

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra genetiky a šlechtění (FAPPZ)



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Dědičné a nedědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového
oleje**

Bakalářská práce

**Tereza Mošová
Výživa a potraviny**

Ing. Vladimíra Sedláková, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Dědičné a nedědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze 28. dubna 2024 _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala své vedoucí práce Ing. Vladimíře Sedlákové Ph.D. za vedení bakalářské práce, konzultace a neustále precizní kontrole v mé bakalářské práci. Zejména bych ráda poděkovala mým kamarádům, Elizabeth Zuckersteinové a Vojtěchu Chaloupkovi, kteří mi pomáhali při mé akademické cestě. V neposlední řadě mojí mamě, která mi byla neustálou psychickou oporou po celou dobu studia.

Dědičné a nedědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje

Souhrn

Sója (*Glycine max*) je v současnosti celosvětově významnou plodinou. Produkty ze sóji nachází uplatnění v celé řadě oborů. Díky svým vysokým nutričním hodnotám, zejména vysokému obsahu rostlinných bílkovin a mastných kyselin, má sója obrovský potenciál zejména v kontextu narůstajícího zájmu o zdravější a udržitelnější potraviny. Proto se pěstování a šlechtění sóji věnuje celá řada odborníků a vědeckých studií. Cílem práce bylo zaměřit se na sójový olej a vytvořit komplexní přehled dědičných a nedědičných faktorů ovlivňujících jeho kvalitu a stabilitu, respektive složení mastných kyselin a jejich derivátů.

Úvodní část rešerše byla věnována podrobnému přehledu o sóji, historii jejího rozšíření, nutričním aspektům a chemickému složení, se zaměřením na složky jako jsou proteiny, lipidy a sacharidy. Dále se rešerše specificky soustředila na sójový olej a byly rozebrány jak genetické, tak environmentální faktory ovlivňující jeho kvalitu s vyzdvižením významu genetické diverzity a selektivního šlechtění v procesu vývoje sójových variant s požadovanými vlastnostmi. V rámci rešerše byl vytvořen přehled pokročilých genetických technik, jako je například metabolické inženýrství a modifikace genomu, které jsou používány k úpravě profilu mastných kyselin v sójovém oleji a jejichž cílem je zejména zvýšit podíl kyseliny olejové a snížit množství polynenasycených mastných kyselin a dosáhnout tak současně zvýšení nutriční hodnoty a stability oleje. Závěrečná část rešerše byla věnována rozboru nedědičných faktorů ovlivňujících kvalitu sójového oleje, kterými jsou například teplota a vlhkost půdy při pěstování sóji, ale také výroba sójového oleje a jeho skladování.

V závěru práce bylo na základě získaných poznatků z rešerše konstatováno, že jednotlivé faktory nikdy nepůsobí izolovaně, ale vždy se vzájemně ovlivňují. Kvalita sójového oleje závisí tedy nejen na specifickém genomu sóji, ale také na podmínkách pěstování a skladování.

Klíčová slova: Glycine max, kvalita oleje, metabolismus, mastné kyseliny, DNA, RNA

Hereditary and non-hereditary factors influencing the quality of soybean oil

Summary

Soybean (*Glycine max*) is currently a globally significant crop. Products derived from soy find application in various industries. Due to its high nutritional value, especially its high content of plant proteins and fatty acids, soy has tremendous potential, particularly in the context of increasing interest in healthier and more sustainable foods. As a result, soy cultivation and breeding receive attention from numerous experts and scientific studies. The aim of this work was to focus on soybean oil and provide a comprehensive overview of genetic and non-genetic factors influencing its quality, stability, and the composition of fatty acids and their derivatives.

The introductory section of the research was dedicated to a detailed overview of soy, including its history, nutritional aspects, and chemical composition, focusing on components such as proteins, lipids, and carbohydrates. Furthermore, the research specifically addressed soybean oil, analyzing both genetic and environmental factors affecting its quality, highlighting the importance of genetic diversity and selective breeding in developing soybean variants with desired properties. Advanced genetic techniques, such as metabolic engineering and genome modification, were outlined within the research, aiming to adjust the profile of fatty acids in soybean oil, particularly increasing the proportion of oleic acid and reducing the amount of polyunsaturated fatty acids, thereby enhancing the nutritional value and stability of the oil. The final part of the research examined non-genetic factors affecting the quality of soybean oil, including factors like temperature and soil moisture during soybean cultivation, as well as the production and storage of soybean oil.

In conclusion, based on the findings of the research, it was noted that individual factors never act in isolation but always influence each other. Therefore, the quality of soybean oil depends not only on the specific genome of soy but also on the conditions of cultivation and storage.

Keywords: *Glycine max*, quality of oil, metabolism, fatty acids, DNA, RNA

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Literární rešerše.....	3
3.1	Sója (<i>Glycine max</i>).....	3
3.2	Historie rozšíření sóji.....	3
3.3	Využití sóji	4
3.4	Pozitivní účinky bioaktivních složek sóji na zdraví	5
3.5	Anti-nutriční složky sóji	6
3.6	Složení sóji.....	7
3.6.1	Bílkoviny	8
3.6.2	Lipidy	8
3.6.2.1	Zásobní lipidy	8
3.6.2.2	Membránové lipidy	9
3.6.3	Sacharidy	10
3.6.3.1	Strukturální sacharidy.....	10
3.6.3.2	Nestrukturální sacharidy	11
3.6.4	Minoritní složky	11
3.7	Sójový olej	12
3.7.1	Faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje.....	13
3.7.2	Dědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje	13
3.7.3	Šlechtitelské metody ovlivňujících složení a kvalitu sójového oleje	14
3.7.4	Konvenční šlechtění	14
3.7.4.1	Metabolické inženýrství a genetické modifikace	14
3.7.5	Genetické modifikace vedoucí ke zvýšení stability sójového oleje	15
3.7.5.1	Snížení obsahu kyseliny linolenové – potlačení exprese <i>FAD3</i> genů	16
3.7.5.2	Zvýšení obsahu kyseliny olejové – potlačení exprese <i>FAD2</i> genů.....	17
3.7.5.3	Zvýšení obsahu stearové kyseliny se současně zvýšeným obsahem kyseliny olejové – strategie skládání genů kombinující potlačení exprese <i>FAD2-1</i> s expresí vhodného <i>FatA</i> genu a/nebo umlčením <i>GmSAD-C</i>	18
3.7.5.4	Změna složení mastných kyselin mutací	19
3.7.5.5	Zvýšení obsahu vitamínu E a jeho složek	19
3.7.6	Genetické modifikace vedoucí ke zlepšení nutriční hodnoty sójového oleje	21
3.7.6.1	Zvýšení obsahu γ -linolenové kyseliny (GLA) a kyseliny stearidonové (SDA)	21

3.7.6.2	Zvýšení obsahu eikosapentaenové kyseliny (EPA) a kyseliny dokosahexaenové (DHA)	22
3.7.6.3	Zvýšení syntézy triacylglycerolů (TAG) a modifikace složení mastných kyselin	22
3.8	Nedědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje	24
3.8.1	Výroba oleje	24
3.8.2	Teplota	24
3.8.3	Vlhkost půdy	25
3.8.4	Skladování	25
4	Závěr	26
5	Literatura.....	28

1 Úvod

Sója (*Glycine max*) se v dnešní době řadí mezi globálně významné plodiny, a to díky své široké škále využití v různých odvětvích. Díky vysoké nutriční hodnotě, zejména obsahu rostlinných bílkovin a mastných kyselin, má sója velký potenciál, zvláště v souvislosti s rostoucím zájmem o zdravější a udržitelnější potraviny. Proto se pěstování a šlechtění sóji stalo předmětem zájmu mnoha odborníků a vědeckých studií. Cílem této práce bylo zaměřit se na sójový olej a poskytnout přehled faktorů, které ovlivňují jeho kvalitu a stabilitu, a to jak dědičných, tak nedědičných.

Úvodní část rešerše podrobněji rozebírá sóju, včetně historie jejího šíření, nutričních aspektů a chemického složení, s důrazem na složky jako jsou proteiny, lipidy a sacharidy. Další část se pak soustředí specificky na sójový olej a analyzuje jak genetické, tak environmentální faktory, které ovlivňují jeho kvalitu a zdůrazňuje význam vývoje sójových variant s požadovanými vlastnostmi. V rámci rešerše byly také stručně popsány kroky, které slouží k úpravě profilu mastných kyselin v sójovém oleji s cílem zvýšit jeho nutriční hodnotu a stabilitu. Závěrečná část rešerše pak zkoumá nedědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje, včetně teploty a vlhkosti půdy při pěstování sóji, proces výroby a skladování sójového oleje.

V závěru práce je poté na základě získaných poznatků z rešerše zdůrazněno, že jednotlivé faktory nikdy nepůsobí izolovaně, ale vždy se vzájemně ovlivňují.

2 Cíl práce

Cílem práce je shromáždit, prostudovat a posoudit současné literárně prezentované poznatky o dědičných a nedědičných faktorech ovlivňujících kvalitu sójového oleje jako potraviny. Jedním z dílčích cílů práce je zaměřit se zejména na aktuální trendy výzkumu této problematiky s využitím moderních molekulárních metod analýzy nukleových kyselin.

3 Literární rešerše

3.1 Sója (*Glycine max*)

Sója luštinatá (*Glycine max*) je celosvětově jednou z nejdůležitějších plodin. Je to vyšší dvouděložná rostlina, která patří do čeledi bobovitých (*Fabaceae*) (Hymowitz and Newell, 1981). Tato rostlina je roční nebo krátce vytrvalá bylina s přímým vzrůstem a dosahuje výšky obvykle od 20 do 180 centimetrů. Listy sóji jsou střídavé, trojčetné a mají eliptický tvar s vroubkovaným okrajem. Rostlina má charakteristické květy, které jsou uspořádány v krátkých hroznech. Květy sóji jsou oboupohlavní a mají bílou, růžovou nebo fialovou barvu (viz Obrázek č.1). Lusky jsou rovné nebo lehce zakřivené a dosahují délky 2 až 7 centimetrů. Semena jsou u většiny odrůd oválná (Nguyen and Bhattacharyya, 2017).

Genom sóji je diploidní, s chromozomovým počtem $2n=40$. Tento chromozomový počet odráží dvě sady chromozomů, což má význam pro genetickou variabilitu a křížení (Nguyen and Bhattacharyya, 2017). Úplný genom sóji byl osekvenován v roce 2008 mezinárodním týmem vědců (Cannon et al., 2009). Tento průlomový krok přinesl kompletní genomovou shotgun sekvenci sóji *Glycine max* var. Williams 82, která má 46 430 genů kódující proteiny a skládá se z 950 megabází (Mb), to představuje přibližně 85 % předpokládaného genomu o velikosti 1 115 Mb1 (Schmutz et al., 2010).



Obrázek č.1: *Glycine max* (odrůda Dwight) převzato z: (Nguyen and Bhattacharyya, 2017)

3.2 Historie rozšíření sóji

Domovskou oblastí sóji (*Glycine max*) je Východní Asie, konkrétně oblast Mandžuska. Okolo roku 1900 se sója stala díky rozvinuté železniční a návažné lodní dopravě pro tuto oblast významnou exportní komoditou, na kterou se Mandžuské zemědělství specializovalo. Sójová moučka byla využívána jako hnojivo, jehož hlavními odběrateli byly Jižní Čína a Japonsko (Hymowitz and Newell, 1981). Přestože sója nebyla v té době pro Evropu a Spojené státy

neznámá, bylo její využití v průmyslu, zemědělství a potravinářství limitováno omezenou znalostí technologie zpracování a antinutričním složkám v ní obsažených. Ve Spojených státech byla sója v počátku využívána převážně jako zelené hnojivo obohacující vyčerpanou půdu o dusíkaté látky, zatímco v Evropě byla využívána zejména pro získávání oleje a rezidua ze zpracování jako krmivo pro hospodářská zvířata. Ke globalizaci sóji došlo až po První světové válce a během Světové hospodářské krize v rozmezí let 1920, 1930, 1940, kdy v Německu pokročily technologie zpracování sóji, které umožnily výrobu levných tuků a dalších produktů a kdy se ve Spojených státech v ekonomicky náročné době obecně rozšířilo její využití. Sója se stala jednou z nejčastěji konzumovaných luštěnin na celém světě (Prodöhl, 2023). V roce 2022/23 činila celosvětová produkce sóji 391 milionů tun (Dvořáková, 2022).

Největším producentem byla v roce 2022 Brazílie (36 %), následovaná Spojenými státy (34 %), Argentinou (12 %), Čínou (5 %) a Indií (3 %). Přestože Čína je sama stále producentem sóji, byla v roce 2022 také jejím největším dovozcem a spotřebitelem. S ohledem na trend přechodu k produktům na bázi rostlinných proteinů a olejů v posledních letech se dá očekávat, že celosvětová poptávka po sóji bude i nadále růst (Tan et al., 2023)

V průběhu posledních deseti let došlo v České republice k významnému nárůstu produkce sóji. Zatímco v letech 2012 a 2013 bylo vyprodukováno 13 149 tun sóji, v období mezi roky 2021 a 2022 produkce výrazně vzrostla až na 51 456 tun, což představuje téměř čtyřnásobný nárůst (Dvořáková, 2022).

3.3 Využití sóji

Asijské kultury používají sóju k výrobě tradičních potravin, jako je sójové mléko, sójová omáčka, sójová pasta, tempeh, miso, tofu, a natto (Hymowitz, 1970). V západních kulturách se sójové boby zpracovávají především na sójovou moučku a olej ze semen. Zpracovatelé drtí sójové boby na plnotučné vločky, které následně procházejí procesem extrakce organickými rozpouštědly, čímž je získán olej a odtučněné vločky. Plnotučné vločky mohou být také použity jako složka krmiva pro zvířata nebo rozemlety na plnotučnou mouku, která se používá jako přísada do potravin. Odtučněné vločky jsou rozemlety na sójovou moučku, která se používá jako vysoce kvalitní bílkovina v krmivech pro zvířata nebo se používá k výrobě texturovaných rostlinných bílkovin, sójového koncentrátu a sójových izolátů. Sójové bílkoviny, koncentráty a izoláty se používají jako obohacující přísada v kojenecké výživě, masu a masných výrobcích, pečivu, šlehaných polevách, mražených dezertech, proteinových nápojích, polévkových základech atd. Přibližně 55 % vyrobeného sójového oleje se používá jako olej na vaření a do salátů, 24 % jako tuk na pečení a smažení, 4 % jako přísada do margarínů, 7 % pro jiné potravinářské a průmyslové účely a 11 % jako substrát pro výrobu bionafty (Dr. Robert Wisner, 2013).

3.4 Pozitivní účinky bioaktivních složek sóji na zdraví

Sója obsahuje řadu biologicky aktivních látek, o nichž se předpokládá, že mají významné zdravotní benefity (viz Tabulka č.1). Stále více zpráv potvrzujících tyto příznivé účinky sóji podnítilo potravinářské výrobce k vývoji nových způsobů využití sóji v potravinách a zařazení více sóji do lidské stravy. Dá se očekávat, že sója bude sloužit nejen jako krmivo pro hospodářská zvířata, jak tomu bylo dříve, ale stane se běžnou složkou stravy lidí v západních kulturách (Sugano, 2005).

Tabulka č.1: Pozitivní účinky složek sóji na zdraví (Sugano, 2005)

Bílkoviny	
Zásobní bílkoviny	Hypocholesterolemické (Sugano, 2005)
Inhibitor trypsinu	Antikarcinogenní (Friedman and Brandon, 2001; Sugano, 2005)
Lektiny	Antikarcinogenní (Friedman and Brandon, 2001; Sugano, 2005)
Lipidy	
Kyselina linolová	Esenciální mastná kyselina, hypocholesterolemická (Sugano, 2005)
α -Linolenová kyselina	Esenciální mastná kyselina, hypotriglyceridemická, zlepšuje kardiovaskulární funkce (Sugano, 2005)
Tokoferoly	Antioxidanty
Fytosteroly	Hypocholesterolemické (Jimenez et al., 1990)
Fosfolipidy	Hypocholesterolemické (Sugano, 2005), snižují hromadění tuku v játrech (Wang, 2008)
Sfingolipidy	Antikarcinogenní, hypocholesterolemické (Imaizumi et al., 1992; Kobayashi et al., 1997), regulují imunitní funkce (Olivera and Rivera, 2005)
Sacharidy	
Vláknina	Antihypertenzivní, zlepšuje funkci trávicího traktu, prevence rakoviny tlustého střeva (Sugano, 2005), hypotriglyceridemická,

Minoritní složky	hypcholesterolemická (Anderson et al., 2009)
Kyselina fytová	Antioxidant, antikarcinogenní (Ferry, 2002; Thompson and Zhang, 1991; Vucenik and Shamsuddin, 2003)
Saponiny	Regulují metabolismus lipidů, antioxidant (Sugano, 2005)
Izoflavony	Slabá estrogenní aktivita (Sakai and Kogiso, 2008), hypcholesterolemické, pokud jsou podávány v kombinaci se sójovými bílkovinami (Murphy P, 2008; Vincent and Fitzpatrick, 2000), mohou předcházet osteoporóze a některým druhům rakoviny (Vincent and Fitzpatrick, 2000; Weaver and Cheong, 2005).

3.5 Anti-nutriční složky sóji

Syrová sójová semena obsahují řadu antinutričních látek, které snižují výživovou hodnotu sóji. Tyto látky jsou z větší míry deaktivovány tepelným zpracováním za optimální teploty (Van Eys et al., 2004). Přehled hlavních antinutričních složek obsahuje Tabulka č.2.

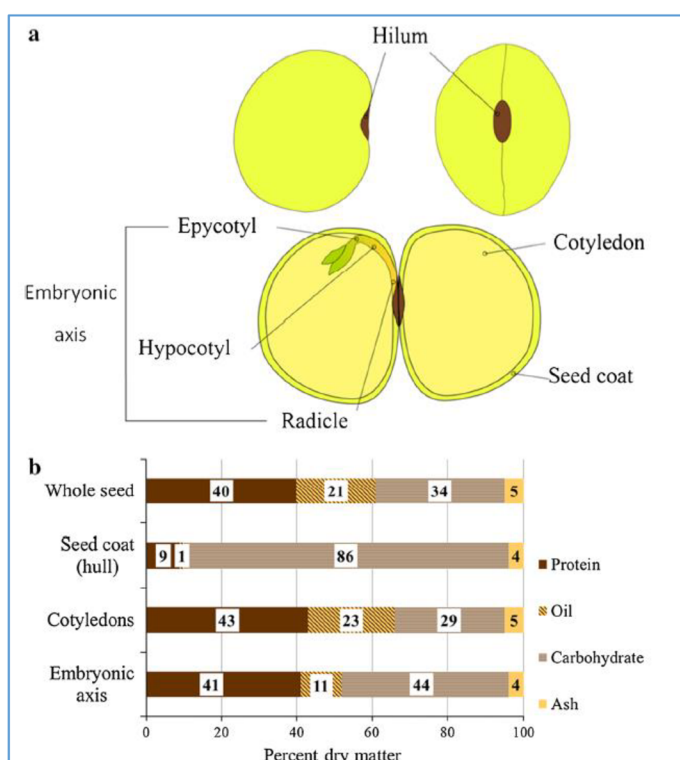
Tabulka č.2: Hlavní antinutriční složky sóji (Banaszkiewicz et al., 2011)

Inhibitory proteáz	Výživová hodnota sóji je ovlivněna přítomností inhibitorů inhibitorů proteáz, především inhibitorů trypsinu a chymotrypsinu. Nejvýznamnějšími jsou trypsinové inhibitory, jako jsou Kunitzovy inhibitory a Bowmanovy-Birkovy inhibitory (Winiarska-Mieczan, 2007). Tyto inhibitory zasahují do procesu trávení bílkovin, což vede ke snížení růstu zvířat. Taktéž mohou vést k nižší retenci dusíku a zvýšení jeho metabolického vylučování. Proces pečení nebo zahřívání může snížit aktivitu těchto inhibitorů (Kulasek et al., 1995).
Lektiny	Lektiny (hemaglutininy) jsou bílkoviny, které se vážou na sacharidy. V syrové sóji mohou snižovat růst a způsobovat zvýšenou úmrtnost zvířat. Tento silný vliv lektinů prakticky mizí po autoklávování (parní sterilizaci) (Fasina et al., 2003; Maenz et al., 1999).

Fytáty	Kyselina fytová váže vápník, hořčík, draslík, železo a zinek, což ztěžuje jejich vstřebávání u nepřežvýkavců. Vysoké množství fytátů v potravě snižuje absorpci těchto minerálních látek, zejména vápníku, fosforu a zinku. Fytáty také snižují aktivitu enzymů, jako jsou pepsin, trypsin a amyláza, a omezení dostupnosti bílkovin, aminokyselin, škrobu a energie (Ravindran et al., 2000; Sebastian et al., 1998).
Alergeny	Alergizující účinek na citlivé jedince se připisuje globulinové frakci sójových bílkovin. Nejvýznamnějšími alergeny sóji jsou GLY 1 a GLY1B - glycinin a β -conglycinin (Swiderska-Kiełbik et al., 2005)

3.6 Složení sóji

Semeno sóji se skládá ze dvou hlavních částí: slupky a embrya. Embryo tvoří většinu hmotnosti semene a skládá se z kotyledonů a embryonální osy, zahrnující různé části, jako jsou radikula, hypokotyl a epikotyl (Obrázek č. 1a). Kotyledony slouží jako zdroj živin pro rostoucí rostlinu během klíčení, zatímco radikula se vyvíjí v hlavní kořen a hypokotyl s epikotylem tvoří nadzemní části rostliny (Liu, 1997). V obchodním kontextu jsou kotyledony klíčové, protože obsahují zásoby bílkovin a oleje (Obrázek č. 2b) (Webster and Leopold, 1977).



Obrázek č.2: Části semene sóji (a) a jejich složení v sušině semen (b) převzato z: Kawamura S (1967)

Významný vliv na strukturu, složení, výživové a funkční vlastnosti sóji má genotyp a environmentální prostředí. V Tabulce č.3 je uvedeno základní složení sójových semen.

Tabulka č. 3: Základní složení sójových semen (Ensminger et al., 1990)

5,6 - 11,5%	voda
32 - 43,6%	hrubý protein
15,5 - 24,7%	lipidy
4,5 - 6,4%	hrubý popel
9 - 14,9%	vláknina (podle typu použitého detergentu)
31,7 - 31,85%	sacharidy (v sušině)
4,66 - 7%	škrob

3.6.1 Bílkoviny

Semena sóji běžně obsahují 40-41 % bílkovin v sušině. Lze je klasifikovat do čtyř základních skupin: metabolické enzymy, strukturální bílkoviny (včetně ribosomálních a chromosomálních), membránové bílkoviny a zásobní bílkoviny (Krishnan, 2000; Nielsen et al., 1997). Hlavními dvěma zásobními bílkovinami jsou hexamer glycinin a glycoprotein β -conglycinin. Díky odlišné struktuře zastávají v metabolickém systému různé funkce. Glycinin tvoří pevnější a odolnější gely, zatímco β -conglycinin má vyšší emulgační schopnost a emulzní stabilitu (KangII, Matsumura, Mori 1991). Metabolické bílkovinné enzymy odpovídají za mobilizaci uložených živin nebo obranu proti makro a mikroorganismům. Řada z nich jsou i antimetabolické sloučeniny, které vyvolávají alergické reakce u sensitivních lidí a zvířat (např. inhibitory proteáz). Další skupinu bílkovin tvoří lektiny, které jsou řazeny mezi antinutriční faktory (Herman, 2005).

Obecně se bílkoviny sóji vyznačují vysokým obsahem esenciálních aminokyselin, zejména lysinu, argininu, leucinu a isoleucinu. Nutriční hodnota sójových bílkovin je limitována nízkým obsahem sirných aminokyselin (zejména cysteinu a methioninu). Na zvýšení obsahu sirných aminokyselin jsou zaměřeny jak šlechtitelské metody, tak genové inženýrství, které cílí zejména na expresi syntetických genů s dobře vyváženým složením aminokyselin (Utsumi, Matsumura, Mori 2017).

3.6.2 Lipidy

Lipidy ze sójových semen fungují zejména jako zásobárna energie pro rostlinu, složky membrán, signalizační molekuly a obrana proti patogenům. (Medic et al., 2014).

3.6.2.1 Zásobní lipidy

Zásobní lipidy se převážně ukládají ve formě triacylglycerolů v olejových tělískách. Triacylglycerolová molekula se skládá z trojice mastných kyselin, jež jsou esterifikovány s glycerolovou páteří. V komoditních sójových bobech převažuje kyselina linolová (18:2), následovaná kyselinou olejovou (18:1), palmitovou (16:0), linolenovou (18:3) a stearovou

(18:0). Rozložení mastných kyselin uvnitř triacylglycerolu a mezi různými triacylglyceroly není náhodné, což je důsledek specifičnosti rostlinných lipáz (Pokorn, Schmidt 2010). Podle (Liu, 1997) jsou nasycené mastné kyseliny (kyselina palmitová a stearová) a mastné kyseliny s dlouhými řetězci (s více než 18 uhlíky) rozloženy proporcionálně a náhodně mezi polohami 1 a 3 na triglyceridech, kyselina olejová a linolenová na všech třech pozicích a zbytek dostupných pozic je vyplněn kyselinou linolovou.

Složení a distribuce mastných kyselin ovlivňuje kvalitu oleje, jeho nutriční hodnotu, chuť, oxidační stabilitu, bod tání a způsob krystalizace (Verma, 1996). Sójový olej je výživný díky svému bohatství na nenasycené mastné kyseliny, jako je olejová, linolová a linolenová, které obsahují jednu, dvě a tři dvojně vazby. Tyto nenasycené mastné kyseliny přispívají k prevenci aterosklerózy, snižování celkového a LDL cholesterolu, triacylglycerolů v plazmě a potlačení zánětlivých procesů (Mozaffarian, 2006)

Linolová a linolenová jsou také esenciální mastné kyseliny, které savci nemohou syntetizovat a musí být získávány z potravy. Nicméně počet dvojných vazeb má přímý vliv na stabilitu oleje. Díky vysokému obsahu kyseliny linolenové je sójový olej relativně nestabilní a náchylný k oxidaci a vzniku nepříjemné chuti. Proto je často hydrogenován k snížení obsahu nenasycených dvojných vazeb. Avšak tento proces může vést k vzniku transmastných kyselin, které jsou spojeny s rizikem ischemické choroby srdeční zvýšením hladiny LDL a snížením hladiny HDL cholesterolu v krvi (DeSoucey and Schleifer, 2010).

3.6.2.2 Membránové lipidy

Membránové lipidy sójových semen se skládají především z fosfolipidů (~3 % z celkového množství lipidů v sóji) (Wang et al., 1997), které jsou podobné triacylglycerolům až na to, že je mastná kyselina na pozici sn-3 glycerolu nahrazena fosfátovou skupinou. Tato fosfátová skupina je často spojena s polárními skupinami cholinu, etanolaminu a inositolu. Fosfolipidy jsou odstraněny ze surového sójového oleje během odtučňování při rafinaci oleje. Odstraněná frakce, bohatá na fosfolipidy, se běžně nazývá sójový lecitin a komerčně se používá jako emulgátor. Hlavními fosfolipidy v sójovém lecitinu jsou fosfatidylcholin (55,3 %), fosfatidyletanolamin (26,3 %) a fosfatidylinositol (18,4 %) (Wang et al., 1997).

Kromě fosfolipidů obsahují sójová semena sfingolipidy jako minoritní složky membrán. Nejhojněji je zastoupen glykosylceramid (White, Johnson 2008). Tyto neglyceridové lipidové složky obsahují ceramidovou kostru s navázaným cukrem nebo fosforylcholinem. Ceramidy se skládají z mastné kyseliny navázané na aminoalkohol s dlouhým řetězcem (sfingosin) prostřednictvím amidové vazby. Fosfolipidy i sfingolipidy jsou bioaktivní složky sóji.

Bylo prokázáno, že příjem sfingolipidů inhibuje tvorbu kolorektálního karcinomu a rakoviny kůže, snižuje hladinu cholesterolu v plazmě a játrech a reguluje funkci imunitních buněk. Příjem fosfolipidů vede ke snížení sérového cholesterolu a hromadění tuku v játrech. Fosfatidylcholin obsahuje cholin, živinu potřebnou pro správný vývoj nervové soustavy a funkci jater (Zeisel, 1992).

Fytosteroly jsou další skupinou bioaktivních lipidových složek v semenech sóji, které byly podrobně studovány kvůli jejich schopnostem snižovat hladinu LDL cholesterolu v séru (Kritchevsky and Chen, 2005). Jsou to 28- nebo 29-uhlíkaté alkoholy a podobají se cholesterolu

jak z hlediska struktury, tak i funkce. Slouží jako regulátory fluidity a permeability rostlinných buněčných membrán (Lagarda et al., 2006). Nejhojněji zastoupené fytosteroly v sóji jsou kampesterol, stigmasterol a β -sitosterol (White, Johnson 2008). Fytosteroly jsou získávány jako vedlejší produkty při výrobě sójového oleje a jejich extrakty se používají ve zdraví prospěšných a výživových doplňcích. Tokoferoly slouží jako přirozená obranná látka rostlin, která chrání biologické membrány proti oxidačnímu poškození polynenasycených mastných kyselin (Sattler et al., 2003).

Tokoferoly inhibují peroxidaci lipidů tím, že vychytávají aktivní formy kyslíku a peroxylové radikály, a tak zabraňují jejich reakci s lipidy (Kamal-Eldin and Appelqvist, 1996). Tokoferoly se skládají z polární chromanolové hlavy a hydrofobního fytolového ocasu (Ujiie et al., 2005).

Semena sóji obsahují čtyři typy tokoferolů, α -, β -, γ - a δ -, které se liší počtem a pozicí methylových skupin na chromanolové hlavě (White, Johnson 2008). α -tokoferol má nejsilnější antioxidační účinek in vivo, zatímco β -, γ - a δ -tokoferoly mají o 60, 90, a 98-99 % nižší aktivitu vitamínu E než α -tokoferol (Kamal-Eldin and Appelqvist, 1996; Ujiie et al., 2005).

Surový sójový olej obsahuje 1205 až 2195 ppm tokoferolů, které přispívají k oxidační stabilitě oleje, ale jejich značné množství je odstraněno během procesu rafinace (White, Johnson 2008). Složení tokoferolů se také mění s vývojem semen sóji. Byl pozorován pozitivní vztah mezi mírou nenasycenosti oleje a celkovým obsahem tokoferolů v sójových semenech; to znamená, že odrůdy sóji s nižšími hladinami kyseliny linolenové mají obvykle nižší obsah tokoferolů (Dolde et al., 1999).

3.6.3 Sacharidy

Sacharidy jsou třetí hojně zastoupenou složkou sóji a tvoří přibližně 35 % hmotnosti sušiny semen. Jsou přítomny ve vysoké koncentraci ve slupkách semen sóji, ale vyskytují se i v parenchymatických buňkách embrya. Část sacharidů v semenech je odstraněna spolu se slupkami, ale sójová moučka může stále obsahovat až 40 % celkových sacharidů (Middelbos, Fahey 2008; Karr-Lilienthal et al. 2005).

Přibližně polovina celkových sacharidů v sójových bobech jsou strukturální sacharidy (polysacharidy buněčné stěny: celulóza, hemicelulóza a pektiny), zatímco druhou polovinu tvoří nestrukturální sacharidy (např. škrob a různé mono-, di- a oligosacharidy) (Middelbos and Fahey, 2008).

3.6.3.1 Strukturální sacharidy

Savci nemají enzymy potřebné k hydrolyzaci polysacharidů buněčných stěn a tyto složité sacharidy nemohou být v tenkém střevě stráveny. Spolu s ligninem (nopolysacharid), enzymaticky rezistentním škrobem a oligosacharidy jsou polysacharidy buněčných stěn složkami vlákniny a nestravitelnou částí potravy, respektive krmiva (Rodríguez et al., 2006). Obsah vlákniny v semenech sóji se liší v závislosti na odrůdě a metodách použitých k měření. Většina polysacharidů buněčné stěny je odstraněna při loupání sójových bobů. Slupky jsou tedy bohatým zdrojem vlákniny (83 % celkové vlákniny). Mohou být také zpětně smíchány se sójovou moučkou a použity v živočišné výrobě, pokud není obsah hrubé vlákniny v sójové moučce dostatečný (Middelbos and Fahey, 2008).

3.6.3.2 Nestrukturální sacharidy

Sójové boby obvykle obsahují 11 až 25 % rozpustných sacharidů, které zahrnují 15-20 různých druhů cukrů (Maughan et al., 2000; Obendorf et al., 2008). Nejrozšířenějšími rozpustnými cukry jsou sacharóza, rafinóza a stachyóza. Sacharóza dodává sójovým potravinám příjemnou sladkou chuť a je žádoucí složkou sójových semen. Galaktooligosacharidy (rafinóza, stachyóza a verbaskóza) jsou považovány za antinutriční faktory, protože jejich konzumace je spojena s nadýmáním a poruchami trávení u lidí a nepřežvýkavců. Savci nesyntetizují enzym α -galaktozidázu potřebnou k hydrolyzaci galaktooligosacharidů na D-galaktózu a sacharózu. V důsledku toho galaktooligosacharidy procházejí do dolní části střeva, kde slouží jako substráty pro bakteriální fermentaci, při níž vzniká oxid uhličitý, metan a další plyny způsobující plynatost (Kumar et al., 2010). Galaktooligosacharidy slouží jako zásobní nebo transportní sacharidy ve zralých semenech, vegetativních orgánech a listech (Dey 1985).

Škrob je zásobní polysacharid složený z monomerních jednotek D-glukózy. Je syntetizován v buňkách sojového kotyledonu (Yazdi-Samadi et al., 1977). Dvěma hlavními složkami škrobu jsou amyulóza a amylopektin. Amyulóza je lineární polymer glukózy, zatímco amylopektin je vysoce rozvětvený polymer složený z relativně krátkých řetězců D-glukózy propojených glykosidickými vazbami (Stevenson et al., 2006).

3.6.4 Minoritní složky

Kyselina fytová je hlavní zásobní formou fosforu v luštěninách a v obilovinách. Tvoří 65-80 % celkového obsahu fosforu v semenech sóji (Raboy and Dickinson, 1993). Na rozdíl od anorganického fosforu není fosfor kyseliny fytové pro člověka a nepřežvýkavce dostupný, protože ve svém trávicím systému nesyntetizují enzym fytázu (Oltmans et al., 2005). Kyselina fytová se v semenech sóji vyskytuje ve formě směsi fytátů a fytinových solí. Nabité fytinové soli chelatují kationty kovů, jako jsou nutričně důležité minerály zinek, vápník, hořčík a železo, a činí je pro člověka a nepřežvýkavce nedostupnými. Kyselina fytová je tedy považována za antinutriční faktor v potravinách a krmivech (Israel et al., 2007; Raboy et al., 1984).

Izoflavony (třída fytoestrogenů) mají fenolickou strukturu podobnou estrogenu 17 β -estradiolu, který má schopnost vázat se na estrogenní receptory a vykazovat slabou estrogenní aktivitu (Vincent and Fitzpatrick, 2000). Mnoho studií prokázalo kardioprotektivní roli sójových izoflavonů podávaných v kombinaci se sójovými bílkovinami, a to především snížením sérové hladiny LDL cholesterolu a zvýšením oxidační stability LDL cholesterolu (White, Johnson 2008; Vincent, Fitzpatrick 2000). Sójové boby jsou bohatým zdrojem izoflavonů. Obsah jednotlivých izoflavonů se liší podle genotypu, místa pěstování a roku sklizně (Lee et al., 2003; Wang and Murphy, 1994). Sójový olej obsahuje pouze stopové množství izoflavonů, protože tyto vysoce polární sloučeniny jsou odstraněny během rafinace oleje (Kenneth, 1998).

3.7 Sójový olej

Komoditní sójový olej je tvořen pěti hlavními mastnými kyselinami: kyselina palmitová (16:0), kyselina stearová (18:0), kyselina olejová (18:1), kyselina linolová (18:2) a kyselina linolenová (18:3) (Canakci, Monyem, Van Gerpen 1999) (Tabulka č. 4).

Tabulka č.4: Procentuální zastoupení hlavních mastných kyselin v komoditním sójovém oleji (Canakci, Monyem, Van Gerpen 1999)

kyselina palmitová (16:0)	10 %
kyselina stearová (18:0)	4 %
kyselina olejová (18:1)	18 %
kyselina linolová (18:2)	55 %
kyselina linolenová (18:3)	13 %

Výživové a funkční vlastnosti sójového oleje mohou být modifikovány konvenčním šlechtěním semen a genovým inženýrstvím. Pomocí těchto technik se podařilo vytvořit mnoho linií sóji s různým složením mastných kyselin pro různá koncová využití (Tabulka č.5).

Linie sóji s nízkým obsahem kyseliny linolenové byly vyvinuty pro výrobu olejů s lepší oxidační stabilitou bez nutnosti hydrogenace (Gerde et al., 2007). Tyto řady jsou určeny pro trhy s olejem na vaření, pečení a fritování. Pro pokrytí poptávky spotřebitelů po potravinách s nízkým obsahem nasycených tuků a potřebě olejů s přijatelnou oxidační stabilitou byly vytvořeny linie sójových bobů s vysokým obsahem kyseliny olejové (List et al., 1996). Naproti tomu oleje s vysokým obsahem nasycených mastných kyselin jsou žádoucí v margarínovém průmyslu a ty se zvýšeným obsahem kyseliny linolenové jsou využívány pro výrobu barev a laků (Cahoon, 2003).

Tabulka č.5: Složení mastných kyselin vybraných linií sóji (Vick 2002)

Linie	Mastná kyselina (% v surovém oleji)				
	Palmitová (16:0)	Stearová (18:0)	Olejová (18:1)	Linolová (18:2)	Linolenová (18:3)
Normální	12	4	21	55	9
Nízce linolenová	5-12	3-4	19-48	36-57	3-6
Vysoce linolenová	11-15	3-4	11-14	52-55	15-19
Vysoce olejová	8-9	3-4	60-79	3-26	2-6
Nízce palmitová	4-8	3-4	22-39	44-61	5-9
Vysoce palmitová	15-18	3-4	16-26	48-55	7-8
Vysoce stearová	7-11	9-28	18-25	38-51	5-9

3.7.1 Faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje

Struktura a množství složek sóji se výrazně mění v závislosti na genetických a environmentálních faktorech, podmínkách zpracování a skladování. Kvalita sójového oleje je výsledkem komplexního působení těchto faktorů a jejich vzájemného ovlivňování (Kumar et al., 2006a).

3.7.2 Dědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje

Primárním cílem šlechtitelů sóji bylo v minulosti zejména zvýšení celkového obsahu bílkovin a tomu odpovídalo i selekční kritérium pro vývoj zárodečné plazmy. V posledních dekádách se však v genetice a šlechtitelských programech sóji v důsledku zvýšené poptávky po rostlinných olejích věnuje velká pozornost sójovému oleji, a to jak jeho obsahu, tak jeho kvalitě. Za tímto účelem bylo vyvinuto značné úsilí ke zvýšení oxidační stability sójového oleje jako prostředku k zamezení vzniku transmastných kyselin, které vznikají při hydrogenačním procesu, ke zvýšení obsahu ω -3 mastných kyselin v oleji pro použití v potravinách i krmivech a ke zvýšení celkového obsahu oleje v semenech (Schwender et al., 2003).

Během embryogeneze je uhlík v sóji rozdělen především mezi bílkoviny a olej, v poměru 40 %: 20 %. Inverzní vztah mezi celkovým obsahem oleje a bílkovin v sóji je dobře zdokumentován, přičemž obvykle zvýšení celkového obsahu bílkovin o 2 % vede ke snížení celkového obsahu oleje o 1 %. Regulace toku uhlíku během embryogeneze se tedy posune směrem k jednomu nebo druhému, což je ovlivněno jak genetikou, tak prostředím (Schwender et al., 2003).

Je evidována celá řada odrůd s rozdílným obsahem oleje v sójových semenech (škála obsahu oleje 8,1 % - 27,9 %) (Shibles 2004). Svou roli v obsahu oleje může hrát i mikroprostředí, respektive umístění lusků na rostlině sóji. Zatímco lusky umístěné u vrcholu rostliny mají vyšší obsah bílkovin, lusky umístěné níže mají naopak vyšší obsah oleje (Bennett et al., 2003). Šlechtitelé sóji dosáhli významného pokroku při zvyšování celkového výnosu sóji, což se projevuje ve vyšším obsahu bílkovin a oleje na hektar, nicméně z pohledu kvality oleje bylo dosaženo jen minimálního pokroku ve výběru vysoce výnosných genotypů pro komerční užití. Pěstování těchto vyšlechtěných genotypů má jednak negativní dopad na výnosnost sklizně a pro dosažení vyššího podílu olejové kyseliny vyžaduje pěstování teplé klima (Bachlava et al., 2008; Scherder and Fehr, 2008).

Významná progresa v zavedení nástrojů molekulární biologie a biotechnologie, spolu se zmapováním genomu sóji, umožnili zaměřit vývoj směrem ke zlepšení kvality sójového oleje pomocí cílené modifikace biosyntézy mastných kyselin přirozeně obsažených v sóji s cílem změnit jejich relativní množství nebo za účelem produkce nových mastných kyselin (Damude and Kinney, 2008; Jaworski and Cahoon, 2003).

3.7.3 Šlechtitelské metody ovlivňujících složení a kvalitu sójového oleje

3.7.4 Konvenční šlechtění

Konvenční šlechtění je založeno na výběru a křížení rostlin sóji s žádanými vlastnostmi za účelem získání nových odrůd. Tato metoda se opírá o přirozenou genetickou variabilitu v rámci populace sóji. Pro zefektivnění a urychlení šlechtitelského procesu je dnes konvenční šlechtění často kombinováno s mutačním šlechtěním. Cílem je zavedení specifických genetických změn, které zlepšují požadované vlastnosti, například lepší kvalitu oleje. Následně se používají selekční metody s využitím genetických markerů spojených s příznivými metabolickými znaky (Ayan et al., 2022).

Příkladem selekční metody je metoda tzv. molekulárně asistovaného šlechtění, která byla využita při vývoji odrůd sóji se zvýšeným obsahem vitamínu E a vysokým obsahem kyseliny olejové. Výběr sójových rostlin s kombinovanými genetickými vlastnostmi zvýšeného obsahu vitamínu E a zvýšeného obsahu olejové kyseliny probíhal pomocí genotypové analýzy a selekce genetických markerů spojených s oběma znaky. Nejprve byly identifikovány genetické markery spojené s genetickými variantami odpovědnými za zvýšený obsah vitamínu E a zároveň za zvýšený obsah olejové kyseliny v sójových rostlinách. Následně byly provedeny genotypové analýzy sójových rostlin s cílem identifikovat ty, které obsahují požadované genetické markery pro oba znaky – zvýšený obsah vitamínu E (konkrétně byly zkoumány sekvence DNA nad genem γ -*TMT3*, odpovědného za expresi α -tokoferolu) a zvýšený obsah olejové kyseliny. Na základě výsledků genotypové analýzy byly vybrány sójové rostliny, které splňovaly požadavky pro oba znaky. Tyto rostliny byly dále šlechtěny a kříženy tak, aby byla zachována kombinace genetických variant pro zvýšený obsah vitamínu E a zároveň pro zvýšený obsah olejové kyseliny. Po opakovaném křížení a selekci byly vyvinuty nové sójové odrůdy obsahující kombinaci genetických variant pro oba znaky. Tyto nové odrůdy byly poté testovány a ověřeny, zda skutečně obsahují požadované vlastnosti. Tímto způsobem byly využity genotypová analýza a selekce genetických markerů k identifikaci a výběru sójových rostlin s požadovanými genetickými vlastnostmi (Hagely et al., 2021).

3.7.4.1 Metabolické inženýrství a genetické modifikace

Metabolické inženýrství je cílenou modifikací biochemických drah spojených s metabolismem za účelem zvýšení produkce specifických sloučenin nebo vlastností (Volk et al., 2023). V kontextu sóji, se metabolické inženýrství zaměřuje na manipulaci metabolických drah souvisejících s biosyntézou a složením oleje. Cílem tohoto přístupu je zlepšit nutriční kvalitu, funkční vlastnosti a celkovou hodnotu sójového oleje pro různé průmyslové a spotřebitelské aplikace. Metabolické inženýrství u sóji se často zaměřuje na biosyntézu mastných kyselin s cílem změnit relativní poměr nasycených, mononenasycených a polynenasycených mastných kyselin v oleji. To zahrnuje snahu o zvýšení obsahu žádaných mastných kyselin, jako je kyselina olejová, a snížení méně žádaných, jako je kyselina linolenová (List et al., 1996).

Optimalizace metabolických drah zapojených do biosyntézy oleje se dosahuje manipulací s expresí klíčových enzymů a regulačních genů. To může zahrnovat nadměrnou

expresi genů kódujících enzymy odpovědné za syntézu specifických mastných kyselin nebo potlačení genů podílejících se na tvorbě nežádoucích sloučenin (Fehr, 2007).

Genetické prvky z jiných organismů, například geny z rostlin s přirozeně vysokým obsahem kyseliny olejové, mohou být vneseny do sóji, aby jí propůjčily specifické vlastnosti. Toto vkládání cizích genů je koncipováno tak, aby se zabránilo negativním dopadům na celkový zdravotní stav rostlin a agronomickou výkonnost (Graef et al., 2009).

K potlačení exprese genů zodpovědných za syntézu nežádoucích látek lze použít techniky RNA interference (RNAi) nebo umlčování genů (gen silencing). To může vést ke snížení specifických mastných kyselin nebo jiných metabolitů, které negativně ovlivňují kvalitu oleje (Flores et al., 2008).

Strategie metabolického inženýrství mohou zahrnovat stohování více vlastností, například lepší kvalitu oleje a zvýšenou odolnost vůči škůdcům nebo chorobám. To umožňuje vývoj odrůd sóji s kombinací žádoucích vlastností.

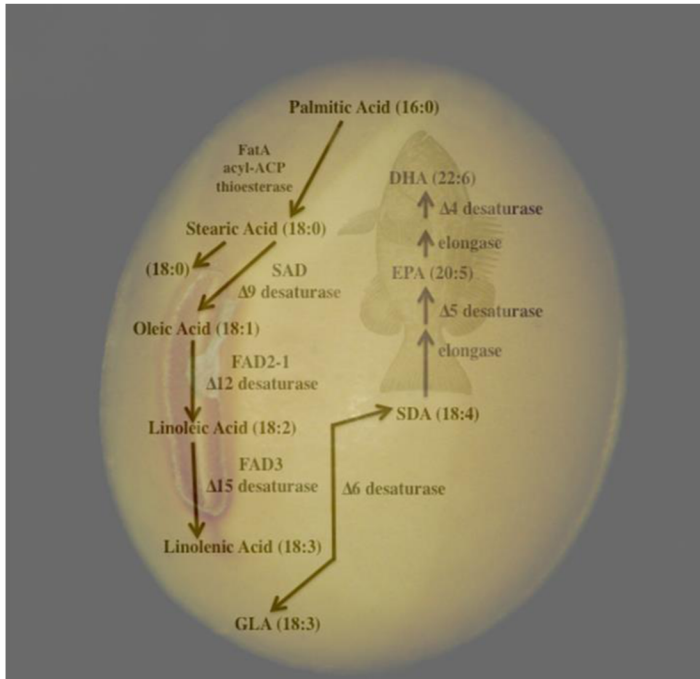
Úspěšnost metabolického inženýrství se často ověřuje pomocí analytických technik, jako je plynová chromatografie, která umožňuje přesně kvantifikovat změny ve složení mastných kyselin upraveného sójového oleje. Tyto analýzy zajišťují přesnost modifikací a pomáhají při posuzování stability upravených vlastností napříč generacemi (Li et al., 2023).

Pěstování sóji je regulováno legislativním rámcem stanovujícím normy a směrnice, které zajišťují bezpečné a etické používání geneticky modifikovaných odrůd sóji (Chen et al., 2022).

3.7.5 Genetické modifikace vedoucí ke zvýšení stability sójového oleje

Oxidační nestabilita sójového oleje vyplývá z relativně vysokého obsahu polynenasycených mastných kyselin, konkrétně kyseliny linolové a linolenové. Historicky byla tato problematika řešena prostřednictvím částečné hydrogenace, která vedla k redukci podílu polynenasycených mastných kyselin na méně než 18 % z celkového obsahu mastných kyselin, přičemž podíl kyseliny linolenové typicky klesl pod 2 %. Tímto procesem se zároveň zvyšoval obsah kyseliny olejové a stearové. Nicméně negativním důsledkem částečné hydrogenace je tvorba transmastných kyselin, které jsou spojovány s rizikem kardiovaskulárních onemocnění (Danaei et al., 2009).

Částečně hydrogenovaný sójový olej má navíc špatné vlastnosti při proudění za studena, sníženou mazivost a zvýšenou viskozitu, což omezuje jeho hodnotu jako bionafty (Moser et al., 2007). Genetické modifikace, které snižují syntézu polynenasycených mastných kyselin, lze použít ke zlepšení oxidační stability sójového oleje, aniž by došlo k produkci transmastných kyselin při zachování funkčnosti pro konečné použití. Genetické modifikace pro dosažení vyšší stability sójového oleje cílí na následující profily mastných kyselin: olej s nízkým obsahem kyseliny linolenové, olej s vysokým obsahem kyseliny olejové a olej se zvýšeným obsahem kyseliny stearové v kombinaci s vysokým obsahem kyseliny olejové (Abbadí et al., 2004; Burgal et al., 2008; Cahoon et al., 2007; Jaworski and Cahoon, 2003; Kinney, 1998) (Obrázek č.3).



Obrázek č.3: Schéma biosyntézy mastných kyselin (Clemente and Cahoon, 2009)

3.7.5.1 Snížení obsahu kyseliny linolenové – potlačení exprese *FAD3* genů

Množství kyseliny linolenové v komoditním sójovém oleji činí zhruba 10 % z celkového množství mastných kyselin, což snižuje oxidační stabilitu oleje a vede ke žluknutí a zkrácení trvanlivosti výrobků. Řada genotypů sójového oleje s nízkým obsahem kyseliny linolenové (low-lin) byla vyšlechtěna mutačním šlechtěním (Fehr et al., 1992; Hammond and Fehr, 1983; Wilcox and Cavins, 1985). Sójový olej s nízkým obsahem linolenové kyseliny má obvykle podíl kyseliny linolenové nižší než 4 %, přičemž olej s velmi nízkým obsahem linolenové kyseliny má podíl kyseliny linolenové pod 2 %. Mutace, jejichž výsledkem je fenotyp sóji pro olej s nízkým obsahem kyseliny linolenové se nachází v oblasti genu *FAD3*, který kóduje $\Delta 15$ desaturázu mastné kyseliny, která začleňuje třetí dvojnou vazbu do linolové kyseliny za vzniku kyseliny linolenové (Obrázek č.3). V sóji byly identifikovány tři geny *FAD3*, označené *GmFAD3A*, *GmFAD3B* a *GmFAD3C* odpovědné za vznik linolenové kyseliny. Ačkoli všechny tři přispívají k obsahu kyseliny linolenové v semenech, *GmFAD3A*, který je vysoce exprimován během embryogeneze, je hlavním determinantem určujícím obsah kyseliny linolenové v sójovém oleji (Bilyeu et al., 2003). Flores et al. (2008) dokázali pomocí cíleného „genesilencingu“ vytvořit fenotyp sóji s velmi nízkým obsahem linolenové kyseliny (ultra-low-lin) účinným potlačením exprese všech tří genů *GmFAD3* pomocí jediné RNA interference (posttranskripčním umlčováním genů).

Gen silencing neboli genové potlačení je regulace genové exprese, kde jsou specifické geny potlačeny nebo inhibovány. Tento proces může být dosažen pomocí mechanismů, jako je RNA interference (RNAi) nebo metylace DNA. Genové potlačení nachází uplatnění výzkumu genové funkce a s cílem zkoumat a ovlivňovat biologické procesy (Pandey et al., 2015).

Odrůdy sóji s nízkým obsahem kyseliny linolenové jsou na trhu již řadu let a jejich pěstování se zvýšilo s povinností uvádět na etiketách potravinových výrobků procentuální obsah transmastných kyselin. Snížení obsahu kyseliny linolenové v sójovém oleji sice zlepšuje oxidační stabilitu v porovnání se standardním komoditním sójovým olejem, ale toto zlepšení není dostatečné k tomu, aby byl olej klasifikován jako vysoce stabilní (Warner 2009)

3.7.5.2 Zvýšení obsahu kyseliny olejové – potlačení exprese *FAD2* genů

Oleje s vysokým podílem kyseliny olejové (>80 %) vyžadují méně zpracování, což nabízí cestu k dalšímu snížení obsahu transmastných kyselin v potravinářských výrobcích. Olej s vysokým podílem kyseliny olejové je využíván tam, kde je vyžadována jeho vysoká stabilita, jako je například pražení ořechů, nosiče chuti a barviv, maziva a smažené výrobky vyžadující prodlouženou trvanlivost (Widlak, 1999). Ve vyvíjejících se semenech sóji se kyselina olejová mění na kyselinu linolovou v jediném desaturačním kroku, který probíhá za přítomnosti enzymu $\Delta 12$ desaturázy mastných kyselin, který je kódován *FAD2* genem (Heppard et al., 1996). U sóji byly identifikovány tři geny *FAD2*, označené jako *FAD2-1A*, *FAD2-1B* a *FAD2-2*. *FAD2-1A* a *FAD2-1B* jsou exprimovány především během embryogeneze, zatímco *FAD2-2* je exprimován kontinuálně (Heppard et al., 1996; Tang et al., 2005).

K regulaci genové exprese specifických genů je využíváno potlačení nebo inhibice genové exprese (gen silencing). Tento proces může být dosažen pomocí mechanismů, jako je RNA interference (RNAi) nebo metylace DNA. Prostřednictvím posttranskripčního genesilencingu bylo dosaženo snížení exprese *FAD2-1A* a *-1B* v semenech. Takto získaná semena mají obsah kyseliny olejové přesahující 80 % celkových mastných kyselin, aniž by došlo ke změně složení mastných kyselin vegetativních tkání. Transgenní alela se navíc dědí jako jediný dominantní znak, což značně usnadňuje šlechtění (Buhr et al., 2002; Graef et al., 2009; Mazur et al., 1999).

Další metodou použitou k potlačení genů desaturázy mastných kyselin (*FAD2*) je cílená mutagenese nukleázami podobnými transkripčním aktivátorům – TALEN. TALEN (Transcription Activator-Like Effector Nucleases) jsou efektorové nukleázy, které byly vyvinuty pro cílenou úpravu genomu. TALEN jsou složeny z dvou hlavních částí: transkripční aktivátorové domény (TALE) a nukleázové domény. TALE domény jsou schopny specificky vázat určité sekvence DNA, zatímco nukleázová doména způsobuje řez v cílové DNA. Tím umožňují TALEN přesné zasahování do genomu a vytváření cílených mutací nebo úprav genů. TALEN byly speciálně navrženy tak, aby rozpoznaly a štěpily sekvence DNA současně v genech *FAD2-1A* a *FAD2-1B*. Tímto způsobem byly indukovány cílené mutace v těchto genech, což vedlo k potlačení jejich aktivity a změně v obsahu mastných kyselin v sójovém oleji. Obsah kyseliny olejové se zvýšil z 20 % na 80 % a obsah kyseliny linolové se snížil z 50 % pod 4 %. Tato metoda umožňuje přesnou manipulaci s genetickým materiálem a má potenciál v oblasti biotechnologií a léčby genetických onemocnění (Haun et al., 2014).

3.7.5.3 Zvýšení obsahu stearové kyseliny se současně zvýšeným obsahem kyseliny olejové – strategie skládání genů kombinující potlačení exprese *FAD2-1* s expresí vhodného *FatA* genu a/nebo umlčením *GmSAD-C*

Užití sójového oleje pro pečení vyžaduje funkční vlastnosti nasycených tuků. Vzhledem k negativním dopadům hydrogenace (vznik transmastných kyselin) a při současném požadavku na oxidační stabilitu a potřebnou vysokou teplotu tání, splňují tyto požadavky oleje se zvýšeným obsahem nasycených mastných kyselin v kombinaci s vysokým obsahem kyseliny olejové a nižším podílem polynenasycených mastných kyselin. Ne všechny nasycené mastné kyseliny však mají stejný vliv na kardiovaskulární zdraví, přičemž kyselina stearová je považována za kardiovaskulárně neutrální (Bonanome and Grundy, 1988; Kris-Etherton et al., 2005).

Genetické modifikace vedoucí ke zvýšení obsahu kyseliny stearové jsou zaměřeny na dvě možné cesty, které byly úspěšně ověřeny: heterologní expresi stearoyl-ACP thioesterázy (*FatA*) a mutaci nebo cílenou down-regulaci genů $\Delta 9$ -stearoyl-ACP desaturázy (*SAD*) (viz Obrázek č.2) (Knutzon et al., 1992; Liu et al., 2002). V prvním případě je exprimována varianta genu *FatA* s vysokou specifitou pro stearoyl-ACP, která uvolňuje kyselinu stearovou ze syntézy de novo mastných kyselin v plastidu pro případnou inkorporaci do triacylglycerolů v endoplazmatickém retikulu. Tento přístup byl úspěšný při produkci oleje s vysokým obsahem kyseliny stearové v semenech tropického ovoce mangostanu a v transgenní řepce (Facciotti et al., 1999; Hawkins and Kridl, 1998). U sóji je fenotyp zvýšeného obsahu kyseliny stearové řízen recesivními lokusy získaných mutagenézí. Byly identifikovány nejméně tři geny *SAD*. Bylo prokázáno, že mutace v genu *SAD-C* zvyšují obsah kyseliny stearové v semenech sóji (Zhang et al. 2008). Cílená down-regulace genů *SAD* byla rovněž úspěšná při vytváření fenotypu zvýšené kyseliny stearové u druhů *Brassica* a bavlíku (Knutzon et al., 1992). Strategie kombinující down-regulaci *FAD2-1* s expresí vhodného *FatA* a/nebo umlčením *GmSAD-C* může poskytnout požadovaný sójový olej pro následné využití v pekařství a cukrářství. Na druhou stranu vysoký obsah nasycených mastných kyselin představuje problém kvůli potenciálnímu vlivu na tekutost membrán během embryogeneze, což může negativně ovlivnit agronomii. Zvýšené hladiny nasycených mastných kyselin v sóji mohou vést ke snížení klíčivosti a výnosů spojených s tímto fenotypem (Fehr, 2007). Nicméně primárním cílem nemusí být nutně přímé využití rostlinného oleje. Místo toho by měl profil mastných kyselin sloužit jako surovina pro nákladově efektivní míchání s jinými nasycenými mastnými kyselinami a/nebo interesterifikaci triacylglycerolu za účelem výroby vhodného margarínu pro pekařské a cukrářské účely (List et al., 2001, 1997, 1996). Proto by rozumným cílem pro sójový olej vhodný pro účely míchání a/nebo interesterifikace mohlo být 20 % až 25 % kyseliny stearové a 60 % až 70 % kyseliny olejové, jak navrhuje Kok et al. (1999) a List et al. (2001), aniž by se snížila výtěžnost.

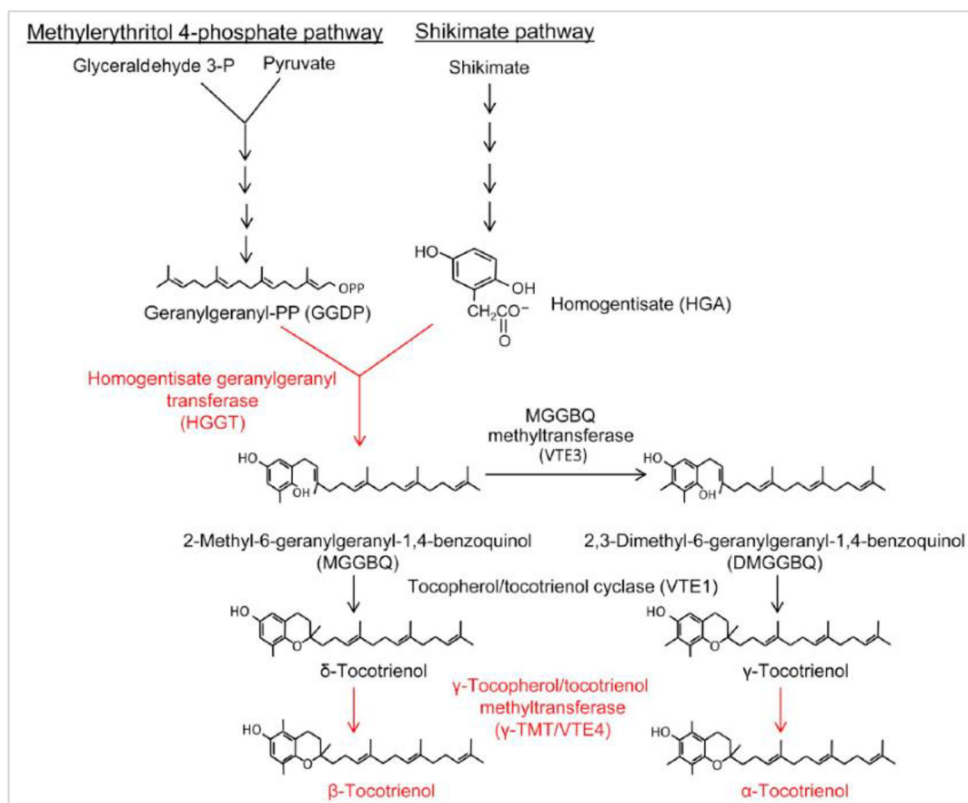
3.7.5.4 Změna složení mastných kyselin mutací

Stabilita a využitelnost sójového oleje pro spotřebitele je do značné míry dána složením mastných kyselin. Změnu složení mastných kyselin lze docílit vyvoláním mutací, tedy indukci genetické variability působením záření (např. γ -záření) nebo chemických mutagenů. Ve studii Patil et al. (2007a) byla indická odrůda sóji MACS 450 vystavena γ -záření a/nebo etylmetan sulfonátu (EMS). K analýze složení mastných kyselin u M1 rostlin byla použita plynová chromatografie. Kombinace vyšších koncentrací EMS a γ -záření vedly ke zvýšení variability obsahu mastných kyselin v sójovém oleji. Byl naměřen vysoký obsah kyseliny olejové (35-42 %) a nízký obsah kyseliny linolenové (3,77-5,00 %). Obsah kyseliny palmitové zůstal nezměněn (Patil et al., 2007a). Mutanti, kteří vykazovali žádoucí odchylky ve složení mastných kyselin, postoupili do další generace a stabilní varianty s vysokým obsahem kyseliny olejové byly vysety pro sklizeň generací M3 a M4. Poměr $\omega 6/\omega 3$ byl u všech mutantů s vysokým obsahem kyseliny olejové v rozmezí doporučené hodnoty Světové zdravotnické organizace (WHO) (5-10 %) (Patil et al., 2007b). Na základě naměřených hodnot indexu oxidační stability OSI (oxidative stability index) a indexu nutriční kvality NQI (nutritional quality index) bylo mutací a následnou selekcí dosaženo lepší oxidační stability sójového oleje při zachování výživové hodnoty (Patil et al., 2007a).

3.7.5.5 Zvýšení obsahu vitamínu E a jeho složek

Vitamin E je skupina sloučenin rozpustných v tucích, které jsou známé svými antioxidačními vlastnostmi a zásadní úlohou pro lidské zdraví. Isomery vitamínu E jsou známy svou antioxidační aktivitou, regulací genů a protizánětlivými a nefroprotektivními vlastnostmi. Vitamin E se skládá z osmi izoform, čtyř tokoferolů (α -, β -, γ -, δ -tokoferoly) a čtyř tokotrienolů (α -, β -, γ -, δ -tokotrienoly). Vitamin E je primárně syntetizován fotosyntetickými organismy a nachází se v různých potravinách rostlinného původu, jako jsou oleje, ořechy, semena, ovoce a zelenina. Kromě antioxidační aktivity je vitamin E spojován s dalšími biologickými funkcemi, včetně protizánětlivých a neuroprotektivních účinků. Má zásadní význam pro ochranu buněk před oxidačním poškozením způsobeným volnými radikály a pro udržení celkové pohody (Zaaboul and Liu, 2022).

Oxidační stabilita sójového oleje, která je pro jeho užité vlastnosti klíčová, je ovlivněna nejen obsahem polynenasycených mastných kyselin, ale také obsahem a složením tokoferolů a tokotrienolů (vitamin E). Tokoferoly, které pocházejí z plastidů, procházejí složitými cestami syntézy, jejichž výsledkem jsou různé formy. Zatímco α -tokoferol je ceněn pro vysokou výživovou hodnotu, δ - a γ -tokoferol poskytují rostlinným olejům vyšší oxidační stabilitu. Přestože tokoferoly tvoří malé procento hmotnosti sójových semen a oleje, hrají klíčovou roli v prevenci oxidace lipidů (Warner, 2005; Warner et al., 2003). V souvislosti s různorodým využitím sójového oleje, včetně smažení, pečení, bionafty a maziv, je zvýšení obsahu tokoferolů pomocí metabolického inženýrství velmi zajímavé (Erhan, Asadauskas 2000; Knothe, Van Gerpen 2010). Předchozí pokusy se zaměřily především na zvýšení aktivity homogentiát fytransferázy (HPT), klíčového enzymu při syntéze tokoferolu (Konda et al., 2020) (Obrázek č.4).



Obrázek č.4: Biosyntetická dráha vitamínu E tokotrienolu v rostlinách
převzato z: (Konda et al., 2020)

Dosažení podstatného zvýšení obsahu tokoferolu však zůstává výzvou, pravděpodobně kvůli omezenému množství substrátů. Strategie metabolického inženýrství zaměřené na syntézu homogentisátu v semenech sóji prokázaly pozoruhodný úspěch při zvyšování obsahu molekul vitamínu typu E. Regulací aktivity homogentisát fytransferázy (HPT) bylo dosaženo podstatného zvýšení hladiny homogentisátu, což vedlo k více než desetinasobnému zvýšení celkového obsahu molekul vitamínu typu E. Toto zvýšení bylo vizuálně potvrzeno nahromaděním melaninu, oxidačního produktu homogentisátu, v semenech sóji. Překvapivě převažující zvýšení obsahu vitamínu E bylo přisuzováno tokotrienolům, nenasycené formě vitamínu E, která se v semenech sóji vyskytuje ve významném množství jen zřídka. Tokotrienoly, odvozené z geranylgeranyldifosfátu a kondenzace homogentisátu, představují úspěch metabolického inženýrství, i když s nejasnostmi ohledně specifických mechanismů, kterými se řídí jejich tvorba (Konda et al., 2020).

Studie také ukázala, že zatímco semena sóji vykazují metabolickou schopnost zvýšit obsah vitamínu E ve formě tokotrienolů, zdá se, že nemají dostatečné zásoby fytoyl difosfátu pro zvýšenou produkci tokoferolů. K řešení tohoto problému byl použit alternativní přístup zahrnující expresi homogentisát geranylgeranyltransferázy (HGTT), klíčového enzymu pro biosyntézu tokotrienolů v endospermu semen jednoděložných rostlin, specifickou pro semena. Transgenní exprese HGTT ječmene v sóji vedla k významné akumulaci tokotrienolu a 6 až 10násobnému zvýšení celkového obsahu tokoferolu a tokotrienolu v semenech sóji a

somatických embryích. Tento přístup překonal přírůstky dosažené předchozími strategiemi, což ukazuje na účinnost přímé exprese HGGT (Konda et al., 2020).

Zatímco zvýšení obsahu tokotrienolů se ukázalo jako úspěšné prostřednictvím exprese HGGT, zvýšení obsahu α -tokoferolů v semenech sóji se ukázalo jako vhodnější pro metabolické inženýrství. Posunem složení z δ - a γ -tokoferolů na α -formu prostřednictvím zvýšené exprese genů pro metyltransferázy (*VTE3* a *VTE4*) přesáhl obsah α -tokoferolů v semenech sóji 90 % celkového obsahu tokoferolů (Van Eenennaam et al., 2003). Tento posun sice nezvýšil celkové množství tokoferolu, ale vedl k získání výživnějšího oleje s přibližně pětinasobným zvýšením aktivity vitamínu E. Studie mimo jiné potvrzuje, že metyltransferáza je primárním limitujícím faktorem v biosyntéze α -tokoferolu/tokotrienolu v semenech sóji (Karunanandaa et al. 2005, Meyer 2007).

Obdobné výsledky potvrdila také studie Konda et al. (2020), která prokázala, že samotná exprese transgenů HGGT specifická pro semena ječmene vedla k 8 až 10násobnému zvýšení celkového množství tokochromanolů vitamínu E v semenech sóji, především ve formě tokotrienolů a společná exprese transgenů HGGT ječmene a γ -tokoferol/tokotrienol metyltransferázy (γ -TMT) sóji vedla ke změně složení tokochromanolů s výrazným zvýšením α - a β -tokochromanolů (Konda et al., 2020).

3.7.6 Genetické modifikace vedoucí ke zlepšení nutriční hodnoty sójového oleje

3.7.6.1 Zvýšení obsahu γ -linolenové kyseliny (GLA) a kyseliny stearidonové (SDA)

Genetické strategie pro nutričně lepší sójový olej zahrnují produkci kyseliny γ -linolenové (GLA) a kyseliny stearidonové (SDA) prostřednictvím sestavení biochemických drah v rostlinných genomech. Zatímco většina rostlinných druhů obsahuje převládající mastné kyseliny, jako jsou kyselina palmitová, stearová, olejová, linolová a linolenová, komerční využití mají relativně vzácné mastné kyseliny, jako jsou GLA a SDA. Jejich vysoká cena a omezená dostupnost v původních zdrojích však brání jejich širokému využití (Horrobin 1992). Konstitutivní exprese transgenů $\Delta 6$ desaturázy z brutnáku lékařského (*Borago officinalis*) v tabáku (*Nicotiana tabacum*) vedla k významné akumulaci GLA a SDA, což ukazuje potenciál genetické modifikace pro zvýšení produkce těchto cenných mastných kyselin. Tato zjištění otevírají možnosti pro vývoj sójového oleje obohaceného o GLA a SDA, který je slibný pro různé potravinářské a krmivářské aplikace (Sayanova et al. 1997).

Vývoj nutričně obohaceného sójového oleje má významný potenciál pro použití v potravinářství a krmivářství. Studie ukázaly, že transgeny sójové boby nesoucí gen pro desaturázu $\Delta 6$ z brutnáku lékařského a gen pro desaturázu $\Delta 15$ z huseníčku rolního (*Arabidopsis thaliana*) produkovaly ve skleníkových podmínkách profil mastných kyselin s GLA, kyselinou γ -linolenovou a SDA, kyselinou stearidonovou (Eckert et al., 2006). Ačkoli

hlavní hnací silou pro vývoj nutričně vylepšeného sójového oleje jsou potravinářské aplikace, existuje také významný tržní potenciál v různých krmivářských aplikacích. Studie však ukázaly, že samotné oleje obohacené o SDA nemusí být schopny sloužit jako udržitelný zdroj, který by nahradil rybí olej (Naylor et al., 2000).

3.7.6.2 Zvýšení obsahu eikosapentaenové kyseliny (EPA) a kyseliny dokosahexaenové (DHA)

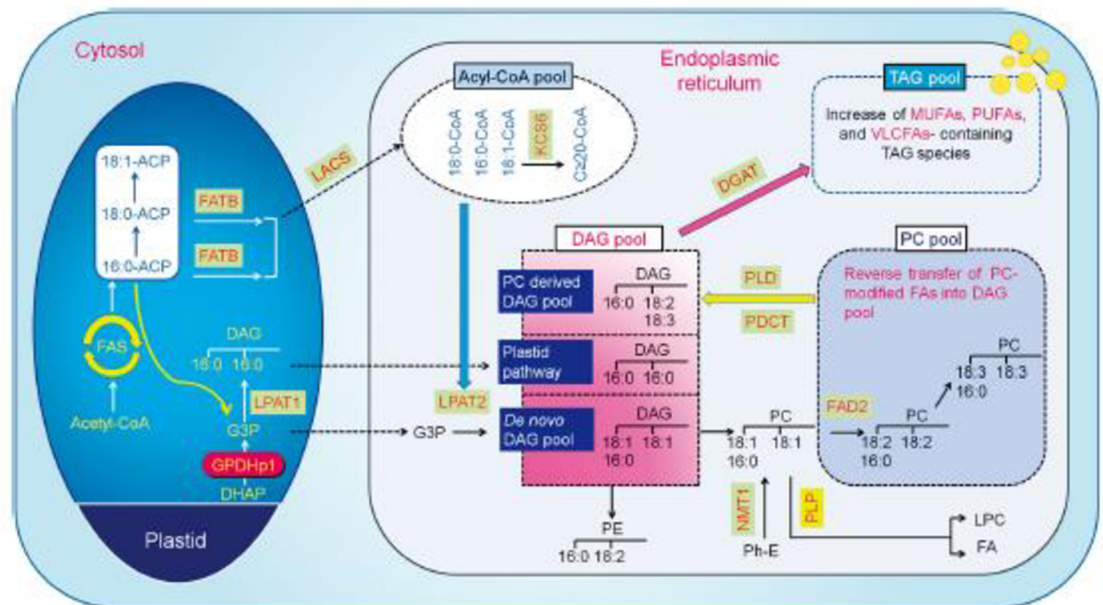
Výživové výhody omega-3 mastných kyselin s velmi dlouhým řetězcem, kyseliny eikosapentaenové (EPA) a kyseliny dokosahexaenové (DHA), podnítily zájem o vývoj sójových semen jako nákladově efektivního a udržitelného zdroje těchto zdraví prospěšných látek. Na rozdíl od ryb a řas, současných komerčních zdrojů EPA a DHA, představují sójová semena ekologicky šetrnější platformu. Předpokládané využití sójového oleje obohaceného o EPA a DHA zahrnuje výrobu různých potravin a krmiv, včetně salátových olejů, kojenecké výživy a krmiv pro chované ryby. Byly prozkoumány různé strategie, jak upravit semena sóji pro zvýšenou produkci EPA a DHA. Využití biosyntetické cesty zavedené pro kyselinu stearidonovou (SDA), prekurzor EPA (Obrázek č.2), zahrnuje zavedení kondenzačních enzymů a desaturáz. Zatímco cévnaté rostliny postrádají geny pro syntézu EPA a DHA, potenciálními zdroji jsou houby, mořské mikrořasy a protisté známé syntézou polynenasycených mastných kyselin s velmi dlouhým řetězcem. Pokusy o sestavení cest v sóji pomocí transgenů pro desaturázy a kondenzační enzymy z různých organismů přinesly významné množství EPA a v menší míře i DHA. Mezi problémy však patří akumulace meziproduktů mastných kyselin s nedefinovanými nutričními vlastnostmi. Významným omezením současných snah o metabolické inženýrství je nutnost použití více transgenů, což zvyšuje složitost regulace. Zásadním cílem zůstává dosažení ekonomicky životaschopných hladin EPA a DHA s minimálním množstvím meziproduktů. Úspěšná komercializace těchto znaků pravděpodobně vytvoří regulační precedens pro další geneticky složité nutriční znaky, což zdůrazňuje potřebu pečlivé regulační kontroly. Navzdory problémům je snaha o využití semen sóji jako zdroje EPA a DHA příslibem pro zajištění dostupné a udržitelné výživy pro různé aplikace (Griffiths et al. 1996), (Berti, Marisol & Johnson, Burton & Dash, S. & Fischer, S. & Wilckens, R. & Hevia, F.. (2007).

3.7.6.3 Zvýšení syntézy triacylglycerolů (TAG) a modifikace složení mastných kyselin

Poptávka potravinářského, krmivářského a biopalivového průmyslu po sójovém oleji vyvolala naléhavou potřebu zvýšit obsah oleje v sóji pomocí genového inženýrství. Sójový olej se skládá převážně z triacylglycerolů, které se během vývoje hromadí v semenech sóji. Uhlík pro biosyntézu TAG je získáván ze sacharózy, která se metabolizuje na glykolytické meziprodukty, které jsou poté přeneseny do plastidu, kde se z nich de novo vytvářejí mastné kyseliny. Ty jsou následně exportovány z plastidu a aktivovány na acylkoenzym A (acyl-CoA) thioestery v endoplazmatickém retikulu. V biosyntéze triacylglycerolů, které jsou obecně

známé jako tuky nebo triglyceridy, hraje klíčovou roli glycerol-3-fosfát (G3P). G3P slouží jako počáteční akceptor mastných kyselin při syntéze TAG. Poskytuje páteř, na kterou se postupně připojují mastné kyseliny a vytvářejí molekuly TAG. G3P je tedy kritickým meziproduktem při syntéze TAG (Zhao et al., 2021).

G3P vzniká mimo jiné také redukcí dihydroxyacetonfosfátu (DHAP) za vzniku G3P pomocí glycerol-3-fosfát dehydrogenázou (GPDH) s nikotinamidadenindinukleotidem (NADH) jako koenzymem (NAD⁺-GPDH). Studie naznačují, že NAD⁺-GPDH je pravděpodobně hlavním zdrojem G3P ve vyvíjejících se olejnatých semenech. Glycerol-3-fosfát dehydrogenáza (GPDH) je kódována genem *GmGPDHp1*. Zvýšením exprese *GmGPDHp1*, lze dosáhnout významného zvýšení obsahu GPDH, které v konečném důsledku vede ke zvýšení obsahu nenasycených mastných kyselin v sójovém oleji, aniž by došlo k ovlivnění růstu, obsahu bílkovin v semenech nebo váhy semen (Zhao et al., 2021). G3P metabolické dráhy jsou znázorněny na Obrázku č.5.



Obrázek č.5: Předpokládaný model G3P metabolismu a regulace produkce TAG a mastných kyselin zprostředkovaný *GmGPDHp1* (Zhao et al., 2021)

3.8 Nedědičné faktory ovlivňující kvalitu sójového oleje

Rostlina sóji je během svého růstu a vývoje semen vystavena různým environmentálním faktorům jako je například teplota, dostupnost vody a minerálních živin, způsob pěstování, typ půdy, termín setí a napadení plevelem či hmyzem. Tyto faktory se významně liší v různých zeměpisných oblastech i letech sklizně a mají významný vliv na výnos a složení semen, tedy i na množství a kvalitu sójového oleje (Kumar et al., 2006b). Vliv environmentálních faktorů je komplexní a nebyl zcela objasněn, protože polní pokusy nemohou izolovat jediný faktor prostředí a vyloučit ostatní faktory, které ovlivňují vývoj plodin sóji. Je zapotřebí provést další výzkumné studie v kontrolovaném prostředí, aby bylo možné plně pochopit vliv jednotlivých faktorů na složení sóji. Tyto informace budou velmi důležité v příštích letech, kdy je pravděpodobné, že dojde k extrémnějším výkyvům počasí. (Medic et al., 2014).

3.8.1 Výroba oleje

Nejvíce používanou metodu pro získávání sójového oleje je metoda „přímé extrakce za přítomnosti rozpouštědla“ (Johnson 2008). Extrahování oleje zahrnuje sérii následujících kroků. Na začátku procházejí sójové boby procesem čištění, loupání a rozlámání, aby byly připraveny k extrakci. Rozlámané sójové boby jsou pak vloženy do extraktoru, kde přicházejí do kontaktu s rozpouštědlem, nejčastěji hexanem. Rozpouštědlo pomáhá rozpustit olej ze sójových bobů a vytváří směs oleje a rozpouštědla. Tato směs je následně zpracována přes desolventizační „toaster“ kde dochází k odstranění rozpouštědla, čímž zůstane jen extrahovaný olej (Johnson 2008).

Výpary rozpouštědla jsou kondenzovány zpět do tekuté formy pro opětovné použití, a veškeré zbývající stopy rozpouštědla jsou odstraněny z extrahovaného oleje. Metoda přímého extrahování za pomoci rozpouštědla je výhodná pro nákladovou efektivitu a schopnost dosáhnout vysokých výtěžků oleje ve srovnání s tradičními lisovacími metodami, což ji činí preferovanou volbou pro velkovýrobu oleje ze sójových bobů (Ribeiro et al. 2006).

Zásadním faktorem pro dosažení optimální kvality sójového oleje je přesné pochopení používaných technologií během výrobního procesu. Toto porozumění je klíčové pro účinnou optimalizaci výrobních postupů s cílem zajistit, co nejvíce kvalitní olej (Ribeiro et al. 2006).

3.8.2 Teplota

Vliv teploty na složení a stabilitu sójového oleje je významný. Studie ukazují, že teplota má vliv na celkový obsah oleje, složení mastných kyselin a stabilitu oleje v sójových bobech. Vyšší teploty mohou vést k vyššímu obsahu oleje a vyšší koncentraci kyseliny olejové a nižšímu obsahu kyselin linolové a linolenové (Wolf et al., 1982). Dále bylo zjištěno, že teplota může ovlivnit enzymy kontrolující biosyntézu mastných kyselin sójových semen, zejména během fáze plnění semen. Studie také naznačují, že teplota může ovlivnit desaturázy kyseliny olejové a linolenové, což má vliv na složení mastných kyselin v sójovém oleji (Cheesbrough 1989). Důležitým faktorem je také genotyp sójových plodin a jeho interakce s prostředím, což naznačuje potřebu dalšího výzkumu v oblasti genotypu a prostředí pro zajištění stability

požadovaných vlastností mastných kyselin v různých prostředích. Tyto poznatky jsou klíčové pro vývoj sójových plodin s požadovanými vlastnostmi mastných kyselin, které mohou ovlivnit stabilitu a kvalitu oleje v různých prostředích (Bellaloui et al., 2015).

3.8.3 Vlhkost půdy

Vliv půdní vlhkosti na složení a stabilitu semen sóji je mnohostranný a v literatuře jsou uváděny rozporuplné výsledky. Načasování a intenzita stresu suchem během vývoje semen hrají důležitou roli. Nedostatek vody v období setí semen snižuje počet semen na rostlině, zatímco nedostatek vody v pozdějších fázích vývoje semen zkracuje dobu jejich plnění, čímž dochází ke zmenšení velikosti sójových bobů. Vztah mezi deficitem vlhkosti půdy a složením semen sóji však stále zůstává kontroverzní. Výsledky některých studií ukázaly, že stres ze sucha může snížit obsah oleje v semenech o 10-25 % (Rotundo and Westgate, 2009; Specht et al., 2001), zatímco výsledkem jiných studií bylo zvýšení obsahu oleje o 4 % při deficitu vody (Specht et al. 2001; Boydak et al. 2002; Bellaloui, Reddy, Mengistu 2015). Tyto studie naznačují, že reakce rostliny na deficit půdní vlhkosti může být závislá na odrůdě sóji. Bylo zjištěno, že složení mastných kyselin v semenech sóji je citlivé na úroveň srážek. Obzvláště citlivé jsou kyselina olejová a kyselina linolová. Obsah kyseliny palmitové, stearové a linolenové je pod vlivem srážek relativně stabilní. Velký vliv na stabilitu oleje mají správné skladovací podmínky, tedy chladné a suché prostředí. Vysoké teploty a vlhkost mohou vést k oxidaci lipidů, což může způsobit žluknutí a nepříjemné chutě sójového oleje (Bellaloui et al., 2015).

3.8.4 Skladování

Skladování sójových zrn má zásadní vliv na kvalitu sójového oleje. Teplota ve skladovacím prostoru je klíčovým faktorem pro stabilitu mastných kyselin v sóji. Prudké teplotní výkyvy zvyšují riziko oxidace, což může snížit nutriční hodnotu oleje. Bylo zjištěno, že optimální teplota skladování semen v semihermetickém obalu se pohybuje okolo 15 °C při vzdušné vlhkosti 12 % až 16 % (Ziegler et al., 2016).

Vlhkost vzduchu ve skladovacím prostoru je tedy druhým důležitým faktorem při skladování semen. Vysoká vlhkost podporuje růst plísní a bakterií, což může negativně ovlivnit kvalitu oleje. Udržování konstantní a optimální teploty a vlhkosti vzduchu je klíčové. Optimální hodnoty teploty a vzdušné vlhkosti při skladování semen sóji se liší podle specifické odrůdy a podle doby skladování. Vlastnost, která se u každé odrůdy liší je obsah vody, která souvisí s vodní aktivitou neboli obsahem vody dostupné pro mikroorganismy (Coradi et al., 2020).

Dlouhodobé skladování přináší riziko ztráty nutričních hodnot a zvýšení oxidačních procesů, což může ovlivnit stabilitu a životnost oleje. Dodržení skladovacích podmínek a správné zvolení obalů je klíčové pro minimalizaci negativních vlivů prostředí (Alencar et al., 2010).

4 Závěr

Sója (*Glycine max*), je celosvětově významnou plodinou, která nachází uplatnění v řadě odvětví. Semena sóji jsou zdrojem rostlinných bílkovin, tuků a řady bioaktivních látek prospěšných zdraví. Vzhledem k velkému potenciálu využití sóji se na její pěstování a šlechtění zaměřuje celá řada odborníků i vědeckých studií.

Cílem práce bylo se formou literární rešerše zaměřit zejména na literárně prezentované poznatky o dědičných a nedědičných faktorech, které ovlivňují kvalitu sójového oleje jako potraviny a zejména na aktuální trendy výzkumu využívajících znalosti a metody genového inženýrství.

Z dostupné literatury a vědeckých studií je zřejmé, že kvalitu sójového oleje ovlivňuje zejména složení a poměrné zastoupení nenasycených mastných kyselin. To může být ovlivněno jak dědičnými, tak nedědičnými faktory. Žádný z faktorů nepůsobí samostatně, ale vždy jde o jejich komplexní působení a vzájemné ovlivňování.

Mezi významné nedědičné faktory patří zejména teplota a vláha během setí, růstu a sklizně rostlin. Tyto environmentální faktory ovlivňují, jak složení mastných kyselin v semenech, tak velikost a počet semen. Teplota a vlhkost hrají svoji významnou roli také při skladování již vyrobeného sójového oleje. Ať již kvůli strukturálním změnám mastných kyselin, které mohou během skladování probíhat a které mají dopad na oxidační stabilitu a chuť oleje, tak kvůli potenciálnímu napadení oleje mikroorganismy. Kvalita, respektive složení a stabilita sójového oleje je ovlivněna i samotnou výrobou, tedy postupem získání oleje ze semen.

Jedním z podstatných faktorů ovlivňujících složení mastných kyselin v semenech sóji se jeví specifický genom sóji. Již historicky se snažili vědci tradičními metodami šlechtitelství vypěstovat odrůdy s požadovanými vlastnostmi, respektive specifickým zastoupením mastných kyselin, zejména s vyšším obsahem kyseliny olejové a nižšími obsahy kyselin linolové a linolenové. Čistě konvenční šlechtitelství bylo však časově a realizačně náročné.

Rozkódování genomu sóji a aplikace metod sekvenování DNA a RNA spolu s vylepšením metod selekce pomocí molekulárních markerů, rozšířily tradiční metody šlechtění o metabolické inženýrství a genetické modifikace. Použití těchto nových metod významným způsobem zefektivnilo šlechtění odrůd sóji s požadovanými vlastnostmi. Genetické úpravy sóji se zaměřují na optimalizaci metabolických drah zapojených do biosyntézy oleje. Zejména manipulace s expresí klíčových enzymů a regulačních genů.

Publikované články popisují zejména genetické modifikace zvyšující obsah kyseliny olejové a snižující obsah polynenasycených mastných kyselin vedoucí ke zlepšení oxidační stability oleje při zachování jeho nutriční hodnoty nebo modifikace navyšující obsah specifických látek jako například složek vitamínu E a dalších metabolitů procesu biosyntézy.

V publikovaných studiích byly pro genetické modifikace sóji použity různé metody, například umlčování genů jak na úrovni DNA, tak na úrovni RNA (postranskpční umlčování genů), mutageneze nukleázami, kombinace skládání a umlčování genů, mutace γ -zářením nebo chemickým mutagenem etylmetan sulfonátem nebo vkládání transgenů.

Pěstování sóji je obecně regulováno legislativním rámcem stanovujícím normy a směrnice, které zajišťují bezpečné a etické používání geneticky modifikovaných odrůd.

Vzhledem k vysokým nutričním hodnotám sóji, širší spektra jejího využití a současným trendům zdravé výživy se dá očekávat, že pěstování sóji a šlechtění nových odrůd s požadovanými vlastnostmi bude i nadále pokračovat.

5 Literatura

- Abbadi, A., Domergue, F., Bauer, J., Napier, J.A., Welti, R., Zähringer, U., Cirpus, P., Heinz, E., 2004. Biosynthesis of Very-Long-Chain Polyunsaturated Fatty Acids in Transgenic Oilseeds: Constraints on Their Accumulation. *Plant Cell* 16, 2734–2748. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.026070>
- Alencar, E.R. de, Faroni, L.R.D., Peternelli, L.A., Silva, M.T.C. da, Costa, A.R., 2010. Influence of soybean storage conditions on crude oil quality. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14, 303–308. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300010>
- Anderson, J.W., Baird, P., Davis Jr, R.H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters, V., Williams, C.L., 2009. Health benefits of dietary fiber. *Nutr Rev* 67, 188–205. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2009.00189.x>
- Ayan, A., Meriç, S., Gümüş, T., Atak, Ç., 2022. Current Strategies and Future of Mutation Breeding in Soybean Improvement, in: *Soybean - Recent Advances in Research and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104796>
- Bachlava, E., Burton, J.W., Brownie, C., Wang, S., Auclair, J., Cardinal, A.J., 2008. Heritability of Oleic Acid Content in Soybean Seed Oil and Its Genetic Correlation with Fatty Acid and Agronomic Traits. *Crop Sci* 48, 1764–1772. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.01.0049>
- Banaszkiewicz, T., Burssens, S., Petry, I., Ngudi, D.D., Kuo, Y.-H., Van Montagu, M., Lambein, F., 2011. Soya, Human Nutrition and Health, Nutritional Value of Soybean Meal, in: El-Shemy, H. (Ed.), *Soybean and Nutrition*. InTech. <https://doi.org/10.5772/1008>
- Bellaloui, N., Reddy, K.N., Mengistu, A., 2015. Drought and Heat Stress Effects on Soybean Fatty Acid Composition and Oil Stability, in: *Processing and Impact on Active Components in Food*. Elsevier, pp. 377–384. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00045-7>
- Bennett, J.O., Krishnan, A.H., Wiebold, W.J., Krishnan, H.B., 2003. Positional Effect on Protein and Oil Content and Composition of Soybeans. *J Agric Food Chem* 51, 6882–6886. <https://doi.org/10.1021/jf0343711>
- Bilyeu, K.D., Palavalli, L., Sleper, D.A., Beuselinck, P.R., 2003. Three Microsomal Omega-3 Fatty-acid Desaturase Genes Contribute to Soybean Linolenic Acid Levels. *Crop Sci* 43, 1833–1838. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1833>
- Bonanome, A., Grundy, S.M., 1988. Effect of Dietary Stearic Acid on Plasma Cholesterol and Lipoprotein Levels. *New England Journal of Medicine* 318, 1244–1248. <https://doi.org/10.1056/NEJM198805123181905>
- Boydak, E., Alpaslan, M., Hayta, M., Gerçek, S., Simsek, M., 2002. Seed Composition of Soybeans Grown in the Harran Region of Turkey As Affected by Row Spacing and Irrigation. *J Agric Food Chem* 50, 4718–4720. <https://doi.org/10.1021/jf0255331>

- Brady A. Vick, J.F.M., 2002. Lipid Biotechnology, in: Lipid Biotechnology.
- Buhr, T., Sato, S., Ebrahim, F., Xing, A., Zhou, Y., Mathiesen, M., Schweiger, B., Kinney, A., Staswick, P., 2002. Ribozyme termination of RNA transcripts down-regulate seed fatty acid genes in transgenic soybean. *The Plant Journal* 30, 155–163. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01283.x>
- Burgal, J., Shockey, J., Lu, C., Dyer, J., Larson, T., Graham, I., Browse, J., 2008. Metabolic engineering of hydroxy fatty acid production in plants: RcDGAT2 drives dramatic increases in ricinoleate levels in seed oil. *Plant Biotechnol J* 6, 819–831. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2008.00361.x>
- Cahoon, E.B., 2003. Genetic Enhancement of Soybean Oil for Industrial Uses: Prospects and Challenges. Plant Genetics Research Unit, United States Department of Agriculture Agricultural Research Service.
- Cahoon, E.B., Shockey, J.M., Dietrich, C.R., Gidda, S.K., Mullen, R.T., Dyer, J.M., 2007. Engineering oilseeds for sustainable production of industrial and nutritional feedstocks: solving bottlenecks in fatty acid flux. *Curr Opin Plant Biol* 10, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.005>
- Cannon, S.B., May, G.D., Jackson, S.A., 2009. Three Sequenced Legume Genomes and Many Crop Species: Rich Opportunities for Translational Genomics. *Plant Physiol* 151, 970–977. <https://doi.org/10.1104/pp.109.144659>
- Cheesbrough, T.M., 1989. Changes in the Enzymes for Fatty Acid Synthesis and Desaturation during Acclimation of Developing Soybean Seeds to Altered Growth Temperature. *Plant Physiol* 90, 760–764. <https://doi.org/10.1104/pp.90.2.760>
- Chen, S.-P.J., Li, M.-W., Wong, H.-Y., Wong, F.-L., Wu, T., Gai, J., Han, T., Lam, H.-M., 2022. The Seed Quality Assurance Regulations and Certification System in Soybean Production—A Chinese and International Perspective. *Agriculture* 12, 624. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050624>
- Clemente, T.E., Cahoon, E.B., 2009. Soybean Oil: Genetic Approaches for Modification of Functionality and Total Content. *Plant Physiol* 151, 1030–1040. <https://doi.org/10.1104/pp.109.146282>
- Coradi, P.C., Lima, R.E., Padia, C.L., Alves, C.Z., Teodoro, P.E., Carina da Silva Cândido, A., 2020. Soybean seed storage: Packaging technologies and conditions of storage environments. *J Stored Prod Res* 89, 101709. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101709>
- Damude, H.G., Kinney, A.J., 2008. Engineering oilseeds to produce nutritional fatty acids. *Physiol Plant* 132, 1–10. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.00998.x>
- Danaei, G., Ding, E.L., Mozaffarian, D., Taylor, B., Rehm, J., Murray, C.J.L., Ezzati, M., 2009. The Preventable Causes of Death in the United States: Comparative Risk Assessment of Dietary, Lifestyle, and Metabolic Risk Factors. *PLoS Med* 6, e1000058. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000058>

- DeSoucey, M., Schleifer, D., 2010. Technique and Technology in the Kitchen: Comparing Resistance to Municipal Trans. pp. 185–218. [https://doi.org/10.1108/S1059-4337\(2010\)0000051010](https://doi.org/10.1108/S1059-4337(2010)0000051010)
- Dolde, D., Vlahakis, C., Hazebroek, J., 1999. Tocopherols in breeding lines and effects of planting location, fatty acid composition, and temperature during development. *J Am Oil Chem Soc* 76, 349–355. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0242-9>
- Dr. Robert Wisner, 2013. Soybean Oil and Biodiesel Usage Projections & Balance Sheet.
- Eckert, H., LaVallee, B., Schweiger, B.J., Kinney, A.J., Cahoon, E.B., Clemente, T., 2006. Co-expression of the borage $\Delta 6$ desaturase and the Arabidopsis $\Delta 15$ desaturase results in high accumulation of stearidonic acid in the seeds of transgenic soybean. *Planta* 224, 1050–1057. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0291-3>
- Ensminger, M.E., Oldfield, J.E., Heinemann, W.W., 1990. Feeds and Nutrition. The Ensminger Publishing Company, Clovis.
- Erhan, S.Z., Asadauskas, S., 2000. Lubricant basestocks from vegetable oils. *Ind Crops Prod* 11, 277–282. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00061-8)
- Facciotti, M.T., Bertain, P.B., Yuan, L., 1999. Improved stearate phenotype in transgenic canola expressing a modified acyl-acyl carrier protein thioesterase. *Nat Biotechnol* 17, 593–597. <https://doi.org/10.1038/9909>
- Fasina, Y., Classen, H., Garlich, J., Swaisgood, H., Clare, D., 2003. Investigating the possibility of monitoring lectin levels in commercial soybean meals intended for poultry feeding using steam-heated soybean meal as a model. *Poult Sci* 82, 648–656. <https://doi.org/10.1093/ps/82.4.648>
- Fehr, W.R., 2007. Breeding for Modified Fatty Acid Composition in Soybean. *Crop Sci* 47. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0004IPBS>
- Fehr, W.R., Welke, G.A., Hammond, E.G., Duvick, D.N., Cianzio, S.R., 1992. Inheritance of Reduced Linolenic Acid Content in Soybean Genotypes A16 and A17. *Crop Sci* 32, 903–906. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200040013x>
- Ferry, S., 2002. Inositol hexakisphosphate blocks tumor cell growth by activating apoptotic machinery as well as by inhibiting the Akt/NFkappaB-mediated cell survival pathway. *Carcinogenesis* 23, 2031–2041. <https://doi.org/10.1093/carcin/23.12.2031>
- Flores, T., Karpova, O., Su, X., Zeng, P., Bilyeu, K., Sleper, D.A., Nguyen, H.T., Zhang, Z.J., 2008. Silencing of GmFAD3 gene by siRNA leads to low α -linolenic acids (18:3) of fad3-mutant phenotype in soybean [*Glycine max* (Merr.)]. *Transgenic Res* 17, 839–850. <https://doi.org/10.1007/s11248-008-9167-6>
- Friedman, M., Brandon, D.L., 2001. Nutritional and Health Benefits of Soy Proteins. *J Agric Food Chem* 49, 1069–1086. <https://doi.org/10.1021/jf0009246>

- Gerde, J., Hardy, C., Fehr, W., White, P.J., 2007. Frying Performance of No- *trans* , Low-Linolenic Acid Soybean Oils. *J Am Oil Chem Soc* 84, 557–563. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1066-0>
- Graef, G., LaVallee, B.J., Tenopir, P., Tat, M., Schweiger, B., Kinney, A.J., Van Gerpen, J.H., Clemente, T.E., 2009. A high-oleic-acid and low-palmitic-acid soybean: agronomic performance and evaluation as a feedstock for biodiesel. *Plant Biotechnol J* 7, 411–421. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00408.x>
- Griffiths, G., Brechany, E.Y., Jackson, F.M., Christie, W.W., Stymne, S., Stobart, A.K., 1996. Distribution and biosynthesis of stearidonic acid in leaves of *Borago officinalis*. *Phytochemistry* 43, 381–386. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(96\)00305-6](https://doi.org/10.1016/0031-9422(96)00305-6)
- Hagely, K., Konda, A.R., Kim, J.-H., Cahoon, E.B., Bilyeu, K., 2021. Molecular-assisted breeding for soybean with high oleic/low linolenic acid and elevated vitamin E in the seed oil. *Molecular Breeding* 41, 3. <https://doi.org/10.1007/s11032-020-01184-y>
- Hammond, E.G., Fehr, W.R., 1983. Registration of A5 Germplasm Line of Soybean ¹ (reg. No. GP44). *Crop Sci* 23, 192–192. <https://doi.org/10.2135/cropsci1983.0011183X002300010085x>
- Haun, W., Coffman, A., Clasen, B.M., Demorest, Z.L., Lowy, A., Ray, E., Retterath, A., Stoddard, T., Juillerat, A., Cedrone, F., Mathis, L., Voytas, D.F., Zhang, F., 2014. Improved soybean oil quality by targeted mutagenesis of the fatty acid desaturase 2 gene family. *Plant Biotechnol J* 12, 934–940. <https://doi.org/10.1111/pbi.12201>
- Hawkins, D.J., Kridl, J.C., 1998. Characterization of acyl-ACP thioesterases of mangosteen (*Garcinia mangostana*) seed and high levels of stearate production in transgenic canola. *The Plant Journal* 13, 743–752. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1998.00073.x>
- Heppard, E.P., Kinney, A.J., Stecca, K.L., Miao, G.H., 1996. Developmental and Growth Temperature Regulation of Two Different Microsomal [omega]-6 Desaturase Genes in Soybeans. *Plant Physiol* 110, 311–319. <https://doi.org/10.1104/pp.110.1.311>
- Herman, E., 2005. Soybean Allergenicity and Suppression of the Immunodominant Allergen. *Crop Sci* 45, 462–467. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0462>
- Horrobin, D.F., 1992. Nutritional and medical importance of gamma-linolenic acid. *Prog Lipid Res* 31, 163–194. [https://doi.org/10.1016/0163-7827\(92\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0163-7827(92)90008-7)
- Hymowitz, T., 1970. On the domestication of the soybean. *Econ Bot* 24, 408–421. <https://doi.org/10.1007/BF02860745>
- Hymowitz, T., Newell, C.A., 1981. Taxonomy of the genus *Glycine*, domestication and uses of soybeans. *Econ Bot* 35, 272–288. <https://doi.org/10.1007/BF02859119>
- Imaizumi, K., Tominaga, A., Sato, M., Sugano, M., 1992. Effects of dietary sphingolipids on levels of serum and liver lipids in rats. *Nutrition Research* 12, 543–548. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(05\)80024-7](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(05)80024-7)

- Israel, D.W., Kwanyuen, P., Burton, J.W., Walker, D.R., 2007. Response of Low Seed Phytic Acid Soybeans to Increases in External Phosphorus Supply. *Crop Sci* 47, 2036–2046. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.11.0691>
- Jaworski, J., Cahoon, E.B., 2003. Industrial oils from transgenic plants. *Curr Opin Plant Biol* 6, 178–184. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00013-X)
- Jimenez, M.A., Scarino, M.L., Vignolini, F., Mengheri, E., 1990. Evidence that Polyunsaturated Lecithin Induces a Reduction in Plasma Cholesterol Level and Favorable Changes in Lipoprotein Composition in Hypercholesterolemic Rats. *J Nutr* 120, 659–667. <https://doi.org/10.1093/jn/120.7.659>
- Johnson, L.A., 2008. Oil Recovery from Soybeans, in: *Soybeans*. Elsevier, pp. 331–375. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-64-6.50014-7>
- Johnson, P.J.W.R.G., 2008. *Soybeans: Chemistry, Production, Processing, and Utilization*.
- Kamal-Eldin, A., Appelqvist, L., 1996. The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols. *Lipids* 31, 671–701. <https://doi.org/10.1007/BF02522884>
- KangII, J., Matsumura, Y., Mori, T., 1991. Characterization of texture and mechanical properties of heat-induced soy protein gels. *J Am Oil Chem Soc* 68, 339–345. <https://doi.org/10.1007/BF02657690>
- Karr-Lilienthal, L.K., Grieshop, C.M., Spears, J.K., Fahey, G.C., 2005. Amino Acid, Carbohydrate, and Fat Composition of Soybean Meals Prepared at 55 Commercial U.S. Soybean Processing Plants. *J Agric Food Chem* 53, 2146–2150. <https://doi.org/10.1021/jf048385i>
- Karunanandaa, B., Qi, Q., Hao, M., Baszis, S.R., Jensen, P.K., Wong, Y.-H.H., Jiang, J., Venkatramesh, M., Gruys, K.J., Moshiri, F., Post-Beittenmiller, D., Weiss, J.D., Valentin, H.E., 2005. Metabolically engineered oilseed crops with enhanced seed tocopherol. *Metab Eng* 7, 384–400. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2005.05.005>
- Kenneth, D.S., 1998. Phytoestrogens: the biochemistry, physiology, and implications for human health of soy isoflavones. *Am J Clin Nutr* 68, 1333S–1346S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/68.6.1333S>
- Kinney, A.J., 1998. Plants as industrial chemical factories - new oils from genetically engineered soybeans. *Lipid - Fett* 100, 173–176. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4133\(19985\)100:4/5<173::AID-LIPI173>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4133(19985)100:4/5<173::AID-LIPI173>3.0.CO;2-D)
- Knothe, G., Van Gerpen, J. (Eds.), 2010. *The Biodiesel Handbook*. AOCS Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003040262>
- Knutzon, D.S., Thompson, G.A., Radke, S.E., Johnson, W.B., Knauf, V.C., Kridl, J.C., 1992. Modification of Brassica seed oil by antisense expression of a stearoyl-acyl carrier protein desaturase gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 89, 2624–2628. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.7.2624>

- Kobayashi, T., Shimizugawa, T., Osakabe, T., Watanabe, S., Okuyama, H., 1997. A LONG-TERM FEEDING OF SPHINGOLIPIDS AFFECTED THE LEVELS OF PLASMA CHOLESTEROL AND HEPATIC TRIACYLGLYCEROL BUT NOT TISSUE PHOSPHOLIPIDS AND SPHINGOLIPIDS. *Nutrition Research* 17, 111–114. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(96\)00237-0](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(96)00237-0)
- Konda, A.R., Nazareus, T.J., Nguyen, H., Yang, J., Gelli, M., Swenson, S., Shipp, J.M., Schmidt, M.A., Cahoon, R.E., Ciftci, O.N., Zhang, C., Clemente, T.E., Cahoon, E.B., 2020. Metabolic engineering of soybean seeds for enhanced vitamin E tocopherol content and effects on oil antioxidant properties in polyunsaturated fatty acid-rich germplasm. *Metab Eng* 57, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2019.10.005>
- Kris-Etherton, P.M., Griel, A.E., Psota, T.L., Gebauer, S.K., Zhang, J., Etherton, T.D., 2005. Dietary stearic acid and risk of cardiovascular disease: Intake, sources, digestion, and absorption. *Lipids* 40, 1193–1200. <https://doi.org/10.1007/s11745-005-1485-y>
- Krishnan, H.B., 2000. Biochemistry and Molecular Biology of Soybean Seed Storage Proteins. *Journal of New Seeds* 2, 1–25. https://doi.org/10.1300/J153v02n03_01
- Kritchevsky, D., Chen, S.C., 2005. Phytosterols—health benefits and potential concerns: a review. *Nutrition Research* 25, 413–428. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2005.02.003>
- Kulasek, G., Leonowicz, H., Krzemiński, R., 1995. Bioaktywne substancje w pokarmach dla ludzi i zwierząt (cz.I). Czynniki antyżywniowe. *Magazyn Weterynaryjny*.
- Kumar, V., Rani, A., Goyal, L., Dixit, A.K., Manjaya, J.G., Dev, J., Swamy, M., 2010. Sucrose and Raffinose Family Oligosaccharides (RFOs) in Soybean Seeds As Influenced by Genotype and Growing Location. *J Agric Food Chem* 58, 5081–5085. <https://doi.org/10.1021/jf903141s>
- Kumar, V., Rani, A., Solanki, S., Hussain, S.M., 2006a. Influence of growing environment on the biochemical composition and physical characteristics of soybean seed. *Journal of Food Composition and Analysis* 19, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.06.005>
- Kumar, V., Rani, A., Solanki, S., Hussain, S.M., 2006b. Influence of growing environment on the biochemical composition and physical characteristics of soybean seed. *Journal of Food Composition and Analysis* 19, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.06.005>
- Lagarda, M.J., García-Llatas, G., Farré, R., 2006. Analysis of phytosterols in foods. *J Pharm Biomed Anal* 41, 1486–1496. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.02.052>
- Lee, S.J., Ahn, J.K., Kim, S.H., Kim, J.T., Han, S.J., Jung, M.Y., Chung, I.M., 2003. Variation in Isoflavone of Soybean Cultivars with Location and Storage Duration. *J Agric Food Chem* 51, 3382–3389. <https://doi.org/10.1021/jf0261405>
- Li, Q., Cai, S., Xu, D., Lin, J., Shen, G., Feng, J., 2023. Comparative Analysis of Nutritional Composition Between GM and Non-GM Soybeans and Soybean Oils by NMR and GC-FID Techniques. *Food Anal Methods* 16, 478–490. <https://doi.org/10.1007/s12161-022-02435-8>

- List, G.R., Mounts, T.L., Orthoefer, F., Neff, W.E., 1997. Effect of interesterification on the structure and physical properties of high-stearic acid soybean oils. *J Am Oil Chem Soc* 74, 327–329. <https://doi.org/10.1007/s11746-997-0145-6>
- List, G.R., Mounts, T.L., Orthoefer, F., Neff, W.E., 1996. Potential margarine oils from genetically modified soybeans. *J Am Oil Chem Soc* 73, 729–732. <https://doi.org/10.1007/BF02517948>
- List, G.R., Pelloso, T., Orthoefer, F., Warner, K., Neff, W.E., 2001. Soft margarines from high stearic acid soybean oils. *J Am Oil Chem Soc* 78, 103–104. <https://doi.org/10.1007/s11746-001-0227-x>
- Liu, K., 1997. *Soybeans: Chemistry, Technology and Utilization*.
- Liu, Q., Singh, S., Green, A., 2002. High-Oleic and High-Stearic Cottonseed Oils: Nutritionally Improved Cooking Oils Developed Using Gene Silencing. *J Am Coll Nutr* 21, 205S-211S. <https://doi.org/10.1080/07315724.2002.10719267>
- M. Canakci, A. Monyem, J. Van Gerpen, 1999. ACCELERATED OXIDATION PROCESSES IN BIODIESEL. *Transactions of the ASAE* 42, 1565–1572. <https://doi.org/10.13031/2013.13321>
- Maenz, D.D., Irish, G.G., Classen, H.L., 1999. Carbohydrate-binding and agglutinating lectins in raw and processed soybean meals. *Anim Feed Sci Technol* 76, 335–343. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(98\)00215-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(98)00215-6)
- Maughan, P.J., Maroof, M.A.S., Buss, G.R., 2000. Identification of quantitative trait loci controlling sucrose content in soybean (*Glycine max*). *Molecular Breeding* 6, 105–111. <https://doi.org/10.1023/A:1009628614988>
- Mazur, B., Krebbers, E., Tingey, S., 1999. Gene Discovery and Product Development for Grain Quality Traits. *Science* (1979) 285, 372–375. <https://doi.org/10.1126/science.285.5426.372>
- Medic, J., Atkinson, C., Hurburgh, C.R., 2014. Current Knowledge in Soybean Composition. *J Am Oil Chem Soc* 91, 363–384. <https://doi.org/10.1007/s11746-013-2407-9>
- Middelbos, I.S., Fahey, G.C., 2008. Soybean Carbohydrates, in: *Soybeans*. Elsevier, pp. 269–296. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-64-6.50012-3>
- Moser, B.R., Haas, M.J., Winkler, J.K., Jackson, M.A., Erhan, S.Z., List, G.R., 2007. Evaluation of partially hydrogenated methyl esters of soybean oil as biodiesel. *European Journal of Lipid Science and Technology* 109, 17–24. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200600215>
- Mozaffarian, D., 2006. Trans fatty acids – Effects on systemic inflammation and endothelial function. *Atheroscler Suppl* 7, 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2006.04.007>
- Murphy P, 2008. *Soybeans*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02416-9>

- Naylor, R.L., Goldberg, R.J., Primavera, J.H., Kautsky, N., Beveridge, M.C.M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., Troell, M., 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017–1024. <https://doi.org/10.1038/35016500>
- Nguyen, H.T., Bhattacharyya, M.K., 2017. Botany and Cytogenetics of Soybean, in: Nguyen, H.T., Bhattacharyya, M.K. (Eds.), *The Soybean Genome*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64198-0>
- Nielsen, N.C., Bassüner, R., Beaman, T., 1997. The Biochemistry and Cell Biology of Embryo Storage Proteins. pp. 151–220. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8909-3_5
- Obendorf, R.L., Zimmerman, A.D., Ortiz, P.A., Taylor, A.G., Schnebly, S.R., 2008. Imbibitional Chilling Sensitivity and Soluble Carbohydrate Composition of Low Raffinose, Low Stachyose Soybean Seed. *Crop Sci* 48, 2396–2403. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.12.0706>
- Olivera, A., Rivera, J., 2005. Sphingolipids and the Balancing of Immune Cell Function: Lessons from the Mast Cell. *The Journal of Immunology* 174, 1153–1158. <https://doi.org/10.4049/jimmunol.174.3.1153>
- Oltmans, S.E., Fehr, W.R., Welke, G.A., Raboy, V., Peterson, K.L., 2005. Agronomic and Seed Traits of Soybean Lines with Low-Phytate Phosphorus. *Crop Sci* 45, 593–598. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0593>
- P. M. Dey, R.A.D., 1985. *Biochemistry of Storage Carbohydrates in Green Plants*.
- Pandey, P., Senthil-Kumar, M., Mysore, K.S., 2015. Advances in Plant Gene Silencing Methods. pp. 3–23. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2453-0_1
- Patil, A., Taware, S.P., Oak, M.D., Tamhankar, S.A., Rao, V.S., 2007a. Improvement of Oil Quality in Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] by Mutation Breeding. *J Am Oil Chem Soc* 84, 1117–1124. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1146-1>
- Patil, A., Taware, S.P., Oak, M.D., Tamhankar, S.A., Rao, V.S., 2007b. Improvement of Oil Quality in Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] by Mutation Breeding. *J Am Oil Chem Soc* 84, 1117–1124. <https://doi.org/10.1007/s11746-007-1146-1>
- Pokorný, J., Schmidt, Stefan, 2010. Plant Lipids and Oils. pp. 249–271. <https://doi.org/10.1201/b10272-15>
- Prodöhl, I., 2023. *Globalizing the Soybean*. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9781003255222>
- Raboy, V., Dickinson, D.B., 1993. Phytic Acid Levels in Seeds of *Glycine max* and *G. soja* as Influenced by Phosphorus Status. *Crop Sci* 33, 1300–1305. <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300060036x>
- Raboy, V., Dickinson, D.B., Below, F.E., 1984. Variation in Seed Total Phosphorus, Phytic Acid, Zinc, Calcium, Magnesium, and Protein among Lines of *Glycine max* and *G. soja* ¹. *Crop Sci* 24, 431–434. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400030001x>

- Ravindran, V., Cabahug, S., Ravindran, G., Selle, P.H., Bryden, W.L., 2000. Response of broiler chickens to microbial phytase supplementation as influenced by dietary phytic acid and non-phytate phosphorous levels. II. Effects on apparent metabolisable energy, nutrient digestibility and nutrient retention. *Br Poult Sci* 41, 193–200. <https://doi.org/10.1080/00071660050022263>
- RIBEIRO, A., DEMOURA, J., GONCALVES, L., PETRUS, J., VIOTTO, L., 2006. Solvent recovery from soybean oil/hexane miscella by polymeric membranes. *J Memb Sci* 282, 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.036>
- Richard M. Shibles, J.E.H.R.F.W.R.C.S., 2004. Soybeans: Improvement, Production, and Uses, 3rd ed. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr16.3ed>
- Rodríguez, R., Jiménez, A., Fernández-Bolaños, J., Guillén, R., Heredia, A., 2006. Dietary fibre from vegetable products as source of functional ingredients. *Trends Food Sci Technol* 17, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.002>
- Rotundo, J.L., Westgate, M.E., 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Res* 110, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.012>
- Sakai, T., Kogiso, M., 2008. Soy isoflavones and immunity. *The Journal of Medical Investigation* 55, 167–173. <https://doi.org/10.2152/jmi.55.167>
- Sattler, S.E., Cahoon, E.B., Coughlan, S.J., DellaPenna, D., 2003. Characterization of Tocopherol Cyclases from Higher Plants and Cyanobacteria. Evolutionary Implications for Tocopherol Synthesis and Function. *Plant Physiol* 132, 2184–2195. <https://doi.org/10.1104/pp.103.024257>
- Sayanova, O., Smith, M.A., Lapinskas, P., Stobart, A.K., Dobson, G., Christie, W.W., Shewry, P.R., Napier, J.A., 1997. Expression of a borage desaturase cDNA containing an N-terminal cytochrome *b₅* domain results in the accumulation of high levels of Δ^6 -desaturated fatty acids in transgenic tobacco. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94, 4211–4216. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.8.4211>
- Scherder, C.W., Fehr, W.R., 2008. Agronomic and Seed Characteristics of Soybean Lines with Increased Oleate Content. *Crop Sci* 48, 1755–1758. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.01.0043>
- Schmutz, J., Cannon, S.B., Schlueter, J., Ma, J., Mitros, T., Nelson, W., Hyten, D.L., Song, Q., Thelen, J.J., Cheng, J., Xu, D., Hellsten, U., May, G.D., Yu, Y., Sakurai, T., Umezawa, T., Bhattacharyya, M.K., Sandhu, D., Valliyodan, B., Lindquist, E., Peto, M., Grant, D., Shu, S., Goodstein, D., Barry, K., Futrell-Griggs, M., Abernathy, B., Du, J., Tian, Z., Zhu, L., Gill, N., Joshi, T., Libault, M., Sethuraman, A., Zhang, X.-C., Shinozaki, K., Nguyen, H.T., Wing, R.A., Cregan, P., Specht, J., Grimwood, J., Rokhsar, D., Stacey, G., Shoemaker, R.C., Jackson, S.A., 2010. Genome sequence of the palaeopolyploid soybean. *Nature* 463, 178–183. <https://doi.org/10.1038/nature08670>

- Schwender, J., Ohlrogge, J.B., Shachar-Hill, Y., 2003. A Flux Model of Glycolysis and the Oxidative Pentosephosphate Pathway in Developing Brassica napus Embryos. *Journal of Biological Chemistry* 278, 29442–29453. <https://doi.org/10.1074/jbc.M303432200>
- Sebastian, S., Touchburn, S.P., Chavez, E.R., 1998. Implications of phytic acid and supplemental microbial phytase in poultry nutrition: a review. *Worlds Poult Sci J* 54, 27–47. <https://doi.org/10.1079/WPS19980003>
- Specht, J.E., Chase, K., Macrander, M., Graef, G.L., Chung, J., Markwell, J.P., Germann, M., Orf, J.H., Lark, K.G., 2001. Soybean Response to Water: A QTL Analysis of Drought Tolerance. *Crop Sci* 41, 493–509. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.412493x>
- Stevenson, D.G., Doorenbos, R.K., Jane, J., Inglett, G.E., 2006. Structures and Functional Properties of Starch From Seeds of Three Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Varieties*. *Starch - Stärke* 58, 509–519. <https://doi.org/10.1002/star.200600534>
- Sugano, M., 2005. SOY in Health and Disease Prevention. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420026566>
- Swiderska-Kielbik, S., Krakowiak, A., Wittczak, T., Pałczyrisk, C., 2005. [Occupational allergy: a major health hazard among food processing workers]. *Med Pr.*
- Tan, S.T., Tan, S.S., Tan, C.X., 2023. Soy protein, bioactive peptides, and isoflavones: A review of their safety and health benefits. *PharmaNutrition* 25, 100352. <https://doi.org/10.1016/J.PHANU.2023.100352>
- Tang, G., Novitzky, W.P., Carol Griffin, H., Huber, S.C., Dewey, R.E., 2005. Oleate desaturase enzymes of soybean: evidence of regulation through differential stability and phosphorylation. *The Plant Journal* 44, 433–446. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02535.x>
- Thompson, L.U., Zhang, L., 1991. Phytic acid and minerals: effect on early markers of risk for mammary and colon carcinogenesis. *Carcinogenesis* 12, 2041–2045. <https://doi.org/10.1093/carcin/12.11.2041>
- Ujiie, A., Yamada, T., Fujimoto, K., Endo, Y., Kitamura, K., 2005. Identification of Soybean Varieties with High .ALPHA.-Tocopherol Content. *Breed Sci* 55, 123–125. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.55.123>
- Utsumi, S., Matsumura, Y., Mori, T., 2017. Structure-Function Relationships of Soy Proteins, in: *Food Proteins and Their Applications*. CRC Press, pp. 257–292. <https://doi.org/10.1201/9780203755617-9>
- Van Eenennaam, A.L., Lincoln, K., Durrett, T.P., Valentin, H.E., Shewmaker, C.K., Thorne, G.M., Jiang, J., Baszis, S.R., Levering, C.K., Aasen, E.D., Hao, M., Stein, J.C., Norris, S.R., Last, R.L., 2003. Engineering Vitamin E Content: From Arabidopsis Mutant to Soy Oil. *Plant Cell* 15, 3007–3019. <https://doi.org/10.1105/tpc.015875>
- Van Eys, J.E., Offner, A., Bach, A., 2004. Chemical Analysis. *Manual of Quality Analysis for Soybean Products in the Feed Industry*. American Soybean Association.

- Verma, D.P.S.; S.R.C., 1996. Soybean: genetics, molecular biology and biotechnology.
- Vincent, A., Fitzpatrick, L.A., 2000. Soy Isoflavones: Are They Useful in Menopause? *Mayo Clin Proc* 75, 1174–1184. <https://doi.org/10.4065/75.11.1174>
- Volk, M.J., Tran, V.G., Tan, S.-I., Mishra, S., Fatma, Z., Boob, A., Li, H., Xue, P., Martin, T.A., Zhao, H., 2023. Metabolic Engineering: Methodologies and Applications. *Chem Rev* 123, 5521–5570. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00403>
- Vucenik, I., Shamsuddin, A.M., 2003. Cancer Inhibition by Inositol Hexaphosphate (IP6) and Inositol: From Laboratory to Clinic. *J Nutr* 133, 3778S-3784S. <https://doi.org/10.1093/jn/133.11.3778S>
- Wang, H., Murphy, P.A., 1994. Isoflavone Composition of American and Japanese Soybeans in Iowa: Effects of Variety, Crop Year, and Location. *J Agric Food Chem* 42, 1674–1677. <https://doi.org/10.1021/jf00044a017>
- Wang, T., 2008. Minor Constituents and Phytochemicals of Soybeans, in: *Soybeans*. Elsevier, pp. 297–329. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-64-6.50013-5>
- Wang, T., Hammond, E.G., Fehr, W.R., 1997. Phospholipid fatty acid composition and stereospecific distribution of soybeans with a wide range of fatty acid composition. *J Am Oil Chem Soc* 74, 1587–1594. <https://doi.org/10.1007/s11746-997-0082-4>
- WARNER, K., 2009. OXIDATIVE AND FLAVOR STABILITY OF TORTILLA CHIPS FRIED IN EXPPELLER PRESSED LOW LINOLENIC ACID SOYBEAN OIL*. *Journal of Food Lipids* 16, 133–147. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2009.01137.x>
- Warner, K., 2005. Effects on the Flavor and Oxidative Stability of Stripped Soybean and Sunflower Oils with Added Pure Tocopherols. *J Agric Food Chem* 53, 9906–9910. <https://doi.org/10.1021/jf0517593>
- Warner, K., Neff, W.E., Eller, F.J., 2003. Enhancing Quality and Oxidative Stability of Aged Fried Food with γ -Tocopherol. *J Agric Food Chem* 51, 623–627. <https://doi.org/10.1021/jf020937e>
- Weaver, C.M., Cheong, J.M.K., 2005. Soy Isoflavones and Bone Health: The Relationship Is Still Unclear. *J Nutr* 135, 1243–1247. <https://doi.org/10.1093/jn/135.5.1243>
- Webster, B.D., Leopold, A.C., 1977. The Ultrastructure of Dry and Imbibed Cotyledons of Soybean. *Am J Bot* 64, 1286. <https://doi.org/10.2307/2442492>
- Widlak, N., 1999. Physical Properties of Fats, Oils, and Emulsifiers.
- Wilcox, J.R., Cavins, J.F., 1985. Inheritance of low linolenic acid content of the seed oil of a mutant in *Glycine max*. *Theoretical and Applied Genetics* 71, 74–78. <https://doi.org/10.1007/BF00278257>
- Winiarska-Mieczan, A., 2007. Bowman-Birk trypsyn inhibitors: their structure and value in human and animal feeding 276–281.

- Wolf, R.B., Cavins, J.F., Kleiman, R., Black, L.T., 1982. Effect of temperature on soybean seed constituents: Oil, protein, moisture, fatty acids, amino acids and sugars. *J Am Oil Chem Soc* 59, 230–232. <https://doi.org/10.1007/BF02582182>
- Yazdi-Samadi, B., Rinne, R.W., Seif, R.D., 1977. Components of Developing Soybean Seeds: Oil, Protein, Sugars, Starch, Organic Acids, and Amino Acids ¹. *Agron J* 69, 481–486. <https://doi.org/10.2134/agronj1977.00021962006900030037x>
- Zaaboul, F., Liu, Y., 2022. Vitamin E in foodstuff: Nutritional, analytical, and food technology aspects. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 21, 964–998. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12924>
- Zeisel, S.H., 1992. Choline: an important nutrient in brain development, liver function and carcinogenesis. *J Am Coll Nutr* 11, 473–481. <https://doi.org/10.1080/07315724.1992.10718251>
- Zhang, P., Burton, J.W., Upchurch, R.G., Whittle, E., Shanklin, J., Dewey, R.E., 2008. Mutations in a Δ^9 -Stearoyl-ACP-Desaturase Gene Are Associated with Enhanced Stearic Acid Levels in Soybean Seeds. *Crop Sci* 48, 2305–2313. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.02.0084>
- Zhao, Ying, Cao, P., Cui, Y., Liu, D., Li, J., Zhao, Yabin, Yang, S., Zhang, B., Zhou, R., Sun, M., Guo, X., Yang, M., Xin, D., Zhang, Z., Li, X., Lv, C., Liu, C., Qi, Z., Xu, J., Wu, X., Chen, Q., 2021. Enhanced production of seed oil with improved fatty acid composition by overexpressing NAD⁺-dependent glycerol-3-phosphate dehydrogenase in soybean. *J Integr Plant Biol* 63, 1036–1053. <https://doi.org/10.1111/jipb.13094>
- Ziegler, V., Marini, L.J., Ferreira, C.D., Bertinetti, I.A., Silva, W.S.V. da, Goebel, J.T., Oliveira, M. De, Elias, M.C., 2016. Efeitos da temperatura e umidade durante o armazenamento semi-hermético sobre parâmetros de avaliação da qualidade dos grãos e do óleo de soja. *Semin Cienc Agrar* 37, 131. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n1p131>