. Studies on sugarcane cultivation, 2: Effects of the mixture of charcoal with pyroligneous acid on dry matter production and root growth of summer planted sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Jpn. J. Crop Sci.* 64(4):747–753.

Vattem, D. A., Y. T. Lin, R. G. Labbe, and K. Shetty. 2004. Phenolic antioxidant mobilization in cranberry pomace by solid-state bioprocessing using food grade fungus *Lentinus edodes* and effect on antimicrobial activity against select food borne pathogens. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 5(1):81–91. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.09.002>

Wada, T. 1997. Charcoal Handbook. Forest Management Section, Agriculture, Forestry and Fisheries Division. Bureau of Labour and Economic Affairs, Tokyo Metropolitan Government, Japan.

Wang, C., S. Zhang, S. Wu, M. Sun, and J. Lyu. 2020. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process. *Fuel* 282:118775. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118775>

Wei, Q., X. Ma, and J. Dong. 2010. Preparation, chemical constituents and antimicrobial activity of pyroligneous acids from walnut tree branches. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 87(1):24–28. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.09.006>

Yatagai, M., M. Nishimoto, K. Hori, T. Ohira, and A. Shibata. 2002. Termiticidal activity of wood vinegar, its components and their homologues. *J. Wood Sci.* 48(4):338–342. <https://doi.org/10.1007/BF00831357>

Young-Hee, H., M. Yoh-Ichi, S. Kazuhiro, and M. Takanao. 2005. Antimicrobial effect of the wood vinegar from *Cryptomeria japonica* sapwood on plant pathogenic microorganisms. *J. Microbiol. Bio-technol.* 15(5):1106–1109.

Zhu, K., S. Gu, J. Liu, T. Luo, Z. Khan, K. Zhang, and L. Hu. 2021. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed. *Agronomy* 11(3):510. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>

Zobi, C., D. Chessel, A. Kadio, and J. Pascal. 2009. Détermination des paramètres influents de la dynamique des forêts naturelles ivoiriennes. *Agron. Afr.* 21(3):273–285. <https://doi.org/10.4314/aga.v21i3.56454>

Zulkarami, B., M. Ashrafuzzaman, M. O. Husni, and M. R. Ismail. 2011.

Effect of pyroligneous acid on growth, yield and quality improvement of rockmelon in soilless culture. *Aust. J. Crop Sci.* 5(12):1508–1514. <https://doi.org/10.3316/informit.005300006042339>