

Thèse de doctorat

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 602

Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes

Spécialité : Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (SIS)

Par Valentin CHATAIGNER

« Etude des flux de chaleur et de matières dans un réacteur de pyrolyse continu, vertical et coaxial pour la production de biochar de haute qualité »

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 22 mai 2024

Unité de recherche : UMR C6607 Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes

Rapporteurs avant soutenance :

Laurent VAN DE STEENE	Cadre scientifique HDR des EPIC / CIRAD Montpellier
Hervé JEANMART	Professeur Ecole Polytechnique de Louvain

Composition du Jury :

Président :	Pascaline PRÉ	Professeure IMT Atlantique Nantes
Examineurs :	Khaled LOUBAR	Maitre de Conférences HDR IMT Atlantique Nantes
Dir. de thèse :	Jérôme BELLETTRE	Professeur Nantes Université
Co-encadrant. de thèse :	Dominique TARLET	Maître de Conférences HDR Nantes Université
Invité	François RICOUL	Chef du pôle pyrogazéification S3d Ingénierie Nantes

Titre : Etude des flux de chaleur et de matières dans un réacteur de pyrolyse continu, vertical et coaxial pour la production de biochar de haute qualité

Mots clés : Ecorces de pin, Pyrolyse, Biochar, Réduction partielle, Modélisation

Résumé : Cette thèse industrielle sous contrat CIFRE est le fruit d'une collaboration entre l'entreprise Florentaise, la société S3d Ingénierie et le laboratoire de thermique et d'énergie de Nantes (LTeN). L'objectif global du projet est de développer une solution industrielle de production de biochar par pyrolyse respectant certaines spécifications agronomiques via l'exploitation du prototype de pyrolyse Ariane® et le développement d'un outil de dimensionnement numérique.

Le prototype de pyrolyse permettant initialement de produire un biochar à 200 m²/g lorsque le débit d'écorces de pin à 15% d'humidité, criblées en 4 – 15 mm s'élevait à 20 kg/h, permet désormais de produire un biochar dont la surface spécifique s'élève à 420 m²/g grâce à l'ajout d'une zone de réduction partielle in-situ post pyrolyse. Le carbone du biochar est également élevé avec des taux de carbone fixe se situant entre 85 et 90%. Cette qualité de biochar est obtenue en pyrolysant les écorces durant 1h30, entre 400 et 700°C avec une vitesse de chauffe de 20 K/min, puis en réduisant 20% du carbone du biochar majoritairement à la vapeur d'eau. Le fonctionnement du pyrolyseur a été validé et pourra

ainsi produire à échelle industrielle du biochar de haute qualité.

Le développement d'un modèle numérique s'est appuyé sur les résultats expérimentaux et sur une étude bibliographique pour traduire les réactions thermochimiques de la pyrolyse dans une géométrie identique à celle du prototype. Une fois la correspondance entre les résultats théoriques et expérimentaux validée, les dimensions et le débit de biomasse ont été modifiés vers celles d'un démonstrateur de plus grande taille. La largeur de la zone de pyrolyse a été clairement identifiée comme le facteur limitant du dimensionnement.

Une étude théorique est venue conclure ces travaux avec l'étude des réactions carbone-syngas dans la zone de réduction partielle étant à l'origine du transfert des 20% de carbone du biochar vers le syngas et de l'augmentation des fractions volumiques dans le syngas d'H₂ passant de 6 à 17% et de CO₂ passant de 19 à 25%.

Title : Study of heat and mass flows in a continuous, vertical and coaxial pyrolysis reactor for the production of high-quality biochar

Keywords : Pine Bark, Pyrolysis, Biochar, partial reduction, Modeling

Abstract : This industrial thesis under CIFRE contract is the result of a collaboration between the Florentaise company, the company S3d Ingénierie and the Nantes Thermal and Energy Laboratory (LTeN). The overall objective of the project is to develop an industrial solution for the production of biochar by pyrolysis in accordance with certain agronomic specifications through the exploitation of the Ariane® pyrolysis prototype and the development of a numerical sizing tool.

The pyrolysis prototype initially produced a biochar with 200 m²/g when the pine bark flow at 15% of moisture, screened in 4 – 15 mm was 20 kg/h, can now be used to produce a biochar with a specific surface area of 420 m²/g thanks to the addition of a post-pyrolysis in-situ partial gasification zone. The carbon in biochar is also high with fixed carbon levels between 85 and 90%. This quality of biochar is obtained by pyrolyzing the bark during 1h30, between 400 and 700°C with a heating rate of 20 K/min, and then by a gasifying 20% of biochar's carbon mostly with steam.

The operation of the pyrolyzer has been validated and will thus be able to produce high-quality biochar on an industrial scale.

The development of a numerical model was based on the experimental results and a literature review to translate the thermochemical reactions of pyrolysis into a geometry identical to that of the prototype. Once the correspondence between the theoretical and experimental results was validated, the dimensions and the biomass flow rate were modified towards those of a larger demonstrator. The width of the pyrolysis zone was clearly identified as the limiting factor of the sizing.

A theoretical study concluded this work with the study of the carbon-syngas reactions in the partial gasification zone at the origin of the transfer of 20% of carbon from biochar to syngas and increase in volume fractions in syngas H₂ from 6 to 17% and CO₂ from 19 à 25%.