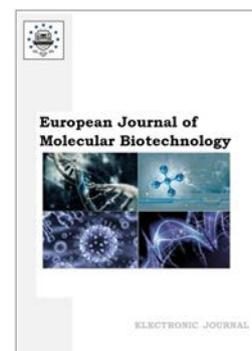


Copyright © 2025 by Cherkas Global University



Published in the USA
 European Journal of Molecular Biotechnology
 Issued since 2013.
 E-ISSN: 2409-1332
 2025. 13(1): 44-60

DOI: 10.13187/ejmb.2025.1.44
<https://ejmb.cherkasgu.press>



Starch Aggregation and Aggregometry: From the Molecular to the Microstructural Level, from Physical Chemistry to Molecular Biology and Taxonomy (Tutorial Review/Lecture)

Lyubov' A. Wasserman ^a, Oleg V. Gradov ^{b, *}

^a IBCB RAS, Russian Federation

^b FRC CP RAS (CHEMBIO Dept.), Russian Federation

Abstract

Starch aggregation is a critical topic of interest for raw material quality assessment and the food industry. The size of starch granules and their surface roughness influence digestion efficiency and processing speed both within organisms and during technological operations. Starch's aggregation structure at supramolecular ultra-microscopic levels determines its assimilation effectiveness across different consumer types, including primary consumers with active microbiota versus secondary or higher-order consumers, as well as ruminants vs non-ruminants among first-order consumers. Digestive processes can involve either molecular transfer mechanisms through enzymatic hydrolysis chains or whole-granule uptake via phagocytosis, which may occur under normal conditions or pathological ones such as peritonitis. Phagocytic events are facilitated by immune system components like calcium-dependent lectins and collagens from glycoprotein superfamily, ensuring physical feasibility of intact granule transport. Furthermore, external factors like rheology and hydrostatic pressure affect starch morphology, leading to correlations between native or processed granule shapes and metabolic performance that impact organoleptic properties and nutritional value. The paper proposes a comprehensive classification framework for analyzing starch aggregation phenomena across various levels: molecular structural, supramolecular, physicochemical, etc. This structured approach aims not only to classify but also predict functional attributes of starch samples based on measurable parameters, leveraging machine learning techniques to ensure accurate identification and correlation analysis without human bias. Ultimately, this methodology could enhance product quality control, improve diagnostic tools, and contribute to broader biophysical insights into life origins, given the historical significance of starch-containing coacervates in pre-biotic evolution studies since the mid-twentieth century.

Keywords: starch aggregation, multi-level aggregometry, co-aggregation, phagocytosis, hydrolysis, ML, ultrastructural morphometry.

1. Введение

Агрегация гранул крахмала является предметом пристального интереса в квалиметрии сырья для пищевой индустрии (Wang et al., 1994; Herrera-Gómez et al., 2002), поскольку размеры гранул и развитость их поверхности (ультра-шероховатость) влияют на эффективность их переваривания и усвоения в организме, а также на скорость переработки этих гранул в технологических процессах. Агрегационная структура крахмала, как на надмолекулярном ультрамикроскопическом, так и на гранулометрическом

* Corresponding author

E-mail addresses: o.v.gradov@gmail.com (O.V. Gradov)

субмикроскопическом, микроскопическом уровне определяет эффективность его усвоения (Chen et al., 2016). Отличия лежат в области клеточных механизмов переноса и ассимиляции, одним из следствий которых является классическое различие в усвояемости крахмала первичными консументами (с активной микробиотой/микробиомом (Baker, 1942)) и консументами второго и высших порядков, а также – для консументов первого порядка – различие между жвачными и нежвачными животными по критерию ассимиляции крахмала (Gray, 1992; Bauer et al., 1995). Речь идёт о различиях «молекулярного переноса» (с сопутствующими ему цепями реакций расщепления) и захвата цельных гранул с переносом их внутрь клетки без полного расщепления. Если первый механизм, в норме, выполняется цитохимией процесса пищеварения, то вторым характеризуются процессы фагоцитоза крахмала, как в норме, так и при патологии: например, при перитоните (Grant, Davies, 1981), либо в ходе выполнения иммунных функций полиморфно-ядерными лейкоцитами врожденного иммунитета (Baboolal, Powell, 1972). Для усвоения гранул, в рамках второго механизма, неизбежно не только использование иммунных (в частности – супрамолекулярных взаимодействий типа антитело-комплемент) и иных рецептор-субстратных (например, фермент-субстратных) взаимодействий между участниками процесса (Nelson, Lebrun, 1956), но и использование поверхностно-активных агентов, обеспечивающих физико-химическую реализуемость переноса цельных гранул (в частности, сурфактантных белков типа кальций-зависимых лектинов/коллектинов коллагенового суперсемейства гликопротеинов (Erpenbeck et al., 2005)). В общем случае, усвояемость крахмала на ультраструктурном уровне зависит также от реологии среды и от гидростатического давления в ней (Deng et al., 2014; Menon et al., 2015). Это, с одной стороны, апеллирует к очевидным взаимосвязям между морфологией/анизотропией крахмальных зёрен и реологией крахмал-содержащих структур (Singh, Singh, 2003; Singh et al., 2007) (позволяющим рассматривать эти взаимосвязи как видоспецифичные и связанные с пропорциями и способами структурирования крахмала в среде, в том числе, при внедрении в композитную матрицу, сигнатуры или футпринты (Seethamraju et al., 1994; Singh et al., 2003)), а, с другой стороны, говорит о влиянии технологического процесса на морфологию и размер гранул крахмала, что реально наблюдается на практике (в зависимости от давления и микрофлюидизации потоков (Bahrani et al., 2012; Fu et al., 2015; Liu et al., 2016; Kaur et al., 2019), с учётом гидродинамики неньютоновской жидкости при различных скоростях потока). Иными словами, можно установить корреляцию между морфологией, свойственной гранулам крахмала в нативном состоянии (в том числе, при их хранении) либо после технологической обработки, и параметрами их усвоения, определяющими эффективность их метаболизации, отражающуюся не только на органолептических свойствах продукта, но и на его пищевой ценности при интернализации по различным физико-биохимическим путям.

Действительно, давно показано, что условия энзиматического гидролиза, в том числе, наличие сурфактантов, эмульгаторов, содержание солей (удельная электропроводность) или ионная сила среды, определяющим образом влияют на различия в надмолекулярной либо ультраструктурной агрегации крахмала, вплоть до гелеобразования (Richardson et al., 2004; Fa-xing et al., 2013; Li et al., 2020). Однако, корреляции между агрегацией на микроструктурном уровне (гранулы) и энзиматической эффективностью, как при переваривании, так и при технологических операциях, не установлены, в силу элиминирования структуры индивидуальных гранул при переваривании и в технологических операциях. Единичные работы с исследованием эффекта неспецифических агентов воздействия – таких, как ультразвуковая обработка (Hongwei et al., 2019) – только подтверждают это правило. Между тем, в общем случае, очевидны и в частных (дисперсных) состояниях крахмала могут быть проиллюстрированы корреляции между физико-химическими, морфологическими, термическими, реологическими характеристиками, нередко влияющими друг на друга путём обратных связей, которые должны учитываться как при построении техники, реализующей соответствующие процессы (внедрение адекватных датчиков и систем сбора-обработки данных), так и при исследовании эффективности или девиации соответствующих процессов в организме (диагностика, мониторинг и установление мультипараметрических фазовых портретов патологических/девиантных состояний, в которых необходимо применение фармакотерапии/профилактики) (Kaur et al., 2002; Singh et al., 2006). Соответственно, необходимо создание

корреляционной агрегометрии, позволяющей распознавать агрегационное состояние крахмала в зависимости от внешних факторов по унифицированным морфометрическим критериям и обеспечивать качественную идентификацию внешних факторов по этим критериям (исключая возможность интерференции эффектов от различных факторов).

2. Обсуждение и результаты

Возможная классификация уровней агрегометрии крахмала

Для конструктивных целей возможно выделение следующих параметров различия эффектов и соответствующих им методов дифференциальной или компаративной агрегометрии, реализуемой с использованием средств KDD и машинного обучения:

– Структурная: установление роли молекулярной и кристаллической структуры (например, степени разветвленности (*branching/debranching*) полисахаридов, для соответствующих энзиматических условий среды ([Wattebled et al., 2008](#)), или качества молекулярной архитектуры крахмала, определяющей критическую концентрацию, необходимую для его агрегации в данных условиях ([Tizzotti et al., 2013](#)). Конкретным случаем структурного подхода является принцип изотопного стереохимического установления нюансов структуры – в частности – использование ЯМР-спектроскопии при исследовании процессов агрегации (например, использование спектроскопии ЯМР на ядрах ^{17}O и ^{13}C , а также методов протонной ЯМР-релаксометрии для одновременного исследования структурных изменений при гидратации-дегидратации крахмала и соответствующих им процессов агрегации и роста/растворения гранул, в зависимости от химических и реологических параметров среды ([Mora-Gutierrez, Baianu, 1989](#)));

– Физико-химическая: установление зависимости результатов процесса агрегации от параметров среды её протекания, приводящей к различной структуре гранул и морфометрическим показателям, специфично характеризующим гранулярные агрегаты ([Zhang et al., 2011](#)). Пример этого – качественное различие микро-/нано-структуры коллоидных систем, содержащих крахмал и липид/сурфактант, при различных pH ([Wu et al., 2013](#)), а также pH-индуцированная агрегация инкапсулированных форм крахмала, крахмал-содержащих ассоциатов ([Park et al., 2019](#)), обратимость которой зависит от глубины эффектов редокс-процессов в системе. При этом, энзиматическая модификация и кислотная модификация, как правило, качественно отличны по ультраструктурным формам проявления ([Hollinger, Marchessault, 1975](#)). Аналогично доказано воздействие электрохимии и лиотропных рядов солей на процессы агрегации крахмала ([Abedi, Pourmohammadi, 2020](#)). Как правило, влияние электролитов на крахмал не ограничено формой отдельных ультрамикрочастиц, а детерминирует и диффузионным путём лимитирует процессы агрегации, приводя к формированию сложных реакционно-диффузионных структур с нецелочисленной размерностью Хаусдорфа, древовидным фрактальным ветвлением, зависящим от типа подложки и иницируемой кислой средой ([Tiwari et al., 2013](#)).

– Дигестивная и/или фагоцитарная: установление роли белковых и иных агентов (в особенности, внутриклеточных сурфактантов ([Erpenbeck et al., 2005](#))) на разных стадиях фагоцитоза у животных клеток и при ассимиляции/депонировании крахмала в развивающихся растительных клетках ([Mares, Marschner, 1980](#)). Этому подходу может также быть дана молекулярная и эволюционно-физиологическая интерпретация, так как хорошо известна зависимость агрегометрических параметров крахмала от уровня эволюционного развития гликогенового метаболизма, проявляющаяся настолько активно на молекулярном уровне, что можно отследить явления конвергенции биохимических путей у подобных таксономических единиц (на данный момент это наиболее эффективно доказано на цианобактериях ([Kadouche et al., 2016](#))).

– Молекулярная ко-агрегационная: установление роли молекулярных агентов внутриклеточной и внеклеточной природы в ко-агрегации, приводящей к формированию комплексных, мультикомпонентных агрегатов (например, иммобилизация энзиматических агрегатов на крахмалах, приводящая к изменению эффективности их функции с потерей качества/воспроизводимости протоколов, обусловленной стохастической природой результата агрегации – вплоть до полной гетероскедастичности выборок ([Cui et al., 2013](#)); или воздействие молекулярных компонентов иных источников рациона, например – белка

казеина, неизменно присутствующего во многих рецептурах приготовления крахмал-содержащих продуктов, особенно – кондитерских (Azim et al., 2010));

– Клеточно-ко-агрегационная: исследование агрегации крахмала с клеточными структурами и ультраструктурными элементами, усваивающимися вместе с гранулами крахмала (это направление практически не исследовано, так как задачи постпурификационной квалиметрии крахмала на основе представлений импедансной или оптической цитометрии не ставилось, а исследование процессов разложения клеточных структур/субклеточных компонентов внутри органов было бы возможным только при использовании практически запрещенных методов *in vivo* и *in situ* техник вивисекционной микроскопии во вживляемых в тело прижизненных камерах (Иоганнсен, 1980)). Единственными исследованными клетками, на которых были продемонстрированы явления агрегации совместно с крахмалами (методами ЯМР (Caines, Goldstein, 1987) и диэлектрической спектроскопии с временным разрешением (Jaroszyński et al., 2002)), являются релевантные в области диагностики клетки крови – эритроциты (van der Plaats et al., 2002; Henkelman et al., 2012) и тромбоциты (Blaicher et al., 1997; Sossdorf et al., 2008) (в исследовании которых гидроксипроксиэтилкрахмал используется в роли экспандера плазмы крови, известного с 1970-х гг. (Takeyoshi et al., 1971));

– Таксономическая (вплоть до видоспецифической и «культурварной»/сортовой): известно, что крахмалы различных видов растений для данных условий получения имеют морфометрические различия, по которым можно с определенной вероятностью (при прочих равных условиях) идентифицировать источник их получения. Соответственно этому, учитывая накопленный морфометрический опыт в анализах микро- и ультраструктуры крахмалов различного происхождения и различной биогеографии земледелия (кукурузы (Gallant, Bouchet, 1986; Monma et al., 1990), картофеля (Jagadeesan et al., 2020), моркови (Pérez et al., 1999), ячменя (Li et al., 2003), озимых и яровых сортов пшеницы (Zayas et al., 1994) и т.д. – вплоть до киви (Hallett et al., 1995)), можно, базируясь на представлениях о географической зональности в интродукции культурных растений, начиная с работ Вавилова (Spaar, 1987; Janick, 2015; Cohen, 1991; Cohen, Loskutov, 2016; Levina et al., 2005), сопоставить различным показателям мультипараметрической морфометрии крахмальных гранул разные свойства среды их возникновения и, через это, разные «индикаторные дескрипторы» видов и сортов (см., например, (Coster, Field, 2015));

– Таксономическая клеточно-ко-агрегационная: интегрируя принцип исследования специфической молекулярной агрегации или адгезии крахмала на поверхности клеток и ко-агрегации крахмалов с ними, в зависимости от отнесения этих клеток к различной молекулярной таксономии, можно сопоставить показатели геометрии агрегации и конкретные таксономические группы источников клеток. Известно, что адгезия бактерий к гранулам крахмала (Wang et al., 1987; Ratithammatorn et al., 2012) (пробиотическим, в особенности (Lim, 2006)) существенно отличается в зависимости от того, с каким молекулярным типом поверхности бактерий производится связывание, а в связывании крахмала клеточной стенкой основных групп бактериоидов работают группы мембранных белков (Shipman et al., 2000) (даже у грибов *Aspergillus sp.*, у которых метаболизм устроен не так, как у прокариот, существуют специализированные белки с регионами/фармакофорами связывания крахмала в процессах адсорбции (Luojing et al., 1991)). Следует отметить, что для целого ряда патогномичных бактерий агрегация крахмала со второй половины XX века используется как «презумптивный тест» (Hafiz et al., 1982).

– Генетическая (в том числе, в мутагенезах): молекулярная природа таксономически специфичной агрегации и ко-агрегации крахмала, как правило, подтверждается генетическими тестами экспрессии и может быть сопоставлена отдельным её девиациям (в особенности – посттрансляционной модификации участвующих в агрегации, а также в адгезии и в адсорбции, специфических белков). Так, транспорт мальтозы и связывание крахмала при фагорезистентных мутациях, обеспечивающих дисфункцию мальтопоринов, являются прямыми генетическими индикаторами наличия соответствующей мутации, не требующими секвенирования и анализа транскриптома (Charbit et al., 1988). Как показывает практика, это проявляется и в агрегации крахмалов растений: морфометрические данные агрегации нативных и генно-модифицированных крахмалов качественно отличны.

От классификации к машинному обучению и автоматизированной морфометрии

Все указанные единицы рубрикатора или аналогичные им по уровню сложности/ уровню организации и функциональной актуальности тех или иных видов агрегации могут быть использованы при построении баз данных для систематизации процессов и механизмов агрегации крахмала, а также для построения систем на основе искусственного интеллекта и машинного обучения для их человеконезависимого распознавания на базе известных дескрипторов.

Принципиальной задачей является, как минимум, создание и апробация таких методов на любой компаративной выборке зёрен крахмала, а, как максимум, закладывание основ агрегометрии крахмала, пригодной не только для качественной характеристики образца, но и для биологически и физико-химически корректного установления функций и/или причин соответствующих морфологических изменений, определяемых, независимо от человека, автоматическим или полуавтоматическим методом с использованием глубинного анализа данных – KDD («обучение без учителя», в идеале, автоматического подхода, или «обучение с учителем» в упрощенной и более алгоритмически доступной полуавтоматической модификации). Этот подход, работая не только со сферическими агрегированными частицами (как это часто бывает, *ad hoc*, в исследованиях крахмала (Vernon-Carter et al., 2019)), в перспективе может быть распространен на агрегацию целого ряда метаболически релевантных (крахмалу) структур – сахарозы, изомальта и мальтодекстрина, амилопектина, а также объёмных наполнителей-миметиков (типа карбоксиметилцеллюлозы (Liu et al., 2016)) и т. д. (Blennow et al., 2001; Pourmohammadi, Abedi, 2020), являясь как средством дифференциальной агрегометрии, так и инструментом морфометрической идентификации компонентов и выбраковки артефактов и нерепрезентативных иррелевантных составляющих в образце. С другой стороны, для ряда механических и реологических тестов продукции, в которых морфология гранул изменяется и происходят процессы растяжения/сжатия с распадом и агрегацией гранул (Kim et al., 1999), предлагаемый нами подход может являться средством микромеханического и микрореологического контроля на разных стадиях данных процессов. Также этот подход может служить простым средством исследования, мониторинга коалесценции и флокуляции крахмалсодержащих частично упорядоченных сред (*soft matter*) либо гидроколлоидов пищевого назначения (Ye et al., 2004), включая среды, регистрируемые в процессах растяжения/сжатия и экструзии (являющихся частью пищевой технологии крахмала (Emin et al., 2013; Emin, Schuchmann, 2013) и ряда иных использующих его индустриальных приложений).

В общем случае, представляется возможным распространить вышеописанный общий подход на самосборку или самоорганизацию зёрен крахмала в произвольных физических условиях, если морфометрическая информация, регистрируемая в динамике химических или биологических процессов самосборки и самоорганизации крахмала способна являться мерой процессов самоорганизации и молекулярной коалесценции (о чём писал ещё Г. Рейни в ранних работах по формированию гранул крахмала в XIX веке (Rainey, 1860)).

3. Заключение

Таким образом, в рамках предложенного динамического агрегометрического подхода, все явления формообразования в агрегирующих и в деградирующих ансамблях гранул крахмала, в том числе – проходящие через «пластическую» стадию (Donald, 2001) и начинающиеся со сферических ультрамикрочастиц, сферулитов (Kiatponglarp et al., 2016; Luo et al., 2019) или изначально сферических мицелл и липосомальных и везикулярных структур (Besheer et al., 2007) – могут быть исследованы (в рамках морфометрического подхода при использовании «сферических» структур в качестве референсных, нулевых по дополнительной кривизне объектов схемы измерений). Это вводит автоматически в круг рассмотрения нашего подхода и коацерваты (как классические крахмальные, известные с 1940-х гг. (MacMasters, 1946) и доработанные на промышленном уровне в серии классических работ 1960-х гг. (Schulze et al., 1964; Yu, MacMasters, 1965; Chung, Macmasters, 1966; Baker, Macmasters, 1967, 1968; Chung, 1966), так и современные их микроинкапсулированные версии (Korus, 2001; Liu et al., 2011; Srifiana et al., 2014; Dam et al., 2018)), и другие полиэлектролитные комплексы на основе крахмала и с его включениями

(Zaharia, 2012). Таким образом, агрегометрия крахмала может пролить свет не только на проблемы улучшения качества жизни за счёт улучшения пищеварения, но также и на проблемы происхождения жизни, роль крахмал-содержащих коацерватов в котором известна ещё с 1950-х гг., со времён акад. А.И. Опарина, и не оспаривается до сих пор (Oparin et al., 1955, Oparin et al., 1962, Oparin et al., 1964; Liebl et al., 1984; Mason et al., 2017).

Литература

Иоганнсен, 1980 – Иоганнсен М.Г. Микроскопия тканей в камерах. Наука, Ленинградское отд-ние, 1980. 143 с.

Abedi, Pourmohammadi, 2020 – Abedi E., Pourmohammadi K. Aggregation behaviors of sonicated tapioca starch with various strengths of Hofmeister salts under pre-and post-ultrasonic treatment // *Food Hydrocolloids*. 2020. 105826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105826>

Azim et al., 2010 – Azim Z., Alexander M., Koxholt M., Corredig M. Influence of cross-linked waxy maize starch on the aggregation behavior of casein micelles during acid-induced gelation // *Food biophysics*. 2010. 5(3): 227-237. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11483-010-9164-1>

Baboolal, Powell, 1972 – Baboolal R., Powell R.N. The effect of oral microbial endotoxins on phagocytosis of 14C-labelled starch granules by rabbit polymorphonuclear leukocytes // *Archives of Oral Biology*. 1972. 17(2): 249-251. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-9969\(72\)90207-5](https://doi.org/10.1016/0003-9969(72)90207-5)

Bahrani et al., 2012 – Bahrani S.A., Loisel C., Rezzoug S.A., Doublier J.L., Maache-Rezzoug Z. Role of vacuum steps added before and after steaming treatment of maize starch. Impact on pasting, morphological and rheological properties // *Carbohydrate polymers*. 2012. 89(3): 810-820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.04.015>

Baker, Macmasters, 1967 – Baker R.E., MacMasters M.M. Coacervation of Starch IV. Effect of Added Salts or Furfural on Stability of Coacervated Starch-Chloral Hydrate Systems // *Starch-Stärke*. 1967. 19(12): 399-402. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19670191203>

Baker, Macmasters, 1968 – Baker R.E., MacMasters M.M. Coacervation of Starch. Part V. Electrophoresis of Starch Coacervates // *Starch-Stärke*. 1968. 20(1): 11-16. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19680200105>

Baker, 1942 – Baker F. Microbial factors in the digestive assimilation of starch and cellulose in herbivore // *Nature*. 1942. 150(3808): 479-481. DOI: <https://doi.org/10.1038/150479a0>

Bauer et al., 1995 – Bauer M.L., Harmon D.L., McLeod K.R., Huntington G.B. Adaptation to small intestinal starch assimilation and glucose transport in ruminants // *Journal of animal science*. 1995. 73(6): 1828-1838. DOI: <https://doi.org/10.2527/1995.7361828x>

Besheer et al., 2007 – Besheer A., Hause G., Kressler J., Mäder K. Hydrophobically modified hydroxyethyl starch: synthesis, characterization, and aqueous self-assembly into nano-sized polymeric micelles and vesicles // *Biomacromolecules*. 2007. 8(2): 359-367. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm0609487>

Blaicher et al., 1997 – Blaicher A., Reiter W., Blaicher W., Felfernig M., Zimpfer M., Mueller C. Effect of hydroxyethyl-starch on platelet aggregation in vitro // *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*. 1997. 41.

Blennow et al., 2001 – Blennow A., Mette Bay-Smidt A., Bauer R. Amylopectin aggregation as a function of starch phosphate content studied by size exclusion chromatography and on-line refractive index and light scattering // *Int. J. Biol. Macromol.* 2001. 28: 409-420. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(01\)00133-7](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(01)00133-7)

Caines, Goldstein, 1987 – Caines G.H., Goldstein J.H. NMR investigation of hydroxyethyl starch-induced aggregation of human erythrocytes // *Magnetic resonance in medicine*. 1987. 5(1): 67-72. DOI: <https://doi.org/10.1002/mrm.1910050108>

Charbit et al., 1988 – Charbit A., Gehring K., Nikaido H., Ferenci T., Hofnung M. Maltose transport and starch binding in phage-resistant point mutants of maltoporin: functional and topological implications // *Journal of molecular biology*. 1988. 201(3): 487-493.

Chen et al., 2016 – Chen P., Wang K., Kuang Q., Zhou S., Wang D., Liu X. Understanding how the aggregation structure of starch affects its gastrointestinal digestion rate and extent // *International journal of biological macromolecules*. 2016. 87: 28-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.119>

Chung, Macmasters, 1966 – Chung H.Y., Macmasters M.M. Coacervation of Starch) Part III. Complex Coacervation of Starch with Gelatin // *Starch-Stärke*. 1966. 18(12): 377-382. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.2810181203>

Chung, 1966 – Chung F.H. Complex Coacervation of Starch and Gelatin // *Die Stärke*. 1966. 12: 377.

Cohen, Loskutov, 2016 – Cohen J.I., Loskutov I.G. Exploring the nature of science through courage and purpose: a case study of Nikolai Vavilov and plant biodiversity // *SpringerPlus*. 2016. 5: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2795-z>

Cohen, 1991 – Cohen B.M. Nikolai Ivanovich Vavilov: The explorer and plant collector a. // *Economic Botany*. 1991. 45(1): 38-46. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02860048>

Coster, Field, 2015 – Coster A.C., Field J.H. What starch grain is that? – A geometric morphometric approach to determining plant species origin // *Journal of Archaeological Science*. 2015. 58: 9-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.03.014>

Cui et al., 2013 – Cui J.D., Sun L.M., Li L.L. A simple technique of preparing stable CLEAs of phenylalanine ammonia lyase using co-aggregation with starch and bovine serum albumin // *Applied biochemistry and biotechnology*. 2013. 170(8): 1827-1837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0317-9>

Dam et al., 2018 – Dam X.T., Nguyen N.T., Le K.N., Nguyen T.K. Effect of starch and glycerol on the properties of alginate-microcapsules creating by phase separation coacervation method // *Pharm Sci Asia*. 2018. 45(1): 22-28. DOI: <https://doi.org/10.29090/psa.2018.01.022>

Deng et al., 2014 – Deng Y., Jin Y., Luo Y., Zhong Y., Yue J., Song X., Zhao Y. Impact of continuous or cycle high hydrostatic pressure on the ultrastructure and digestibility of rice starch granules // *Journal of Cereal Science*. 2014. 60(2): 302-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.06.005>

Donald, 2001 – Donald A.M. Plasticization and self assembly in the starch granule // *Cereal chemistry*. 2001. 78(3): 307-314. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.3.307>

Emin, Schuchmann, 2013 – Emin M.A., Schuchmann H.P. Droplet breakup and coalescence in a twin-screw extrusion processing of starch based matrix // *Journal of Food Engineering*. 2013. 116(1): 118-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.010>

Emin et al., 2013 – Emin M.A., Schmidt U., Van Der Goot A.J., Schuchmann H.P. Coalescence of oil droplets in plasticized starch matrix in simple shear flow // *Journal of food engineering*. 2013. 113(3): 453-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.015>

Erpenbeck et al., 2005 – Erpenbeck V.J., Malherbe D.C., Sommer S., Schmiedl A., Steinhilber W., Ghio A.J., Krug N., Wright J.R., Hohlfeld J.M. Surfactant protein D increases phagocytosis and aggregation of pollen-allergen starch granules // *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*. 2005. 288(4): L692-L698. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajplung.00362.2004>

Fa-xing et al., 2013 – Fa-xing L., Xiu-ying W., Qiang H., Chao L. Influences of Enzymatic Hydrolysis Conditions on Aggregation Structure of Starch Granules // *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*. 2013. 41(10): 66-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1000-565X.2013.10.011>

Fu et al., 2015 – Fu Z., Luo S.J., BeMiller J.N., Liu W., Liu C.M. Influence of high-speed jet on solubility, rheological properties, morphology and crystalline structure of rice starch // *Starch (Stärke)*. 2015. 67(7-8): 595-603. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.201400256>

Gallant, Bouchet, 1986 – Gallant D.J., Bouchet B. Ultrastructure of maize starch granules. A review. *Food microstructure*. 1986. 5: 141-155.

Grant, Davies, 1981 – Grant J.B., Davies J.D. Ascitic starch phagocytosis in experimental guinea-pig peritonitis // *British journal of experimental pathology*. 1981. 62(4): 407.

Gray, 1992 – Gray G.M. Starch digestion and absorption in nonruminants // *The Journal of nutrition*. 1992. 122(1): 172-177. DOI: <https://doi.org/10.1093/jn/122.1.172>

Hafiz et al., 1982 – Hafiz S., Kinghorn G.R., McEntegart M.G. Starch aggregation as a presumptive test for *Haemophilus ducreyi* // *Lancet (London, England)*. 1982. 2(8303): 872. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(82\)90830-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(82)90830-3)

Hallett et al., 1995 – Hallett I.C., Wegrzyn T.F., MacRae E.A. Starch degradation in kiwifruit: in vivo and in vitro ultrastructural studies // *International Journal of Plant Sciences*. 1995. 156(4): 471-480. DOI: <https://doi.org/10.1086/297269>

Henkelman et al., 2012 – Henkelman S., Rakhorst G., van der Mei H.C., Busscher H.J. Use of hydroxyethyl starch for inducing red blood cell aggregation // *Clinical hemorheology and microcirculation*. 2012. 52(1): 27-35. DOI: <https://doi.org/10.3233/ch-2012-1542>

Herrera-Gómez et al., 2002 – Herrera-Gómez A., Canónico-Franco M., Ramos G., Pless R.C. Aggregation in cooked maize starch // *Carbohydrate Polymers*. 2002. 50(4): 387-392. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00054-1)

Hollinger, Marchessault, 1975 – Hollinger G., Marchessault R.H. Ultrastructure of acid-and enzyme-modified cross-linked potato starch // *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*. 1975. 14(2): 265-276. DOI: <https://doi.org/10.1002/bip.1975.360140203>

Hongwei et al., 2019 – Hongwei W., Naiyong X., Ying M. Effect of ultrasonic treatment time on aggregation structure and physicochemical properties of wheat starch // *Journal of Light Industry*. 2019. 34(5): 10. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1553.2019.05.001

Jagadeesan et al., 2020 – Jagadeesan S., Govindaraju I., Mazumder N. An Insight into the Ultrastructural and Physicochemical Characterization of Potato Starch: a Review // *American Journal of Potato Research*. 2020. 97: 464-476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-020-09798-w>

Janick, 2015 – Janick J. Nikolai Ivanovich Vavilov: Plant geographer, geneticist, martyr of science // *HortScience*. 2015. 50(6): 772-776. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.6.772>

Jaroszyński et al., 2002 – Jaroszyński W., Keslinka E., Wujtewicz M., Suchorzewska J., Kwiatkowski B. Effect of hydroxyethyl starch (HAES) on degree and kinetics of erythrocyte aggregation studied with dielectric spectroscopy method // *Medical Science Monitor*. 2002. 8(7): BR272-BR278.

Kadouche et al., 2016 – Kadouche D., Ducatez M., Cenci U., Tirtiaux C., Suzuki E., Nakamura Y., Putaux J.L., Terrasson A.D., Diaz-Troya S., Florencio F.J. Arias M.C. Characterization of function of the GlgA2 glycogen/starch synthase in *Cyanobacterium* sp. Clg1 highlights convergent evolution of glycogen metabolism into starch granule aggregation // *Plant physiology*. 2016. 171(3): 1879-1892. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.16.00049>

Kaur et al., 2002 – Kaur L., Singh N., Sodhi N.S. Some properties of potatoes and their starches II. Morphological, thermal and rheological properties of starches // *Food chemistry*. 2002. 79(2): 183-192. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00130-9)

Kaur et al., 2019 – Kaur M., Punia S., Sandhu K.S., Ahmed J. Impact of high pressure processing on the rheological, thermal and morphological characteristics of mango kernel starch // *International journal of biological macromolecules*. 2019. 140: 149-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.132>

Kiatpongarp et al., 2016 – Kiatpongarp W., Rugmai S., Rolland-Sabaté A., Buléon A., Tongta S. Spherulitic self-assembly of debranched starch from aqueous solution and its effect on enzyme digestibility // *Food Hydrocolloids*. 2016. 55: 235-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.027>

Kim et al., 1999 – Kim S., Willett J., Carriere C. Shear-induced aggregation in starch solutions // *American Chemical Society Abstracts*. 1999, August. [Electronic resource]. URL: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=101894>

Korus, 2001 – Korus J. Microencapsulation of flavours in starch matrix by coacervation method // *Polish journal of food and nutrition sciences*. 2001. 51(1): 17-23.

Levina et al., 2005 – Levina E.S., Yesakov V.D., Kisselev L.L. Nikolai Vavilov: Life in the cause of science or science at a cost of life // *Comprehensive biochemistry*. 2005. 44: 345-410. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0069-8032\(05\)44006-1](https://doi.org/10.1016/S0069-8032(05)44006-1)

Li et al., 2003 – Li J.H., Vasanthan T., Hoover R., Rossnagel B.G.. Starch from hull-less barley: Ultrastructure and distribution of granule-bound proteins // *Cereal chemistry*. 2003. 80(5): 524-532. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.5.524>

Li et al., 2020 – Li Y., Liu P., Ma C., Zhang N., Shang X., Wang, L., Xie F. Structural Disorganization and Chain Aggregation of High-Amylose Starch in Different Chloride Salt Solutions // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. 8(12): 4838-4847. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07726>

Liebl et al., 1984 – Liebl V., Novák V.J.A., Masinovsky Z., Pacltova B., Bejšovcová L. The evolution of prebiological self-organization: Probable colloid-chemical evolution of first prokaryotic cells // *Origins of life*. 1984. 14(1-4): 323-334. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00933674>

Lim, 2006 – *Lim T.S.* The Effect of Hydrolysis on Adhesion of Probiotic Cells to Starch Granules (Doctoral dissertation, Universiti Malaysia Sabah), 2006.

Liu et al., 2011 – *Liu Z.L., Cao Y.F., Ma X.J., Liu X.D.* A Technology of Self-Emulsification Coacervation to Prepare Starch Sodium Octenyl Succinate (SSOS) Microcapsules Consisting of Evening Primrose Oil (EPO) // *Advanced Materials Research*. 2011. 335: 1293-1298. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1293>

Liu et al., 2016 – *Liu W., Zhao X., Cai Z., Han B., Zhao D.* Aggregation and stabilization of multiwalled carbon nanotubes in aqueous suspensions: influences of carboxymethyl cellulose, starch and humic acid // *Rsc Advances*. 2016. 6(71): 67260-67270. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA10500A>

Liu et al., 2016 – *Liu C.M., Liang R.H., Dai T.T., Ye J.P., Zeng Z.C., Luo S.J., Chen J.* Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch // *Food Hydrocolloids*. 2016. 57: 55-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.01.015>

Luo et al., 2019 – *Luo K., Park K.H., Lee D.H., Hong C.E., Song Y.W., Yoo S.H., Kim Y.R.* Self-assembly kinetics of debranched short-chain glucans from waxy maize starch to form spherical microparticles and its applications // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019. 176: 352-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.01.002>

Luoqing et al., 1991 – *Luoqing C., Ford C., Nikolov Z.* Adsorption to starch of a β -galactosidase fusion protein containing the starch-binding region of *Aspergillus glucoamylase* // *Gene*. 1991. 99(1): 121-126. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(91\)90043-B](https://doi.org/10.1016/0378-1119(91)90043-B)

MacMasters et al., 1946 – *MacMasters M.M., Cox M.J., Eck J.W., Bice C.W.* Coacervation of starch. Manuscript presented at the Annual Meeting of AACC in Niagara Falls, Ontario, Canada. 1946, May.

Mares, Marschner, 1980 – *Mares D.J., Marschner H.* Assimilate conversion in potato tubers in relation to starch deposition and cell growth // *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*. 1980. 93(1): 299-313. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1980.tb03341.x>

Mason et al., 2017 – *Mason A.F., Buddingh' B.C., Williams D.S., van Hest J.C.* Hierarchical self-assembly of a copolymer-stabilized coacervate protocell // *Journal of the American Chemical Society*. 2017. 139(48): 17309-17312. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.7b10846>

Menon et al., 2015 – *Menon R., Padmaja G., Sajeev M.S.* Ultrastructural and starch digestibility characteristics of sweet potato spaghetti: effects of edible gums and fibers // *International Journal of Food Properties*. 2015. 18(6): 1231-1247. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.903263>

Monma et al., 1990 – *Monma M., Yamamoto Y., Kainuma K.* Ultrastructure of corn starch-granules digested by *Chalara paradoxa glucoamylase* // *Journal of the Japanese Society of Starch Science*. 1990. 37(1): 13-19. DOI: <https://doi.org/10.5458/jag1972.37.13>

Mora-Gutierrez, Baianu, 1989 – *Mora-Gutierrez A., Baianu I.C.* Proton NMR relaxation and viscosity measurements on solutions and suspensions of carbohydrates and starch from corn: the investigation of carbohydrate hydration and stereochemical and aggregation effects in relation to oxygen-17 and carbon-13 NMR data for carbohydrate solutions // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1989. 37(6): 1459-1465. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf00090a002>

Nelson, Lebrun, 1956 – *Nelson R.A., Lebrun J.* The requirement for antibody and complement for in vitro phagocytosis of starch granules // *Epidemiology & Infection*. 1956. 54(1): 8-19. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022172400044259>

Oparin et al., 1955 – *Oparin A.I., Yevreinova T., Shubert T., Nestyuk M.* Coacervates and enzymes. Protein-carbohydrate coacervates and alpha-amylase / *Doklady biochemistry: proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Biochemistry section*. 1955. 104(4): 581-583.

Oparin et al., 1962 – *Oparin A.I., Evreinova T.N., Larionova T.I., Davydova I.M.* Synthesis and disintegration of starch in coacervate drops / *Doklady biochemistry: proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Biochemistry section*. 1962. 143(4): 980-983.

Oparin et al., 1964 – *Evreinova T.N., Shurygina N.N., Oparin A.I.* Synthesis of starch in coacervate drops. *Biokhimiia (Moscow, Russia)*. 1964. 29: 1035-1041. [Electronic resource]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14320810/>

Park et al., 2019 – *Park H.R., Rho S.J., Kim Y.R.* Solubility, stability, and bioaccessibility improvement of curcumin encapsulated using 4- α -glucanotransferase-modified rice starch with

reversible pH-induced aggregation property // *Food Hydrocolloids*. 2019. 95: 19-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.012>

Pérez et al., 1999 – Pérez E.E., Borneo R., Melito C.G., Tovar J. Chemical, physical and morphometric properties of Peruvian carrot (*Arracacia xanthorrhiza* B.) starch // *Acta científica venezolana*. 1999. 50(4): 240.

Pourmohammadi, Abedi, 2020 – Pourmohammadi K., Abedi E.. The effect of pre and post-ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of tapioca starch containing sucrose, isomalt and maltodextrin // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. 163: 485-496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.205>

Rainey, 1860 – Rainey G. Original Communications: On the Structure and Mode of Formation of Starch Granules, according to the Principle of "Molecular Coalescence" // *Quarterly Journal of Microscopical Science*. 1860. 1(29): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1242/jcs.s1-8.29.1>

Ratithammatorn et al., 2012 – Ratithammatorn T., Thongwai N., Yotsawimonwat S., Sirithunyalug B., Sirithunyalug J. Adhesion and Utilization of Native Starch Granules by *Lactobacillus amylovorus* // *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*. 2012. 11: 29-42. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133022269>

Richardson et al., 2004 – Richardson G., Kidman S., Langton M., Hermansson A.M. Differences in amylose aggregation and starch gel formation with emulsifiers. *Carbohydrate Polymers*. 2004. 58(1): 7-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.06.013>

Schulze et al., 1964 – Schulze W.E., Yu D.T., Macmasters M.M. Coacervation of starch I. By freezing // *Starch (Stärke)*. 1964. 16(2): 41-44. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19640160202>

Seethamraju et al., 1994 – Seethamraju K., Bhattacharya M., Vaidya U.R., Fulcher R.G. Rheology and morphology of starch/synthetic polymer blends // *Rheologica acta*. 1994. 33(6): 553-567. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00366339>

Shipman et al., 2000 – Shipman J.A., Berleman J.E., Salyers A.A. Characterization of Four Outer Membrane Proteins Involved in Binding Starch to the Cell Surface of *Bacteroides thetaiotaomicron* // *Journal of bacteriology*. 2000. 182(19): 5365-5372. DOI: <https://doi.org/10.1128/jb.182.19.5365-5372.2000>

Singh, Singh, 2003 – Singh J., Singh N. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches // *Food hydrocolloids*. 2003. 17(1): 63-72. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00036-X)

Singh et al., 2003 – Singh N., Singh J., Kaur L., Sodhi N.S., Gill B.S. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources // *Food chemistry*. 2003. 81(2): 219-231. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00416-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8)

Singh et al., 2006 – Singh N., Kaur L., Sandhu K.S., Kaur J., Nishinari K. Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches // *Food hydrocolloids*. 2006. 20(4): 532-542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.05.003>

Singh et al., 2007 – Singh J., Kaur L., McCarthy O.J. Factors influencing the physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications – A review // *Food hydrocolloids*. 2007. 21(1): 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>

Sossdorf et al., 2008 – Sossdorf M., Appelt A., Schaarschmidt B., Döring S., Claus R.A., Hartog C., Lösche W. Hydroxyethyl starch solutions impair clot formation and platelet aggregation but enhance platelet surface receptor expression // *Hämatologie*. 2008. 28: A82.

Spaar, 1987 – Spaar D. Zum 100. Geburtstag von Nikolai Ivanovič Vavilov // *Archives of Phytopathology & Plant Protection*. 1987. 23(6): 423-426. DOI: <https://doi.org/10.1080/03235408709437746>

Srifiana et al., 2014 – Srifiana Y., Surini S., Yanuar A. Encapsulation of Ketoprofen with Coacervation and Spray Drying Methods Using Pregelatinized Cassava Starch Phthalate as Film-Forming Excipient // *Jurnal Ilmu Kefarmasian Indonesia*. 2014. 12(2): 162-169. [Electronic resource]. URL: <http://jifi.farmasi.univpancasila.ac.id/index.php/jifi/article/view/141>

Takeyoshi et al., 1971 – Takeyoshi S., Yamauchi N., Hiyoshi K., Ikeda Y., Sato T. Effects of a new plasma expander, hydroxyethyl starch (HES) on circulatory dynamics, blood coagulation and erythrocyte aggregation. 1. Studies on volunteers // *Masui. The Japanese journal of anesthesiology*. 1971. 20(7): 648.

Tiwari et al., 2013 – Tiwari T., Kumar M., Pandey K., Srivastava N., Srivastava P.C. Diffusion-limited aggregation in potato starch and hydrogen borate electrolyte system. *Advances in Condensed Matter Physics*. 2013. ID781058. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/781058>

Tizzotti et al., 2013 – Tizzotti M.J., Sweedman M.C., Schäfer C., Gilbert R.G. The influence of macromolecular architecture on the critical aggregation concentration of large amphiphilic starch derivatives // *Food Hydrocolloids*. 2013. 31(2): 365-374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.023>

van der Plaats et al., 2002 – van der Plaats A., Verkerke G., Leuvenink H., Ploeg R., Rakhorst G. UV induced red blood cell aggregation; influence of hydroxy ethyl starch *American Journal of Transplantation Supplement*. 2002. 2: 304-305.

Vernon-Carter et al., 2019 – Vernon-Carter E.J., Alvarez-Ramirez J., Bello-Perez L.A., Hernandez-Jaimes C., Reyes I. Role of Endogenous Protein in the Spherical Aggregation of Taro Starch Granules upon Spray-Drying and in In Vitro Digestibility // *Starch Stärke*. 2019: 1900087. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.201900087>

Wang et al., 1987 – Wang H.H., Chiou T.W., Hsu J.P. Anaerobic saccharolytic bacterial adhesion to raw starch granules // *Biotechnology and bioengineering*. 1987. 29(9): 1122-1126. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.260290912>

Wang et al., 1994 – Wang S.S., Qu D., Chiew Y.C. A study of starch granular aggregation // *Starch – Stärke*. 1994. 46(9): 337-341. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19940460905>

Wattebled et al., 2008 – Wattebled F., Planchot V., Dong Y., Szydłowski N., Pontoire B., Devin A., Ball S., d'Hulst C. Further evidence for the mandatory nature of polysaccharide debranching for the aggregation of semicrystalline starch and for overlapping functions of debranching enzymes in Arabidopsis leaves // *Plant physiology*. 2008. 148(3): 1309-1323. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.108.129379>

Wu et al., 2013 – Wu B., Degner B., McClements D.J. Microstructure & rheology of mixed colloidal dispersions: Influence of pH-induced droplet aggregation on starch granule–fat droplet mixtures // *Journal of Food Engineering*. 2013. 116(2): 462-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.020>

Ye et al., 2004 – Ye A., Hemar Y., Singh H. Flocculation and coalescence of droplets in oil-in-water emulsions formed with highly hydrolysed whey proteins as influenced by starch // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2004. 38(1-2): 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2004.07.011>

Yu, MacMasters, 1965 – Yu D.T., MacMasters M.M. Coacervation of Starch. Part. II. Some Instances // *Starch (Stärke)*. 1965. 17(3): 75-77. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19650170303>

Zaharia, 2012 – Zaharia C. Performances of natural polyelectrolytes based on starch in aggregation and stabilization of aqueous coal-containing systems // *Bul. Inst. Polit. Iasi, series: Chemistry and Chemical Engineering*. 2012. 58: 29-39.

Zayas et al., 1994 – Zayas I.Y., Bechtel D.B., Wilson J.D., Dempster R.E. Distinguishing selected hard and soft red winter wheats by image analysis of starch granules // *Cereal chemistry*. 1994. 71(1): 82-86. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19951602715>

Zhang et al., 2011 – Zhang B., Huang Q., Luo F., Wang K. Review on Aggregation State Structures of Starch Granule // *Polymer Materials Science & Engineering*. 2011. 27(4): 167-170.

References

Abedi, Pourmohammadi, 2020 – Abedi, E., Pourmohammadi, K. (2020). Aggregation behaviors of sonicated tapioca starch with various strengths of Hofmeister salts under pre-and post-ultrasonic treatment. *Food Hydrocolloids*. 105826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105826>

Azim et al., 2010 – Azim, Z., Alexander, M., Koxholt, M., Corredig, M. (2010). Influence of cross-linked waxy maize starch on the aggregation behavior of casein micelles during acid-induced gelation. *Food biophysics*. 5(3): 227-237. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11483-010-9164-1>

Baboolal, Powell, 1972 – Baboolal, R., Powell, R.N. (1972). The effect of oral microbial endotoxins on phagocytosis of ¹⁴C-labelled starch granules by rabbit polymorphonuclear leukocytes. *Archives of Oral Biology*. 17(2): 249-IN1. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-9969\(72\)90207-5](https://doi.org/10.1016/0003-9969(72)90207-5)

Bahrani et al., 2012 – Bahrani, S.A., Loisel, C., Rezzoug, S.A., Doublier, J.L., Maache-Rezzoug, Z. (2012). Role of vacuum steps added before and after steaming treatment of maize starch. Impact on pasting, morphological and rheological properties. *Carbohydrate polymers*. 89(3): 810-820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.04.015>

- Baker, 1942** – Baker, F. (1942). Microbial factors in the digestive assimilation of starch and cellulose in herbivora. *Nature*. 150(3808): 479-481. DOI: <https://doi.org/10.1038/150479a0>
- Baker, Macmasters, 1967** – Baker, R.E., MacMasters, M.M. (1967). Coacervation of Starch IV. Effect of Added Salts or Furfural on Stability of Coacervated Starch-Chloral Hydrate Systems. *Starch-Stärke*. 19(12): 399-402. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19670191203>
- Baker, Macmasters, 1968** – Baker, R.E., Macmasters, M.M. (1968). Coacervation of Starch. Part. V. Electrophoresis of Starch Coacervates. *Starch-Stärke*. 20(1): 11-16. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19680200105>
- Bauer et al., 1995** – Bauer, M.L., Harmon, D.L., McLeod, K.R., Huntington, G.B. (1995). Adaptation to small intestinal starch assimilation and glucose transport in ruminants. *Journal of animal science*. 73(6): 1828-1838. DOI: <https://doi.org/10.2527/1995.7361828x>
- Besheer et al., 2007** – Besheer, A., Hause, G., Kressler, J., Mäder, K. (2007). Hydrophobically modified hydroxyethyl starch: synthesis, characterization, and aqueous self-assembly into nano-sized polymeric micelles and vesicles. *Biomacromolecules*. 8(2): 359-367. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm0609487>
- Blaicher et al., 1997** – Blaicher, A., Reiter, W., Blaicher, W., Felfernig, M., Zimpfer, M., Mueller, C. (1997). Effect of hydroxyethyl-starch on platelet aggregation in vitro. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*. 41.
- Blennow et al., 2001** – Blennow, A., Mette Bay-Smidt, A., Bauer, R. (2001). Amylopectin aggregation as a function of starch phosphate content studied by size exclusion chromatography and on-line refractive index and light scattering. *Int. J. Biol. Macromol.* 28: 409-420. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(01\)00133-7](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(01)00133-7)
- Caines, Goldstein, 1987** – Caines, G.H., Goldstein, J.H. (1987). NMR investigation of hydroxyethyl starch-induced aggregation of human erythrocytes. *Magnetic resonance in medicine*. 5(1): 67-72. DOI: <https://doi.org/10.1002/mrm.1910050108>
- Charbit et al., 1988** – Charbit, A., Gehring, K., Nikaido, H., Ferenci, T., Hofnung, M. (1988). Maltose transport and starch binding in phage-resistant point mutants of maltoporin: functional and topological implications. *Journal of molecular biology*. 201(3): 487-493.
- Chen et al., 2016** – Chen, P., Wang, K., Kuang, Q., Zhou, S., Wang, D., Liu, X. (2016). Understanding how the aggregation structure of starch affects its gastrointestinal digestion rate and extent. *International journal of biological macromolecules*. 87: 28-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.119>
- Chung, 1966** – Chung, F.H. (1966). Complex Coacervation of Starch and Gelatin. *Die Stärke*. 12: 377.
- Chung, Macmasters, 1966** – Chung, H.Y., Macmasters, M.M. (1966). Coacervation of Starch Part III. Complex Coacervation of Starch with Gelatin. *Starch-Stärke*. 18(12): 377-382. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.2810181203>
- Cohen, 1991** – Cohen, B.M. (1991). Nikolai Ivanovich Vavilov: The explorer and plant collector a. *Economic Botany*. 45(1): 38-46. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02860048>
- Cohen, Loskutov, 2016** – Cohen, J.I., Loskutov, I.G. (2016). Exploring the nature of science through courage and purpose: a case study of Nikolai Vavilov and plant biodiversity. *SpringerPlus*. 5: 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2795-z>
- Coster, Field, 2015** – Coster, A.C., Field, J.H. (2015). What starch grain is that? – A geometric morphometric approach to determining plant species origin. *Journal of Archaeological Science*. 58: 9-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.03.014>
- Cui et al., 2013** – Cui, J.D., Sun, L.M., Li, L.L. (2013). A simple technique of preparing stable CLEAs of phenylalanine ammonia lyase using co-aggregation with starch and bovine serum albumin. *Applied biochemistry and biotechnology*. 170(8): 1827-1837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0317-9>
- Dam et al., 2018** – Dam, X.T., Nguyen, N.T., Le, K.N., Nguyen, T.K. (2017). Effect of starch and glycerol on the properties of alginate-microcapsules creating by phase separation coacervation method. *Pharm Sci Asia*. 45(1): 22-28. DOI: <https://doi.org/10.29090/psa.2018.01.022>
- Deng et al., 2014** – Deng, Y., Jin, Y., Luo, Y., Zhong, Y., Yue, J., Song, X., Zhao, Y. (2014). Impact of continuous or cycle high hydrostatic pressure on the ultrastructure and digestibility of rice starch granules. *Journal of Cereal Science*. 60(2): 302-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.06.005>

- Donald, 2001 – Donald, A.M. (2001). Plasticization and self assembly in the starch granule. *Cereal chemistry*. 78(3): 307-314. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.3.307>
- Emin et al., 2013 – Emin, M.A., Schmidt, U., Van Der Goot, A.J., Schuchmann, H.P. (2012). Coalescence of oil droplets in plasticized starch matrix in simple shear flow. *Journal of food engineering*. 113(3): 453-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.06.015>
- Emin, Schuchmann, 2013 – Emin, M.A., Schuchmann, H.P. (2013). Droplet breakup and coalescence in a twin-screw extrusion processing of starch based matrix. *Journal of Food Engineering*. 116(1): 118-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.010>
- Erpenbeck et al., 2005 – Erpenbeck, V.J., Malherbe, D.C., Sommer, S., Schmiedl, A., Steinhilber, W., Ghio, A.J., Krug, N., Wright, J.R., Hohlfeld, J.M. (2005). Surfactant protein D increases phagocytosis and aggregation of pollen-allergen starch granules. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*. 288(4): L692-L698. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajplung.00362.2004>
- Fa-xing et al., 2013 – Fa-xing, L., Xiu-ying, W., Qiang, H., Chao, L. (2013). Influences of Enzymatic Hydrolysis Conditions on Aggregation Structure of Starch Granules. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*. 41(10): 66-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1000-565X.2013.10.011>
- Fu et al., 2015 – Fu, Z., Luo, S.J., BeMiller, J.N., Liu, W., Liu, C.M. (2015). Influence of high-speed jet on solubility, rheological properties, morphology and crystalline structure of rice starch. *Starch (Stärke)*. 67(7-8): 595-603. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.201400256>
- Gallant, Bouchet, 1986 – Gallant, D.J., Bouchet, B. (1986). Ultrastructure of maize starch granules. A review. *Food microstructure*. 5: 141-155.
- Grant, Davies, 1981 – Grant, J.B., Davies, J.D. (1981). Ascitic starch phagocytosis in experimental guinea-pig peritonitis. *British journal of experimental pathology*. 62(4): 407.
- Gray, 1992 – Gray, G.M. (1992). Starch digestion and absorption in nonruminants. *The Journal of nutrition*. 122(1): 172-177. DOI: <https://doi.org/10.1093/jn/122.1.172>
- Hafiz et al., 1982 – Hafiz, S., Kinghorn, G.R., McEntegart, M.G. (1982). Starch aggregation as a presumptive test for *Haemophilus ducreyi*. *Lancet (London, England)*. 2(8303): 872. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(82\)90830-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(82)90830-3)
- Hallett et al., 1995 – Hallett, I.C., Wegrzyn, T.F., MacRae, E.A. (1995). Starch degradation in kiwifruit: in vivo and in vitro ultrastructural studies. *International Journal of Plant Sciences*. 156(4): 471-480. DOI: <https://doi.org/10.1086/297269>
- Henkelman et al., 2012 – Henkelman, S., Rakhorst, G., van der Mei, H.C., Busscher, H.J. (2012). Use of hydroxyethyl starch for inducing red blood cell aggregation. *Clinical hemorheology and microcirculation*. 52(1): 27-35. DOI: <https://doi.org/10.3233/ch-2012-1542>
- Herrera-Gómez et al., 2002 – Herrera-Gómez, A., Canónico-Franco, M., Ramos, G., Pless, R.C. (2002). Aggregation in cooked maize starch. *Carbohydrate Polymers*. 50(4): 387-392. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(02\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(02)00054-1)
- Hollinger, Marchessault, 1975 – Hollinger, G., Marchessault, R.H. (1975). Ultrastructure of acid-and enzyme-modified cross-linked potato starch. *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*. 14(2): 265-276. DOI: <https://doi.org/10.1002/bip.1975.360140203>
- Hongwei et al., 2019 – Hongwei, W., Naiyong, X., Ying, M. (2019). Effect of ultrasonic treatment time on aggregation structure and physicochemical properties of wheat starch. *Journal of Light Industry*. 34(5): 10. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1553.2019.05.001
- Iogannsen, 1980 – Iogannsen, M.G. (1980). Mikroskopiya tkanei v kamerakh [Tissue microscopy in chambers]. Nauka. Leningradskoe otd-nie. 43 p. [in Russian]
- Jagadeesan et al., 2020 – Jagadeesan, S., Govindaraju, I., Mazumder, N. (2020). An Insight into the Ultrastructural and Physicochemical Characterization of Potato Starch: a Review. *American Journal of Potato Research*. 97: 464-476. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-020-09798-w>
- Janick, 2015 – Janick, J. (2015). Nikolai Ivanovich Vavilov: Plant geographer, geneticist, martyr of science. *HortScience*. 50(6): 772-776. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.6.772>
- Jaroszyński et al., 2002 – Jaroszyński, W., Keslinka, E., Wujtewicz, M., Suchorzewska, J., Kwiatkowski, B. (2002). Effect of hydroxyethyl starch (HAES) on degree and kinetics of erythrocyte aggregation studied with dielectric spectroscopy method. *Medical Science Monitor*. 8(7): BR272-BR278.

Kadouche et al., 2016 – Kadouche, D., Ducatez, M., Cenci, U., Tirtiaux, C., Suzuki, E., Nakamura, Y., Putaux, J.L., Terrasson, A.D., Diaz-Troya, S., Florencio, F.J. Arias, M.C. (2016). Characterization of function of the GlgA2 glycogen/starch synthase in Cyanobacterium sp. Clg1 highlights convergent evolution of glycogen metabolism into starch granule aggregation. *Plant physiology*. 171(3): 1879-1892. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.16.00049>

Kaur et al., 2002 – Kaur, L., Singh, N., Sodhi, N.S. (2002). Some properties of potatoes and their starches II. Morphological, thermal and rheological properties of starches. *Food chemistry*. 79(2): 183-192. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00130-9)

Kaur et al., 2019 – Kaur, M., Punia, S., Sandhu, K.S., Ahmed, J. (2019). Impact of high pressure processing on the rheological, thermal and morphological characteristics of mango kernel starch. *International journal of biological macromolecules*. 140: 149-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.132>

Kiatpongarp et al., 2016 – Kiatpongarp, W., Rugmai, S., Rolland-Sabaté, A., Buléon, A., Tongta, S. (2016). Spherulitic self-assembly of debranched starch from aqueous solution and its effect on enzyme digestibility. *Food Hydrocolloids*. 55: 235-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.027>

Kim et al., 1999 – Kim, S., Willett, J., Carriere, C. (1999, August). Shear-induced aggregation in starch solutions. *American Chemical Society Abstracts*. [Electronic resource]. URL: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=101894>

Korus, 2001 – Korus, J. (2001). Microencapsulation of flavours in starch matrix by coacervation method. *Polish journal of food and nutrition sciences*. 51(1): 17-23.

Levina et al., 2005 – Levina, E.S., Yesakov, V.D., Kisselev, L.L. (2005). Nikolai Vavilov: Life in the cause of science or science at a cost of life. *Comprehensive biochemistry*. 44: 345-410. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0069-8032\(05\)44006-1](https://doi.org/10.1016/S0069-8032(05)44006-1)

Li et al., 2003 – Li, J.H., Vasanthan, T., Hoover, R., Rossnagel, B.G. (2003). Starch from hull-less barley: Ultrastructure and distribution of granule-bound proteins. *Cereal chemistry*. 80(5): 524-532. DOI: <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2003.80.5.524>

Li et al., 2020 – Li, Y., Liu, P., Ma, C., Zhang, N., Shang, X., Wang, L., Xie, F. (2020). Structural Disorganization and Chain Aggregation of High-Amylose Starch in Different Chloride Salt Solutions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 8(12): 4838-4847. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07726>

Liebl et al., 1984 – Liebl, V., Novák, V.J.A., Masinovský, Z., Pacltova, B., Bejšovcová, L. (1984). The evolution of prebiological self-organization: Probable colloid-chemical evolution of first prokaryotic cells. *Origins of life*. 14(1-4): 323-334. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00933674>

Lim, 2006 – Lim, T.S. (2006). The Effect of Hydrolysis on Adhesion of Probiotic Cells to Starch Granules (Doctoral dissertation, Universiti Malaysia Sabah).

Liu et al., 2011 – Liu, Z.L., Cao, Y.F., Ma, X.J., Liu, X.D. (2011). A Technology of Self-Emulsification Coacervation to Prepare Starch Sodium Octenyl Succinate (SSOS) Microcapsules Consisting of Evening Primrose Oil (EPO). *Advanced Materials Research*. 335: 1293-1298. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1293>

Liu et al., 2016 – Liu, C.M., Liang, R.H., Dai, T.T., Ye, J.P., Zeng, Z.C., Luo, S.J., Chen, J. (2016). Effect of dynamic high pressure microfluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch. *Food Hydrocolloids*. 57: 55-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.01.015>

Liu et al., 2016 – Liu, W., Zhao, X., Cai, Z., Han, B., Zhao, D. (2016). Aggregation and stabilization of multiwalled carbon nanotubes in aqueous suspensions: influences of carboxymethyl cellulose, starch and humic acid. *Rsc Advances*. 6(71): 67260-67270. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA10500A>

Luo et al., 2019 – Luo, K., Park, K.H., Lee, D.H., Hong, C.E., Song, Y.W., Yoo, S.H., Kim, Y.R. (2019). Self-assembly kinetics of debranched short-chain glucans from waxy maize starch to form spherical microparticles and its applications. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 176: 352-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.01.002>

Luojing et al., 1991 – Luojing, C., Ford, C., Nikolov, Z. (1991). Adsorption to starch of a β -galactosidase fusion protein containing the starch-binding region of *Aspergillus glucoamylase*. *Gene*. 99(1): 121-126. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-1119\(91\)90043-B](https://doi.org/10.1016/0378-1119(91)90043-B)

MacMasters et al., 1946 – MacMasters, M.M., Cox, M.J., Eck, J.W., Bice, C.W. (1946, May). Coacervation of starch. Manuscript presented at the Annual Meeting of AACC in Niagara Falls, Ontario, Canada.

Mares, Marschner, 1980 – Mares, D.J., Marschner, H. (1980). Assimilate conversion in potato tubers in relation to starch deposition and cell growth. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*. 93(1): 299-313. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1980.tb03341.x>

Mason et al., 2017 – Mason, A.F., Buddingh', B.C., Williams, D.S., van Hest, J.C. (2017). Hierarchical self-assembly of a copolymer-stabilized coacervate protocell. *Journal of the American Chemical Society*. 139(48): 17309-17312. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.7b10846>

Menon et al., 2015 – Menon, R., Padmaja, G., Sajeev, M.S. (2015). Ultrastructural and starch digestibility characteristics of sweet potato spaghetti: effects of edible gums and fibers. *International Journal of Food Properties*. 18(6): 1231-1247. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.903263>

Monma et al., 1990 – Monma, M., Yamamoto, Y., Kainuma, K. (1990). Ultrastructure of corn starch-granules digested by *Chalara paradoxa* glucoamylase. *Journal of the Japanese Society of Starch Science*. 37(1): 13-19. DOI: <https://doi.org/10.5458/jag1972.37.13>

Mora-Gutierrez, Baianu, 1989 – Mora-Gutierrez, A., Baianu, I.C. (1989). Proton NMR relaxation and viscosity measurements on solutions and suspensions of carbohydrates and starch from corn: the investigation of carbohydrate hydration and stereochemical and aggregation effects in relation to oxygen-17 and carbon-13 NMR data for carbohydrate solutions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 37(6): 1459-1465. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf00090a002>

Nelson, Lebrun, 1956 – Nelson, R.A., Lebrun, J. (1956). The requirement for antibody and complement for in vitro phagocytosis of starch granules. *Epidemiology & Infection*. 54(1): 8-19. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022172400044259>

Oparin et al., 1955 – Oparin, A.I., Yevreinova, T., Shubert, T., Nestyuk, M. (1955). Coacervates and enzymes. Protein-carbohydrate coacervates and alpha-amylase. *Doklady biochemistry: proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Biochemistry section*. 104(4): 581-583.

Oparin et al., 1962 – Oparin A.I., Evreinova T.N., Larionova T.I., Davydova I.M. (1962). Synthesis and disintegration of starch in coacervate drops. *Doklady biochemistry: proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Biochemistry section*. 143(4): 980-983.

Oparin et al., 1964 – Evreinova, T.N., Shurygina, N.N., Oparin, A.I. (1964). Synthesis of starch in coacervate drops. *Biokhimiia (Moscow, Russia)*. 29: 1035-1041. [Electronic resource]. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14320810/>

Park et al., 2019 – Park, H.R., Rho, S.J., Kim, Y.R. (2019). Solubility, stability, and bioaccessibility improvement of curcumin encapsulated using 4- α -glucanotransferase-modified rice starch with reversible pH-induced aggregation property. *Food Hydrocolloids*. 95: 19-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.012>

Pérez et al., 1999 – Pérez, E.E., Borneo, R., Melito, C.G., Tovar, J. (1999). Chemical, physical and morphometric properties of Peruvian carrot (*Arracacia xanthorrhiza* B.) starch. *Acta científica venezolana*. 50(4): 240.

Pourmohammadi, Abedi, 2020 – Pourmohammadi, K., Abedi, E. (2020). The effect of pre and post-ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of tapioca starch containing sucrose, isomalt and maltodextrin. *International Journal of Biological Macromolecules*. 163: 485-496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.205>

Rainey, 1860 – Rainey, G. (1860). Original Communications: On the Structure and Mode of Formation of Starch Granules, according to the Principle of "Molecular Coalescence". *Quarterly Journal of Microscopical Science*. 1(29): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1242/jcs.s1-8.29.1>

Ratithammatorn et al., 2012 – Ratithammatorn, T., Thongwai, N., Yotsawimonwat, S., Sirithunyalug, B., Sirithunyalug, J. (2012). Adhesion and Utilization of Native Starch Granules by *Lactobacillus amylovorus*. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*. 11: 29-42. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133022269>

Richardson et al., 2004 – Richardson, G., Kidman, S., Langton, M., Hermansson, A.M. (2004). Differences in amylose aggregation and starch gel formation with emulsifiers. *Carbohydrate Polymers*. 58(1): 7-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2004.06.013>

Schulze et al., 1964 – Schulze, W.E., Yu, D.T., Macmasters, M.M. (1964). Coacervation of starch I. By freezing. *Starch (Stärke)*. 16(2): 41-44. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19640160202>

Seethamraju et al., 1994 – Seethamraju, K., Bhattacharya, M., Vaidya, U.R., Fulcher, R.G. (1994). Rheology and morphology of starch/synthetic polymer blends. *Rheologica acta*. 33(6): 553-567. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00366339>

Shipman et al., 2000 – Shipman, J.A., Berleman, J.E., Salyers, A.A. (2000). Characterization of Four Outer Membrane Proteins Involved in Binding Starch to the Cell Surface of *Bacteroides thetaiotaomicron*. *Journal of bacteriology*. 182(19): 5365-5372. DOI: <https://doi.org/10.1128/jb.182.19.5365-5372.2000>

Singh et al., 2003 – Singh, N., Singh, J., Kaur, L., Sodhi, N.S., Gill, B.S. (2003). Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food chemistry*. 81(2): 219-231. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00416-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8)

Singh et al., 2006 – Singh, N., Kaur, L., Sandhu, K.S., Kaur, J., Nishinari, K. (2006). Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food hydrocolloids*. 20(4): 532-542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.05.003>

Singh et al., 2007 – Singh, J., Kaur, L., McCarthy, O.J. (2007). Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications – A review. *Food hydrocolloids*. 21(1): 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.02.006>

Singh, Singh, 2003 – Singh, J., Singh, N. (2003). Studies on the morphological and rheological properties of granular cold water soluble corn and potato starches. *Food hydrocolloids*. 17(1): 63-72. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(02\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(02)00036-X)

Sossdorf et al., 2008 – Sossdorf, M., Appelt, A., Schaarschmidt, B., Döring, S., Claus, R.A., Hartog, C., Lösche, W. (2008). Hydroxyethyl starch solutions impair clot formation and platelet aggregation but enhance platelet surface receptor expression. *Hämatologie*. 28: A82.

Spaar, 1987 – Spaar, D. (1987). Zum 100. Geburtstag von Nikolai Ivanovič Vavilov. *Archives of Phytopathology & Plant Protection*. 23(6): 423-426. DOI: <https://doi.org/10.1080/03235408709437746>

Srifiana et al., 2014 – Srifiana, Y., Surini, S., Yanuar, A. (2014). Encapsulation of Ketoprofen with Coacervation and Spray Drying Methods Using Pregelatinized Cassava Starch Phthalate as Film-Forming Excipient. *Jurnal Ilmu Kefarmasian Indonesia*. 12(2): 162-169. [Electronic resource]. URL: <http://jifi.farmasi.univpancasila.ac.id/index.php/jifi/article/view/141>

Takeyoshi et al., 1971 – Takeyoshi, S., Yamauchi, N., Hiyoshi, K., Ikeda, Y., Sato, T. (1971). Effects of a new plasma expander, hydroxyethyl starch (HES) on circulatory dynamics, blood coagulation and erythrocyte aggregation. 1. Studies on volunteers. *Masui. The Japanese journal of anesthesiology*. 20(7): 648.

Tiwari et al., 2013 – Tiwari, T., Kumar, M., Pandey, K., Srivastava, N., Srivastava, P.C. (2013). Diffusion-limited aggregation in potato starch and hydrogen borate electrolyte system. *Advances in Condensed Matter Physics*. ID781058. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/781058>

Tizzotti et al., 2013 – Tizzotti, M.J., Sweedman, M.C., Schäfer, C., Gilbert, R.G. (2013). The influence of macromolecular architecture on the critical aggregation concentration of large amphiphilic starch derivatives. *Food Hydrocolloids*. 31(2): 365-374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.11.023>

van der Plaats et al., 2002 – van der Plaats, A., Verkerke, G., Leuvenink, H., Ploeg, R., Rakhorst, G. (2002). UV induced red blood cell aggregation; influence of hydroxy ethyl starch. *American Journal of Transplantation Supplement*. 2: 304-305.

Vernon-Carter et al., 2019 – Vernon-Carter, E.J., Alvarez-Ramirez, J., Bello-Perez, L.A., Hernandez-Jaimes, C., Reyes, I. (2019). Role of Endogenous Protein in the Spherical Aggregation of Taro Starch Granules upon Spray-Drying and in In Vitro Digestibility. *Starch Stärke*, 1900087. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.201900087>

Wang et al., 1987 – Wang, H.H., Chiou, T.W., Hsu, J.P. (1987). Anaerobic saccharolytic bacterial adhesion to raw starch granules. *Biotechnology and bioengineering*. 29(9): 1122-1126. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.260290912>

Wang et al., 1994 – Wang, S.S., Qu, D., Chiew, Y.C. (1994). A study of starch granular aggregation. *Starch – Stärke*. 46(9): 337-341. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19940460905>

Wattebled et al., 2008 – Wattebled, F., Planchot, V., Dong, Y., Szydłowski, N., Pontoire, B., Devin, A., Ball, S., d'Hulst, C. (2008). Further evidence for the mandatory nature of polysaccharide debranching for the aggregation of semicrystalline starch and for overlapping functions of

debranching enzymes in Arabidopsis leaves. *Plant physiology*. 148(3): 1309-1323. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.108.129379>

Wu et al., 2013 – Wu, B., Degner, B., McClements, D.J. (2013). Microstructure & rheology of mixed colloidal dispersions: Influence of pH-induced droplet aggregation on starch granule-fat droplet mixtures. *Journal of Food Engineering*. 116(2): 462-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.020>

Ye et al., 2004 – Ye, A., Hemar, Y., Singh, H. (2004). Flocculation and coalescence of droplets in oil-in-water emulsions formed with highly hydrolysed whey proteins as influenced by starch. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 38(1-2): 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2004.07.011>

Yu, MacMasters, 1965 – Yu, D.T., MacMasters, M.M. (1965). Coacervation of Starch. Part. II. Some Instances. *Starch (Stärke)*. 17(3): 75-77. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19650170303>

Zaharia, 2012 – Zaharia, C. (2012). Performances of natural polyelectrolytes based on starch in aggregation and stabilization of aqueous coal-containing systems. *Bul. Inst. Polit. Iasi, series: Chemistry and Chemical Engineering*. 58: 29-39.

Zayas et al., 1994 – Zayas, I.Y., Bechtel, D.B., Wilson, J.D., Dempster, R.E. (1994). Distinguishing selected hard and soft red winter wheats by image analysis of starch granules. *Cereal chemistry*. 71(1): 82-86. DOI: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19951602715>

Zhang et al., 2011 – Zhang, B., Huang, Q., Luo, F., Wang, K. (2011). Review on Aggregation State Structures of Starch Granule. *Polymer Materials Science & Engineering*. 27(4): 167-170.

Агрегация и агрегометрия крахмала: от молекулярного до микроструктурного уровня, от физической химии до молекулярной биологии и таксономии (Вводный обзор/Лекционный материал)

Любовь Александровна Вассерман ^a, Олег Валерьевич Градов ^b *

^a ИБХФ РАН, Российская Федерация

^b ОДХБП ФИЦ ХФ РАН, Российская Федерация

Аннотация. Агрегация крахмала на разных уровнях является критически важной тематикой как для оценки качества сырья, так и для пищевой промышленности. Размер крахмальных гранул и шероховатость их поверхности влияют на эффективность переваривания и скорость обработки как внутри организмов, так и в процессе технологических операций. Агрегационная структура крахмала на супрамолекулярном ультрамикроскопическом уровне определяет эффективность его усвоения организмами. Кроме того, внешние факторы, такие как реология и гидростатическое давление, влияют на морфологию крахмала, что приводит к корреляциям между формой естественных или обработанных гранул и метаболической активностью, коррелирующих с органолептическими свойствами и пищевой ценностью. В этой статье предлагается комплексная классификационная структура для анализа явлений агрегации крахмала на различных уровнях: структурном, физико-химическом, пищеварительном/фагоцитарном, молекулярно-клеточном (коагрегация), таксономическом/видоспецифическом/селекционном или генетическом/молекулярно-генетическом и морфометрическом. Этот структурный подход направлен не только на классификацию, но и на прогнозирование функциональных характеристик образцов крахмала на основе измеримых параметров, с использованием методов машинного обучения для обеспечения более точной идентификации и корреляционного анализа без артефактов/человеческого фактора. В конечном итоге, эта методология может улучшить контроль качества продукции, усовершенствовать диагностические инструменты и внести вклад в более широкое понимание биофизики происхождения жизни, учитывая историческую значимость крахмалсодержащих коацерватов в исследованиях пребиотической эволюции с середины XX века.

Ключевые слова: агрегация крахмала, агрегометрия, коагрегация, фагоцитоз, гидролиз, машинное обучение, ультраструктурная морфометрия.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: o.v.gradov@gmail.com (О.В. Градов)