



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AMONIAK JAKO ALTERNATIVNÍ PALIVO

AMMONIA AS AN ALTERNATIVE FUEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Radil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Jan Radil**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Amoniak jako alternativní palivo

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza vlastností amoniaku jako možné součásti cesty k nízkouhlíkovému hospodářství.

Cíle bakalářské práce:

Popsat vlastnosti amoniaku jako paliva.

Popsat technologii výroby amoniaku, jeho transport a skladování.

Provést porovnání s alternativním palivem vodíkem.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. ISBN 978-0-230-57663-6.

ŽIDKOVÁ, Petra. Příručka produkce biopaliv: Handbook of bio fuels production. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2476-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Náhrada současných fosilních paliv jakožto jednou z hlavních příčin vysokého obsahu nežádoucích částic v ovzduší zelenější alternativou rok od roku nabývá na důležitosti. Amoniak se v posledních letech stává jedním z nejčastěji zkoumaných alternativních paliv s potenciálem snížit emise skleníkových plynů v dopravě a energetice. Bakalářská práce zkoumá problematiku této látky v kontextu jejího využití jako paliva. Práce přináší přehled o stávajícím stavu výzkumu a vývoje amoniaku jako alternativního paliva a poukazuje na jeho potenciál a výzvy při přechodu na nízkouhlíkovou ekonomiku. Čtenář je seznámen se základními vlastnostmi amoniaku, technologií výroby, dopravy a skladování. Nechybí zde ani porovnání s jinými palivy, zejména pak s vodíkem, jakožto dalšího alternativního paliva. Dále je uveden přehled možností použití amoniaku jako paliva v současných spalovacích motorech a palivových článcích. Tento přehled je podložen několika studii a výzkumy, které se aktuálně zabývají touto problematikou. Mimo jiné práce uvádí současně nejvíce probírané projekty aplikace amoniaku jako paliva v automobilovém a námořním odvětví průmyslu. V závěru jsou všechny získané informace shrnuty a vyvozena konkrétní stanoviska z hlediska možné budoucnosti aplikace amoniaku jako paliva.

KLÍČOVÁ SLOVA

Amoniak, bezuhlíkové palivo, alternativní palivo, výroba amoniaku, skladování amoniaku

ABSTRACT

Replacing current fossil fuels as one of the main causes of the high levels of unwanted particles in the air with greener alternatives is growing in importance every year. In recent years, ammonia has become one of the most frequently investigated alternative fuels with the potential to reduce greenhouse gas emissions in the transport and energy sectors. This bachelor thesis examines the issue of this substance in the context of its use as a fuel. Thesis brings an overview of the current state of research and development of ammonia as an alternative fuel and highlights its potential and challenges in the transition to a low-carbon economy. The reader is introduced to the basic properties of ammonia, production, transport and storage technologies. Comparisons with other fuels, in particular hydrogen, as another alternative fuel are also included. An overview of the possible applications of ammonia as a fuel in current internal combustion engines and fuel cells is also given. This overview is supported by several studies and researches that are currently dealing with this issue. Besides this, the thesis also mentions the most discussed projects for the application of ammonia as a fuel in the automotive and marine industries. In conclusion, all the collected informations are summarized and specific conclusions are drawn in terms of possible future applications of ammonia as a fuel.

KEYWORDS

Ammonia, carbon-free fuel, alternative fuel, ammonia production, ammonia storage

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RADIL, Jan. *Amoniak jako alternativní palivo*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Václav Píštěk.

Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/156766>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Václava Píštěka, DrSc., a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Jan Radil

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc., za jeho čas, ochotu, věcné připomínky a odborná doporučení při vypracovávání této práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Historie amoniaku	11
2 Vlastnosti amoniaku	12
3 Výroba amoniaku	15
3.1 Generace 1	17
3.2 Generace 2	17
3.3 Generace 3	18
4 Doprava a skladování amoniaku	20
4.1 Plyn pod tlakem	22
4.2 Chlazené palivo	22
4.3 Skladování absorpcí	23
5 Amoniak jako palivo	24
5.1 Spalovací motory	24
5.1.1 Čistý amoniak	25
5.1.2 Palivové směsi amoniaku	26
5.2 Palivové články	29
5.2.1 Palivové články s tuhými oxidy	30
5.2.2 Alkalické a alkalické membránové palivové články	32
6 Současné aplikace amoniaku jako paliva	34
6.1 Námořní průmysl	34
6.2 Automobilový průmysl	34
6.2.1 Amweh	34
6.2.2 Marangoni toyota GT-86 eco explorer	35
6.2.3 Spalovací motor na čistý amoniak?	35
6.2.4 Amogy truck	35
Závěr	37
Použité informační zdroje	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	48

ÚVOD

Přeprava ať už osob, nebo různého nákladu pomocí dopravních prostředků je v dnešní době neodmyslitelnou součástí lidského života. S rostoucí světovou populací a kvalitou života lze očekávat, že se poptávka po různých způsobech dopravy bude jenom zvyšovat. S touto poptávkou však roste i míra škodlivých látek v ovzduší, zvláště pak oxidu uhličitého (CO₂). Hledání udržitelných a ekologicky šetrných zdrojů energie proto v dnešním světě patří mezi klíčové výzvy. Nejvíce protlačovanou alternativou k nynějším fosilním palivům jsou v této době zejména elektromobily. Ovšem i elektromobily, které jsou mnohdy označovány za zcela ekologické, nejsou ve skutečnosti tak zelené, jak se na první pohled může zdát. Kromě elektromobilů se také v posledních letech často ozývají názory, že další možnou cestou k vyřešení problémů spojených s tvorbou CO₂ by mohl být vodík. Kromě vodíku se mimo jiné nabízí další řada alternativních paliv. Jedním z nich je právě amoniak. Tato chemická sloučenina, zejména známá jako surovina pro výrobu hnojiv, zaujímá stále významnější postavení v oblasti alternativních paliv.

Cílem této bakalářské práce je podrobně prozkoumat vlastnosti amoniaku z pohledu palivové aplikace a zhodnotit jeho potenciál jako paliva. Práce se zaměřuje na popis chemických, fyzikálních a energetických vlastností amoniaku, které umožňují jeho využití jako efektivního zdroje energie. Dále jsou v práci rozebrány technologie výroby amoniaku, včetně přehledu hlavních postupů a procesů, které jsou v současnosti využívány v průmyslu. Důraz je kladen také na otázky týkající se transportu a skladování amoniaku, včetně bezpečnostních aspektů spojených s jeho manipulací. Práce mimo jiné uvádí konkrétní studie a výsledky zabývající se právě použitím amoniaku jako paliva.

Kromě těchto aspektů se práce zaměřuje na porovnání amoniaku s jinými alternativními palivy, zejména pak vodíkem. Zahrnuty jsou jak energetické a ekonomické aspekty, tak i možné výhody a nevýhody těchto látek v kontextu jejich použití jako paliva. Porovnání těchto dvou látek poskytne ucelený pohled na jejich potenciál umožňující identifikovat oblasti, ve kterých by amoniak mohl být vhodnější volbou. Dále se práce pokusí odpovědět na otázku, zdali může amoniak uspět i mezi ostatními alternativami jako palivo budoucnosti.

V závěru práce jsou shrnuty hlavní poznatky a závěry vyplývající z provedené analýzy. Celkově lze očekávat, že tato práce přinese čtenáři kvalitní a ucelený přehled současného stavu poznání a vývoje využití amoniaku jako paliva s ohledem na jeho využití v kontextu současných trendů.

1 HISTORIE AMONIAKU

Počátkem 19. století se v důsledku rostoucí populace začala zvyšovat poptávka po dusičnanech a amoniaku jakožto surovinách pro výrobu hnojiv v zemědělství. Jediným takovým zdrojem byla dříve pouze těžba chilského ledku, též známého jako dusičnan sodný. Na začátku 20. století se předpovídalo, že vzhledem k vysoké poptávce tyto zásoby budou nedostačující [1]. Vznikají tak snahy získávat hnojiva jiným způsobem. Počátkem 20. století přichází německý vědec Fritz Haber s katalytickým procesem pro výrobu amoniaku. V létě roku 1909 společně se svým asistentem vyvinul vysokotlakové zařízení a katalyzátory potřebné k demonstraci výrobního procesu v laboratorním měřítku. Produkce tehdy činila přibližně 125 ml amoniaku za hodinu [2]. Chemická společnost BASF tento proces zakoupila a svěřila jej svému vědci Carlu Boschovi s úkolem převést tuto laboratorní metodu do průmyslového měřítka. Průmyslová výroba amoniaku pomocí Haberova procesu započala v roce 1913. Během následujícího roku dosahovala produkce amoniaku až 20 tun za den [3].

Myšlenka použití amoniaku jako alternativního paliva není žádnou novinkou. Za druhé světové války v roce 1943 došlo v Belgii k jeho prvnímu použití. Vzhledem k extrémnímu nedostatku motorové nafty se kapalný amoniak využíval jako palivo pro autobusy ve speciálně vyvinutém hybridním motoru na směs amoniaku a svítiplynu. Autobusy ve své době najezdily desítky tisíc kilometrů [4]. Neoficiální zdroje dokonce tvrdí, že v době této palivové krize někteří obyvatelé využívali toto hybridní palivo i pro své osobní automobily. Jakmile však byla fosilní paliva opět dostupná, od tohoto paliva se upustilo [5].

Počátkem 60. let minulého století vznikl ve Spojených státech experimentální raketový letoun North America X-15. Palivem byla experimentální směs tekutého amoniaku a kapalného kyslíku. Kapalný amoniak byl v počáteční fázi zkoušen jako náhrada kapalného petroleje v proudových motorech. Tento motor poskytoval tah až 250 500 N. Přestože se jednalo pouze o experimentální letoun, dokázal překonat tehdejší rychlostní rekord nejvyšší dosažené rychlosti stroje pilotovaného lidskou posádkou. Dosažená rychlost byla 6,72 Ma a dodnes nebyl tento rekord překonán [6]. I přes všechny tyto úspěchy se nakonec od amoniaku upustilo. Hlavními důvody byly nepříznivé vlastnosti samotného amoniaku a také nedostatek leteckých dat, která by mohla dále prohloubit znalosti v této oblasti [7], [8]. Od té doby nedošlo k žádnému dalšímu využití amoniaku jak ve vojenském, tak ani v civilním letectví [9].

V roce 2007 se ve Spojených státech objevilo první automobilové vozidlo s názvem Ammonia Fuel Truck, které fungovalo na bázi hybridního paliva benzínu a amoniaku. Jako důkaz funkčnosti procestoval automobil trasu z Východního na Západní pobřeží. Tento experiment opět prokázal schopnost použití amoniaku jako alternativního paliva v automobilovém odvětví [4].

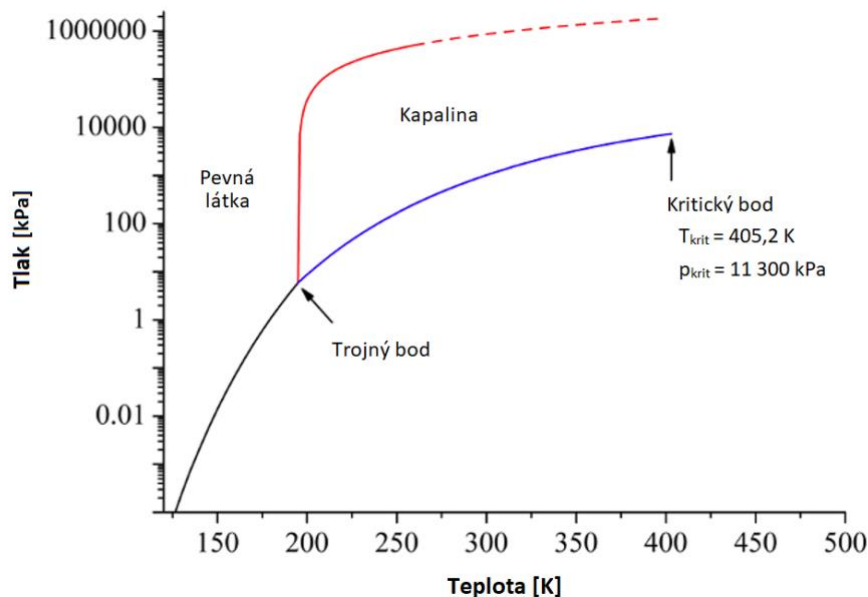
2 VLASTNOSTI AMONIAKU

Amoniak je alkalický, bezbarvý plyn s ostrým štiplavým zápachem. Na *obr. 1* je zobrazena molekula amoniaku, která má tvar trigonální pyramidy se třemi atomy vodíku a nesdílným párem elektronů připojených k atomu dusíku [10].



Obr. 1 Model molekuly amoniaku [11]

Při pokojové teplotě a atmosférickém tlaku se amoniak vyskytuje v plynné fázi. Jednotlivá skupenství amoniaku na základě tlaku a teploty lze stanovit z fázového diagramu, viz *obr. 2*. Teplota trojného bodu je 195,4 K při tlaku 6,060 kPa [12].



Obr. 2 Fázový diagram amoniaku; upraveno dle [12]

Vybrané fyzikální a chemické vlastnosti amoniaku jsou uvedeny níže v *tab. 1*. Díky své nízké hustotě je amoniak v plynném stavu lehčí než vzduch. Tato vlastnost má za následek formu hustého aerosolového mraku [13]. Amoniak je též vysoce rozpustný ve vodě. Při smíšení s malým množstvím vody se přeměňuje na hydroxid amonný, který je vysoce korozivní pro řadu materiálů, včetně zinku, mědi a mosazi [14], [15].

Tab. 1 Vlastnosti amoniaku [16], [17], [18]

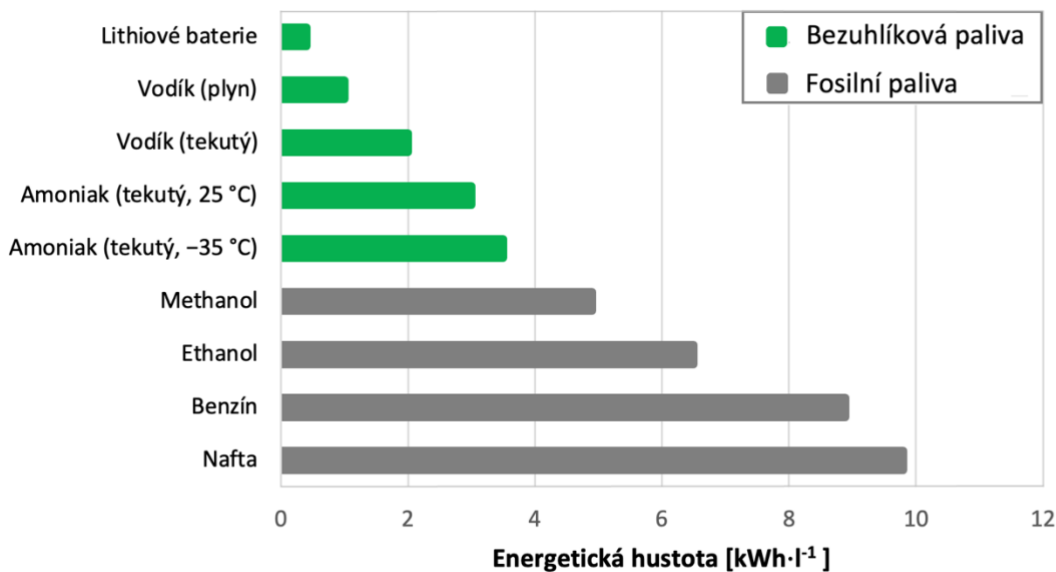
Další názvy	čpavek, azan, amoniak bezvodý
Chemický vzorec	NH ₃
Molární hmotnost	17,031 g·mol ⁻¹
Chemické složení (hmotnostní)	
dusík	82,35 %
vodík	17,65 %
Skupenství	Při 20 °C a atmosférickém tlaku plynná látka
Zápach	čpavkový zápach
Teplota tání	-77,73 °C / 195,42 K
Teplota varu	-33,34 °C / 239,81 K
Teplota samovznícení (101,3 kPa)	651 °C / 930 K
Relativní hustota, kapalina (vzduch = 1)	0,73
Relativní hustota, plyn (vzduch = 1)	0,65
Energetický obsah	18,6 MJ·kg ⁻¹
Mez výbušnosti ve vzduchu	16,6–27,2 %
Laminární rychlost hoření	0,06–0,08 m·s ⁻¹
Cetanolové číslo	0
Oktanové číslo	110–130
Výparné teplo	1371 kJ·kg ⁻¹
Minimální energie vznícení	680 mJ

Ostrý a pronikavý zápach amoniaku lze cítit již při koncentracích 5–30 ppm. Podle nařízení Evropského parlamentu je amoniak klasifikován jako nebezpečná látka. Jako většina chemikálií je amoniak nebezpečný při vdechování a potenciálně i smrtelný. Při kontaktu s pokožkou může kapalný amoniak způsobit podráždění a vážné popáleniny. Při koncentracích 1700 ppm se mohou objevit zdravotní problémy, jako je kašel. Expozice koncentracím 2500–4500 ppm po dobu přibližně 30 minut může být smrtelná [14]. Právě toxicita amoniaku dosud zakazovala většinu vážných úvah o jeho použití jako paliva [13], [19].

Amoniak se chová podobně jako uhlovodíkové páry a s rostoucí teplotou se limity hořlavosti rozšiřují. Limity ve vzduchu při pokojové teplotě (16,6–27,2 %) se zvyšují na 13,1–34,3 % při teplotě 573 K a na 11,2–37,1 % při teplotě 673 K [15], [20]. Vysoká hodnota výparného tepla a nízká reaktivita však mají za následek nízkou hořlavost. Tyto vlastnosti vedou k tomu, že teplo získané ve spalovacím procesu je obvykle nedostačující k odpaření dostatečného množství kapaliny pro udržení spalovacího procesu. Spalování amoniaku ve vzduchu je proto problematické a obvykle je zapotřebí dalších zdrojů vznícení [21]. Z pohledu bezpečnosti jsou tak rizika vyplývající z jeho hořlavosti ve srovnání s uhlovodíkovými a jinými chemickými látkami mnohem nižší [14], [16].

Objemová hustota energie amoniaku je přibližně 3 kWh·l⁻¹ [22]. Jak je vidět na *obr. 3*, ve srovnání s fosilními palivy je objemová hustota energie amoniaku nižší, ale jako bezuhlíkové palivo je amoniak mezi ostatními palivy z tohoto hlediska nejlepší. Objemová hustota energie amoniaku je přibližně desetkrát vyšší než objemová hustota lithiových baterií [23]. Množství energie uloženého v kapalném amoniaku dle objemu dokonce převyšuje množství energie

uložené v kapalném vodíku až o 30 % [15]. Z těchto hodnot lze jasně vyvodit závěr, že amoniak je jako medium pro přenos vodíku lepší než samotný vodík.

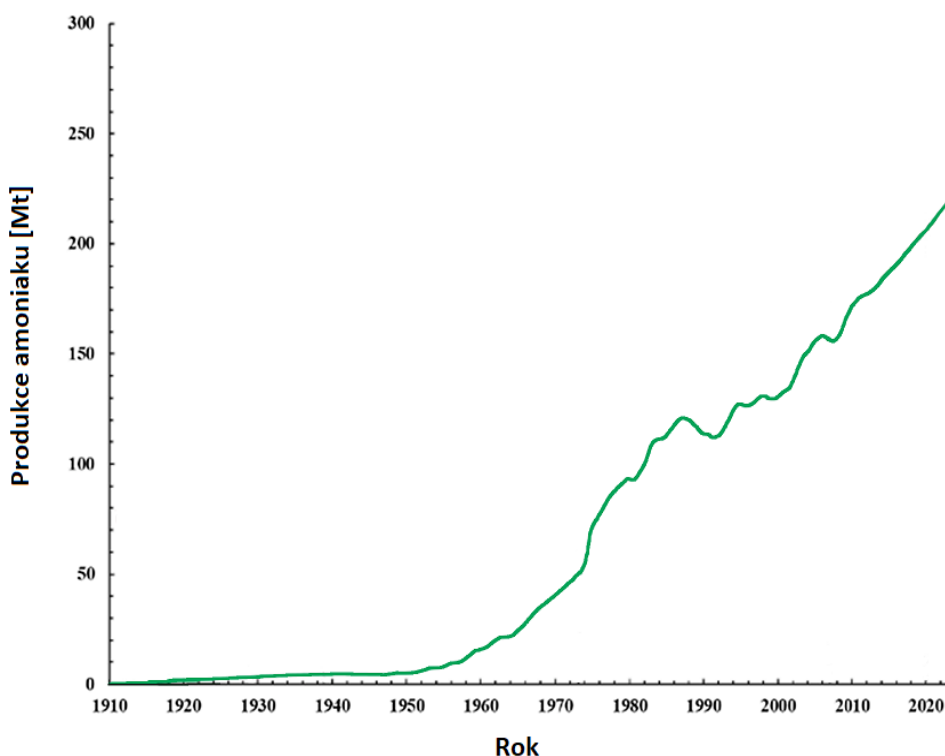


Obr. 3 Objemová hustota energie vybraných paliv; upraveno dle [22]

Přestože amoniak neprodukuje CO₂, produkuje emise oxidu dusného (N₂O) a obecně oxidů dusíku (NO_x). Tyto emise mohou být zmírněny optimálními strategiemi spalování a systémy následného zpracování. Emise NO_x je možné snížit prostřednictvím již existujících a známých technologií snižování NO_x používaných pro fosilní paliva, jako je selektivní katalytická redukce (SCR) a recirkulace výfukových plynů (ERG). Mimo tvorby emisí NO_x může při spalování také docházet k úniku nízkých koncentrací amoniaku [24].

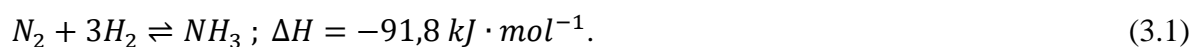
3 VÝROBA AMONIAKU

Mezinárodní energetická agentura (IEA) předpokládá, že světová populace mezi roky 2020 a 2050 vzroste až o 25 %. S rostoucí populací bude nepochybně spojena rostoucí poptávka po amoniaku jakožto látce pro výrobu hnojiv. Přestože se různé literatury a články v konkrétních hodnotách rozcházejí, odhaduje se, že celosvětová produkce amoniaku v roce 2016 byla okolo 146 Mt a v roce 2021 to bylo již více než 235 Mt. Očekává se, že roční produkce amoniaku do roku 2030 překročí hranici 290 Mt [20]. Rostoucí trend světové produkce je znázorněn na obr. 4. Kromě současně primárního využití amoniaku pro výrobu hnojiv se dále očekává, že do roku 2050 bude potřeba ročně produkovat dalších 125 Mt amoniaku jakožto nosiče energie či paliva. Z tohoto pohledu se poptávka po amoniaku může ode dneška zvýšit až o 90 % [23], [25].

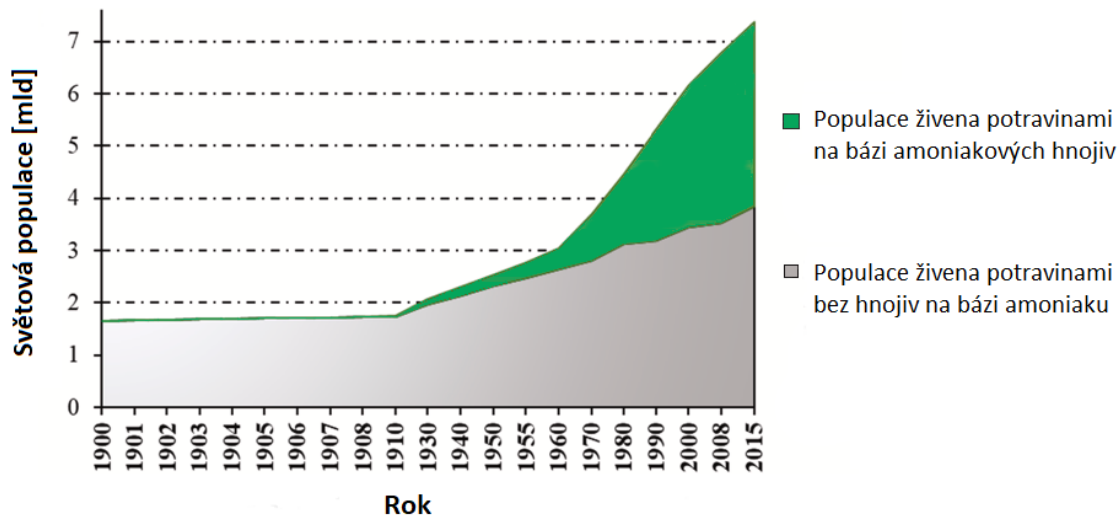


Obr. 4 Graf roční produkce amoniaku; upraveno dle [17]

Amoniak je hned po kyselině sírové druhou nejvíce vyráběnou chemikálií na světě. Hlavním důvodem je jeho primární využití pro výrobu hnojiv ve formě solí nebo roztoků. Díky tomu jsou technologie jeho výroby dlouhodobě zavedené a jsou na vysoké technologické úrovni [14], [26]. V současnosti je výroba amoniaku prováděna výhradně prostřednictvím syntézy vodíku a dusíku, viz rovnice (3.1). Proces je též známý pod názvem Haber-Boschův proces (H-B proces). Syntéza se uskutečňuje při teplotách 450–600 °C a tlacích 10–25 MPa. Proces je implementovaný ve velkozávodní výrobě s kapacitou 2–3000 tun/den [9]:

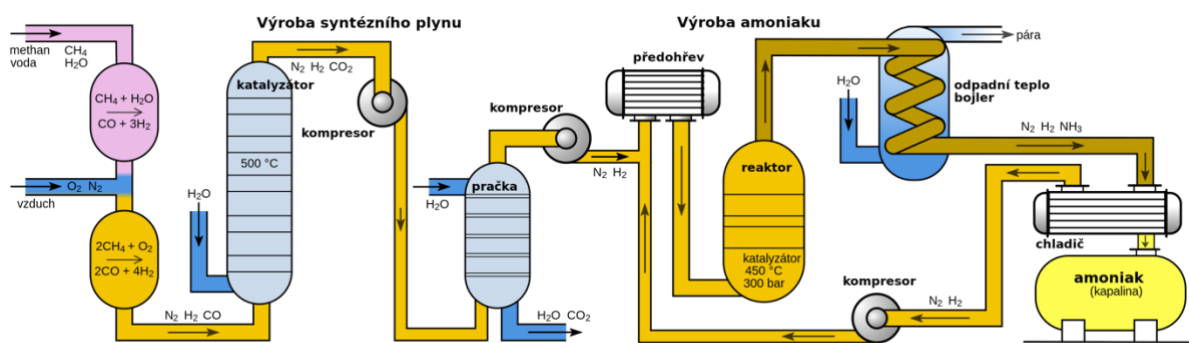


Tento jednoduchý proces v minulosti doslova zachránil lidstvo. Amoniak jako látka pro výrobu hnojiv zvýšil dostupnost potravin a uspokojil tak poptávku světové populace, což mimo jiné vedlo k rychlému demografickému růstu. Odhaduje se, že dnešní světová populace by byla bez implementace H-B procesu o 4 miliardy menší. Na obr. 5 je tento odhad populačního růstu zobrazen [23].



Obr. 5 Trend rostoucí populace a použití amoniaku; upraveno dle [17]

H-B proces, schematicky zobrazen na obr. 6, je energeticky vysoce náročný výrobní postup vyžadující až 8 MWh energie na výrobu jedné tuny amoniaku. Nejškodlivějším environmentálním krokem je výroba vodíku zodpovídající za většinu spotřeby energie a přibližně 90 % všech emisí uhlíku [16]. V roce 2020 celková výroba amoniaku spotřebovala 2,4 TWh energie. To je přibližně 1,8–3 % konečné celosvětové spotřeby energie [23]. Syntéza amoniaku mimo jiné uvolňuje do atmosféry asi 290 milionů tun CO_2 , představující asi 1 % globálních emisí CO_2 [13].



Obr. 6 Schéma H-B procesu [3]

Vzhledem k těmto faktům nelze současný způsob výroby amoniaku považovat za ekologický proces. Jak již bylo zmíněno, hlavní výzvy týkající se výroby ekologicky čistého amoniaku primárně nesouvisí s výrobními technologiemi, ale s dostupností zelených zdrojů vodíku a dusíku pro jeho výrobu [14]. Podle technologie a ekologické náročnosti lze výrobu amoniaku obecně rozdělit do následujících tří generací.

3.1 GENERACE 1

V první generaci se dusík získává pomocí vzduchové separační jednotky nebo ze stlačeného vzduchu a syntéza probíhá pomocí H-B procesu [22]. Kromě generací některé literatury označují amoniak podle barev, které vycházejí ze surovin a ekologické náročnosti výroby vodíku. Je ovšem důležité podotknout, že korektní přiřazení barev k této generaci není obecně stanoveno a různé literatury se v tomto ohledu rozcházejí. Například [20] do první generace zařazuje pouze modrý amoniak, protože při výrobě vodíku dochází k zachycování CO₂. Naopak [27] pak do první generace zahrnuje i současné technologie výroby, tedy hnědý a šedý amoniak. Pro kompletní přehled jsou proto v této práci do první generace zahrnuta i tato, současně nejrozšířenější barevná provedení [9]:

- Hnědý amoniak; vodík je vyroben z ropy, CO₂ se nezachycuje
- Šedý amoniak; vodík je vyroben ze zemního plynu nebo uhlí, CO₂ se nezachycuje
- Modrý amoniak; vodík je vyroben ze zemního plynu, CO₂ se zachycuje technologií Carbon capture and storage (CCS)

Vodík se pomocí současných technologií vyrábí nejčastěji z uhlovodíků. Mezi tyto metody výroby patří částečná oxidace černého uhlí, popsána rovnicí (3.2), nebo výroba pomocí parní reformace (SMR) ze zemního plynu, respektive metanu, popsána v rovnici (3.3) [28]:



Použitím těchto surovin bude při výrobě vodíku vznikat ohromné množství emisí CO₂. Při použití metanu bude vznikat 7–29 kgCO₂/kgH₂ a 1,6–1,8 tCO₂/tNH₃. Při zplyňování uhlí pak vzniká 14–60 kgCO₂/kgH₂ a 2,5–3,8 tCO₂/tNH₃ [28].

Vzhledem k takto vysokým hodnotám tvorby CO₂ při výrobě přišla myšlenka zachycovat CO₂. Technologie CCS je založena na ukládání CO₂ pod zemí. Výroba pomocí SMR s technologií CCS bude pravděpodobně nejlevnější možností pro snížení uhlíkové stopy při výrobě amoniaku. Technologie CCS ovšem zvyšuje složitost a cenu stávajícího H-B procesu [22], [29]. Stávající odhady však naznačují, že tato fáze bude pouze mezikrokem v cestě výroby bezuhlíkového vodíku [20].

3.2 GENERACE 2

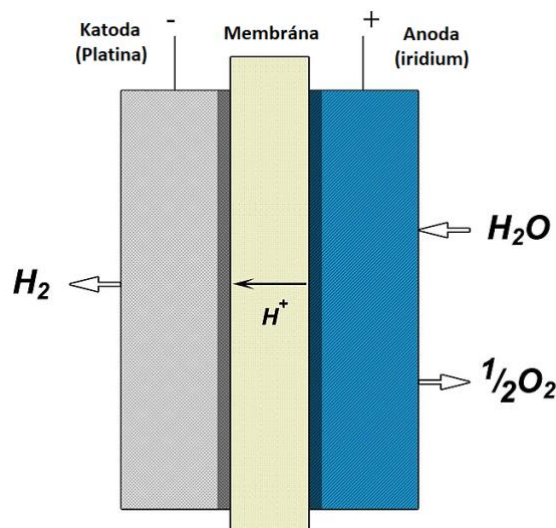
Druhé generaci výroby amoniaku lze přiřadit světle modrou, popřípadě tyrkysovou barvu. Syntéza vodíku a dusíku se stále uskutečňuje pomocí H-B procesu [9]. Zásadním rozdílem této generace je získávání vodíku z obnovitelných zdrojů energie prostřednictvím elektrolýzy vody. Proces dělení vody se provádí v elektrochemických člancích, které lze kategorizovat podle jejich konfigurace:

- Membránové elektrolýzery s polymerním elektrolytem (PEM)
- Alkalické elektrolýzery (AEL)
- Elektrolýzery pevných kovů (SOE)

Všechny tyto články se skládají z anody, katody, elektrolytu, zdroje energie a v některých případech i membrány. Průchodem elektrického proudu elektrodami se začnou kovalentní vazby rozpadat, což umožňuje produkovat plyny vodíku a kyslíku. Rovnice (3.4) a (3.5) popisují reakce na anodě a katodě, celkový proces je poté uveden v rovnici (3.6) [30], [31]:



Wilkinson a kolegové [17] ze společnosti Siemens tuto technologii již prakticky otestovali. Pomocí PEM elektrolyzáru, viz *obr. 7*, a obnovitelné energie generované turbínou o výkonu 20 kW generuje prototyp vodík a asi 30 kg amoniaku každý den [32].



Obr. 7 Membránový elektrolyzáru s polymerním elektrolytem; upraveno dle [71]

Hlavní problémy druhé generace jsou ekonomické náklady. Elektřina, která je většinou částí světa stále výrazně dražší než zemní plyn, tvoří asi 85 % všech nákladů. IEA odhaduje, že výroba vodíku pomocí elektrolýzy je cenově konkurenceschopná oproti výrobě pomocí technologie SMR s CCS při cenách elektřiny v rozmezí 0,015–0,05 \$/kWh a technologií SMR bez CCS při cenách elektřiny 0,01–0,04 \$/kWh za předpokladu ceny plynu 0,03–0,10 \$/kWh [22]. Zpráva [33] z roku 2020 porovnávala náklady na výrobu amoniaku elektrolýzou s konvenčními metodami. Vyšlo najevo, že amoniak vyrobený z obnovitelných zdrojů je až pětikrát dražší z hlediska nákladů na energii a třikrát až čtyřikrát dražší z hlediska kapitálových nákladů než amoniak vyráběný ze zemního plynu.

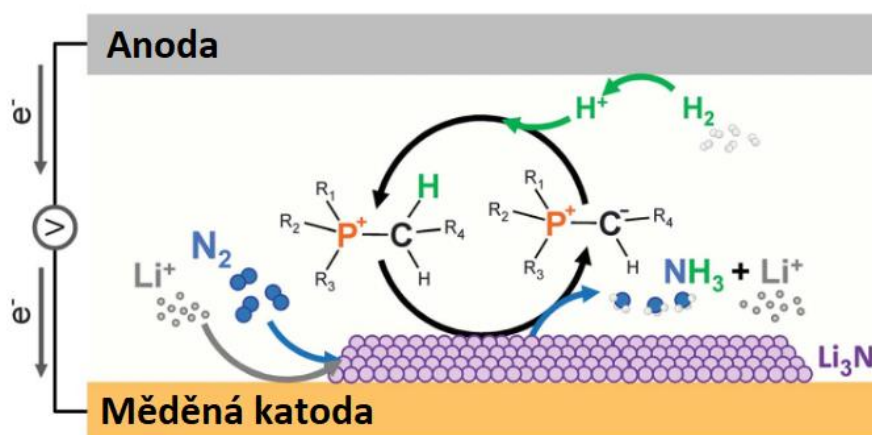
3.3 GENERACE 3

Technologie třetí generace označuje výrobu amoniaku elektrochemickou syntézou (EAS). EAS dnes přitahuje velkou pozornost, protože nabízí zcela bezuhlíkové řešení a optimální provozní podmínky vyžadující atmosférickou teplotu a tlak 20 barů. Některé studie dokonce

uvádí, že proces bude možné provádět i v podmínkách atmosférického tlaku [34]. Metody výroby amoniaku zařazené do třetí generace již nevyžadují syntézu pomocí H-B procesu. Místo tohoto procesu se způsob výroby řídí elektrochemickou redukcí dusíku (NRR) a vodík se získává z vody. EAS navíc oproti H-B procesu využívá pouze 80 % energie. EAS může být poháněna obnovitelnou elektrickou energií generovanou solární, větrnou nebo vodní energií. Takto vyrobený amoniak je označován jako zelený amoniak [20], [27], [35].

NRR – ELEKTROCHEMICKÁ REDUKCE DUSÍKU

Proces NRR využívá elektrolyty známé z oblasti lithiových baterií. Dusík se ve vzduchu vyskytuje v molekulární podobě (N_2), kterou rostliny nejsou schopny přijímat. Je proto nutné jej upravit do atomární podoby. Toho se běžně dosahuje fixací dusíku. Dusík je však díky své trojně vazbě jednou z nejvíce stabilních a nereaktivních molekul. K roztržení této vazby je proto potřeba vynaložit velké množství energie ($941 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$). Dlouhá léta se proto hledalo takové médium, které je toho schopné. Výzkumy ukázaly, že právě lithium je reaktivní natolik, že dokáže roztrhnout tuto trojnou vazbu. Schématické provedení této metody je znázorněno na obr. 8 [30].



Obr. 8 Schéma procesu elektrochemické redukce dusíku; upraveno dle [72]

Elektrolyt článků obsahuje fosfoniové soli, které slouží jako efektivní nosič vodíkových protonů. Proud procházející těmito články způsobuje na povrchu měděné katody tvorbu nitridu lithia (Li_3N), viz rovnice (3.7). Při dosažení katody vodíkové ionty nahradí všechny tři atomy lithia, čímž z nitridu vzniká amoniak, viz rovnice (3.8). Fosfoniové soli jsou kontinuálně recyklovány, což umožňuje opětovné použití a nepřetržitý provoz procesu až po dobu čtyř dnů [36].



Za posledních 5 let bylo dosaženo významného pokroku technologie NRR. Proces NRR by byl ideálním pro distribuovanou výrobu a pro přerušované napájení. V současnosti je však vývoj tohoto procesu pouze na laboratorní úrovni. Odhaduje se, že nástup této technologie ve větším měřítku by v ideálním případě mohl být nejdříve kolem roku 2040 [34].

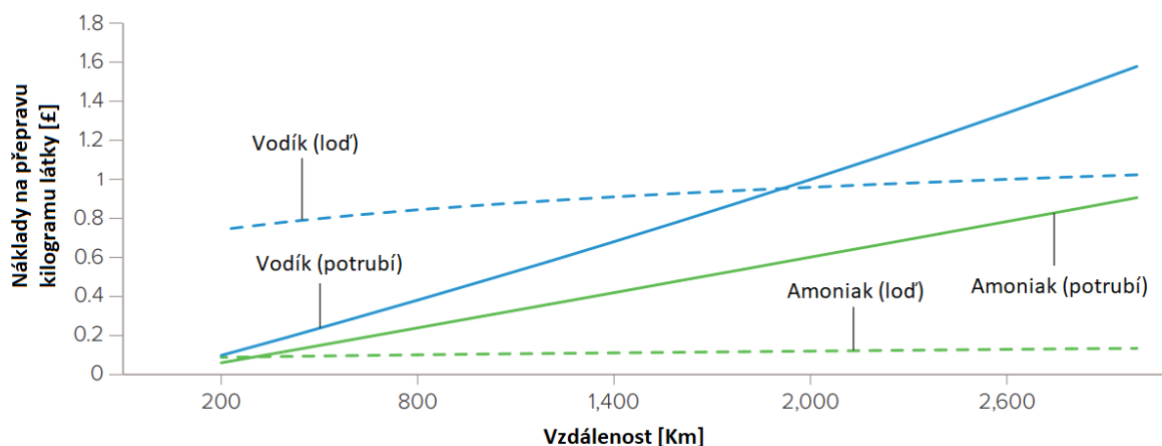
4 DOPRAVA A SKLADOVÁNÍ AMONIÁKU

Amoniak má zavedenou obchodní a dopravní infrastrukturu po celém světě se sítí přístavů vybavených pro manipulaci s velkým množstvím této látky [14]. Hlavním důvodem takto vyspělé infrastruktury je fakt, že se amoniak po více než století používá k výrobě hnojiv. Tato stávající infrastruktura poskytuje pevný základ pro rychlé přijetí amoniaku jako nosiče energie.

V důsledku podobnosti termodynamických parametrů amoniaku a zemního plynu je možné využít zařízení zkapalněného ropného plynu (LPG) pro skladování amoniaku. Tato zařízení by však měla být vybavena dalšími bezpečnostními systémy [14]. Amoniak ve středním až velkém měřítku je obvykle přepravován právě v nosičích LPG. V současnosti je k dispozici 170 lodí se schopností přepravovat amoniak [28].

Kromě nákladních lodí lze amoniak přepravovat prostřednictvím potrubí, železnic a také silnic. Vzhledem k tomu, že amoniak k přepravě vyžaduje mnohem nižší tlaky než zemní plyn a zároveň nereaguje se železem a ocelovými materiály, ze kterých je současná infrastruktura postavena, lze široce rozvinutou síť plynovodu s minimálními změnami přizpůsobit přepravě kapalného amoniaku. Ve východní Evropě se do roku 2022 ročně přepravovalo přibližně 3 Mt amoniaku v současně nejdelším plynovodu na amoniak Tolyatti–Oděsa o délce 2471 km, vedoucí z Ruska na Ukrajinu. Tento plynovod je v současnosti z důvodu války uzavřen [37]. V západní Evropě se po železnici přepraví až 1,5 Mt amoniaku ročně. Ve Spojených státech se ročně přes celou zemi a po trati přepraví 2,9 Mt amoniaku. Přeprava potrubím kapalného amoniaku má větší význam ve Spojených státech a Rusku, zatímco v Evropě se k přepravě přednostně používají cisternové vozy o objemu až 126 800 litrů [18].

Amoniak se řadí mezi látky s daleko nejnižšími náklady na přepravu. Obr. 9 srovnává náklady na přepravu amoniaku s plyným vodíkem. Náklady na přepravu vodíku prostřednictvím lodní dopravy jsou ve srovnání s amoniakem více než trojnásobné [35]. Také účinnost systému skladování amoniaku (93,6 %) je výrazně vyšší než systémy skladování vodíku (76,9 %) [20].



Obr. 9 Srovnání nákladů na přepravu amoniaku a vodíku; upraveno z [22]

Jak již bylo uvedeno ve druhé kapitole, amoniak je díky svým chemickým vlastnostem, zejména pak objemové hustotě energie, lepším nosičem vodíku než vodík samotný. Ale to

není zdaleka jediná vlastnost, ve které amoniak nad vodíkem vyniká. Díky své infrastruktuře je amoniak dostupnější a lépe se distribuuje ve velkém množství. Přeprava a skladování vodíku jsou také složitější. Problematika vodíku s dopravou a skladováním souvisí s jeho vysokou reaktivitou, nižším bodem vzplanutí a jeho vysokou rychlostí hoření. Vzhledem k těmto vlastnostem je potenciální výbuch mnohem pravděpodobnější než u amoniaku [38], [15]. Tekutý vodík mimo jiné vyžaduje kryogenní skladování při teplotě 20 K, kterou je z dlouhodobého hlediska obtížné dosáhnout a udržet [19], [35].

Produkce amoniaku je soustředěna jenom v určitých zemích a mezi zeměmi se obchoduje pouze s 20,6 miliony tunami, což je přibližně 12 % celosvětové produkce. To je také zřejmé ze skutečnosti, že největší spotřebitelé, jako je Čína, Evropská unie, USA a Indie, produkují většinu své poptávky po amoniaku lokálně. Další země vyvážející a dovážející amoniak jsou uvedeny v *tab. 2* [28].

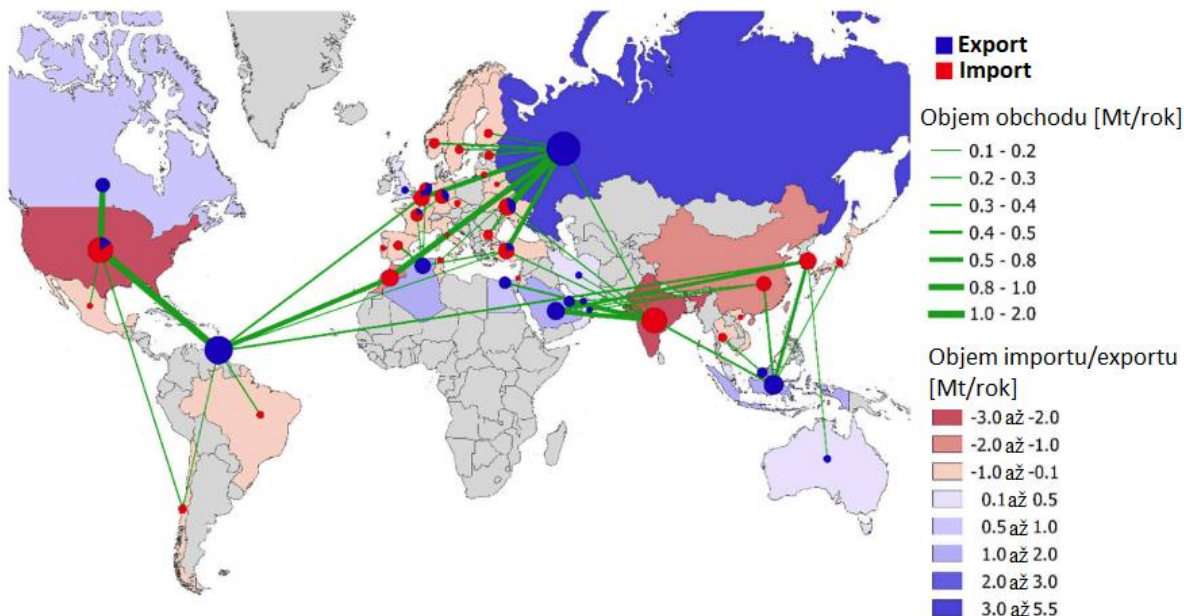
Tab. 2 Hlavní výrobci amoniaku v roce 2019 v megatunách [28]

Stát/svaz zemí	Produkce	Export	Import	Spotřeba
Čína	46,3	-	1,1	47,3
Rusko	18,3	5,2	0,1	13,1
USA	16,4	0,5	2,5	18,5
Evropská unie	16	1,7	5,7	20,1
Indie	14,9	-	2,9	17,8
Indonésie	6,1	1,8	-	4,3
Trinidad a Tobago	5,5	3,7	-	1,8
Egypt	5,1	0,7	-	4,4
Saudská Arábie	4,9	1,5	-	3,4
Kanada	4,8	1	-	3,8
Katar	4,3	0,2	-	4
Irán	3,8	0,6	-	3,3
Pákistán	3,8	-	-	3,8
Alžírsko	2,7	1,2	-	1,5
Omán	2,1	0,2	-	1,9
Ukrajina	1,8	0,5	0,9	2,2
Austrálie	1,6	0,3	-	1,3
součet	158,4	19,1	13,2	152,5

Obr. 10 představuje 96 % vývozu a 95 % dovozu v mezinárodním obchodě a obchodní cesty větší než 0,1 Mt ročně představující asi 80 % z 20,6 Mt světového obchodu s amoniakem v roce 2019. Obchodní cesty naznačují význam námořního obchodu s amoniakem [28].

Kromě námořní dopravy mohou potrubí sloužit pro následující integraci z importních terminálů do poptávaných center a propojit tak výrobu s exportními terminály. Příkladem integrace dovozu jsou například Spojené státy, kde potrubní systém ročně přepraví z Mexického zálivu do průmyslových center na Středozápadě asi 1,5 Mt amoniaku [28].

Skladování amoniaku se provádí buď za zvýšeného tlaku v plynném skupenství, nebo za snížené teploty v kapalném skupenství [39]. Podzemní skladovací nádrže se již v praxi nepoužívají z důvodu nedostatečného množství dostupnosti plochy pro jejich výstavbu a problémy s kontaminací [20].



Obr. 10 Globální proud obchodu amoniaku v roce 2019; upraveno z [28]

4.1 PLYN POD TLAKEM

Amoniak lze skladovat v plynném skupenství při pokojové teplotě a tlaku v rozsahu přibližně 8–30 barů. Skladování jakéhokoli média pod tlakem je spojeno s rizikem prasknutí zásobníku v případě nekontrolovaného zvýšení tlaku v důsledku zvýšení teploty. Nádrže jsou proto dimenzovány na mnohem vyšší tlak. Dalším bezpečnostním prvkem jsou pojistné ventily v případě požáru v okolí nádrže [14].

Amoniak může být skladován pod tlakem jak ve válcových nádobách konstruovaných pro přibližně 25 barů s kapacitou 150 t, tak i v kulových nádobách konstruovaných pro přibližně 16 barů s kapacitou 250–1500 t. V obou případech je stanovena minimální tloušťka stěny 30 mm [40].

4.2 CHLAZENÉ PALIVO

Druhým způsobem je skladování kapalného amoniaku za atmosférického, popřípadě lehce zvýšeného tlaku a za snížené teploty okolo $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě je kontakt s médiem spojen s rizikem těžkých omrzlin a poleptání. Pokud z nějakého důvodu tlak klesne, stejně jako u tlakového skladování, kapalina se rychle ochladí [14]. Tlakový rozsah nádrží na chlazené palivo se pohybuje mezi 1,0–1,5 bary, kapacita skladování může být až 50 000 t [40].

Tab. 3 na závěr uvádí srovnání způsobů skladování pod tlakem a za snížené teploty. V tabulce je mimo jiné uveden i hmotnostní poměr, který uvádí, kolik tun amoniaku připadá na jednu tunu oceli nádrže. Při skladování amoniaku za snížené teploty je tento poměr přibližně 41–45.

Tento hmotnostní poměr ve srovnání se skladováním pod tlakem je mnohonásobně vyšší, protože při výpočtu působení napětí na nádrž lze vzít v úvahu pouze statické zatížení látky, zatímco při skladování pod tlakem je nutné vzít v úvahu i tlak působící na stěny nádrže [20]. Na základě srovnání hodnot z tabulky jasně vyplývá, že skladování za snížené teploty je ekonomicky výhodnější.

Tab. 3 Porovnání vlastností skladování amoniaku pod tlakem a za snížené teploty [20]

Způsob skladování	Teplota [K]	Tlak [bar]	Energetická hustota [MJ·l ⁻¹]	Poměr NH ₃ /Ocel [-]
skladování pod tlakem	293	8–30	13,77	2–8
skladování za snížené teploty	240	1–1,5	15,37	41–45

4.3 SKLADOVÁNÍ ABSORPCÍ

Problémy spojené s toxicitou amoniaku je možné obejít jeho skladováním v absorbované formě, viz *obr. 11*. Skladování amoniaku ve formě kovových aminových komplexů, jako je Mg(NH₃)₆Cl₂, vzniká průchodem amoniaku přes bezvodý chlorid hořečnatý při pokojové teplotě. Absorpce a desorpce amoniaku je zcela reverzibilní. Jakmile se amoniak uvolní ze soli, může být snadno přeměněn na vodík a dusík pomocí katalyzátoru rozkladu amoniaku, který může být integrován do zásobníku aminové soli. Mg(NH₃)₆Cl₂ lze tvarovat do zcela kompaktních těles v podstatě bez jakéhokoli prázdného prostoru [19], [22].

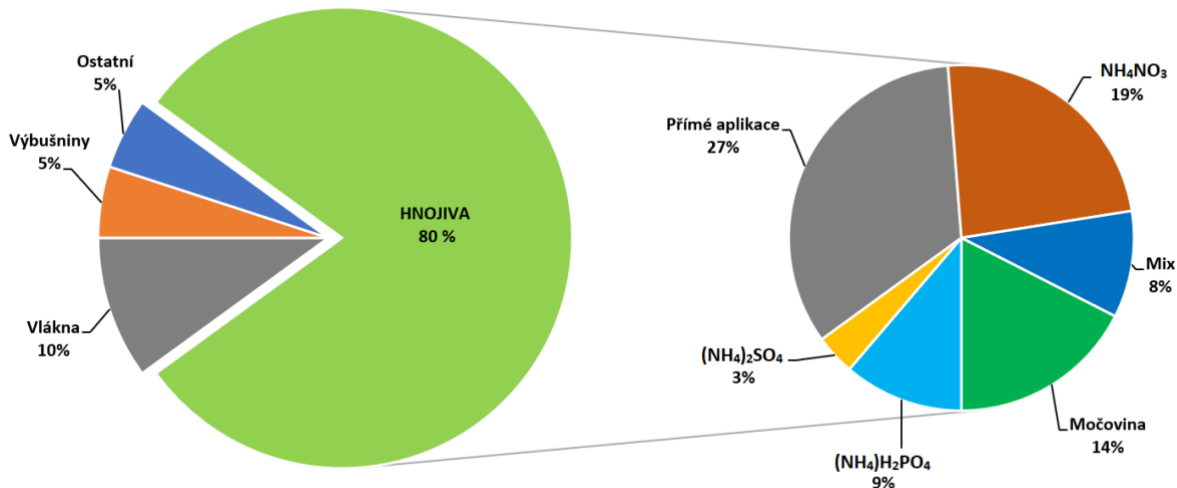


Obr. 11 Skladování absorpcí, tablety Mg(NH₃)₆Cl₂ [19]

Pro vyšší účinnost by měly mít komplexy nízkou desorpční aktivační energii, vysokou gravimetrickou a objemovou hustotu vodíku. Tlak par by měl být také nízký, aby se předešlo problémům s vypařováním [15], [20].

5 AMONIAK JAKO PALIVO

Jak ukazuje *obr. 12*, dnes se přibližně 80 % celosvětové produkce amoniaku využívá v zemědělství pro výrobu hnojiv. Zbývajících 20 % se používá v oblastech spojených s chlazením, čištěním vody a průmyslové výroby různých produktů, včetně plastů, výbušnin, textilií, pesticidů, barviv a jiných chemikálií. Například v textilním průmyslu se amoniak používá k výrobě syntetických vláken, popřípadě jako nylon a umělé hedvábí. Amoniak se široce používá při průmyslové výrobě sody a kyseliny dusičné [10].



Obr. 12 Současné využití amoniaku; upraveno dle [45]

V současnosti se čím dál více ozývají myšlenky pokusit se použít amoniak jako palivo ve spalovacích motorech nebo palivových článcích. Na této cestě se ale nachází mnoho výzev, které v současnosti brání použití amoniaku jako paliva ve veřejné sféře. Většina výzkumů zabývajících se použitím amoniaku v pohonných jednotkách se zaměřuje na použití samotného amoniaku nebo řešení v palivových směsích. Vzhledem k tomu, že je amoniak považován za dobrý nosič vodíku, je také zkoumán jako alternativní palivo v palivových článcích [5], [14].

5.1 SPALOVACÍ MOTORY

Spalovací motory (ICE) se obecně dělí dle typu vznícení. Pro spalování amoniakových směsí byly zkoumány především základní typy motorů, a to motory se zážehovým motorem (SI) a motory se vznětovým motorem (CI). V SI motorech dochází ke spalování zapálením směsi vzduchu a paliva pomocí zapalovací svíčky, zatímco v CI motorech teplo vzniká mechanickou kompresí uvnitř válce, aby došlo ke vznícení paliva. Z hlediska přívodu paliva dávají SI motory přednost palivům s vysokým oktanovým číslem, zatímco CI motory lépe spalují paliva s vysokým cetanovým číslem [16].

K dosažení použití amoniaku jako schopného paliva ve spalovacích motorech v současnosti existují dva hlavní směry, kudy se výzkumy ubírají. Obě strategie mají společný cíl, tedy dosáhnout nulové nebo minimální uhlíkové stopy ve srovnání s dnešními fosilními palivy. První strategie zkoumá použití čistého amoniaku ve standardních motorech s upraveným

systemem spalování. Druhá strategie se zabývá hledáním takové směsi amoniaku s dalšími palivy, která by umožnila její optimální použití v běžných spalovacích motorech [9].

5.1.1 ČISTÝ AMONIAK

Navzdory výhodám amoniaku jakožto bezuhlíkového paliva s vysokou hustotou energie jsou jeho spalovací vlastnosti ve srovnání s vlastnostmi tradičních fosilních paliv velmi slabé. Rychlost plamene je také výrazně nižší než u konvenčních paliv a alkoholů, přibližně o jeden řád velikosti, a třikrát nižší než u vodíku. Kromě toho má amoniak úzký limit hořlavosti na vzduchu a dále trpí vysokou teplotou samovznícení, minimální energie vznícení je 680 mJ. Dále má amoniak vysoké výparné teplo, což je mnohem více než například u etanolu, tekutého vodíku a benzínu. Takto vysoké výparné teplo může vést k drastickému snížení teploty spalování, pokud je amoniak vstříkovan do motoru [14], [41]. Kromě toho je amoniak korozivní pro měď, nikl a plasty, proto je třeba se těchto materiálů vyvarovat. Všechny tyto nepříznivé vlastnosti znesnadňují dosažení rychlého a stabilního spalování v motorech obsahujících pouze amoniak, což omezuje jeho rozsáhlé použití jako paliva v ICE [42].

Optimálním řešením se tedy jeví použít amoniak ve směsi s jinými palivy nebo provést konstrukční úpravy spalovacího systému pro zlepšení kinetiky a dynamiky spalování [20], [16]. Použití čistého amoniaku v kapalném stavu nepřímo brání procesu spalování, protože vysoký tlak par amoniaku může vést k vypařování s následným chladícím efektem během vstříkování paliva [43]. Vysoké oktanové číslo amoniaku umožňuje vyšší úroveň nadměrného přeplňování, než je možné u běžných motorů. Zvýšené kompresní poměry mohou pomoci při řešení problémů spojených se zapalováním. Zvýšení tlaku by rovněž zvýšilo teplotu palivové směsi ve válci, což by usnadnilo spalovací proces [20].

Ve srovnání s jinými palivy spalování amoniaku za normálních podmínek obvykle vede k tvorbě vyšších hodnot NO_x . Tyto chemicky a radioaktivně aktivní látky přispívají ke skleníkovému efektu a hrají významnou roli při vzniku kyselých dešťů [44]. Je však možné použít katalyzátory ke snížení emisí NO_x s účinností konverze až 99 % [45], [46].

VZNĚTOVÉ MOTORY

Vzhledem k uvedeným vlastnostem amoniaku a jeho neochotě hořet může být spalování čistého amoniaku v CI motorech velmi komplikované. Aby se proto předešlo problémům hoření amoniaku, předpokládá se, že provozní teploty a tlaky by měly být ve srovnání s konvenční motorovou naftou obecně vyšší. Pro spalování čistého amoniaku v CI motorech se proto navrhuje používat extrémně vysoké kompresní poměry. Běžný vznětový motor funguje při kompresním poměru v rozmezí 15–17:1. Aby však bylo vůbec možné použít amoniak jako palivo ve vznětových motorech, je nezbytné dosáhnout hodnot kompresních poměrů až 35:1 a více, přičemž se uvádí, že kapalným amoniakem se nedokáže spalovat při poměrech nižších jak 30:1. Takto vysoké kompresní poměry jsou nutné v důsledku nízkého cetanového čísla amoniaku, které značně ztěžuje jeho zážehové vlastnosti v těchto systémech [47].

Lee a Song [38] studovali strategii spalování, která by snížila teplotu samovznícení amoniaku a zlepšila výkon v CI motoru. Podle studie by počáteční pilotní vstříkování amoniaku při

vysokém kompresním poměru 35:1 mohlo být použito k vytvoření chudé směsi amoniaku a vzduchu v CI motoru. Zjistili, že předspalovací směs se může v motoru samovznítit, a to může být použito ke spuštění spalování hlavního čpavkového palivové vstříku. Při testování po určité zkušební době došlo k menšímu přírůstku hmotnosti a změně barvy v důsledku usazování [20]. Přestože byl tento proces úspěšně simulován, ukázalo se, že výsledné emise NO_x zde byly na poměry běžných paliv mnohonásobně vyšší a výsledný výkon byl v porovnání s konvenčními palivy nižší [17], [45].

ZÁŽEHOVÉ MOTORY

SI motory naopak mohou do jisté míry pracovat na čistý amoniak, protože proces zapalování je iniciován zapalovací svíčkou a vysoké oktanové číslo amoniaku odolává klepání motoru. Pro zavedení amoniaku jako paliva přímo v SI motorech by kompresní poměr měl být udržován v rozmezí 6:1 až 10:1 [48].

Pouze několik studií se zabývalo možností pohánět SI motor čistým amoniakem. Jedna z prvních výzkumných prací zabývající se amoniakem jako paliva v SI motoru byla od Corneliuse [49], který zkoumal spalování čistého plynného amoniaku v SI motoru. Aby došlo ke smíchání amoniaku s nasávaným vzduchem, byl kapalný amoniak odpařen a poté vstříkován do sacího potrubí. Studie došla k závěru, že indikovaná tepelná účinnost motoru byla přibližně o 12 % nižší než u běžného SI motoru.

Gross a Kong [50] zjistili, že zvýšení vstřikovacího tlaku až na hodnotu 230 barů umožňuje používat směsi s vyšší koncentrací amoniaku, vedoucí k lepšímu spalování a emisím. Pokud se použijí ještě vyšší koncentrace amoniaku, předpokládá se, že použití vyššího vstřikovacího tlaku může zlepšit mísení paliva se vzduchem a umožnit tak lepší spalování a vyšší zatížení motoru.

Koike a spol. [51] poprvé prokázali, že při kompresním poměru 14:1 může motor za zvýšených podmínek pracovat s amoniakem s přijatelnými cyklickými změnami při vysokém zatížení, ale pouze při 800 min^{-1} . Lhuillier [48] potvrdil použití amoniaku v současném motoru SI (kompresní poměr 10,5:1) při 1500 min^{-1} při plném zatížení. Zároveň uvedl, že pro zvýšení stabilních podmínek je nutné drastické zahřátí spalovací komory.

5.1.2 PALIVOVÉ SMĚSI AMONIAKU

Přestože lze vhodnými katalyzátory NO_x redukovat, spalování čistého amoniaku stále tvoří nadměrné množství těchto nežádoucích emisí. Hladiny nespáleného amoniaku, které mohou potenciálně unikat do ovzduší, zůstávají rovněž relativně vysoké. K překonání některých z těchto problémů bylo navrženo mísení amoniaku s dalšími palivy [27]. Ukazuje se, že amoniak v ICE funguje lépe s přidávanými modifikátory spalování. Palivové směsi je možné obecně rozdělit na směsi s fosilními palivy a směsi s vodíkem [42].

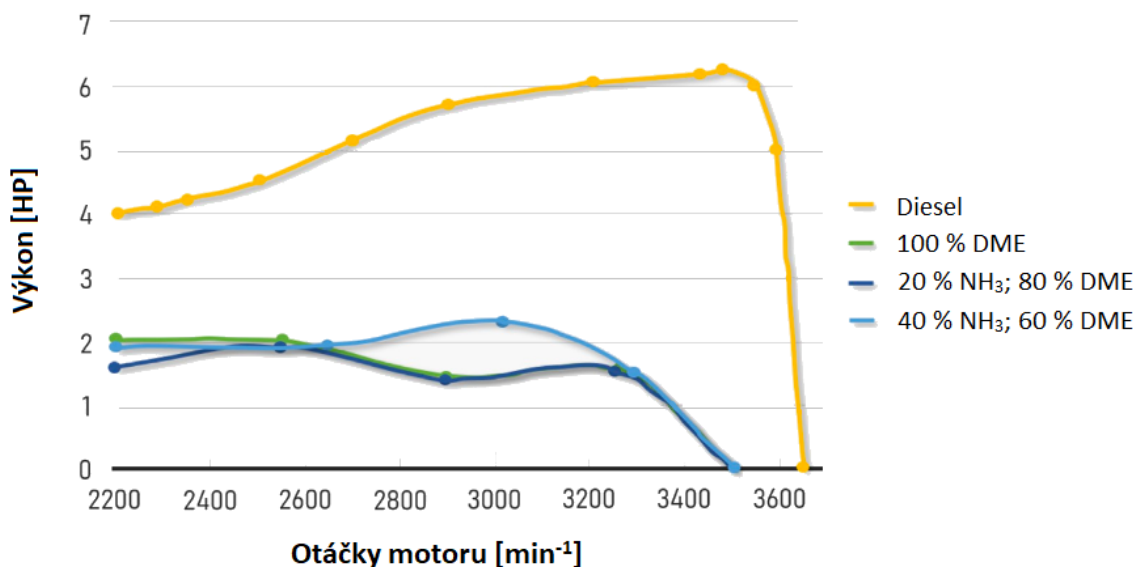
SMĚSI AMONIAKU S FOSILNÍMI PALIVY

Použití amoniaku ve směsích s uhlovodíkovými palivy může v některých případech pomoci s problematickými vlastnostmi spalování amoniaku. Pro zlepšení spalovacího procesu byla s amoniakem smíchána celá řada paliv, včetně benzínu, petroleje, nafty, etanolu, dimethyletheru (DME), metanolu a diethyletheru (DEE), přičemž u některých směsí byly prokázány příznivé výsledky [26], [52].

Palivové směsi amoniaku s uhlovodíky ve srovnání s použitím čistého amoniaku obecně vykazují vyšší točivý moment a vyšší výkon motoru za stabilnějších podmínek [18]. Tyto vlastnosti jsou však kompenzovány zvýšenými hodnotami NO_x a tvorbou CO_2 [47], [50]. Zatímco nespálený amoniak je produktem nízkých teplot spalování, emise NO_x bývají důsledkem vysokých teplot spalování. Z velké části se tyto problémy řeší technologií SCR nebo definováním nových strategií vstřikování paliva [16], [53].

Podle studie [54] lze pro CI motory použít směs amoniaku a DME. Vysoké oktanové číslo, rychlé odpařování a dobrá mísitelnost DME jsou vlastnosti, které doplňují slabé stránky amoniaku. Studie uvádí, že při zvyšování poměru amoniaku ve směsi dochází ke zvýšení provozního tlaku. Dále byla zkoumána směs amoniaku a benzínu v SI motorech. Ukazuje se, že benzín pomáhá snižovat tření v motoru a zlepšuje spalování amoniaku [43].

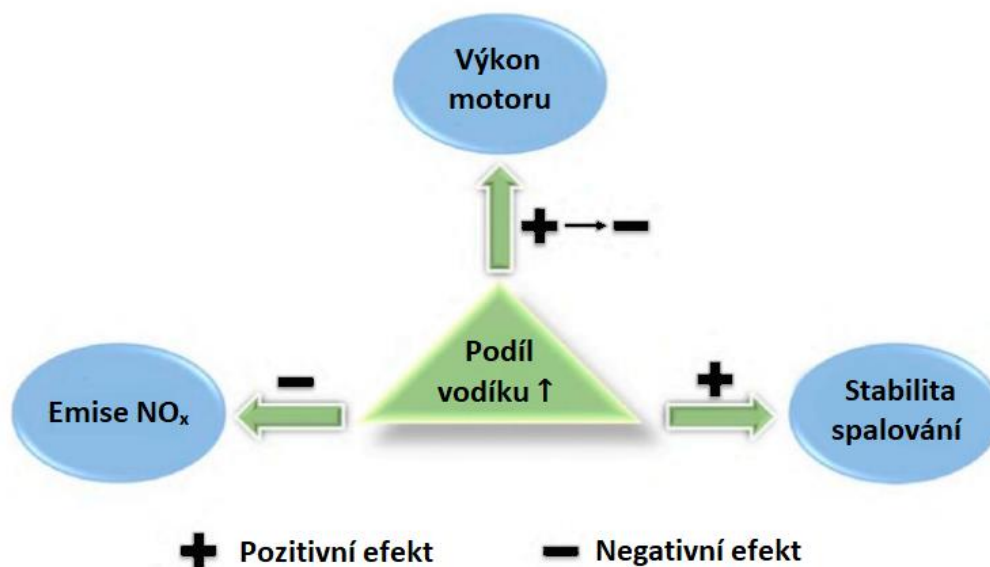
Gross a Kong [50] rovněž provedli řadu zkušebních podmínek v CI motoru s použitím různých směsí, včetně amoniaku a DME. Autoři zjistili, že rostoucí podíl amoniaku v palivové směsi ztěžuje provoz motoru při vysokém zatížení. Obr. 13 ukazuje velikost výkonu v závislosti na otáčkách motoru jednotlivých experimentálních směsí, které jsou porovnávány s čistou naftou. Přestože se palivové směsi jeví jako schopné, z grafu je zřejmé, že v porovnání s čistou naftou jsou jejich výkony nedostačující.



Obr. 13 Rozsah zkušebních podmínek v motoru CI s různými směsmi paliv; upraveno dle [50]

SMĚSI AMONIAKU S VODÍKEM

Silnou vlastností vodíku z pohledu jeho použití v palivových aplikacích je jeho vysoká laminární rychlost hoření dosahující přibližně $2,5\text{--}3,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ve srovnání s amoniakem, jehož rychlost hoření se uvádí $0,06\text{--}0,08\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, se směs amoniaku s vodíkem nabízí jako jedna z možných alternativ [50]. Jedinou škodlivou látkou uvolňovanou při čistém spalování jsou emise NO_x , které vznikají oxidací atomů dusíku uvolňovaných do vzduchu v důsledku jeho reaktivního prostředí [20]. Obecně platí, že do jisté míry má rostoucí poměr vodíku jako přísady k amoniaku za následek zvýšení rychlosti plamene a může zlepšit hoření amoniaku [9], [55]. Bylo zjištěno, že pro optimální chod motoru je vyžadován minimálně 5 % podíl vstřikovaného vodíku [56]. Molekulární vodík lze vytvořit přímo rozkladem amoniaku, což by umožnilo vozidlu používat pouze jednu palivovou nádrž. Obr. 14 obecně uvádí, jak vliv vodíku ve směsi amoniak–vodík ovlivňuje spalovací vlastnosti motoru [48], [56].



Obr. 14 Vliv vodíku v palivových směsích amoniak-vodík; upraveno z [42]

Bylo provedeno několik studií palivových směsí amoniak–vodík v SI motorech. Zjistilo se, že přidáním vodíku se spalovací proces optimalizuje. Motor poháněný touto palivovou směsí může poskytovat srovnatelné výkony s konvenčními palivy, pokud jsou použity vhodné podpůrné strategie, jako je vyšší kompresní poměr nebo zvýšený sací tlak. Lhullier [48] studoval tuto směs na jednoválcovém SI motoru. Zjistil, že požadovaných výkonů lze dosáhnout při 10 % obj. podílu vodíku. Další studie zjistila, že palivová směs s 10 % obj. vodíku poskytuje nejlepší výkon s ohledem na účinnost a výkon motoru. Podobně většina dalších výzkumů odhalila, že palivová směs obsahující 10–20 % obj. vodíku typicky vykazovala vynikající spalovací charakteristiky pro SI motor při přijatelném výkonu motoru.

Ukazuje se, že tvorba NO_x a únik amoniaku jsou jedny z hlavních negativních aspektů této směsi. Studie [57] z roku 2013 však poukazuje, že při kombinaci 80 % amoniaku a 20 % vodíku katalyzátor SCR účinně snižuje emise NO_x na úroveň nižší, než jsou zákonem vyžadované hodnoty. Studie navíc podotýká, že rostoucí podíl vodíku výrazně snižuje únik nespáleného amoniaku. Pozdější studie [48] potvrzuje, že problematika tvorby NO_x je jednou z hlavních problémů této směsi. Vzhledem k tomu, že při spalování této směsi bez použití vhodných katalyzátorů mohou být koncentrace unikajících emisí NO_x až více jak 1000 ppm,

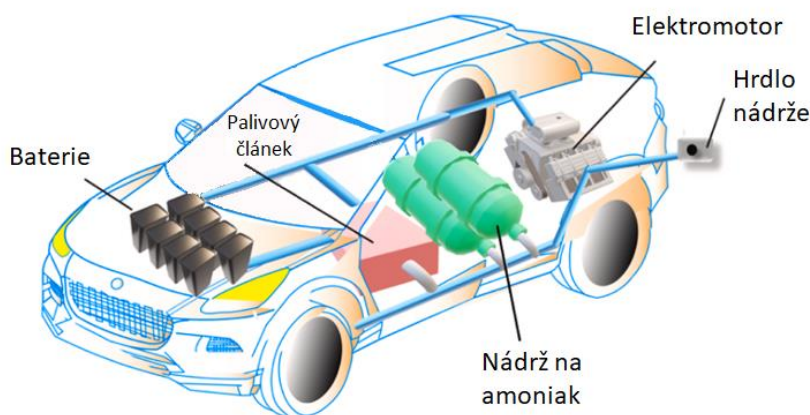
studie poukazuje na to, že je zcela nezbytné použití vhodných technologií k zamezení úniku těchto nežádoucích částic.

5.2 PALIVOVÉ ČLÁNKY

Proces spalování amoniaku je doprovázen vysokými teplotami umožňujícími jeho rozklad a oxidaci. Kvůli již dříve zmíněným problémům souvisejícím se špatnou kvalitou zapalování, vysokou teplotou samovznícení a nízkou rychlostí plamene jsou palivové články (FC) zajímavou technologií pro přeměnu energie amoniaku. Při použití FC nedochází k typickému spalování, ale přímo k přeměně chemické potenciální energie paliva na energii elektrickou [58]. Díky své modularitě lze FC zvětšovat nebo zmenšovat podle energetické potřeby zařízení. Účinnosti různých druhů článků se pohybují v rozmezí 50–60 % [24]. Podle provozní teploty lze FC rozdělit na [20]:

- **Vysokoteplotní palivové články;** Provozní teplota je vyšší než 923 K, snadno čelí nečistotám a tvorbě škodlivin, jako je CO a CO₂. Vysoká teplota přináší i některé nevýhody, jako je problematická údržba, nižší trvanlivost a proměnlivé chování součástí. V této kategorii bylo za posledních deset let provedeno obrovské množství studií právě na palivových článcích s tuhými oxidy (SOFC).
- **Nízkoteplotní palivové články;** Provozní teplota těchto článků je nižší než 523 K. Příkladem tohoto typu jsou palivové články s protonovou výměnnou membránou nebo alkalické palivové články (AFC). Dodnes však proběhlo pouze několik výzkumů zabývajících se konkrétně tímto typem FC na amoniak.

Díky své jednoduché struktuře, bezuhlíkovému a udržitelnému zdroji energie je vodík považován jako nejlepší palivo v palivových článcích [59]. Jak již bylo ale dříve zmíněno, využití vodíku jako paliva čelí dvěma hlavními výzvám, které spočívají v jeho přepravě a skladování [60]. Pro překonání těchto problémů byly navrženy vodíkové nosiče, jako je methanol, ethanol, hydrazin a amoniak. Právě amoniak je považován za bezuhlíkový nosič vodíku s vysokým obsahem vodíku, který by mohl být přímo nebo nepřímo použit jako palivo v FC. Konceptní schéma dopravního automobilu poháněného FC je uvedeno na *obr. 15* [30].



Obr. 15 Schéma konceptu automobilu poháněného palivovými články na amoniak; upraveno dle [20]

Kromě výše uvedeného rozdělení lze FC na amoniak dělit z hlediska využití paliva na přímé a nepřímé. Nepřímé FC na amoniak jsou ve své podstatě články na vodík. Oproti čistě vodíkovým článkům je zde navíc před vstupem do článku přidán krok k rozložení amoniaku pro získání vodíku. Dusík se typicky uvolňuje do atmosféry a vodík je použit jako palivo. Výhodou nepřímých FC na amoniak je vyvinutá a komerčně dostupná technologie vodíkových FC. Nepřímý systém FC na amoniak je však složitější a nákladnější než FC s přímým přívodem amoniaku [35]. Přímé FC na amoniak jsou články, které transformují chemickou energii amoniaku na elektrickou energii přímo ve článku [30].

Vzhledem k tomu, že amoniak v nepřímých FC působí čistě jako nosič energie a v člancích oxiduje pouze vodík, následující text bude pojednávat pouze o přímých FC, kde se amoniak aktivně podílí na oxidaci v palivovém článku.

5.2.1 PALIVOVÉ ČLÁNKY S TUHÝMI OXIDY

SOFC jsou mezi články považovány za nejúčinnější způsob výroby energie a jsou jedním z nejčastěji studovaných typů technologie FC s přívodem amoniaku. Tento typ vykazuje vysokou účinnost přeměny energie a vysoký stupeň spotřeby paliva.

Vzhledem k vysokým provozním teplotám SOFC, které jsou typicky i nad 800 °C, nahrazují teplotu rozkladu amoniaku. Tento typ FC tedy odstraňuje požadavek na fázi předúpravy, která je nezbytná u nepřímých palivových článků [35]. Vysoké teploty rovněž zvyšují katalytickou aktivitu, takže je možné použít levnější katalyzátor [61].

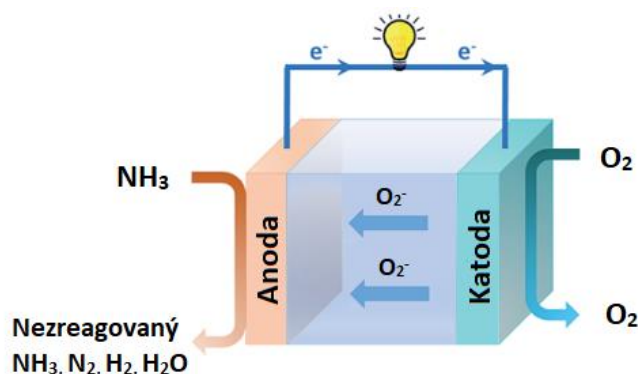
Zatímco účinnost přeměny chemické energie na elektrickou energii je u SOFC vysoká, stabilita jejich konstrukčních součástí, zejména anody, se v současnosti jeví jako hlavní problém. Anoda plní stěžejní roli v zajištění funkce celého systému [61]. Nejen, že je zodpovědná za katalytický rozklad amoniaku za vzniku vodíku, ale také musí být dostatečně aktivní pro elektrochemickou reakci. Kromě toho musí mít dostatečně vysokou poréznost, aby umožnila difuzi topného plynu do aktivního místa a odvod spalin. Ještě důležitějším faktorem je, že anoda by měla být také vysoce vodivá, aby umožnila přenos elektronů. Vzhledem k tomu, že SOFC pracuje ve vysoce redukčním prostředí a vysokých teplotách, musí být anoda stabilní a také tolerantní vůči teplotním výkyvům v širokém rozsahu. Z ekonomického hlediska musí být anoda snadno vyrobitelná, cenově dostupná a odolná. Výše uvedená kritéria ukládají přísná omezení na výběr materiálu pro anodu SOFC. Kompozit zirkonia a niklu stabilizovaný ytriem (Ni/YSZ) byl označen jako nejschopnější anoda pro tyto články. Hlavní překážkou v komerčních aplikacích SOFC však nadále zůstávají problémy související s degradací anody [13].

V současné době je na trhu nízký počet společností vyrábějících SOFC na amoniak nebo energetické systémy na nich založené. Většina navrhovaných SOFC je navíc dostupná v měřítku přibližně 1–10 kW, tedy v rozsahu, který neodpovídá současným požadavkům v odvětví dopravy [14]. Nepřímé SOFC používající amoniak jako palivo jsou klasifikovány do dvou typů podle typu elektrolytu [30]:

- SOFC-O neboli články na bázi elektrolytů a aniontů kyslíku
- SOFC-H neboli články na bázi protonů vodíkových elektrolytů

SOFC-O – PALIVOVÉ ČLÁNKY S TUHÝMI OXIDY NA BÁZI ELEKTROLYTŮ A ANIONTŮ KYSLÍKU

Pracovní princip SOFC-O je založen na transportu kyslíkových aniontů přes elektrolyt, viz *obr. 16*. Počátečním krokem je rozklad amoniaku na anodě, následující elektrochemickou oxidací vzniklého vodíku. Na katodu se přivádí plynný kyslík nebo vzduch a na rozhraní katoda–elektrolyt se redukuje na anionty kyslíku (O_2^-). Anionty kyslíku jsou dále transportovány přes elektrolyt, kde se spojují s disociovaným vodíkem a vytvářejí vodu a elektrický proud [26].



Obr. 16 Schéma SOFC-O; upraveno dle [26]

Vzhledem k přítomnosti vody společně s amoniakem na anodě existuje možnost tvorby NO_x . Předpokládá se však, že při použití vhodného katalyzátoru dojde k potlačení těchto částic. Některé studie dokonce uvádí, že vytvořené množství NO_x je zcela zanedbatelné [26], [35]. Rovnice (5.1) popisuje rozklad amoniaku na anodě, rovnice (5.2) a (5.3) poté proces na anodě a katodě [26]:



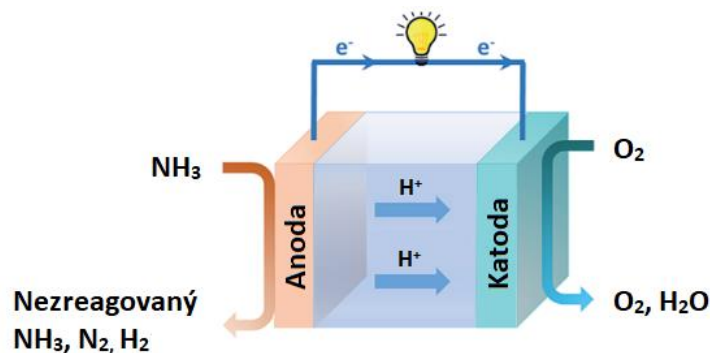
SOFC-H – PALIVOVÉ ČLÁNKY S TUHÝMI OXIDY NA BÁZI PROTONŮ VODÍKOVÝCH ELEKTROLYTŮ

Princip SOFC-H je podobný jako u SOFC-O. Nicméně nosičem náboje v elektrolytu jsou protony. Podobně jako u SOFC-O je amoniak na anodě nejprve rozložen na dusík a vodík a ke katodě je opět zaveden kyslík. V tomto případě je však produkovaný vodík oxidován na rozhraní anoda–elektrolyt na vodíkové protony (H^+), které jsou transportovány přes elektrolyt. Nakonec vodíkové protony reagují s kyslíkem za vzniku vodní páry. Schématické zobrazení SOFC-H je na *obr. 17* [26].

Vodní pára s nezreagovaným kyslíkem odchází na katodové straně, zatímco nezreagovaný amoniak, dusík a vodík odchází na anodové straně [30], [35]. V tomto typu článku na anodě nevzniká voda, proto při použití SOFC-H nedochází ke vzniku NO_x . Rozklad amoniaku je zde stejný jako v rovnici (5.1), rovnice (5.4) a (5.5) poté uvádí proces na anodě a katodě [26]:



Studie [61] uvádí, že podle teorie je SOFC-H optimální technologií díky vysokému potenciálu špičkových výkonových hustot, dosahující až $700 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$, a nízké produkci NO_x . SOFC-O prostřednictvím stejného modelování dosahuje nižších hodnot, přibližně $600 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Experimentální měření však přineslo rozdílné výsledky. SOFC-O při tomto experimentu dosáhl nejvyšší výstupní výkon $1100 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ při $650 \text{ }^\circ\text{C}$, zatímco SOFC-H dosáhl pouze $275 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ při $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Studie to odůvodňuje neočekávaným vývojem ředění vodíku na katodě SOFC-H, které snižuje výstupní výkon. Z této studie tedy jednoznačně vyplývá, že je třeba ještě provést další řadu výzkumů a experimentů, než bude možné jednoznačně stanovit, který z těchto dvou FC je výkonnější.



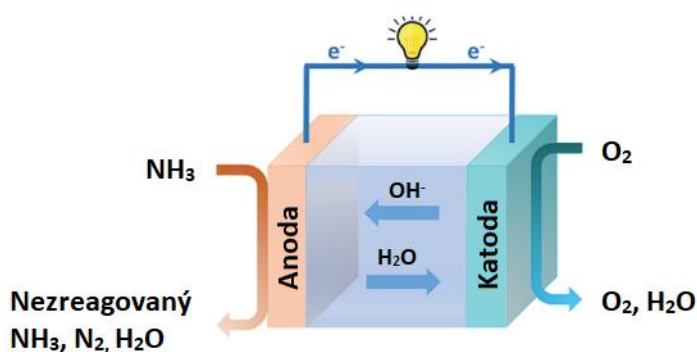
Obr. 17 Schéma SOFC-H; upraveno dle [26]

5.2.2 ALKALICKÉ A ALKALICKÉ MEMBRÁNOVÉ PALIVOVÉ ČLÁNKY

Od raných fází vývoje palivových článků byly AFC studovány a využívány v praktických systémech, jako jsou vesmírné aplikace, vozidla a skladování energie. AFC využívají jako elektrolyt vodný roztok alkalického hydroxidu na bázi vody, jako je například hydroxid draselný (KOH) nebo hydroxid sodný (NaOH). K uzavření obvodu a získání elektrické energie putují ionty hydroxidů přes elektrolyt. AFC pracují v teplotách v rozmezí $200\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C}$ [26].

Alkalické membránové palivové články (AMFC) fungují na podobných principech jako AFC. Pracují však při nižších provozních teplotách okolo $50\text{--}120 \text{ }^\circ\text{C}$. Kyslík se přivádí na katodu, kde dochází k reakci s vodou za vzniku iontů hydroxidů. Ionty jsou pak transportovány přes alkalickou membránu na anodickou stranu, kde s roztaveným nebo vodným alkalickým elektrolytem anionty reagují s palivem. V tomto případě je palivo přímo amoniak. Schématické provedení AMFC je zobrazeno na obr. 18 [26], [43].

Hejze a spol. [62] uvedli, že amoniak lze použít v AFC při pracovní teplotě $200\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C}$ a hustotě výkonu $40 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ při $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Nedávná studie [63] zkoumala oxidaci amoniaku na katalyzátoru Pt/C v roztaveném hydroxidovém elektrolytu. Bylo zjištěno, že platina vykazuje katalytickou aktivitu na oxidaci amoniaku [64].



Obr. 18 Schéma AMFC; upraveno dle [26]

Narozdíl od SOFC, kde se amoniak zpočátku rozkládá na dusík a vodík, AMFC používají jako palivo přímo amoniak. To zamezuje potřebu pro vysoké teploty a reakce probíhá bez ohledu na tento krok rozložení. Pro zvýšení hustoty výkonu palivového článku jsou OH ionty typicky zaváděny do anodické složky pro zvýšení rychlosti reakce. AMFC jsou rovněž považovány za atraktivního konkurenta PEMFC, které se již dnes běžně používají ve vodíkových palivových článcích. Rovnice (5.6) a (5.7) uvádí proces na anodě a katodě AMFC [26]:



6 SOUČASNÉ APLIKACE AMONIAKU JAKO PALIVA

V této kapitole jsou blíže uvedeny některé nadějně nebo často diskutované projekty zabývající se amoniakem jako alternativního paliva v námořní a automobilové dopravě.

6.1 NÁMOŘNÍ PRŮMYSL

Studie [65] poskytuje podrobné posouzení vhodnosti použití amoniaku pro toto odvětví. Studie zejména poukazuje na to, že námořní ICE motory poháněné amoniakem jsou z hlediska výkonu srovnatelné s těmi, které používají motorovou naftu či zemní plyn. Technologická skupina Wärtsilä v tomto odvětví představila první komerčně dostupný čtyřdobý motor založený na amoniaku. Uvedení do prodeje by mělo být v průběhu roku 2024. Palivový systém na bázi amoniaku vychází ze systému LNG, který je v lodním průmyslu osvědčený. Výrobce uvádí, že toto nové řešení může okamžitě snížit emise skleníkových plynů o více než 70 % ve srovnání se současnými fosilními palivy a splnit tak současný cíl EU snížit skleníkové plyny do roku 2050 [66].

Také použití palivových článků v lodním průmyslu také nabývá stále většího zájmu díky možnosti jejich provozu na vodík, amoniak a metanol. Instalace FC však vyžaduje kompletní revizi motorových systémů, což v konečném důsledku vede k vyšším ekonomickým nákladům. Objemová hustota energie FC je navíc ve srovnání s jinými alternativami výrazně nižší. V současnosti proto lze použít FC pouze na plavidlech určených pro krátké a střední vzdálenosti. Díky výrazným pokrokům technologie FC za posledních pár let však není vyloučeno, že by se jejich aplikace v blízké budoucnosti mohla uskutečnit. V současnosti však v odvětví námořní dopravy neexistuje žádná vystavěná infrastruktura, která by tuto technologii podporovala [65].

6.2 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

Přestože se o amoniaku v posledních letech spekuluje jako o možném palivu v automobilech, existuje dnes pouze jen několik společností, které se opravdu pokusily vytvořit funkční vozidlo pracující na amoniak či palivovou směs s ním spojenou. Když už se přeci jenom objeví projekt nabízející schopné řešení použití amoniaku jako paliva ve spalovacích motorech, blíže specifické informace jsou téměř vždy nedostupné. Následující projekty jsou zde proto uvedeny spíše pro kontext dosavadního poznání a vývoje, než pro samotný popis a posouzení jejich charakteristik.

6.2.1 AMWEH

V roce 2013 přišla jihokorejská společnost KIER s prototypem hybridního vozidla s názvem AmVeh. Palivová směs se skládá ze 70 % amoniaku a 30 % benzínu. Vývojáři představili jednotku na LPG–benzín přidáním řídicího systému a odstraněním korodujících kovů obsahujících měď. Bylo však třeba provést další výzkumy, aby tento systém mohl být proveditelný v hromadné výrobě, včetně zdokonalení a optimalizace palivového systému a

systemu následného zpracování výfukových plynů [67]. Bohužel v současnosti společnost ani žádná další literatura neuvádí, jak současný vývoj probíhá.

6.2.2 MARANGONI TOYOTA GT-86 ECO EXPLORER

Marangoni Toyota GT-86 Eco-Explorer, zobrazen na *obr. 19* je hybridní automobil poháněný směsí amoniaku a benzínu, navržený italským výrobcem pneumatik Marangoni. GT86-R Maragoni je vybaven systémem, který nabízí dvojí dodávku paliva. Auto může jezdit na benzín nebo používat amoniak uložený v samostatné nádrži. Při otáčkách do 2 800 min⁻¹ lze jako palivo používat pouze amoniak. Při vyšším zatížení motoru je možné přejít na přímé vstřikování a benzín. Systém využívá speciální redukční ventil a speciální řídicí jednotku k zajištění a splnění všech požadavků na bezpečnost a spolehlivost zahrnující použití amoniaku. Tento systém zcela eliminuje emise jemných prachových částic a výrazně snižuje emise CO₂. [68].



Obr. 19 Marangoni Toyota GT-86 Eco-Explorer [68]

6.2.3 SPALOVACÍ MOTOR NA ČISTÝ AMONIAK?

Čínská společnost GAC ve spolupráci s automobilkou Toyota představila průkopnický dvoulitrový spalovací motor, který údajně dokáže účinně a bezpečně spalovat kapalným amoniakem. Jak samotná společnost uvádí, jejich cílem je na trh uvést novou protiváhu proti současně rostoucímu trendu elektromobilů jakožto budoucnosti automobilového průmyslu. Společnost uvádí, že se jí podařilo překonat problematické spalovací vlastnosti amoniaku, a přichází tak s motorem o výkonu 120 kW, emitující o 90 % méně CO₂ ve srovnání s benzínem. Toyota dále uvedla, že plánuje vozy začít testovat v průběhu roku 2026 [69]. Vzhledem k tomu, že představení proběhlo přibližně v polovině roku 2023, žádné další bližší informace zatím nejsou k dispozici.

6.2.4 AMOGY TRUCK

V lednu roku 2023 oznámil výrobce Amogy úspěšné testování prvního elektrického nákladního tahače, který používá amoniak jako zdroj energie. Tento tahač, viz *obr. 20*, je

založený na modelu amerického tahače Freightliner Cascadia, je určen pro silniční soupravy o hmotnosti 15–36 tun. Jeho systém funguje na základě principu nepřímého palivového článku, který využívá amoniak. Amoniaková energetická jednotka, pohánějící vozidlo, poskytuje elektrický výkon 300 kW [70].



Obr. 20 Amogy Truck [70]

ZÁVĚR

Náhrada fosilních paliv těmi obnovitelnými je jedním z klíčových a zároveň jedním z nejpálčivějších problémů lidstva. Spalování fosilních paliv se již přímo negativně projevuje na naší zemi. V obecné sféře se například jedná o tání ledovců a s tím spojené zvyšování vodních hladin. Také vysoké teploty a enormní sucha v některých částech světa jsou jedním z častých následků. Jako řešení těchto problémů souvisejících se spalováním fosilních paliv se mimo jiné nabízí použití bezuhlíkového paliva, jako je právě například amoniak.

Bakalářská práce se zabývá studiem amoniaku jako alternativního paliva budoucnosti. Cílem práce bylo zhodnotit amoniak jako potenciální látku sloužící jako palivo, přiblížit jeho metody výroby a porovnat tuto látku s jinými alternativními palivy, zejména pak vodíkem jakožto v současnosti nejvíce probíranou látkou z pohledu alternativních paliv.

Z pohledu výroby amoniaku je současná syntéza amoniaku prováděna výhradně metodou zvanou Haber-Boschův proces. Výroba amoniaku pomocí tohoto procesu je energeticky i environmentálně velice náročná, způsobující až 1 % globálních emisí za rok a 1,8–3 % konečné celosvětové roční spotřeby energie. Tato náročnost však není způsobena přímo procesem syntézy, ale způsobem výroby vodíku, který je v současnosti nejčastěji vyráběn parní reformací ze zemního plynu. Alternativní technologie zmírňující uhlíkovou stopu, jako je výroba vodíku elektrolýzou či výroba amoniaku pomocí elektrochemické redukce dusíku, jsou teprve v rané fázi svého vývoje. Předpokládá se však, že tyto technologie v budoucnosti umožní výrobu tzv. zeleného amoniaku, který bude mít nulovou či minimální ekologickou stopu.

Při pohledu na vlastnosti amoniaku se může zdát, že tuto látku nelze použít pro palivové aplikace. Slabé spalovací vlastnosti amoniaku, jako je například vysoká teplota samovznícení (651 °C), velmi nízká rychlost hoření (0,06–0,08 m·s⁻¹) a úzký limit hořlavosti nebo velmi vysoká hodnota výparného tepla (1370 kJ·kg⁻¹), jasně ukazují neochotu amoniaku hořet. Práce rovněž poukazuje na silné stránky amoniaku, které se ve srovnání právě například s vodíkem mohou v jistých pohledech jevit jako lepší palivo. Klíčovým rozdílem je objemová hustota energie, kterou má amoniak oproti vodíku téměř dvojnásobnou. Dalším zcela zásadním rozdílem jsou náklady na skladování a přepravu. Skladovat vodík ať už v plynném, nebo kapalném stavu za velmi nízkých teplot je ekonomicky náročné, nehledě na to, že přeprava vodíku musí podléhat přísným bezpečnostním nárokům. Na druhou stranu amoniak je poměrně jednoduché a levné přepravovat a dlouhodobě skladovat. Díky tomu, že se amoniak po více než století používá jako hnojivo, jeho logistická a dopravní struktura je po celém světě na vysoké úrovni. Zároveň jeho nízká reaktivita, na rozdíl od vodíku, nevyvolává riziko výbuchu. Jediným bezpečnostním rizikem je únik amoniaku, jehož toxicita může být ve vyšších koncentracích smrtelná. Vodík se díky svým spalovacím vlastnostem nabízí jako vhodné bezuhlíkové palivo budoucnosti. Amoniak, jakožto vodíkové palivo, může být v budoucnosti přijat jako palivo právě skrze vodík, a je proto možné jej v dlouhodobém měřítku vnímat jako určitou nadstavbu vodíkového paliva.

Z hlediska použití amoniaku jako paliva byly na základě vybraných studií vyvozeny tyto závěry:

- Samotný amoniak jako palivo v současných spalovacích motorech přináší hned několik úskalí souvisejících s jeho nepříznivými spalovacími vlastnostmi. Tyto vlastnosti velmi výrazně ztěžují použití samotného amoniaku jako paliva. Jedná se

zejména o výše uvedené spalovací vlastnosti. Jako řešení těchto nežádoucích vlastností se nabízí konstrukční úprava stávajících spalovacích systémů. Téměř žádná dostupná studie však nenabízí bližší konkrétní konstrukční řešení. Mnoho studií ale na druhou stranu souhlasí s tím, že pro zajištění stabilního spalování čistého amoniaku v současných spalovacích motorech je třeba používat velmi vysoké kompresní poměry. Pro vznětové motory se doporučují poměry až 35:1, u zážehových motorů až 14:1. Dále se také u zážehových motorů doporučuje zvýšit hodnotu vstřikovacího tlaku nad rámec standardu až o 30 barů. Studie se rovněž shodují na tom, že zážehové motory jsou pro čistý amoniak způsobilější, protože palivo je zapalováno svíčkou a díky vysokému oktanovému číslu amoniak odolává klepání motoru. Přestože se v některých případech podařilo zajistit chod motoru, výsledné výkony byly ve srovnání s konvenčními palivy velmi nízké. I přes všechny tyto nepříznivé vypadající výsledky vybraných studií přichází v roce 2023 společnost GAC společně s automobilkou Toyota s oznámením, že se jim podařilo překonat neochotu amoniaku hořet a vytvořili tak spalovací motor schopný pracovat na čistý amoniak. Kromě toho Toyota dále uvedla, že první testy vozidel začnou v průběhu roku 2026. Další, blíže specifické informace nejsou bohužel v současnosti k dispozici. Je proto možné, že svět se ještě v této dekádě dočká spalovacích motorů na čistý amoniak.

- Ke zlepšení nežádoucích spalovacích vlastností samotného amoniaku se nabízí hledání směsí amoniaku s fosilními palivy nebo s vodíkem. Fosilní paliva ve směsi s amoniakem přinášejí lepší stabilitu spalování a vyšší výkon motoru na úkor tvorby CO_2 a NO_x . Mimo běžná fosilní paliva se několik studií zabývalo směsí amoniaku s DME. DME se díky svým vlastnostem, jako je dobrá mísitelnost nebo jeho rychlé odpařování, nabízí jako vhodné palivo, které by vyvážilo nežádoucí spalovací vlastnosti amoniaku. Přestože se našly takové poměry směsi, které zajišťovaly stabilní chod motoru, ukázalo se, že výkonové charakteristiky této směsi byly ve srovnání s čistou naftou slabé. Studie palivové směsi amoniaku a vodíku prokázaly, že vodík je vhodnou přísadou díky své velmi vysoké rychlosti hoření a tím, že se rovněž jedná o bezuhlíkové palivo. Ukázalo se, že podíl vodíku ve směsi v rozsahu 5–20 % zvyšuje výkon motoru až na úroveň srovnatelné s konvenčními palivy pod podmínkou, že jsou použity vhodné podpůrné strategie, jako zmiňované zvýšení kompresního poměru nebo zvýšení sacího tlaku. Vodík dále zvyšuje stabilitu spalování, a dokonce snižuje emise NO_x . Díky těmto vlastnostem lze tuto palivovou směs označit za jednu z možných schopných alternativ v oblasti bezuhlíkových paliv.
- Poslední, v současnosti velmi diskutovanou možností použití amoniaku jako paliva v dopravním odvětví jsou palivové články. Palivové články jsou lákavé hlavně díky své vysoké účinnosti přeměny chemické energie na energii elektrickou. Dále jejich kompaktnost umožňuje navrhnout velikost článků dle potřeby zařízení. Zároveň přináší bezuhlíkové řešení. Vzhledem k tomu, že amoniak má větší objemovou hustotu energie než vodík, budoucí nahrazení vodíku amoniakem se jeví jako jedna z možných cest. Současným problémem ve vývoji palivových článků používajících přímo amoniak je volba vhodné anody, která dokáže z hlediska její životnosti odolávat výkyvům teploty a toxicitě amoniaku. Každopádně po vyřešení těchto komplikací by v cestě použití amoniaku jako přímého paliva v aplikacích palivových článků, zejména článků s tuhými oxidy, nemělo nic bránit.

Na základě těchto poznatků lze stanovit, že výhody amoniaku převyšují jeho nevýhody a je pravděpodobně jen otázkou času, než se na trhu začnou objevovat první koncepty poháněné touto chemickou látkou. Díky své cenově přijatelné výrobě a logistické dostupnosti může být

amoniak konkurenceschopný i mezi ostatními alternativními palivy. Otázkou však zůstává, zdali je společnost schopna přijmout tuto chemickou látku. Může se stát, že například kvůli své toxicitě a dráždivému zápachu se amoniak, byť jako schopné palivo, stane terčem kritiky a bude společností i přes svoje benefity zavržen.

S ohledem na zadání bakalářské práce lze stanovit, že všechny cíle byly úspěšně splněny.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Nobel Laureates in Chemistry. In: *Nobel Laureates in Chemistry 1901-1992*. 3rd. Washington: American Chemical Society, 1993, s. 118. History of modern chemical sciences. ISBN 0-8412-2690-3.
- [2] Chem USL NEWSLETTER 2009. In: *Web Archive* [online]. 2009 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20110113022251/http://www.ucl.ac.uk/chemistry/alumni/documents/A5booklet_020909.pdf
- [3] Haberův–Boschův proces. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Haber%C5%AFv%E2%80%93Bosch%C5%AFv_proces#cite_note-8
- [4] Introduction to NH₃ Fuel. In: *NH₃FuelAssociation* [online]. 2016 [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://nh3fuelassociation.org/introduction/>
- [5] EMTIAZ ALI BROHI. *Ammonia as fuel for internal combustion engines?* Sweden, 2014. Master's thesis. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [6] Kailos, N. C. *Ammonia as an Alternative Fuel in Army Aircraft Engines*. U.S. Army Aviation Materiel Laboratories: Fort Eustis, VA, 1966.
- [7] NEWHALL, H. K. a E. S. STARKMAN. *Theoretical Performance of Ammonia as a Gas Turbine Fuel* [online]. - [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: doi:10.4271/660768
- [8] VERKAMP, F.J., M.C. HARDIN a J.R. WILLIAMS. Ammonia combustion properties and performance in gas-turbine burners. *Symposium (International) on Combustion* [online]. 1967, 11(1), 985-992 [cit. 2024-01-16]. ISSN 00820784. Dostupné z: doi:10.1016/S0082-0784(67)80225-X
- [9] VALERA-MEDINA, A., F. AMER-HATEM, A. K. AZAD, et al. *Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics* [online]. 2021, 2021-05-06, 35(9), 6964-7029 [cit. 2024-01-16]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/acs.energyfuels.0c03685
- [10] DIMITRIOU, Pavlos a Rahat JAVAID. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, 45(11), 7098-7118 [cit. 2024-01-22]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.209
- [11] Model molekuly amoniaku. In: *Glpautogas* [online]. 2023 [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.glpautogas.info/cs/cpavkove-auto.html>

- [12] RICHTER, Theresia a Rainer NIEWA. Chemistry of Ammonothermal Synthesis. *Inorganics* [online]. 2014, 2(1), 29-78 [cit. 2024-01-14]. ISSN 2304-6740. Dostupné z: doi:10.3390/inorganics2010029
- [13] WAN, Zhijian, Youkun TAO, Jing SHAO, Yinghui ZHANG a Hengzhi YOU. Ammonia as an effective hydrogen carrier and a clean fuel for solid oxide fuel cells. *Energy Conversion and Management* [online]. 2021, 228 [cit. 2024-01-23]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2020.113729
- [14] CHOROWSKI, Maciej, Michał LEPSZY, Krystian MACHAJ, Ziemowit MALECHA, Dominika PORWISIAK, Paweł PORWISIAK, Zbigniew ROGALA a Michał STANCLIK. Challenges of Application of Green Ammonia as Fuel in Onshore Transportation. *Energies* [online]. 2023, 16(13) [cit. 2024-01-14]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16134898
- [15] HUMMELSHØJ, Jens S., Rasmus Zink SØRENSEN, Marina Yu. KUSTOVA, Tue JOHANNESSEN, Jens K. NØRSKOV a Claus Hviid CHRISTENSEN. Generation of Nanopores during Desorption of NH₃ from Mg(NH₃)₆Cl₂. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2006, 2006-01-01, 128(1), 16-17 [cit. 2024-01-17]. ISSN 0002-7863. Dostupné z: doi:10.1021/ja0556070
- [16] CARDOSO, João Sousa, Valter SILVA, Rodolfo C. ROCHA, Matthew J. HALL, Mário COSTA a Daniela EUSÉBIO. Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier, 2021, 296, 126562 [cit. 2024-01-12]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2021.126562
- [17] CHEHADE, Ghassan a Ibrahim DINCER. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel. *Fuel* [online]. 2021, 299 [cit. 2024-01-14]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2021.120845
- [18] VALERA-MEDINA, A, H XIAO, M OWEN-JONES, W.I.F. DAVID a P.J. BOWEN. Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2018, 69, 63-102 [cit. 2024-01-08]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.peccs.2018.07.001
- [19] CHRISTENSEN, Claus Hviid, Tue JOHANNESSEN, Rasmus Zink SØRENSEN a Jens K. NØRSKOV. Towards an ammonia-mediated hydrogen economy? *Catalysis Today* [online]. 2006, 111(1-2), 140-144 [cit. 2024-01-23]. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2005.10.011
- [20] SONKER, Muskan, Saurabh Kr TIWARY, Nehil SHREYASH, Sushant BAJPAI, Mainak RAY, Sanjay Kumar KAR a M.S. BALATHANIGAIMANI. Ammonia as an alternative fuel for vehicular applications: Paving the way for adsorbed ammonia and direct ammonia fuel cells. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier, 2022, (376), 133960 [cit. 2024-01-08]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2022.133960

- [21] KOBAYASHI, Hideaki, Akihiro HAYAKAWA, K.D. Kunkuma A. SOMARATHNE a Ekenechukwu C. OKAFOR. Science and technology of ammonia combustion. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2019, 37(1), 109-133 [cit. 2024-01-14]. ISSN 15407489. Dostupné z: doi:10.1016/j.proci.2018.09.029
- [22] , Royal Society. Ammonia: Zero-carbon Fertiliser, Fuel and Energy Store: Policy Briefing. In: *Royal Society* [online]. 2020 [cit. 2024-01-15]. ISBN 978-1-78252-448-9. Dostupné z: <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>
- [23] MAYER, Patricia, Adrian RAMIREZ, Giuseppe PEZZELLA, Benedikt WINTER, S. Mani SARATHY, Jorge GASCON a André BARDOW. Blue and green ammonia production: A techno-economic and life cycle assessment perspective. *IScience* [online]. 2023, 26(8) [cit. 2024-01-20]. ISSN 25890042. Dostupné z: doi:10.1016/j.isci.2023.107389
- [24] NEGRO, Viviana, Michel NOUSSAN a David CHIARAMONTI. The Potential Role of Ammonia for Hydrogen Storage and Transport: A Critical Review of Challenges and Opportunities. *Energies* [online]. 2023, 16(17) [cit. 2024-01-23]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16176192
- [25] GHAVAM, Seyedehhoma, Maria VAHDATI, I. A. Grant WILSON a Peter STYRING. Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2021, 2021-3-29, 9 [cit. 2024-01-17]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2021.580808
- [26] JEERH, Georgina, Mengfei ZHANG a Shanwen TAO. Recent progress in ammonia fuel cells and their potential applications. *Journal of materials chemistry. A, Materials for energy and sustainability* [online]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2021, 9(2), 727-752 [cit. 2024-01-13]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/d0ta08810b
- [27] MACFARLANE, Douglas R., Pavel V. CHEREPANOV, Jaecheol CHOI, Bryan H.R. SURYANTO, Rebecca Y. HODGETTS, Jacinta M. BAKKER, Federico M. FERRERO VALLANA a Alexandr N. SIMONOV. A Roadmap to the Ammonia Economy. *Joule* [online]. Elsevier, 2020, 4(6), 1186-1205 [cit. 2024-01-12]. ISSN 2542-4351. Dostupné z: doi:10.1016/j.joule.2020.04.004
- [28] EGERER, Jonas, Veronika GRIMM, Kiana NIAZMAND a Philipp RUNGE. The economics of global green ammonia trade – “Shipping Australian wind and sunshine to Germany.” *Applied Energy* [online]. 2023, 334 [cit. 2024-01-20]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2023.120662
- [29] ZINCIR, Burak. Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2022, 47(41), 18148-18168 [cit. 2024-01-17]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.03.281

- [30] OLABI, A.G., Mohammad Ali ABDELKAREEM, Mohammed AL-MURISI, et al. Recent progress in Green Ammonia: Production, applications, assessment; barriers, and its role in achieving the sustainable development goals. *Energy conversion and management* [online]. Elsevier, 2023, 277, 116594 [cit. 2024-01-12]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2022.116594
- [31] ZAYAT, Billal, Debanjan MITRA a S. R. NARAYANAN. Inexpensive and Efficient Alkaline Water Electrolyzer with Robust Steel-Based Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2020, 2020-07-29, 167(11) [cit. 2024-01-15]. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/1945-7111/aba792
- [32] ZAMFIRESCU, C. a I. DINCER. Using ammonia as a sustainable fuel. *Journal of power sources* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 2008, 185(1), 459-465 [cit. 2024-01-12]. ISSN 0378-7753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2008.02.097
- [33] Ammonia as a Marine Fuel. In: *Group Technology & Research, D&G* [online]. 2020 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>
- [34] TORNATORE, Cinzia, Luca MARCHITTO, Pino SABIA a Mara DE JOANNON. Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Frontiers in Mechanical Engineering* [online]. 2022, 2022-7-22, 8 [cit. 2024-01-22]. ISSN 2297-3079. Dostupné z: doi:10.3389/fmech.2022.944201
- [35] CAI, Andrew a Zoe ROZARIO. Direct Ammonia Fuel Cells: A general overview, current technologies and future directions. *Johnson Matthey technology review* [online]. Johnson Matthey, 2022, 66(4), 479-489 [cit. 2024-01-12]. ISSN 2056-5135. Dostupné z: doi:10.1595/205651322X16584143272416
- [36] Výroba amoniaku elektrolýzou by mohla konečně vyřadit Haber-Boschovu syntézu. In: *Osel.cz* [online]. 2021 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/12049-prulom-v-elektrolyze-amoniaku-by-mohl-konecne-vyradit-haber-boschovu-syntezu.html>
- [37] Ammonia Technology Roadmap. In: *Ammonia Technology Roadmap: Towards More Sustainable Nitrogen Fertilizer Production* [online]. IEA, 2022, s. 163 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
- [38] LEE, Donggeun a Han Ho SONG. Development of combustion strategy for the internal combustion engine fueled by ammonia and its operating characteristics. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2018, 32(4), 1905-1925 [cit. 2024-01-16]. ISSN 1738-494X. Dostupné z: doi:10.1007/s12206-018-0347-x
- [39] Fuels - Higher and Lower Calorific Values. In: *Engineering toolbox* [online]. 2023 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

- [40] MEULENBELT, Jan. *Ammonia. Medicine* [online]. 2003, 31(9), 30-31 [cit. 2024-01-17]. ISSN 13573039. Dostupné z: doi:10.1383/medc.31.9.30.27713
- [41] TORNATORE, Cinzia, Luca MARCHITTO, Pino SABIA a Mara DE JOANNON. Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Frontiers in Mechanical Engineering* [online]. 2022, 2022-7-22, 8 [cit. 2024-01-14]. ISSN 2297-3079. Dostupné z: doi:10.3389/fmech.2022.944201
- [42] ZHOU, Lei, Lijia ZHONG, Zongkuan LIU a Haiqiao WEI. Toward highly-efficient combustion of ammonia-hydrogen engine: Prechamber turbulent jet ignition. *Fuel* [online]. 2023, 352 [cit. 2024-01-20]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2023.129009
- [43] MANIGANDAN, S., Je Ir RYU, T.R. PRAVEEN KUMAR a Mahmoud ELGENDI. Hydrogen and ammonia as a primary fuel – A critical review of production technologies, diesel engine applications, and challenges. *Fuel* [online]. 2023, 352 [cit. 2024-01-14]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2023.129100
- [44] GRENNFELT, Peringe, Anna ENGLERYD, Martin FORSIUS, Øystein HOV, Henning RODHE a Ellis COWLING. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio* [online]. 2020, 49(4), 849-864 [cit. 2024-01-14]. ISSN 0044-7447. Dostupné z: doi:10.1007/s13280-019-01244-4
- [45] TAWALBEH, Muhammad, Sana Z.M. MURTAZA, Amani AL-OTHMAN, Abdul Hai ALAMI, Karnail SINGH a Abdul Ghani OLABI. Ammonia: A versatile candidate for the use in energy storage systems: A versatile candidate for the use in energy storage systems. *Renewable energy* [online]. Elsevier, 2022, 194, 955-977 [cit. 2024-01-12]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2022.06.015
- [46] YAPICIOGLU, Arda a Ibrahim DINCER. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, 103, 96-108 [cit. 2024-01-16]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.12.023
- [47] DIMITRIOU, Pavlos a Rahat JAVAID. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, 45(11), 7098-7118 [cit. 2024-01-15]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.209
- [48] LHUILLIER, Charles, Pierre BREQUIGNY, Francesco CONTINO a Christine MOUNAÏM-ROUSSELLE. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions. *Fuel (Guildford)* [online]. Kidlington: Elsevier, 2020, 269, 117448 [cit. 2024-01-12]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.117448

- [49] CORNELIUS, Walter, L. William HUELLMANTEL a Harry R. MITCHELL. *Ammonia as an Engine Fuel* [online]. - [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: doi:10.4271/650052
- [50] GROSS, Christopher W. a Song-Chang KONG. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia–DME mixtures. *Fuel* [online]. 2013, 103, 1069-1079 [cit. 2024-01-15]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.08.026
- [51] KOIKE, Makoto a Tetsunori SUZUOKI. In-line adsorption system for reducing cold-start ammonia emissions from engines fueled with ammonia and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, 44(60), 32271-32279 [cit. 2024-01-16]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.10.105
- [52] NONAVINAKERE VINOD, Kaushik, Matt GORE, Hanzhang LIU a Tiegang FANG. Experimental characterization of ammonia, methane, and gasoline fuel mixtures in small scale spark ignited engines. *Applications in Energy and Combustion Science* [online]. 2023, 16 [cit. 2024-01-20]. ISSN 2666352X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaecs.2023.100205
- [53] NIKI, Yoichi, Dong-Hoon YOO, Koichi HIRATA a Hidenori SEKIGUCHI. Effects of Ammonia Gas Mixed Into Intake Air on Combustion and Emissions Characteristics in Diesel Engine. *ASME 2016 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2016, 2016-10-09, - [cit. 2024-01-15]. ISBN 978-0-7918-5050-3. Dostupné z: doi:10.1115/ICEF2016-9364
- [54] COMOTTI, Massimiliano a Stefano FRIGO. Hydrogen generation system for ammonia–hydrogen fuelled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2015, 40(33), 10673-10686 [cit. 2024-01-14]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.06.080
- [55] VALERA-MEDINA, A., S. MORRIS, J. RUNYON, D.G. PUGH, R. MARSH, P. BEASLEY a T. HUGHES. Ammonia, Methane and Hydrogen for Gas Turbines. *Energy Procedia* [online]. 2015, 75, 118-123 [cit. 2024-01-14]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.07.205
- [56] HERBINET, Olivier, Pietro BARTOCCI a Alon GRINBERG DANA. On the use of ammonia as a fuel – A perspective. *Fuel communications* [online]. Elsevier, 2022, 11, 100064 [cit. 2024-01-12]. ISSN 2666-0520. Dostupné z: doi:10.1016/j.jfueco.2022.100064
- [57] WESTLYE, Fredrik R., Anders IVARSSON a Jesper SCHRAMM. Experimental investigation of nitrogen based emissions from an ammonia fueled SI-engine. *Fuel* [online]. 2013, 111, 239-247 [cit. 2024-03-20]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2013.03.055

- [58] LUCENTINI, Ilaria, Xènia GARCIA, Xavier VENDRELL a Jordi LLORCA. *Review of the Decomposition of Ammonia to Generate Hydrogen* [online]. 2021, 2021-12-29, 60(51), 18560-18611 [cit. 2024-01-14]. ISSN 0888-5885. Dostupné z: doi:10.1021/acs.iecr.1c00843
- [59] BARNOON, Pouya. Modeling of a high temperature heat exchanger to supply hydrogen required by fuel cells through reforming process. *Energy Reports* [online]. 2021, 7, 5685-5699 [cit. 2024-01-15]. ISSN 23524847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2021.08.171
- [60] YUE, Meiling, Hugo LAMBERT, Elodie PAHON, Robin ROCHE, Samir JEMEI a Daniel HISSEL. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, 146 [cit. 2024-01-15]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.111180
- [61] SIDDIQUI, Osamah a Ibrahim DINCER. A review and comparative assessment of direct ammonia fuel cells. *Thermal Science and Engineering Progress* [online]. 2018, 5, 568-578 [cit. 2024-01-15]. ISSN 24519049. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsep.2018.02.011
- [62] HEJZE, T., J.O. BESENHARD, K. KORDESCH, M. CIFRAIN a R.R. ARONSSON. Current status of combined systems using alkaline fuel cells and ammonia as a hydrogen carrier. *Journal of Power Sources* [online]. 2008, 176(2), 490-493 [cit. 2024-02-08]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2007.08.117
- [63] YANG, Jun, Hiroki MUROYAMA, Toshiaki MATSUI a Koichi EGUCHI. Development of a direct ammonia-fueled molten hydroxide fuel cell. *Journal of Power Sources* [online]. 2014, 245, 277-282 [cit. 2024-02-08]. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2013.06.143
- [64] LAN, Rong a Shanwen TAO. Direct Ammonia Alkaline Anion-Exchange Membrane Fuel Cells. *Electrochemical and Solid-State Letters* [online]. 2010, 13(8) [cit. 2024-02-08]. ISSN 10990062. Dostupné z: doi:10.1149/1.3428469
- [65] de Vries, Niels. Safe and Effective Application of Ammonia as a Marine Fuel. In: *Delft Perspective University of Technology* [online]. 2019 [cit. 2024-01-13]. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:be8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8?collection=education>
- [66] Wärtsilä continues to set the pace for marine decarbonisation with launch of world-first 4-stroke engine-based ammonia solution. In: *Wärtsilä* [online]. 2023 [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.wartsila.com/media/news/15-11-2023-wartsila-continues-to-set-the-pace-for-marine-decarbonisation-with-launch-of-world-first-4-stroke-engine-based-ammonia-solution-3357985>

- [67] T. Brown. The AmVeh – an ammonia fueled car from south Korea. Ammonia Energy. In: *Ammonia Energy Association* [online]. 2013 [cit. 2024-01-13]. Dostupné z: <https://nh3fuelassociation.org/2013/06/20/the-amveh-an-ammonia-fueled-car-from-south-korea/>
- [68] Ammonia fueled sports car: Marangoni Toyota GT86 Eco Explorer. In: *Nh3fuelassociation* [online]. 2013 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://nh3fuelassociation.org/2013/04/25/ammonia-fuel-marangoni-eco-explorer/>
- [69] China's GAC Unveils World's First Ammonia Car Engine. In: *Bloomberg* [online]. 2023 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.bnnbloomberg.ca/china-s-gac-unveils-world-s-first-ammonia-car-engine-1.1937948>
- [70] Vodík z amoniaku jako perspektivní zdroj energie pro palivočlánkové nákladní automobily a lodě. In: *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2023 [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/403.php>
- [71] Proton exchange membrane electrolysis. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_electrolysis
- [72] SURYANTO, Bryan H. R., Karolina MATUSZEK, Jaecheol CHOI, et al. Nitrogen reduction to ammonia at high efficiency and rates based on a phosphonium proton shuttle. *Science* [online]. 2021, 2021-06-11, 372(6547), 1187-1191 [cit. 2024-01-24]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.abg2371

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AEL	Alkalický elektrolyzér (Alkaline Electrolyser)
AFC	Alkalický palivový článek (Alkaline Fuel Cell)
AMFC	Alkalický palivový článek s membránou (Alkaline Membrane Fuel Cells)
CCS	Technologie zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (Carbon Capture and Storage)
CI	Vznětový motor (Compression Ignition)
DEE	Diethylether
DME	Dimethylether
EAS	Elektrochemická syntéza amoniaku (Electrochemical Ammonia Synthesis)
ERG	Recirkulace výfukových plynů (Exhaust Gas Recirculation)
FC	Palivový článek (Fuel Cell)
HCCI	Vznětový motor s homogenním naplněním spalovacího prostoru (Homogeneous-Charge Compression Ignition)
ICE	Spalovací motor (Internal Combustion Engine)
IEA	Mezinárodní energetická agentura (International Energy Agency)
KOH	Hydroxid draselný
LPG	Zkapalněný ropný plyn (Liquified Petroleum Gas)

NRR		Elektrochemické redukce dusíku (Nitrogen Reduction Reaction)
PEM		Membránové elektrolyzéry s polymerním elektrolytem (Proton Exchange Membrane)
PEMFC		Palivový článek s protonovou výměnnou membránou (Proton-Exchange Membrane Fuel Cell)
ppm		Miliontina celku (Parts Per Million)
SCR		Selektivní katalytická redukce (Selective Catalytic Reduction)
SI		Zážehový motor (Spark Ignition)
SMR		Výroba vodíku z metanu (Steam Methane Reforming)
SOE		Elektrolyzér pevných kovů (Solid Oxide Electrolyser)
SOFC		Palivový článek s pevným oxidem (Solid Oxide Fuel Cell)
c	[Ma]	Rychlost zvuku
m	[Mt]	Hmotnost v jednotkách milion tun
T	[K]	Termodynamická teplota