

Artikel

# Fisikokimia, Reologi, Kecernaan In-Vitro, dan Sifat Pengemulsi Pati yang Diekstrak dari Nanas Limbah Pertanian Batang

Tempat Tinggal Sriprabom<sup>1</sup>, Manop Suphantharika dan<sup>2</sup> ID, Siwaporn Meejoo Smith<sup>3</sup> ID, Taweechai Amornsakchai<sup>3</sup> ID, Jukkrapong Pinyo<sup>4</sup> ID, Rungtiwa Wongsagonsup<sup>4</sup> ID

- <sup>1</sup> Divisi Teknologi Pangan, Kampus Kanchanaburi, Universitas Mahidol, Kanchanaburi 71150, Thailand; jirattthikan.new@gmail.com
- <sup>2</sup> Departemen Bioteknologi, Fakultas Sains, Universitas Mahidol, Jalan Rama 6, Bangkok 10400, Thailand; manop.sup@mahidol.ac.th
- <sup>3</sup> Pusat Energi Berkelanjutan dan Material Ramah Lingkungan dan Departemen Kimia, Fakultas Sains, Universitas Mahidol, Nakhon Pathom 73170, Thailand; siwaporn.smi@mahidol.ac.th (SMS); taweechai.amo@mahidol.ac.th (TA)
- <sup>4</sup> Fakultas Pertanian di Kamphaeng Saen, Universitas Kasetsart, Nakhon Pathom 73140, Thailand; jukkrapong.p@ku.th \*

Korespondensi: rungtiwa.won@mahidol.ac.th † Alamat

Sekarang: Gugus Akademik dan Penelitian Pangan dan Gizi, Institut Gizi, Universitas Mahidol, Nakhon Pathom 73170, Thailand.

**Abstrak:** Dalam penelitian ini, sifat fisikokimia, reologi, daya cerna pati in vitro, dan sifat pengemulsi pati yang diekstrak dari limbah pertanian batang nanas diteliti dengan membandingkannya dengan pati singkong, jagung, dan beras komersial. Pati batang nanas memiliki kandungan amilosa tertinggi (30,82%), yang berkontribusi terhadap suhu penempelan tertinggi (90,22 °C) dan viskositas pasta terendah. Pati ini memiliki suhu gelatinisasi, entalpi gelatinisasi, dan retrogradasi tertinggi. Gel pati batang nanas memiliki stabilitas beku-cair terendah, sebagaimana dibuktikan oleh nilai sineresis tertinggi sebesar 53,39% setelah lima siklus beku-cair. Uji aliran tetap menunjukkan bahwa gel pati batang nanas (6%, b/b) menunjukkan koefisien konsistensi (K) terendah dan indeks perilaku aliran (n) tertinggi, sedangkan pengukuran viskoelastis dinamis memberikan kekuatan gel dalam urutan berikut: beras > jagung > batang nanas > gel pati singkong. Menariknya, pati batang nanas memberikan kandungan pati yang dapat dicerna secara lambat (SDS) (48,84%) dan pati resistan (RS) (15,77%) tertinggi dibandingkan dengan pati lainnya. Emulsi minyak dalam air (O/W) yang distabilkan dengan pati batang nanas yang digelatinisasi menunjukkan stabilitas emulsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pati singkong yang digelatinisasi. Oleh karena itu, pati batang nanas dapat digunakan sebagai sumber SDS dan RS yang menjanjikan, dan sebagai penstabil emulsi untuk aplikasi pangan.

**Kata kunci:** pati batang nanas; sifat fisikokimia; limbah pertanian; reologi; pencernaan pati secara in vitro; emulsi O/W



**Kutipan:** Sriprabom, J.; Suphantharika, M.; Smith, SM; Amornsakchai, T.; Pinyo, J.; Wongsagonsup, R. Sifat Fisikokimia, Reologi, Daya Cerna In-Vitro, dan Pengemulsi Pati yang Diekstrak dari Limbah Pertanian Batang Nanas. *Foods* **2023**, *12*, 2028. <https://doi.org/10.3390/foods12102028>

Editor Akademik: Sara

Ghorbani Gorji dan Paul JA Sobral

Diterima: 14 April 2023

Direvisi: 10 Mei 2023

Diterima: 16 Mei 2023

Diterbitkan: 17 Mei 2023



**Hak Cipta:** © 2023 oleh penulis. Pemegang Lisensi MDPI, Basel, Swiss. Artikel ini adalah artikel akses terbuka didistribusikan berdasarkan ketentuan dan kondisi Creative Commons Lisensi Atribusi (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Pendahuluan

Saat ini, ada minat global yang berkembang dalam mengeksplorasi sumber daya pati baru dan mengembangkan produk kimia berbasis bio atau ramah lingkungan. Akibatnya, bahan alternatif hijau seperti pati yang berasal dari limbah pertanian akan berharga untuk produk makanan dan non-makanan karena biaya rendah dan ketersediaannya dari sumber daya terbarukan [1–3]. Pati adalah sumber karbohidrat terpenting untuk nutrisi manusia dan biopolimer alami serbaguna yang ditemukan dalam sereal dan umbi-umbian. Pati juga memainkan peran penting dalam mengendalikan struktur, tekstur, dan stabilitas makanan [4]. Ada dua kategori utama polimer pati: amilosa dan amilopektin, yang merupakan homopolimer unit rantai D-glukosa [5]. Berdasarkan laju dan tingkat pencernaan pati, pati diklasifikasi

pati yang mudah dicerna (RDS), pati yang mudah dicerna (SDS), dan pati resistan (RS) [6]. Untuk manfaat kesehatan, SDS dan RS direkomendasikan sebagai karbohidrat makanan sehat untuk mengatur homeostasis glukosa darah dan mengurangi respons glikemik [5], yang dapat mencegah banyak penyakit kronis seperti obesitas dan diabetes. Namun, pati dari berbagai bagian tanaman seperti daun, batang, akar, dan buah berbeda secara signifikan dalam hal sifat morfologi dan fisikokimia serta daya cernanya.

Nanas merupakan salah satu tanaman buah terpenting di Thailand, yang menghasilkan lebih dari 1,67 juta ton setiap tahunnya [7]. Dengan demikian, peningkatan produksi nanas akan menghasilkan jumlah limbah yang dapat diprediksi setiap tahunnya. Setelah panen nanas, batang dan daunnya dianggap sebagai limbah pertanian. Sebagian besar limbah ini tidak memiliki penggunaan akhir yang jelas dan dapat dibuang secara tidak benar, yang dapat menyebabkan masalah lingkungan yang serius [1]. Oleh karena itu, sangat penting untuk memanfaatkan limbah pertanian batang nanas untuk meningkatkan keberlanjutan dan ekonomi dari proses tersebut dan berpotensi mendukung nilai tambah dalam produk makanan medis dan industri.

Menurut penelitian sebelumnya, batang nanas digunakan sebagai limbah pertanian untuk mendapatkan enzim bromelain, yang dapat digunakan dalam industri makanan dan farmasi [8,9]. Baru-baru ini, batang nanas telah digunakan sebagai sumber pati alternatif untuk aplikasi makanan dan non-makanan [1,2,10–12]. Dalam penelitian kami sebelumnya, karakteristik dasar pati yang diekstraksi dari batang nanas ditentukan, seperti hasil ekstraksi, kandungan amilosa, distribusi ukuran partikel, morfologi granula, difraksi sinar-X, daya pembengkakan, kelarutan, sifat pasta, dan sifat gelatinisasi dibandingkan dengan pati beras, jagung, dan singkong yang tersedia secara komersial [1]. Hasil ekstraksi pati batang nanas adalah 30% dalam berat kering [1]. Granul pati batang nanas dengan ukuran partikel median 9,69  $\mu\text{m}$  memiliki bentuk semi-sudut dengan segmen sebagian bulat yang memiliki dua atau lebih permukaan datar [1]. Pati batang nanas menunjukkan struktur kristal tipe A dengan kristalinitas relatif 25,12% [1,2]. Akan tetapi, daya cerna pati batang nanas secara in vitro belum diteliti. Selain itu, sifat reologi dan pengemulsi pati batang nanas masih kurang diketahui. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengkarakterisasi pati batang nanas yang diekstraksi dan menyelidiki sifat reologi, daya cerna pati secara in vitro, dan kemampuannya untuk menstabilkan emulsi minyak dalam air (O/W) dibandingkan dengan pati singkong, jagung, dan beras yang tersedia secara komersial untuk memberikan informasi berharga bagi aplikasi di masa mendatang.

## 2. Bahan dan Metode

### 2.1. Bahan

Batang nanas (*Ananas comosus*, varietas Smooth Cayenne) dikumpulkan sebagai limbah pertanian setelah panen di perkebunan nanas (Kanchanaburi, Thailand) (Gambar 1A). Semua batang yang baru dikumpulkan dari perkebunan nanas (10 kg) segera dibawa ke laboratorium dalam sehari dan disimpan dalam freezer hingga digunakan untuk isolasi pati. Batang yang basi tidak dipilih untuk penelitian ini. Pati singkong (merek Jade leaf), pati jagung (merek Kruawangthip), dan minyak kedelai dibeli dari pasar lokal (Bangkok, Thailand). Pati beras disediakan oleh Cho Heng Rice Vermicelli Factory Co., Ltd. (Nakhon Pathom, Thailand). Pankreatin babi (P7545, spesifikasi 8xUSP) dan amiloglukosidase (A-7095, 300 U/mL) diperoleh dari Sigma-Aldrich Chemical Co. (St. Louis, MO, AS). Kit pengujian glukosa oksidase/peroksidase (GOPOD) diperoleh dari Megazyme International Ireland Ltd. (Wicklow, Irlandia). Semua bahan kimia lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah kelas analitis.

### 2.2. Ekstraksi Pati Batang Nanas

Ekstraksi pati batang nanas disiapkan sesuai dengan metode Nak-thong et al. [1] dan Tangsrianugul et al. [13] dengan beberapa modifikasi. Batang nanas dicuci, dikupas, dan dipotong-potong kecil. Potongan-potongan ini digiling dengan larutan natrium metabisulfit 400 ppm ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) dengan rasio berat 1:3 dalam penggilingan. Bubur batang nanas kemudian diaduk pada suhu kamar selama 18 jam. Bubur kemudian disari

Kue pati dikeringkan semalaman dalam oven pada suhu 45 °C. Akhirnya, batang nanas yang dikeringkan pati digiling dan diayak melalui saringan 100 mesh (Gambar 1B). Nanas yang diisolasi Pati batang disimpan dalam kantong plastik ziplock polietilen dan disimpan pada suhu ruang. pH pati batang nanas yang diisolasi adalah 6,79.



### Kandungan Amilosa

Kandungan Amilosa pati batang nanas dilakukan dengan metode Nak-Kadar amilosa pati batang thomson pada [1] dan Torgersen dan bayer al. [13] dengan beberapa modifikasi. Batang nanas, jagung, dan padi beras) yang disis keenggungan kitorijamilosagami dektin (Megazyme International Ireland Ltd, Wick, New Zealand) dengan sampel dihidangkan 10 menit dengan pemanasan. Nubuat pati yang telah diambil sukatasi (DMSO) dipisahkan dengan cara mendidihkan dengan pati dalam etanol 95% yang kemudian dievaporasi dan dikondensasi dengan asetat glasir. 100 ml 40 mg agarose 20 mm x 1,5 mm digunakan untuk menyalakan dengan gelas A Gelus. Pati dalam filtrat A ditambahkan ke suspensi pati untuk mengendapkan amilopektin yang dihilangkan sentrifugasi dengan sentrifugasi pada 5000 x g selama 10 menit. Fraksi cair ade dengan sentrifugasi, dikonsentrasikan pada spinfilter unitikamilosa secara manual. Supernatan dialisis menggunakan reagen GORDAN air suling sampai supernatnya bening. Bubur pati

dikeringkan semalaman dalam oven pada suhu 45 °C. Akhirnya, nanas kering 2.3.2. Sifat-sifat Pasta

Pati batang digiling dan diayak melalui saringan 100 mesh (Gambar 1B). Pati batang nanas yang diisolasi dan pati komersial dianalisis untuk mengetahui karakteristik pasta. Pati batang nanas disimpan dalam kantong plastik polietilen dan disimpan pada suhu kamar menggunakan Rapid Visc Analyzer (RVA) (Model-4, Newport Scientific Pty. Ltd., War- pH pati batang nanas yang diisolasi adalah 6,79.

2.3.3 *Sifat Fisikokimia* Pada 0,1% pati, dan dengan mencampurkan sampel pati dengan air suling untuk mendapatkan konsentrasi pati akhir diaduk dalam wadah aluminium selama 20 detik sebelum dimasukkan ke dalam

2.3.1. Instrumen kadar amilosa. Rapid Visco Unit (RVU) digunakan untuk mengukur viskositas.

Kandungan amilosa dari pati batang nanas dan pati komersial (pati singkong, jagung, dan beras)

[illegible]

Pengamatan Mikroskopis Pasta Pati

Larutan iodine 0,1%, dipindahkan ke slide, dan ditutup dengan penutup kaca. Morfologi

Penempelan Pati batang nanas dan pati komersial dianalisis untuk mengetahui karakteristik penempelan menggunakan Rapid Visco-Analyzer (RVA) (Model-4, Newport Scientific Pty. Ltd., Warriewood, Australia) berdasarkan profil standar 1. Suspensi pati seberat 28 g disiapkan dengan mencampur sampel pati dengan air suling untuk memperoleh konsentrasi pati akhir sebesar 6% *b/b*, dan diaduk dalam wadah aluminium selama 20 detik sebelum dimasukkan ke dalam

pasta diamati dengan mikroskop cahaya normal (Olympus BX51, Olympus Optical Co. Ltd., Tokyo, Jepang) pada perbesaran 40x .

### 2.3.5. Penentuan Stabilitas Beku-Cair Lima gram pasta

pati dari RVA ditempatkan dalam tabung sentrifus 15 mL, dibekukan pada suhu -18 °C selama 21 jam, lalu dicairkan dalam penangas air pada suhu 30 °C selama 3 jam, yang diulang selama lima siklus. Persen sineresis ditentukan untuk setiap siklus beku-cair dengan membagi berat air yang dipisahkan setelah sentrifugasi tabung sampel pada 2200x g selama 10 menit dengan berat gel awal dan mengalikannya dengan 100.

### 2.3.6. Penentuan Sifat Termal

Sampel pati dianalisis untuk mengetahui sifat termalnya menggunakan kalorimeter pemindaian diferensial (DSC) (Sistem DSC-1 STARe, Mettler-Toledo AG, Schwerzenbach, Swiss) seperti yang dijelaskan oleh Wongsagonsup et al. [14]. Panci aluminium yang berisi campuran 3 mg (berat kering) sampel pati dan 9 mg air suling ditutup rapat dan diseimbangkan pada suhu kamar selama 1 jam sebelum ditempatkan dalam instrumen DSC . Panci sampel dipanaskan dari 25 hingga 100 °C pada laju pemanasan 10 °C/menit. Untuk analisis retrogradasi, pati yang tergelatinisasi dari pengukuran DSC disimpan pada suhu 4 °C selama 7 hari dan kemudian dianalisis dengan DSC dalam kondisi yang sama seperti untuk gelatinisasi pati. Persentase retrogradasi dihitung sebagai berikut:

$$\text{Retrogradasi (\%)} = (\Delta H_{\text{ret}} / \Delta H_{\text{gel}}) \times 100$$

di mana  $\Delta H_{\text{ret}}$  adalah entalpi retrogradasi dan  $\Delta H_{\text{gel}}$  adalah entalpi gelatinisasi.

### 2.4. Pengukuran Reologi Gel

pati yang baru disiapkan dari RVA dianalisis untuk sifat reologinya pada suhu 25 °C menggunakan rheometer (HAAKE MARS 40, Thermo Fischer Scientific, Karlsruhe, Jerman) yang dilengkapi dengan sensor kerucut dan pelat ( sudut kerucut 2°, diameter 40 mm, dan celah 0,1 mm). Untuk pengukuran viskoelastis dinamis, rentang viskoelastis linier ditentukan dengan memvariasikan regangan 0,01–100% pada frekuensi tetap 10 rad/dtk. Uji sapuan frekuensi dinamis kemudian dilakukan dalam rentang viskoelastis linier dengan regangan konstan 0,2% dalam rentang frekuensi 0,1–10 rad/dtk. Modulus penyimpanan ( $G'$ ), modulus kehilangan ( $G''$ ), dan tangen kehilangan, yang didefinisikan sebagai rasio  $G''$  terhadap  $G'$  ( $\tan \delta$ ), kemudian diplot sebagai fungsi frekuensi.

Untuk pengukuran aliran tetap, sampel digeser terus menerus dari 0,1 s $\dot{\gamma}$ 1 hingga 300 s $\dot{\gamma}$ 1 dalam 1 menit diikuti dengan pengurangan langsung dari 300 s $\dot{\gamma}$ 1 hingga 0,1 s $\dot{\gamma}$ 1 dalam 1 menit berikutnya. Kurva aliran yang diperoleh dianalisis menggunakan model Herschel-Bulkley sebagai berikut:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 + K \dot{\gamma}^n$$

dimana,  $\dot{\gamma}$  adalah tegangan geser (Pa),  $\dot{\gamma}_0$  adalah tegangan luluh (Pa),  $K$  adalah laju geser (s $\dot{\gamma}$ 1),  $n$  adalah indeks perilaku aliran (tanpa dimensi).

### 2.5. Daya Cerna Pati In-Vitro

Kecernaan pati ditentukan secara in vitro menurut metode Englyst et al. [6] dengan sedikit modifikasi. Sebelum pengujian, sampel pati direbus pada suhu 100 °C selama 15 menit. Untuk menentukan kecernaan pati secara in vitro, sebagian pati yang dicerna diambil setelah pencernaan enzimatik dengan campuran enzim pankreatin babi dan amiloglucosidase pada menit ke-20 dan ke-120. Kandungan glukosa yang dilepaskan setelah 20 menit (G20) dan 120 menit (G120) pencernaan enzimatik diukur menggunakan kit uji GOPOD. Fraksi pati dihitung sebagai berikut:

$$\text{Pati yang mudah dicerna (RDS) (\%)} = \%G20 \times 0,9$$

$$\text{Pati yang lambat dicerna (SDS) (\%)} = (\%G120 - \%G20) \times 0,9$$

$$\text{Pati resistan (RS) (\%)} = 100 - (\%RDS + \%SDS)$$

2.6. Penentuan Sifat Emulsifikasi

Emulsi disiapkan sesuai dengan metode Sriprabom et al. [ 15]. suspensi pati yang mengandung 5% (b/b) pati dalam air suling direbus dalam penangas air pada suhu 100 °C selama 15 menit. Emulsi dibuat dengan mencampur 10% (b/b) minyak kedelai dan 90% (b/b) fase air dari suspensi pati yang dimasak setelah didinginkan hingga suhu kamar dalam penyebar (model Ultra Turrax T18, IKA Works, Inc., Wilmington, NC, AS) pada 10.000 rpm selama 1 menit pertama dan kemudian pada 14.000 rpm selama 4 menit tambahan. Natrium azida digunakan sebagai pengawet pada konsentrasi 0,02% (b/b). Emulsi yang baru disiapkan (10 mL) diisi ke dalam botol kaca dan disimpan pada suhu kamar selama 15 hari. Stabilitas emulsi dievaluasi dengan indeks krim (CI), yang didefinisikan sebagai berikut:

$$CI (\%) = (HS/HE) \times 100$$

di mana HS merupakan tinggi lapisan serum dan HE merupakan tinggi total emulsi.

2.7. Analisis Statistik

Semua pengukuran dilakukan dalam tiga kali replikasi. Hasil dinyatakan sebagai berikut: berarti ± simpangan baku. Analisis statistik dilakukan dengan menggunakan SPSS versi Program 26.0 untuk Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, AS). Perbedaan yang signifikan antara rata-rata dianalisis menggunakan ANOVA satu arah dan uji rentang berganda Turki pada 5% tingkat signifikansi (p < 0,05).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kandungan Amilosa

Amilosa merupakan salah satu komponen kunci yang berpengaruh secara signifikan terhadap sifat fisikokimia dan daya cerna pati [1,16]. Kandungan amilosa batang nanas, Pati singkong, jagung, dan beras disajikan pada Tabel 1. Pati batang nanas memiliki kandungan kandungan amilosa tertinggi, yaitu sebesar 34,37% yang dilaporkan oleh Nakthong et al. [1], namun lebih tinggi dari nilai yang dilaporkan oleh Rinju dan Harikumar-Thampi [2] (23,86%). Oleh karena itu, variasi kandungan amilosa terhadap jenis pati yang sama bergantung terutama pada lingkungan, genotipe, dan sumber botani. Kandungan amilosa pati singkong, jagung dan beras sesuai dengan data yang dilaporkan oleh Srichuwong dan Jane [17]. Biasanya, pati akar dan umbi memiliki kandungan amilosa lebih rendah daripada pati sereal normal. Pati dengan kandungan amilosa tinggi membantu menunda pencernaan pati dan menurunkan glukosa darah. tingkat [16,18], yang berguna untuk produksi makanan indeks glikemik rendah.

**Tabel 1.** Kandungan amilosa dan stabilitas beku-cair pada batang nanas, singkong, jagung, dan umbi-umbian. pati beras.

Mencicipi	Kandungan Amilosa (%)		Sineresis (%)						
			1 Siklus	2 Siklus	3 Siklus	4 Siklus	5 Siklus		
Batang Nanas	30,82 ± 0,85	A	Tahun 19,52 ± 0,83	SM 29,76 ± 0,77	51,52 ± 0,96	aB	53,21 ± 0,74 21,40	53,39 ± 0,93	A A
Singkong	18,98 ± 0,22	D	M *	3,82 ± 0,30 bc	13,21 ± 0,84	—	± 0,84 bA 40,98 ±	23,16 ± 0,86 bA	Dan
Jagung	b. 22,88 ± 0,23		Nilai CD 4,15 ± 0,13	0,46	20,79 ±	bB31,21	0,59	41,13 ± 0,41	
Beras	21,46 ± 0,32	C	7,87 ± 0,27	16,07 ± 0,65	29,07 ± 0,66	cC	—	35,37 ± 0,74	itu

\* Tidak terdeteksi. Nilai dalam kolom yang sama dengan huruf superskrip kecil yang berbeda (a–d) secara signifikan berbeda (p < 0,05). Nilai pada baris yang sama dengan huruf kapital superskrip yang berbeda (A–E) secara signifikan berbeda (p < 0,05).

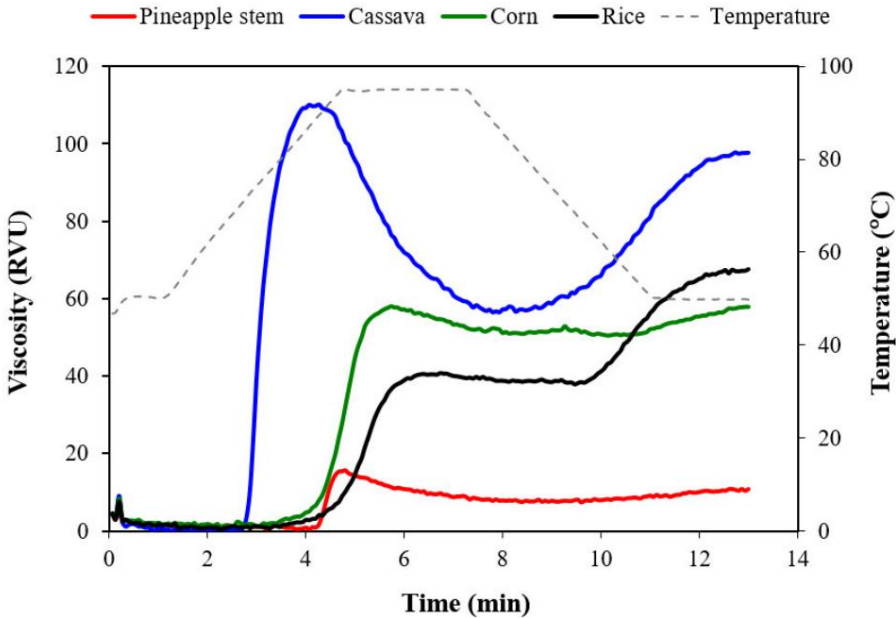


3.2. Menempelkan Properti

Gambar 2 dan Tabel 2 menunjukkan kurva penempelan RVA dan parameter penempelan pati batang nanas dibandingkan dengan pati singkong, jagung, dan beras yang tersedia secara komersial, Sesuai dengan hasil penelitian, pati batang nanas menunjukkan nilai terendah viskositas puncak, palung terendah, viskositas akhir terendah, dan kemunduran terendah, tetapi viskositas tertinggi suhu penempelan. Pemecahan pati batang nanas lebih tinggi dibandingkan dengan pati beras tetapi lebih rendah dibandingkan dengan pati singkong. Kandungan amilosa pati lebih tinggi berkorelasi dengan viskositas puncak dan kerusakan yang lebih rendah serta suhu penempelan yang lebih tinggi [17]. Namun, lipid yang ada dalam pati beras dapat membentuk kompleks heliks dengan amilosa, yang meningkatkan interaksi molekul pati, sehingga menghasilkan kerusakan terendah nilai pati beras. Tren serupa diamati oleh Nakthong et al. [1], yang mempelajari Pati batang nanas memiliki sifat perekat yang sangat rendah. Pati batang nanas menunjukkan sifat perekat yang sangat rendah. viskositas pasta, menunjukkan bahwa granula pati sangat kuat dan pembengkakannya sangat terbatas. Puncak, palung, dan viskositas akhir pati yang lebih rendah dapat disebabkan oleh granula pati yang lebih terbatas [19]. Pembengkakan granula pati batang nanas yang terbatas pelindian molekul amilosa dari granula terbatas, sehingga agregasi amilosa berkurang selama pendinginan dan akibatnya viskositas setback lebih rendah. Pembengkakan terbatas pada butiran dan viskositas dapat dikaitkan dengan kandungan amilosa tertinggi pada nanas pati batang (Tabel 1). Amilosa meningkatkan interaksi antar molekul pati, yang mempertahankan integritas granula pati dan meningkatkan stabilitasnya [20,21]. Oleh karena itu, kandungan amilosa yang lebih tinggi dapat menekan kemampuan pembengkakan granula dan mengurangi perilaku perekatan pati. Sebaliknya, pati singkong menunjukkan viskositas puncak tertinggi dan kerusakan tetapi suhu penempelan terendah (Tabel 2), sesuai dengan suhu penempelan terendah kandungan amilosa (Tabel 1). Kandungan amilosa yang rendah dapat menyebabkan viskositas yang tinggi dan suhu penempelan pasta pati yang rendah [22,23].

Makanan 2023, 12, x UNTUK TINJAUAN SEBAYA

7 dari 16



Gambar 2. Kurva penempelan RVA dari pati batang nanas, singkong, jagung, dan beras dengan konsentrasi 6% (b/b).  
bubur pati.

Tabel 2. Penampakan Visual dan Pengamatan Mikroskopis Pasta Pati beras.

Mencicipi	Penampakan visual dan ciri morfologi dengan pewarnaan iodum					Suhu (°C) pasta
	Viskositas Puncak Melalui Viskositas Akhir (RVU)	Viskositas Puncak Melalui Viskositas Akhir (RVU)	Viskositas Puncak Melalui Viskositas Akhir (RVU)	Viskositas Puncak Melalui Viskositas Akhir (RVU)	Viskositas Puncak Melalui Viskositas Akhir (RVU)	
Batang Nanas	15,78 ± 0,13	3,75 ± 0,13	2,06 ± 0,38	hari		
Singkong	111,61 ± 1,47	3,75 ± 0,13	2,06 ± 0,38	hari		
Jagung	57,06 ± 0,96	3,75 ± 0,13	2,06 ± 0,38	hari		
Beras	40,55 ± 0,48	37,64 ± 0,48	2,91 ± 0,00	67,47 ± 0,73	29,83 ± 0,30	82,87 ± 0,83

Nilai pada kolom yang sama dengan superskrip yang berbeda berbeda secara signifikan (p > 0,05).

3.3 Penampakan Visual dan Pengamatan Mikroskopis Pasta Pati

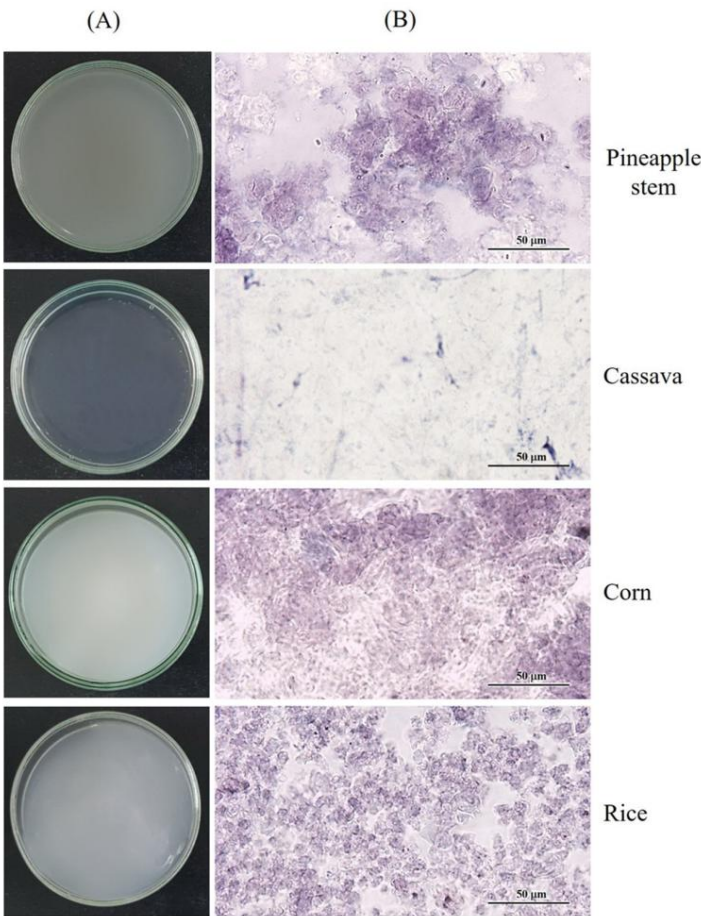
(Gambar 3B). Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian Błaszczyk dan Lewandowicz [24] yang menemukan bahwa Dispersi pati singkong yang digelatinisasi sempurna tanpa granula yang membengkak diamati pada suhu 90 °C, menunjukkan karakteristik pembengkakan yang tinggi. Sebaliknya, batang nanas, jagung, dan pasta pati beras dengan kandungan amilosa yang lebih tinggi berwarna keruh dan buram (Gambar 3A). butiran pati tidak sepenuhnya terganggu tetapi mempertahankan struktur butirannya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3B. Hal ini dikarenakan molekul amilosa berinteraksi dengan molekul amilopektin untuk meningkatkan stabilitas dan integritas granula [1,21], yang dapat membatasi granula pati pembengkakan dan menghasilkan pasta yang buram. Secara umum, pati sereal normal membentuk pasta yang keruh dan buram karena adanya kompleks heliks yang terbentuk antara molekul amilosa dan lipid, yang meningkatkan interaksi antara amilosa terjerat dan amilopektin molekul, sekali lagi membatasi pembengkakan pati sereal normal [17]. Untuk batang nanas, pasta pati jagung dan beras, warna biru tua dari kompleks amilosa-yodium diamati di sekitar butiran yang membengkak dengan warna merah-ungu dari amilopektin-iodin pewarnaan, menunjukkan kebocoran amilosa dari butiran selama gelatinisasi [24].

Tabel 2. Parameter penempelan RVA dari pati batang nanas, singkong, jagung, dan beras.

Mencicipi	Viskositas Puncak (RVU)	Palung (RVU)	Kerusakan (RVU)	Viskositas Akhir (RVU)	Kemunduran (RVU)	Suhu Penempelan (°C)
Batang Nanas	d. 15,78 ± 0,13	d. 8,47 ± 0,13	b. 7,31 ± 0,05	d. 10,53 ± 0,48	d. 2,06 ± 0,38	90,22 ± 0,53 A
Singkong	a111,61 ± 1,47 657,06	57,06 ± 0,49 dan A	54,55 ± 1,10 dan A	98,17 ± 0,60 < 57,53 a	41,11 ± 0,50 detik A	70,86 ± 0,29 miliar C
Jagung	0,96 z	49,61 ± 0,79	7,45 ± 0,13	0,42 b 67,47 ± 0,73 z	7,92 ± 0,44	81,84 ± 0,82 miliar
Beras	40,55 ± 0,48 C	37,64 ± 0,48 C	2,91 ± 0,00 C		b. 29,83 ± 0,30	82,87 ± 0,83

Makanan 2023, 12, x UNTUK TINJAUAN SEBAYA

Nilai pada kolom yang sama dengan superskrip yang berbeda berbeda secara signifikan (p > 0,05).



Gambar 3. Penampakan visual (A) dan ciri morfologi (B) batang nanas, singkong, Gambar 3. Penampakan visual (A) dan ciri morfologi (B) batang nanas, singkong, pasta pati jagung dan beras dan pengukuran RVA. Morfologi pati yang diwarnai dengan iodium pasta pati jagung dan beras disko peraganya pada 400x perbesaran. Morfologi pati yang diwarnai dengan iodium pasta diamati dengan mikroskop cahaya pada perbesaran 400x.

3.4. Stabilitas Beku-Cair

Istilah “stabilitas beku-cair” mengacu pada kemampuan pati untuk menahan perubahan fisik yang tidak menguntungkan yang terjadi selama pembekuan dan pencairan. Sineresis adalah proses di mana air yang tidak terikat mudah dilepaskan dari jaringan polimer selama pencairan [25]. Diasumsikan bahwa sineresis gel pati berhubungan langsung dengan retrogradasi

3.4. Stabilitas Beku-Cair

Istilah “stabilitas beku-cair” mengacu pada kemampuan pati untuk menahan perubahan fisik yang tidak menguntungkan yang terjadi selama pembekuan dan pencairan. Sineresis adalah proses yang mana air tak terikat mudah dilepaskan dari jaringan polimer selama pencairan [25]. Diasumsikan bahwa sineresis gel pati berhubungan langsung dengan retrogradasi pati [25,26]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua gel pati menunjukkan peningkatan yang signifikan sineresis dengan peningkatan siklus beku-cair ( $p \leq 0,05$ ) (Tabel 1). Siklus beku-cair berulang siklus menghasilkan sineresis gel pati yang lebih besar [17]. Dibandingkan dengan singkong komersial, jagung, dan pati beras, gel pati batang nanas yang dibekukan dan dicairkan menunjukkan nilai tertinggi sineresis pada setiap siklus beku-cair. Sineresis gel pati batang nanas adalah 19,52% setelah siklus pertama dan meningkat secara signifikan ( $p \leq 0,05$ ) menjadi 51,52% setelah tiga kali pembekuan–pencairan siklus, dan kemudian mengalami sedikit perubahan (53,21–53,39%) pada siklus 4–5. Sementara sineresis singkong gel pati tidak diamati setelah siklus pertama dan sebesar 23,16% setelah lima kali pembekuan–pencairan siklus, yang merupakan sineresis terendah secara signifikan. Sineresis terjadi pada perlakuan beku-cair karena kristalisasi pati (retrogradasi). Amilosa mengalami retrogradasi jauh lebih cepat daripada amilopektin karena strukturnya yang dominan linier [17]. Oleh karena itu, sineresis gel pati telah dikaitkan dengan kandungan amilosa pati. Pati singkong dengan Kandungan amilosa terendah (18,98%) menunjukkan sineresis terendah namun pembekuan–pencairan tertinggi stabilitas. Oleh karena itu, sineresis pati batang nanas tertinggi dikaitkan dengan kandungan amilosa tertinggi (Tabel 1), sehingga menghasilkan stabilitas beku-cair yang buruk. Kemampuan pembengkakan pati batang nanas juga dapat mempengaruhi sineresis pati gel. Sejumlah besar air bebas di sekitar butiran bengkak yang terbatas dapat dengan mudah dilepaskan sebagai sineresis selama siklus beku-cair.

3.5. Sifat Gelatinisasi dan Retrogradasi

Termogram DSC dari pati yang mengalami gelatinisasi dan retrogradasi ditunjukkan pada gambar berikut: Gambar 4, dan parameter termal tercantum pada Tabel 3. Pati batang nanas menunjukkan parameter gelatinisasi tertinggi (awal, puncak, dan akhir gelatinisasi) suhu serta entalpi gelatinisasi) dibandingkan dengan pati komersial (Tabel 3). Suhu transisi yang tinggi bisa jadi disebabkan oleh tingginya kandungan amilosa yang memberikan stabilitas struktural dan meningkatkan ketahanan granula terhadap gelatinisasi [1]. Suhu gelatinisasi berkorelasi sangat positif dengan kandungan amilosa [23]. Nilai  $\bar{y}H_{gel}$  menunjukkan hilangnya tatanan molekul di dalam granula dan mencerminkan total kristalinitas granula pati baik dari segi kualitas maupun kuantitas pati kristal [27]. Dapat diketahui bahwa pati batang nanas secara struktural lebih stabil dibandingkan pati singkong, jagung, dan beras, mungkin karena kandungan amilosa yang tinggi [1]. Amilosa Molekul-molekul tersebut berinteraksi kuat dengan molekul-molekul amilopektin untuk meningkatkan integritas pati granula [21]. Oleh karena itu, pati dengan kandungan amilosa yang tinggi biasanya memerlukan amilosa yang lebih tinggi suhu untuk menyelesaikan proses memasak.

Tabel 3. Sifat termal pati batang nanas, singkong, jagung, dan beras.

Mencicipi	Pati Asli				Pati Retrogradasi *				Retrogradasi (%) **
	Ke (°C)	Kota (°C)	Tc (°C)	yHgel (J/g)	Ke (°C)	Kota (°C)	Tc (°C)	yHret (J/g)	
Nanas tangkai	83,77 ± 0,09 A	86,53 ± 0,13	90,90 ± 0,15 A	17,24 ± 0,10 A	42,35 ± 0,95	59,68 ± 0,45 A	70,45 ± 0,60 A	7,94 ± 0,07	46,07 ± 0,43 A
Singkong	63,23 ± 0,22 d	d. 68,59 ± 0,09	75,80 ± 0,23 d	b. 15,48 ± 0,12	b. 39,20 ± 0,11	b. 53,67 ± 0,34	68,02 ± 0,69	d.2,98 ± 0,03	19,23 ± 0,18 D
Jagung	b. 70,29 ± 0,23	74,08 ± 0,25 dan C	78,83 ± 0,35 dan C	14,33 ± 0,25 dan C	41,50 ± 0,27 A	52,09 ± 0,42 C	64,23 ± 0,11 C	b. 5,26 ± 0,02	36,71 ± 0,68 miliar
Beras	64,91 ± 0,37 C	76,24 ± 0,08	80,89 ± 0,46	11,12 ± 0,55	41,75 ± 0,29	52,30 ± 0,27 C	63,40 ± 0,17 dan	3,86 ± 0,13 C	34,73 ± 0,81 C

\* Setelah penyimpanan selama 7 hari pada suhu 4 °C; \*\* Retrogradasi (%) =  $(\bar{y}H_{ret}/\bar{y}H_{gel}) \times 100$ . Nilai dalam kolom yang sama dengan superskrip yang berbeda berbeda secara signifikan ( $p \leq 0,05$ ). To, suhu awal; Tp, suhu puncak; Tc, suhu kesimpulan;  $\bar{y}H_{gel}$ , entalpi gelatinisasi;  $\bar{y}H_{ret}$ , entalpi retrogradasi.

Dalam kasus pati retrogradasi, suhu transisi (To, Tp, dan Tc) dan entalpi leleh ( $\bar{y}H_{ret}$ ) gel pati yang mengalami retrogradasi lebih rendah dibandingkan dengan entalpi gelatinisasi. suhu dan  $\bar{y}H_{gel}$  dari padanan pati asli. Kristalit dan terurut Struktur daerah amorf pati yang mengalami retrogradasi tidak sesempurna struktur daerah amorf pati yang mengalami retrogradasi.

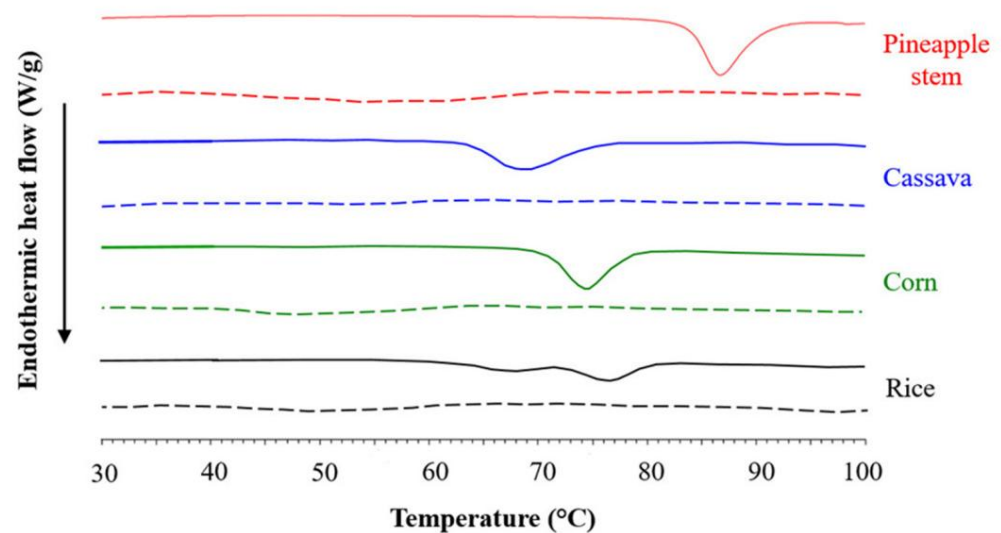


butiran pati [21]. Oleh karena itu, pati dengan kandungan amilosa tinggi biasanya memerlukan suhu yang lebih tinggi untuk menyelesaikan proses pemasakan.

Pada kasus pati retrogradasi, suhu transisi ( $T_o$ ,  $T_p$ , dan  $T_c$ ) dan entalpi leleh ( $\Delta H_{ret}$ ) dari gel pati retrogradasi lebih rendah dibandingkan suhu gelatinisasi. suhu dan  $\Delta H_{gel}$  dari pati asli. Kristalit dan struktur teratur daerah amorf pati retrogradasi tidak sesempurna pati asli [15]. Pati batang nanas retrogradasi memiliki  $T_o$ ,  $T_p$ ,  $T_c$ , dan  $\Delta H_{ret}$  tertinggi.

nilai yang dihasilkan memiliki derajat retrogradasi pati tertinggi (46,07%) tertinggi dibandingkan dengan nilai beras yang digradasi. Entalpi retrogradasi dilaporkan positif korelasi positif dengan kandungan amilosa [28]. Kandungan amilosa yang tinggi mendorong pati retrogradasi, amilosa dengan cepat dan permanen berasosiasi kembali untuk membentuk kristal. Setelah amilosa teroksidasi, amilosa akan kembali mengkristal kembali pada tahap selanjutnya, sehingga kristal pati dengan amilosa akan kembali terbentuk. Kristal pati yang lebih besar memiliki tingkat retrogradasi yang lebih tinggi. Penelitian telah difokuskan pada bagaimana kandungan amilosa mempengaruhi retrogradasi pati, karena amilosa mempengaruhi kualitas bertepung [28,30,31]. Ditemukan bahwa retrogradasi

hasil gradasi bermutasi dengan nilai sineresis setelah siklus beku-cair (Tabel 1). Pada suhu kamar, nilai sineresis setelah siklus beku-cair (Tabel 1) lebih tinggi dari nilai sineresis setelah siklus beku-cair (Tabel 2). Pada tingkat retrogradasi yang lebih tinggi, kadar air yang terperas keluar dari gel, sehingga menghasilkan tingkat sineresis yang lebih tinggi [30].

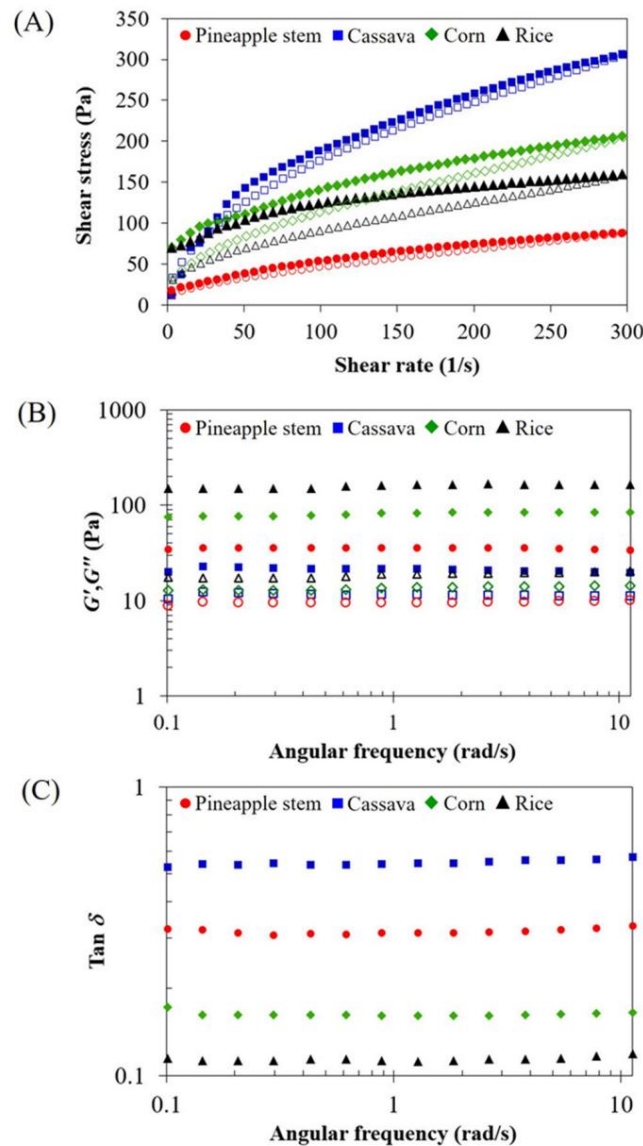


**Gambar 4.** Termogram kalorimetri pemindaian diferensial (DSC) dari asli (garis utuh) dan retrogradasi (garis putus-putus) batang nanas, singkong, jagung, dan pati beras.

### 3.6. Sifat Reologi

Perilaku reologi, termasuk karakteristik aliran stabil, spektrum mekanis ( $G'$  dan  $G''$  sebagai fungsi frekuensi), dan  $\tan \delta$  sebagai fungsi frekuensi gel pati ditunjukkan pada Gambar 5. Semua gel pati menunjukkan penipisan geser yang terutama bergantung pada waktu perilaku (tikotropik) dengan tegangan luluh ( $\dot{\gamma}_0$ ) untuk kisaran laju geser yang digunakan dalam penelitian ini (Gambar 5A). Kurva aliran gel pati yang baru disiapkan dapat disesuaikan dengan menggunakan Herschel–Bulkley Model. Tabel 4 memberikan ringkasan dari luas loop histeresis, tegangan luluh ( $\dot{\gamma}_0$ ), koefisien konsistensi ( $K$ ), indeks perilaku aliran ( $n$ ), dan koefisien penentuan ( $R^2$ ) dari kurva aliran ke atas. Semua gel pati menunjukkan aliran searah jarum jam daerah loop histeresis, menunjukkan kerusakan struktural yang disebabkan oleh medan geser dan perubahan dalam struktur yang sudah ada, yang kemudian terus menunjukkan karakteristik penipisan geser selama sapuan geser berikutnya [32]. Area loop histeresis yang lebih besar, yaitu, tixotropi yang lebih tinggi, disebabkan oleh kerusakan struktural gel pati yang lebih besar selama geser [33]. Semua gel pati memiliki nilai  $n$  kurang dari 1, yang menunjukkan sifat pseudoplastiknya perilaku penipisan geser. Dalam penelitian ini, gel pati batang nanas menunjukkan perilaku penipisan geser terendah. Nilai  $K$  dan luas loop histeresis, serta nilai  $n$  tertinggi, menunjukkan nilai terendah sifat viskos, ketahanan geser dan pemulihan struktural tertinggi, dan terendah derajat pengenceran geser. Gel pati singkong memiliki nilai  $K$  tertinggi dan  $\dot{\gamma}_0$  terendah. dan nilai  $n$ , menunjukkan sifat viskositas terbesar, pembentukan struktur paling sedikit gel, dan tingkat penipisan geser tertinggi. Pengamatan serupa dilaporkan oleh Wongsagonsup et al. [14] yang mempelajari sifat reologi dari serat asli dan serat ikatan silang

dengan urutan sebagai berikut: singkong > batang nanas > jagung > gel pati beras. Ditemukan bahwa nilai  $\tan \delta$  dari semua gel pati berbanding terbalik dengan nilai  $\gamma_0$  yang sesuai. Nilai  $\tan \delta$  terendah dari gel pati beras dikaitkan dengan nilai  $\gamma_0$  tertinggi, sedangkan nilai  $\tan \delta$  tertinggi dari gel pati singkong dikaitkan dengan nilai  $\gamma_0$  terendah. Nilai  $\tan \delta$  gel pati batang nanas relatif lebih tinggi dibandingkan gel pati jagung dan beras, yang menunjukkan perilaku yang lebih seperti cairan, yang mungkin disebabkan oleh kemampuan pembengkakannya yang terbatas. Disimpulkan bahwa gel pati batang nanas lebih cair dan menunjukkan gel pati singkong. Mereka menyimpulkan bahwa kurva aliran yang meningkat tidak terbatas dan ketahanan geser yang tinggi gel pati singkong yang berikatan silang tinggi menghasilkan nilai  $K$  yang lebih rendah dan lebih baik sifat gel pati singkong relatif dengan gel pati beras yang paling tidak ada. Bicara yang gampang-jepit. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sifat air tanaman bentuk, kekakuan, kemampuan pembengkakan, jumlah dan nilai  $K$  dari semua gel pati sesuai dengan hasil sifat perekatan (Tabel 2).



**Gambar 5.** Kurva aliran tetap (A), yaitu tegangan geser sebagai fungsi laju geser, dengan simbol tertutup melambangkan kurva ke atas dan simbol terbuka melambangkan kurva ke bawah, dan viskoelastis dinamis melambangkan spektrum mekanik, dan (B), yaitu modulus penyimpanan,  $G'$  (simbol tertutup) dan modulus kerugian,  $G''$  (simbol terbuka) sebagai fungsi frekuensi, dan tangen kerugian mekanik dinamis ( $\tan \delta$ ) sebagai fungsi frekuensi (C) gel pati batang nanas, singkong, jagung, dan beras 6% (b/b). Semua pengukuran frekuensi dilakukan pada suhu 25 °C.

Spektrum mekanik semua gel pati menunjukkan bahwa  $G'$  dan  $G''$  tidak bersilangan dan bahwa  $G'$  lebih tinggi daripada  $G''$  pada seluruh rentang frekuensi yang diteliti, menunjukkan karakteristik gel yang khas (Gambar 5B). Gel pati batang nanas memiliki nilai  $G'$  yang lebih rendah dibandingkan dengan gel pati beras dan pati jagung, sehingga menegaskan sifat lunak gel pati batang nanas. Kemampuan pembengkakan pati batang nanas yang terbatas dapat menghambat pembentukan ikatan rangkap yang kuat jaringan gel. Gel pati jagung dan beras lebih kaku dan menunjukkan nilai  $G'$  yang lebih tinggi dibandingkan dengan gel pati batang nanas. Di sisi lain, gel pati singkong memiliki

nilai G terendah, menunjukkan gel paling lunak. Pada gel pati singkong dengan amilosa terendah kandungan pati, molekul pati cenderung tidak berasosiasi kembali dan membentuk gel yang kuat. Hasil dapat dikonfirmasi dengan nilai  $\tan \delta$  (Gambar 5C), yang merupakan rasio G terhadap G dan digunakan untuk menjelaskan perubahan viskoelastisitas. Semua gel pati yang diuji menunjukkan  $\tan \delta < 1$ , menunjukkan pembentukan jaringan gel yang khas [34]. Nilai  $\tan \delta$  dari semua gel pati menurun dengan urutan sebagai berikut: singkong > batang nanas > jagung > gel pati beras. Ditemukan bahwa Nilai  $\tan \delta$  dari semua gel pati berbanding terbalik dengan nilai  $\gamma_0$  yang sesuai. Nilai  $\tan \delta$  terendah Nilai  $\tan \delta$  gel pati beras berhubungan dengan nilai  $\gamma_0$  tertinggi, sedangkan nilai  $\tan \delta$  gel pati beras berhubungan dengan nilai  $\gamma_0$  tertinggi. Nilai  $\gamma$  gel pati singkong berhubungan dengan nilai  $\gamma_0$  terendah. Nilai  $\tan \delta$  gel pati singkong gel pati batang nanas relatif lebih tinggi dibandingkan dengan gel pati jagung dan beras, menunjukkan perilaku lebih seperti cairan, yang mungkin disebabkan oleh kemampuan pembengkakannya yang terbatas. Disimpulkan bahwa gel pati batang nanas lebih cair dan menunjukkan aktivitas antioksidasi yang lebih rendah. gel yang lebih kaku dibandingkan pati jagung dan beras. Namun, gel dari pati singkong menunjukkan nilai  $\tan \delta$  tertinggi, menunjukkan perilaku gel terlemah yang paling mirip cairan, yang mungkin disebabkan oleh kandungan amilosa yang rendah. Sifat reologi gel pati adalah dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran butiran, bentuk, kekakuan, kemampuan pembengkakan, jumlah, dan jenis amilosa dan amilopektin, serta kompleks dengan komponen lainnya [2].

**Tabel 4.** Parameter reologi Herschel–Bulkley pada batang nanas, singkong, jagung, dan pati gel pati.

Mencicipi	Luas Histerisis (Pa/s)	$\gamma_0$ (Pa)	K (Pa.sn)	$\tan \delta$	$R^2$
Batang Nanas	tahun $1850 \pm 65,77$	$6,51 \pm 1,49$ C	$d. 2,017 \pm 0,66$	$0,614 \pm 0,03$ A	0,987
Singkong	$8941 \pm 802,53$ C	$1,70 \pm 0,22$ b. D	$7,608 \pm 0,06$ b. A	$0,295 \pm 0,03$ D	0,978 tahun
Jagung	$b. 34.950 \pm 2.126,62$	$\pm 1,78$ $56,40 \pm 1,78$ <sup>45,00</sup>	$\pm 0,40$ $3,153 \pm 0,43$ <sup>4,673</sup>	$0,495 \pm 0,01$ C	0,962
Beras	$50.246 \pm 2.289,46$ A	A	C	$b. 0,536 \pm 0,01$	0,960

Nilai dalam kolom yang sama dengan superskrip yang berbeda secara statistik berbeda ( $p \leq 0,05$ ).  $\gamma_0$ , tegangan luluh; K, koefisien konsistensi; n, indeks perilaku aliran; R<sup>2</sup> koefisien determinasi.

3.7. Daya Cerna Pati In Vitro

Kandungan RDS, SDS, dan RS pada sampel pati yang dimasak ditunjukkan pada Tabel 5. Kecuali pati batang nanas, semua sampel pati yang dimasak memiliki kandungan pati yang signifikan persentase kandungan RDS tertinggi terutama pati singkong (79,34%), yang dapat disimpulkan dijelaskan oleh gangguan lengkap struktur butiran selama pemasakan, memfasilitasi kerentanan terhadap hidrolisis enzimatis [15]. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa RDS fraksi merupakan komponen utama dalam pati asli yang dimasak [15,35,36]. Menariknya, Pati batang nanas memiliki proporsi fraksi SDS tertinggi. butiran pati nanas mungkin tidak mudah dicerna oleh enzim amilolitik dan mungkin akibatnya memperlambat daya cerna pati. Dibandingkan dengan pati singkong, jagung, dan beras, Pati batang nanas memiliki kandungan SDS dan RS tertinggi namun kandungan RDS terendah, yang ditemukan pertama kali dalam penelitian ini. Hal ini mungkin berhubungan dengan tingginya kadar amilosa Kandungan pati batang nanas yang mempunyai kemampuan menghambat hidrolisis pati dengan cara membatasi pembengkakan pati. Pati dengan kandungan amilosa yang tinggi lebih tahan terhadap enzimatis hidrolisis dengan meningkatkan kemampuan pati untuk menahan pencernaan enzimatis [37]. Kandungan amilosa berkorelasi negatif dengan RDS tetapi berkorelasi positif dengan SDS dan RS [20]. Selain itu, struktur halus amilopektin mempengaruhi pencernaan pati. Kandungan RS berkorelasi positif dengan panjang rantai cabang amilopektin rata-rata dan proporsi rantai cabang yang panjang, namun berbanding terbalik dengan proporsi rantai cabang yang lebih pendek. rantai cabang [20,38]. Dengan menurunkan kadar kolesterol darah dan trigliserida serta mengurangi akumulasi lemak, RS sangat penting untuk menjaga kesehatan yang baik. Namun, tingkat SDS yang lebih tinggi mungkin juga bermanfaat bagi kesehatan manusia. SDS biasanya dianggap sebagai metode yang paling disukai pati makanan karena dicerna secara menyeluruh namun lambat di usus halus [ 39]. Selain itu, SDS kemungkinan besar dikaitkan dengan efek kesehatan yang bermanfaat seperti peningkatan rasa kenyang dan kinerja mental, kontrol gula darah, dan manajemen diabetes [5,39,40].

**Tabel 5.** Kecernaan in vitro dari pati batang nanas, singkong, jagung, dan beras yang dimasak.

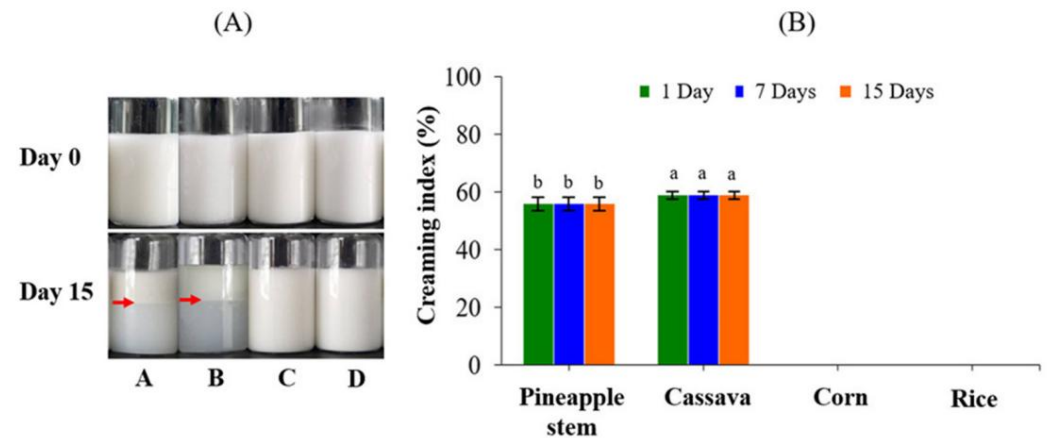
Mencicipi	RDS (%)	SDS (%)	RS (%)
Batang Nanas	d 35,38 ± 0,71	48,84 ± 0,63 d <sup>A</sup>	15,77 ± 1,04 <sup>A</sup>
Singkong	79,34 ± 0,16 <sup>A</sup>	± 0,86 b 31,02 ± 16,94	3,72 ± 0,70 <sup>C</sup>
Jagung	b. 66,77 ± 0,24	0,27	2,21 ± 0,39 <sup>D</sup>
Beras	63,24 ± 0,24 <sup>C</sup>	28,32 ± 0,39 <sup>C</sup>	8,45 ± 0,63 <sup>B</sup>

Nilai-nilai dalam kolom yang sama dengan superskrip yang berbeda secara statistik berbeda ( $p \leq 0,05$ ). RDS, cepat dicerna pati; SDS, pati yang dicerna lambat; RS, pati resisten.

### 3.8. Stabilitas Emulsi O/W yang Distabilkan oleh Pati

Gambar 6 menunjukkan emulsi minyak dalam air (O/W) yang distabilkan dengan pati gelatinisasi sampel. Stabilitas krim emulsi dievaluasi dengan menggunakan indeks krim (CI). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6A, emulsi yang distabilkan dengan pati jagung dan beras yang berumur selama 15 hari menunjukkan penampilan yang homogen tanpa krim (CI = 0) (Gambar 6B), menunjukkan stabilitas emulsi yang tinggi. CI yang lebih rendah berhubungan dengan stabilitas emulsi yang lebih tinggi. Perilaku gel pati jagung dan beras yang lebih padat (Gambar 5B,C) dapat mengentalkan fase air kontinyu dan menstabilkan emulsi O/W. Emulsi yang distabilkan dengan Pati jagung dan beras yang digelatinisasi menunjukkan tekstur padat atau seperti gel viskoelastis dari hari ketiga penyimpanan. Beberapa pati asli yang digelatinisasi seperti pati beras non-lilin, pati lilin pati beras, dan pati jagung lilin menunjukkan kemampuan pengemulsi O/W melalui penyerapan antarmuka [41]. Namun, kemampuan pengemulsi tidak berhubungan jelas dengan kandungan amilosa, pola kristal, dan sifat termal pati [41]. Di sisi lain, emulsi yang distabilkan dengan pati batang singkong dan nanas menunjukkan nilai CI yang tinggi (masing-masing 58,91% dan 55,81%) dari hari pertama penyimpanan hingga hari ke-15 penyimpanan. Hasil serupa juga ditemukan pada emulsi yang distabilkan dengan pati singkong asli yang digelatinisasi dalam penelitian Sriprabom et al. [15]. Hal ini mungkin disebabkan oleh fakta bahwa sejumlah besar gugus -OH hidrofilik dari pati singkong yang tergelatinisasi sempurna dapat membatasi sifat pengemulsi. Dalam kasus emulsi yang distabilkan dengan pati batang nanas, CI juga tinggi, tetapi lapisan serum yang lebih rendah sedikit lebih keruh dibandingkan dengan emulsi distabilkan dengan pati singkong (Gambar 6A), menunjukkan adanya sejumlah kecil tetesan minyak individual yang tersuspensi dan/atau butiran pati yang membengkak. Bengkak terbatas butiran pati batang nanas dapat sedikit menstabilkan emulsi sebagai penstabil partikel tetapi tidak cukup kuat untuk mencegah terbentuknya krim, yang mungkin disebabkan oleh gugus hidrofilik dan viskositas rendah dari fase air kontinyu yang mengandung batang nanas yang membengkak butiran pati, yang serupa dengan hasil yang dilaporkan oleh Kasprzak et al. [41] untuk tinggi amilosa pati jagung. Untuk mencegah terbentuknya krim, pengemulsi harus ditambahkan ke dalam fase air atau pati asli harus dimodifikasi untuk meningkatkan sifat amfifiliknya dan menghasilkan emulsi yang stabil [15,41,42]. Misalnya, pati dimodifikasi secara kimia dengan oktenil suksinat anhidrida (OSA) telah digunakan sebagai pengemulsi untuk menstabilkan Emulsi O/W. Telah dilaporkan bahwa pati nanas yang dimodifikasi OSA memiliki kinerja yang lebih baik sifat pengemulsi yang lebih baik daripada pati asli dan dapat digunakan sebagai penstabil emulsi dalam makanan dan aplikasi farmasi [43].

fase air kontinu atau pati asli harus dimodifikasi untuk meningkatkan sifat amfifiliknya dan menghasilkan emulsi yang stabil [15,41,42]. Misalnya, pati yang dimodifikasi secara kimia dengan oktenil suksinat anhidrida (OSA) telah digunakan sebagai pengemulsi untuk menstabilkan emulsi O/W konvensional. Telah dilaporkan bahwa pati nanas yang dimodifikasi OSA memiliki sifat pengemulsi yang lebih baik daripada pati asli dan dapat digunakan sebagai penstabil emulsi dalam aplikasi makanan dan farmasi [43].



**Gambar 6.** (A) Foto emulsi O/W yang disimpan selama 0 dan 15 hari yang distabilkan oleh gelatinisasi sampel pati dengan tanda panah merah yang menandai batas krim-serum (A, pati batang nanas; B, pati singkong; C, pati jagung; D, pati beras), dan (B) indeks krim emulsi O/W yang distabilkan oleh batang nanas yang digelatinisasi, singkong, jagung, dan pati beras selama penyimpanan pada suhu kamar selama 15 hari. Nilai dengan superskrip yang berbeda (a,b) secara statistik berbeda ( $p < 0,05$ ). Nilai dengan superskrip yang berbeda (a,b) secara statistik berbeda ( $p < 0,05$ ).

#### Kesimpulan 4.

Batang Nanas merupakan limbah pertanian yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber alternatif pati. Ketika pati yang diekstrak dari batang nanas dibandingkan dengan pati yang diekstrak secara komersial, ketika pati yang diekstrak dari batang nanas dibandingkan dengan pati yang diekstrak secara komersial, pati singkong, jagung, dan beras yang tersedia, pati batang nanas menunjukkan karakteristik khusus karena memiliki indeks gelatinisasi, suhu pembengkakan pasta, dan entalpi gelatinisasi yang rendah.

rendahnya entalpi gelatinisasi. Jika suhu pasta dan entalpi gelatinisasi pasta terendah, laju menunjukkan stabilitas granula yang tinggi. Karena kemampuan pembengkakannya yang terbatas, batang nanas gel pati mempunyai koefisien konsistensi dan luas loop histeresis paling rendah dan memiliki lebih banyak perilaku seperti cairan dibandingkan dengan pati jagung dan beras. Dibandingkan dengan pati komersial, ia memiliki kandungan pati yang dapat dicerna secara lambat (SDS) dan pati resisten (RS) tertinggi. Sifat pengemulsi pati batang nanas lebih baik dibandingkan pati singkong. Karena Dengan sifat-sifat tersebut, pati batang nanas dapat dimanfaatkan sebagai sumber SDS gizi yang baik dan RS untuk aplikasi pangan. Pati batang nanas dengan kandungan SDS dan RS yang tinggi dapat digunakan dalam formulasi berbagai macam makanan rendah kelembaban seperti pasta, roti, kue, kue kering, dan sereal sarapan untuk meningkatkan manfaat kesehatan.

**Kontribusi Penulis:** Konseptualisasi, RW; metodologi, JS; validasi, JS; analisis formal, JS; investigasi, JS; kurasi data, JS; penulisan—persiapan draf asli, JS; penulisan—tinjauan dan penyuntingan, MS, SMS, TA, JP dan RW; supervisi, RW; administrasi proyek, RW; pendanaan akuisisi, TA Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

**Pendanaan:** Penelitian ini didanai oleh Universitas Mahidol (Dana Penelitian Dasar: tahun fiskal 2022).

**Pernyataan Ketersediaan Data:** Data yang disajikan dalam penelitian ini tersedia atas permintaan dari penulis korespondensi.

**Konflik Kepentingan:** Penulis menyatakan tidak adanya konflik kepentingan.

#### Referensi

1. Nakthong, N.; Wongsagonsup, R.; Amornsakchai, T. Karakteristik dan potensi pemanfaatan pati dari batang nanas limbah. *Ind. Crops Prod.* **2017**, *105*, 74–82. [\[CrossRef\]](#)
2. Rinju, R.; Harikumar-Thampi, BS Karakteristik pati yang diekstrak dari batang tanaman nanas (*Ananas comosus*)—An limbah pertanian dari perkebunan nanas. *Braz. Arch. Biol. Technol.* **2021**, *64*, e21190276. [\[CrossRef\]](#)
3. Wei, M.; Andersson, R.; Xie, G.; Salehi, S.; Boström, D.; Xiong, S. Sifat pati batang singkong sebagai sumber pati baru. *Pati-Pati* **2018**, *70*, 1700125. [\[CrossRef\]](#)
4. Chen, S.; Qin, L.; Chen, T.; Yu, Q.; Chen, Y.; Xiao, W.; Ji, X.; Xie, J. Modifikasi pati dengan polisakarida dalam pembuatan pasta, reologi, tekstur dan pencernaan in vitro: Sebuah tinjauan. *Int. J. Biol. Macromol.* **2022**, *207*, 81–89. [\[CrossRef\]](#)



5. Bello-Perez, LA; Flores-Silva, PC; Agama-Acevedo, E.; Tovar, J. Kecernaan pati: Masa lalu, masa kini, dan masa depan. *J. Sci. Food Agric.* **2020**, *100*, 5009–5016. [[Referensi silang](#)]
6. Englyst, HN; Kingman, SM; Cummings, JH Klasifikasi dan pengukuran fraksi pati yang penting secara gizi. *Eur. J. Klinis. Nutrisi.* **1992**, *46*, S33–S50.
7. Hikal, WM; Mahmoud, AA; Said-Ah Ahl, HAH; Bratovcic, A.; Tkachenko, KG; Kačániová, M.; Rodriguez, RM Pineapple (Ananas comosus L. Merr.), aliran limbah, karakterisasi dan valorisasi: Suatu Tinjauan. *Buka J.Ecol.* **2021**, *11*, 610–634.  
[[Referensi Silang](#)]
8. Ketnawa, S.; Chaiwut, P.; Rawdkuen, S. Limbah nanas: Sumber potensial untuk ekstraksi bromelain. *Food Bioprod. Process.* **2012**, *90*, 385–391. [[Referensi silang](#)]
9. Sangkharak, K.; Wangsirikul, P.; Pichid, N.; Yunu, T.; Prasertsan, P. Pemisahan bromelain dari batang nanas (Smooth Cayenne) dengan sistem dua fase berair dan penerapannya untuk pemulihan dan pemurnian polihidroksialkanolat. *Chiang Mai J. Sains.* **2016**, *43*, 794–807.
10. Chaosap, C.; Sahatsanon, K.; Sitthigripong, R.; Sawanon, S.; Setakul, J. Efek penggunaan pati batang nanas sebagai sumber pati alternatif dan periode penuaan terhadap kualitas daging, profil tekstur, kandungan ribonukleotida, dan komposisi asam lemak longissimus thoracis sapi perah penggemukan. *Foods* **2021**, *10*, 2319. [[CrossRef](#)]
11. Chu, PH; Jenol, MA; Phang, LY; Ibrahim, MF; Prasongsuk, S.; Bankir, W.; Punnapayak, H.; Lotrakul, P.; Abd-Aziz, S. Pati yang diekstrak dari batang tanaman nanas (Ananas comosus) sebagai sumber produksi asam amino. *Kimia. Biol. Teknol. Pertanian.* **2021**, *8*, 29. [[Referensi silang](#)]
12. Khongpradit, A.; Boonsaen, P.; Homwong, N.; Buaphan, S.; Maitreejit, W.; Karnjanasirm, K.; Sawanon, S. Pengaruh pati batang nanas dalam pakan konsentrat terhadap fermentasi rumen pada sapi potong dan degradasi bahan kering in situ. *Agric. Nat. Resour.* **2022**, *56*, 277–286.
13. Tangsrianugul, N.; Hongsanyatham, S.; Kapcum, C.; Sungayuth, N.; Boonsanong, N.; Somprasong, N.; Smith, SM; Amornsakchai, T.; Pinyo, J.; Wongsagonsup, R. Sifat fisikokimia dan sensoris dari bubur jagung dan pati batang nanas yang diperkaya dengan bubuk jamur tiram. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2023**, *58*, 1528–1540. [[CrossRef](#)]
14. Wongsagonsup, R.; Pujchakarn, T.; Jitrakbumrung, S.; Chaiwat, W.; Fuongfuchat, A.; Varavinit, S.; Dangtip, S.; Supphantharika, M. Pengaruh ikatan silang terhadap sifat fisikokimia pati tapioka dan aplikasinya dalam produk sup. *Karbohidrat. Polim.* **2014**, *101*, 656–665. [[Referensi silang](#)]
15. Sriprabhom, J.; Tatikunakorn, P.; Lerdpriyanun, P.; Supphantharika, M.; Wongsagonsup, R. Efek modifikasi tunggal dan ganda dengan ikatan silang dan oktenilsuksinilasi pada sifat fisikokimia, daya cerna in-vitro, dan pengemulsi pati singkong. *Food Res. Int.* **2023**, *163*, 112304. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Farooq, MA; Murtaza, MA; Aadil, RM; Arshad, R.; Rahaman, A.; Siddique, R.; Hassan, S.; Akhtar, HMS; Manzoor, MF; Karrar, E.; dkk. Menyelidiki sifat struktural dan pencernaan tepung beras secara in vitro . *Food Sci. Nutr.* **2021**, *9*, 2668–2675.  
[[Referensi Silang](#)]
17. Srichuwong, S.; Jane, J. Sifat fisikokimia pati yang dipengaruhi oleh komposisi dan struktur molekul: Sebuah tinjauan. *Pangan Jurnal Bioteknologi.* **2007**, *16*, 663–674.
18. Denardin, CC; Bouffleur, N.; Reckziegel, P.; Silva, LP; Walter, M. Kandungan amilosa dalam beras (Oryza sativa) memengaruhi kinerja, metabolisme glikemik dan lipid pada tikus. *Cienc. Rural* **2012**, *42*, 381–387. [[CrossRef](#)]
19. Tao, K.; Li, C.; Yu, W.; Gilbert, RG; Li, E. Bagaimana struktur molekul halus amilosa dari pati beras memengaruhi sifat fungsional. *Karbohidrat. Polim.* **2019**, *204*, 24–31. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
20. Chung, H.-J.; Liu, Q.; Lee, L.; Wei, D. Hubungan antara struktur, sifat fisikokimia dan pencernaan in vitro dari pati beras dengan kandungan amilosa yang berbeda. *Food Hydrocoll.* **2011**, *25*, 968–975. [[CrossRef](#)]
21. Jane, J.; Craig, S.; Seib, P.; Hosene, R. Karakterisasi pati granular yang larut dalam air dingin. *Starch-Stärke* **1986**, *38*, 258–263.  
[[Referensi Silang](#)]
22. Jane, J.; Shen, L.; Chen, J.; Lim, S.; Kasemsuwan, T.; Nip, WK Studi fisika dan kimia pati dan tepung talas. *Serealia Kimia.* **1992**, *69*, 528–535.
23. Varavinit, S.; Shobsngob, S.; Varayanond, W.; Chinachoti, P.; Naivikul, O. Pengaruh kandungan amilosa terhadap sifat gelatinisasi, retrogradasi, dan pembentukan pasta tepung dari berbagai kultivar beras Thailand. *Starch-Stärke* **2003**, *55*, 410–415. [[CrossRef](#)]
24. Błaszczyk, W.; Lewandowicz, G. Mikroskopi cahaya sebagai alat untuk mengevaluasi fungsi pati dalam makanan. *Foods* **2020**, *9*, 670. [[Referensi Silang](#)] [[PubMed](#)]
25. Yamazaki, E.; Sago, T.; Kasubuchi, Y.; Imamura, K.; Matsuoka, T.; Kurita, O.; Nambu, H.; Matsumura, Y. Peningkatan stabilitas beku-cair gel pati jagung oleh polisakarida dari daun Corchorus olitorius L. *Carbohydr. Polym.* **2013**, *94*, 555–560. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Zhang, B.; Bai, B.; Pan, Y.; Li, XM; Cheng, JS; Chen, HQ Efek pektin dengan berat molekul berbeda pada perilaku gelatinisasi, sifat tekstur, retrogradasi, dan daya cerna pati jagung secara in vitro. *Food Chem.* **2018**, *264*, 58–63. [[CrossRef](#)]
27. Sudheesh, C.; Sunooj, KV; George, J.; Kumar, S.; Sajeevkumar, VA Sifat fisiko-kimia, morfologi, penempelan dan termal tepung batang dan pati yang diisolasi dari palem kithul (Caryota urens) yang ditanam di lembah Ghats Barat, India. *J. Ukuran Makanan. Karakter.* **2019**, *13*, 1020–1030. [[Referensi Silang](#)]
28. Yu, S.; Ma, Y.; Sun, D.-W. Dampak kandungan amilosa pada retrogradasi pati dan tekstur beras giling yang dimasak selama penyimpanan. *Jurnal Ilmu Serealia*, **2009**, *50*, 139–144. [[CrossRef](#)]

29. Han, KT; Kim, HR; Moon, TW; Choi, SJ Retrogradasi isothermal dan siklus suhu pati jagung amilosa tinggi: Dampak sonikasi pada sifat struktural dan retrogradasinya. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *76*, 105650. [\[CrossRef\]](#)
30. Sobolewska-Zielińska, J.; Fortuna, T. Retrogradasi pati dan maltodekstrin dari berbagai asal. *Acta Sci. Pol. Technol. Makanan.* **2010**, *9*, 71–81.
31. Dobosz, A.; Sikora, M.; Krystijan, M.; Tomasik, P.; Lach, R.; Borczak, B.; Berski, W.; Lukasiewicz, M. Retrogradasi pati kentang jangka pendek dan jangka panjang dengan kandungan amilosa yang bervariasi. *J. Ilmu. Pertanian Pangan.* **2019**, *99*, 2393–2403. [\[Referensi Silang\]](#)
32. Achayuthakan, P.; Supphantharika, M. Sifat-sifat pasta dan reologi pati jagung lili yang dipengaruhi oleh gom guar dan xanthan permen karet. *Karbohidrat. Polim.* **2008**, *71*, 9–17. [\[CrossRef\]](#)
33. Banchathanakij, R.; Supphantharika, M. Pengaruh berbagai  $\gamma$ -glukan terhadap gelatinisasi dan retrogradasi pati beras. *Makanan Kimia.* **2009**, *114*, 5–14. [\[Referensi silang\]](#)
34. George, J.; Nair, SG; Kumar, R.; Semwal, IKLAN; Sudheesh, C.; Basheer, A.; Sunooj, KV Wawasan baru tentang efek pati nanokristal dalam sifat retrogradasi pati. *Food Hydrocoll. Kesehatan* **2021**, *1*, 100009. [\[CrossRef\]](#)
35. Kumar, SR; Tangsrianugul, N.; Sriprabhom, J.; Wongsagonsup, R.; Wansuksri, R.; Supphantharika, M. Pengaruh perlakuan panas-kelembapan terhadap sifat fisikokimia dan daya cerna tepung dan pati millet proso. *Carbohydr. Polym.* **2023**, *307*, 120630. [\[Referensi Silang\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Wongsagonsup, R.; Nateelerdpaisan, T.; Gross, C.; Supphantharika, M.; Belur, PD; Agoo, EMG; Janairo, JIB Sifat fisikokimia dan daya cerna in vitro tepung dan pati dari talas yang dibudidayakan di berbagai daerah di Thailand. *Int. J. Food Sci. Teknol.* **2021**, *56*, 2395–2406. [\[CrossRef\]](#)
37. Huang, J.; Shang, Z.; Man, J.; Liu, Q.; Zhu, C.; Wei, C. Perbandingan struktur molekul dan sifat fungsional pati anilosa tinggi dari galur padi transgenik dan jagung komersial. *Food Hydrocoll.* **2015**, *46*, 172–179. [\[CrossRef\]](#)
38. Pan, L.; Chen, F.; Yang, Y.; Li, Q.; Fan, X.; Zhao, D.; Liu, Q.; Zhang, C. Struktur pati yang mendasari biji beras dengan variasi daya cerna yang baik tetapi kandungan amilosanya juga tinggi. *Food Chem.* **2022**, *379*, 132071. [\[CrossRef\]](#)
39. Lehmann, U.; Robin, F. Pati yang lambat dicerna—Struktur dan implikasinya terhadap kesehatan: Tinjauan. *Trends Food Sci. Technol.* **2007**, *18*, 346–355. [\[Referensi silang\]](#)
40. Goux, A.; Breyton, A.-E.; Meynier, A.; Lambert-Porcheron, S.; Sothier, M.; Berghe, LVD; Brack, O.; Normand, S.; Disse, E.; Laville, M.; dkk. Desain dan validasi diet kaya pati yang dapat dicerna secara lambat bagi pasien diabetes tipe 2 untuk perbaikan signifikan pada profil glikemik. *Nutrients* **2020**, *12*, 2404. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
41. Kasprzak, MM; Macnaughtan, W.; Harding, S.; Wilde, P.; Wolf, B. Stabilisasi emulsi minyak dalam air dengan pati gelatinisasi yang dimodifikasi secara non-kimia. *Food Hydrocoll.* **2018**, *81*, 409–418. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
42. Cheng, F.; Ai, Y.; Ghosh, S. Pemanfaatan pati kacang polong dan jagung yang dimodifikasi dengan oktenil suksinat anhidrida untuk menstabilkan emulsi minyak dalam air. *Food Hydrocoll.* **2021**, *118*, 106773. [\[CrossRef\]](#)
43. Latt, SS; Patomchaiviat, V.; Sriamornsak, P.; Piriyaprasath, S. Modifikasi pati nanas dari batang dan rimpang menggunakan optimasi respons yang diinginkan dan karakterisasinya. *Pharm. Sci. Asia* **2019**, *46*, 206–217. [\[CrossRef\]](#)

**Penafian/Catatan Penerbit:** Pernyataan, opini, dan data yang dimuat dalam semua publikasi sepenuhnya merupakan pendapat penulis dan kontributor individu, bukan pendapat MDPI dan/atau editor. MDPI dan/atau editor tidak bertanggung jawab atas segala cedera pada orang atau harta benda yang diakibatkan oleh ide, metode, instruksi, atau produk yang dirujuk dalam konten.