

氏名（本籍）	Agusta Samodra PUTRA（インドネシア）		
学位の種類	博士（生物資源工学）		
学位記番号	博 甲 第 9691 号		
学位授与年月日	令和 2 年 9 月 25 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審査研究科	生命環境科学研究科		
学位論文題目	Life Cycle Assessment for Integrated Dissolving Pulp and Furfural Production from Oil Palm Empty Fruit Bunch (オイルパーム空果房を原料とする溶解パルプとフルフラール生産に関する環境影響評価)		
主査	筑波大学准教授	博士（農学）	野口 良造
副査	筑波大学准教授	博士（農学）	トファエル アハメド
副査	筑波大学教授	博士（農学）	大井 洋
副査	筑波大学准教授	博士（農学）	中川明子

論 文 の 要 旨

世界の溶解パルプ生産量は約 850 万トン（2017 年）であり、セルロースと再生繊維の需要増加によって、今後も溶解パルプ生産量の増加が予測されている。一方、溶解パルプ生産の拡大と持続可能性の両立を図るために、非木材材料を原料とした溶解パルプに関する研究とその生産技術の改善が継続的に行われている。オイルパームの空果房（EFB）は、パームオイル搾油工場から排出される多量の非木材バイオマス廃棄物である。現在、再利用される EFB の代表的かつ商業的な付加価値処理は堆肥化である。しかし、EFB のほとんどがそのような処理をされずにオイルパーム農園へ直接廃棄されている。したがって、EFB を溶解パルプの原料として利用することは、EFB へ高い付加価値を与えることになり、また環境保全の観点からも重要な解決策となる。

一方で、拡大する溶解パルプの製造法では、原料の通常 150~170℃の前加水分解およびクラフト蒸解（高温高圧前加水分解・蒸解）プロセスが必要である。前加水分解プロセスにおいて、キシラン等が前加水分解液（PHL）へ溶解する。この PHL 中のキシランからフルフラールなどのバイオリファイナリー製品を生産することは、溶解パルプ生産の経済性改善と持続的発展の観点からも魅力的である。

本論文では、EFB 利用による溶解パルプとフルフラールの統合化された共同生産の実現可能性を明らかにすることを課題としている。そのために第一に、実験室規模で EFB から溶解パルプとフルフラールを製造し、実験データとシミュレーションによって共同生産におけるマスバランスを把握することを目的としている。第二に、ライフサイクルアセスメント（LCA）を用いて、共同生産方法に関する環境影響評価と経済性評価を行うことを目的としている。

著者は、第一章において本論文の研究背景と研究目的の詳細を述べている。特に、溶解パルプ製造の現状と展望、溶解パルプ製造のための EFB 利用、フルフラール製造のための PHL 利用の詳細を明らかにした。また、溶解パルプとフルフラールの共同生産の実現可能性を把握するために、LCA、ライフサイクルコスト計算（LCC）、累積エネルギー需要量（CED）、および技術経済評価（TEA）の手法の重要性について言及した。

著者は第二章において、実験室規模で EFB から溶解パルプとフルフラールを製造する実験を行った。大気圧下での硝酸前加水分解とそれに続く大気圧下でのソーダ蒸解を提案し、溶解パルプの品質およびフルフラールの調製条件を明らかにした。ソーダ蒸解パルプをモノ過硫酸（P_{sa}）、二酸化塩素（D₀、D₁）および過酸化水素（E_p）を用いる無塩素（ECF）漂白 P_{sa}-D₀-E_p-D₁ シーケンスで漂白した。その結果、得られたパルプは、溶解パルプのインドネシア国家規格を満たす 90.4%の ISO 白色度と 6.5 cP の粘度を示した。一方、そのキシラン

含有量は 8.6%となり、木材由来の市販溶解パルプの平均 (5%以下) と比べて高い値であった。また、EFB 溶解パルプの α -セルロース含有量は 83.0%で、インドネシア国家規格と市販パルプの平均値よりも低かった。これらは改善する必要があるものの、著者は EFB から溶解パルプの製造が可能であることを示した。また、硝酸前加水分解液に酸触媒処理を行い、キシランから高収率でフルフラールを製造する条件を見出し、EFB 重量の 6.2%のフルフラールを得た。

著者は第三章において、EFB 利用の溶解パルプとフルフラールの共同生産を対象とした帰結的 LCA (cLCA) を行い、EFB 利用による溶解パルプ生産とフルフラール生産における環境影響評価を行った。cLCA では、シナリオ 1 (木材原料の 50%を EFB 硝酸前加水分解・大気圧蒸解に置き代えた生産体系)、シナリオ 2 (木材原料の 100%を EFB 硝酸前加水分解・大気圧蒸解に置き代えた生産体系) を設定した。また、通常の高温前加水分解・高圧蒸解プロセスにより、その前加水分解では、硝酸前加水分解と比べてフルフラールの生産量は減少するが、 α -セルロース含有量は改善できる。そこで、シナリオ 3 (木材原料の 100%を EFB 高温前加水分解・ソーダ・AQ 蒸解に置き代えた生産体系) を設定した。環境影響評価は、シナリオ 3 を対象に、地球温暖化ポテンシャル (GWP)、酸性化ポテンシャル (AP)、富栄養化ポテンシャル (EP)、および人間毒性ポテンシャル (HTP) について行った。その結果、シナリオ 3 は、シナリオ 1、2 および既存の生産体系 (木材高温前加水分解・クラフト蒸解) よりも GWP、AP、EP、および HTP の数値が小さく、溶解パルプ製造における環境影響を改善するための最も有望なシナリオとして推奨されることを明らかにした。

著者は第四章において、シナリオ 3 の LCA、LCC、CED、および TEA を行い、EFB を原料とした溶解パルプとフルフラールの共同生産の実現可能性を検討した。コスト計算のために、現実的な産業規模でのプロセス条件を追加し、TEA を行った。その結果、EFB を原料とした溶解パルプとフルフラールの共同生産において、EFB の廃棄物として価値の評価が、経済、環境、およびエネルギーの面で利点を提供することを示した。本研究では、二つの経済評価が行われ、シナリオ 3 にもとづく 1 kg の溶解パルプの生産の LCC は 71.11 円、技術経済評価シミュレーションでは 15 年後において 54.44 円となることを示した。

以上を総括すると、本論文では、実験室規模の主要な実験データ抽出から、環境、エネルギーおよび経済の観点からの実現可能性評価までの包括的な研究を実施するとともに、LCA を用いた環境影響評価の結果から、論文を通じて、EFB を原料としたバイオリファイナリー製品としての溶解パルプとフルフラールの共同生産の優位性が示された。

審 査 の 要 旨

本論文は、EFB 利用による溶解パルプとフルフラールの共同生産のための実験的考察と、実用化に向けた環境影響評価を対象とした。まず、実験室規模での EFB 利用の溶解パルプとフルフラールの共同生産実験において、硝酸前加水分解と、それに続く大気圧下でのソーダ蒸解による溶解パルプの調製を行い、得られたパルプをインドネシアの国家規格との比較を行い、その品質の評価を行った。さらに、cLCA、LCC、CED、TEA による環境影響評価と技術評価、経済評価を行い、EFB を原料とした高付加価値を有するバイオリファイナリープロセスの新たな提案と、数量的評価による環境影響評価を含む技術移転の可能性について論じた。これらの成果は、生物資源工学分野の学術的価値に大きく貢献した。以上から、本論文は、高い学術的価値を有し、博士論文としてふさわしい内容であると判断される。

令和 2 年 7 月 22 日、学位論文審査委員会において、審査委員全員出席のもとに論文の審査及び最終試験を行い、本論文について著者に説明を求め、関連事項について質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって合格と判定された。

よって、著者は博士 (生物資源工学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものとして認める。