

Pengaruh *Compatibilizer Polyvinyl Alcohol-graft-Maleic Anhydride (PVA-g-MAH)* terhadap Karakteristik Plastik *Degradable* Berbasis Pati Sagu dan Pati Biji Nangka

Rozanna Dewi^{1*}, Zulnazri¹, Novi Sylvia¹, Medyan Riza²

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Indonesia

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Indonesia

Corresponding Author:
Rozanna Dewi
rozanna.dewi@unimal.ac.id

Received: March 2024
Accepted: July 2024
Published: September 2024

©Rozanna Dewi et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

Degradable plastics may be employed as a substitute for conventional plastics in various commercial applications. Plastics made from starch and PVA-g-MAH are biodegradable. This research uses sago and jackfruit starch, a maleic anhydride compatibilizer, and PVA to make degradable plastics stronger. The research method consists of several stages, making sago starch and jackfruit seed starch, preparing degradable plastic synthesis, and testing the resulting degradable plastic. The test of mechanical characteristics of degradable plastics carried out is the tensile strength test of 4.41 Mpa - 6.02 MPa on sago starch-based degradable plastic with PVA-g-MAH, while the tensile strength of 6.86 - 8.43 MPa on jackfruit seed starch-based degradable plastic with PVA-g-MAH. The test shows that the compound is hydrophilic, meaning it binds to water and is easily degraded by soil. The DSC thermogram shows that the plastic samples degrade when heated, both thermogram peaks occur which indicate physical changes. The swelling value obtained in sago starch degradable plastic with PVA-g-MAH is (28.14-72.17%) while in jackfruit seed starch degradable plastic, the swelling obtained ranges from (25.91-84.72%) showing a good result. Sago starch and jackfruit seed starch degradable plastics degraded in 6-18 days using PVA-g-MAH. Sago starch and jackfruit seed starch-based plastics using PVA-g-MA meet the ASTM 6400 standard for biodegradable plastics. The plastic should be able to biodegrade up to 60% within six months or 90% within one year.

Keywords: *Degradable Plastics; PVA-g-MAH; Compatibilizer; Sago Starch; Jackfruit Seed Starch*

Pendahuluan

Penggunaan plastik daur ulang masih menjadi topik perdebatan, karena kekhawatiran seputar potensi dampaknya terhadap kesehatan dan keselamatan manusia, serta biaya tinggi yang terkait dengan pemrosesannya. Saat ini, dunia membutuhkan solusi untuk mengatasi masalah sampah plastik yang terus berkembang. Ada

tiga metode utama untuk menangani sampah plastik: mendaur ulang, melakukan pembakaran, dan menimbunnya. Namun, membakar limbah plastik dapat melepaskan zat-zat toksik yang berbahaya terhadap makhluk hidup dan lingkungan. Selain itu, penanaman sampah ternyata tidak efektif karena plastik sulit terdegradasi ^[1].

Solusi optimal adalah dengan menggunakan plastik yang dapat terurai secara hayati, yang diuraikan oleh bakteri, yaitu plastik *degradable* dengan menggunakan sumber pati sebagai bahan dasar pembuatannya. Sifat mekanik, yang belum sesuai dengan plastik konvensional, merupakan salah satu faktor yang membatasi plastik *degradable* saat ini. Oleh karena itu, kemajuan teknologi lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan kinerjanya. Pati telah diidentifikasi sebagai bahan baku yang berpotensi ramah lingkungan untuk produksi bahan berpori, termasuk aerogel, *biofoam*, dan bioplastik. Hal ini karena pati merupakan sumber daya yang dapat terurai secara hayati, murah, terbarukan, dan berlimpah. Oleh karena itu, bahan ini diberi label “jalur hijau” dalam konteks ini [2]. Sagu terdiri dari karbohidrat, serat makanan, protein, lemak, dan mineral. Pati sagu terdiri dari selulosa, bahan makromolekul [3].

Lusiana et al., (2019) melakukan penelitian bioplastik menggunakan pati sagu-PVA dengan pemlastis gliserol dan memperoleh nilai kekuatan tarik sebesar 16.12 MPa, elongasi 142.05%, kekuatan sobek 12.729 kgf/mm, dan daya serap air sebesar 10.34% [4]. Penelitian lain oleh Dianursanti dan S A Khalis., (2018) melihat bagaimana rasio *compatibilizer* mempengaruhi kualitas komposit PVACHlorella. Menambahkan *maleic anhydride* (2%, 4%, 5% berat PVA) membuat permukaan menjadi lebih kuat dan fleksibel. Hasil ini menunjukkan bahwa menambahkan *compatibilizer* membuat campuran *film* plastik PVACHlorella menjadi lebih homogen dan elastis [5]. Metode baru untuk menggunakan PVOH dalam memformulasikan komposit pati termoplastik dan polivinil alkohol (TPS/PVOH) telah dilaporkan. Dalam metode ini, menambahkan 1 wt% mikrosfer PVOH ke matriks TPS secara efektif meningkatkan kekuatan tarik, perpanjangan putus, dan kekuatan impak dibandingkan dengan TPS murni, dan juga meningkatkan stabilitas termal TPS [6].

Bianka Nagy et al., (2021) dalam studinya tentang meningkatkan kompatibilitas antara PLA-graft-MA dan pati dengan aditif berbasis minyak nabati. Berdasarkan hasil pengujian

tarik, dapat dinyatakan bahwa kekuatan impak Charpy dapat ditingkatkan untuk campuran 70/30 dan 60/40 baik dalam kasus tanpa kondisi maupun dengan kondisi, terlepas dari minyak nabati. PLA-g-MA dapat membuat PLA lebih kompatibel dengan bahan lain. Ketika ditambahkan ke PLA yang rapuh, dampak, ketangguhan, dan ketangguhan patah akan meningkat tanpa mempengaruhi sifat lainnya [7]. Veronika Bátori et al., (2019) mempelajari pengaruh gliserol, gula dan *maleic anhydride* pada *film* berbasis pektin selulosa dari limbah jeruk. *Maleic anhydride* ditambahkan ke *film* untuk membuatnya lebih kuat. Efek dari jumlah gula dan gliserol yang berbeda sebagai *plasticizer* dan maleat anhidrida sebagai zat pengikat silang pada karakteristik *film* dipelajari. *Maleic anhydride* membuat film lebih seragam dan meningkatkan daya rekat antar komponen [8].

Binod Shrestha et al., (2023) membuat bioplastik berbasis pati dengan campuran pemlastis gliserol dan polivil alkohol (PVA) dan mengkarakterisasi sifat ketahanan plastik terhadap air, biodegradabilitas dan ketahanan asam-basa. Uji penyerapan air menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pati dalam campuran pati/PVA meningkatkan kapasitas penyerapan air. Rasio berat pati yang lebih tinggi dalam campuran pati/PVA membuat bioplastik terdegradasi dengan cepat dibandingkan bioplastik lainnya. Selain itu, bioplastik dengan kandungan pati yang lebih tinggi tahan asam dan basa masing-masing selama 45 dan 42 jam tanpa larut [9]. Rozanna Dewi et al., (2024) dalam studinya membuat plastik *degradable* berbasis pati sagu dan pati sukun dengan campuran PVA menggunakan katalis seng oksida (ZnO). Menghasilkan kuat tarik dengan katalis ZnO 40% dan PVA adalah 2.31-3.96 MPa, sedangkan untuk plastik *degradable* berbahan dasar pati sukun adalah 2.88-3.20 MPa. Semakin tinggi konsentrasi katalis ZnO yang ditambahkan ke dalam bioplastik, maka semakin lama waktu degradasinya, sedangkan semakin tinggi kandungan PVA, maka semakin cepat waktu degradasinya [10]. Abdallah S. Elgharbawy et al., (2024) menyatakan menambahkan pati, selulosa, atau turunan selulosa ke dalam PVA

membuat plastik lebih mudah larut dan dapat terurai secara hayati di dalam tanah. Namun, beberapa campuran memiliki sifat mekanik yang lebih lemah daripada PVA murni [11].

Penelitian ini menggunakan pati sagu dan pati biji nangka yang dapat dijadikan sebagai bahan dasar pembuatan plastik *degradable* dan mencampurkannya dengan compatibilizer PVA-g-MAH. Berbagai upaya dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan untuk membuat campuran PVA dan pati. PVA adalah polimer sintesis semi-kristal yang tidak beracun, dapat terurai secara hayati, dan memiliki sifat mekanis yang baik, kemampuan membentuk film, ketahanan yang tinggi terhadap minyak dan pelarut dan penghalang gas. Menambahkan PVA membuat plastik lebih kuat dan lebih tahan lama [12]. Kadar air sagu adalah 7.48%, kadar abu 0.062%, kadar serat kasar 0.04%, yang menyumbang 88.31% dari total komposisi [13]. Biji nangka memiliki komponen yaitu 30.08% \pm 0.1 amilosa; 7.16% \pm 0.04 kelembaban; 1.17% \pm 0.03 protein total; 0.3% \pm 0:01 lipid; 0:21% \pm 0:03 abu; dan 0:15% \pm 0:02 serat. Penting untuk mempertimbangkan jumlah abu, amilosa, dan lipid yang terkandung karena komponen-komponen ini mempengaruhi pembentukan bioplastik [14]. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari perbandingan pengaruh *Polyvinyl Alcohol-graft-Maleic Anhydride* (PVA-g-MAH) pada karakteristik mekanis, termal, gugus fungsi, ketahanan plastik terhadap air, biodegradabilitas plastik *degradable* berbasis pati sagu dan pati biji nangka.

Metodologi Penelitian

Bahan Kimia

Bahan pembuatan pati meliputi: batang sagu diambil dari Desa Alue Bili, Kecamatan Baktiya, Kabupaten Aceh Utara; limbah biji nangka diambil dari Desa Tumbo Baro, Kecamatan Kuta Malaka, Kabupaten Aceh Besar; pati sagu yang diolah dari hasil batang sagu 10 gr; pati biji nangka yang diolah dari biji mentah pada buah nangka 10 gr; Glycerol 85% Pro Analisis Merck 3 ml; dan Aquadest 200 ml.

Bahan perlakuan persiapan kompatibilitas, yaitu: Polyvinyl Alcohol Fully Hydrolyzed Merck 843866 (PVA) 5 gr, Vaseline Medicaments Merck – 7354215 sebanyak 50 gr dan Aquadest 15 ml. Maleic Anhydride 99% Sigma-Aldrich - 8.00408.1000 sebanyak (4, 6, 8, dan 10% dari berat PVA) dan Kalium Peroksodisulfat Merck 1.05091.1000 sebanyak 0.5 gr untuk plastik *degradable* pati sagu. Sedangkan, Polyvinyl Alcohol Fully Hydrolyzed Merck 843866 (PVA) 5 gr, Maleic Anhydride 99% Sigma-Aldrich - 8.00408.1000 sebanyak (4, 6, 8, dan 10% dari berat PVA) (2, 4, 6 dan 8% dari berat PVA) dan Kalium Peroksodisulfat Merck 1.05091.1000 sebanyak 0.025 gr untuk plastik *degradable* pati biji nangka.

Peralatan

Penelitian ini menggunakan dua beaker glass Pyrex yang berbeda, dengan kapasitas masing-masing 50 mL dan 250 mL; Gelas Ukur Pyrex 10 ml; cetakan kaca seperti plat ukuran 200 mm \times 200 mm \times 0.5 mm; Spatula Stainless; Thermometer Millipore Merck, Hotplate Stirrer MS H280 Pro, Oven Merck 1.88054.0005 Water Standard dan Analytical Balance ADB 600 - C3 untuk penimbangan semua bahan.

Prosedur penelitian

Pada studi ini, menggunakan konsentrasi *maleic anhydride* (4, 6, 8, 10%) dari berat PVA pada plastik *degradable* berbasis pati sagu, sedangkan plastik *degradable* pati biji nangka menggunakan *maleic anhydride* (2, 4, 6, 8%) dari berat PVA untuk mendapatkan hasil karakteristik mekanis dan termal yang paling optimal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memastikan karakteristik optimal dari plastik *degradable* yang dihasilkan dalam kekuatan mekanis, termal, sifat kimia, ketahanan plastik terhadap air, dan laju penguraian. Untuk mencapai tujuan ini, variasi konsentrasi dari berbagai kompatibilisator maleat anhidrida digunakan.

Pembuatan Pati Sagu dan Pati Biji Nangka

Pembuatan pati dari sagu, dengan cara batang sagu di cacah dan dicuci hingga bersih, dihaluskan menggunakan blender, dan

ditambahkan air. Selanjutnya setelah menjadi bubur sagu, disaring menggunakan kain dan filtratnya diendapkan selama 24 jam. Hasil endapan dipisahkan dari bagian airnya kemudian dikeringkan menggunakan oven hingga menjadi pati.

Produksi pati dari biji nangka melibatkan pemilihan biji nangka terbaik dengan ciri-ciri sebagai berikut: ukurannya normal, teksturnya keras, dan warnanya agak cokelat, yang menandakan bahwa biji nangka tersebut sudah matang dan tidak mengalami pembusukan. Biji kemudian dibersihkan dari sisa daging buah yang mungkin masih tersisa. Biji nangka yang telah dibersihkan kemudian melalui proses perebusan selama 30 menit, diikuti dengan penirisan selama 5 menit. Selanjutnya, kulit ari biji nangka dibuang dengan cara dikupas dan diiris setebal 0.3 cm. Selanjutnya, biji nangka yang telah diiris kemudian mengeringkannya dengan oven pada temperatur 60°C dalam 12 jam. Menghaluskan biji nangka yang sudah kering menggunakan blender dan mengayaknya dengan saringan berukuran 80 mesh, sampai memperoleh tepung biji nangka dengan distribusi ukuran yang sama.

Persiapan Compatibilizer

Dengan variasi *maleic anhydride*, PVA sebesar 5 gr dicampur sambil diaduk dengan kalium peroksidisulfat selama 30 menit pada suhu 70°C sampai homogen dan membentuk suspensi kental.

Sintesa Plastik Degradable

Pati sagu dan pati biji nangka dengan variasi *compatibilizer maleic anhydride* dan *plasticizer gliserol* yang dicampur, dengan pengadukan selama 30 menit pada suhu 75°C. Dituangkan ke dalam cetakan kaca berukuran 200 mm × 200 mm × 0.5 mm. Vaseline dioleskan pada permukaan cetakan untuk memudahkan pelepasan *film* plastik. Selanjutnya, pengeringan plastik *degradable* yang telah dicetak menggunakan oven pada suhu 80°C selama 24 jam. Kemudian, *film* plastik harus dibiarkan dingin pada suhu kamar dan kemudian dikeluarkan dari cetakan.

Karakterisasi dan Pengujian

Karakteristik mekanik plastik terdegradasi yang berasal dari pati sagu dan pati biji nangka dengan bahan pengikat PVA-g-MAH dievaluasi melalui pengujian kuat tarik, perpanjangan, dan modulus elastisitas. Pengujian kuat tarik dilakukan sesuai ASTM D-638 (*American Standard Testing and Materials*). Metode pengujian ini menggunakan spesimen berbentuk halter dengan panjang pengukur 50 mm. Kekuatan tarik dan perpanjangan sampel yang telah dipotong sesuai ukuran 165 mm dianalisis menggunakan Mesin Uji Universal Mekanis. Pada penelitian ini karakteristik mekanis dilakukan dengan konsentrasi *maleic anhydride* (4, 6, 8, 10%) dari 5 gr PVA pada plastik *degradable* berbasis pati sagu, sedangkan plastik *degradable* pati biji nangka menggunakan *maleic anhydride* (2, 4, 6, 8%) dari 5 gr PVA. Kekuatan tarik dan perpanjangan dapat ditentukan dengan Persamaan (1) dan (2).

$$\sigma = \frac{F_{maks}}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Keterangan:

σ = kekuatan tarik (MPa)

F_{maks} = tegangan maksimum (N)

A = luas penampang film yang mengalami tegangan (mm²)

ε = regangan (MPa),

l = panjang pengukur, panjang pengukur sampel uji setelah perpanjangan (mm)

l₀ = panjang pengukur sampel awal (mm²)

Untuk mengidentifikasi ikatan kimia dalam bahan organik, polimer, logam, dan berbagai bahan lainnya, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi ikatan kimia dalam berbagai bahan. Hal ini dilakukan dengan menggunakan cahaya inframerah untuk memindai sampel uji, molekul-molekulnya berada dalam kondisi getaran yang tinggi karena radiasi inframerah yang diserap. Panjang gelombang yang diserap tergantung pada struktur molekul sampel.

Penelitian ini menggunakan analisis FTIR pada bilangan gelombang 550-4000 cm^{-1} .

Differential Scanning Calorimetry (DSC) digunakan untuk menguji sifat termal plastik yang dapat terurai. DSC digunakan untuk menganalisis bagaimana polimer berubah ketika dipanaskan. Karakteristik panas berupa T_g , T_m , T_c . Alat uji DSC yang digunakan dalam penelitian ini adalah DSC DuPont 9100. Sampel dipanaskan dengan kecepatan $10^\circ\text{C}/\text{menit}$. dari 50°C hingga 300°C .

Uji *swelling*/pembengkakan (penyerapan air) digunakan untuk menganalisis ketahanan plastik *degradable* terhadap air. Tingkat pembengkakan diukur menggunakan metode *American Society for Testing and Materials (ASTM) D2765*. Selanjutnya, sampel ditimbang dan selanjutnya direndam dalam pelarut selama 24 jam. Selanjutnya, sampel ditimbang ulang dalam keadaan membengkak, kemudian dikeringkan dan ditimbang ulang untuk menentukan berat akhir. Uji ketahanan air pada sampel plastik *degradable* pati sagu menggunakan *compatibilizer maleic anhydride* (4, 6, 8, 10%) dengan variasi suhu gelatinisasi (65, 70, 75°C), sedangkan sampel plastik *degradable* pati biji nangka menggunakan *compatibilizer maleic anhydride* (2, 4, 6, 8%) dengan variasi suhu gelatinisasi (70, 80, 90°C). Tingkat pembengkakan dihitung dengan menggunakan Persamaan (3) berikut.

$$\text{Derajat Swelling} = \frac{\text{Berat setelah pembengkakan} - \text{Berat awal}}{\text{Berat awal}} \times 100\%$$

Laju penguraian mikroba dianalisis melalui proses penguburan di dalam tanah (biodegradabilitas). Analisis biodegradabilitas dilakukan sesuai dengan referensi ASTM G-21-70, dengan menggunakan metode kontak langsung antara plastik *degradable* dengan tanah. Sampel plastik *degradable* dengan dimensi 5×2 cm dipotong. Massa awal dicatat untuk setiap sampel. Sampel kemudian

ditempatkan di dalam tanah dengan kedalaman 30 cm, dan sampel dipantau selama empat hari. Sampel diambil dari tanah dan dibersihkan dari tanah yang tersisa. Massa akhir (M_1) dicatat untuk setiap sampel. Laju *biodegradability* pada sampel plastik *degradable* pati sagu menggunakan *compatibilizer maleic anhydride* (4, 6, 8, 10%) dengan variasi suhu gelatinisasi (65, 70, 75°C), sedangkan sampel plastik *degradable* pati biji nangka menggunakan *compatibilizer maleic anhydride* (2, 4, 6, 8%) dengan variasi suhu gelatinisasi (70, 80, 90°C). Biodegradabilitas plastik *degradable* dihitung dengan menggunakan Persamaan (4) berikut.

$$\text{Biodegradability (\%)} = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (4)$$

Keterangan:

M_0 = massa awal (gr)

M_1 = massa terakhir (gr)

Hasil dan Diskusi

Analisa Sifat Mekanik dengan Kuat Tarik (*Tensile*)

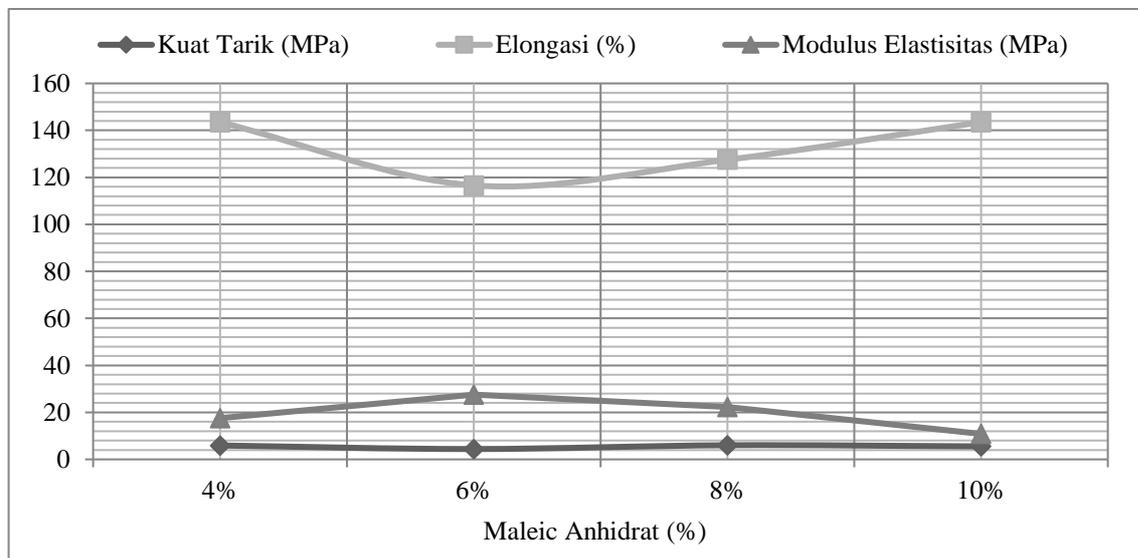
Sifat mekanik material, khususnya kekuatan tarik, perpanjangan dan modulus elastisitas, dievaluasi dengan menggunakan alat analisis tekstur. Kekuatan tarik dapat didefinisikan sebagai kemampuan maksimum plastik *degradable* untuk menahan gaya eksternal sebelum terjadi degradasi atau fraktur pada material. Elongasi digunakan untuk memastikan rasio pertambahan panjang yang ditunjukkan oleh plastik *degradable* dibandingkan dengan panjang awalnya.. Sebaliknya, tujuan pengujian modulus elastisitas adalah untuk mengukur tingkat elastisitas bahan yang sedang diamati. Hubungan antara nilai kekuatan tarik dan nilai perpanjangan dapat digambarkan sebagai berbanding terbalik, sementara ada hubungan yang berbanding lurus antara modulus elastisitas dan nilai elongasi.

Tabel 1. Nilai kuat tarik pada plastik *degradable* berbasis pati sagu dan (PVA-g-MAH)

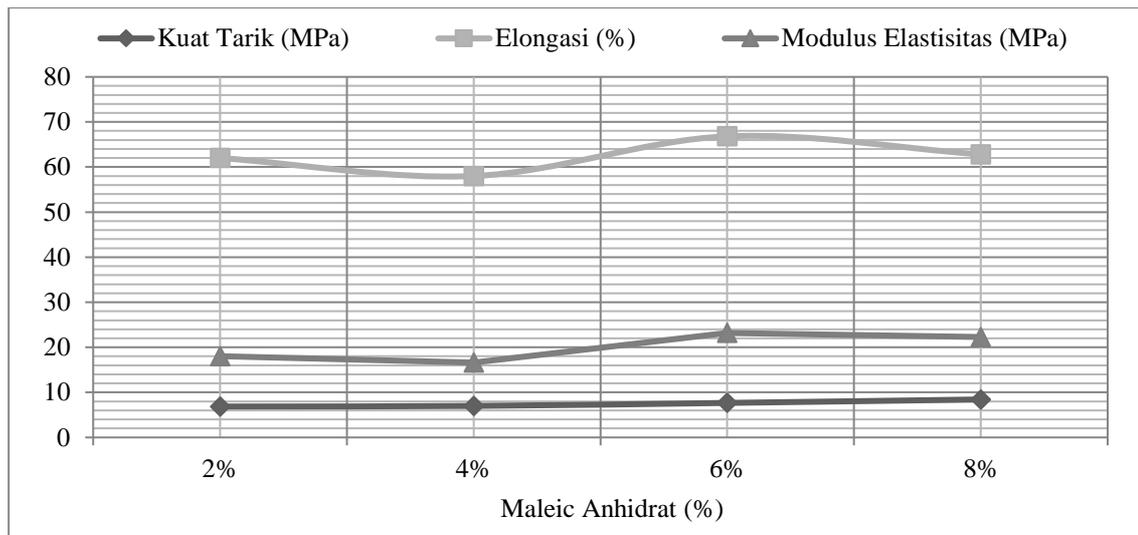
Maleic Anhydride (%)	PVA (gram)	Kuat Tarik (MPa)	Elongasi (%)	Modulus Young (MPa)
4	5	5.91	153.51	17.5
6	5	4.41	116.5	27.56
8	5	6.02	127.5	22.29
10	5	5.54	143.5	10.84

Tabel 2. Nilai kuat tarik pada plastik *degradable* berbasis pati biji nangka dan (PVA-g-MAH)

Maleic Anhydride (%)	PVA (%)	Kuat Tarik (MPa)	Elongasi (%)	Modulus Young (MPa)
2	5	6.86	62.0	18.05
4	5	6.99	58.0	16.61
6	5	7.66	66.8	23.18
8	5	8.43	62.8	22.29



Gambar 1. Kuat Tarik (MPa), Elongasi (%), dan Modulus Elastisitas (MPa) Plastik *Degradable* (PVA-g-MAH) Berbasis Pati Sagu.



Gambar 2. Kuat Tarik (MPa), Elongasi (%), dan Modulus Elastisitas (MPa) Plastik *Degradable* (PVA-g-MAH) Berbasis Pati Biji Nangka.

Nilai kuat tarik plastik *degradable* berbasis pati sagu dengan menggunakan PVA-g-MAH yang diperoleh pada penelitian ini berkisar antara 4.41 Mpa – 6.02 MPa, sedangkan pada plastik *degradable* berbasis pati biji nangka berkisar antara 6.86 – 8.43 MPa. Pada penelitian ini *maleic anhydride* sebagai *compatibilizer* dan PVA sebagai matriks. Dari Tabel 1 dan Tabel 2 terlihat bahwa kuat tarik plastik *degradable* paling rendah adalah kuat tarik plastik *degradable* dari pati sagu, sedangkan kuat tarik paling tinggi adalah kuat tarik plastik *degradable* dari pati biji nangka. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan PVA-g-MAH dan jenis pati yang digunakan berpengaruh terhadap sifat mekanis dari plastik *degradable*. Amulya Raj et al., (2020) menggunakan *compatibilizer Polylactid Acid-graft-Maleic Anhydride* (PLA-g-MA) untuk meningkatkan sifat mekanik pada plastik *degradable*. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa PLA-g-MA adalah *compatibilizer* yang efisien untuk aplikasi potensial dalam industri otomotif dan elektronik [15]. Songting Yu et al., (2022) mempelajari pengaruh poli (asam laktat) yang dicangkokkan dengan *maleic anhydride* pada perilaku reologi dan mekanik kinerja poli (asam laktat)/poli (etilen glikol) (PLA/PEG) campuran. Campuran tersebut memiliki perpanjangan putus 526.9% dan kekuatan tarik

30.91 MPa. Hal ini membuat bahan PLA memiliki sifat yang bagus [16]. Nilai kekuatan tarik yang diperoleh dalam penelitian ini, hampir mendekati dengan nilai kekuatan tarik untuk HDPE (11-25 MPa) dan PP (15-45 MPa), seperti yang didokumentasikan dalam basis data *Mat Web Material Property* untuk kategori “Polipropilena, Kelas Ekstrusi”.

Pemanjangan suatu bahan dapat didefinisikan sebagai ukuran kemampuannya untuk meregang ketika dikenakan gaya tarik. Parameter ini berfungsi untuk menentukan elastisitas bahan tertentu. Dalam plastik *degradable*, semakin tinggi nilai elongasi, semakin besar elastisitas yang ditunjukkan oleh bahan tersebut. Faktor ini menyebabkan material menampilkan karakteristik kemuluran yang cukup besar. Tabel 1 dan Tabel 2, nilai uji elongasi plastik *degradable* berbasis pati sagu dan pati biji nangka dengan menggunakan PVA-g-MAH adalah 116.5-153.51% dan 58-66.8%. Nilai perpanjangan yang diperoleh sebanding dengan PET, dengan kisaran 15 hingga 165% [9]. Nawel Mokrane et al., (2023) dalam studinya, penggabungan PLA-g-MA ke dalam nanokomposit dari poli(3-hidroksibutirat-co-3-hidroksiheksanoat) dicangkokkan dengan *maleic anhydride* (PLA-g-MA) menghasilkan peningkatan yang signifikan pada kekuatan tarik, perpanjangan

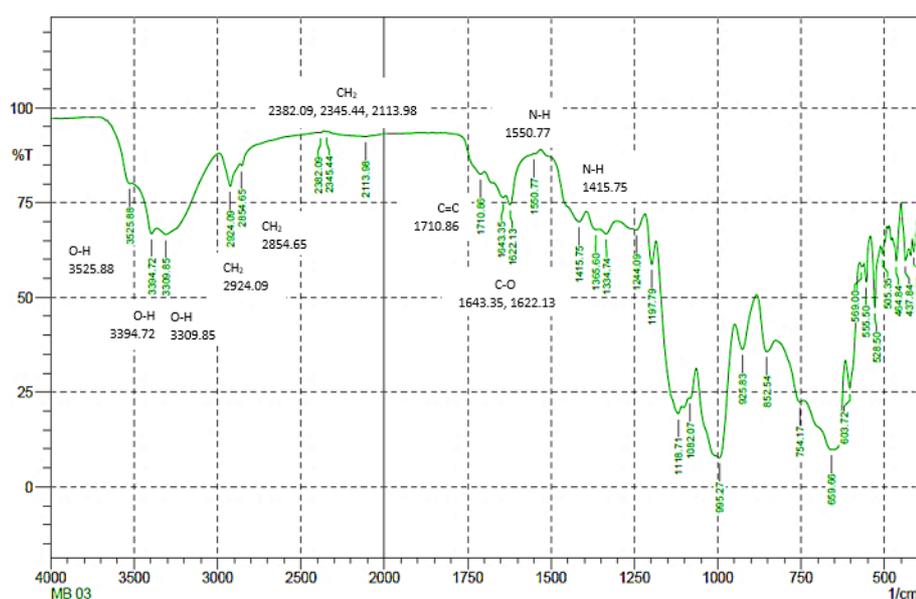
putus, dan kekuatan impak. Secara khusus, parameter-parameter ini menunjukkan peningkatan dari sekitar 42 MPa, 14.5%, dan 20.9 kJ/mm² menjadi hampir 46 MPa, 18.2%, dan 31.2 kJ/mm²^[17]. Menurut persyaratan kemasan *degradable* ISO 7188.7:2011, campuran yang mengandung termoplastik, dan pati alami, dengan nilai perpanjangan putus kurang dari 5% dapat digunakan sebagai bahan baku plastik *degradable* ^[18].

Modulus elastisitas suatu bahan tertentu dapat dinyatakan sebagai fungsi dari nilai perpanjangan. Modulus elastisitas merepresentasikan besaran elastisitas bahan yang kaku dan digunakan untuk tujuan mencirikan bahan tertentu. Hal ini dihitung dengan menggunakan hubungan antara tegangan dan regangan suatu benda. Nilai modulus elastisitas plastik *degradable* berbahan dasar pati sagu yang menggunakan PVA-g-MAH ditemukan berkisar antara 10.84 MPa dan 27.56 MPa, sedangkan plastik *degradable* berbasis pati biji nangka dengan menggunakan PVA-g-MAH adalah 16.61-23.18 MPa. Pada penelitian ini, penggunaan *compatibilizer* dengan konsentrasi *maleic anhydride* pada konsentrasi 6% memiliki nilai kuat tarik, elongasi dan modulus elastisitas yang cukup baik. Penelitian oleh Alper Aksit et

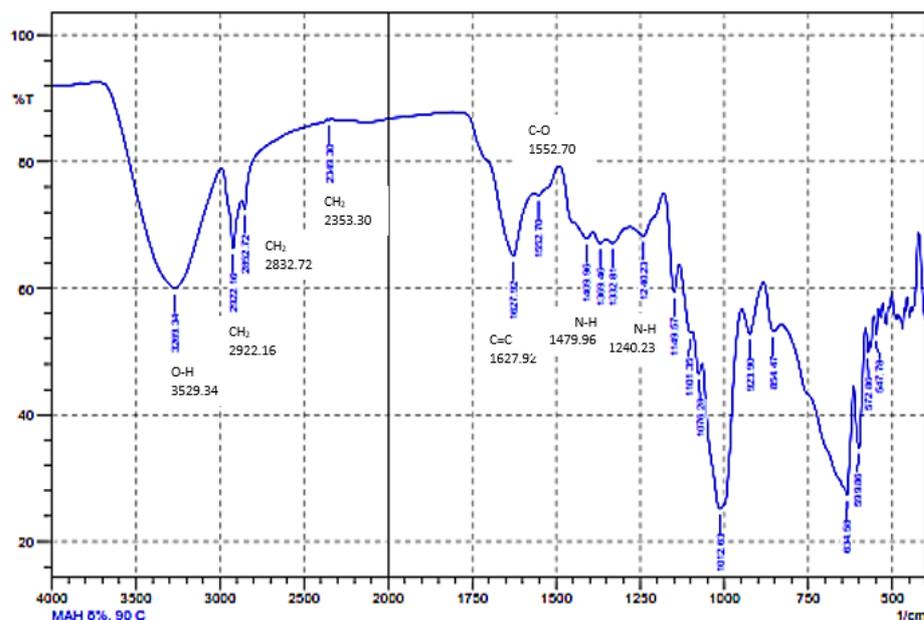
al., (2020) dengan penambahan *compatibilizer maleic anhydride* meningkatkan kekuatan tarik (10%) dan perpanjangan putus (70%) pada *Polyphenylene Ether* (PPE) ^[19]. Berdasarkan data dari *Mat Web Material Property* untuk kategori "Polipropilena, Kelas Ekstrusi" nilai elongasi diperoleh kisaran 8 – 750% dan modulus elastisitas pada 0.680 - 3.60 GPa. Jika dibandingkan dengan nilai elongasi dan modulus elastisitas plastik *degradable* berbasis pati sagu dan pati biji nangka dengan penambahan PVA-g-MAH adalah nilai elongasi sebanding dan nilai dari modulus elastisitas belum sebanding.

Analisa Gugus Fungsi dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Tujuan analisis FTIR adalah memastikan gugus fungsi spesifik yang terkandung pada bahan plastik *degradable* yang sedang di uji. Pada analisa FTIR, setiap molekul memiliki spektrum inframerah yang berbeda-beda. Ketika molekul menyerap radiasi inframerah, molekul akan bergetar lebih kuat. Energi ini dilepaskan sebagai panas ketika molekul kembali ke keadaan semula. Panjang gelombang penyerapan tergantung pada sifat vibrasi ikatan. Penyerapan radiasi inframerah oleh jenis ikatan yang berbeda, terjadi pada panjang gelombang yang berbeda-beda.



a)



b)

Gambar 3. Analisa FTIR a) plastik *degradable* berbasis pati sagu dan PVA-g-MAH b) plastik *degradable* berbasis pati biji nangka dan PVA-g-MAH.

Gambar 3(a) menggambarkan vibrasi peregangan O-H dari senyawa natrium hidroksida yang ada pada pati sagu, yang ditunjukkan oleh bilangan gelombang 3525.88 cm^{-1} , 3394.72 cm^{-1} dan 3309.85 cm^{-1} . Sedangkan 2924.09 cm^{-1} , 2854.65 cm^{-1} , 2382.09 cm^{-1} , 2345.44 cm^{-1} dan 2113.98 cm^{-1} terdapat ikatan CH_2 yang merupakan kandungan polisakarida atau glukosa pada pati sagu. Pada penelitian ini terdapat banyak gugus hidroksimetil $-\text{CH}_2-\text{OH}$ pada $3500 - 2100\text{ cm}^{-1}$. Pada 1710.86 cm^{-1} , 1643.35 cm^{-1} , 1622.13 cm^{-1} dikarakterisasi sebagai vibrasi regangan C=C dan C-O yang ditemukan pada senyawa maleat anhidrida dan mungkin juga terkait dengan PVA-g-MAH. Pada 1550.77 cm^{-1} dan 1415.75 cm^{-1} terdapat gugus N-H amina yang memungkinkan terjadinya reaksi eksotermik antara *maleic anhydride* dan natrium hidroksida pada proses pembuatan plastik *degradable*.

Gambar 3 (b) menggambarkan vibrasi peregangan O-H dari senyawa natrium hidroksida yang ada pada pati biji nangka, yang ditunjukkan oleh bilangan gelombang 3529.34 cm^{-1} . Sedangkan pada 2922.16 cm^{-1} dan 2832.72 cm^{-1} terdapat ikatan CH_2 yang

merupakan kandungan polisakarida atau glukosa pada pati biji nangka. Pada penelitian ini terdapat gugus hidroksimetil $-\text{CH}_2-\text{OH}$ pada $3500 - 2300\text{ cm}^{-1}$. Pada 1627.92 cm^{-1} dan 1552.70 cm^{-1} dikarakterisasi sebagai vibrasi regangan C=C dan C-O yang ditemukan pada senyawa *maleic anhydride* dan mungkin juga terkait dengan PVA-g-MAH. Pada 1479.96 cm^{-1} dan 1240.23 cm^{-1} terdapat gugus N-H amina yang memungkinkan terjadinya reaksi eksotermik antara *maleic anhydride* dan natrium hidroksida pada proses pembuatan plastik *degradable*.

Rajesh Jesudoss Hynes Navasingh et al., (2023) membuat bioplastik berbasis pati yang dimodifikasikan dengan kalsium karbonat dengan pemlastis dan menganalisa kandungan gugus fungsi pada bioplastik tersebut. Puncak-puncak pada analisa FTIR menunjukkan bahwa sampel mengandung gliserol, yang memiliki gugus hidroksil. Gugus C-O-H dapat dilihat di antara 1624 cm^{-1} dan 1759 cm^{-1} . Puncak antara 2883 cm^{-1} dan 3000 cm^{-1} terdapat ikatan gugus C-H. Dimasukkannya pati telah menyebabkan adanya gugus-gugus ini ^[20]. Federico Barrino et al., (2023) membuat bioplastik berbais

polibutilena suksinat (PBS) dengan campuran minyak zaitun dan minyak kelapa. Dalam penelitiannya, spektrum FTIR polibutilena suksinat menunjukkan pita serapan pada 2922 cm^{-1} , yang ditetapkan untuk peregangan ikatan C-H. Pita serapan pada 1711 cm^{-1} mencirikan pembentukan gugus ester dan berhubungan dengan vibrasi peregangan C=O karbonil. Puncak pada 1328 cm^{-1} ditetapkan untuk getaran pemanjangan ikatan -COO. Ketika minyak ditambahkan ke dalam bahan, pita C-H metilen pada 2930 dan 2855 cm^{-1} terlihat jelas di semua spektrum. Intensitasnya meningkat seiring dengan jumlah minyak. Puncak pada 1161 cm^{-1} banyak berubah [21].

Kandungan gugus yang diidentifikasi dalam analisis FTIR plastik *degradable* pati sagu dan biji nangka dengan bahan pengikat PVA-g-MaH dapat dideskripsikan sebagai gugus hidrofilik yang terbentuk secara alami yang menunjukkan afinitas yang kuat terhadap air, yang mengakibatkan degradasi tingkat tinggi oleh mikroorganisme tanah. Gugus -OH yang berasal dari PVA atau dari zat ekstraktif lainnya. Adanya gugus OH yang berikatan dengan hidrogen, peregangan C-H alkana, peregangan C=O amida dan peregangan C-O eter telah merepresentasikan kandungan pati

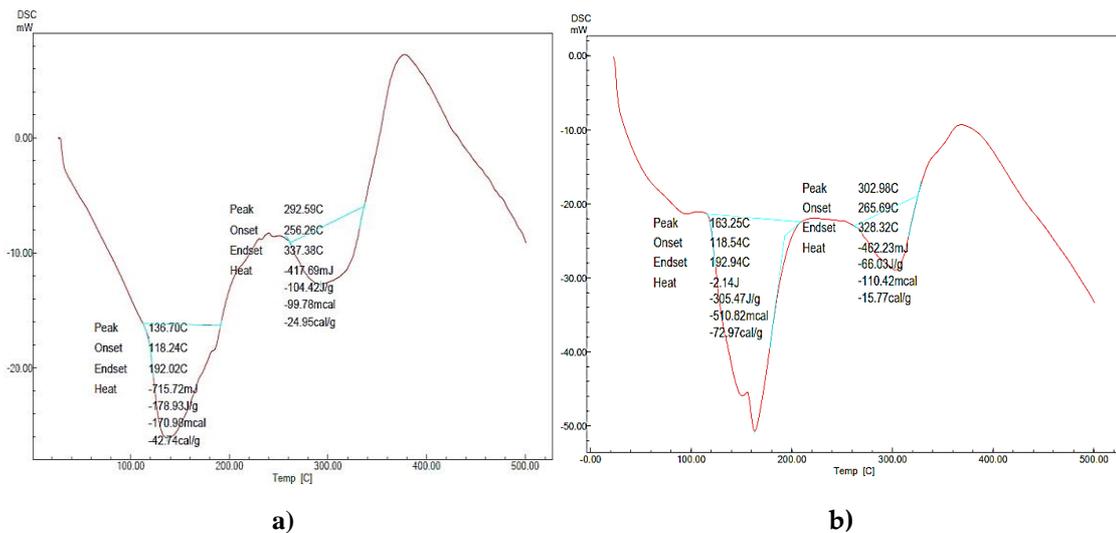
biji nangka yang terdiri dari amilosa dan amilopektin serta mengurangi adanya glukosa[22]. Shio Xuan Tan et al, (2022) pada penelitian yang dilakukan menyatakan bahwa ikatan hidrogen antara gugus OH dari pati dan gugus COOH dari *Cellulose nanocrystals* memiliki nilai kuat tarik yang tinggi dan memiliki nilai elongasi yang rendah [23]. PVA baik untuk dicampur dengan pati karena bersifat polar dan berinteraksi dengan ikatan fisik pada keduanya. PVA memiliki banyak gugus hidroksil bebas, yang memungkinkannya bereaksi dengan gugus lain[24] [25].

Analisa Penyerapan Energi dengan *Differential Scanning Callorimetry* (DSC)

Dasar dari metode pengukuran DSC adalah apabila spesimen menunjukkan perubahan bentuk fisis, seperti perubahan fasa, maka diperlukan perpindahan panas untuk mempertahankan suhu keseimbangan antara referensi dan sampel. Diperlukan lebih sedikit atau lebih banyak panas untuk mentransfer panas ke sampel berdasarkan pada apakah prosesnya bersifat eksotermik atau endotermik. Pada analisa DSC dalam penelitian ini akan menjelaskan pada termogram DSC *second heating*.

Tabel 2. Ringkasan data analisa DSC pada plastik *degradable* dari pati sagu dan pati biji nangka menggunakan PVAg-MAH

Plastik <i>degradable</i> dari pati sagu dan PVA-g-MAH		Plastik <i>degradable</i> dari pati biji nangka dan PVA-g-MAH	
<i>First Heating</i>		<i>First Heating</i>	
Peak	136.70°C	Peak	163.25°C
Onset	116.24°C	Onset	118.54°C
Endset	192.02°C	Endset	192.54°C
Heat	-715.72 mJ	Heat	-2.14 J
	-178.93 J/g		-305.47 J/g
	-170.93 mcal		-510.82 mcal
	-42.74 cal/g		-72.97 cal/g
<i>Second Heating</i>		<i>Second Heating</i>	
Peak	292.59°C	Peak	302.98°C
Onset	256.20°C	Onset	265.69°C
Endset	337.38°C	Endset	328.32°C
Heat	-417.69 mJ	Heat	-462.23 mJ
	-104.42 J/g		-66.03 J/g
	-99.78 mcal		-110.42 mcal
	-24.96 cal/g		-15.77 cal/g



Gambar 4. Analisa DSC a) plastik *degradable* berbasis pati sagu dan PVA-g-MAH b) plastik *degradable* berbasis pati biji nangka dan PVA-g-MAH.

Dalam penelitian ini, *differential scanning calorimetry* (DSC) digunakan untuk memastikan tingkat penyerapan energi yang ditunjukkan oleh bahan plastik *degradable*. Salah satu cara untuk menilai kualitas plastik adalah dengan melihat bagaimana plastik bereaksi terhadap panas. Gambar 4 menunjukkan bagaimana plastik berubah ketika dipanaskan. Pertama, plastik mengalami dehidrasi yaitu hilangnya gugus air. Kemudian, plastik berubah menjadi bentuk yang berbeda. Ini disebut transisi polimorfik. Terakhir, plastik meleleh. Ketika didinginkan, lelehan mengkristal dan perubahan polimorfik terjadi, tetapi rehidrasi tidak terjadi [10]. Untuk proses ini, pemanasan bersifat endotermik (puncak termogram menurun ke bawah) dan pendinginan bersifat eksotermik (puncak termogram menghadap ke atas). Pada Gambar 5. (a) (b) mengilustrasikan plastik *degradable* pati sagu + PVA-g-MAH terdapat puncak yang sangat tajam dan memiliki kisaran suhu transisi gelas 292.59°C dimana transisi gelas dapat terjadi karena suhu padatan *amorf* meningkat, titik leleh 256.20°C, dan suhu kristalisasi 337.38°C. Plastik *degradable* pati biji nangka + PVA-g-MAH memiliki puncak yang lebih tajam dan disini tidak terjadi transisi gelas, dimana terbentuknya semikristalisasi dalam keadaan *amorf* pada kisaran suhu 302.98°C, suhu titik leleh 265.69°C dan suhu kristalisasi pada 328.32°C. Perubahan dari padatan amorf ke padatan kristal adalah

proses eksotermis, dan menghasilkan puncak (*peak*) pada sinyal DSC pada termogram. Proses pelepasan menghasilkan puncak endotermik dalam kurva DSC.

Titik leleh sampel plastik *degradable* pati sagu yang diperoleh hampir sama dengan titik leleh sampel plastik *degradable* pati biji nangka, dalam hal ini terjadi pembentukan pencampuran keseluruhan antara pati dan PVA-g-MAH. Perbandingan titik leleh pati sagu dan pati biji nangka menunjukkan bahwa keduanya hanya berkisar antara 70-75°C. Rozanna Dewi et al., (2017) dimana penambahan poliuretan menyebabkan terjadinya kenaikan titik leleh pada bioplastik, dikarenakan titik leleh dari poliuretan yang ditambahkan lebih tinggi dari pada titik leleh pati [26].

Md. Arefin Kowser et al., (2023) dalam penelitian bioplastik yang dilakukan dalam dua jenis bahan dasar yang berbeda, titik leleh dan suhu transisi gelas dari sampel bioplastik diselidiki. Bioplastik teh jahe memiliki kisaran suhu transisi gelas 48-51°C, titik leleh 276°C, dan suhu kristalisasi 304°C. Bioplastik teh hijau memiliki kisaran suhu transisi gelas 49-52 ° C, titik leleh 275°C, dan suhu kristalisasi 303°C [27]. Małgorzata Majder-Lopatka et al., (2022) dalam studinya analisis termal plastik yang digunakan dalam industri makanan, salah

satunya menganalisa DSC pada polistirena. Kurva DSC menunjukkan bahwa sampel polistirena kehilangan berat dan berubah dengan cara yang berbeda. Penguraian dimulai dengan reaksi endotermik berenergi rendah pada suhu 250°C. Lebih dari 92% berat sampel hilang pada tahap pertama penguraian, yang terjadi pada suhu 412°C [28].

Nasirtabrizi et al., (2013) dalam penelitiannya pada modifikasi sintesa kopolimer *maleic anhydride* dengan ftalimida dapat meningkatkan stabilitas termal [29]. Analisa DSC menunjukkan bahwa plastik *degradable* berbasis pati sagu dan pati biji nangka dengan menggunakan *compatibilizer* PVA-g-MAH memiliki karakteristik termal dan stabilitas

yang baik. Jumlah ikatan hidrogen yang ada dalam bahan plastik berkorelasi secara langsung dengan titik lelehnya. Hal ini disebabkan oleh banyaknya energi yang diperlukan untuk memutuskan ikatan tersebut^[30].

Analisa Ketahanan Plastik dengan Derajat Swelling

Ketahanan air dari plastik *degradable* dipastikan melalui uji pembengkakan (*swelling*), yaitu persentase pengembangan plastik *degradable* karena adanya air. Penggunaan variasi *compatibilizer* MAH dan suhu gelatinisasi untuk melihat sifat ketahanan air yang optimal pada plastik *degradable*.

Tabel 3. Analisa ketahanan plastik dengan derajat *swelling* pada plastik *degradable* pati sagu dengan variasi PVA-g-MAH dan variasi suhu gelatinisasi

Analisa Swelling				
Suhu Gelatinisasi (°C)	% MAH	Berat		% Swelling
		Awal (gr)	Akhir (gr)	
65	4	0.1477	0.2543	72.17
	6	0.1652	0.2628	59.08
	8	0.1485	0.2168	45.99
	10	0.1734	0.2222	28.14
70	4	0.1413	0.2386	68.86
	6	0.1126	0.1858	65.01
	8	0.1084	0.1666	53.69
	10	0.1247	0.1821	46.03
75	4	0.1340	0.2279	70.07
	6	0.1910	0.3020	58.12
	8	0.1366	0.2069	51.46
	10	0.1665	0.2356	41.50

Tabel 4. Analisa ketahanan plastik dengan derajat swelling pada plastik *degradable* pati biji nangka dengan variasi PVA-g-MAH dan variasi suhu gelatinisasi

Suhu Gelatinisasi (°C)	%	Analisa Swelling		
		Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	% Swelling
70	2	0.1001	0.1849	84.72
	4	0.1403	0.2457	75.12
	6	0.0958	0.1602	67.22
	8	0.1604	0.2446	52.49
80	2	0.1274	0.2251	76.69
	4	0.1325	0.2237	68.83
	6	0.1389	0.2164	55.80
	8	0.1391	0.1973	41.84
90	2	0.1012	0.1696	67.59
	4	0.1103	0.1734	57.21
	6	0.1029	0.1469	42.76
	8	0.1015	0.1278	25.91

Pada Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan nilai *swelling* yang diperoleh pada plastik *degradable* pati sagu dengan PVA-g-MAH yaitu (28.14-72.17%), sedangkan pada plastik *degradable* pati biji nangka dengan PVA-g-MAH, *swelling* yang diperoleh kisaran (25.91-84.72%). Nilai *swelling* dari *degradable* pati sagu dan pati biji nangka tidak jauh berbeda. Pada plastik *degradable* pati sagu dengan PVA-g-MAH, nilai *swelling* terbesar yang diperoleh yaitu 28.14% pada penambahan *maleic anhidrat* 10% dan suhu gelatinisasi 65°C. Pada plastik *degradable* pati biji nangka dengan PVA-g-MAH, nilai *swelling* terkecil yang diperoleh yaitu 25.91% pada penambahan *maleic anhydride* 8% dan suhu gelatinisasi 90°C.

Henry Cinedu Obasi et al., (2014) dalam studinya membuat polimer berbasis pati ubi menggunakan *compatibilizer* polipropilena yang dicangkokkan dengan *maleic anhydride* (PP-g-MA) dan polimer dari campuran pati singkong yang diplastisasi tanpa *compatibilizer*. Polimer yang menggunakan *compatibilizer* PP-g-MA lebih tahan air daripada campuran tanpa PP-g-MA. Campuran tanpa PP-g-MA menyerap sekitar 28% lebih banyak air dibandingkan campuran PP-g-MA pada kadar *filler* 10% dan 50% [31]. D.A. Tanjung et al., (2021) mengembangkan termoplastik berbasis pati sagu dengan polipropilena (TPSS/PP). Konsentrasi polipropilena diberikan dari 10 hingga 30 persen, dengan bahan pencampur PP-g-MA. Campuran TPSS menyerap lebih banyak air daripada campuran TPSS/PP

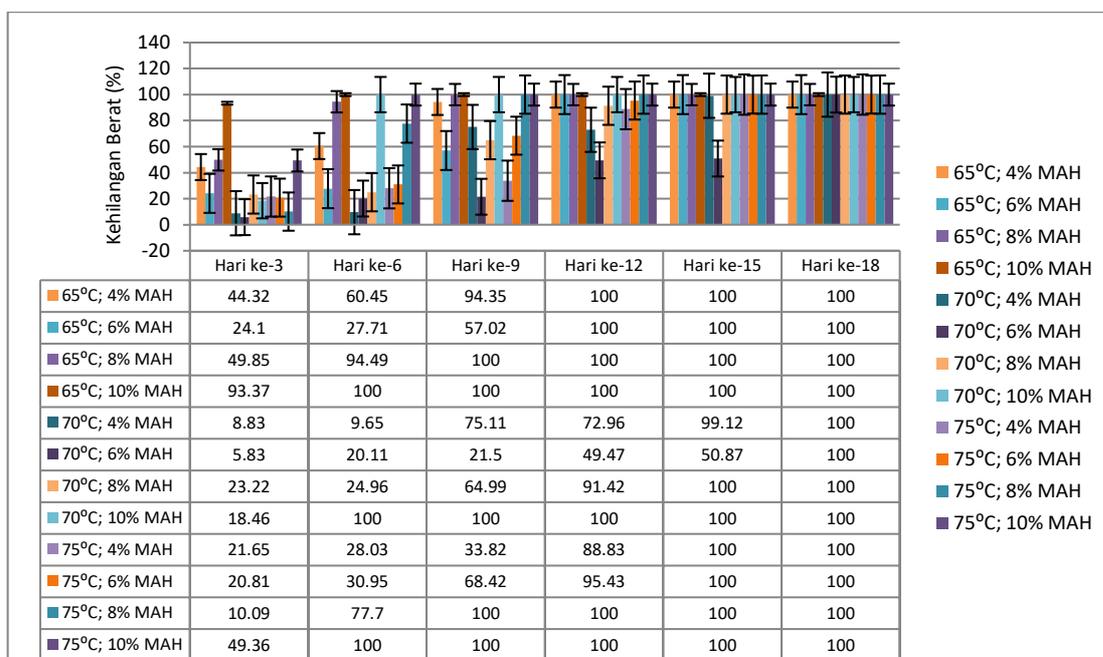
dengan 121.3% karena sifat hidrofilik pati. Semakin banyak PP dalam campuran, semakin sedikit air yang diserap. Gugus hidroksil dari pati sagu bereaksi dengan gugus anhidrida dari PP-g-MA, yang membuat molekul air lebih sulit berinteraksi dengan gugus hidroksil pati^[32].

Hasil analisis dalam penelitian ini Hasil analisis dalam penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan *maleic anhydride* berpengaruh dalam derajat *swelling* yang dihasilkan sehingga dapat menaikkan kestabilan dimensi *film*. Semakin banyak penggunaan *maleic anhydride* pada plastik *degradable* maka nilai *swelling* yang diperoleh lebih kecil dan semakin sedikit penggunaan *maleic anhydride* pada plastik *degradable* maka nilai *swelling* yang dihasilkan semakin besar. Sesuai dengan standar plastik internasional EN 317, nilai *swelling* untuk plastik telah ditentukan sebesar 1.44%^[33]. Besarnya nilai *swelling* pada plastik *degradable* yang dihasilkan dalam penelitian ini belum memenuhi standar plastik internasional EN 317.

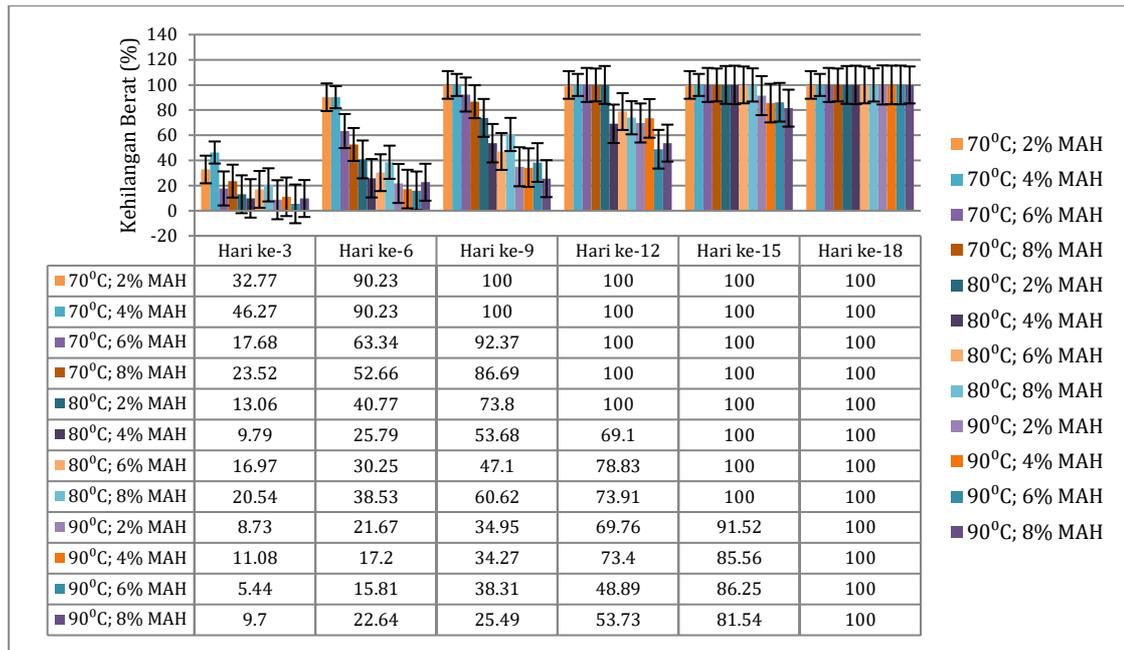
Analisa Laju Biodegradability dengan Penanaman di Dalam Tanah

Untuk menentukan laju penguraian plastik yang dapat terurai dengan menggunakan laju biodegradabilitas, maka diperlukan waktu untuk penguraian plastik yang dapat terurai. Yang mana hal tersebut dengan cara melakukan uji penguburan di dalam tanah.

Hasil waktu degradasi plastik *degradable* pati sagu dan pati biji nangka dengan menggunakan variasi *maleic anhydride* dan suhu gelatinisasi berkisar antara 6-18 hari, yang ditampilkan pada Tabel 5 dan Tabel 6. Pada penelitian ini plastik *degradable* dari pati sagu cenderung lebih cepat terurai secara sempurna pada hari ke-6 dengan penggunaan 10% *maleic anhydride* pada suhu gelatinisasi 65°C, sedangkan plastik *degradable* pati biji nangka terurai habis di hari ke-9 dengan penggunaan 10% *maleic anhydride* pada suhu gelatinisasi 70°C. Penggunaan *maleic anhydride* dan suhu gelatinisasi berpengaruh terhadap tingkat biodegradasi pada plastik *degradable* tergantung dengan jenis pati yang digunakan.



a)



b)

Gambar 5. Analisa laju *biodegradability* a) plastik *degradable* berbasis pati sagu dan PVA-g-MAH b) plastik *degradable* berbasis pati biji nangka dan PVA-g-MAH.

Pati dicampur dengan polimer sintesis yaitu polivinil alkohol (PVA) juga telah dipelajari sebagai polimer potensial yang dapat terurai secara hayati [34] dan PVA lebih mudah terdegradasi oleh tanah dikarenakan PVA bersifat hidrofilik sehingga mudah terdegradasi oleh mikroba. Gliserol sebagai *plasticizer* memiliki sifat hidrofilik karena itu, tingkat penyerapan air lebih tinggi dan dapat menyediakan ruang yang kondusif bagi perkembangan mikroorganisme[35]. Subramanian N., (2019) meneliti plastik ramah lingkungan dari pati sagu, terjadi peningkatan degradasi dengan penggunaan konsentrasi NaOH yang meningkat. Penurunan berat bioplastik 79% dan 74% diamati dengan amilase dari pati sagu setelah 3 hari. Dari hasil terdegradasi tersebut bahwa pati sagu mengandung resistensi amilase [36]. Faktor penggunaan bahan pada polimer, kelembaban tanah atau kondisi lingkungan berpengaruh terhadap tingkat degradasinya plastik *degradable* [37]. Laju *biodegradability* pada plastik *degradable* berbasis pati sagu dan pati biji nangka menggunakan PVA-g-MA memenuhi standar ASTM 6400, yang menetapkan ambang

batas yang sedikit lebih rendah, yaitu 60% biodegradasi dalam waktu enam bulan untuk homopolimer atau kopolimer campuran, dan 90% untuk kopolimer dan gabungan polimer[38].

Kesimpulan

Penelitian ini menggunakan pati sagu, pati biji nangka dan *compatibilizer* PVA-g-MAH untuk plastik *degradable*. Uji kuat tarik 4.41 Mpa - 6.02 MPa pada plastik *degradable* berbasis pati sagu, dan 6.86 - 8.43 MPa pada plastik *degradable* berbasis pati biji nangka. Analisa gugus fungsi dengan FTIR pada plastik *degradable* pati sagu terdapat ikatan O-H dengan bilangan gelombang 3525.88 cm^{-1} , 3394.72 cm^{-1} dan 3309.85 cm^{-1} , ikatan CH₂ bilangan gelombang 2924.09 cm^{-1} , 2854.65 cm^{-1} , 2382.09 cm^{-1} , 2345.44 cm^{-1} dan 2113.98 cm^{-1} , C=C dan C-O bilangan gelombang 1710.86 cm^{-1} , 1643.35 cm^{-1} , 1622.13 dan ikatan N-H bilangan gelombang dan 1550.77 cm^{-1} dan 1415.75 cm^{-1} . Pada plastik *degradable* pati biji nangka ikatan O-H bilangan gelombang 3529.34 cm^{-1} , ikatan CH₂ bilangan gelombang 2922.16 cm^{-1} , 2832.72 cm^{-1} , ikatan C=C dan C-O bilangan gelombang 1627.92 cm^{-1} dan 1552.70 cm^{-1} dan ikatan N-H bilangan

gelombang 1479.96 cm^{-1} dan 1240.23 cm^{-1} . Pada analisa termal dengan DSC plastik *degradable* pati sago suhu transisi gelas 292.59°C , titik leleh 256.20°C , dan suhu kristalisasi 337.38°C , pada plastik *degradable* pati biji nangka terbentuknya semikristalisasi dalam keadaan *amorf* pada kisaran suhu 302.98°C , suhu titik leleh 265.69°C dan suhu kritalisasi pada 328.32°C . Nilai *swelling* yang diperoleh pada plastik *degradable* pati sago yaitu (28.14-72.17%) sedangkan pada plastik *degradable* pati biji nangka yaitu (25.91-84.72%). Degradasi plastik *degradable* pati sago dan pati biji nangka dengan PVA-g- MAH terurai habis pada 6-18 hari.

Ucapan Terima Kasih

Kami berterima kasih kepada Laboratorium Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Malikussaleh yang telah membantu terselesaikannya penelitian ini.

Daftar Pustaka

1. Tanjung, D. A., Jamarun, N., Arief, S., Aziz, H., Ritonga, A. H. & Isfa, B., Influence of LLDPE-g-MA on Mechanical Properties, Degradation Performance, and Water Absorption of Thermoplastic Sago Starch Blends. *Indones. J. Chem.*, **22(1)**: 171–178 (2022).
2. Falua, K. J., Pokharel, A., Babaei-Ghazvini, A., Ai, Y. & Acharya, B., Valorization of Starch to Biobased Materials: A Review. *Polymers (Basel)*, **14(11)**: 1–44 (2022).
3. Muhamad Saleh, E. R., Rakhman, K. A. & Samad, S., Synthesis of Biofoam From Sago Waste as a Biodegradable Food Storage Candidate. *KnE Life Sci.*, **2022**: 162–169 (2022).
4. Lusiana, S. W., Putri, D., Nurazizah, I. Z. & Bahruddin., Bioplastic Properties of Sago-PVA Starch with Glycerol and Sorbitol Plasticizers. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1351(1)**: (2019).
5. Dianursanti. & Khalis, S. A., The Effect of Compatibilizer Addition on *Chlorella vulgaris* Microalgae Utilization as a Mixture for Bioplastic. *E3S Web Conf.*, **67**: 2–6 (2018).
6. Guo, B., Zha, D., Li, B., Yin, P. & Li, P., Polyvinyl alcohol microspheres reinforced thermoplastic starch composites. *Materials (Basel)*, **11(4)**: 1–8 (2018).
7. Nagy, B., Miskolczi, N. & Eller, Z., Improving mechanical properties of pla/starch blends using masterbatch containing vegetable oil based active ingredients. *Polymers (Basel)*, **13(17)**: (2021).
8. Bátori, V., Lundin, M., Åkesson, D., Lennartsson, P. R., Taherzadeh, M. J. & Zamani, A., The effect of glycerol, sugar, and maleic anhydride on pectin-cellulose thin films prepared from orange waste. *Polymers (Basel)*, **11(3)**: (2019).
9. Shrestha, B., Chapain, K., Shah, S. & Pandit, R., Starch/ Polyvinyl Alcohol (PVA) Blend Bioplastics: Synthesis and Physicochemical Properties. *J. Nepal Chem. Soc.*, **43(2)**: 103–109 (2023).
10. Dewi, R., Sylvia, N. & Riza, M., Characterization of Degradable Plastics from Sago and Breadfruit Starch-Based with Addition of Zinc Oxide (ZnO) Catalyst and Polyvinyl Alcohol (PVA). *J. Kim. Sains dan Apl.*, **26(11)**: 427–436 (2023).
11. Elgharbawy, A. S., El Demerdash, A. G. M., Sadik, W. A., Kasaby, M. A., Lotfy, A. H. & Osman, A. I., Synthetic Degradable Polyvinyl Alcohol Polymer and Its Blends with Starch and Cellulose—A Comprehensive Overview. *Polymers (Basel)*, **16(10)**: (2024).
12. More, A. S., Sen, C. & Das, M., Development of Starch-Polyvinyl Alcohol (PVA) Biodegradable Film: Effect of Cross-Linking Agent and Antimicrobials on Film Characteristics. *J. Appl. Packag. Res.*, **9(3)**: 1 (2017).
13. Mandei, J. H., The Use of Heat Moisture Treatment-Modified Sago Starch As a Substitute Ingredient for Dried Noodle Product. *J. Penelit. Teknol. Ind.*, **8(Juni)**: 57–72 (2016).

14. Nguyen, T. K., That, N. T. T., Nguyen, N. T. & Nguyen, H. T., Development of Starch-Based Bioplastic from Jackfruit Seed. *Adv. Polym. Technol.*, **2022**: (2022).
15. Raj, A., Samuel, C. & Prashantha, K., Role of Compatibilizer in Improving the Properties of PLA/PA12 Blends. *Front. Mater.*, **7(July)**: 1–12 (2020).
16. Yu, S., Zhang, Y., Hu, H., Li, J., Zhou, W., Zhao, X. & Peng, S., Effect of maleic anhydride grafted poly(lactic acid) on rheological behaviors and mechanical performance of poly(lactic acid)/poly(ethylene glycol) (PLA/PEG) blends. *RSC Adv.*, **12(49)**: 31629–31638 (2022).
17. Poly, P., Combined Effect of Poly (lactic acid) -Grafted Maleic Anhydride Compatibilizer and Halloysite Nanotubes on Morphology and. (2023).
18. Dwi, T. & Matondang, S., Studies about Palm Sago Starch as a Filler to Make Biodegradable Packaging Material. **7(1)**: 163–175 (2017).
19. Aksit, A., Menzel, T., Aksit, M. & Altstädt, V., Properties of styrene-maleic anhydride copolymer compatibilized polyamide 66/poly (phenylene ether) blends: Effect of maleic anhydride concentration and copolymer content. *Materials (Basel)*, **13(5)**: (2020).
20. Navasingh, R. J. H., Gurunathan, M. K., Nikolova, M. P. & Królczyk, J. B., Sustainable Bioplastics for Food Packaging Produced from Renewable Natural Sources. *Polymers (Basel)*, **15(18)**: (2023).
21. Barrino, F., De La Rosa-Ramírez, H., Schiraldi, C., López-Martínez, J. & Samper, M. D., Preparation and Characterization of New Bioplastics Based on Polybutylene Succinate (PBS). *Polymers (Basel)*, **15(5)**: 1–15 (2023).
22. Kane, S. N., Mishra, A. & Dutta, A. K., Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2016). *J. Phys. Conf. Ser.*, **755(1)**: (2016).
23. Tan, S. X., Andriyana, A., Ong, H. C., Lim, S., Pang, Y. L. & Ngoh, G. C., A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers Fabrication. *Polymers (Basel)*, **14(664)**: 1–27 (2022).
24. Li, M., Tian, X., Jin, R. & Li, D., Preparation and characterization of nanocomposite films containing starch and cellulose nanofibers. *Ind. Crops Prod.*, **123(July)**: 654–660 (2018).
25. Ortega-Toro, R., López-Córdoba, A. & Avalos-Belmontes, F., Epoxidised sesame oil as a biobased coupling agent and plasticiser in polylactic acid/thermoplastic yam starch blends. *Heliyon*, **7(2)**: 1–8 (2021).
26. Dewi, R., Ibrahim, N., Sylvia, N., Abdullah, D. & Riza, M., Thermal behavior of modified thermoplastic starch (Tps) synthesized from sago (metroxylon sago) with diphenylmethane diisocyanate and castor oil. *Emerald Reach Proc. Ser.*, **1**: 387–393 (2018).
27. Kowser, M. A., Hossain, S. M. K., Amin, M. R., Chowdhury, M. A., Hossain, N., Madkhali, O., Rahman, M. R., *et al.*, Development and Characterization of Bioplastic Synthesized from Ginger and Green Tea for Packaging Applications. *J. Compos. Sci.*, **7(3)**: 1–17 (2023).
28. Majder-Łopatka, M., Węsierski, T., Ankowski, A., Ratajczak, K., Duralski, D., Piechota-Polanczyk, A. & Polanczyk, A., Thermal analysis of plastics used in the food industry. *Materials (Basel)*, **15(1)**: (2022).
29. Nasirtabrizi, M. H., Ziaei, Z. M., Jadid, A. P. & Fatin, L. Z., Synthesis and chemical modification of maleic anhydride copolymers with phthalimide groups. *Int. J. Ind. Chem.*, **4(1)**: 11 (2013).
30. Gunawardene, O. H. P., Gunathilake, C., Amaraweera, S. M., Fernando, N. M. L., Wanninayaka, D. B., Manamperi, A., Kulatunga, A. K., *et al.*, Compatibilization of starch/synthetic biodegradable polymer blends for packaging applications: A review. *J. Compos. Sci.*, **5(11)**: 1–33 (2021).

31. Obasi, H. C. & Igwe, I. O., Cassava starch-mixed polypropylene biodegradable polymer: Preparation, characterization, and effect biodegradable products on growth of plants. *Int. J. Sci. Res.*, **3(7)**: 802–807 (2012).
32. Tanjung, D. A., Jamarun, N., Arief, S., Aziz, H., Ritonga, A. H. & Isfa, B., Improving mechanical and physical properties on thermoplastic sago starch blends with the addition of polypropylene. *Rasayan J. Chem.*, **14(4)**: 2451–2458 (2021).
33. Harsojuwono, B. A., Arnata, I. W., Hartiati, A., Setiyo, Y., Hatiningsih, S. & Suriati, L., The Improvement of the Modified Starch—Glucomannan—Polyvinyl Alcohol Biothermoplastic Composite Characteristics With Polycaprolactone and Anhydride Maleic Acid. *Front. Sustain. Food Syst.*, **6(March)**: 1–13 (2022).
34. Widiarto, S. & Brojonegoro, J. S., EFFECT OF BORAX ON MECHANICAL PROPERTIES AND BIODEGRADABILITY OF SAGO STARCH - POLY (VINYL ALCOHOL) BLEND FrLMS. *Polymers (Basel)*, **1(3)**: 151–157 (2005).
35. Pati, D. & Pisang, K., 3 ; 2 ; 69–81
36. Subramanian, N., Vinoth Kumar, B., Geetha, M. & Gladys Kalpana, K., Biodegradable Plastic From Mixed Starch. *Int. J. Mech. Eng.*, **6(3)**: 1009–1019 (2021).
37. Coppola, G., Gaudio, M. T., Lopresto, C. G., Calabro, V., Curcio, S. & Chakraborty, S., Bioplastic from Renewable Biomass: A Facile Solution for a Greener Environment. *Earth Syst. Environ.*, **5(2)**: 231–251 (2021).
38. Folino, A., Pangallo, D. & Calabrò, P. S., Assessing bioplastics biodegradability by standard and research methods: Current trends and open issues. *J. Environ. Chem. Eng.*, **11(2)**: (2023).