

Transformation de déchets plastiques de polypropylène en carburant pour usage domestique

Seydou DIAWARA, Issiaka TRAORE, Souleymane SANOGO

Laboratoire d'optique de spectroscopie et des sciences atmosphériques (LOSSA), Faculté des Sciences et Techniques, Université des Sciences des Techniques et des Technologies de Bamako.

Correspondant : traoreamenophis@gmail.com

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 10 janvier 2024

Reçu en format révisé le : 14 août 2025

Accepté le : 14 octobre 2025

Mots-Clés :

Déchets plastiques, Polypropylène, Pyrolyse, Carburant, Essence

Keywords : Plastic waste, polypropylene, Pyrolysis, Fuel, Gasoline

RESUME

La prolifération des déchets plastiques non biodégradables dans l'environnement constitue une menace croissante pour notre planète, engendrant des conséquences désastreuses sur les écosystèmes et la santé humaine. Face à ce défi environnemental majeur, la présente étude s'oriente vers la transformation des déchets plastiques en carburant par le biais de la pyrolyse non catalytique thermique. Pour ce faire un dispositif expérimental a été conçu avec des matériaux locaux et à moindre coût. Grâce à ce dispositif, un liquide de masse volumique $787,59 \text{ kg/m}^3$ a été recueilli et les rendements massiques, de conversion et énergétique du processus évalué à 83 %, 81 % et 49,3 % respectivement. L'analyse de ce liquide par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a mis en évidence des signatures spectrales comparables à celles des carburants tels que l'essence, le gazole et le kérosène. Le bilan technico-économique a montré qu'au-delà de deux ans d'exploitation, un retour sur investissement est envisageable. Les résultats de l'étude nous ont permis de comprendre que ce procédé de recyclage des déchets représente une source d'énergie qui pourrait être économiquement rentable à petite échelle, constituant ainsi une source potentielle de revenus.

ABSTRACT

The proliferation of non-biodegradable plastic waste in the environment is a growing threat to our planet, causing disastrous consequences for ecosystems and human health. Faced with this major environmental challenge, this study focuses on the transformation of plastic waste into fuel through non-catalytic thermal pyrolysis. To do this, an experimental device was designed with local materials and at a lower cost. Thanks to this device, a liquid with a density of 787.59 kg/m^3 was collected and the mass, conversion and energy yields of the process were estimated at 83%, 81% and 49.3% respectively. Analysis of this liquid by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) revealed spectral signatures comparable to those of fuels such as gasoline, diesel and kerosene. The technical and economic assessment showed that after two years of operation, a return on investment is possible. The results of the study allowed us to understand that this waste recycling process represents a source of energy that could be economically profitable on a small scale, thus constituting a potential source of income.

I. INTRODUCTION

La croissance démographique mondiale et le besoin croissant d'améliorer nos conditions de vie ont entraîné une augmentation substantielle de la consommation de polymères, principalement sous forme de plastiques (Viswanath, 2010). En raison de leurs caractéristiques exceptionnelles telles que leur malléabilité, leur non-toxicité, leur légèreté, leur résistance mécanique, ainsi que leur durabilité face à la corrosion et aux acides, ces matériaux sont devenus indispensables dans de nombreux secteurs tels que la construction, la santé, l'électronique, l'automobile, l'emballage, et bien d'autres (Dittenber et al., 2012).

La demande croissante de plastiques a entraîné une production mondiale atteignant 58 millions de tonnes en 2015 (Plastics Europe, 2015). Ces plastiques représentent

entre 8 et 12 % du total des déchets ménagers mondiaux, une proportion qui devrait augmenter pour atteindre entre 9 et 13 % d'ici 2025, selon les pays (Hoorweg et Bhada, 2012). Cette croissance rapide de la demande a conduit à une accumulation considérable de déchets plastiques dans le monde (Plastics Europe, 2021).

Au Mali la quantité de déchets générés par jour est estimée à environ $5000 \text{ m}^3/\text{j}$, dont $3000 \text{ m}^3/\text{j}$, pour la seule ville de Bamako.

Les déchets plastiques représenteraient la troisième catégorie la plus abondante parmi les déchets domestiques dans le district de Bamako, soit environ 14% (Adamou et al., 2023).

L'accumulation de déchets a des conséquences environnementales néfastes en raison de leur incapacité à se dégrader et des difficultés liées à leur recyclage. Cela contribue à une durée de vie utile limitée, qui varie de quelques jours à trois ans pour de nombreux produits en

plastique (Ncube et al., 2021). Une fois hors d'usage, ces déchets ont un temps de décomposition disproportionné, s'étalant sur des centaines d'années (Jalaluddin, 2017). Pour gérer ces déchets, trois méthodes prédominantes sont mises en œuvre : l'incinération, le recyclage et la mise en décharge. L'incinération génère des gaz à effet de serre tandis que la mise en décharge requiert d'importantes surfaces (Sadaka, 2010 ; Merrington, 2017).

Par conséquent, le recyclage des plastiques apparaît comme une solution prometteuse, se déclinant en recyclage mécanique et en recyclage chimique. Ce dernier convertit les déchets plastiques en combustibles liquides via des procédés chimiques tels que la pyrolyse et la gazéification. La pyrolyse, réalisée en l'absence d'air, dans un système fermé à une température comprise entre 300 et 900 °C, convertit les déchets plastiques en produits utiles comme des carburants (diesel et essence) ou des produits chimiques (monomères) utilisés dans l'industrie pétrochimique (Sharuddin et al., 2016). En outre, les plastiques peuvent être transformés en carburants sans soufre et de qualité similaire aux carburants fossiles traditionnels.

Malgré les nombreuses études qui ont mis en évidence les avantages qu'offrent la pyrolyse, notre étude vise à concevoir avec les matériaux locaux un système de production de combustible liquide à partir de déchets solides en accord avec les principes de l'économie circulaire et du développement durable. Il s'agira donc d'évaluer l'efficacité énergétique et économique du dispositif de conversion des plastiques en carburant mis en place.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 Matériels

a- Matière première utilisée

Au cours de cette étude, nous avons utilisé un seul type de plastique, le PolyPropylène (PP) pour produire du carburant. Les différentes études de pyrolyse réalisées sur ce polymère ont mis en évidence un rendement massique élevé de la fraction liquide par rapport aux fractions de gaz et de charbon (coke) produits. Aussi, la prévalence abondante du polypropylène dans diverses décharges de déchets solides publiques a motivé ce choix.

Il est à rappeler que le polypropylène est un polymère thermoplastique appartenant à la famille des polyoléfines. Il est constitué d'une chaîne linéaire d'hydrocarbures formée à partir de l'addition de molécules de propylène qui sont reliées entre elles par réaction de polymérisation (polyaddition). Selon la stéréoisométrie du substituant méthyle, le polypropylène présente trois structures de tacticités différentes. Dans le polypropylène isotactique, les substituants méthyles sont tous orientés du même côté de la chaîne. À l'opposé, le polypropylène syndiotactique présente une alternance du groupement méthyle de part et d'autre de la chaîne. Enfin, lorsque le groupement méthyle est réparti de manière aléatoire par rapport à la

chaîne du polymère, on parle alors de polypropylène atactique.

b- Dispositif expérimental

Afin d'étudier la pyrolyse non catalytique du polypropylène, les réactions de pyrolyse ont été menées dans un dispositif à l'échelle du laboratoire (Figure 1). Il ne possède ni alimentation, ni système de soutirage. Le réacteur (figure 1-a) cocotte-minute en aluminium de 6 litres de volume permet de chauffer la charge placée à l'intérieur jusqu'à des températures avoisinant 400 °C à l'aide d'un brûleur (figure 1-b) WINDPROOF CAMPING STOVE d'une puissance maximale de 2800 W. Un condenseur (figure 1-c) est raccordé à la sortie du réacteur et à un récipient (figure 1-d) pour recueillir les condensats. Les produits non condensables seront évacués à l'aide d'un tuyau (figure 1-e) vers le milieu extérieur.

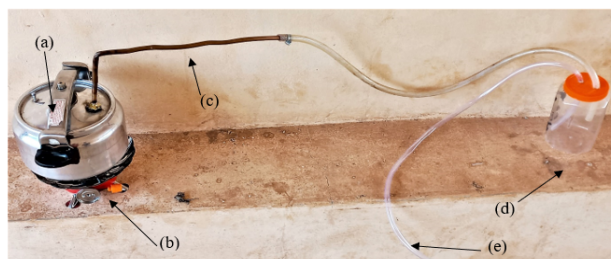


Fig.1. Dispositif expérimental conçu pour la pyrolyse : a) réacteur ; b) brûleur ; c) condenseur ; d) récipient ; e) tuyau vers l'extérieur

II.2 METHODE

a- Procédure expérimentale

Les déchets plastiques sous forme solide collectés ont été nettoyés avec du savon liquide et de l'eau avant d'être découpés en morceaux adaptés à la taille du réacteur. L'expérience a consisté à introduire 300 g de PP dans le réacteur sans catalyseur, puis à faire passer la température du réacteur de la température ambiante à 400 °C. Les gaz de pyrolyse traversent un condenseur en cuivre, puis, le condensat est recueilli dans un récipient refroidi avec de l'eau de robinet. Les gaz non condensés sont évacués par un tuyau d'évacuation, tandis que les résidus restent au fond du réacteur et sont récupérés à la fin de la réaction. Les produits de dégradation ont été classés en trois groupes : les produits liquides, les produits gazeux et les résidus. La procédure expérimentale a duré 50 min.

b - Bilan massique

Le bilan massique permet de quantifier les matières entrantes et les produits sortants. Le réacteur de pyrolyse a été rempli de polypropylène, qui est considéré comme un intrant. Le résidu solide (char), le carburant (carb) et les gaz produits à la fin de la réaction sont considérés comme des extrants. Le bilan massique de cette technique de conversion thermochimique est :

$$M_{pp} = M_{char} + M_{carb} + M_{gaz} \quad (1)$$

Où M_{pp} , M_{char} , M_{carb} et M_{gaz} représentent respectivement la masse de polypropylène, de charbon, de carburant et de gaz. Notre étude s'est limitée à la détermination de la masse de carburant générée lors du processus de pyrolyse, sans tenir compte des quantités de charbon et de gaz produites. Selon plusieurs études, notamment celles menées par Walendziewski en 2005 (avec une fraction de gaz de 2,2% et de résidu solide de 1,1%) et Yoon et al en 1999 (avec une fraction totale de gaz et de résidu solide de 6%), les fractions de gaz et de résidu solide sont négligeables comparées à la fraction liquide.

c - Bilan énergétique

Le bilan énergétique du procédé de pyrolyse peut être écrit comme suit :

$$E_{brûleur} + E_{pp} = E_{char} + E_{carb} + E_{gaz} \quad (2)$$

Où, $E_{brûleur}$ et E_{pp} sont l'énergie fournie par le brûleur et celle du polypropylène. E_{gaz} , E_{carb} et E_{char} désignent respectivement l'énergie de sortie du gaz, du carburant et du résidu solide résultant de la pyrolyse.

L'énergie du PP a été calculée par la formule :

$$E_{pp} = M_{pp} \times PCI_{pp} \quad (3)$$

Où $PCI_{pp} = 43,5$ MJ/kg et désigne le pouvoir calorifique inférieur du polypropylène (Kassargy, 2018).

$$E_{carb} = m_{carb} \times PCI_{carb} \quad (4)$$

$PCI_{carb} = 42,3$ MJ/kg (Kassargy, 2018)

Le rendement de conversion du PP en carburant par le procédé de pyrolyse est estimé par la relation :

$$\eta_{conversion} (\%) = \frac{E_{carb}}{E_{pp}} = \frac{m_{carb} \times PCI_{carb}}{m_{pp} \times PCI_{pp}} \quad (5)$$

Tandis que le rendement massique de la fraction liquide est :

$$\eta_{massique} (\%) = \frac{m_{carb}}{m_{pp}} \quad (6)$$

La relation $\eta_{conversion} = 0,97 \times \eta_{massique}$ nous autorise désormais à considérer ces deux types de rendement comme équivalents dans le cadre de cette étude.

Quant au rendement énergétique du processus, il est obtenu par la relation :

$$\eta_{énergétique} (\%) = \frac{E_{carb}}{E_{pp} + E_{brûleur}} \quad (7)$$

en négligeant les contributions des énergies E_{char} et E_{gaz} conformément à l'hypothèse formulée en II.2-b.

d - Bilan technico-économique

Pour évaluer la viabilité technique et économique du processus de pyrolyse utilisant des matériaux locaux, les coûts des équipements, les coûts d'exploitation, ainsi que les revenus ont été évalués, en supposant que le coût

d'achat de la matière première (le polypropylène) et les coûts liés à la main-d'œuvre ne sont pas inclus dans le calcul du coût de production du combustible.

L'énergie fournie par le brûleur au réacteur a été déterminée par la relation :

$$E_{brûleur} = P \times t \quad (8)$$

Où P représente la puissance maximale du brûleur WINDPROOF CAMPING STOVE=2800 W

t : la durée totale du procédé de pyrolyse = 50 minutes

Le coût de cette énergie sera équivalent aux frais d'exploitation.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

a - Caractéristiques du carburant obtenu

La pyrolyse non catalytique de 0,300 kg de polypropylène durant 50 min a donné 0,25 kg de carburant (figure 2) dont la masse volumique était de 787,59 kg/m³. La viscosité a été déterminée à l'aide d'un viscosimètre à chute de bille et une valeur de 0.7 mm²/s à 40 °C a été obtenue. La masse volumique obtenue nous incline à penser que la nature du carburant est similaire de celle de l'essence en référence aux travaux de Kassargy (2018). Le tableau 1 résume les caractéristiques du liquide.

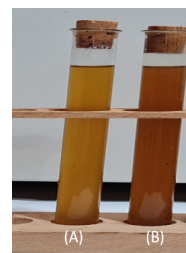


Fig.2. Carburant filtré à gauche (A) et brute à droite (B)

Table 1. Caractéristiques du liquide résultant de la pyrolyse de cette étude comparées aux normes européennes, ainsi qu'à celle de Kassargy.

	Etude de Kassargy	Cette étude	Norme diesel EN 590	Norme essence EN 228
Masse volumique (kg/m ³)	777	787,59	820-875	720-775
Viscosité (mm ² /s)	0,6	0,7	2-4,5	

L'analyse du spectre infrarouge de la fraction liquide permettra une meilleure identification de la nature du carburant produit.

b -Analyse infrarouge par transformée de Fourier (FTIR) du carburant obtenu

L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été utilisée pour déterminer les groupes fonctionnels présents dans l'échantillon de carburant. Le spectre infrarouge de la figure 3 montre plusieurs bandes d'absorption dans la gamme de 400 à 4000 cm^{-1} . Ces bandes correspondent aux groupes fonctionnels de la molécule, et leurs nombres d'onde sont indiqués dans la table 2.

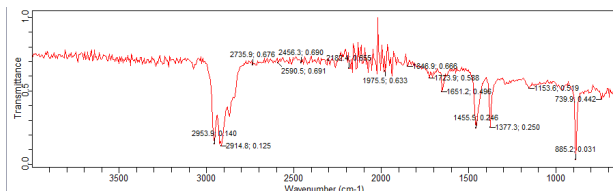


Fig.3. Spectre FTIR du carburant dans la région 400-4000 cm^{-1} .

Le spectre FTIR présente plusieurs similitudes de formes avec ceux des hydrocarbures comme l'essence, le diesel et le kérosène. En effet, la présence de pics dans la région de 2954-2852 cm^{-1} et de 1455-1377 cm^{-1} est due respectivement aux élongations des vibrations des liaisons C-H confirmant ainsi la présence d'hydrocarbures aliphatiques. Cette présence est confirmée par la présence des vibrations de déformation du groupement méthyle dans la région 1377-1455 cm^{-1} . Les pics d'absorption de la figure 3 révèle que le liquide issu de notre processus de pyrolyse présente des propriétés similaires à celles décrites dans les études de Chandran et al., 2020 et Khan et al., 2016.

Ces études ont également mis en évidence de fortes ressemblances entre les spectres de l'essence, du gazole et du kérosène. Cependant, le kérosène et le gazole ne présentent pas de pics d'absorption aux longueurs d'onde 3025 et 2958 cm^{-1} , contrairement à l'essence.

En se basant sur cette observation, on peut conclure partiellement que le produit obtenu dans notre étude est de l'essence.

Table 2. Bandes d'absorption FTIR de la fraction liquide

Fréquence de vibration (cm^{-1})	Nature de la vibration	Nature du groupement fonctionnel
2953,9	Elongation C-H	alcane
2914,8	Elongation C-H	alcane
2852	Elongation C-H	alcane
1651,2	Elongation C=C	Alcène
1455,5	Déformation C-H	Alcane
1377,3	Déformation C-H	alcane
1153,6	Elongation C-O	Ether
885,2	Déformation hors du plan C-H	Alcène
739,9	Déformation hors du plan C-H	Alcène

c - Test de performance du carburant obtenu

Afin de nous assurer que le liquide pyrolytique peut être utilisé directement comme carburant, nous l'avons testé sur une lampe à pétrole traditionnelle fabriquée à l'interne. L'expérience est illustrée à la figure 4.



Fig.4. Lampe traditionnelle fonctionnant avec le carburant pyrolytique

Nous observons une inflammation rapide, vive et intense de la mèche, ce qui montre que notre carburant brûle facilement comme l'essence. Ce test montre que le carburant peut être utilisé tel quel. Toutefois, des analyses plus poussées restent à faire sur la « qualité » de ce carburant.

d - Rendement énergétique du processus de pyrolyse

Les rendements massique et de conversion de la fraction liquide à la température de 400 $^{\circ}\text{C}$, sont respectivement de 83 % et 81 %.

Ces résultats sont en bon accord avec les études menées par Sakata et al., 1999 ; Gao, 2010 ; FakhrHoseini et Dastanian, 2013, qui ont obtenu un rendement massique respectif de 80,1 % à 380 $^{\circ}\text{C}$, 84,2% à 450 $^{\circ}\text{C}$ et de 81,32 %-82,12% à 500 $^{\circ}\text{C}$. Aussi, Gebre et al., dans leur publication de 2021, ont affirmé que des études antérieures indiquaient que plus de 80 % de rendement massique de la fraction liquide pouvaient être obtenus à partir de la pyrolyse de plastiques purs.

Quant au rendement énergétique, sa valeur obtenue par l'équation (7) est de 49,3 %. Au regard de cette valeur relativement faible, il s'avère nécessaire de mener une étude technico-économique afin d'évaluer l'efficacité du processus.

e- Bilan technico-économique

Pour une production destinée à une consommation domestique, la table 3 présente le bilan technico-économique du procédé.

Table 3. Bilan technico-économique du procédé.

Désignation	Prix en FCFA	Coûts annuel FCFA
Capital initial d'investissement (coût du réacteur)	20000	20000
Coût d'exploitation (bombe de gaz pour produire 1L de carburant)	807	193 680
Main d'œuvre	-	-
Coût d'achat de la matière première	-	-
Revenu (prix de vente d'un litre)	864	207 360

Le coût de l'énergie fournie par le brûleur au réacteur $E_{\text{brûleur}}$ a été déterminé en prenant en considération le fait qu'au cours de l'expérience, un quart (1/4) du gaz contenu dans la bouteille de gaz de 220 g, achetée à 1000 FCFA a été utilisé pour produire 0,25 kg, soit 0,31 L de carburant. Ainsi, le coût énergétique par litre de production s'élève à 807 FCFA.

D'après les données du site GlobalPetrolPrices.com, le prix d'un litre d'essence et de gazole au 08 janvier 2024 s'établit respectivement à 866 et 864 FCFA. La valeur minimale a été retenue pour nos estimations.

Pour l'évaluation de certains coûts annuels, nous avons pris en compte une production mensuelle de 20 litres de carburant, totalisant ainsi 240 litres par an. En appliquant la formule $B = R - C$ où B représente le bénéfice, R le revenu, et C les coûts totaux, une perte de 5320 FCFA est enregistrée lors de la première année. Cependant, sur une période de deux ans, un bénéfice de 8360 FCFA peut être réalisé puisque le capital initial n'est plus inclus dans le calcul du bénéfice. Le retour sur investissement n'est donc envisageable qu'à partir de la deuxième année.

CONCLUSION

Dans ce travail, des matériaux locaux à moindre coût ont été utilisés pour mener l'expérience de pyrolyse non catalytique avec du polypropylène (PP) comme matière première à la température de 400 °C. Les rendements massiques, de conversion ont été évalués à 83% et 81% respectivement. Ces performances attestent du potentiel indéniable du polypropylène en tant que matière première pour la pyrolyse parmi les polymères. Bien que près de la moitié de l'énergie (49,3%) ait été valorisée sous forme de carburant lors de la pyrolyse, la nécessité d'optimiser le dispositif expérimental pour minimiser les pertes de chaleur s'impose. La masse volumique du liquide pyrolytique a été estimée à 787,59 kg/m³, comparable à celle de l'essence. L'analyse des pics caractéristiques du spectre IR par la transformation de Fourier du carburant a montré qu'il appartient à la catégorie des carburants tels que l'essence, le diesel, le kérosène avec une proximité plus marquée à l'essence. L'utilisation de ce carburant dans une lampe traditionnelle montre qu'il correspond effectivement aux carburants disponibles dans le commerce et, peut potentiellement être utilisé. Des tests poussés tels que l'indice d'octane, la volatilité, la température de vaporisation, le point d'éclair, devraient être réalisés pour avoir plus d'information sur la nature du carburant obtenu. L'analyse de rentabilité indique qu'un retour sur investissement ne peut être anticipé qu'au-delà d'une année.

En somme, ce mode de recyclage, au-delà de la simple réduction de l'impact sur l'environnement offre en outre l'opportunité de transformer les déchets en un combustible utilisable, pavant ainsi la voie à la création de profits et à la diminution du taux de chômage chez les jeunes.

Acknowledgement:

This work was realised in the framework of the waste to energy project in ITT/TH KOLN implemented at USTTB.

Acknowledgement to the International Science Programme (ISP/IPPS) through its founded research group MAL01 for providing workspace and data for this study.

REFERENCES

- A. Merrington., 2017. *Recycling of Plastics*, Appl. Plast. Eng. Handb. 167–189. doi:10.1016/B978-0-323-39040-8.00009-2.
- Chantal Kassargy., 2018. *Contribution à l'étude de la valorisation énergétique des résidus de plastique par craquage catalytique*. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique; École Doctorale des Sciences et de Technologie (Beyrouth). NNT:2018IMTA0077. tel-01883636
- Dittenber, D.B., 2012. GangaRao, H.V.S. *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure*. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 43, 1419–1429.
- F. Sadaka., 2010. *Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : application au recyclage des déchets pneumatiques*, Université Du Maine. <http://www.theses.fr/2010LEMA1029>
- FakhrHoseini, S.M., Dastanian, M., 2013. *Pyrolysis of LDPE, PP and PET Plastic Wastes at Different Conditions and Prediction of Products Using NRTL Activity Coefficient Model*. Arab. J. Chem.
- Gao F., 2010. *Pyrolysis of waste plastics into fuels*. PhD thesis. New Zealand: University of Canterbury.
- Hoornweg, Daniel; Bhada-Tata, Perinaz., 2012. *What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management*. Urban development series; knowledge papers no. 15. © World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/17388> License: CC BY 3.0 IGO.
- J. Walendziewski., 2005. *Fuel Processing Technology* 86 1265–1278
- Jalaluddin, M., 2017. *Use of Plastic Waste in Civil Constructions and Innovative Decorative Material (Eco-Friendly)*. MedCrave Online J. Civ. Eng. 3, 00082.
- Mohamadou Adamou, Mohamed S Maiga, Oumar Cissé, Joseph Amadomon Sagara et Yaya Ouattara., 2023. *Étude expérimentale de la caractérisation des ordures ménagères de Bamako au Mali*. International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, 8(2)-2023.
- Mohammad Saleem Khan, Inamullah, Mohammad Sohail, Noor Saeed Khattak., 2016. *Conversion of Mixed Low-Density Polyethylene Wastes into Liquid Fuel by Novel CaO/SiO₂ Catalyst*. J Polym Environ.

Springer Science+Business Media New York. DOI 10.1007/s10924-016-0768-5

- Mohanraj Chandran, Senthilkumar Tamilkolundu, Chandrasekar Murugesan., 2020. *Plastic Waste and Recycling*. ISBN 978-0-12-817880-5© Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00014-1>.
- Ncube, L.K.; Ude, A.U.; Ogunmuyiwa, E.N.; Zulkifli, R.; Beas, I.N., 2021. *An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries*. Recycling, 6, 6010012.
- Plastics Europe, Plastics - the facts 2014/2015.,2015. *An analysis of European plastics production, demand and waste data, PlasticsEurope*. 1–34. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.01.015.
- Plastics-The Facts 2021-Report Plastics., Europe. *The Association of Plastics Manufacturers in Europe*. Available online: <https://plasticseurope.org/pl/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (accessed on 13 January 2022).
- S.D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W.M.A. Wan Daud, M.K. Aroua., 2016. *A review on pyrolysis Of plastic wastes*, *Energy Convers. Manag.* 115, 308–326. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- Sakata, Y., Uddin, M.A., Muto, A., 1999. *Degradation of polyethylene and polypropylene into fuel oil by using solid acid and non-acid catalysts*. J. Anal. Appl. Pyrolysis 51, 135–15.
- Shushay Hagos Gebre, Marshet Getaye Sendeku, Mohamed Bahri. 2021. *Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics*. ChemistryOpen, 10, 1202–1226.
- Viswanath V., 2010. *Degradation Studies of Polypropylene Fibers and Nonwovens with Prodegradant Additives*, M.Sc. Thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University.