

Modulasi Kadar Pati Resisten Berbagai Pangan Karbohidrat melalui Pemanasan *Microwave*: Meta-Analisis

[Resistant Starch Content Modulation of Carbohydrates Sources through Microwave Heating: Meta-Analysis]

Sugoi Marsaputra Karsodimejo¹⁾, Feri Kusnandar^{1)*}, Hanifah Nuryani Lioe¹⁾, dan Anuraga Jayanegara²⁾

¹⁾ Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB University, Bogor, Indonesia

²⁾ Departemen Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan, Fakultas Peternakan, IPB University, Bogor, Indonesia

Diterima 11 Juni 2023 / Disetujui 8 November 2023

ABSTRACT

Starch is extensively utilized in food processing for various purposes. However, the use of native starch is limited due to its unsuitability with processing conditions or products characteristics. Physical modification of starch is commonly employed to enhance the properties of native starch. The physical starch modification using microwave heating is presently developed due to its more efficient energy consumption than that of traditional heating methods. The process of microwave heating followed by cooling has been found to induce the formation of type 3 resistant starch (RS3). However, the effects of microwaving heating towards the increase of resistant starch contents varies among researchers. For this reason, a meta-analysis was conducted to evaluate the effect of microwave heating on the levels of resistant starch in carbohydrate sources such as cereals, pulses, and tubers. The objective of this study was to analyze the carbohydrate food groups that demonstrated the most significant increase in resistant starch levels due to microwave heating, and to determine the optimal microwave treatment parameters within these food groups using meta-analysis. The findings indicate that microwave heating treatment is particularly effective for cereals, with rice being the most responsive. The most favorable treatment parameters include a power range of 401-600 W, heating time of 60-99 s, and starch moisture content of 40-60%.

Keywords: carbohydrate foods, meta-analysis, microwave, resistant starch

ABSTRAK

Pati digunakan secara luas dalam pengolahan makanan untuk berbagai tujuan. Namun, penggunaan pati asli terbatas karena ketidaksiannya dengan kondisi pengolahan atau karakteristik produk. Modifikasi pati secara fisik biasanya digunakan untuk meningkatkan sifat pati asli. Saat ini, teknik modifikasi pati secara fisik dengan pemanasan *microwave* banyak dikembangkan, karena memiliki konsumsi energi yang lebih efisien dibandingkan dengan metode pemanasan konvensional. Proses pemanasan *microwave* yang diikuti dengan pendinginan telah terbukti dapat menginduksi pembentukan pati resisten tipe 3 (RS3). Namun demikian, kondisi pemanasan dengan *microwave* terhadap peningkatan kadar pati resisten, berbeda antar hasil penelitian. Oleh karena itu, kajian meta-analisis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pemanasan *microwave* terhadap kadar pati resisten dari sumber karbohidrat seperti sereal, biji-bijian/kacang-kacangan, dan umbi-umbian. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis kelompok pangan karbohidrat yang menunjukkan peningkatan kadar pati resisten paling signifikan akibat pemanasan *microwave* dan mengidentifikasi parameter perlakuan *microwave* paling optimal dari kelompok pangan tersebut dengan menggunakan meta-analisis. Hasil kajian menunjukkan bahwa perlakuan pemanasan *microwave* efektif untuk sereal, dengan beras menjadi yang paling responsif. Parameter perlakuan pemanasan yang menghasilkan kadar RS3 paling tinggi adalah daya dengan kisaran 401-600 W, waktu pemanasan 60-99 detik, dan kadar air pati 40-60%.

Kata kunci: pangan karbohidrat, meta-analisis, *microwave*, pati resisten

*Penulis Korespondensi: E-mail: fkusnandar@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Pati, yang merupakan kelompok karbohidrat yang melimpah di alam dan ditemukan dalam berbagai sumber pangan nabati, dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok berdasarkan tingkat pencernaan, yaitu pati yang dicerna dengan cepat (*rapidly digestible starch*), pati yang dicerna dengan lambat (*slowly digestible starch*), dan pati yang tidak dapat dicerna (*resistant starch*) (Wang *et al.*, 2022). *Resistant starch* (RS) tidak dapat dicerna di usus manusia dan berfungsi sebagai serat pangan, yang dapat membantu menurunkan respon glikemik. RS bermanfaat dalam mengatur kadar glukosa darah dengan mengurangi penyerapan glukosa, serta mengurangi risiko komplikasi pada penyakit degeneratif seperti diabetes mellitus tipe 2 (Lockyer dan Nugent, 2017). Agar tubuh manusia merasakan manfaat fisiologis dari RS, maka sebanyak 10-20% RS dibutuhkan dalam konsumsi karbohidrat harian. Produk pangan komersial umumnya memiliki kadar RS kurang dari 5% per porsi (Alsaffar, 2011). Dengan demikian, peningkatan kandungan RS dari pati dibutuhkan sebagai sumber serat yang dapat dimanfaatkan sebagai ingredien pangan.

RS tipe 3 (RS3) banyak dimanfaatkan sebagai ingredien pangan fungsional karena ketahanannya terhadap panas dan kemampuannya untuk mempertahankan karakteristiknya selama proses pengolahan pangan. Hal ini menyebabkan RS3 sesuai untuk dijadikan ingredien pangan. RS3 dari pati alami dapat ditingkatkan dengan melakukan modifikasi fisik, di antaranya dengan teknik pemanasan dengan *microwave*. Energi dari gelombang mikro diketahui lebih efisien daripada pemanasan konvensional, karena paparan panas ke dalam bahan pangan lebih homogen dan memiliki kedalaman penetrasi yang lebih besar. Pemanasan *microwave* yang diikuti dengan pendinginan dapat meningkatkan suhu gelatinisasi dan menginduksi pembentukan RS3 (Mutlu *et al.*, 2017). Zheng *et al.* (2020) melaporkan bahwa pemanasan *microwave* dapat meningkatkan kadar RS3 dari pati millet putih yang lebih tinggi (18,7%) dibandingkan dengan pemanasan metode *heat moisture treatment* (HMT) konvensional (12,3%).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemanasan *microwave* dapat meningkatkan kandungan RS dari sumber karbohidrat seperti nasi (Liu *et al.*, 2021), kacang hijau (Huong *et al.*, 2021), gandum (Zhang *et al.*, 2021), jagung, kentang, dan kastanye (Wang *et al.*, 2019). Namun, penelitian lain menunjukkan bahwa kandungan RS pada sumber karbohidrat lain seperti pati kacang polong (Lu *et al.*, 2018), kastanye air (Wei *et al.*, 2020), beras hybrid (XL753) (Bruce *et al.*, 2021), dan tepung ubi jalar (Trancoso-Reyes *et al.*, 2016) lebih rendah dibandingkan dengan pati alaminya. Untuk menjawab hasil yang bertolak belakang tersebut, maka studi meta-analisis

ini dilakukan. Meta-analisis merupakan metode statistik yang digunakan untuk menggabungkan dan menganalisis hasil dari beberapa penelitian independen tentang suatu lingkup penelitian tertentu, dengan tujuan untuk mendapatkan perkiraan faktor yang berpengaruh dengan hasil yang lebih kuat dan akurat dibandingkan dengan studi individual. Meta-analisis juga sering digunakan untuk menganalisis bukti dari efektifitas dari suatu perlakuan dan menganalisis parameter paling efektif dari perlakuan tersebut (Gurevitch *et al.*, 2018). Meskipun meta-analisis tidak digunakan untuk tujuan langsung optimisasi, namun dapat bermanfaat dalam pengambilan kesimpulan yang lebih akurat. Sebagai contoh, Faridah *et al.* (2021) menerapkan pendekatan meta-analisis dalam mengevaluasi pengaruh modifikasi fisik dengan *heat moisture treatment* (HMT) terhadap perubahan pati resisten dari berbagai pati. Dalam kajian ini, meta-analisis digunakan untuk menghasilkan rentang parameter perlakuan terbaik untuk meningkatkan kadar pati resisten.

Tujuan kajian ini adalah untuk mengevaluasi dampak pemanasan *microwave* terhadap kadar RS dalam sumber karbohidrat melalui pendekatan meta-analisis. Dalam kajian ini, meta-analisis digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh pemanasan *microwave* terhadap perubahan kadar RS dari sumber karbohidrat seperti sereal (*cereal*), biji-bijian/kacang-kacangan (*pulses*), dan umbi-umbian (*tubers*).

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan adalah artikel hasil penelitian dari berbagai jurnal nasional yang terakreditasi dan jurnal internasional bereputasi. Peralatan yang digunakan dalam kajian ini adalah perangkat lunak *Publish or Perish* (versi 8) *Mendeley* (versi 2.57.0 (2021)), *Web Plot Digitizer* (versi 4.5.0 (2021)), *Microsoft Excel* 2013 dan *OpenMEE* (Wallace *et al.*, 2017).

Pencarian dan pengumpulan artikel sumber studi

Artikel dicari dan diseleksi dengan berpedoman pada *preferred reporting items for systematic reviews and meta-analysis statement* (PRISMA) (Page *et al.*, 2021). Proses pencarian artikel jurnal dilakukan melalui situs pencarian yang menyediakan basis data publikasi ilmiah seperti *Science Direct*, *Google Scholar*, *Springer*, *Wiley Online Library*, *Scopus* dan *PubMed*. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian adalah "*microwave treatment*", "*microwave irradiation*", "*retrogradation starch*", "*resistant starch*", "*modified starch*" dan "*digestibility*". Penggunaan kata kunci disertai dengan operator boolean (*and*, *or*,

dan *not*) dan fitur pencarian lanjutan untuk memudahkan pencarian artikel yang sesuai.

Seleksi dan pemilihan artikel

Proses seleksi dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak referensi, yaitu Mendeley, untuk membaca judul dan abstrak artikel jurnal. Artikel jurnal yang terduplikasi kemudian dihapus. Setelah itu, dilakukan penilaian kesesuaian artikel jurnal berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi artikel yang berasal dari jurnal internasional yang memiliki reputasi baik atau jurnal nasional yang telah terakreditasi minimal dengan akreditasi B atau Sinta 2. Studi yang dipilih merupakan studi yang membahas tentang pati sebagai sampel penelitiannya dan harus menyajikan data kadar RS sebelum dan setelah modifikasi, data kadar air, suhu pemanasan, waktu pemanasan, daya pemanasan, jenis sampel yang digunakan, dan terbatas pada studi yang menggunakan perlakuan *microwave*. Selain itu, studi terpilih harus menyertakan data statistik yang lengkap, termasuk jumlah ulangan kontrol, jumlah ulangan percobaan, rata-rata, dan nilai standar deviasi. Kriteria eksklusi meliputi studi yang memiliki data statistik yang tidak lengkap, seperti tidak adanya nilai standar deviasi atau galat standar, serta studi yang berasal dari buku, tinjauan pustaka, dan paten.

Pengumpulan data

Artikel yang memenuhi syarat tersebut kemudian digunakan untuk melakukan meta-analisis. Data hasil penelitian dari jurnal yang telah dipilih kemudian diekstraksi ke dalam *Microsoft Excel*. Data tersebut mencakup informasi mengenai nama penulis, tahun publikasi, kadar air, suhu pemanasan, waktu pemanasan, daya pemanasan, jenis sampel, jumlah replikasi, serta nilai rerata dan standar deviasi atau standar galat dari kadar pati resisten pada kelompok kontrol dan kelompok percobaan. Informasi yang diperoleh harus memadai untuk dapat menghitung *standardized mean difference (SMD)*, *confidence interval 95% (CI)*, dan mengidentifikasi bias publikasi.

Analisis statistik

Data dianalisis dengan menggunakan perangkat lunak OpenMEE dengan menghitung nilai *effect size Hedges'd (standardized mean difference/SMD)* dan *confidence interval (CI) 95%*. Analisis dilakukan dengan menggunakan model efek acak (*random effects model*) yang menggabungkan data dari beberapa studi (Palupi *et al.*, 2012; Afandi *et al.*, 2021). Data yang dianalisis adalah data yang memiliki nilai rerata dan standar deviasi dari suatu perlakuan.

Variabel yang digunakan untuk analisis subgroup adalah jenis pangan karbohidrat, kadar air, waktu pemanasan dan daya pemanasan. Data yang digunakan adalah data kadar RS dari berbagai sumber karbohidrat. *Effect size* dari setiap perlakuan dihitung

untuk menentukan seberapa besar pengaruh perlakuan tersebut terhadap suatu kelompok pangan. *Effect size* yang bernilai positif dengan nilai *p-value* kurang dari 0,05 menunjukkan bahwa perlakuan *microwave* secara signifikan dapat meningkatkan kadar RS. Penilaian signifikansi dari dampak pemanasan *microwave* dapat ditentukan jika nilai CI tidak mencapai nilai nol. Heterogenitas antar variabilitas studi direpresentasikan menggunakan nilai statistik I^2 dan bias publikasi dievaluasi dengan menggunakan uji *Rosenthal's fail-safe number* (Fragkos *et al.*, 2014).

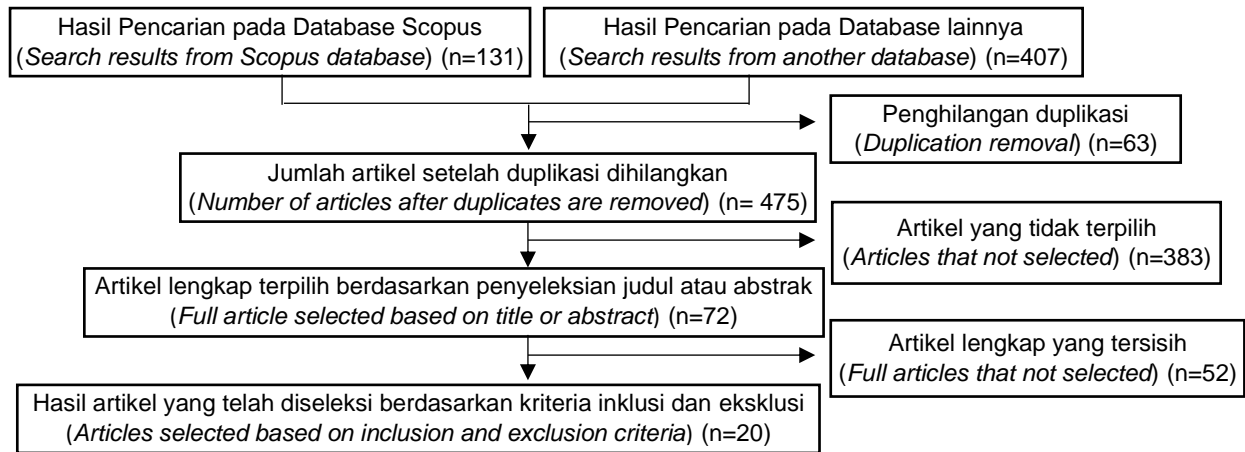
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan profil data dari sumber studi terpilih

Proses seleksi referensi menggunakan metode PRISMA terangkum dalam Gambar 1. Pencarian pada database, ditemukan total 538 artikel. Setelah dilakukan penghapusan duplikasi menggunakan *software* Mendeley, terdapat 475 artikel yang akan diseleksi berdasarkan abstrak dan judul. Hasil seleksi mengeliminasi 383 artikel yang abstrak dan judulnya tidak membahas tentang modifikasi pati secara pemanasan *microwave*. Berdasarkan seleksi ini, terdapat 72 artikel lengkap yang akan diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Sebanyak 52 artikel dikecualikan karena berbagai alasan, seperti tidak menyediakan data analisis kadar RS sebelum dan sesudah modifikasi, tidak memuat modifikasi pati dengan metode *microwave* serta data yang tidak lengkap seperti kurangnya data standar deviasi atau jumlah ulangan sampel. Dengan demikian, jumlah artikel lengkap yang digunakan dalam meta-analisis adalah 20 artikel, dengan total 45 data yang diperoleh dari artikel-artikel tersebut.

Tabel 1 menyajikan persentase perubahan kadar RS dari pati alami menjadi pati termodifikasi dari tiga subgroup sumber karbohidrat, yaitu sereal, umbi-umbian, dan biji-bijian/kacang-kacangan. Sebanyak 31 data menunjukkan rata-rata kenaikan kadar RS sebesar 7,01%, sedangkan 14 data menunjukkan rata-rata penurunan tingkat RS sebesar 8,45%.

Sebanyak 23 data dari 10 studi pada kelompok sereal, yaitu 17 data menunjukkan peningkatan rata-rata kadar RS sebesar 4,43% dan 6 data menunjukkan rata-rata penurunan kadar RS sebesar 9,93%. Peningkatan kadar RS tertinggi ditemukan pada pati jagung dengan pemanasan selama 60 detik sebesar 14,1%, sedangkan penurunan kadar RS tertinggi ditemukan pada pati sagu sebesar 17,21%. Sebanyak 8 data dari 6 studi pada kelompok umbi-umbian, yaitu 5 data menunjukkan peningkatan rata-rata kadar RS sebesar 10,16%, dan 3 data menunjukkan rata-rata penurunan kadar RS sebesar 11,89%.



Gambar 1. Proses penyaringan dan penyeleksian literatur menggunakan metode PRISMA
 Figure 1. Screening and selection literature process using PRISMA method

Peningkatan kadar RS tertinggi ditemukan pada pati ganyong sebesar 27,79%, sedangkan penurunan kadar RS tertinggi ditemukan pada pati kentang sebesar 25,83%. Sebanyak 14 data dari 6 studi pada kelompok biji-bijian/kacang-kacangan, yaitu 9 data menunjukkan peningkatan rata-rata kadar RS sebesar 10,12%, dan 5 data menunjukkan rata-rata penurunan kadar RS sebesar 4,59%. Peningkatan kadar RS tertinggi ditemukan pada kacang faba sebesar 17,8%, sedangkan penurunan kadar RS tertinggi ditemukan pada pati buncis sebesar 6,72%.

Effect size dan heterogenitas pada kelompok karbohidrat hasil perlakuan microwave

Analisis yang dilakukan dalam kajian meta-analisis ini adalah mengevaluasi nilai ukuran efek dan heterogenitas dari data yang telah dikumpulkan. Pertama dilakukan analisis *effect size* dan heterogenitas pada kelompok karbohidrat hasil perlakuan *microwave* yang dapat dilihat di Tabel 2 dan hasil *forest plot*-nya dapat dilihat di Gambar 2. Serealialia (*effect size*: 2,522; 95% CI: 0,514 hingga 4,529; $p=0,014$) memiliki nilai signifikansi tertinggi dalam meningkatkan kadar RS. Namun demikian, tidak ada pengaruh signifikan yang ditemukan pada kelompok umbi-umbian (*effect size*: 2,551, 95% CI: -0,984 hingga 6,086, $p=0,157$) dan biji-bijian/kacang-kacangan (*effect size*: 3,251, 95% CI: -0,108 hingga 6,610, $p=0,058$). Perlakuan signifikan ditandai dengan nilai *p-value* di bawah 0,05. Nilai heterogenitas yang dihasilkan dari ketiga kelompok karbohidrat termasuk tinggi karena lebih besar dari 75% (Jin *et al.*, 2014).

Pemanasan serealialia dengan *microwave* dapat meningkatkan kadar RS karena gelombang mikro dapat menurunkan daya cerna pati melalui retrogradasi pati. Peningkatan kandungan RS dengan perlakuan pemanasan disebabkan oleh gelatinisasi dan regenerasi ikatan hidrogen dalam pati saat proses

retrogradasi (Li *et al.*, 2018). Proses ini memicu terbentuknya pati RS3. Ketika pati diberikan pemanasan *microwave* pada kondisi kadar air tinggi, heliks ganda amilosa pada pati dihancurkan karena terjadinya disosiasi ikatan hidrogen dan amilopektin terlepas dari rantai utama. Peristiwa ini disebut sebagai gelatinisasi yang disertai dengan peningkatan tajam dari viskositas pasta pati. Gelombang mikro dapat menginduksi tahap pembengkakan gelatinisasi pati dan kemudian proses pendinginan akan menurunkan suhu dan menginduksi rekristalisasi pati, yaitu rantai molekul bergabung kembali melalui ikatan hidrogen untuk membentuk kristal baru yang menyebabkan retrogradasi (Sjöqvist dan Gatenholm, 2005).

Effect size dan heterogenitas pada sub kelompok jenis serealialia

Analisis *effect size* dan heterogenitas kemudian dilakukan pada sub-kelompok jenis serealialia yang dapat dilihat di Tabel 3, hasil *forest plot*-nya dapat dilihat pada Gambar 3. Perlakuan *microwave* dapat meningkatkan kadar RS pada beras (*effect size*: 5,312, 95% CI: 2,538 hingga 8,266, $p<0,001$). Perlakuan *microwave* pada pati beras membuat lamela amorf lebih kompak yang menyebabkan heliks ganda amilopektin menjadi lebih padat dan lamela kristal lebih teratur. Struktur yang lebih padat ini membuat pati menjadi lebih sulit dicerna oleh enzim pencernaan dan meningkatkan kadar pati resisten (Liu *et al.*, 2021). Perlakuan *microwave* dapat meningkatkan kadar RS pada pati sorgum (*effect size*: 2,056, 95% CI: 0,545 hingga 3,566, $p=0,008$) secara signifikan. Namun, nilai heterogenitas pada data kelompok sorgum bernilai rendah (36,19%) yang menunjukkan kurangnya variasi data yang digunakan. Perlakuan *microwave* dapat menggelatinisasi pati sorgum dan proses pendinginan setelahnya menyebabkan retrogradasi pati.

Tabel 1. Pati resisten dari berbagai sumber karbohidrat
 Table 1. Resistent starch from various carbohydrate source

Kode Studi (Study Code)	Tipe Sampel (Sample Type)	Waktu (Detik) (Time (Second))	Daya (Watt) (Power (Watt))	Kadar Air (%) (Moisture Content (%))	Kadar RS (%) (RS Content (%))		RS Different/ Δ RS (%)	Referensi (Reference)
					Awal (Initial)	Akhir (Final)		
Sub kelompok serealia (Sub group cerealia)					Awal (Initial)	Akhir (Final)		
1	Beras (Rice)	30	500	40	43.54	46.87	3.33	Sun et al. (2022)
1	Beras (Rice)	90	500	40	43.54	48.68	5.14	Sun et al. (2022)
2	Sagu (Sago)	900	180	20	62.15	44.94	-17.21	Zailani et al. (2022)
3	Sorgum LML1 (Sorghum LML1)	360	600	30	5.09	6.12	1.03	Li et al. (2021)
3	Sorgum LZ13 (Sorghum LZ13)	360	600	25	7.35	9.76	2.41	Li et al. (2021)
3	Sorgum HN (Sorghum HN)	360	600	28	7.62	9.13	1.51	Li et al. (2021)
5	Milet putih (Proso millet)	600	500	25	11.5	18.7	7.2	Zheng et al. (2019)
7	Jagung (Corn)	60	1200	30	40.7	54.8	14.1	Zhong et al. (2019)
7	Jagung (Corn)	120	1200	30	40.7	34.1	-6.6	Zhong et al. (2019)
7	Jagung (Corn)	180	1200	30	40.7	30.2	-10.5	Zhong et al. (2019)
7	Jagung (Corn)	240	1200	30	40.7	29.5	-11.2	Zhong et al. (2019)
10	Jagung (Corn)	300	206	30	57.61	44.94	-12.67	Xu et al. (2019)
11	Beras (Rice)	90	200	47.6	18.01	20.65	2.64	Liu et al. (2021)
11	Beras (Rice)	48	400	47.6	18.01	24.37	6.36	Liu et al. (2021)
11	Beras (Rice)	25	600	47.6	18.01	26.1	8.09	Liu et al. (2021)
11	Beras (Rice)	90	200	40	17.29	15.88	-1.41	Liu et al. (2021)
11	Beras (Rice)	48	400	40	17.29	17.84	0.55	Liu et al. (2021)
11	Beras (Rice)	25	600	40	17.29	20.72	3.43	Liu et al. (2021)
12	Jagung (Corn)	90	1100	30	62	71.4	9.4	Wang et al. (2019)
12	Kastanye (Chestnut)	90	1100	30	73.4	78	4.6	Wang et al. (2019)
15	Beras RD 43 (Rice RD 43)	30	600	42	0.28	0.44	0.16	Techanet et al. (2022)
15	Beras RD 43 (Rice RD 43)	30	800	42	0.28	0.41	0.13	Techanet et al. (2022)
17	Gandum hitam tartar (Tartary buckwheat)	120	800	5	33.65	38.85	5.2	Zhou et al. (2021)
Sub kelompok umbi-umbian (Sub group tubers)					Awal (Initial)	Akhir (Final)		
4	Singkong WCS Cassava WCS)	1800	900	20	57.17	61.62	4.45	Khursida dan Deka (2021)

Sub kelompok umbi-umbian (<i>Sub group tubers</i>)					Awal (<i>Initial</i>)	Akhir (<i>Final</i>)		
4	Singkong PS (<i>Cassava PS</i>)	1800	900	20	8.7	8.14	-0.56	Khursida dan Deka (2021)
6	Ganyong (<i>Canna</i>)	1800	1000	20	27.73	55.52	27.79	Zhang <i>et al.</i> (2010)
10	Kentang (<i>Potato</i>)	300	206	30	65.91	67.17	1.26	Xu <i>et al.</i> (2019)
10	Kentang (<i>Potato</i>)	300	609	30	65.91	40.08	-25.83	Xu <i>et al.</i> (2019)
12	Kentang (<i>Potato</i>)	90	1100	30	64.7	71.5	6.8	Wang <i>et al.</i> (2019)
13	Ubi kaki gajah (<i>Elephant foot yam</i>)	120	600	35	29.88	40.37	10.49	Barua <i>et al.</i> (2021)
19	Ubi ungu (<i>Purple yam</i>)	480	60	10	59.69	50.39	-9.3	Wang <i>et al.</i> (2022)
Sub kelompok biji-bijian/kacang-kacangan (<i>Sub group pulses</i>)					Awal (<i>Initial</i>)	Akhir (<i>Final</i>)		
8	Kastanye air (<i>Water caltrop</i>)	20	800	30	64.4	59.35	-5.05	Wei <i>et al.</i> (2020)
8	Kastanye air (<i>Water caltrop</i>)	30	800	30	64.4	61.4	-3	Wei <i>et al.</i> (2020)
8	Kastanye air (<i>Water caltrop</i>)	50	800	30	64.4	67.41	3.01	Wei <i>et al.</i> (2020)
9	Biji teratai (<i>Lotus seeds</i>)	120	240	70	15.38	20.91	5.53	Zeng <i>et al.</i> (2016)
9	Biji teratai (<i>Lotus seeds</i>)	120	400	70	15.38	22.33	6.95	Zeng <i>et al.</i> (2016)
9	Biji teratai (<i>Lotus seeds</i>)	120	640	70	15.38	28.85	13.47	Zeng <i>et al.</i> (2016)
9	Biji teratai (<i>Lotus seeds</i>)	120	800	70	15.38	30.42	15.04	Zeng <i>et al.</i> (2016)
14	Buncis (<i>Green bean</i>)	1800	650	33.33	17.19	10.47	-6.72	Krupa-Kozak <i>et al.</i> (2010)
14	Kacang polong (<i>Pea</i>)	1200	650	30	31.53	25.81	-5.72	Krupa-Kozak <i>et al.</i> (2010)
16	Quinoa	300	600	30	2.89	7.74	4.85	Dong <i>et al.</i> (2021)
18	Kacang faba (<i>Faba beans</i>)	420	800	4	3.6	21.4	17.8	Liu <i>et al.</i> (2021)
18	Miju-miju (<i>Lentil</i>)	120	800	4	5.1	21.8	16.7	Liu <i>et al.</i> (2021)
20	Talipot	700	90	30	9.22	6.75	-2.47	Aaliya <i>et al.</i> (2022)

Tabel 2. Hasil analisis effect size dan heterogenitas dari kelompok karbohidrat hasil perlakuan *microwave*
 Table 2. Analysis of effect size analysis and heterogeneity from carbohydrate groups with microwave treatment

Jenis Karbohidrat (<i>Carbohydrate Type</i>)	N	Effect Size Hedges'd	95% CI		p-value	Heterogenitas (<i>Heterogeneity</i>)	
			BB	BA		I ² (%)	p-value
Serealia (<i>Cereals</i>)	23	2.522	0.514	4.529	0.014	87.16	<0.001
Umbi-umbian (<i>Tubers</i>)	8	2.551	-0.984	6.086	0.157	89.27	<0.001
Biji-bijian/kacang-kacangan (<i>Pulses</i>)	14	3.251	-0.108	6.610	0.058	90.06	<0.001

Keterangan: N= Jumlah data, 95% CI= Selang kepercayaan effect size, BB= Batas bawah, BA= Batas atas, I²= Persen heterogenitas

Note: N= Number of data, 95% CI= Interval of confidence of effect size, BB= Lower limit, BA= Upper limit, I²= Percent of heterogeneity

Selama proses retrogradasi, rantai molekul amilosa dan amilopektin dalam granula pati mulai bergabung kembali, membentuk struktur yang lebih padat

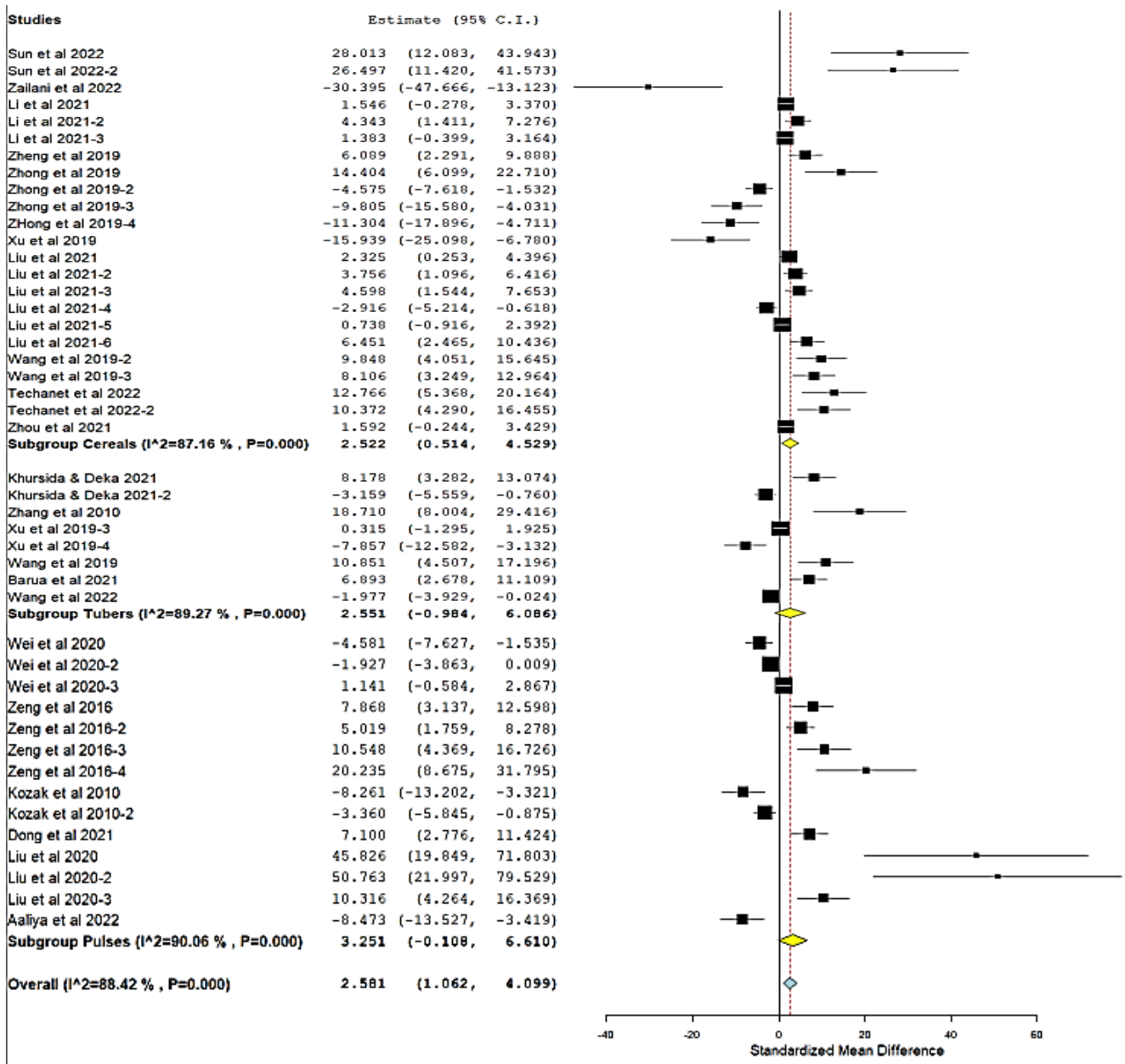
dan teratur sehingga dapat meningkatkan kadar pati resisten (Li *et al.*, 2021). Namun demikian, perlakuan *microwave* pada jagung (effect size: -2,870, 95% CI:

-10,823 hingga 5,082, $p=0,479$) tidak menunjukkan pengaruh signifikan pada kadar RS. Oleh karena nilai heterogenitas dari kelompok sorgum bernilai rendah, maka dari ketiga jenis sereal ini yang paling cocok diberi perlakuan *microwave* untuk meningkatkan kadar RS adalah pati beras.

Effect size dan heterogenitas dari daya pemanasan *microwave*

Hasil analisis *effect size* dan heterogenitas pada daya pemanasan *microwave* dapat dilihat pada Tabel

4 hasil *forest plot*-nya dapat dilihat di Gambar 4. Analisis sub-kelompok pada daya yang digunakan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kadar RS hanya pada daya 401-600 Watt (*effect size*: 4,918, 95% CI: 3,140 hingga 6,696, $p<0,001$). Nilai heterogenitasnya pun tinggi karena di atas 75% (Jin *et al.*, 2014). Kadar RS meningkat karena daya yang tinggi dapat menghasilkan suhu yang tinggi. Suhu tinggi dapat membuka ikatan antara molekul pati dan membentuk struktur baru lebih rapat dan lebih kompak (Li *et al.*, 2019).



Gambar 2. Hasil *forest plot* analisis *effect size* dan heterogenitas pada kelompok karbohidrat hasil perlakuan *microwave*

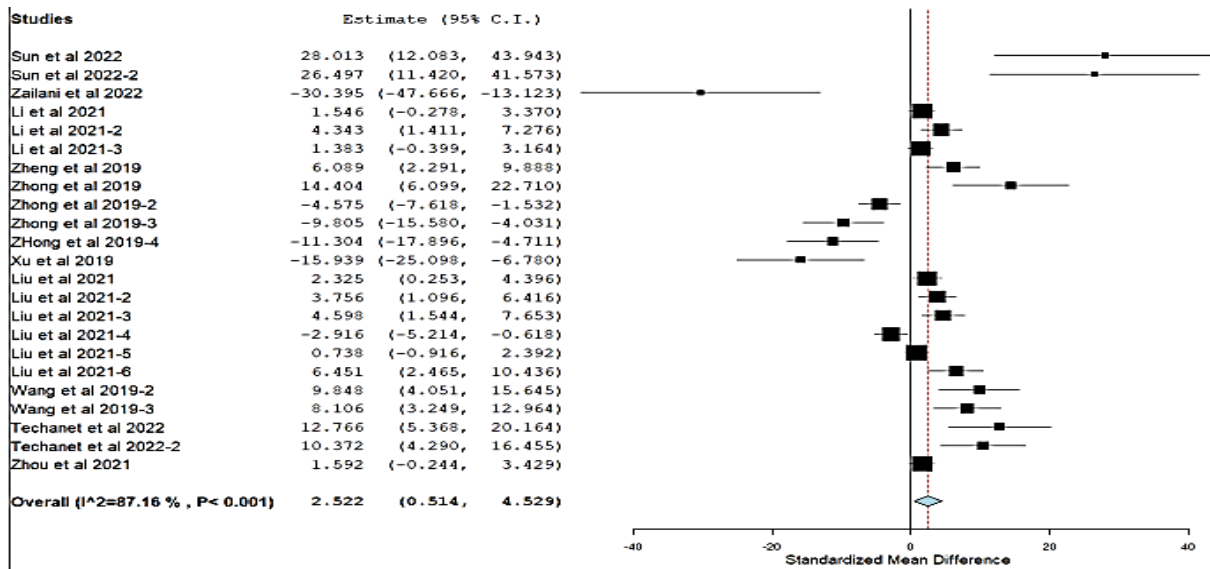
Figure 2. *Forest plot* results of *effect size* and heterogeneity analysis on *microwave-treated carbohydrate groups*

Tabel 3. Hasil analisis effect size dan heterogenitas dari sub kelompok jenis sereal
 Table 3. Analysis of effect size and heterogeneity from sub-group of cereals

Jenis Sereal (Cereals Type)	N	Effect Size Hedges'd	95% CI		p-value	Heterogenitas (Heterogeneity)	
			BB	BA		I ² (%)	p-value
Nasi (Rice)	10	5.312	2.358	8.266	<0.001	86.13	<0.001
Sorgum (Sorghum)	3	2.056	0.545	3.566	0.008	36.19	<0.001
Jagung (Corn)	6	-2.870	-10.823	5.082	0.479	91.03	<0.001

Keterangan: N= Jumlah data, 95% CI= Selang kepercayaan effect size, BB= Batas bawah, BA= Batas atas, I²= Persen heterogenitas

Note: N= Number of data, 95% CI= Interval of confidence of effect size, BB= Lower limit, BA= Upper limit, I²= Percent of heterogeneity



Gambar 3. Hasil forest plot analisis effect size dan heterogenitas pada sub kelompok jenis sereal
 Figure 3. Forest Plot results of effect size and heterogeneity analysis on cereal type subgroups

Penggunaan daya yang tinggi juga dapat membuat struktur kristal amorf yang lebih teratur. Pembentukan struktur yang lebih kompak dan teratur ini dapat membuat pati menjadi lebih resisten (Liu et al., 2021). Namun demikian, daya yang terlalu tinggi dapat menghasilkan kondisi panas yang berlebihan (over-heating) yang mengakibatkan RS1 dan RS2 terdegradasi sehingga total RS menurun (Brahma dan Sit, 2020). Penggunaan daya tinggi, iradiasi jangka panjang dari gelombang mikro, dapat menyebabkan panas lokal berlebih yang mengakibatkan karbonisasi pati dan pembelahan rantai pada molekul pati. Rantai amilosa pendek dan menengah pada pati dapat terputus secara berlebihan jika daya yang digunakan berlebih (Tao et al., 2020).

Effect size dan heterogenitas dari waktu pemanasan microwave

Analisis sub-kelompok pada waktu pemanasan menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kadar RS pada waktu 20-59 detik (effect size: 3,377, 95% CI: 0,770 hingga 5,984, p=0,011) dan 60-99 detik (effect size: 7,832, 95% CI: 2,759 hingga 12,906, p=0,002) (Tabel 5) dan hasil forest plot-nya pada Gambar 5. Waktu 60-99 detik dipilih

sebagai perlakuan terbaik karena memiliki nilai p-value yang lebih rendah yang menunjukkan perlakuan ini lebih signifikan. Waktu 60-99 detik lebih baik dari 20-59 detik karena meningkatnya waktu pemanasan dapat meningkatkan mobilitas rantai pati yang dapat menyebabkan meningkatnya pati resisten yang disebabkan penurunan sensitivitas terhadap enzim pencernaan (Kim et al., 2017). Waktu pemanasan yang terlalu lama dapat menyebabkan overheating, sehingga pemanasan microwave lebih dari 200 detik tidak berpengaruh signifikan terhadap kenaikan kadar RS.

Effect size dan heterogenitas dari kadar air pati dengan perlakuan microwave yang digunakan

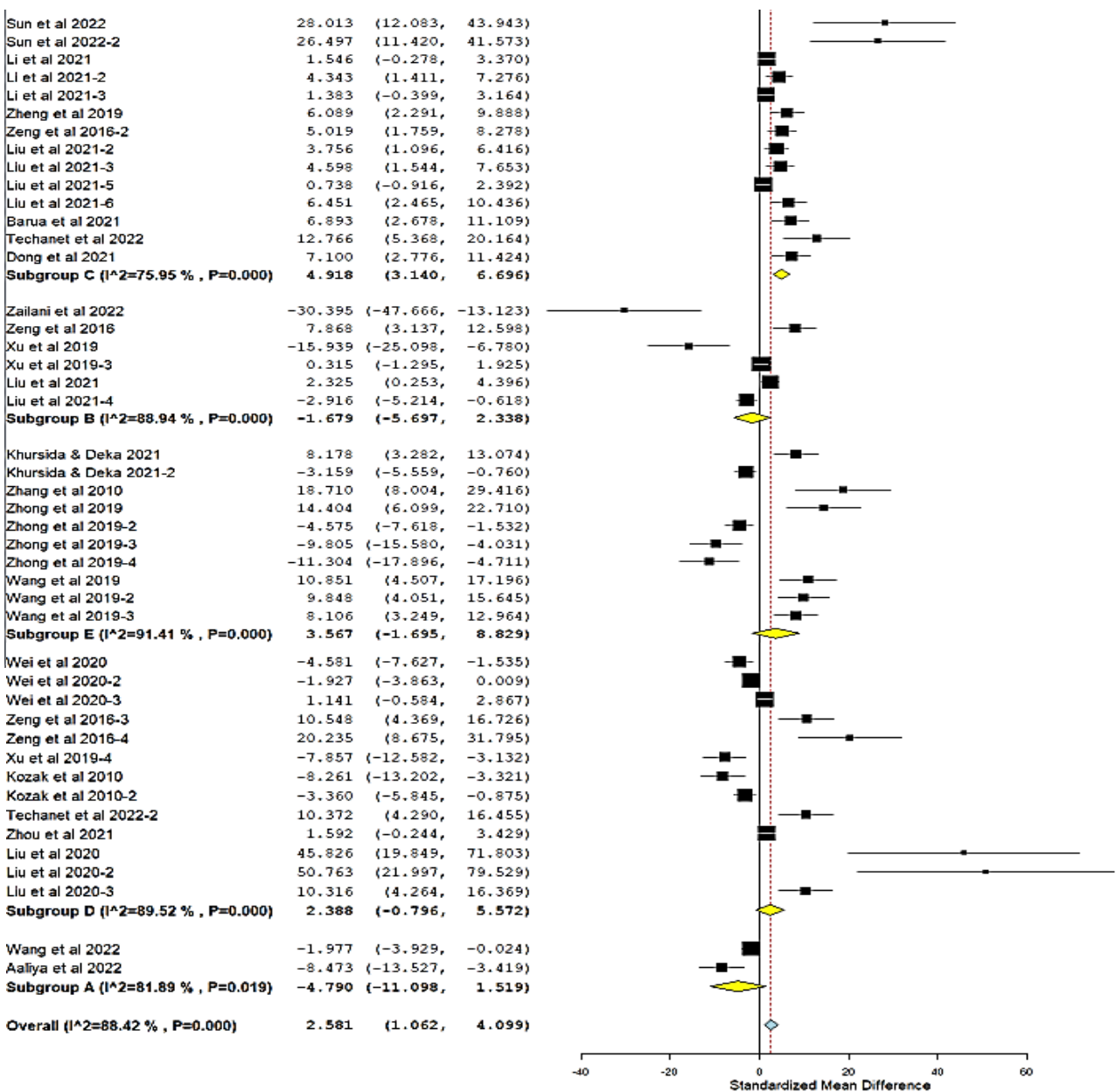
Pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kadar pati resisten ditunjukkan oleh kadar air 40-60% (effect size: 5,312; 95% CI: 2,358 hingga 8,266, p<0,001) dan 61-70% (effect size: 8,674; 95% CI: 6,122 hingga 11,227, p<0,001) (Tabel 6) dan hasil forest plot-nya pada Gambar 6. Namun nilai heterogenitas data kadar air 61-70% bernilai kecil (35,77%) yang menunjukkan data yang digunakan kurang heterogen.

Tabel 4. Hasil analisis effect size dan heterogenitas dari daya pemanasan microwave yang digunakan
 Table 4. Analysis of effect size and heterogeneity from microwave power

Kelompok Daya (Power group)	N	Effect Size Hedges'd	95% CI		p-value	Heterogenitas (Heterogeneity)	
			BB	BA		I ² (%)	p-value
20-99 W	2	-4.790	-11.098	1.519	0.137	81.89	<0.001
100-400 W	6	-1.679	-5.697	2.338	0.413	88.94	<0.001
401-600 W	14	4.918	3.140	6.696	<0.001	75.95	<0.001
601-800 W	13	2.388	-0.796	5.572	0.142	89.52	<0.001
>801 W	10	3.567	-1.695	8.829	0.184	91.41	<0.001

Keterangan: N= Jumlah data, 95% CI= Selang kepercayaan effect size, BB= Batas bawah, BA= Batas atas, I²= Persen heterogenitas

Note: N= Number of data, 95% CI= Interval of confidence of effect size, BB= Lower limit, BA= Upper limit, I²= Percent of heterogeneity



Gambar 4. Hasil forest plot analisis effect size dan heterogenitas pada daya pemanasan microwave yang digunakan

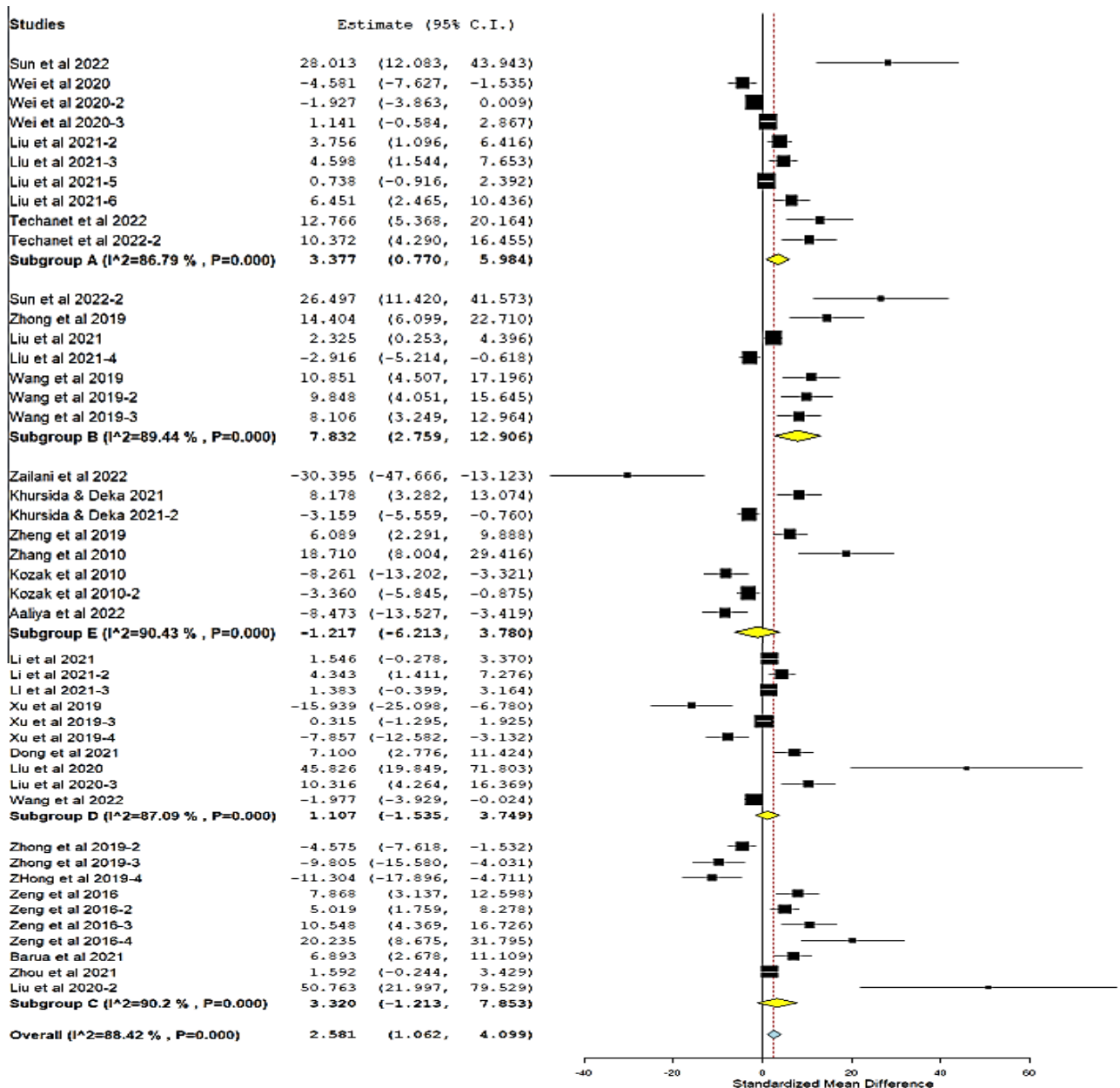
Figure 4. Forest plot results of effect size and heterogeneity analysis on microwave heating power used

Tabel 5. Hasil analisis *effect size* dan heterogenitas dari waktu pemanasan *microwave* yang digunakan
 Table 5. Analysis of effect size and heterogeneity from microwave heating time

Kelompok Waktu (Time group)	N	Effect Size Hedges'd	95% CI		p-value	Heterogenitas (Heterogeneity)	
			BB	BA		I ² (%)	p-value
20-59 S	10	3.377	0.770	5.984	0.011	86.79	<0.001
60-99 S	7	7.832	2.759	12.906	0.002	89.44	<0.001
200-299 S	10	3.320	-1.213	7.853	0.151	90.20	<0.001
300-599 S	10	1.107	-1.535	3.749	0.411	87.09	<0.001
600-1800 S	8	-1.217	-6.213	3.780	0.633	90.43	<0.001

Keterangan: N= Jumlah data, 95% CI= Selang kepercayaan *effect size*, BB= Batas bawah, BA= Batas atas, I²= Persen heterogenitas

Note: N= Number of data, 95% CI= Interval of confidence of effect size, BB= Lower limit, BA= Upper limit, I²= Percent of heterogeneity



Gambar 5. Hasil *forest plot* analisis *effect size* dan heterogenitas pada waktu pemanasan *microwave* yang digunakan

Figure 5. Forest plot results of effect size and heterogeneity analysis on microwave heating time used

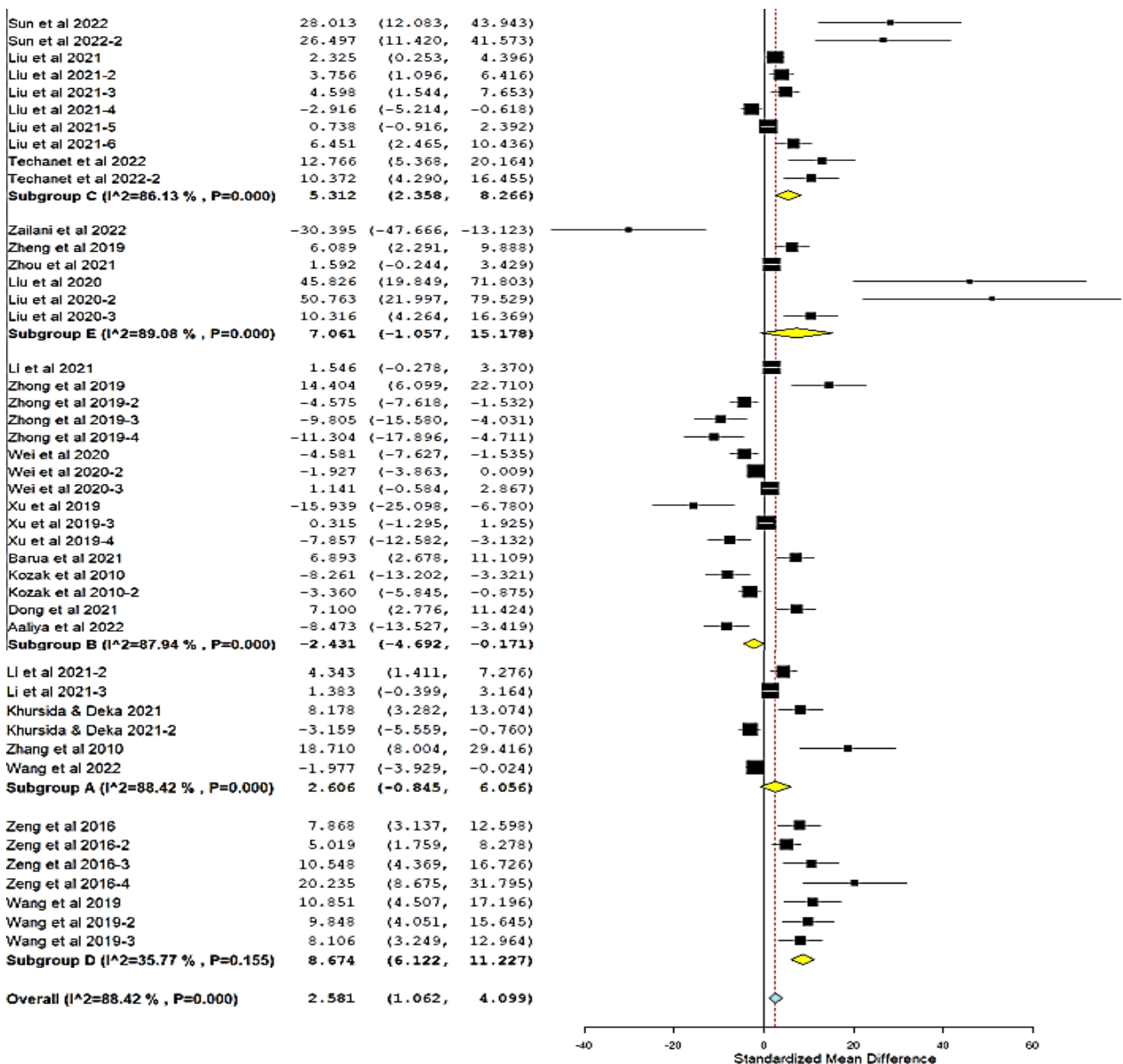
Tabel 6. Hasil analisis effect size dan heterogenitas dari kadar air pati dengan perlakuan microwave yang digunakan

Table 6. Analysis of effect size and heterogeneity from moisture content of starch with microwave treatment

Kelompok Kadar Air (Moisture Content Group)	N	Effect Size Hedges'd	95% CI		p-value	Heterogenitas (Heterogeneity)	
			BB	BA		I ² (%)	p-value
10-29%	6	2.606	-0.845	6.056	0.139	88.42	<0.001
30-39%	16	-2.431	-4.692	-0.171	0.035	87.94	<0.001
40-60%	10	5.312	2.358	8.266	<0.001	86.13	<0.001
61-70%	7	8.674	6.122	11.227	<0.001	35.77	<0.001
71-100%	6	7.061	-1.057	15.178	0.088	89.08	<0.001

Keterangan: N= Jumlah data, 95% CI= Selang kepercayaan effect size, BB= Batas bawah, BA= Batas atas, I²= Persen heterogenitas

Note: N= Number of data, 95% CI= Interval of confidence of effect size, BB= Lower limit, BA= Upper limit, I²= Percent of heterogeneity



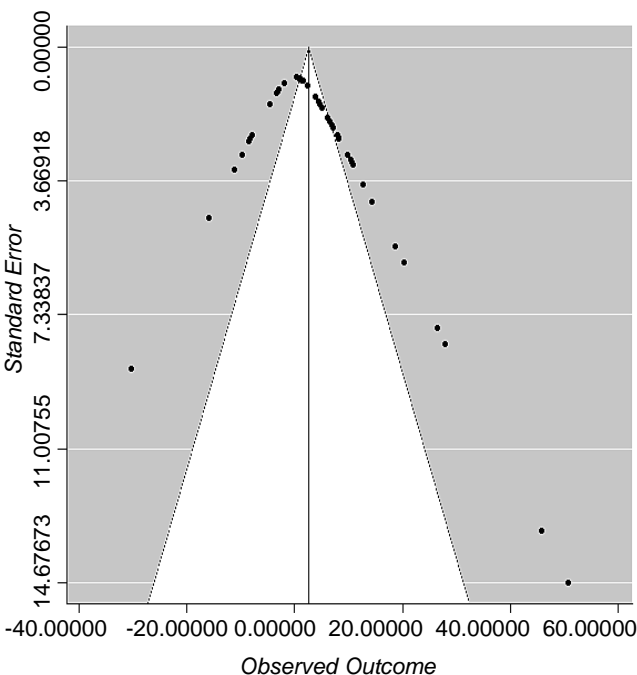
Gambar 6. Hasil forest plot analisis effect size dan heterogenitas pada kadar air pati yang diperlakukan microwave

Figure 6. Forest plot results of effect size and heterogeneity analysis on moisture content of microwave-treated starch

Kadar air 30-39% (*effect size*: -2,431; 95% CI: -4,692 hingga -0,171, $p=0,035$) berpengaruh signifikan dalam mengurangi kadar pati resisten dalam pati, sehingga nilai kadar air ini tidak cocok untuk digunakan. Pemanasan dengan *microwave* dipengaruhi oleh komponen dielektrik dari bahan yang dipanaskan. Air merupakan komponen dielektrik terbesar dari pati dan merupakan komponen dielektrik termudah untuk dikontrol dan dikustomisasi (Li *et al.*, 2019). Penelitian terdahulu Li *et al.* (2011) dan Liu *et al.* (2019) menggunakan kadar air yang berbeda-beda dalam perlakuannya bergantung dari jenis pati yang dilakukan pemanasan *microwave* untuk meraih hasil peningkatan RS yang optimal. Air pun dapat membentuk ikatan hidrogen antarmolekul pada granula pati dan mereformasi rantai molekul menjadi heliks ganda, yang dapat membuat struktur pati lebih kompak sehingga RS meningkat.

Bias publikasi

Berdasarkan *funnel plot* yang dihasilkan dapat dilihat bentuknya cukup simetris, sehingga tidak terdapat bias publikasi dalam kajian ini (Gambar 7). Hasil analisis bias publikasi berdasarkan uji *Rosenthal's fail-safe-number* menunjukkan bahwa meta-analisis yang dilakukan kuat (*robust*) terhadap kemungkinan bias publikasi.



Gambar 7. Hasil *funnel plot* dari meta-analisis yang dilakukan menunjukkan tidak terdapat bias publikasi

Figure 7. *Funnel plot* results from the meta-analysis show no publication bias

Hal tersebut disebabkan oleh nilai *Fail-safe N* pada semua analisis yang dilakukan lebih dari 5N+10, yaitu N merupakan jumlah studi tiap parameter. Nilai *Fail-safe N* diperoleh dari olah data menggunakan *software* OpenMEE pada uji *Rosenthal's fail-safe-number* (Fragkos *et al.*, 2014). Nilai *Fail-safe N* untuk data kelompok karbohidrat hasil perlakuan *microwave*, data daya pemanasan *microwave*, waktu pemanasan *microwave*, dan kadar air pati pada pemanasan *microwave* sebesar 774 dan nilai *Fail-safe N* untuk data subgroup jenis serealiala sebesar 326.

KESIMPULAN

Berdasarkan meta-analisis yang telah dilakukan, pemanasan *microwave* untuk meningkatkan kadar RS paling signifikan dilakukan pada pangan serealiala, khususnya beras. Besaran parameter perlakuan paling efektif untuk pangan tersebut berdasarkan meta-analisis yang telah dilakukan ialah daya sebesar 401-600 W, waktu pemanasan selama 60-99 detik, dan kadar air pati sebesar 40-60%.

DAFTAR PUSTAKA

Aaliya B, Sunooj K V, John NE, Navaf M. 2022. Impact of microwave irradiation on chemically modified talipot starches: A characterization study on heterogeneous dual modifications. *Int J Biol Macromol* 20: 1943-1955. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.172>

Afandi FA, Wijaya CH, Faridah DN, Suyatma NE, Jayanegara A. 2021. Evaluation of various starchy foods: A systematic review and meta-analysis on chemical properties affecting the glycemic index values based on *in vitro* and *in vivo* experiments. *Foods* 10: 1-28. <https://doi.org/10.3390/foods10020364>

Alsaffar AA. 2011. Effect of food processing on the resistant starch content of cereals and cereal products – a review. *Int J Food Sci Technol* 46: 455–462. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02529.x>

Brahma B, Sit N. 2020. Physicochemical properties and digestibility of heat moisture-treated potato starches for different treatment conditions. *Potato Res* 63: 367–383. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09445-w>

Bruce RM, Atungulu GG, Sadaka S, Smith D. 2021. Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. *Cereal Chem* 98: 557–570. <https://doi.org/10.1002/cche.10398>

- Dong J, Huang L, Chen W, Zhu Y, Dun B, Shen R. 2021. Effect of heat-moisture treatments on digestibility and physicochemical property of whole quinoa flour. *Foods* 10: 3042. <https://doi.org/10.3390/foods10123042>
- Faridah DN, Damaiyanti S, Indrasti D, Jayanegara A, Afandi FA. 2021. Effect of heat moisture treatment on resistant starch content among carbohydrate sources: A meta-analysis. *Int J Food Sci Technol* 57: 1-10. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15276>
- Fragkos KC, Tsagris M, Frangos CC. 2014. Publication bias in meta-analysis: confidence intervals for Rosenthal's Fail-safe number. *Int Sch Res Notices* 2014: 1–17. <https://doi.org/10.1155/2014/825383>
- Gurevitch J, Koricheva J, Nakagawa S, Stewart G. 2018. Meta-analysis and the science of research analysis. *Nature* 555: 175-182. <https://doi.org/10.1038/nature25753>
- Huong NTM, Hoa PN, Van Hung P. 2021. Effects of microwave treatments and retrogradation on molecular crystalline structure and *in vitro* digestibility of debranched mung-bean starches. *Int J Biol Macromol* 190: 904–910. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.032>
- Jin Z-C, Wu C, Zhou X-H, He J. 2014. A modified regression method to test publication bias in meta-analyses with binary outcomes. *BMC Med Res Methodol* 14: 1–9. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-14-132>
- Khatun A, Waters DLE, Liu L. 2019. A review of rice starch digestibility: Effect of composition and heat-moisture processing. *Starch-Stärke* 71: 190 0090. <https://doi.org/10.1002/star.201900090>
- Khurshida S, Deka SC. 2021. Application of microwave and hydrothermal treatments for modification of cassava starch of Manipur region, India and development of cookies. *J Food Sci Technol* 59: 344-354. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05020-9>
- Krupa-Kozak U, Juśkiewicz J, Wronkowska M, Soral-Śmietana M, Zduńczyk Z. 2010. Native and microwaved bean and pea starch preparations: physiological effects on the intestinal ecosystem, caecal tissue and serum lipids in rats. *Br J Nutr* 103: 118-1126. <https://doi.org/10.1017/S0007114509992960>
- Kim M-J, Oh S-G, Chung H-J. 2017. Impact of heat-moisture treatment applied to brown rice flour on the quality and digestibility characteristics of Korean rice cake. *Food Sci Biotechnol* 26:1579–1586. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0151-x>
- Li R, Dai L, Peng H, Jiang P, Liu N, Zhang D, Wang C, Li Z. 2021. Effects of microwave treatment on sorghum grains: Effects on the physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starch. *J Food Process Eng* 44: e13804. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13804>
- Li S, Ward R, Gao Q. 2011. Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch. *Food Hydrocoll* 25: 1702–1709. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.03.009>
- Li Y, Hu A, Wang X, Zheng J. 2019. Physicochemical and *in vitro* digestion of millet starch: Effect of moisture content in microwave. *Int J Biol Macromol* 134: 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.046>
- Lim S-T, Chang E-H, Chung H-J. 2001. Thermal transition characteristics of heat–moisture treated corn and potato starches. *Carbohydr Polym* 46: 107–115. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00287-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00287-3)
- Liu K, Zhang B, Chen L, Li X, Zheng B. 2019. Hierarchical structure and physicochemical properties of highland barley starch following heat moisture treatment. *Food Chem* 271: 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.193>
- Liu T, Zhang B, Wang L, Zhao S, Qiao D, Zhang L, Xie F. 2021a. Microwave reheating increases the resistant starch content in cooked rice with high water contents. *Int J Biol Macromol* 184: 804–811. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.136>
- Liu Y, Ragaei S, Marcone MF, Abdel-Aal E-SM. 2020. Effect of different cooking methods and heating solutions on nutritionally-important starch fractions and flatus oligosaccharides in selected pulses. *Cereal Chem* 97: 1216–1226. <https://doi.org/10.1002/cche.10344>
- Lockyer S, Nugent AP. 2017. Health effects of resistant starch. *Nutr Bull* 42: 10–41. <https://doi.org/10.1111/nbu.12244>
- Lu Z-H, Donner E, Liu Q. 2018. Effect of roasted pea flour/starch and encapsulated pea starch incorporation on the *in vitro* starch digestibility of pea breads. *Food Chem* 245: 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.037>
- Mutlu S, Kahraman K, Öztürk S. 2017. Optimization of resistant starch formation from high amylose corn starch by microwave irradiation treatments and characterization of starch preparations. *Int J Biol Macromol* 95: 635–642. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.097>

- Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, Moher D. 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 372: n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Palupi E, Jayanegara A, Ploeger A, Kahl J. 2012. Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: a meta-analysis. *J Sci Food Agric* 92: 2774–2781. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5639>
- Panyoo AE, Emmambux MN. 2017. Amylose–lipid complex production and potential health benefits: A mini-review. *Starch/Stärke* 69: 1600203. <https://doi.org/10.1002/star.201600203>
- Sjöqvist M, Gatenholm P. 2005. The effect of starch composition on structure of foams prepared by microwave treatment. *J Polym Environ* 13: 29–37. <https://doi.org/10.1007/s10924-004-1213-8>
- Tao Y, Yan B, Fan D, Zhang N, Ma S, Wang L, Wu Y, Wang M, Zhao J, Zhang H. 2020. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. *Trends Food Sci Technol* 99: 593–607. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.020>
- Techanet N, Kawee-Ai A, Laokuldilok N, Utama-Ang N. 2022. Effect of microwave and infrared heating process on increasing resistant starch type 3 and reducing glycemic index in RD 43 rice. *Chiang Mai J Sci* 49: 364–376. <https://doi.org/10.12982/CMJS.2022.040>
- Trancoso-Reyes N, Ochoa-Martínez LA, Bello-Pérez LA, Morales-Castro J, Estévez-Santiago R, Olmedilla-Alonso B. 2016. Effect of pre-treatment on physicochemical and structural properties, and the bioaccessibility of β -carotene in sweet potato flour. *Food Chem* 200: 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.047>
- Wallace BC, Lajeunesse MJ, Dietz G, Dahabreh IJ, Trikalinos TA, Schmid CH, Gurevitch J. 2017. OpenMEE: Intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology. *Methods Ecol Evol* 8: 941–947. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12708>
- Wang M, Sun M, Zhang Y, Chen Y, Wu Y, Ouyang J. 2019. Effect of microwave irradiation-retrogradation treatment on the digestive and physicochemical properties of starches with different crystallinity. *Food Chem* 298: 125015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125015>
- Wang W, Hu A, Li J, Liu G, Wang M, Zheng J. 2022. Comparison of physicochemical properties and digestibility of sweet potato starch after two modifications of microwave alone and microwave-assisted L-malic acid. *Int J Biol Macromol* 210: 614–621. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.215>
- Wei H-X, Liang B-D, Chai Y-R, Xue L-P, Wang X-Q, Yin X-M. 2020. Effect of different heat treatments on physicochemical properties and structural and digestibility of water caltrop starch. *Starch/Stärke* 72: 1900275. <https://doi.org/10.1002/star.201900275>
- Xu X, Chen Y, Luo Z, Lu X. 2019. Different variations in structures of A- and B-type starches subjected to microwave treatment and their relationships with digestibility. *LWT* 99: 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.072>
- Zailani MA, Kamilah H, Husaini A, Awang Seruji AZR, Sarbini SR. 2022. Functional and digestibility properties of sago (*Metroxylon sagu*) starch modified by microwave heat treatment. *Food Hydrocoll* 122: 107042. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107042>
- Zhang J, Chen F, Liu F, Wang Z-W. 2010. Study on structural changes of microwave heat-moisture treated resistant Canna edulis Ker starch during digestion *in vitro*. *Food Hydrocoll* 24: 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.07.005>
- Zhang K, Zhao D, Guo D, Tong X, Zhang Y, Wang L. 2021. Physicochemical and digestive properties of A- and B-type granules isolated from wheat starch as affected by microwave-ultrasound and toughening treatment. *Int J Biol Macromol* 183: 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.04.180>
- Zheng M-Z, Xiao Y, Yang S, Liu H-M, Liu M-H, Yaqoob S, Xu X-Y, Liu J-S. 2020. Effects of heat-moisture, autoclaving, and microwave treatments on physicochemical properties of proso millet starch. *Food Sci Nutr* 8: 735–743. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1295>
- Zhong Y, Liang W, Pu H, Blennow A, Liu X, Guo D. 2019. Short-time microwave treatment affects the multi-scale structure and digestive properties of high-amylose maize starch. *Int J Biol Macromol* 137: 870–877. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.025>
- Zhou X, Wang S, Zhou Y. 2021. Study on the structure and digestibility of high amylose Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) starch-flavonoid prepared by different methods. *J Food Sci* 86: 1463–1474. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15657>