České vysoké učení technické v Praze Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

> Katedra Fyziky Obor: Fyzika plazmatu a termojaderné fúze



# Studium amplitudové modulace plazmatu multidutinového dielektrického bariérového výboje

# Amplitude modulation study of plasma in multi-hollow surface dielectric barrier discharge

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Vypracoval: Bc. Jiří Fujera Vedoucí práce: doc. RNDr. Tomáš Homola, Ph.D. Rok: 2021

#### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu. Nemám závážný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

Bc. Jiří Fujera

#### Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc. RNDr. Tomášovi Homolovi, Ph.D. a svému konzultantovi Ing. Václavu Pruknerovi, Ph.d. za pomoc při organizaci a provedení experimentů a za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování výzkumného úkolu.

Bc. Jiří Fujera

#### Název práce:

Studium amplitudové modulace plazmatu multidutinového dielektrického bariérového výboje

Autor:	Bc. Jiri Fujera
Obor: Druh práce:	Fyzika plazmatu a termojaderné fúze Výzkumný úkol
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Tomáš Homola, Ph.D. Ústav fyziky plazmatu AV ČR. v vi
Konzultant:	Ing. Václav Prukner, Ph.D. Ústav fyziky plazmatu AV ČR. v.v.i.

Abstrakt: Účinky vlhkosti jsou v ozonové syntéze často přehlížené. V této práci jsme tedy do suchého vzduchu skrze probublávací zhlčovač zavedli vysokou relativní vlhkost a studovali její vliv na multi-dutinový povrchový dielektrický bariérový výboj (MSDBD) a především na ozonovou syntézu. Ve shodě s experimenty na jiných dielektrických výbojích jsme zjistili, že vlhkost silně ovlivňuje jak produkci, tak energetickou účinnost se ztrátami v intervalu 50 % až 85 %. Nejvyšší naměřená účinnost byla 52 g · kWh<sup>-1</sup>, což je značný rozdíl oproti 232 g · kWh<sup>-1</sup>, které jsou dosažitelné v suchém vzduchu.

Klíčová slova: syntéza ozónu, dielektrický bariérový výboj, relativní vlhkost

#### Title:

# Amplitude modulation study of plasma in multi-hollow surface dielectric barrier discharge

Author: Bc. Jiří Fujera

Abstract: The effects of humidity in air is often overlooked aspect in ozone synthesis. So, in this study we introduced high relative humidity through bubbling humidifier into dry synthetic air and studied its effects on multi-hollow surface dielectric barrier discharge (MSDBD) and mainly on ozone synthesis. In accordance with experiments on other DBDs we found out that humidity severely affects both ozone production and energy efficiency with losses ranging from 50% to 85% depending on humidity. Our highest measured energy efficiency was 52 g · kWh<sup>-1</sup>, which is in stark contrast to 232 g · kWh<sup>-1</sup> achievable in dry air.

Key words: ozone synthesis, dielectric barrier discharge, relative humidity

# Obsah

Ú	vod		1
1	<b>Plaz</b> 1.1 1.2 1.3 1.4	<b>ma</b> Studené plazma	<b>2</b> 2 2 4 5
2	<b>Ozó</b> 2.1 2.2 2.3	n Reakce v čistém kyslíku	7 7 8 10 11
3	<b>Exp</b> 3.1 3.2 3.3 3.4	eriment         Uspořádání         Postup         Měření vlhkosti         Vliv vlhkosti         3.4.1         Stabilita         3.4.2         Výkon         3.4.3         Produkce         3.4.4         Energetická účinnost	12 14 14 15 17 18 19 20 20 21
Zá	věr		23
$\mathbf{Li}$	terat	ura	<b>24</b>
Př	filohy	,	<b>28</b>
$\mathbf{A}$	Příl	oha	<b>28</b>

# Úvod

Plazma všemožných typů nalezlo užití v široké škále různých odvětví a množina jeho aplikací se neustále rozrůstá. U vysokoteplotního plazmatu se očekává jeho použití pro dosažení termojaderné fúze, kde je vysoká teplota nezbytná pro překonání Coulombické bariéry slučovaných jader. Nízkoteplotní plazma na druhou stranu nalezlo uplatnění v průmyslu, kde se procesy probíhající ve studeném plazmatu využívají především ve dvou podoblastech: leptání anorganických nebo polymerních povrchů a substrátů a plazmová chemie tedy plazmatem iniciovaná syntéza molekul jako jsou ozón, oxidy dusíku, peroxidy vodíku, dusíkaté kyseliny a další. Syntéza ozónu skrze plazma z dielektrických výbojů je postup známý již více než 150 let a stal se běžně používanou metodou v komerční syntéze ozónu vedle dalších metod jako jsou fotochemická či elektrolytická.

Klasické komerční ozonizátory na principu dielektrických výbojů pracují z venku načerpaným vzduchem, který prochází dielektrickou výbojkou, kde se syntetizuje ozón. Výzkum zefektivnění ozonové výroby se tedy zaměřuje na podmínky v suchém atmosférickém vzduchu [1–5], kde se daří i mnohonásobně překonávat možnosti komerčních ozonizátorů, jejichž účinnosti jsou nejčastěji v intervalu  $50 - 60 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$  [6]. Existuje však o poznání méně prací, ve kterých se jako pracovní plyn používá vlhký vzduch [7–9], což je mnohem blíže klasickému vzduchu, jehož vlhkost se v domácnostech pohybuje mezi 30 - 50%. V této práci tedy rozšíříme experimentální výsledky syntézy v suchém vzduchu v MSDBD uspořádání o vliv vysoké relativní vlhkosti, přičemž jako referenční hodnoty použijeme předchozí práce na tomto uspořádání [5,10]. V teoretické části krátce zmíníme studené plazma, jeho aplikace a zdroje. Dále shrneme znalosti o syntéze ozónu a jeho možných reakcí v plynech, které jsou součástí vzduchu, tedy kyslíku, dusíku a vodních výparů. V experimentální části zavedeme přes probublávací zvlhčovač do suchého syntetického vzduchu vlhkost a budeme sledovat změny v chování výboje a výstupních parametrů ozonové syntézy, tedy množství vyprodukovaného ozónu a celkovou energetickou účinnost výroby.

## Kapitola 1

## Plazma

Plazma, běžně označované jako čtvrté skupenství hmoty, je takový stav systému ionizovaných a neutrálních částic, kdy mají ionizované částice podstatný vliv na chování daného systému. Plazma lze podle jeho vlastností dělit do celé řady různých podskupin. Podle teploty elektronů můžeme plazma rozdělit na klasické, kvantové a relativistické, podle teploty iontů na plazma vysokoteplotní a nízkoteplotní. Rozdíl elektronové iontové teploty nám rozděluje plazma na rovnovážné ( $T_e = T_i$ ) a nerovnovážné ( $T_e \neq T_i$ ). Vliv srážek nám dělí plazma na srážkové, bezesrážkové a pokud dominují kolektivní procesy nad srážkami jde o plazma ideální.

### 1.1 Studené plazma

Jako studené nebo též netermalizované označujeme plazma, jehož elektronová teplota  $T_e$  výrazně převyšuje teplotu iontů  $T_i$  a neutrálních částic  $T_n$  a částice plazmatu tak nejsou v termodynamické rovnováze. Jako studené nazýváme toto plazma, protože ačkoliv se energie elektronů pohybují v řádech jednotek elektronvoltu, teplota iontů a neutrálních částic, které mají dominantní vliv na celkovou teplotu systému, zůstává takřka nezměněna ve srovnání s látkou, ze které bylo plazma vytvořeno. Atmosférické plazma z elektrických výbojů tak dosahuje teplot v řádech stovek kelvin a nelineární fotoionizací laserem ochlazovaných par xenonu lze získat i superchladné plazma o teplotě 100 mK až 10  $\mu$ K [11].

### 1.2 Zdroje nízkoteplotního plazmatu

Abychom vytvořili studené plazma, potřebujeme v systému získat dostatečné množství energetických elektronů, čehož můžeme dosáhnout dvěma způsoby. Buď elektrony do systému "vstříkneme"z externího zdroje, nebo elektrickým polem urychlíme přirozeně se vyskytující volné elektrony. Pod druhý způsob spadají různé elektrické nízkotlaké a vysokotlaké výboje.

- Doutnavé výboje ze stejnosměrného napětí probíhají za nízkého tlaku  $(1-10^4 \text{ Pa})$  mezi dvěma elektrodami (nejčastěji jde o skleněný válec s elektrodami na obou koncích) s napětím v oblastech  $10^2 10^3$  V. Volně se vyskytující elektrony (např. vytvořené kosmickým zářením) jsou urychleny napětím na energie umožňující srážkovou ionizaci. Uvolňuje-li se více elektronů ionizací, než je ztraceno rekombinacemi nebo srážkou se stěnou, vzniká výboj.
- Jako výboje se střídavým napětím o nízké frekvenci označujeme běžně takové, kde frekvence napájecího napětí je menší než 100 Hz. Elektrody se periodicky mění z katod na anody a výboje se tak tvoří dvakrát za jednu periodu, tedy pro každý směr elektrického pole jednou. Střídavé napětí nám umožňuje nemít povrch elektrod z vodivého materiálu, které mohou být poškozeny třeba urychlenými ionty z výbojů. Kdybychom totiž pokryli elektrodu nevodičem u výboje při stejnosměrném napětí, nahromaděný náboj by nabil nevodič na plovoucí potenciál, čímž by došlo, nehledě na vnější napětí, k vyrovnání toku iontů a elektronů a uhašení výboje. U střídavého napětí tento problém není, jelikož obrácením polarity elektrod může výboj probíhat v opačném směru a nahromadění potenciál na nevodiči může dokonce urychlit vznik tohoto nového výboje.
- Jelikož je čas pro nabití nevodiče na plovoucí potenciál velmi rychlý, tak pro nízké frekvence zdrojového napětí je výboj většinu času uhašen. Pokud však navýšíme frekvenci střídavého napětí na jednotky kilohertze a výše, což označujeme jako vysokofrekvenční výboj, zkrátíme nebo plně odstraníme dobu mezi uhašením výboje v jednom směru a jeho zapálení ve směru druhém. Celkový výboj je tak rovnoměrnější, energeticky efektivnější a udržení plazmatu je jednodušší, jelikož vysoká frekvence snižuje ztráty částic nárazem na stěnu.

Výše zmíněné výboje probíhají za sníženého tlaku a vyžadují tedy mnohdy složitá a drahá vakuová zařízení, která tyto výboje znevýhodňují pro praktické aplikace a to obzvláště v oblastech, kde by mělo plazma nahradit dosud používané postupy. Jako užitečnější alternativa se tedy nabízejí neúplné výboje probíhající v plynu za atmosférického tlaku, kde nejčastěji mluvíme o koronách a dielektrických bariérových výbojích (původně označované jako tiché výboje).

- Jako korony označujeme takové neúplné výboje, kde je vzájemná vzdálenost elektrod velká a jedna z elektrod má malý poloměr zakřivení (v poměru ke vzdálenosti elektrod). U této elektrody má elektrické pole velkou intenzitu a dochází zde k ionizaci plynu. Ve větší vzdálenosti od elektrody převládají rekombinační procesy a chemické reakce tak probíhají mezi povětšinou neutrálními radikály.
- Nejjednodušší dielektrické bariérové výboje (DBD) probíhají mezi dvěma deskovými elektrodami vzdálenými 0,1 mm až několik centimetrů pokrytými dielektrikem (keramika, sklo, slída a další). Toto uspořádání je známo jako objemový DBD (VDBD) a jeho schématické zakreslení je na obrázku 1.1 b). Změníme-li uspořádání a tvar elektrod s dielektrikem, můžeme dostat celou



Obrázek 1.1: Typy dielektrických bariérových výbojů: a) cylindrický, b). objemový, c) povrchový, d) koplanární. Převzato z [12]

řadu různých typů DBD, kde nejčastějšími zástupci jsou cylindrický, povrchový a koplanární DBD (po řadě a), c), d) Obr. 1.1). Tato rozmanitost umožňuje optimalizovat dielektrické výboje pro danou aplikaci, například povrchové a koplanární výboje umožňují snadný přístup k plazmatu a hodí se tak pro povrchovou úpravu. Samotné výboje se skládají z vodivých mikrokanálů známých jako filamenty, ve kterých protéká všechen výbojový proud a mají větší podíl ionizovaných částic než okolní plyn. Běžný průměr filamentů je 100  $\mu$ m a doba jejich trvání se pohybuje v intervalu 1 – 10 ns [12].

### 1.3 Aplikace

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tak aplikace studeného plazmatu lze nejjednodušeji rozdělit do dvou podskupin: leptání povrchů a plazmová chemie. Výhody leptání pomocí plazmatu spočívají v přesném zaměření leptavých procesů a absenci toxických či jinak nebezpečných látek, které se vyskytují při leptání pomocí různých kyselin. Například ve výrobě mikročipů [13] lze plazmatem leptat křemíkové destičky s přesností desetin mikrometru bez poškození okolního materiálu. Dále lze plazma využít pro čištění vzduchu [14], vody, či půdy [15] od patogenů nebo chemikálií, v biomedicíně pro léčbu poraněné kůže [16] a dezinfekci jiných biomateriálů [17]. V zemědělství a v potravinářském průmyslu obecně je možnost použití atmosférického plazmatu k ošetření semen, čímž dojde k poklesu množství patogenních mikroorganismů na povrchu semen a navýší se tak jejich klíčivost [18, 19]. Popřípadě lze v plazmatu iniciovanou syntézou oxidů dusíku a dusíkatých kyselin nahradit dosud používaný a energeticky neefektivní Haberův-Boschův proces pro výrobu hnojiv [20]. Potenciál pro použití i v masném průmyslu ukázali Yong a další, když použili plazma k inaktivaci bakterií a plísní na komerčně dostupném sušeném hovězím mase, avšak se zaznamenatelným dopadem na chuť a vůni [21].

### 1.4 Plazmová chemie

Použití plazmatu pro inicializaci chemických reakcí nabízí množství výhod [22]. Teplota a energetická hustota některých komponentů plazmatu může drasticky přesáhnout hodnoty, které jsou v možnostech konvenční chemie. V plazmatu je vysoká koncentrace chemicky aktivních částic jako jsou elektrony, ionty, atomové radikály, fotony různých vlnových délek a excitované atomy a molekuly. Největší výhodou je však jíž zmíněná tepelná nerovnováha mezi elektrony a zbylými částicemi. Většina vložené elektrické energie přejde na volné elektrony a jen malá část zůstane v neužitečném a pro mnohé případy škodlivém teple. Energetické elektrony srážkami s molekulami iniciují jejich disociace na radikály, jelikož disociační energie mnoha plynných molekul (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) se pohybují v řádech jednotek elektronvoltů, tedy přibližně v oblasti energie většiny urychlených elektronů studeného plazmatu. Zároveň dle Druyvesteynovy aproximace (Obr. 1.2) jen malá část elektronů má energii přesahující 10 eV, tedy oblasti ionizačních energií atomů v atmosférickém plynu  $(C^+ = 11, 26 \text{ eV}, H^+ = 13, 6 \text{ eV}, O^+ = 13, 6 \text{ eV} \text{ a } N^+ = 14, 53 \text{ eV} [23]), \text{ což vy-}$ světluje nízký stupeň ionizace studeného plazmatu. Nízká teplota prostředí zároveň nebrání vzniku na teplo citlivých molekul, jako je například ozón.



Obrázek 1.2: Druvesteynovo rozdělení energie elektronů ve studeném plazmatu. Převzato z [23].

Jednotlivé postupy v plazmatem iniciované syntéze dané molekuly nebo skupiny molekul lze srovnávat ze tří směrů podle jejich takzvaných výstupných parametrů syntézy. Prvním parametrem je koncentrace, tedy množství cílového produktu v objemu pracovního plynu. Nejčastěji se vyjadřuje v jednotkách ppm tedy parts-per-million, což je značení vhodné pro nízké až střední koncentrace, se kterými se v plazmové chemii často setkáváme. Dalším parametrem je takzvaná produkce, tedy množství vyrobeného produktu za jednotku času. Produkce je však veličina velmi závislá na celkové velikosti zařízení, přesněji řečeno na objemu plazmatu, ve kterém k syntéze dochází. Pro objetivně lepší srovnání jednotlivých zařízení je lepší vztáhnout produkci na objem plazmatu nebo plochu elektrod, jak bylo ukázáno v [24]. Posledním parametrem je výtěžnost (anglicky Production Yield) též nazývaná energetická efektivita nebo energetická účinnost, kterou značíme v gramech na kilowatthodinu nebo pro potřeby výpočtů na molekulární úrovni v molekulách syntetizované látky na elektronvolt. V ideálním případě nám výtěžnost umožňuje porovnat celkové energetické náročnosti různých postupů. Ve skutečnost však autoři některých experimentů do výtěžnosti započítají jen energii vynaloženou na vznik plazmatu, ale už opomenou zahrnout energii spotřebovanou v okolních procesech jako je případné chlazení aparatury nebo pohon čerpadel, čímž uměle navýší účinnost svých postupů. Skrze známou cenu elektřiny, která se nejčastěji udává právě na 1 kWh, lze tak spočíst i finanční náklady na syntézu. I zde je však potřeba započítat všechny okolní náklady jako je například cena pracovního plynu (čistý kyslík, směs kyslík-dusík a další) pokud negenerujeme plazma ve vzduchu načerpaného z okolí přístroje.

## Kapitola 2

## Ozón

Ozón je tříatomová alotropní modifikace kyslíku známá pro svůj charakteristický zápach, podle kterého byla pojmenována (z řečt. ozein, cítit). Jde o velmi reaktivní molekulu s redoxním potenciálem 2,8 V, která je však zároveň nestabilní a po jisté době se samovolně rozpadá zpět na dvouatomární kyslík, takže nespotřebované molekuly nezpůsobují dlouhodobé toxické znečištění. Tyto vlastnosti zajistily, že je ozón často používaným dezinfekčním prostředkem a velká část výše zmíněných aplikací studeného plazmatu je přímým důsledkem syntézy ozónu v atmosférickém nebo kyslíkovém plazmatu. V následujících oddílech se podíváme na různé reakce syntézy a zániku ozónu v plynech tvořících atmosférický vzduch a naše dosavadní poznatky o jejich vlivu. Začneme čistým kyslíkem (tedy zdrojovým prvkem pro ozón), do kterého přidáme dusík, čímž přibližně dostaneme suchý vzduch a nakonec se zaměříme na vzdušnou vlhkost. Vliv ostatních plynů ve vzduchu, jakou jsou argon nebo oxid uhličitý, zanedbáme.

### 2.1 Reakce v čistém kyslíku

V první fázi volný elektron s dostatečnou energií (prahové energie reakcí jsou 6,4 eV, 8 eV a 11eV) excituje srážkou molekulu kyslíku, která se následně disociuje na radikály  $O(^{3}P)$  popřípadě  $O(^{1}D)$  [25]:

$$e + O_2 \to e + O_2(A^3\Sigma_u^+) \to e + O(^3P) + O(^3P),$$
 (2.1)

$$e + O_2 \rightarrow e + O_2(B^3\Sigma_u^+) \rightarrow e + O(^3P) + O(^1D),$$
 (2.2)

$$e + O_2 \rightarrow e + O(^1D) + O(^1D).$$
 (2.3)

Disociace kyslíku v daném výboji proběhne v řádu nanosekund, přičemž přibližně do 10 ns jsou excitované radikály  $O(^{1}D)$  přeměněny na základní stav  $O(^{3}P)$  [26] reakcí:

$$O(^{1}D) + M \rightarrow O(^{3}P) + M \quad \Delta H \approx -189 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}.$$
 (2.4)

Tyto radikály následně endotermickou reakcí s molekulou kyslíku a kolizním partnerem reakce M ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $O_3$  nebo i  $O_3^*$ ) tvoří excitovanou molekulu ozónu:

$$O_2 + O({}^{3}P) + M \to O_3^* + M \to O_3 + M.$$
 (2.5)

Reakční rychlost této reakce je  $k_{O_3} = 2, 5 \cdot 10^{-25} \exp\left(\frac{970}{T_p}\right)$  [cm<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>], kde  $k_{O_3}$  je závislá na teplotě plynu  $T_p$ . Kolizní partner M odnáší zbytkovou energii reakce od excitované molekuly O<sub>3</sub><sup>\*</sup> (nejčastěji jde o vibračně excitovaný stav [27]) a je tedy klíčový ke stabilizaci syntetizované ozónové molekuly. Tím, že se přebytečná energie z reakce (2.5) přenáší na molekuly plynu, přispívá k navýšení celkové teploty prostředí.

Deexitovaný ozón však stále není plně stabilní molekula a existuje celá řada reakcí, ve kterým se přeměňuje zpět na dvouatomový kyslík. V čistém kyslíku je to srážka s radikálem nebo jinou ozonovou molekulou:

$$O + O_3 \to 2O_2, \tag{2.6}$$

$$O_3 + O_3 \to 3O_2, \tag{2.7}$$

$$O_3 + O_3 \to O_2 + O_3 + O.$$
 (2.8)

Reakce syntézy a případného zániku ozónu (2.5-2.8) jsou dokončeny v řádu jednotek až desítek mikrosekund [26].



Obrázek 2.1: Teoreticky předpovězená závislost energetické efektivity na koncentraci ozónu, kde funkce  $g(x_3)$  je integrální energetickou efektivitou a funkce  $f(x_3)$ diferenciální energetickou efektivitou. Převzato z [27]

#### 2.1.1 Teoretické znalosti o reakcích plynného kyslíku

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, ozón je značně citlivý na vysoké teploty. Reakční rychlost destruktivních reakcí (2.6 - 2.8) se s rostoucí teplotou zvyšuje



Obrázek 2.2: Experimentálně naměřená závislost integrální energetické efektivity (černá křívka) na koncentraci ozónu. Převzato z [28].

vztahem  $k = 7,475 \cdot 10^{-9} \exp(\frac{-9309}{T_p}) [\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ a zároveň rychle klesá reakční rychlost syntézy (2.5). Například stoupne-li teplota plynu z pokojové teploty 298 K na 348 K dojde k poklesu rychlosti syntézy na 63 % a urychlení procesů rozkladu ozónu o faktor 89.

Ze tří v předchozích kapitolách zmiňovaných veličin je u syntézy ozónu nejdůležitější vztah mezi koncentrací a energetickou efektivitou (popřípadě výtěžností). V ideálním případě bychom po ozonizátoru chtěli, aby na sobě koncentrace a výtěžnost nezávisely nebo alespoň dosahovaly svých maxim za stejných nebo podobných podmínek. Jak však ukázal Kogelschatz a další [27] ve svém modelu, maxima obou veličin se vzá jemně vylučují. V tomto modelu byla koncentrace vzata jako nezávislá proměnná a byl sledován její vliv na diferenciální a integrální energetickou efektivitu, kde diferenciální energetická efektivita  $f(x_3)$  značí normalizované množství ozónu syntetizované v k-tém pulzu a integrální energetická efektivita  $q(x_3)$  je podílem celkového množství vyprodukovaného ozónu a veškeré k tomu použité energie. Na obrázku 2.1, kde jsou obě funkce vyobrazené na normalizovaných intervalech, je tedy vidět relativně pomalý pokles energetické efektivity na většině hodnot koncentrace, ale velmi rychlé poklesy na obou koncích. V momentě, kdy dojde k dosažení saturační koncentrace ozónu (normalizovaná koncentrace je rovna jedné), klesne energetická efektivita na nulu, jelikož vede syntéza každé další molekuly ozónu k rozkladu jiné molekuly ozónu a koncentrace tak už s přidáním dodatečné energie neroste. Experimentální potvrzení zmíněného modelu najdeme například v práci Jodzise a dalších [28], kteří naměřili takřka identickou křivku (Obr. 2.2) k teoreticky předpovězené závislosti.



Obrázek 2.3: Aktivační energie a energetické ztráty v ozonové syntéze. Převzato

# 2.1.2 Limity energetické účinnosti syntézy ozónu

z [28]

Dalším podstatným teoretickým výsledkem je výpočet maximální fyzikálně možné účinnosti. Zanedbáme-li totiž všechny energetické ztráty, bude spotřebovaná energie rovna pouze rozdílu entalpií molekuly kyslíku a ozónu v základním stavu  $\Delta H_f[O_3] = 142,7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  [28]. Přes následující vztah, kde  $M_{O_3}$  je molární hmotnost ozónu, pak dostaneme teoretický limit pro ozonovou syntézu:

$$\eta_{theor_0} = \frac{3600 \cdot M_{O_3}}{\Delta H_f[O_3]} = 1211 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}.$$
(2.9)

Výsledná hodnota  $\eta_{theor}$  se napříč literaturou [6,28–30] pohybuje v intervalu 1200 – 1226 g · kWh<sup>-1</sup>, která je dána neurčitostí v naměřených rozdílech entalpií  $\Delta H_f[{\rm O}_3] = 141 - 144~{\rm kJ}\cdot{\rm mol}^{-1}$ . Samozřejmě v konečném důsledku není přesná hodnota maximální účinnosti podstatná, jelikož je předpoklad využití veškeré vložené energie příliš silný. Reálnější limit plyne z bližšího energetického rozboru reakcí (2.1) a (2.5). Ze schématu na obrázku 2.3 můžeme vidět, že ačkoliv čistý rozdíl entalpií molekuly kyslíku a ozónu je  $\Delta H_f[{\rm O}_3] = 141 - 144~{\rm kJ}\cdot{\rm mol}^{-1}$ , aktivační energie reakce (2.5) je dána rozdílem entalpií kyslíku a radikálu O(<sup>3</sup>P)  $\Delta H_f[{\rm O}_3^{\rm P}] = 247~{\rm kJ}\cdot{\rm mol}^{-1}$ .

Přebytečnou energii ze syntézy (Losses 1° z Obr. 2.3) pak odnáší kolizní partner M, čímž se ozón deexituje na energeticky stabilnější molekulu. Započítáme-li tuto energii jako nevyhnutelné ztráty, dostaneme reálnější odhad maximální energetické efektivity:

$$\eta_{theor_1} = \frac{3600 \cdot M_{O_3}}{\Delta H_f[O({}^{3}P)]} \approx 700 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}.$$
 (2.10)

Tuto hodnotu lze dále snížit započítáním 86 kJ · mol<sup>-1</sup>, které jsou rozdílem mezi prahovou energii reakce (2.1) 6 eV (580 kJ · mol<sup>-1</sup> O<sub>2</sub>) a celkovou entalpií dvou atomů O(<sup>3</sup>P), čímž dostaneme třetí odhad teoretické účinnosti  $\eta_{theor_2} \approx 600 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . Toto můžeme považovat za poměrně reálný odhad maximální praktické energetické účinnosti. Uvolněná energie z reakcí (2.5), (2.1) může vést k excitaci molekuly kyslíku a usnadnit její dissociaci. Existuje tedy možnost, dostat účinnosti i nad  $\eta_{theor_2} \approx 600 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . Je však stále potřeba vzít v úvahu, že jsme zanedbali celou řadu procesů jako je zpětný rozklad vzniklého ozónu a i vznik radikálu O(<sup>1</sup>D), který se na syntéze nepodílí a jeho vznik vyžaduje elektron o vyšších energiích (8 a 11 eV pro reakce (2.2) a (2.3)). Za zmínku stojí, že se odhadu maximální energetické účinnosti  $\eta_{theor_2}$  experimentálně podařilo přiblížit ze dvou třetin, když byla na multi-dutinovém povrchovém dielektrickém výboji dosažena výtěžnost 413, 91 ± 58, 7g · kWh [5].

### 2.2 Vliv dusíku

V atmosféře tvoří dusík okolo 75 % její hmotnosti a ačkoliv je plynná molekula dusíku za pokojové teploty inertní, mohou se v plazmatu vyskytovat elektrony s dostatečnou energii pro její disociaci. Takto uvolněné dusíkaté radikály jsou naopak silně reaktivní a stojí na počátku celé řady reakcí s kyslíkem a ozónem a mají tak velký vliv na průběh ozonové syntézy. Takovýchto reakcí však existuje velké množství, takže zmíníme jen některé, přičemž rozsáhlejší seznam lze nalézt v [25] nebo [31].

Atomární dusík dostaneme v atmosférickém plazmatu stejným způsobem jako atomární kyslík, tedy srážkou elektronu s prahovou energií 12,13 eV [6] a molekuly dusíku následovanou jejím rozpadem na radikály  $N(^{2}D)$  a  $N(^{4}S)$ :

$$e + N_2 \rightarrow N(^2D) + N(^4S) + e.$$
 (2.11)

Takto uvolněné atomy dusíku ve vzduchu reagují s kyslíkem atomovým i oběma molekulami (dikyslík  $O_2$ , trikyslík  $O_3$ ) za vzniku oxidů dusíku.

$$N + O_2 \to NO + O, \tag{2.12}$$

$$N + O_3 \to NO + O_2. \tag{2.13}$$

Nejprve se vytváří oxid dusnatý, který se může účasnit exotermických dějů, ve kterém se spotřebovává ozón a uvolňuje dvouatomová molekula kyslíku a oxid dusičitý:

$$\mathrm{NO} + \mathrm{O}_3 \to \mathrm{NO}_2 + \mathrm{O}_2 \quad \Delta H = -200 \text{ kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1},$$
 (2.14)

$$NO_2 + O_3 \to NO_3 + O_2 \quad \Delta H = -112 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1},$$
 (2.15)

$$\mathrm{NO} + \mathrm{NO}_3 \to 2\mathrm{NO}_2 \quad \Delta H = -88 \text{ kJ} \cdot \mathrm{mol}^{-1}.$$
 (2.16)

Všechny tři předchozí reakce jsou exotermické, takže mohou probíhat v systému i po opuštění plazmatu a opakovaně přeměňovat ozón zpět na dikyslík. Podobný děj existuje i pro atomární kyslík, kde znovu jako produkt reakcí vystupuje molekula O<sub>2</sub>:

$$O + NO + M \to NO_2 + M, \qquad (2.17)$$

$$O + NO_2 \to NO + O_2. \tag{2.18}$$

Na základě předchozích reakcí můžeme negativní vliv dusíku na ozónovou syntézu shrnout do následujících bodů:

- Přítomnost dusíku snižuje počet disociačních reakcí kyslíku, jelikož se snižuje pravděpodobnost setkání elektronu a molekuly O<sub>2</sub>.
- Oxidy dusíku exotermicky přeměňují ozón zpět na dvouatomový kyslík v reakcích (2.14 – 2.16), čímž snižují koncentraci O<sub>3</sub> v systému.
- Oxidy dusíku v cyklických reakcích přeměňují atomární kyslík, který je nezbytný pro syntézu ozónu (2.5), zpět na dvouatomární kyslík, čímž snižují množství syntetizovaného ozónu.
- Výše zmíněné procesy uvolňují teplo a navýšená teplota systému dále urychluje reakce rozpadu ozónu (2.6 2.8).

#### 2.3 Vliv vzdušné vlhkosti

Vliv vzdušné vlhkosti na ozonovou syntézu je podobný vlivu dusíku v tom, že dojde jak k poklesu celkového množství syntetizovaného ozónu, tak i účinnosti celé syntézy. Toto působení vlhkosti můžeme vysvětlit podobně jako u vlivu dusíku sepsáním možných reakcí molekul vody a jejich produktů s atomy a molekulami kyslíku (O, O<sub>2</sub> a O<sub>3</sub>). Znovu tyto reakce rozdělíme do dvou podskupin. První skupinou jsou reakce, které pohlcují atomární kyslík nebo energii elektronů a snižují tak počet možných ozón syntetizujících reakcí (2.5):

$$e + H_2 O \rightarrow OH + H,$$
 (2.19)

$$O(^{1}D) + H_{2}O \rightarrow 2OH, \qquad (2.20)$$

$$OH + O \to O_2 + H. \tag{2.21}$$

Druhou skupinou jsou reakce přímo mezi ozonem a produkty rozpadu  $H_2O$ , například: OH,  $HO_2$ , H a další, které do systému zpátky vrací dvouatomovou molekulu kyslíku.

$$O_3 + OH \to HO_2 + O_2, \tag{2.22}$$

$$O_3 + H \to OH + O_2. \tag{2.23}$$

Obě tyto skupiny tedy dokáží na první pohled zhoršovat parametry ozonové syntézy, ale jak však ukázali Ono a Oda [7] ve svých výpočtech, které byly potvrzené měřeními na pulzním korónovém výboji ve vlhkém vzduchu, na narušení syntézy se podílí především první skupina reakcí (2.19 - 2.21). Vliv druhé skupiny je naopak znatelně nižší, jelikož při teplotách pod 2000 K probíhají reakce (2.22, 2.23) pomaleji a množství takto zreagovaného ozónu je tedy menší, než počet zredukovaných atomů kyslíku v reakcích (2.20, 2.21). Celkově naměřili Ono a Oda pokles ozonové produkce na šestinu ve vzduchu s obsahem vody 2,4 % oproti suchému vzduchu. K podobným výsledkům dospěli i Chen a další [8], kteří naměřili pokles koncentrace syntetizovaného ozónu v dielektrickém výboji z 100 ppm v suchém vzduchu na 20 ppm ve vzduchu s 5% obsahem vody.

Z těchto dvou příkladů můžeme vidět, že přítomnost vody vede na velké propady v množství syntetizovaného ozónu. Uvážíme-li však, že za teploty 25° C a při atmosférickém tlaku dochází k nasycení vzduchu vodními parami (100% relativní vlhkosti) při přibližně 2% hmotnostním obsahu vody, zjistíme, že zmíněná dvě měření byla provedena v přesyceném vzduchu. Na druhou stranu se běžná pokojová relativní vlhkost pohybuje mezi 30 – 50 % a při této nižší vlhkosti nemusí docházet k tak silnému narušení ozonové syntézy. V okolí tohoto vlhkostního intervalu pracovali například Zhang a další [9], kteří naměřili úbytek koncentrace na přibližně polovinu vlivem 33% relativní vlhkosti a na jednu třetinu vlivem 60% vlhkosti.

# Kapitola 3

## Experiment

### 3.1 Uspořádání

V experimentální části navážeme na poznatky o plazmatem iniciované ozonové syntéze v MSDBD výbojce shrnuté v mé bakalářské práci [10] a článku od docenta Homoly a dalších [5] a rozšíříme je o vliv vzdušné vlhkosti. Použijeme tedy experimentální uspořádání z těchto dvou prací s drobnými obměnami (Obr. 3.1). Jako zdroj plazmatu bude sloužit již zmíněná výbojka Multi-dutinového povrchového dielektrického bariérového výboje (Multi-hollow surface dielectric barrier discharge - MSDBD), která se skládá ze dvou paralelně posazených elektrod vzdálených 0,5 mm, zalitých v korundové keramice o celkové tloušťce (elektrody a keramika) 1,5 mm. Do této destičky o ploše  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  je vyvrtáno 105 kruhových otvorů o průměru 0,6 mm vzájemně vzdálených 2,1 mm vertikálně a 1,8 mm horizontálně (Obr. 3.2). Aby se předešlo kontaktu elektrod s plazmatem a jejich korozi jsou vnitřní stěny těchto otvorů taktéž pokryty keramikou.

Jako pracovní plyn byl použit syntetický vzduch o 99,999% čistotě, který byl uměle zvlhčen (v čistém syntetickém vzduchu je méně než 2 ppm H<sub>2</sub>O), tak že před vstupem do výbojky prošel jednoduchým probublávacím zvlhčovačem (Obr. 3.3) naplněným destilovanou vodou. Jako zdroj napětí sloužil funkční generátor TG1010A a RF výkonový zesilovač Powertron model 250A, ve kterých byl generován vysokonapěťový střídavý proud se sinusovým průběhem o frekvenci 5 kHz v napěťových balících o frekvenci 500 Hz. Napětí a náboj ve výboji, měřené vysokonapěťovou pasivní sondou Tektronix DPO5204 a kondenzátorem o kapacitě 400 nF, byly zaznamenávány na osciloskopu Tektronix DPO5204. Koncentrace syntetizovaného ozónu byla měřena v ozonovém detektoru Teledyne Model 465M s rozsahem 0 – 10000 ppm a vlhkost s teplotou pomocí vlhkoměru GHM3330.





### 3.2 Postup

Jelikož je naším konečným cílem porovnat ozonovou syntézu v suchém [5, 10] a uměle zvlhčeném vzduchu, použijeme co nejvíce stejných vstupních parametrů jako ve zmíněných pracích. Tyto parametry jsou: amplituda generovaného napětí, střída signálu (*Duty Cycle*) a typ, průtok a vlhkost pracovního plynu.

- U amplitudy napětí vycházejícího z funkčního generátoru, tedy před zesílením v transformátoru, se omezíme pouze na hodnoty z intervalu 1, 1-1, 4 V, jelikož pro nižší napětí se ve vlhkém vzduchu nedaří výboj zapálit a nedochází tak k iniciaci reakcí ozonové syntézy.
- Střídy signálu, které jsou definovány jako poměr délky pluzu (počet napěťových sinusoid s frekvencí 5 kHz) vůči délce periody (napěťové balíky s frekvencí 500 Hz), použijeme dvě: 40 % a 100 %, kde 100 % znamená kontinuální provoz. Omezení pouze na dvě střídy bylo vynucené výše zmíněným omezením intervalu napětí, jelikož předchozí měření v celém intervalu stříd (10 – 100 %) byla provedena se vstupním napětím 0,98 V, tedy pod minimální hodnotou potřebnou pro zapálení výboje ve vlhkém vzduchu.
- Jak již bylo zmíněno v popisu experimentálního uspořádání, budeme jako pracovní plyn používat pouze syntetický vzduch. Důvod je stejný jako u střídy a to tedy ten, že kyslík jsme měřili v nízkých hodnotách napětí. Zároveň se v této práci snažíme vlhkostí syntetického vzduchu simulovat reálné podmínky komerční syntézy ozónu, takže pro nás vlhký kyslík nepředstavuje užitečný pracovní plyn. Průtoky syntetického vzduchu budou i nadále sledovat geometrickou řadu, tedy 1, 2, 4 a 8 standardních litrů za minutu (SLM).



Obrázek 3.2: Nákres multi-dutinového povrchového dielektrického bariérového výboje (MSDBD). Převzato z [5].

• Vlhkost budeme do suchého syntetického vzduchu zavádět skrze zmíněný probublávací zvlhčovač (Obr. 3.3). Toto jednoduché zařízení nám však neumožňuje jakékoliv přesné nastavení vzdušné vlhkosti. Částečně se pokusíme vlhkost ovládat výškou hladiny ve zvlhčovači, kde budeme rozlišovat dva stavy. Bude-li hladina vody pod úrovní hlavy trysky, budeme hovořit o výparovém režimu, protože se do vzduchu dostane pouze voda přirozeně vypařená z povrchu vody. Dáme-li hladinu nad hlavu trysky, budeme hovořit o probublávacím režimu, ve kterém se voda vedle výparů z povrchu uvolňuje dalšími dvěma procesy. V momentě, kdy bublina dorazí k hladině vody, neuvolní se vzduch okamžitě do okolí, nýbrž vzniká na horní hranici bubliny vodní film. Tento film se postupně trhá a kolabuje do vodních kapek, které se uvolňují do okolí. Roztržením filmu bublina zaniká, bublinový kráter kolabuje a okolní voda je urychlena do centra roztržené bubliny, kde se sráží a vymršťuje další kapky z hladiny do vzduchu.

Vliv vlhkosti na ozonovou syntézu budeme studovat skrze čtyři veličiny: výkon, koncentraci, produkci a výtěžnost (energetickou účinnost). Výkon budeme počítat metodou Lissajousových obrazců, kde plocha obrazce na grafu napětí-náboj vyjadřuje celkovou energii spotřebovanou ve výboji. Integrálně to můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

$$P = fW = f \oint U dQ = fC \oint U dU_C, \qquad (3.1)$$

kde f je frekvence napěťového balíku (500 Hz), U je naměřené napětí a Q náboj na kondenzátoru. Poslední rovnost dostaneme přepočtem náboje Q na měřené napětí  $U_C$  na kondenzátoru, přes vztah  $Q = U_C C$ , kde C je kapacita kondenzátoru. Do výpočtu výkonu použijeme hodnoty napětí U a  $U_C$ , které budou průměrem 512 záznamů.



Obrázek 3.3: Zjednodušený nákres probublávacího zvlhčovače. Převzato z [33] a přepracováno.

Produkci (značenou v g · h<sup>-1</sup>) spočteme přes koncentraci (měřenou v ppm) pronásobenou průtokem  $Q_v$  (ve l · min<sup>-1</sup>). Podělením produkce spočteným (3.1) výkonem (v kW) dostaneme výtěžnost  $\eta$ :

$$M_t = 2,14 \cdot 10^{-6} n Q_v 60 \quad [\text{g} \cdot \text{h}^{-1}]$$
(3.2)

$$\eta = \frac{M_t}{P} \quad [\mathbf{g} \cdot \mathbf{kWh}^{-1}]. \tag{3.3}$$

Číselné konstanty 2,  $14 \cdot 10^{-6}$  a 60 slouží pouze k přepočtu na chtěné jednotky, tedy ppm na g $\cdot l^{-1}$  a minuty na hodiny.

Chyby budeme v grafech uvádět pouze u výkonu a výtěžnosti, kde zavedeme jednotnou chybu 10 %, která v sobě bude zahrnovat zaokrouhlovací chybu numerické integrace, frekvenční závislost kapacity kondenzátoru a další. Deklarovaná přesnost použitého ozonového detektoru a tedy chyba měření koncentrace (a i produkce) je  $\pm 1$  %, což je dostatečné přesné na to, abychom se chybou nemuseli zabývat.

### 3.3 Měření vlhkosti

Jak již bylo zmíněno v popisu experimentu, u námi použitého zvlhčovače nebylo možné přesně nastavit hodnoty vlhkosti a v některých případech ani udržet konstantní vlhkost napříč jednou sadou měření. V probublávacím režimu byla vlhkost pro jeden průtok dostatečně neměná, abychom jí mohli považovat za konstantní napříč měřením celého intervalu napětí. Naměřené vlhkosti a teploty syntetického vzduchu pro jednotlivé průtoky jsou v tabulce 3.1, přičemž se pro průtoky 1 a 2 litrů nepodařilo naměřit obě střídy dostatečně časově blízko (ve stejném dni) a došlo k nárůstu vlhkosti při měření se střídou 40 % (pravděpodobně změnou výšky hladiny

Střída	100	0 %	40 %		
Průtok [SLM]	Vlhkost [%]	Teplota [°C]	Vlhkost [%]	Teplota [°C]	
1	68	24,2	77	25,8	
2	63	$24,\!6$	74	26,3	
4	58	25,0	58	25,0	
8	56	25,2	56	25,2	

Tabulka 3.1: Tabulka naměřených vlhkostí a teplot vzduchu v probulbávacím režimu v závislosti na jeho průtoku.

ve zvlhčovači). U zbylých lze však pozorovat pokles vlhkosti pro větší průtoky plynu, což může souviset s vyčerpáním vodních výparů při vyšších průtocích vzduchu. Jeli totiž množství přirozeně vypařené vody z povrchu přibližně konstantní, platí že pro vyšší průtoky připadá na jednotku objemu vzduchu menší množství výparů a celková vlhkost je tedy nižší. Z tohoto důvodu nebyla provedena měření s vyššími průtoky (4 a 8 SLM) ve výparovém režimu, ale jen při průtoku dvou litrů za minutu, u kterého i tak došlo k poklesu vlhkosti ze 73 % na 66 % od počátku do konce měření napěťového intervalu.

Jako poslední je třeba zdůraznit, že měříme vlhkost relativní, která je vztažena na stav maximálního nasycení vzduchu vodními parami. Jelikož však tento stav není konstantní, nýbrž závisí například a především na teplotě, bylo by vhodnější pro přesnější zhodnocení vlivu vlhkosti přepočítat vlhkost relativní na absolutní (hmotnost vodních par na objem vzduchu), která není na teplotě vzduchu závislá. Z tabulky 3.1 je však vidět, že se teplota plynu v různých měřených příliš nelišila a můžeme tak bez větších nepřesností dále používat vlhkost relativní.

### 3.4 Vliv vlhkosti

Císelné výsledky našich měření se nachází v příloze v tabulkách A.1, A.2, A.3 a A.4 pro probublávací režim a v A.5 pro výparový režim. Hodnoty v suchém syntetickém vzduchu pro účely porovnání budeme čerpat z [5] a [10]. V následujících podkapitolách budeme pracovat s daty pouze z probublávacího režimu, jelikož jsme při něm dosáhli dostatečně stálé vlhkosti napříč jedním měřením. Výparový režim jsme chtěli použít pro dosažení nižších vlhkostí než probubláváním, ale jak již bylo zmíněno, při tomto postupu klesala vlhkost příliš rychle i na nízkých průtocích, takže se u výparového režimu zdržíme hlubší analýzy. Zmíníme pouze, že jsou naměřené koncentrace řádově podobné koncentracím v problubávacím režimu, takže vodními výpary nevzniká výrazně odlišný typ vlhkosti od vlhkosti uvolněné ději v probublávacím režimu.

#### 3.4.1 Stabilita



Obrázek 3.4: Lissajousovův obrazec pro výboj se střídou 40 % a průtokem 2 SLM v a) suchém vzduchu, b) vlhkém vzduchu.

Jako první budeme studovat vliv vlhkosti na průběh výboje skrze měřené hodnoty napětí a náboje. Z teorie o dielektrických výbojích [34] víme, že Q-U diagram (Lissajousův obrazec) dielektrického výboje je kosodélník, kde strany s rychlým nárůstem náboje odpovídají aktivní fázi výboje s přenosem náboje ionizovanými částicemi a strany s pomalým nárůstem odpovídají pasivní fázi, kdy výboj nehoří a elektrody se chovají jako desky kondenzátoru. U suchého vzduchu navíc platí, že při stejných vstupních parametrech se od sebe průběhy za sebou jdoucích výbojů neliší, což je skutečnost, kterou si můžeme ověřit na Obr. 3.4 a), kde je vyobrazen Q-U diagram pro jeden napěťový balík (2 ms) se střídou 40 %. Všechny čtyři kosodélníky se vzájemně překrývají (mají stejné průběhy) a výboj hoří homogenně. Vezmeme-li však ten samý výboj ve vlhkém vzduchu (při zachování všech ostatních parametrů) a vykreslíme Q-U diagram (Obr. 3.4 b)), přestanou se jednotlivé výboje překrývat, protože každý probíhá podél jiného kosodélníku. Z toho můžeme vidět, že vysoká vlhkost narušuje rovnoměrnost hoření výboje, což je nejspíše způsobeno vodou kondenzovanou na stěnách, která narušuje průběh elektrického pole.

Další negativní dopad vlhkosti, který souvisí s narušením elektrického pole, jsme zmínili už v postupu, kde bylo potřeba omezit měřený interval napětí, jelikož se pro vlhký vzduch zvedlo minimální napětí pro zapálení výboje z 0,98 V na 1,1 V (na generátoru). Zároveň však došlo i k omezení na horní hranici napěťového intervalu, kde u kontinuálního provozu (střída 100 %) s průtokem 1 SLM se u vyšších napětí nepodařilo naměřit hodnotu koncentrace, jelikož při takto vysokém výkonu hořel výboj příliš nestabilně (Tab. A.3). I u dvojnásobného průtoku (2 SLM) se ve dvou případech (Tab. A.3, Tab. 3.1) nepodařilo stabilizovat ozonovou koncentraci na jedné hodnotě a bylo tedy potřeba je zaznamenat jako interval. V grafech s těmito intervaly počítat nebudeme, jejich účelem je pouze ukázat hranici stability hoření výboje.



Obrázek 3.5: Graf závislosti výkonu na zdrojovém napětí a střídě a) 40 %, b) 100 % pro různé vlhkosti vzduchu.

#### 3.4.2 Výkon

V tomto odstavci se zaměříme na změnu výkonu výboje vlivem vzdušné vlhkosti. K tomuto nám pomůže poznatek, že v suchém vzduchu výkon výrazně nezávisí na průtoku pracovního plynu (viz [10]). Vlhkost však s vyšším průtokem klesá (Tab. 3.1), takže můžeme změnou průtoku změnit vlhkost a přibližně studovat její vliv na výkon. Grafy na obrázku 3.5 vyobrazují závislost výkonu na napětí na zdroji, přičemž graf a) je pro střídu 40 % a graf b) pro 100 % (kontinuální provoz). Jako referenční hodnoty pro suchý vzduch (světle modré křivky) jsme zvolili výkony pro průtok 1 SLM. Nejdůležitějším poznatkem plynoucím z obrázku 3.5 je několikanásobné zvětšení výkonu výboje ve vlhkém vzduchu oproti výboji v suchém vzduchu, které je pravděpodobně způsobeno nárůstem vodivosti vzduchu vlivem vlhkosti. Tento růst se zdá být taktéž závislým na množství vlhkosti, ale toto platí pouze u grafu b), zatímco na grafu a) jsou rozdíly mezi výkony menší než deklarovaná 10% nepřesnost v jejich výpočtu. S rostoucím výkonem se taktéž zmírňují rozdíly mezi vlhkým a suchým vzduchem, což může být způsobeno větším rozkladem vodních molekul a tedy snížení jejich dopadů na hoření výboje.

#### 3.4.3 Produkce

Jako další bychom měli prostudovat vliv vlhkosti na koncentraci ozónu, ale už nemůžeme použít předpoklad o její nezávislosti na průtoku jako v případě výkonu a sledovat tak pouze závislost na vlhkosti. Přejdeme tedy přímo k produkci, což je veličina vypočtená pronásobením koncentrace průtokem, o které víme, že v suchém vzduchu na průtoku nezávisí (pro průtoky nad 2 SLM) [10], což nám znovu umožní sledovat pouze závislost produkce na vlhkosti. Doposud jsme totiž řešili pouze dopady vlhkosti na hoření výboje, ale nyní si můžeme na obrázku 3.6 povšimnout prvních negativních dopadů vlhkosti na samotnou ozónovou syntézu. Za prvé došlo k propadu celkového množství syntetizovaného ozónu napříč měřeními na přibližně 15 - 50 % hodnot dosažených v suchém vzduchu, kde tento efekt sílí s vyššími



Obrázek 3.6: Graf závislosti produkce na výkonu a střídě a) 40 %, b) 100 % pro různé vlhkosti vzduchu.

vlhkostmi. Pokles produkce je, jak bylo vysvětleno v kapitole věnované vlivu vlhkosti, způsoben molekulami vody a jejich produkty, které především narušují syntézu ozónu (2.19 - 2.21) a v menší míře rozkládají vzniklý ozón  $(2.22 \ a \ 2.23)$ . U kontinuálního provozu a tedy ve vysokých výkonech dochází pro 66% vlhkost nejspíše k tak velkému uvolňování produktů rozpadu vodní molekuly, které pohlcují atomární kyslík, že s rostoucím výkonem produkce stagnuje až klesá. Naměřený pokles produkce vlivem 58% vlhkosti na třetinu až čtvrtinu referenční hodnoty je úbytek srovnatelný s měřeními Zhanga a dalších [9], kteří taktéž naměřili úbytky přibližně v tomto okolí pro podobnou vlhkost 60 % v cylindrickém uspořádání dielektrického výboje. Pro srovnatelnou vlhkost se nám tedy podařilo dosáhnout podobných výsledků jako na jiném typu dielektrického výboje.

#### 3.4.4 Energetická účinnost

Výtěžnost nebo též energetická účinnost je veličina, která dle rovnice (3.3) závisí přímo na produkci a nepřímo na výkonu. O těchto dvou veličinách z předchozích dvou podkapitol víme, že vlivem vlhkosti došlo k navýšení výkonu a poklesu produkce, což v kombinaci se zmíněnou závislostí výtěžnosti znamená, že se oba efekty sečtou a dojde tak k výraznému poklesu celkové účinnosti ozónové syntézy. Na grafech obrázku 3.7 můžeme vidět, že se výtěžnost oproti referenčním hodnotám v suchém vzduchu snížila na polovinu až třetinu u nižších vlhkostí (56 % a 58 %) a až na pětinu u vysoké vlhkosti (77 %). Nejvyšší výtěžnost ve vlhkém vzduchu 52 g  $\cdot$  kWh<sup>-1</sup> jsme dosáhli při kontinuálním provozu a nepřekvapivě pro nejnižší vlhkost (56 %) a nejnižší dosažený výkon pro tuto vlhkost ( $\approx 3$  W). Pro srovnání byla nejvyšší naměřená výtěžnost v suchém vzduchu 232 g  $\cdot$  kWh<sup>-1</sup> [5] dosažena ve výkonu 0,4 W při vstupním parametrech nedosažitelných ve vlhkém vzduchu (vstupní napětí 0,98 V). Zároveň se však hodnoty výtěžnosti příliš nemění s proměnným výkonem, pouze mírně klesají, což znamená, že ve vlhkém vzduchu není třeba vstupními parametry optimalizovat účinnost výroby ozónu a stačí se zaměřit pouze na vyrobené množství, které je dle předchozí podkapitoly nejvyšší ve vysokých výkonech.



Obrázek 3.7: Graf závislosti výtěžnosti na výkonu a střídě a<br/>)40~%, b)100~% pro různé vlhkosti vzduchu.

Podstatný výsledek této podkapitoly je tedy skutečnost, že se maximální dosažitelná výtěžnost zmenšila vlivem vysoké relativní vlhkosti na téměř pětinu ze stovek na desítky g  $\cdot$  kWh<sup>-1</sup>, což jsou hodnoty, které jsou běžně uvedeny u komerčních ozonizátorů v popisu produktu. Je však třeba zmínit, že u komerčních strojů nebývají uvedeny podmínky, za kterých ozonizátor dosahuje deklarovaných hodnot a je v návodech pro uživatele doporučováno stroje používat v nejsušším možném vzduchu. My jsme však na našem uspořádání měřili ve velmi vlhkém vzduchu a pokud jsme za takovýchto podmínek dosáhli komerčních hodnot, lze bezpečně říci, že i v podmínkách vlhkého vzduchu je MSDBD uspořádání stále energeticky účinnější, než v současnosti nabízené produkty

### Závěr

V tomto výzkumném úkolu jsme rozšířili znalosti o ozonové syntéze iniciované plazmatem ze suchého vzduchu generovaného v multi-dutinovém povrchovém dielektrickém bariérovém výboji (MSDBD) o vliv vlhkosti na zmíněnou syntézu. Důvodem přidání vlhkosti do pracovního plynu byla snaha napodobit podmínky komerčního provozu ozonizátorů pracujících s atmosférickým vzduchem, který nevyhnutelně nese jistou vlhkost. Do suchého syntetického vzduchu jsme tedy přes jednoduchý probublávací zvlhčovač zavedli vlhkost a měřili její vliv na hoření výboje a ozonovou syntézu, přičemž jako referenční hodnoty nám posloužily předchozí práce s tímto typem výboje [5,10]. Probublávacím zvlhčovačem se nám podařilo dosáhnout relativních vlhkostí v intervalu 56 – 77 %, přičemž pouze v probublávacím režimu se podařilo dosáhnout dostatečně neměnných vlhkostí pro každou sadu napěťových intervalů.

Vliv vlhkosti na ozonovou syntézu v MSDBD uspořádání můžeme shrnout do následujících bodů. Vlhkost kondenzující na stěnách výbojky narušuje její elektrické pole, čímž ztěžuje zapálení výboje při nízkých napětích a destabilizuje hoření ve vysokých napětích. Samotný výboj hoří vlivem zvýšené vodivosti vlhkého vzduchu při i několikanásobně vyšších výkonech, než v suchém vzduchu. Přítomnost produktů disociace vodní molekuly ve výboji snižuje množství syntetizovaného ozónu na polovinu až šestinu referenčních hodnot, což je úbytek srovnatelný s měřeními na jiných typech dielektrických výbojů. U energetické účinnosti se spojil nárůst výkonu a pokles produkce, čímž došlo k propadu téměř o řád ze stovek na desítky  $g \cdot kWh^{-1}$ . Nejvyšší námi naměřená výtěžnost byla pouze 52 g  $\cdot$  kWh<sup>-1</sup>, což je téměř pětina maximální naměřené výtěžnosti v suchém vzduchu (232 g  $\cdot$  kWh<sup>-1</sup>) a je na úrovni komerčních ozonizátorů (50 – 60 g  $\cdot$  kWh<sup>-1</sup>). Zde je však třeba zdůraznit, že jsme pracovali s vysokými relativními vlhkostmi a výrobci ozonizátoru u svých přístrojů neuvádějí za jakých podmínek byly jejich uvedené hodnoty dosaženy, což nás vede k přesvědčení, že je toto uspořádání stále energeticky účinější než na trhu dostupné modely.

## Literatura

- [1] ZHANG, Y., et al., 2019. Ozone Production in Coaxial DBD Using an Amplitude-Modulated AC Power Supply in Air. *Ozone: Science & Engineering* [online]. 41(5), 437-447 [cit. 2021-06-12]. DOI: 10.1080/01919512.2019.1565986. ISSN 0191-9512. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10. 1080/01919512.2019.1565986
- [2] XIE, S., et al., 2019. The effects of gas flow pattern on the generation of ozone in surface dielectric barrier discharge. *Plasma Science and Technology* [online]. 21(5) [cit. 2021-06-12]. DOI: 10.1088/2058-6272/aafc50. ISSN 1009-0630. Dostupné z: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-6272/aafc50
- WEI, L. S., et al., 2018. Influence of Duty Cycle on Ozone Generation and Discharge Using Volume Dielectric Barrier Discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing* [online]. 38(2), 355-364 [cit. 2021-06-12]. DOI: 10.1007/s11090-017-9866-y. ISSN 0272-4324. Dostupné z: http://link. springer.com/10.1007/s11090-017-9866-y
- [4] MALIK, M. A., HUGHES, D., 2016. Ozone synthesis improves by increasing number density of plasma channels and lower voltage in a nonthermal plasma. Journal of Physics D: Applied Physics [online]. 49(13) [cit. 2021-06-12]. DOI: 10.1088/0022-3727/49/13/135202. ISSN 0022-3727. Dostupné z: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/49/13/135202
- [5] Homola, T., Prukner, V., Hoffer, P., & Šimek, M. (2020). Multi-hollow surface dielectric barrier discharge: an ozone generator with flexible performance and supreme efficiency. *Plasma Sources Science and Technology*, 29(9). https:// doi.org/10.1088/1361-6595/aba987
- [6] WEI, Linsheng, Haizhong DENG, Gabriele NERETTI a Yafang ZHANG, 2019. Ozone yield limit in low temperature plasmas based on thermodynamics. *The European Physical Journal D* [online]. **73**(7) [cit. 2021-4-1]. ISSN 1434-6060. Dostupné z: doi:10.1140/epjd/e2019-90560-y
- [7] ONO, R., & ODA, T. (2003). Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 93(10), 5876-5882. https://doi. org/10.1063/1.1567796

- [8] CHEN, T., LI, H., BAI, B., LIAO, M., & XIA, W. (2016). Parametric Study on Arc Behavior of Magnetically Diffused Arc. *Plasma Science and Technology*, 18(1), 6-11. https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/1/02
- ZHANG, Xuming, Bok Jik LEE, Hong G. IM a Min Suk CHA. Ozone Production With Dielectric Barrier Discharge: Effects of Power Source and Humidity. *IEEE Transactions on Plasma* Science [online]. 2016, 44(10), 2288-2296 [cit. 2021-7-5]. ISSN 0093-3813. Dostupné z: https://doi:10.1109/TPS.2016. 2601246
- [10] FUJERA, J. (2020). Studium nízkoteplotního plazmatu generovaného multidutinovým dielektrickým bariérovým výbojem [Bakalářská práce]. České vysoké učení technické v Praze.
- [11] KILLIAN, T. C., S. KULIN, S. D. BERGESON, L. A. OROZCO, C. ORZEL a S. L. ROLSTON, 1999. Creation of an Ultracold Neutral Plasma. *Physical Review Letters* [online]. 83(23), 4776-4779 [cit. 2021-5-4]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.83.4776
- [12] STAHEL, Pavel, 2012. Dielektrické bariérové výboje a jejich aplikace. Masarykova universita: Brno. Habilitační práce.
- [13] HERSHKOWITZ, Noah, 1998. Role of Plasma-Aided Manufacturing in Semiconductor Fabrication. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 26(6).
- [14] QUOC AN, H. Than, T. PHAM HUU, T. LE VAN, J.M. CORMIER a A. KHACEF, 2011. Application of atmospheric non thermal plasma-catalysis hybrid system for air pollution control: Toluene removal. *Catalysis To-day* [online]. **176**(1), 474-477 [cit. 2021-5-1]. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2010.10.005
- [15] LU, Na, Jing LOU, Cui Hua WANG, Jie LI a Yan WU, 2014. Evaluating the Effects of Silent Discharge Plasma on Remediation of Acid Scarlet GR-Contaminated Soil. Water, Air, & Soil Pollution [online]. 225(6) [cit. 2021-5-1]. ISSN 0049-6979. Dostupné z: doi:10.1007/s11270-014-1991-0
- [16] SCHMIDT, Anke, Sander BEKESCHUS, Kristian WENDE, Brigitte VOLL-MAR a Thomas VON WOEDTKE, 2017. A cold plasma jet accelerates wound healing in a murine model of full-thickness skin wounds. *Experimental Dermatology* [online]. 26(2), 156-162 [cit. 2021-5-1]. ISSN 09066705. Dostupné z: doi:10.1111/exd.13156
- [17] PARK, Joo Young, Sanghoo PARK, Wonho CHOE, Hae In YONG, Cheorun JO a Kijung KIM, 2017. Plasma-Functionalized Solution: A Potent Antimicrobial Agent for Biomedical Applications from Antibacterial Therapeutics to Biomaterial Surface Engineering. ACS Applied Materials & Interfaces [online]. 9(50), 43470-43477 [cit. 2021-5-1]. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.7b14276

- [18] PARK, Dayonna P., Kevin DAVIS, Samid GILANI, et al., 2013. Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield. *Current Applied Physics* [online]. **13**, S19-S29 [cit. 2021-5-1]. ISSN 15671739. Dostupné z: doi:10.1016/j.cap.2012.12.019
- [19] ŠTĚPÁNOVÁ, Vlasta, Pavel SLAVÍČEK, Jakub KELAR, Jan PRÁŠIL, Milan SMÉKAL, Monika STUPAVSKÁ, Jana JURMANOVÁ a Mirko ČERNÁK, 2018. Atmospheric pressure plasma treatment of agricultural seeds of cucumber (Cucumis sativus L.) and pepper (Capsicum annuum L.) with effect on reduction of diseases and germination improvement. *Plasma Processes and Polymers* [online]. **15**(2) [cit. 2021-04-07]. ISSN 16128850. Dostupné z: doi:10.1002/ppap.201700076
- [20] PATIL, B.S., N. CHERKASOV, J. LANG, A.O. IBHADON, V. HESSEL a Q. WANG, 2016. Low temperature plasma-catalytic NO x synthesis in a packed DBD reactor: Effect of support materials and supported active metal oxides. *Applied Catalysis B: Environmental* [online]. **194**, 123-133 [cit. 2021-8-1]. ISSN 09263373. Dostupné z: doi:10.1016/j.apcatb.2016.04.055
- [21] YONG, Hae In, Haelim LEE, Sanghoo PARK, Jooyoung PARK, Wonho CHOE, Samooel JUNG a Cheorun JO, 2017. Flexible thin-layer plasma inactivation of bacteria and mold survival in beef jerky packaging and its effects on the meat's physicochemical properties. *Meat Science* [online]. **123**, 151-156 [cit. 2021-5-1]. ISSN 03091740. Dostupné z: doi:10.1016/j.meatsci.2016.09.016
- [22] FRIDMAN, Alexander, 2008. Plasma chemistry. New York: Cambridge University Press. ISBN 978-0-511-39857-5.
- [23] DENES, F, 2004. Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science. Progress in Polymer Science [online]. 29(8), 815-885 [cit. 2021-5-2]. ISSN 00796700. Dostupné z: doi:10.1016/j.progpolymsci.2004.05.001
- [24] JODZIS, Sławomir a Wojciech PATKOWSKI, 2015. Kinetic and Energetic Analysis of the Ozone Synthesis Process in Oxygen-fed DBD Reactor. Effect of Power Density, Gap Volume and Residence Time. Ozone: Science & Engineering [online]. 38(2), 86-99 [cit. 2021-4-1]. ISSN 0191-9512. Dostupné z: doi:10.1080/01919512.2015.1128320
- [25] ATKINSON, R., D. L. BAULCH, R. A. COX, R. F. HAMPSON, J. A. KERR a J. TROE, 1992. Evaluated Kinetic and Photochemical Data for Atmospheric Chemistry: Supplement IV. IUPAC Subcommittee on Gas Kinetic Data Evaluation for Atmospheric Chemistry. Journal of Physical and Chemical Reference Data [online]. 21(6), 1125-1568 [cit. 2021-5-4]. ISSN 0047-2689. Dostupné z: doi:10.1063/1.555918
- [26] ELIASSON, B a U KOGELSCHATZ, 1986. Electron impact dissociation in oxygen. Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics [online].
   19(8), 1241-1247 [cit. 2021-5-5]. ISSN 0022-3700. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3700/19/8/018

- [27] ELIASSON, B, M HIRTH a U KOGELSCHATZ, 1987. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges. Journal of Physics D: Applied Physics [online]. 20(11), 1421-1437 [cit. 2021-04-09]. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/20/11/010
- JODZIS, S., ZIĘBA, M., 2018. Energy efficiency of an ozone generation process in oxygen. Analysis of a pulsed DBD system. *Vacuum* [online]. 155, 29-37 [cit. 2021-04-09]. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.05.035. ISSN 0042207X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X1830366X
- [29] CHANG, J.-S., P.A. LAWLESS a T. YAMAMOTO. Corona discharge processes. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. **19**(6), 1152-1166 [cit. 2021-4-1]. ISSN 00933813. Dostupné z: doi:10.1109/27.125038
- [30] SAMARANAYAKE, W.J.M., Y. MIYAHARA, T. NAMIHIRA, S. KATSUKI, T. SAKUGAWA, R. HACKAM a H. AKIYAMA. Pulsed streamer discharge characteristics of ozone production in dry air. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 7(2), 254-260 [cit. 2021-4-1]. ISSN 10709878. Dostupné z: doi:10.1109/94.841818
- [31] PARK, S., W. CHOE a Ch. JO, 2018. Interplay among ozone and nitrogen oxides in air plasmas: Rapid change in plasma chemistry. *Chemical Engineering Journal* [online]. **352**, 1014-1021 [cit. 2021-5-8]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2018.07.039
- [32] LI, M., et al., 2018. Experimental study on ozone generation from oxygen in double surface dielectric barrier discharge. *Vacuum* [online]. 157, 249-258 [cit. 2020-05-24]. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.08.058. ISSN 0042207X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X18309771
- [33] Active circuit humidification equipment [online]. [cit. 2021-7-9]. Dostupné z: https://derangedphysiology.com/main/ cicm-primary-exam/required-reading/respiratory-system/Chapter% 20506/active-circuit-humidification-equipment
- [34] PIPA, Andrei a Ronny BRANDENBURG. The Equivalent Circuit Approach for the Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges: The Classical Theory and Recent Developments. *Atoms* [online]. 2019, 7(1) [cit. 2021-7-9]. ISSN 2218-2004. Dostupné z: doi:10.3390/atoms7010014

# Příloha A

# Příloha

Střída 40 %									
$U_{gen}$ [V]	Výkon		Koncentrace		Výtěžnost				
	[W]		[ppm]		$[g \cdot kWh^{-1}]$				
Průtok $[l \cdot min^{-1}]$	1 2		1	2	1	2			
1,10	1,09	0,88	288	135	34,0	$_{39,5}$			
1,15	1,25	$1,\!00$	313	155	32,2	$39,\!8$			
1,20	1,41	1,17	339	176	30,9	$_{38,5}$			
1,25	$1,\!63$	1,34	366	199	28,8	$_{38,2}$			
1,30	1,96 $1,68$		402	231	26,3	$35,\!3$			
1,40	$2,\!68$	2,51	460	299	22,1	$_{30,6}$			

Tabulka A.1: Tabulka závislosti výkonu, koncentrace a výtěžnosti na zdrojovém napětí  $U_{gen}$  pro vzduch s průtoky 1, 2 SLM a střídou 40 %.

Střída 40 %									
$U_{gen}$ [V]	Výkon		Koncentrace		Výtěžnost				
	[W]		[ppm]		$[g \cdot kWh^{-1}]$				
Průtok $[l \cdot min^{-1}]$	4	8	4	8	4	8			
1,10	0,93	$1,\!00$	69	49	$_{38,1}$	$50,\!3$			
1,15	1,17	$1,\!11$	79	55	$34,\!6$	$51,\!1$			
1,20	1,34	1,29	91	62	34,8	49,5			
1,25	1,51	$1,\!46$	95	69	27,5	$48,\! 6$			
1,30	1,76	$1,\!69$	109	78	31,8	47,5			
1,40	2,52	2,39	148	108	$_{30,1}$	46,4			

Tabulka A.2: Tabulka závislosti výkonu, koncentrace a výtěžnosti na zdrojovém napětí  $U_{gen}$  pro vzduch s průtoky 4, 8 SLM a střídou 40 %.

Střída 100 %										
$U_{gen}$ [V]	Výkon		Ko	ncentrace	Výtěžnost					
	[V	V]	[ppm]		g	$\cdot  \mathrm{kWh^{-1}}]$				
Průtok $[l \cdot min^{-1}]$	1	2	1	2	1	2				
1,10	2,98	2,35	492	297	21,2	32,4				
1,15	3,34	2,77	495	328	19,1	$_{30,5}$				
1,20	3,82	3,33	480	362	16,2	28,0				
1,25	4,53	4,04	458	395	13,0	25,1				
1,30	5,48	4,94	-	414	-	21,5				
1,40	-	6,45	-	200 - 400	-	6, 8 - 13, 6				

Tabulka A.3: Tabulka závislosti výkonu, koncentrace a výtěžnosti na zdrojovém napětí  $U_{gen}$  pro vzduch s průtoky 1, 2 SLM a střídou 100 %.

Střída 100 %									
$U_{gen}$ [V]	Výkon		Koncentrace		Výtěžnost				
	[W]		[ppm]		$[g \cdot kWh^{-1}]$				
Průtok $[l \cdot min^{-1}]$	4 8		4	8	4	8			
1,10	2,19	2,34	147	120	34,4	52,7			
1,15	2,57	2,60	156	131	31,2	51,7			
1,20	3,04	2,97	174	144	29,4	49,8			
1,25	$^{3,61}$	$^{3,42}$	187	159	26,6	47,8			
1,30	4,37	$4,\!05$	220	178	25,9	45,2			
1,40	6,25	5,85	264	229	21,7	40,2			

Tabulka A.4: Tabulka závislosti výkonu, koncentrace a výtěžnosti na zdrojovém napětí  $U_{gen}$  pro vzduch s průtoky 4, 8 SLM a střídou 100 %.

$U_{gen}$ [V]	Vý.	kon	Ko	ncentrace	Výtěžnost		
	[V	V]	[ppm]		[g	$\cdot  \mathrm{kWh^{-1}}$	
Střída [%]	40	100	40	100	40	100	
1,10	0,77	$2,\!30$	90	366	$_{30,1}$	$40,\!9$	
1,15	1,01	2,70	113	402	28,6	38,2	
1,20	1,29	$^{3,22}$	114	415	22,7	$^{33,1}$	
1,25	1,55	3,79	139	447	23,0	$_{30,3}$	
1,30	1,84	$4,\!66$	164	481	22,9	$26,\!5$	
1,40	2,58	$6,\!30$	190	450 - 519	18,9	18, 3 - 21, 1	

Tabulka A.5: Tabulka závislosti výkonu, koncentrace a výtěžnosti na zdrojovém napětí  $U_{gen}$  pro vzduch s průtokem 2 SLM ve výparovém režimu.