

ASPECTOS TÉCNICOS DO PROCESSO DE PIRÓLISE

Helder de Lucena Pereira ¹
Tatiane Maria do Nascimento ²
Adriano Lima da Silva ³

RESUMO

O presente artigo descreve conceitos relacionados ao processo de pirólise e suas tipologias, abrangendo desde sua definição, passando pela sua história e categorias, bem como suas vantagens industriais e mercadológicas em razão de seu potencial de produzir multiprodutos com aplicações vastas. O objetivo principal do estudo consiste na investigação literária e acadêmica acerca do que vêm sendo falado sobre esta temática nos últimos cinco anos. Para atingir tal propósito teórico-metodológico, foi explorado a base de dados do periódico da CAPES, onde foi averiguado os termos ‘tipos de pirólise’, ‘reatores’ e ‘produtos’ em um recorte temporal compreendido entre os anos de 2017 a 2021. Os principais resultados apontaram que há inúmeros tipos de processos de pirólise aptos para serem usados com o intuito de converter a biomassa, a depender do processo que se utilizará e da temperatura de pirólise. Além disso, os materiais teóricos consultados indicaram que os produtos primordiais da pirólise da biomassa são o bio-óleo, o biochar e o gás de síntese, cada qual com sua aplicação benéfica específica para o processo. Por fim, observou-se que alguns catalisadores, como os de base zeólita, também foram testados e/ou desenvolvidos para pirólise catalítica de biomassa, tendo contribuído com eficiência para o processo.

Palavras-chave: tipos de pirólise, reatores, produtos.

INTRODUÇÃO

A palavra pirólise significa “decomposição pelo calor”, ou seja, a degradação de um material por energia térmica (SILVÉRIO; BARBOSA; PILÔ-VELOSO, 2008). A pirólise é considerada uma tecnologia revolucionária por aproveitar todo tipo de resíduo com o intuito de gerar energia elétrica ou térmica. O processo é ideal na medida que dá um destino correto aos resíduos. Nesse contexto, as indústrias podem utilizar seus próprios resíduos industriais para a produção de energia elétrica e vapor, o que faz otimizar seu ciclo produtivo. A pirólise é um processo estratégico e sustentável, isento de oxigênio. Desse modo, não há queima envolvida, o que evita a produção de toxinas e gases contaminantes nocivos ao meio ambiente (VELMURUGAN, 2021).

A primeira patente de protótipo de pirólise para resíduos sólidos foi registrada por Garrett e Mallan no dia 17 de maio de 1976. Na década de 80, os cientistas descobriram que a

¹ Graduando do Curso de Química da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, hld.lucena@gmail.com;

² Graduanda do Curso de Química da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, fjtatiane2012@gmail.com;

³ Graduando do Curso de Licenciatura em Química da UEPB, Engenheiro mestre e doutorando em Ciência e engenharia de Materiais da UFCG, adrianolimadasilva@hotmail.com;

pirólise rápida da biomassa com maior taxa de aquecimento contribui para um maior rendimento do produto líquido após uma rápida condensação do vapor de pirólise (MOHAN; PITTMAN; STEELE, 2006; FOONG et al, 2020). A partir daí, pesquisas de pirólise de biomassa foram realizadas para estabelecer o conceito subjacente do processo de pirólise. Posteriormente, Bridgwate, Gerhauser e Effendi (2009) patentearam um protótipo de pirólise de biomassa mais avançado em 11 de fevereiro de 2009. Até o momento, o processo de pirólise ainda permanece como um tópico de pesquisa popular devido à sua capacidade de produzir multiprodutos com amplas aplicações (LAM et al, 2016; FOONG et al, 2020). A distribuição desses produtos de pirólise é considerada variada pela composição dos componentes lignocelulósicos na biomassa (WANG et al, 2017; FOONG et al, 2020).

A pirólise, que utiliza a biomassa como fonte de matéria-prima na produção de energia, é vista com um grande potencial mercadológico e, por isso, pesquisas mundiais estão ocorrendo como o intuito de aperfeiçoar este método (MOTA, 2015). Entretanto, além da biomassa, matérias-primas tais como o plástico, a borracha, o alumínio e os pneus são usados para converter em produtos úteis utilizando o processo de Pirólise (VELMURUGAN, 2021). Então, este é um processo no qual vários materiais podem ser empregados como insumo, ou seja, depende muito da disponibilidade e vocação da localidade de onde se está produzindo. Em suma, o trabalho tem como objetivo explorar a literatura acadêmica sobre o que vem sendo falado sobre o processo de pirólise.

METODOLOGIA

Para o levantamento de informações necessárias para a construção do artigo, buscou-se a base de dados da plataforma de *periódico da CAPES*, que é uma das mais utilizadas para este fim. As palavras-chaves buscadas foram “tipos de pirólise”, “review”, “reatores” e “produtos”, com um recorte temporal que vai de 2017 até 2021. Foram revisados conceitos-chave, os modos de pirólise, os equipamentos utilizados e os produtos. Este trabalho foi motivado por estudos dentro dos processos de graduação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os rendimentos de cada produto da pirólise (biochar sólido, bio-óleo líquido e gás de síntese) são influenciados pelos tipos de matéria-prima usados e pelos parâmetros do processo de pirólise e estes podem ser manipulados ajustando os parâmetros de pirólise. Frequentemente,

a pirólise é classificada em diferentes modos (pirólise rápida, pirólise lenta e pirólise *flash*) pela combinação desses parâmetros. Geralmente, a pirólise tem uma ampla faixa de temperatura (400–1200°C), uma vez que a maioria dos voláteis são formados a uma temperatura de (250–500°C) durante a pirólise de biomassa (NEVES et al, 2011; FOONG et al, 2020). Em temperatura mais amena de pirólise (400°C), os voláteis podem ser recuperados na forma bio-óleo e gás de síntese, resultando em alto rendimento de biochar (FOONG et al, 2020). Diante disso, a Tabela 1 apresenta os tipos de pirólise e as especificações de cada método.

Tabela 1 – Tipo de pirólise.

Tipo de pirólise	Comentários
Pirólise rápida/bio-óleo:	A pirólise rápida é conhecida com bio-óleo como produto principal. A pirólise rápida é geralmente realizada em uma ampla faixa de temperatura (450-850°C) com um curto tempo de residência de vapor (0,5-10s) e uma alta taxa de aquecimento (10-200° C/s). Uma vez que os voláteis liberados deixariam o reator em 10s, o tempo de contato dos voláteis liberados com a superfície do biochar é consideravelmente reduzido. Como resultado, a recombinação de voláteis na superfície do biochar pode ser minimizada, o que eventualmente leva à recuperação de mais voláteis como bio-óleo.
Pirólise lenta/carvão sólido	A pirólise lenta também é conhecida como carbonização, pois produz biochar sólido como o principal produto da pirólise de biomassa. Em contraste com a pirólise rápida, a pirólise lenta é caracterizada por uma taxa de aquecimento mais lenta (0,1–10 °C/s) e um tempo de residência de vapor mais longo (até 550s). Para pirólise lenta, o tempo de processamento pode ir até várias horas para garantir que os voláteis liberados tenham tempo suficiente para recombinação com o biocarvão para maximizar o rendimento do biocarvão. Com isso, uma taxa de aquecimento lenta facilita a quebra de ligações químicas

Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências	mais fracas, mas inofensiva para manter ligações químicas mais fortes.
Pirólise instantânea	A pirólise instantânea é caracterizada por suas taxas de aquecimento extremamente altas ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C/s}$) e tempo de residência de vapor curto ($< 0,5\text{s}$). A pirólise instantânea permite que a alta temperatura seja atingida em um curto espaço de tempo para promover a produção de voláteis, que podem ser recuperados como bio-óleo ou gás de síntese incondensável. Conforme a matéria-prima é aquecida, a maioria de suas ligações químicas será quebrada para liberar mais voláteis; além disso, alguns voláteis quimicamente instáveis se racharão em gás de síntese que não se condensa por causa da rachadura secundária.

Fonte: Adaptado de Foong et al, 2020.

O coração do processo de pirólise é o reator, o lugar onde todas as reações ocorrem (UDDIN et al, 2018; BASU, 2018). No entanto, para realizar a pirólise flash, é necessário ter reatores especiais. Para este processo, é necessária uma atmosfera livre de oxigênio no reator, e uma faixa de temperatura entre 475 e 550°C . Quando o gás flui através da cama, e o sólido se comporta como um líquido (PAPADIKIS; GU; BRIDGWATER, 2009; UDDIN et al, 2018).

Os reatores de pirólise destinados à decomposição térmica da biomassa incluem os seguintes tipos: aqueles com reatores fixos, fluidos, circulantes e vórtices, ou cama de transporte que é movido e girado pneumáticamente, e aqueles com reatores ablativos, centrífugas, auger (LEWANDOWSKI; JANUSZEWICZ; KOSAKOWSKI, 2019). O reator está no centro de qualquer tipo de procedimento de pirólise que tenha sido o conteúdo da invenção, avanço e pesquisa significativa (ZHANG et al, 2005; UDDIN et al, 2018). Com isso, a Tabela 2 mostra a comparação dos diferentes tipos de reatores de pirólise.

Tabela 2 – Tipos de Reator.

Tipo de reator	Comentários
Reator de cama fixa	O sistema de pirólise fixa é simples, confiável e comprovado para combustíveis relativamente uniformes e têm um baixo teor de finos de carvão que

	<p>consistem em um reator com um sistema de resfriamento e limpeza de gás, e foi normalmente usado para produzir carvão vegetal. Os reatores fixos geralmente funcionam com alta preservação de carbono, baixa velocidade de gás e baixo resíduo transportado por um longo e sólido tempo de residência. Um grande problema dos reatores de leito fixo é a formação de piche, embora a recente evolução na conversão térmica e catalítica do piche tenha dado oportunidades viáveis de confiscar piche. No processo de pirólise fixa, a "temperatura" garante que as variáveis, como programa de temperatura, taxas de aquecimento e tempo de residência nas temperaturas, permaneçam dentro dos limites estabelecidos pelo operador e temperaturas finais de pirólise entre 450 e 750 °C, com taxas de aquecimento oscilando entre 5 e 100 °C min/min.</p>
Reator de cama fluidizada	<p>Os reatores de leito fluidizados (borbulhando e circulando) possuem uma tecnologia bem conhecida, e possuem uma série de aplicações industriais, onde se apresentam como vantajosos em escala comercial, ao contrário de outras tecnologias que ainda estão em processo de melhoria. Reatores de leitos fluidizados são usados em muitos projetos para maximizar o produto líquido (bio-óleo) produzido, e vários projetos demonstram sua real capacidade de produzir bio-óleo de boa qualidade. Como a biomassa tem uma densidade muito baixa, é comum em reatores de leitos fluidizados usar um elemento inerte, geralmente areia, para dar estabilidade dinâmica fluida ao processo e ajudar o aquecimento da biomassa. O reator de cama fluidizada compreende uma mistura fluido-sólido que mostra propriedades semelhantes ao fluido. Reatores de cama</p>

	<p>fluidizados parecem ser generalizados e populares porque oferecem reação rápida e transferência de calor, uma ampla e alta área rasa de contato entre o fluido e o sólido, e alta velocidade comparativa.</p>
<p>Cama fluidizadas borbulhantes</p>	<p>O gaseificador de leito fluidizado borbulhante é categorizado como tendo altas taxas de reação, tecnologia bem compreendida, construção e operação simples, controle virtuoso de temperatura, transferência eficiente de calor para partículas de biomassa, e tem leniência superior à faixa de tamanho de partículas. É muito prevalente, pois gera bio-óleo de alta qualidade a partir de uma fonte seca. Uma característica significativa dos reatores de cama de fluidização de bolhas é que estes requerem pequenos tamanhos de partículas de biomassa para atingir altas taxas de aquecimento de biomassa.</p>
<p>Reatores de leito fluidizado circulante (CFB)</p>	<p>Os reatores CFB são comparáveis com reatores de cama fluidizados borbulhante, e este tipo de reator é adequado para grandes quantidades. Existem dois tipos de reatores CFB: circulação única e dupla circulação. O gaseificador CFB é considerado por todas as características dos reatores de cama fluidizados borbulhante, juntamente com uma carga maior em um volume menor. O pirólise CFB é notável por um regulador de temperatura decente no reator.</p>
<p>Reator Ablativo</p>	<p>A pirólise ablativa é principalmente diferente dos procedimentos de cama fluida na ausência de um gás fluidificante. O material conectado à parede derrete fundamentalmente, e o óleo residual evapora como vapor de pirólise. Os reatores de pirólise ablativo têm boa transferência de calor com altas taxas de aquecimento e uma superfície de contato relativamente pequena. Estes também têm alta energia e eficiência de</p>

	<p>custo, já que não é necessário aquecimento e resfriamento de gases fluidificantes, além disso, estes toleram a fixação de unidades de condensação com um pequeno volume em exigir menos espaço a custos mais baixos.</p>
<p>Reator de pirólise à vácuo</p>	<p>Os reatores de vácuo representam um processo lento de pirólise com taxas de transferência de calor mais baixas transmitidas com as tecnologias de leito fluidizadas. Um aquecedor de indução e queimador é usado com sais derretidas. Para este reator, os vapores formados são rapidamente separados do vácuo. Este reator é categorizado pelo tempo de residência mais longo; é conhecido por produzir partículas maiores do que a maioria dos reatores de pirólise rápida. Também não há necessidade de gás transportador, e o processo é mecanicamente complicado; ele precisa de altos custos de investimento. A operação consistente do pirólise a vácuo implica um aparato de entrada de matéria-prima superior que desencoraja os investidores latentes.</p>
<p>Reator Auger</p>	<p>Reatores Auger são usados para trocar matéria-prima de biomassa por um tubo cilíndrico sem oxigênio. Neste reator, o tempo de residência do vapor pode ser alterado flutuando a zona aquecida. Os reatores Auger estão recebendo mais consideração de muitas indústrias de médio porte. Os desafios para o reator Auger incluem peças de agitação na delegacia quente e transmissão de temperatura em grande escala.</p>

Fonte: Adaptado de Uddin et al, 2018.

O bio-óleo da pirólise rápida não pode ser usado diretamente como combustível do motor por apresentar algumas propriedades invejáveis, como alta corrosividade, instabilidade térmica, e alto teor de oxigênio. Vários métodos de atualização, como hidredesoxigenação catalítica, são usados para melhorar a qualidade do combustível do bio-óleo (menor teor de oxigênio). Porém, a rápida desativação do catalisador e também os custos do processo impedem

seu uso, principalmente em aplicações em escala comercial (GHOLIZADEHET et al, 2016; HU; GHOLIZADEHB, 2019).

Para superar este entrave, o catalisador é usado diretamente no processo de pirólise para remover o oxigênio em alguns oxigenados. O catalisador pode definitivamente influenciar o rendimento dos produtos da pirólise (HU; GHOLIZADEHB, 2019). O catalisador para pirólise de biomassa pode ser co-alimentado com a matéria-prima no reator (configuração in situ) ou o catalisador pode ser definido na saída do reator para atualizar o gás volátil de pirólise (configuração ex situ). Tanto in situ quanto ex situ convertem os compostos oxigenados em produtos estáveis (WAN; WANG, 2014; HU; GHOLIZADEHB, 2019).

Em resumo, os catalisadores usados para a pirólise são principalmente ácidos sólidos, como zeólitas, sílica-alumina, catalisadores FCC, alumina, peneiras moleculares, bem como óxidos de metal, como óxido de zinco, zircônia, cério e cromita de cobre. Além disso, outros materiais inorgânicos incluindo cloretos metálicos, fosfatos, sulfatos e metais alcalinos também foram estudados na pirólise catalítica (HU; GHOLIZADEHB, 2019).

A pirólise da biomassa produz três produtos primários, como char, gases e vapores que se condensam a um líquido viscoso à temperatura ambiente. Os rendimentos dos produtos da pirólise de biomassa podem ser melhorados da seguinte forma: (a) carvão vegetal, menos temperatura e menor procedimento de taxa de aquecimento, (b) produtos líquidos, menor temperatura, mas procedimento de taxa de aquecimento mais alta e (c) gás combustível, temperatura mais alta e menor procedimento de taxa de aquecimento. A seguir, na Tabela 3, destaca-se os principais produtos da pirólise de biomassa.

Tabela 3 – Tipos de produtos.

Produtos de pirólise	comentários
Bio-óleo	Também conhecido como óleo de pirólise, bio-óleo bruto, é um líquido de cor marrom escuro, quase preto, com um odor característico de fumaça e uma composição elementar semelhante à biomassa. É uma mistura complexa, contendo compostos oxigenados e alto volume de água, que se origina da umidade da biomassa e das reações. Também pode conter alguma quantidade de partículas de carvão e metais alcalinos dissolvidos das cinzas. A composição da mistura total depende do tipo de biomassa, das condições do processo, do equipamento e da eficiência na separação do carvão e

	<p>da condensação. O Bio-óleo é o principal produto do processo de pirólise. Diversos tipos de pesquisas em todo o mundo, com o objetivo de maximizar e melhorar a quantidade e a qualidade do bio-óleo produzido, estão atualmente sendo realizados. Projetos de reatores são o principal objetivo dos pesquisadores para obter um bio-óleo de melhor qualidade. O produto bio-óleo tem uma série de aplicações: pode ser melhorado para ser usado como combustível de transporte ou como produto químico, e também pode ser usado em turbinas e motores de geração de energia elétrica, ou em caldeiras para gerar calor. Em resumo, o produto bio-óleo tem muitas aplicações e merece grandes investimentos em pesquisa.</p>
<p>Biochar ou char</p>	<p>É o produto sólido do processo de pirólise da biomassa, que é um resíduo carbonáceo. Dependendo da composição da biomassa e das condições do processo de pirólise, o carvão pode ter diferentes propriedades químicas e físicas. Por exemplo, seu teor de carbono pode variar de 53% a 96%, em peso. Além disso, o rendimento e o valor de aquecimento do carvão vegetal também variam em uma ampla faixa (30-90% em peso e 20-36 MJ / kg). Os benefícios potenciais da aplicação do biochar como enriquecimento do solo têm sido destacados fortemente na literatura, abordando questões como manejo de resíduos, produção de bioenergia, aumento da fertilidade do solo através da alteração do pH do solo, retenção de nutrientes por meio de adsorção de cátion, redução das emissões de óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), e dióxido de carbono (CO₂), adsorção de poluentes orgânicos, e melhorias na produtividade.</p>
<p>Syngas (gás de síntese) ou Biogás</p>	<p>Em processos lentos de pirólise, cerca de 10-35% do biogás é produzido. A <i>syngas</i> produzida a partir da pirólise de biomassa pode ser utilizada como uma fonte renovável alternativa de combustível para processos de combustão industrial, bem como para motores de combustão interna. Na geração de energia, transporte e outros setores, o combustível gasoso pode ser usado em motores comerciais convertidos a gasolina e diesel, o que era bastante comum entre 1901 e 1920 e, depois disso, devido à disponibilidade de combustíveis</p>

Líquidos baratos, o uso de combustíveis gasosos em motores IC. No entanto, nos últimos anos, à medida que o foco se moveu em direção a combustíveis renováveis para motores, o uso de *syngas* em motores de combustão interna tem, mais uma vez, ganhado interesse. O rendimento de *syngas* é altamente influenciado pela temperatura da pirólise, e é possível alcançar um rendimento maior na pirólise flash com altas temperaturas. Syngas compreende principalmente em hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO). Também pode conter um pequeno volume de nitrogênio (N₂), água, dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos como C₂H₄, CH₄, C₂H₆, cinzas, e assim por diante, que dependem da matéria-prima de biomassa e das condições de pirólise. Esses componentes são obtidos durante várias reações endotérmicas em altas temperaturas de pirólise.

Fonte: Uddin et al (2018) e Hu, Gholizadehb (2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho visitou várias pesquisas realizadas no âmbito da pirólise e os pontos mais importantes são os apresentados nos tópicos abaixo:

- Existem vários tipos de processos de pirólise que podem ser usados para converter a biomassa, e isto depende do processo utilizado e também da temperatura da pirólise. Ainda há diferentes modos de se empregar a pirólise, como é o caso da pirólise rápida, lenta, e a *flash*;
- Os principais produtos da pirólise da biomassa são o bio-óleo, o biochar e o gás de síntese. O produto bio-óleo tem várias aplicações: pode ser melhorado para ser usado como combustível de transporte ou como produto químico. O bio-carvão é considerado uma adição promissora para o solo; e o biogás pode ser uma fonte renovável alternativa de combustível para processos de combustão industrial, bem como para motores de combustão interna.
- Os reatores de leito fluidizado são usados em muitos projetos para maximizar o produto líquido (bio-óleo) produzido, e vários projetos demonstram sua capacidade real de

produzir bio-óleo de boa qualidade. Os reatores Auger têm potencial para serem usados na produção em pequena escala;

- Alguns catalisadores, como os de base zeólita, também foram testados ou desenvolvidos para pirólise catalítica de biomassa e têm contribuído eficientemente para o processo.

REFERÊNCIAS

BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2018.

BRIDGWATER, A.; GERHAUSER, H.; EFFENDI, A. **Biomass Pyrolysis**, Google Patents, 2009.

FOONG, et al. **Valorization of biomass Waste to Engineered Activated Biochar by Microwave Pyrolysis: Progress, Challenges, and Future Directions**. Chemical Engineering Journal. Vol. 389. 2020.

GHOLIZADEH, M.; GUNAWAN, R.; HU, X.; KADARWATI, S.; WESTERHOF, R.; CHAIWAT, W.; HASAN, M. M.; LI, C.-Z. **Fuel Process. Technol.**, 150 (2016), pp. 132-140.

HU, X.; GHOLIZADEHB, M. **Biomass pyrolysis: A review of the Process Development and Challenges from Initial Researches up to the Commercialisation Stage**. Journal of Energy Chemistry. Vol. 39, 2019.

KABBIR, G; HAMEED, B. H. **Recent Progress on Catalytic Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 70. 2017.

LAM, S. S.; LIEW, R. K.; LIM, X. Y. ANI, F. N.; JUSOH, A. **Fruit Waste as Feedstock for Recovery by Pyrolysis Technique**. Int. Biodeter. Biodeg., 113 (2016), pp. 325-333.

LEWANDOWSKI, W. M.; JANUSZEWICZ, K.; KOSAKOWSKI, W. **Efficiency and Proportions of Waste tyre Pyrolysis Products Depending on the Reactor type—A Review**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Vol. 140, 2019.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. **Pyrolysis of wood/Biomass for bio-oil: a Critical Review**. Energy & Fuels, 20 (2006), pp. 848-889.

MOTA, et al. **Pirólise da Biomassa Lignocelulósica: uma Revisão**. Revista Geintec – Gestão, Inovação e Tecnologias, v. 5, n. 4, p. 2511-2525, 2015.

NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A. TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A. **Caracterização e Previsão de Produtos de Pirólise de Biomassa**. Prog. Energy Combust. Sci., 37 (2011), pp. 611-630.



PAPADIKIS, K.; GU, S.; BRIDGWATER, A. **CFD Modelling of the fast Pyrolysis of Biomass in Fluidised bed Reactors. Part b: heat, momentum and mass transport in Bubbling Fluidised beds.** Chem. Eng. Sci. 2009, 64, 1036–1045.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; PILO-VELOSO, D. A *Pirólise como Técnica Analítica.* *Química Nova*, v. 31, p. 1543-1552, 2008.

UDDIN, M. N.; TECHATO, K.; TAWEEKUN, J.; RAHMAN, M. M.; RASUL, M. G.; MAHLIA, T. M. I.; ASHRAFUR, S. M. **An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies.** *Energies* 2018, 11, 3115.

VELMURUGAN, V. **Review of Research and Development on Pyrolysis Process.** *Materials Today: Proceedings.* 2021.

WAN, S.; WANG, Y.; *Front. Chem. Sci. Eng.*, 24 (2014), pp. 1-15.

WANG, S.; DAI, G.; YANG, H.; LUO, Z. **Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Mechanism: a State-of-the-art Review.** *Prog. Energy Combust. Sci.*, 62 (2017), pp. 33-86.

ZHANG, S.; YAN, Y.; LI, T.; REN, Z. **Upgrading of Liquid Fuel From the Pyrolysis of Biomass.** *Bioresour. Technol.* 2005, 96, 545–550.