

Efecto de la modificación química dual en complejos almidón-quercetina

Effect of dual chemical modification on starch-querctin complexes

Marco A. Estrada-Jasso^a, Juan P. Hernández-Uribe^a, Víctor H. Paniagua-López^a, Gabriela Medina-Pérez^a, Armando Zepeda-Bastida^a, Luisa M. García Vázquez^{a*}

Abstract:

Starch is an essential raw material for the food industry; however, in its native form, it presents limitations that hinder its optimal performance in technological applications. Through various physical, enzymatic, and chemical modifications, it is possible not only to reduce these limitations but also to tailor the functional properties of starch to suit most modern applications. The objective of this research was to evaluate the effect of dual chemical modification of malanga starch (*Colocasia esculenta*) to enhance its ability to stabilize quercetin, an interesting bioactive compound with reported antioxidant activity. Antioxidant capacity was assessed using free radical scavenging assays (DPPH). The results showed that unmodified malanga starch (*Colocasia esculenta*) exhibited higher antioxidant activity than the modified starches, suggesting that the modifications may increase the starch's affinity for quercetin and limit its immediate release into aqueous media. This feature could be utilized to design controlled release systems for quercetin. It is proposed to explore more sustainable and effective processes to enhance the properties of these complexes and to evaluate the molecular interactions involved.

Keywords:

Dual modification, polyphenol, starch

Resumen:

El almidón es una importante materia prima para la industria alimentaria; sin embargo, su forma nativa presenta limitaciones que impiden el adecuado desempeño de su valioso papel tecnológico. Mediante distintas modificaciones físicas, enzimáticas y químicas, es posible no solo disminuir tales limitaciones, sino adecuar las propiedades funcionales del almidón a la mayoría de las aplicaciones modernas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de una modificación química dual del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) para incrementar su capacidad de estabilizar la quercetina, un interesante compuesto bioactivo con actividad antioxidante reportada. Se evaluó la capacidad antioxidante mediante pruebas de eliminación de radicales libres (DPPH). Los resultados muestran que el almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) sin modificación presentó una mayor actividad antioxidante que los modificados, lo que sugiere que las modificaciones pueden incrementar la afinidad del almidón por la quercetina y limitar su liberación instantánea al medio acuoso, cualidad que podría ser aprovechada para diseñar sistemas de liberación controlada de quercetina. Se propone explorar procesos más sostenibles y efectivos para potenciar las propiedades de estos complejos y evaluar las interacciones moleculares involucradas.

Palabras Clave:

Modificación dual, polifenol, almidón

1. Introducción

El almidón es un carbohidrato sintetizado por las plantas, el cual ha llegado a ocupar un importante rol

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Agropecuarias. Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México. Marco A. Estrada-Jasso <https://orcid.org/0009-0000-7992-780X>, marcoanjasso@gmail.com Juan P. Hernández-Uribe <https://orcid.org/0000-0002-2759-1192>, juan_hernandez8391@uaeh.edu.mx Víctor H. Paniagua-López <https://orcid.org/0009-0003-5292-0845>, ing.bt.victor@gmail.com Gabriela Medina-Pérez <https://orcid.org/0000-0001-8673-941X>, gabriela_medina@uaeh.edu.mx Armando Zepeda-Bastida <https://orcid.org/0000-0003-0572-5206>, azepeda@uaeh.edu.mx

* Autor de correspondencia: Luisa M. García-Vázquez <https://orcid.org/0000-0003-4600-7446>, ibt.garval@gmail.com

no solo en la dieta humana, sino en diversas industrias; se compone por monómeros de glucosa, unidas por enlaces α -1,4 y α -1,6 formando largas cadenas de amilosa y amilopectina, las cuales son almacenadas en diversas formas, tales como granos, legumbres y tubérculos [1]. Recientes investigaciones han centrado sus esfuerzos en el estudio del almidón modificado, es decir, aquel almidón cuya estructura ha sido alterada mediante métodos físicos, enzimáticos o químicos con el propósito de mejorar sus propiedades funcionales [2]. Tales modificaciones pueden incluir cambios en su viscosidad, gelatinización, estabilidad y digestibilidad [3]. Estudios recientes han destacado el uso potencial del almidón modificado en el desarrollo de alimentos funcionales, abriendo nuevas oportunidades para su aplicación en la industria alimentaria [4]. En ese sentido, se ha reportado que mediante la modificación química denominada hidroxipropilación, es posible introducir grupos hidroxipropilo ($-\text{CH}_2\text{CHOHCH}_3$) en las cadenas de almidón [5]. Estos grupos aumentan la hidrofiliabilidad y la capacidad de interactuar con otros compuestos, tales como compuestos bioactivos mediante puentes de hidrógeno [6]. Por otra parte, someter el almidón a una modificación química por entrecruzamiento utilizando agentes como fosfatos genera enlaces covalentes entre las cadenas del almidón, lo que estabiliza la estructura del gránulo, aumentando así su resistencia térmica y mecánica [7]. Además, si se controla adecuadamente, el entrecruzamiento puede inducir la formación de micro o nano poros, los cuales pueden facilitar la entrada de compuestos bioactivos creando un sistema de encapsulación más eficiente [8].

La quercetina, flavonoide polifenólico presente en productos vegetales ha mostrado interesantes propiedades antioxidantes que la colocan como un ingrediente prometedor para su inclusión en alimentos funcionales, sin embargo, de manera libre presenta limitaciones tales como un fuerte sabor amargo, color amarillo intenso, baja solubilidad en agua, así como alta sensibilidad a condiciones ambientales y de procesamiento, por lo anterior, se requiere de técnicas de protección previas a su incorporación a procesos tecnológicos, en ese sentido, es posible aprovechar que su estructura química se basa en un esqueleto flavonoide con cinco grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) libres, los cuales pueden formar enlaces por puentes de hidrógeno para afianzar esta molécula a un transportador como el almidón [9]. Se ha reportado que la formación de puentes de hidrógeno entre los grupos $-\text{OH}$ fenólicos y los $-\text{OH}$ de la glucosa en amilosa y amilopectina suelen ocurrir en sus carbonos C2, C3 y

C6, además, que esta unión depende de factores como la temperatura, pH y actividad de agua, es decir, son interacciones reversibles [10]. Además, se ha reportado que la quercetina puede alojarse en el interior de las cavidades de la hélice de amilosa [11]. Estas inclusiones pueden estabilizar a la quercetina, protegiéndola de condiciones ambientales, así como modificar la digestibilidad del almidón, reduciendo su hidrólisis ante enzimas digestivas [12]. Lo anterior podría favorecer directamente la obtención de un sistema de liberación controlada que incremente el tiempo de estancia y la preservación de la actividad antioxidante de compuestos bioactivos de interés [13]. Resulta interesante, además, mencionar la estrecha relación que existe entre la actividad antioxidante de la quercetina y sus efectos antiinflamatorios, los cuales se encuentran respaldados en múltiples estudios [14]. Se ha reportado, por ejemplo, que la quercetina es capaz de neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que puede disminuir e incluso evitar el daño a lípidos, proteínas y al ADN [15]. Se ha mencionado que el estrés oxidativo, producto de la acumulación excesiva de ROS, es un factor clave que dispara y mantiene un estado de inflamación crónica [16].

En ese sentido, se ha resaltado el potencial beneficio de la quercetina, pues el efecto antiinflamatorio mediante la reducción de ROS es capaz además de modular la expresión genética relacionada con la inflamación, además de inhibir la producción de mediadores inflamatorios [17]. Lo anterior resulta particularmente importante, debido a que el estudio de nuevas fuentes de almidón, como sus adecuaciones mediante modificaciones, puede encontrar su aplicación directamente en el campo de los alimentos funcionales [18]. En los últimos años, el estudio de fuentes no tradicionales de almidón (distintas de las de papa y maíz) ha cobrado gran relevancia [19] y mediante su modificación química se busca mejorar la versatilidad y funcionalidad convirtiéndolo quizá en el componente más valioso en el desarrollo de alimentos funcionales y otros productos industriales [20].

Por lo que estudiar fuentes novedosas de almidón es una parte fundamental en el avance de la tecnología del almidón [21]. En años recientes el estudio del almidón de malanga (*Colocasia esculenta*) ha tomado relevancia debido al aprovechamiento de propiedades fisicoquímicas y funcionales [22]; pues se ha reportado que el tubérculo de malanga presenta una cantidad de almidón similar al de la papa [23], además presenta gránulos pequeños, lo que en aplicaciones en polvo, incrementa la superficie de contacto, haciéndolo un material atractivo en técnicas de microencapsulación

[24]. Es por eso que el aprovechamiento de almidones novedosos modificados no solo beneficia a la industria, sino al productor y al medio ambiente [25]. Por todo lo anterior, es que el uso de un almidón modificado no solo mejora la absorción de compuestos bioactivos, sino que también puede permitir su liberación controlada [26]. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la modificación química dual en la actividad antioxidante del complejo almidón-quercetina.

2. Materiales y métodos

Modificación química del almidón

Para la modificación química, se utilizó almidón de malanga (*Colocasia esculenta*). Se colocó 50 g de almidón de malanga en un frasco con taparroca de 1,000 mL al cual se adicionó 500 mL de agua destilada y 5 g de sulfato de sodio anhídrido, con ayuda de un agitador magnético se realizó una agitación a 200 rpm durante 30 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente se ajustó el pH de la solución a 11, con agitación constante, con NaOH 1 M. Después se agregó óxido de propileno en dos porcentajes (10 y 25%). Los frascos fueron colocados cerrados en baño maría a 35 °C a 200 rpm durante 24 h, se agregó trimetafosfato de trisodio en dos diferentes proporciones respecto al peso del almidón (1 y 5%), se continuó con la agitación durante tres horas más. Al término de las tres horas, el pH de la solución fue neutralizado con HCl 0.1 M. Después, el almidón modificado fue repartido en 2 vasos de 250 mL y su peso fue igualado con agua destilada para ser centrifugados a 4,000 rpm por 3 minutos en una centrífuga BIOBASE rotor SLA 1500 a temperatura ambiente, una vez precipitado el almidón se recolectó el sobrenadante en un recipiente especial para el residuo y se procedió realizar el lavado del almidón, igualando el peso de los vasos hasta 200 g con agua destilada, para después ser agitados en vortex durante 2 minutos y ser sometidos nuevamente al centrifugado [27]. Este proceso de lavado se repitió 7 veces. Una vez lavado el almidón, fue colocado en charolas de aluminio y puesto a secar en estufa de convección a 40°C durante 24 h. El almidón obtenido fue molido en mortero y tamizado por malla 100 (0.149 mm) y almacenado en frascos de vidrio con taparroca hasta su uso. La Tabla 1 muestra la modificación química del almidón que

posteriormente se utilizó para realizar el complejo almidón-quercetina.

Tabla 1. Nomenclatura de los almidones obtenidos según sus porcentajes de hidroxipropilación y entrecruzamiento, utilizados para la formación del complejo almidón-quercetina.

Código	Hidroxipropilación (% p/p)	Entrecruzamiento (% p/p)	Descripción del tratamiento
N	–	–	Almidón nativo sin modificación química
A1	10	5	Almidón modificado con 10% de hidroxipropilación y 5% de entrecruzamiento
A2	25	1	Almidón modificado con 25% de hidroxipropilación y 1% de entrecruzamiento

N=Almidón nativo sin modificación química. A1=Almidón modificado químicamente. A2=Almidón modificado químicamente.

Coprecipitación almidón-quercetina

Se realizó por medio de la técnica de coprecipitación; la muestra se colocó en agitación a 350 rpm en un vaso de precipitado de 100 mL con 10 mL de dimetilsulfóxido (DMSO), agua (40:60 v/v) y 1 g de muestra de almidón, para posteriormente agregar 50 mg de quercetina y mantener a temperatura ambiente durante 16 h. Los vasos de precipitado fueron envueltos en papel aluminio para impedir el paso de la luz solar. Una vez transcurrido el tiempo, las muestras fueron vaciadas en tubos de 15 mL y se centrifugaron a 3.500 rpm por 3 minutos. Se recuperó el sobrenadante y se realizaron tres lavados con una solución etanol/agua (1:10 v/v); se repitió el procedimiento de centrifugación entre cada lavado. Todo el sobrenadante de cada muestra fue recolectado por separado para cuantificar la quercetina no encapsulada (datos no mostrados). Los complejos obtenidos fueron denominados N= almidón nativo en complejo con quercetina, AQ1= almidón A1 en complejo con quercetina y AQ2= almidón 2 en complejo con quercetina.

Determinación de la capacidad antioxidante del complejo almidón-quercetina

El ensayo de eliminación de radicales libres DPPH es un método ampliamente utilizado para evaluar la capacidad antioxidante de compuestos como la quercetina. Se pesaron 100 mg del complejo almidón-quercetina y se agregó 1 mL de metanol al 80%. Cada muestra fue agitada en vortex durante 10 segundos, posteriormente se centrifugó por 3 min a 3500 rpm. Se recuperó 50 µL de sobrenadante para agregar 1.95 mL de DPPH 0.1 M. Se determinó la

concentración inicial del compuesto DPPH, según lo indica [28] con algunas modificaciones, así como la concentración resultante después de agregar el complejo almidón-quercetina. Se pesaron 100 mg del complejo almidón-quercetina y se agregó 1 mL de metanol al 80%. Cada muestra fue agitada en vortex durante 10 segundos, posteriormente se centrifugó por 3 min a 3500 rpm. Se recuperaron 50 μ L de sobrenadante para agregar 1.95 mL de DPPH 0.1 M; las muestras se llevaron a incubación durante 30 minutos a temperatura ambiente y en oscuridad. La absorbancia se midió a 517 nm al término de la incubación. El porcentaje de inhibición de los radicales libres se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Inhibición} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

Donde A0 representa la absorbancia del control (DPPH sin muestra) y A1 la absorbancia de la mezcla con el complejo almidón-quercetina.

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante un ANOVA y una prueba de comparación de media por tukey.

3. Resultados y discusión

La capacidad antioxidante de los complejos almidón-quercetina evaluados en este estudio mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). Los resultados muestran que el tratamiento sin modificación (N) tuvo una capacidad antioxidante significativamente mayor en comparación con los modificados químicamente (Figura 1).

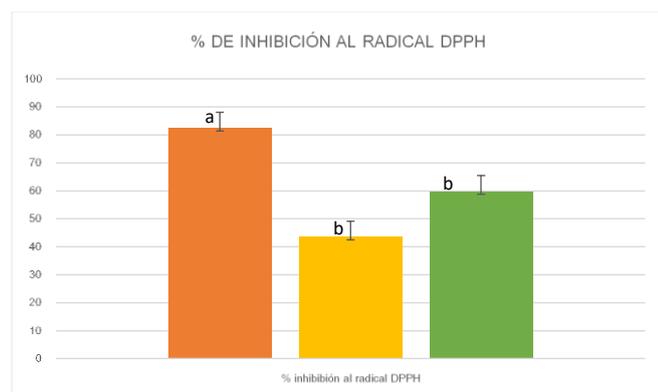


Figura 1. Porcentaje de inhibición del radical DPPH. N=Nativo. AQ1=Complejo almidón 1-quercetina. AQ2=Complejo almidón 2-quercetina. Las letras minúsculas en las barras indican diferencias estadísticas significativas.

Estos resultados sugieren una interacción del almidón con la quercetina, lo que podría indicar una mejor estabilidad; resultados similares han sido reportados [29] en donde sintetizaron y caracterizaron un complejo almidón de batata carboximetilado con quercetina, comprobando la unión covalente mediante FT-IR y ¹H-NMR, demostrando mayor estabilidad térmica en comparación con almidón nativo, junto con una actividad antioxidante significativa, por pruebas de neutralización de radicales libres (DPPH). [30] mencionan que el complejo de inclusión almidón-polifenol, es capaz de mejorar la estabilidad, biodisponibilidad y liberación controlada de los polifenoles, además de sus aplicaciones potenciales como ingredientes prebióticos, además, indican que la encapsulación mejora la estabilidad térmica y oxidativa de los polifenoles, aumentando su biodisponibilidad y en el caso del almidón modificado actúa como almidón resistente de Tipo 5, promoviendo el crecimiento de bacterias benéficas. [31] sugieren que los polifenoles interactúan con almidones mediante enlaces covalentes y no covalentes, alterando propiedades fisicoquímicas como solubilidad, hinchamiento y digestibilidad, lo que permite la formación de complejos de inclusión tipo V o estructuras no incluidas con beneficios funcionales y nutricionales. Estas interacciones reducen la digestibilidad del almidón al inhibir enzimas amilolíticas, disminuyendo la respuesta glucémica posprandial y promoviendo la formación de almidones resistentes y de digestión lenta.

5. Conclusiones

Los resultados sugieren que al combinar dos tipos de modificaciones químicas es posible obtener almidones con características diferentes en cuanto a la capacidad de retener la quercetina, lo cual podría resultar útil en el desarrollo de sistemas de transporte innovadores. Resaltaron la importancia de balancear las modificaciones químicas del almidón con la preservación de la actividad antioxidante de los polifenoles, lo cual puede estar relacionado con el incremento en la afinidad de los almidones modificados por la quercetina, al incorporarse nuevos grupos -OH, se facilita la formación de puentes de hidrógeno almidón-quercetina. Además, la inclusión de moléculas voluminosas como los grupos hidroxipropilo, aunadas al entrecruzamiento, pudo haber inducido la formación de espacios por los cuales la quercetina

ingresa al interior del gránulo, lo que incrementa su protección ante condiciones ambientales y por ende la conservación de su actividad antioxidante. Estos resultados abren nuevas oportunidades para explorar procesos de modificación más sostenibles y eficaces en el desarrollo de productos funcionales. Se sugieren más investigaciones para determinar el tipo de interacción presente en los complejos realizados.

Agradecimientos

A los integrantes del Cuerpo Académico de Biotecnología Veterinaria del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Conflicto de intereses

No existen conflictos de intereses.

Referencias

- [1] Abedi E, Pourmohammadi K, Jahromi M, Niakousari M, Torri L. The effect of ultrasonic probe size on effective ultrasound-assisted pregelatinized starch. *Food and Bioprocess Technology* 2019, 12:1852–1862. DOI:10.1007/s11947-019-02347-2
- [2] Aguilera JM. The food matrix: implications in processing, nutrition and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2019, 59(22):3612–3629. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1502743>
- [3] Amagliani L, O'Regan J, Kelly AL, Mahony JA. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch. *Journal of Cereal Science* 2016; 70:291–300. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.014>
- [4] Amoako DB, Awika JM. Resistant starch formation through intrahelical V-complexes between polymeric proanthocyanidins and amylose. *Food Chemistry* 2019, 285:326–333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.173>
- [5] Basilio-Cortes UA, Gonzalez-Cruz L, Velazquez G, Teniente-Martinez G, Gomez-Aldapa CA, Castro-Rosas J, Bernardino-Nicanor AC. Effect of dual modification on the spectroscopic, calorimetric, viscosimetric and morphological characteristics of corn starch. *Polymers (MDPI)* 2019, 11:333. DOI:10.3390/polym1102033
- [6] Bello-Perez LA, Flores-Silva PC, Agama-Acevedo E, Tovar J. Starch digestibility: past, present, and future. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 2020, 100(14):5009–5016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8955>
- [7] Benavent-Gil Y, Rosell CM. Comparison of porous starches obtained from different enzyme types and levels. *Carbohydrate Polymers* 2016, 157:533–540. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.047>
- [8] Benavent-Gil Y, Rosell CM. Morphological and physicochemical characterization of porous starches obtained from different botanical sources and amylolytic enzymes. *International Journal of Biological Macromolecules* 2017, 101:587–595.
- [9] Benavent-Gil Y, Rodrigo D, Rosell CM. Thermal stabilization of probiotics by adsorption onto porous starches. *Carbohydrate Polymers* 2018, 197:558–564.
- [10] Beninca C, de Oliveira CS, Bet CD, Bisinella B, Gaglieri C, Schnitzler E. Effect of ball milling treatment on thermal, structural and morphological properties of phosphate starches from corn and pinhao. *Starch* 2019, 72(3-4):1900233 DOI:<https://doi.org/10.1002/star.201900233>
- [11] Chen J, Wang Y, Liu J, Xu X. Preparation, characterization, physicochemical property and potential application of porous starch: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* 2020, 148:1169–1181. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.055>
- [12] Ch C., LiX., Lu P, Miao S. Zhang Y, Chen L. Dry heating and annealing treatment synergistically modulate starch structure and digestibility. *International Journal of Biological Macromolecules* 2019, 137:554–561.
- [13] Cruz-Benítez MM, Gómez-Aldapa CA, Castro-Rosas J, Hernández-Hernández E, Gómez-Hernández E, Fonseca-Florido HA. Effect of amylose content and chemical modification of cassava starch on the microencapsulation of *Lactobacillus pentosus*. *LWT* 2019, 105:110–117. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.069>
- [14] Dabeek WM, Marra MV. Dietary quercetin and kaempferol: Bioavailability and potential cardiovascular-related bioactivity in humans. *Nutrients* 2019, 11(10):2288. <https://doi.org/10.3390/nu11102288>
- [15] Das A, Sit N. Modification of Taro Starch and Starch Nanoparticles by Various Physical Methods and their Characterization. *Starch* 2021, 73(5–6):1–8. <https://doi.org/10.1002/star.202000227>
- [16] Devi R, Sit N. Effect of single and dual steps annealing in combination with hydroxypropylation on physicochemical, functional and rheological properties of barley starch. *International Journal of Biological Macromolecules* 2019, 129:1006–1014.
- [17] Dima C, Assadpour E, Dima S, Jafari SM. Bioavailability of nutraceuticals: Role of the food matrix, processing conditions, the gastrointestinal tract, and nanodelivery systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2020, 19(3):954–994. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12547>
- [18] Kumar DV, Verma PRP, Singh SK. Development and evaluation of biodegradable polymeric nanoparticles for the effective delivery of quercetin using a quality by design approach. *LWT-Food Science and Technology* 2015, 61(2):330–338. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.020>
- [19] Du X, Hu M, Liu G, Qi B, Zhou S, Lu K, Xie F, Zhu X, Li Y. Development and evaluation of delivery systems for quercetin: A comparative study between coarse emulsion, nano-emulsion, high internal phase emulsion, and emulsion gel. *Journal of Food Engineering* 2022, 314: 110784. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110784>
- [20] Haq F, Yu H, Wang L, Teng L, Haroon M, Khan RU. Advances in chemical modifications of starches and their applications. *Carbohydrate Research* 2019, 476:12–35.
- [21] Hazarika BJ, Sit N. Effect of dual modification with hydroxypropylation and cross-linking of physicochemical properties of taro starch. *Carbohydrate Polymers* 2016, 40:269–278.
- [22] He T, Wang K, Zhao L, Chen Y, Zhou W, Liu F, Hu Z. Interaction with longan seed polyphenols affects the structure and digestion properties of maize starch. *Carbohydrate Polymers* 2021, 256: 117537. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117537>
- [23] He X Gong, X, Li W, Cao W, Yan J Guo R. Preparation and characterization of amphiphilic composites made with double-modified (etherified and esterified) potato starches. *Starch* 2019, 71(9-10): 1900089. DOI:<https://doi.org/10.1002/star.201900089>
- [24] Hong J, Zeng X, Brennan CS, Brennan S, Han Z. Recent advances in techniques for starch esters and the applications: A review. *Foods* 2016, 5(3):50. <https://doi.org/10.3390/foods5030050>
- [25] Hong Y, Liu G, Gu Z. Recent advances of starch-based excipients used in extended-release tablets: A review. *Drug Delivery* 2016, 23(1):12–20. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.913324>
- [26] Mathobo VM, Silungwe H, Ramashina SE, Anyasi TS. Effects of heat-moisture treatment on the thermal, functional properties and composition of cereal, legume and tuber starches-a review. *Journal of Food Science and Technology* 2021, 58(2):412–426. DOI:10.1007/s13197-020-04520-4

- [27] Wattanachant S, Muhammad KMAT, Hashim DM, Rahman RA. Effect of crosslinking reagents and hydroxypropylation levels on dual-modified sago starch properties. *Food Chemistry* 2003, 80(4):463-471.
- [28] Brand-Williams W, Cuvelier ME, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology* 1995, 28(1):25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- [29] Lv X, Ye F, Li J, Ming J, Zhao G. Synthesis and characterization of a novel antioxidant RS4 by esterifying carboxymethyl sweetpotato starch with quercetin. *Carbohydrate Polymers* 2016, 153:244–252. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.023>
- [30] Deng N, Deng Z, Tang C, Liu C, Luo S, Chen T, Hu X. Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: A review. *Trends in Food Science & Technology* 2021, 112:667-675.
- [31] Ngo TV, Kusumawardani S, Kunyane K, Luangsakul N. Polyphenol-modified starches and their applications in the food industry: recent updates and future directions. *Foods* 2022, 11(21):3384.