

Állatorvostudományi Egyetem

Élelmiszer-higiéniai Tanszék

Vízibarmfi húsminták heterociklikusos amin-tartalmának
vizsgálata különböző hőkezelések hatására

Examination of the heterocyclic amine content of waterfowl meat
samples after various heat treatments

Muszka János Márk

Témavezetők:

Dr. Pleva Dániel (tudományos munkatárs)

Dr. Lányi Katalin (tudományos főmunkatárs)

Élelmiszer-higiéniai Tanszék

2024

Absztrakt

A tanulmány a heterociklikus aminok (HCA-k) keletkezését vizsgálja kacsahúsban, különböző hőkezelési paraméterek mellett. A HCA-k olyan potenciálisan rákkeltő vegyületek, amelyek magas hőmérsékleten történő sütés során keletkeznek. A vizsgálat során kacsamell-mintákat kezeltünk 150°C, 190°C és 230°C hőmérsékleten 5, 10 és 15 percen át, és összehasonlítottuk a bőrös és bőr nélküli minták felszíni („kéreg”) és belső rétegeiben („átlag”) mért HCA-koncentrációkat. Az LC-MS/MS technológia alkalmazásával kvantifikáltuk a legfontosabb HCA-kat, mint például a PhIP, MeIQx és norharman. Az eredmények azt mutatták, hogy a magasabb hőmérséklet és a hosszabb sütési idő jelentősen növelte a HCA-szinteket, különösen a bőr nélküli mintákban. A kacsabőr védő szerepe kiemelkedőnek bizonyult, mivel magas zsírtartalma lassította a hőátadást és mérsékelte a Maillard-reakciót, amely a HCA-képződés fő mechanizmusa. A tanulmány hatékony módszereket javasol, például a pácolást és a hőmérséklet szabályozását, a HCA-szintek csökkentésére. Az eredmények tudományos alapot nyújtanak a biztonságosabb hőkezelési technikákhoz, hozzájárulva az élelmiszerbiztonsághoz és a közegészség védelméhez.

Abstract

This study investigates the formation of heterocyclic amines (HCAs) in duck meat, under various thermal treatment conditions. HCAs, which are potentially carcinogenic compounds formed during high-temperature cooking, were analysed in duck breast samples exposed to 150°C, 190°C, and 230°C for 5, 10, and 15 minutes. The research explores the influence of the skin's presence, comparing concentrations in surface („crust”) and internal layers of the meat („average”). Advanced LC-MS/MS techniques quantified key HCAs, such as PhIP, MeIQx, and norharman, with the results revealing that higher temperatures and extended cooking durations significantly increased HCA levels, especially in skinless samples. The findings underscore the protective role of duck skin due to its high fat content, which slows heat transfer and suppresses the Maillard reaction responsible for HCA formation. The study also identifies effective strategies, such as marination and temperature control, to minimize HCA exposure. These insights provide both scientific understanding and practical recommendations for safer cooking methods, contributing to public health and food safety.

Tartalomjegyzék

Absztrakt	2
Abstract	3
1. Rövidítések jegyzéke	5
2. Bevezetés	6
3. Irodalmi áttekintés	9
3.1. A heterociklikus aminok (HCA-k) jellemzői	9
3.1.1. Termikus heterociklikus aminok	9
3.1.2. Pirolitikus heterociklikus aminok	12
3.2. A HCA-k keletkezése	14
3.3. A HCA-k egészségügyi kockázatai	17
3.4. A HCA-k és a baromfihúsok	17
3.5. A jövőbeli kutatások iránya	19
4. Célkitűzések	20
5. Anyag és módszertan	21
6. Eredmények	24
6.1. Pirolitikus heterociklikus aminok	24
6.1.1. Pirolitikus heterociklikus aminok a bőr nélküli mintákban	24
6.1.2. Pirolitikus heterociklikus aminok bőrös mintákban	27
6.2. Termikus heterociklikus aminok	28
6.2.1. Termikus heterociklikus aminok bőr nélküli mintákban	29
6.2.2. Termikus heterociklikus aminok bőrös mintákban	31
7. Következtetések	35
8. Összefoglalás	37
9. Köszönetnyilvánítás	39
10. Irodalomjegyzék	40

Rövidítések jegyzéke

HCA – Heterociklikus aminok

PhIP – 2-amino-1-metil-6-fenilimidazo[4,5-b]piridin

MeIQx – 2-amino-3,8-dimetilimidazo[4,5-f]kinoxalin

4,8-DiMeIQx – 2-amino-3,4,8-trimetilimidazo[4,5-f]kinoxalin

MeIQ – 2-amino-3-metilimidazo[4,5-f]kinoxalin

AαC – 2-amino-9H-pirido[2,3-b]indol

TRP-P-1 – 3-amino-1,4-dimetil-5H-pirido [4,3-b]indol-acetát

IARC – Nemzetközi Rákkutató Ügynökség (International Agency for Research on Cancer)

HPLC – Nagy teljesítményű folyadékkromatográfia (High-Performance Liquid Chromatography)

LC-MS/MS – Folyadékkromatográfiás tömegspektrometria (Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry)

PUFA – Többszörösen telítetlen zsírsavak (Polyunsaturated Fatty Acids)

NaOH – Nátrium-hidroxid

C18 – Oktadecil-szilika töltetű kromatográfiás vagy szilárd fázisú extrakciós oszlop (C18 silica column)

ISTD – Belső standard (Internal Standard)

SI – Szilikagél szilárd fázisú extrakciós oszlop (Silica Gel Solid Phase Extraction Column)

C18 EVO – Specifikus kromatográfiás oszlop típus

1. Bevezetés

A heterociklusos aminok (HCA-k) olyan aromás, heteroatomot tartalmazó vegyületek, amelyek magas fehérje tartalmú anyagokban keletkeznek hő hatására. Ezek a vegyületek vagy grillezés, sütés és egyéb magas hőmérsékletű hőkezelési eljárás során jöhetnek létre aminosavakból, kreatinból és redukáló cukrokból vagy a fehérjék hőbomlása során. A HCA-k mutagén és rákkeltő hatásuk miatt különös figyelmet érdemelnek az élelmiszer-biztonság szempontjából, számos kutatás kimutatta, hogy ezen vegyületek összefüggésbe hozhatók egyes rákos megbetegedésekkel, mint például a prosztata- és vastagbélrákkal. A képződő HCA-k száma és típusa függ a hús fajtájától, a hőkezelési módszertől, valamint a, hogy mennyi ideig és milyen magas hőmérsékleten kezeltük őket.

Ezen vegyületek veszélyességének vizsgálatával az IARC, vagyis a Nemzetközi Rákkutató Ügynökség (International Agency for Research on Cancer) foglalkozik, amely az Egészségügyi Világszervezet (WHO) részlegeként működik. Feladata a rákos megbetegedések okainak azonosítása, a rákkeltő anyagok kutatása, valamint a rákos megbetegedések megelőzésének elősegítése. Az IARC egyik legismertebb tevékenysége a potenciálisan rákkeltő anyagok értékelése, amelyeket tudományos bizonyítékok alapján különböző csoportokba sorolnak. Az IARC négy fő csoportot definiál a rákkeltési potenciál szerint: az 1-es csoportba a bizonyítottan rákkeltő anyagok tartoznak, a 2A csoportba a valószínűsíthetően rákkeltők, a 2B csoportba a lehetségesen rákkeltők, míg a 3-as csoportba azok az anyagok kerülnek, amelyek esetében nincs elegendő bizonyíték a rákkeltő hatás megállapítására. Az IARC értékelései fontos támpontot nyújtanak a közegészségügyi intézkedésekhez és szabályozásokhoz, különösen a rákkeltő kockázatok minimalizálása érdekében. Az ügynökség jelentős szerepet játszik az élelmiszeripari és környezeti kockázatok elemzésében is, például a MeIQ, MeIQx és PhIP heterociklikus aminok rákkeltő hatásának kutatásában, amelyek az élelmiszerek hőkezelése során keletkeznek, és amelyek besorolása szintén az IARC kutatásain alapul [24].

A baromfihús előállítása világszerte az egyik legdinamikusabban növekvő élelmiszeripari ágazat, mivel olcsóbb az előállítása, mint például a disznó vagy marhahúsnak. Nyugati fogyasztóknak azért lehet vonzóbb mert lényegesen kevesebb termőföld és víz szükséges 1kg baromfihús előállításához, mint 1kg marha vagy disznóhúshoz. Továbbá baromfihús, különösen a csirkehús, kiváló fehérjeforrásként szolgál, miközben alacsony telített

zsírsavtartalommal rendelkezik, így ideális választás az egészséges étrend követői számára [27]. Az Európai Unió tagállamaiban az egy főre jutó baromfihús-fogyasztás évente átlagosan 23,5 kg, míg világszerte ez a szám megközelíti a 15 kg-ot. Az Egyesült Államokban ez az érték ennél jóval magasabb, elérve a 50 kg-ot is évente [26]. Európában a baromfihús-fogyasztást nemcsak az egészségtudatosság, hanem az ár-érték arány és a fenntarthatósági szempontok is befolyásolják. Az antibiotikum-mentes termelés iránti kereslet és az állatjóléti szabályok betartása különösen fontos szemponttá vált a nyugati társadalmakban [31]. Az egy főre jutó baromfihús-fogyasztás az elmúlt években folyamatosan növekedett, megelőzve más állati eredetű fehérjék, például a vörös húsok iránti keresletet [25]. A fejlődő országokban, például Indiában és Ázsiában a baromfihús-fogyasztás emelkedése elsősorban a városiasodás, a növekvő jövedelmek, valamint a vallási és kulturális korlátoktól való növekvő eltávolodás eredménye. A baromfihús globális népszerűségét tovább növeli alacsony termelési költsége és a változatos elkészítési lehetőségek, amelyek különböző kultúrák és gasztronómiai hagyományok igényeihez is alkalmazkodnak [26].

A kacsahús-fogyasztás az elmúlt években egyre nagyobb figyelmet kapott, nemcsak az íze és változatos elkészítési lehetőségei, hanem egészségügyi előnyei miatt is. Gazdag fehérjében, vasban, szelénben és niacinban, amelyek mind alapvető fontosságúak az emberi egészség számára. Ezen kívül a kacsahús energiaértéke alacsonyabb az egyéb húsfélékéénél, különösen, ha bőr nélkül fogyasztjuk. Például 100 g bőr nélküli kacsamell körülbelül 140 kalóriát és jelentős mennyiségű vasat, valamint magas minőségű fehérjét biztosít, amelyek elősegítik az izomtömeg növekedését és a vérképződést [19, 30]. Az ázsiai országok, különösen Kína, vezetik a kacsahús termelését és fogyasztását. Európában Franciaország vezeti a kacsahús termelését és fogyasztását, ahol a kacsahús különösen népszerű a gourmet gasztronómiában, de az egészségtudatos étrendekben is helyet kap. A kacsahús különleges előnyei közé tartozik, hogy a modern fajták, például a pekingi kacsá, rendkívül hatékonyan alakítják át a takarmányt testtömeggé. Az ipari kacsatenyésztés lehetővé teszi, hogy a kacsák optimális vágási súlyt (körülbelül 3 kg) mindössze 6-8 hét alatt elérjenek, ami gyors megtérülést eredményez a termelők számára [28, 29]. A kacsahús iránti kereslet növekedéséhez hozzájárul az is, hogy egyre többen keresik a vörös hús alternatíváit egészségügyi vagy fenntarthatósági okokból.

Európában az egy főre jutó kacsahúsfogyasztás mennyisége ugyan elmarad az ázsiai országokétól, de folyamatos növekedés figyelhető meg, különösen a magasabb jövedelemmel rendelkező országokban élő lakosok körében. Ez részben annak is köszönhető, hogy a fogyasztók egyre inkább előnyben részesítik a magas tápértékű, mégis változatosan elkészíthető húsokat, amelyek megfelelnek az egészséges életmód követelményeinek [27]. Emiatt is fontos foglalkoznunk a kacsahús sütésekor felszabaduló heterociklikus aminosavakkal.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A heterociklikus aminok (HCA-k) jellemzői

A heterociklikus aminok (HCA-k) olyan aromás rákkeltő szénhidrogének, amelyek leginkább magas hőmérsékleten történő sütés során keletkeznek aminosavak, cukrok és kreatin vagy kreatinin kémiai reakciója során, például intenzív grillezés, pirítás és egyéb hőkezelési módszerek alkalmazásakor [9, 5]. A képződés pontos folyamata még nem teljesen ismert, de a reaktív karbonilvegyületek és szabadgyökök szerepe kulcsfontosságú [32]. Fontos odafigyelni ezeknek a vegyületeknek a mennyiségére, mert számos kutatás szerint a HCA-k összefüggésbe hozhatók a vastagbél (colon), a prosztata (prostata) és a hasnyálmirigy (pancreas) rákos megbetegedéseivel [4, 9]. A HCA-k toxikológiai hatása központi téma a táplálkozástudományi és közegészségügyi kutatásokban, mivel a DNS-adduktképződés, az oxidatív stressz és a gyulladásos folyamatok révén hozzájárulhatnak a daganatos megbetegedések kialakulásához [33]. A képződött HCA-k mennyisége és típusa több tényezőtől függ, ilyen a hús fajtája, a sütés hőmérséklete és az időtartama [8, 11].

Termikus heterociklikus aminok (HCA-k) és jellemzőik

A termikus heterociklikus aminok (HCA-k) a húsok hőkezelése során keletkező rákkeltő vegyületek, amelyek az aminosavak, kreatin és cukrok közötti Maillard-reakció révén alakulnak ki. Ezek a vegyületek különösen magas hőmérsékleten, például grillezés vagy sütés során keletkeznek, amikor a hús közvetlen hőhatásnak van kitéve. A PhIP, MeIQx és 4,8-DiMeIQx a leggyakrabban előforduló és tanulmányozott HCA-k közé tartoznak.

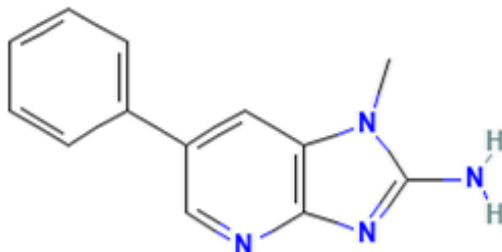
2.1.1. Termikus heterociklikus aminok

A 2-amino-1-metil-6-fenilimidazo[4,5-b] piridin (PhIP) biokémiai és egészségügyi vonatkozásai

A 2-amino-1-metil-6-fenilimidazo[4,5-b] piridin (PhIP) a legnagyobb koncentrációban kimutatható HCA az élelmiszerekben, különösen a grillezett csirkehúsban. Szerkezetileg egy imidazolgyűrűből és egy fenilcsoportból áll, amely nem feltétlenül sík geometriát mutat. A kutatások szerint a PhIP keletkezése a húsok magas hőmérsékleten (150–230°C) történő hőkezeléséhez kapcsolódik, különösen akkor, ha a hús közvetlen hőforrással érintkezik [16].

Egészségügyi szempontból a PhIP bizonyítottan genotoxikus és karcinogén hatású. A PhIP-DNS-adduktumok kimutathatók emberi szövetekben, például a vastagbélben és az

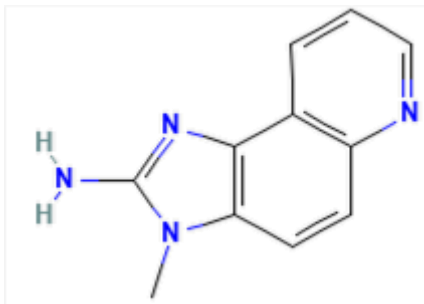
emlőmirigyben, ami azt jelzi, hogy a vegyület szerepet játszhat a daganatok kialakulásában. A PhIP különösen összefüggésbe hozható a vastagbélrák és az emlőrák kockázatával, amelyek gyakorisága nőhet magas HCA-bevitel esetén [9].



Ábra 1: PhIP szerkezeti képlete

2-amino-3-metilimidazo[4,5-f]kinolin (IQ)

Az IQ (2-amino-3-metilimidazo[4,5-f]kinolin) az egyik leginkább rákkeltő heterociklikus aminos, amely húsok magas hőmérsékleten történő sütése során keletkezik. Az IARC 2A kategóriába sorolta, azaz valószínűsíthetően rákkeltő az emberre [24]. Állatkísérletek alapján különböző szövetekben, mint például májban, tüdőben és vastagbélben, tumorokat okozott. Az IQ jelenlétét hús- és halételekben is kimutatták, különösen grillezett vagy sült húsok esetében. Az állatkísérletek során DNS-adduktokat és mutációkat is létrehozott, amelyek a rákkeltő hatását támasztják alá.

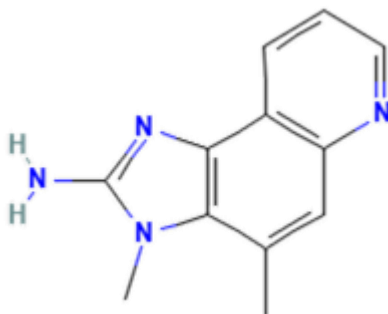


Ábra 2: IQ szerkezeti képlete

2-Amino-1-metil-6-fenil-imidazo [4,5-b] piridin (MeIQ)

A 2-Amino-1-metil-6-fenil-imidazo [4,5-b] piridin (MeIQ) nevű heterociklikus aminos egy, főként húsok és halak magas hőmérsékleten történő sütése során keletkező vegyület. Bár koncentrációja a MeIQx-hez és a PhIP-hez képest általában alacsonyabb, kimutatták halételekben akár 72 ng/g-os szinten is, míg más élelmiszerekben, például húsokban, a

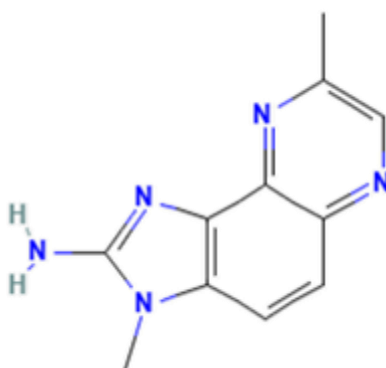
szingte általában 1 ng/g alatt van. Az IARC (1993) besorolása alapján a MeIQ valószínűleg rákkeltő az emberre (2B csoport), amit állatkísérletekben végzett vizsgálatok is alátámasztanak, ahol vastagbél-, máj- és gyomordaganatokat okozott [24].



Ábra 3: MeIQ szerkezeti képlete

A 2-amino-3,8-dimetilimidazo[4,5-f] kinoxalin (MeIQx)

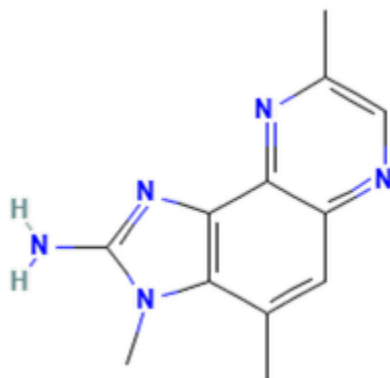
A 2-amino-3,8-dimetilimidazo[4,5-f] kinoxalin (MeIQx) a második leggyakoribb HCA, amely szintén a húsok hőkezelése során keletkezik. A MeIQx-t főként grillezett marhahúsban és csirkehúsban mutatták ki, koncentrációja általában a sütési hőmérséklettel és idővel arányosan növekszik [5]. Szerkezetileg egy imidazol- és kinoxalingyűrűből áll, amelyek sík geometriát alkotnak.



Ábra 4: MeIQX szerkezeti képlete

A 4,8-dimetilimidazo[4,5-f]kinoxalin (4,8-diMeIQx)

A 4,8-dimetilimidazo[4,5-f] kinoxalin (4,8-diMeIQx) a MeIQx egyik származéka, amely kisebb mennyiségben fordul elő, de hasonló mutagén és karcinogén potenciállal rendelkezik. Mindkét vegyület DNS-adduktumokat képezhet, amelyek kulcsszerepet játszanak a daganatok kialakulásában [39].



Ábra 5: 4,8-diMeIQx szerkezeti képlete

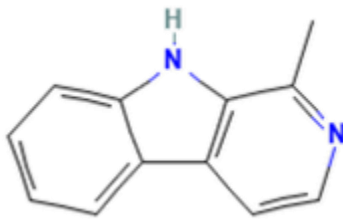
2.1.2. Pirolitikus heterociklikus aminok

A pirolitikus heterociklikus aminok (HCA-k) olyan vegyületek, amelyek az élelmiszerek, különösen a húsok és halak magas hőmérsékleten történő hőkezelése során keletkeznek. Ezek a vegyületek jellemzően 300 °C feletti hőmérsékleten alakulnak ki, amikor a fehérjék, különösen a triptofán, pirolízise (hőbomlása) zajlik le [36]. Fontos azonban itt megjegyezni, hogy ilyen magas hőmérsékleten háztartásokban általában nem hőkezelnek húsokat. A pirolitikus HCA-k közé tartozik többek között a harman (1-metil-9H-pirido[3,4-b]indol) és a norharman (9H-pirido[3,4-b]indol), amelyek nemcsak mutagén, hanem komutagén hatásúak is, azaz más rákkeltő vegyületek hatását erősítik.

1-metil-9H-pirido[3,4-b]indol (harman)

A harman(1-metil-9H-pirido[3,4-b]indol) egy olyan heterociklikus amin, amely a triptofán lebomlásából keletkezik magas hőmérsékleten, például grillezés vagy pirítás során. Ez a vegyület számos élelmiszerben, például húsokban, halakban és kávéban is megtalálható. Bár a harman önmagában nem mutagén, komutagénként működik, ami azt jelenti, hogy fokozza más, például a PhIP vagy MeIQx mutagén hatását [22].

Egészségügyi szempontból a harman neurotoxikus hatású lehet, és összefüggésbe hozható a neurodegeneratív betegségekkel, például a Parkinson-kórral. A harman emellett kötődik a DNS-hez, ami potenciális genotoxicitást jelez, különösen akkor, ha más HCA-kkal együtt van jelen [22].



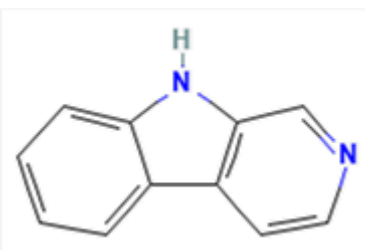
Ábra 6: Harman szerkezeti képlete

9H-pirido[3,4-b]indol (norharman)

A **norharman**, (9H-pirido[3,4-b]indol) amely szerkezetileg a harmanhoz hasonló, szintén a triptofán termikus lebomlásából származik, de a nitrogénatomhoz nem kötődik metilcsoport. A norharman a húsok hőkezelése során keletkezik, különösen magas hőmérsékleten és hosszabb sütési idő esetén. Ez a vegyület szintén komutagén, és képes kölcsönhatásba lépni más rákkeltő vegyületekkel, fokozva azok DNS-károsító hatását [16].

A norharman jelen van a dohányfüstben is, ami a vegyület élelmiszereken kívüli forrásaira hívja fel a figyelmet. Kutatások szerint a norharman és harman kombinációja erősíti a rákkeltő HCA-k hatását az emberi szervezetben, különösen a vastagbél és a prosztata sejtjeiben [5].

Bár a harman és norharman nem a erős mutagének, jelenlétük jelentősen növelheti más HCA-k, például a PhIP és MeIQx genotoxicitását. Komutagén hatásaik miatt fontos, hogy a magas hőmérsékleten kezelt élelmiszerek fogyasztását mérsékeljük, és előnyben részesítsük az alacsonyabb hőmérsékleten történő főzési technikákat [9].

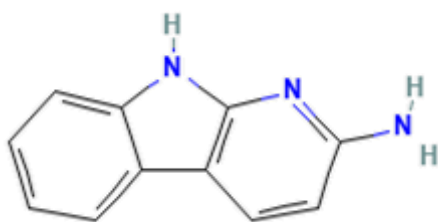


Ábra 7: Norharman szerkezeti képlete

2-amino-9H-pirido[2,3-b]indol (AαC)

Az AαC (2-amino-9H-pirido[2,3-b]indol) szintén a heterociklikus aminok közé tartozik, amely főként magas hőmérsékleten történő húsfeldolgozás során alakul ki. Bár kevésbé ismert és vizsgált vegyület, mutagén tulajdonságai és lehetséges karcinogén hatásai

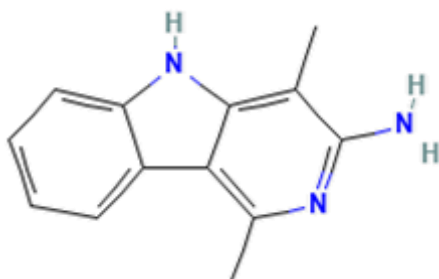
állatkísérletek során bebizonyosodtak. Az A α C különösen grillezett húsokban mutatható ki, ahol magas hőmérséklet és hosszabb sütési idő jellemző [21].



Ábra 8: A α C szerkezeti képlete

3-amino-1,4-dimetil-5H-pirido [4,3-b]indol-acetát (Trp-P-1)

A Trp(-P-1) (3-amino-1,4-dimetil-5H-pirido [4,3-b]indol-acetát) származó heterociklikus aminok, mint például az A α C, a húsok hőkezelése során, a Maillard-reakció révén keletkeznek. Bár ezek koncentrációja alacsonyabb lehet, jelenlétük és mutagén tulajdonságaik szintén hozzájárulhatnak a rákkeltő hatásokhoz. A Trp-P-1-eredetű heterociklikus aminok fontos szerepet játszanak a magas hőmérsékleten készült húsételek mutagenitálásában [12].



Ábra 9: Trp-P-1 szerkezeti képlete

2.2. A HCA-k keletkezése

A HCA-k a hús hőkezelése során végbemenő kémiai folyamatok eredményeként keletkeznek. A termikus HCA-k az aminosavak, a kreatin és a redukáló cukrok nagy hő hatására bekövetkező kémiai reakciói révén keletkeznek, a Maillard-reakció során. Ez a reakció alakítja ki az élelmiszerek ízét és színét is, de ekkor mutagén vegyületek keletkeznek amilyenek a HCA-k is.

Továbbá pirolitikus aminok, például a harman és norharman, szintén a húsok hőkezelése során keletkeznek, de főleg akkor, amikor a fehérjék extrém hőmérsékleten, pirrolízissel bomlanak le. Ezek a vegyületek az indolalkaloidok csoportjába tartoznak, és elsősorban a fehérjék bomlástermékeiből képződnek 300°C körüli hőmérsékleten, amely például intenzív grillezés és füstölés során gyakran előfordul. A harman és norharman, amelyek indolgyűrű-alapú vegyületek, szintén mutagén potenciállal rendelkeznek, és a rákkeltő vegyületek között tartják számon őket.

Kimutatták, hogy minél hosszabb ideig és minél magasabb hőmérsékleten történik a sütés, a HCA-k mennyisége annál nagyobb lesz a húson. A hús felülete, amely például grillezés során a ráccsal vagy a serpenyő anyagával érintkezik és közvetlen hőhatásnak van kitéve, nagyobb mennyiségben tartalmazhat HCA-kat. Szerepet játszik még a sült hús vastagsága, és hogy mekkora felületen érintkezik a sütőeszközzel. Mivel a vékonyabb húsok hamarabb átveszik a közeg hőmérsékletét, ennek következtében bennük nagyobb koncentrációban keletkeznek HCA-k, vastagabb húsokhoz pedig több idő szükséges [9].

A leggyakoribb HCA típusok, a PhIP, amely leginkább csirkehúsban és egyéb baromfikban keletkezik sütés során. Továbbá a MeIQx és a 4,8-diMeIQx, melyek leginkább magas hőmérsékleten sült vörös húsokban találhatóak meg nagy mennyiségben [5]. A kutatások szerint a húsokban jelenlévő kreatin és aminosav mennyisége is egyenesen arányos a keletkező HCA-k mennyiségével, mivel ezek a vegyületek a HCA-k prekursorai [8]. A húsok zsírtartalma is befolyásolja a HCA-k mennyiségét, mivel minél zsírosabb egy hús, annál lassabban szárad ki a felülete, így lassabban melegszik túl így mérsékli a hús hőnek való kitettségét, és lassítja a Maillard-reakciót [12].

A HCA-k képződésében jelentős szerepet játszik, hogy milyen fajtájú húst és milyen hőkezelési technikát használunk. Ezek gondos megválasztásával csökkenthető a rákkeltő vegyületek mennyisége.

A hús típusa jelentős szerepet játszik a HCA-k mennyiségének alakulásában. A sovány húsok, mint például a csirkehús, nagyobb mennyiségben tartalmazhatnak HCA-kat a hőkezelés után, míg a zsírosabb húsok, mint a sertéshús, alacsonyabb koncentrációt eredményezhetnek. A kutatások kimutatták, hogy a vörös húsokban, mint például a marhahús és a sertéshús, magasabb a HCA-k képződésének kockázata, mint a vízibaromfi

húsokban, például a kacsában és a libában [8]. Ez a különbség részben a hús zsírtartalmának és aminosav-összetételének eltéréseire vezethető vissza [2].

A pácolás az egyik leghatékonyabb módszer a HCA-k képződésének csökkentésére. Az antioxidánsokat tartalmazó pácok, mint például a citromlé, a fokhagyma, a mustár és az olívaolaj képesek csökkenteni a mutagén vegyületek mennyiségét a hőkezelés során. Új kutatások alapján polifenolok alkalmazása is hatékony módszer lehet a HCA-k képződésének visszaszorítására. A polifenolok, mint például a klorogénsav, a kvercetin és a luteolin, képesek szabadgyökfogóként működni, ezzel nagy mértékben lassítani a Maillard-reakciókat és az oxidációs folyamatokat, amelyek kulcsszerepet játszanak a HCA-k képződésében [34]. Muscovy kacsákon végzett kísérletek során kimutatták, hogy a polifenolok keveréke akár 64,43%-kal csökkentheti a szabad HCA-k mennyiségét, míg a kötött HCA-k esetében ez az arány 43,44% volt. A polifenolok különböző hatásmechanizmusokon keresztül, például a fenilcsoportokkal való reakció révén, gátolják a HCA-k képződéséhez szükséges köztes vegyületek kialakulását [35]. Továbbá a pácolás polifenolokat tartalmazó oldatokkal nemcsak a HCA-képződés csökkentéséhez járul hozzá, hanem javítja a hús ízét és állagát is.

Egyéb kutatások szerint a PhIP szintje akár 90%-kal is csökkenthető pácolás alkalmazásával, miközben a hús íze és állaga is javul [10]. Az antioxidánsok megakadályozzák a szabad gyökök képződését, ami kulcsfontosságú a HCA-k kialakulásának megelőzésében [6].

A HCA-k képződésének mérséklése nemcsak pácolással érhető el, hanem a grillezés technikájának módosításával is. Például, ha a húst gyakrabban forgatjuk grillezés közben, és alacsonyabb hőmérsékleten grillezünk hosszabb ideig, csökkenthetjük a HCA-k mennyiségét. Ezen kívül a közvetett grillezési módszerek, amelyek során a hús nem közvetlenül érintkezik a lánggal, szintén hatékonyan csökkenthetik a HCA-k képződését [6].

Továbbá a víz-olaj keverékben történő sütés szintén egy lehetséges technológia a HCA-k mennyiségének csökkentésére. Ez a módszer lassítja az olaj oxidációját és csökkenti a hőkezelt húsokban található káros vegyületek koncentrációját [35].

2.3. A HCA-k egészségügyi kockázatai

A heterociklikus aminok (HCA-k) bizonyítottan rákkeltő hatásúak, így jelentős egészségügyi kockázatot jelentenek. Hosszútávon nagy mennyiségű fogyasztásuk növeli a DNS károsodás veszélyét, amely rákos megbetegedésekhez vezethet [34]. Több kutatás arra jutott, hogy a HCA-k, különösen a PhIP, a MeIQx és a 4,8-diMeIQx (2-amino-3,4,8-trimetilimidazo[4,5-f] kinoxalin), képesek DNS-adduktokat képezni a szervezetben. Ezek az adduktok megzavarják a normál sejtfolyamatokat, és sejtmutációkat, illetve rákos sejtosztódást idézhetnek elő [4].

A heterociklikus aminokat leginkább a prosztatata-, vastagbél- és hasnyálmirigy rákkal hozták összefüggésbe. Több epidemiológiai vizsgálat igazolta, hogy nagy hőmérsékleten sült húsok rendszeres fogyasztása növeli a rákos megbetegedések kockázatát. Az egyik legismertebb tanulmány szerint a PhIP a leggyakoribb HCA, amely megtalálható a magas hőmérsékleten sült vagy grillezett csirkehúsban, és jelentős szerepet játszik a vastagbélrák kialakulásában. [9].

A HCA-k által okozott kockázatok nemcsak egyéni szinten jelennek meg, hanem társadalmi szinten is komoly közegészségügyi problémát jelentenek, különösen azokban az országokban, ahol népszerűek a grillezett és egyéb sült húselekek. Világszerte egyre magasabb a rákos megbetegedések száma, így nagyobb figyelem irányul a helyes táplálkozásra, ebből adódóan a megfelelő elkészítési módoka (HCA-k mennyiségének csökkentésére). Az Egyesült Államokban és Európában végzett kutatások alapján kimutatták, hogy azoknál, akik rendszeresen fogyasztanak magas hőmérsékleten készült húsokat, különösen grillezett vagy pirított ételeket, nagyobb a rákos megbetegedések, például a vastagbél- és hasnyálmirigyrák előfordulása [4].

A prosztatata-vastagbél és hasnyálmirigy rákon felül a HCA-k szerepet játszhatnak továbbá az emlőrák kialakulásában, különösen azon nőknél, akik rendszeresen fogyasztanak grillezett húsokat [10].

2.4. A HCA-k és a baromfi-húsok

A kacs- és libahús, mivel sajátos az összetételük, így más mértékben képződnek bennük HCA-k. Általában zsírosabbak, ezért sütéskor kevesebb HCA-t tartalmaznak mivel a zsír jelenléte áttételesen csökkenti a Maillard-reakció intenzitását, amely a HCA-k fő képződési

mechanizmusa [2]. Kimutatták, hogy baromfi húsek esetében az alacsony hőmérsékleten való grillezés és a pácolás jelentősen csökkenti a felszabaduló HCA mennyiségét [1].

A HCA-k képződése a baromfi húsekban nemcsak a zsírtartalom különbségeiből adódik, hanem a hús hőátadási jellemzői is fontos szerepet játszanak. Mivel a baromfi húsek, például a csirkehús, gyakran vékonyabbak, mint a vörös húsek, gyorsabban melegsznek át, így a Maillard-reakció hamarabb beindulhat. A csirkehús alacsony zsírtartalma és a közvetlen, magas hőmérsékleten történő grillezés vagy sütés tovább fokozza a HCA-k képződésének kedvező körülményeket [2].

A kacsas- és csirkehús között jelentős különbségek vannak a zsírtartalom és zsírsavösszetétel tekintetében, amelyek befolyásolják mind a beltartalmi értéküket, mind a HCA-képződés mértékét. A csirkehús általában soványabb, mellrészének zsírtartalma 1–2%, és nagyobb arányban tartalmaz többszörösen telítetlen zsírsavakat (polyunsaturated fatty acids; PUFA), mint a linolsav és az alfa-linolénsav, amelyek kedvező hatásúak lehetnek a szív- és érrendszer egészségére [15]. Ezzel szemben a kacsahús zsírtartalma lényegesen magasabb, mellrészében akár 7,5% is lehet, és a telített zsírsavak, mint a palmitinsav (C16:0) és a sztearinsav (C18:0) dominálnak benne [13, 14].

A csirkehús magasabb PUFA-tartalma, különösen az omega-3 és omega-6 zsírsavak jelenléte, hozzájárulhat a gyulladáscsökkentéshez és a sejtfunkciók támogatásához, míg a kacsahúsban nagyobb arányban található monotelítetlen zsírsav, az oleinsav (C18:1), amely szintén kedvező hatású lehet, de a magasabb telített zsírsavtartalom miatt mértékletes fogyasztása ajánlott [17, 18]

A zsírtartalom közvetlenül befolyásolja a HCA-képződést is. Magasabb zsírtartalmú húsek esetében, mint a kacsahús, a hőátadás lassabb, ami gátolhatja a Maillard-reakció intenzitását, így kevesebb HCA keletkezik. Ezzel szemben a csirkehús alacsony zsírtartalma gyorsabb hőhatást eredményez, ami fokozhatja a HCA-képződést magas hőmérsékleten történő sütés esetén [17].

A PUFA-k hajlamosak az oxidációra, amely szintén hozzájárulhat a HCA-képződéshez, különösen a csirkehús esetében, ahol ezek a zsírsavak nagyobb arányban találhatók. Ezzel szemben a telített zsírsavak, amelyek a kacsahúsban dominálnak, hőkezelés közben stabilabbak, így kevésbé járulnak hozzá a HCA-képződéshez [17, 20].

Összességében a kacs- és csirkehús zsírtartalmának különbségei jelentős hatással vannak mind a táplálkozási profilra, mind a HCA-képződésre, ami a húsok megfelelő hőkezelési módszereinek megválasztásánál fontos szempont lehet.

2.5. A jövőbeli kutatások iránya

A HCA-k képződésének további kutatása szükséges a különböző húsfélék és hőkezelési módszerek hatásának megértéséhez. Különösen fontos a kacs- és a liba sütésének, grillezésének részletes vizsgálata, mivel ezeket kevésbé kutatják a HCA-k képződése szempontjából. Ezen kívül a pácolási módszerek további fejlesztése és a grillezési folyamatok optimalizálása segíthet a HCA-k mennyiségének csökkentésében, ami hozzájárulhat az egészségvédelemhez és az élelmiszerbiztonság javításához [1]. Fontos vizsgálni, hogy a természetes élelmiszer adalékanyagokat milyen koncentrációban alkalmazzuk, mivel ezek bizonyítottan csökkentik a HCA mennyiséget [37]. További kutatásoknak fontos témája lehet a HCA-k emberi szervezetbe kerülésének és az ezzel kapcsolatos kockázatok pontosabb vizsgálata, kitérve itt a táplálkozási szokásokra, és a vegyületek biológiai hasznosulására [33].

Fontos lenne továbbá megfontolni a 925/2023-as EU-s rendelet kiegészítését. A jogszabály előírja ugyan, hogy amennyiben egy élelmiszerben a szennyezőanyag szintje meghaladja az előírt maximumot, az nem forgalmazható és nem használható fel élelmiszer-összetevőként, de – bár felsorol több feldolgozási szennyező anyagot (poliaromás szénhidrogének (PAH-k), benzo(a)piren, a 3-MCPD (3-monoklóropropán-1,2-diol) és a glicidil zsírsav-észterek) – a heterociklikus aminokkal nem foglalkozik.

3. Célkitűzések

Szakdolgozatom célja a kacsahúsminék heterociklikusamin tartalmának vizsgálata különböző hőmérsékleti és idő paraméterek mellett. Célunk a húsminék 5, 10, 15 perces, 150°C, 190°C 230°C-os hőkezelés utáni vizsgálata, amik alapján szeretnénk pontos képet kapni a HCA-k képződéséről különböző hőkezelési paraméterek mellett. Vizsgáljuk a bőr hatását a felszabaduló HCA-mennyiségre, és hogy hogyan befolyásolja a Maillard reakció intenzitását. Szeretnénk elemezni a termikus és pirolitikus HCA-k képződési mintázatát, vizsgálni, hogy mekkora koncentrációban szabadulnak fel az adott hőmérsékleteken a meghatározott sütési időt követően. Továbbá elemezni szeretnénk a HCA-koncentrációkat a kacsahúsok kérgi (kéreg) és belső(átlag) rétegeiben. Így megérthetjük hogyan hatnak a hús belső és külső környezeti tényezői a HCA-k képződésére. Javaslatokat szeretnénk tenni a mért adatok alapján a grillezési hőmérséklet és időtartam meghatározására, amely minimalizálja a HCA-k keletkezését. Célunk új adatokkal és bővíteni a HCA-képződés mechanizmusainak megértését, különös tekintettel a vízibaromfi húsokra, amelyek eddig kevésbé kutatottak ezen a területen. A kutatás célja, hogy nemcsak a vízibaromfi húsminékon végzett kísérleteken keresztül szolgáltatson hasznos adatokat, hanem gyakorlati javaslatokat nyújtson a fogyasztók számára a HCA-k csökkentése érdekében

4. Anyag és módszertan

Vegyszerek

A MeIQx, 4,8-DiMeIQx és PhIP standardokat a Toronto Research Chemicals-tól szereztük be, míg a harman és norharman vegyületeket a Sigma-Aldrich-tól vásároltuk meg. A koffeint (Sigma Aldrich) és a deuterizált MeIQx-D3-at (TRC) belső standardként használtuk az elemzések során. A minta előkészítéséhez és a HPLC eljáráshoz szükséges vegyszereket – beleértve az acetonitrilt, dimetil-formamidot, metanolt, hangyasavat, ecetsavat és nátrium-hidroxidot – a VWR International biztosította. Az ultra tiszta I. típusú vizet az egyetem Állathigiéniai Tanszék SUEZ Environment® víztisztító rendszerén keresztül állítottuk elő.

Műszerek és eszközök

A grillezési eljáráshoz DeLonghi CGH 1012D elektromos kontakt grillt használtunk. A kémiai elemzéshez szükséges minták előkészítését, Certomat WR vízfürdős rázógéppel, Biofuge Primo R centrifugával és Biotage VP bepárlóval végeztük. A vizsgálatokhoz használt további eszközök: Phenomenex SI szilikagél és Phenomenex C18 szilárd fázisú extrakciós oszlopok. Az elemzést egy Shimadzu LCMS 8030 HPLC–MS/MS rendszeren, Phenomenex Kinetex C18 EVO komatografiás oszloppal és LabSolutions® szoftverrel végeztük.

Grillezési kísérletek

A kacsahúst helyi kiskereskedelmi egységekből szereztük be. A grillezési vizsgálatokat zárt grillmódban végeztük. A hőkezelési paraméterek között a bőr jelenlétét, a grill felső lapjának pozícióját, a hőmérsékletet (150, 190 és 230 °C) és az időtartamot (5, 10 vagy 15 perc) is figyelembe vettük. Viszonylag egységes méretű mintákat használtunk.

Mintaelőkészítés HPLC-hez

A grillezett kacsamell mintákat szétbontottuk átlag és kéreg mintákra. A mintákat és a háttér mátrixnak (vak minta) használt főtt kacsamellet kb 1,5 mm vastag és 6 mm hosszú darabokra vágtuk. A „átlag” minták a szeletek nem felszíni részeit tartalmazták, míg a „kéreg” (vagy bőrös) minták a felszíni kérges réteget. A mintákat kézzel vágtuk fel, majd alaposan összekevertük az apró darabokaz, és 6 grammot dolgoztunk fel a további elemzéshez. A mintaelőkészítést a következő lépések követték:

- elszappanosítás: a kimért bőr mintákra 75 ml 5 M NaOH oldatot adagoltunk, a kimért átlag és kéreg mintákra 45 ml 1 M NaOH oldatot adagoltunk, a vak mintára 75 ml 1 M NaOH oldatot adagoltunk
- rázatás: bőr mintákat belehelyeztük a vízfürdős rázó gépbe, majd 120 percen át 80 °C-on 190/min sebességgel ráztuk.
- A rázatás után a mintákat 5 percen át pihentettük szobahőmérsékleten, majd a bőr és vak mintákat 2-2 50 ml-es centrifugacsövekbe töltöttük az átlag és kéreg mintákat esetében 1-1 50 ml-es centrifugacsövekbe töltöttük.
- A mintákat centrifugáltuk 10 percen át 6°C-on 8 000 RPM-en.
- A felülúszót főzőpoharakba pipettáztuk majd hozzáadtunk 60 µl ISTD MIX-et 1 (10.000 ng/ml koncentrációjú koffein és MeIQx-D3 oldat).
- majd kétlépcsős szilárd fázisú extrakciót végeztünk szilikagél és C18 oszlopokon. A mintákat N₂ gáz alatt, 50 °C-on szárazra párologtattuk, majd 500 µl acetonitrilben oldottuk vissza.

minta	bemérés	elszappanosító szer		
		menyisége	koncentrációja	anyaga
bőr	6 g	75 ml	5 M	NaOH
átlag & kéreg	6 g	45 ml	1 M	NaOH
vak minta	30 g	75 ml	1 M	NaOH

LC–MS/MS analízis

A HCA-k mennyiségi kémiai analízisét Shimadzu LCMS 8030 HPLC–MS/MS rendszerrel végeztük. A kromatográfiás szétválasztást Phenomenex Kinetex C18 EVO 100 × 4,6 mm ID (2,6 µm részecskeméretű) oszlopon hajtottuk végre, amelyhez egy 40 × 2 mm-es C18 védőoszlopot használtunk. Az elválasztáshoz alkalmazott gradiens eluensei: A – 50 mM ammónium-acetát vizes oldata (pH 5, ecetsavval beállítva), és B – 0,1 v/v% hangyasav acetonitrilben. Az áramlási sebesség 0,4 ml/perc volt, és egy kromatográfiás futás 6 percig tartott. Az oszlop remosztátot 30 °C-ra, az automata injektor hőmérsékletét 7 °C-ra állítottuk be. Az injektált térfogat 10 µl volt.

A kvadrupól tandem tömegspektrométert elektropray ionizációs (ESI) forrással pozitív módban, többszörös reakció-monitorozással (MRM) használták. További MS paraméterek:

interfészfeszültség 4,5 kV; interfész hőmérséklete 250 °C; deszolvációs vezeték 300 °C; hőblokk 350 °C; detektor 1,78 kV; porlasztógáz (N₂) 3 liter/perc, szárítógáz (N₂) 15 liter/perc; ütközőgáz (Ar) 230 kPa.

Az LC–MS/MS módszer validálása

Az LC–MS/MS módszer validálásának részeként meghatároztuk az öt vizsgált vegyületre a specificitást/szelektivitást, linearitást, kimutatási határt (LOD), mennyiségi meghatározási határt (LOQ), valamint a mérésen belüli és mérésközi pontosságot (precizitás és valódiság). A specificitás és linearitás paraméterek minden esetben megbízhatóan teljesültek. A mennyiségi meghatározási határt minden vizsgált vegyület esetében 0,25 ng/g-ban határoztuk meg. A mérésen belüli és mérésközi precizitási értékek jóval a 15%-os határérték alatt voltak. A valódiság, mint a módszer pontosságának indikátora szintén megfelelt az elfogadott –20% és +10% közötti határoknak.

Adatfeldolgozás és statisztikai elemzés

Az adatfeldolgozást elsőként az LC–MS rendszer LabSolutions® szoftverével végeztük el. A másodlagos adatfeldolgozást és a statisztikai elemzés egy részét MS Excel szoftverrel (Microsoft, Redmond, WA, USA) végezték, a korrelációs elemzéshez Pearson-módszert alkalmazva.

5. Eredmények

A méréseink során azonos méretű kacsamell szeleteket három különböző hőmérsékleten, 150 °C, 190 °C, és 230 °C, állított grillsütőn hőkezeltük öt, tíz és tizenöt percig. A hőkezelés végeztével minden mintában a következő heterociklikus aminokat vizsgáltuk: harman, norharman, AαC, Trp-P-1, IQ, MeIQ, MeIQx, 4,8-diMeIQx, és PhIP. Az 1. mellékletben található táblázatokban a mért mennyiségeket kacsamell hússal vonatkozóan ng/g-ban adtuk meg, vagy a következő kategóriák szerint jeleztük: nem kimutatható (n.d.), ami azt jelenti, hogy a kromatogram megfelelő részén nem jelent meg csúcs; vagy nem kvantifikálható (n.q.), ami azt jelenti, hogy a kromatogram megfelelő részén volt csúcs, de annak intenzitása a legkisebb kalibrációs pont alatt maradt, ezért nem lehetett értéket rendelni hozzá.

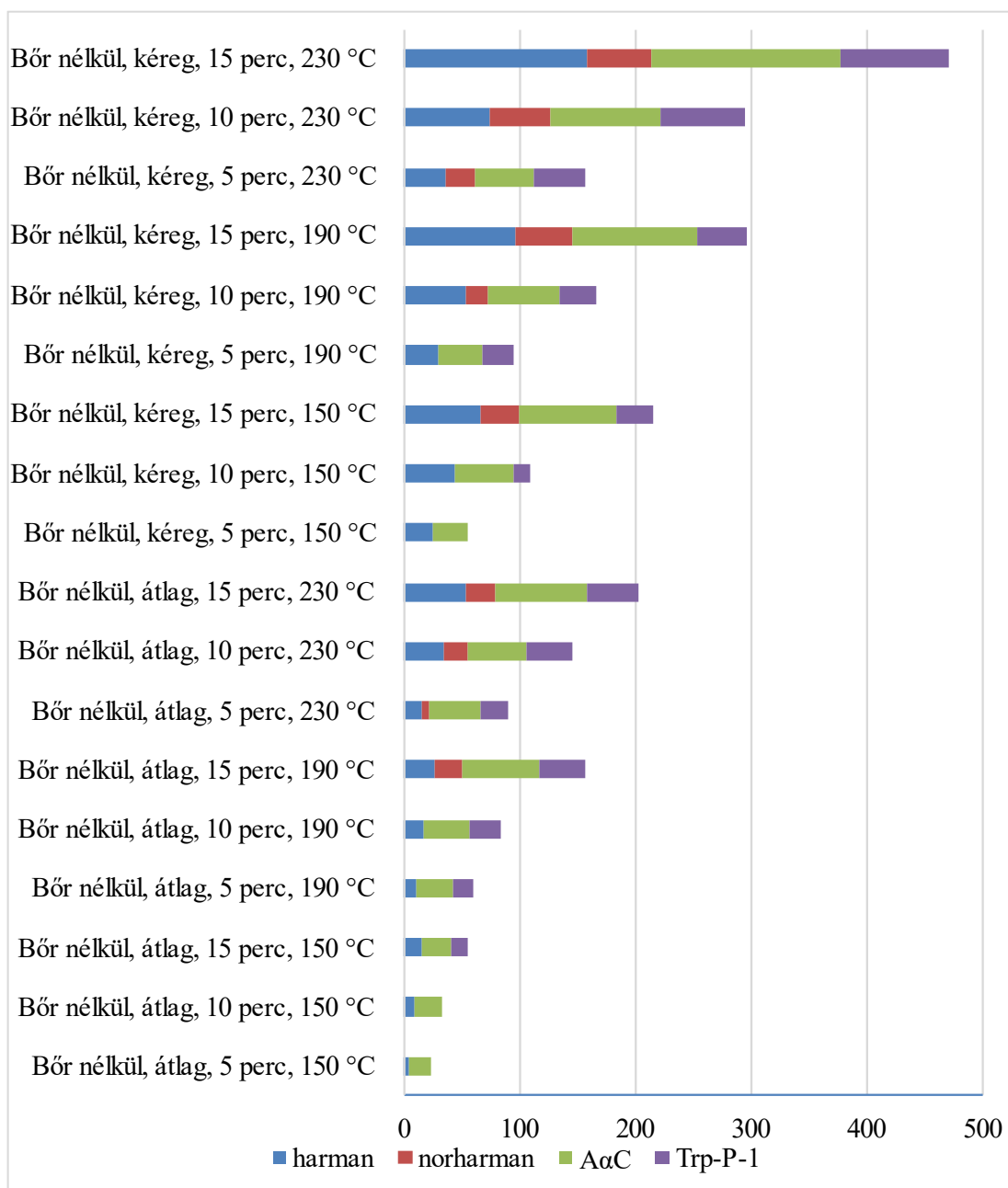
Külön bőr és bőr nélküli mintákat elemeztünk, és minden mintából egy átlag és egy kéreg mintát vizsgáltunk. A mérések részletes eredményeit az 1. melléklet tartalmazza. A táblázatban látható szórások nagyságrendileg elhanyagolhatóak az átlaghoz képest.

5.1. Pirolitikus heterociklikus aminok

Megfigyelhető, hogy az mért HCA-koncentrációk magasabbak a bőr nélküli mintákban mind a kéreg és mind az átlag esetében, míg alacsonyabb a bőrrel fedett átlag és kéreg mintákban. Ennek az lehet az oka, hogy itt érvényesül a bőr védő hatása, ami megvédi a húst, kevesebb ideig lesz nagy hőhatásnak kitéve. Ugyanakkor a bőr nélküli minták direkt kontaktálódnak, így a szövet hamarabb eléri a kritikus hőmérsékletet, amely az egyes HCA-k képződéséhez szükséges. Ennek ellenére az érdekes, hogy a bőr mintákban is alacsony HCA-koncentrációt mértünk, annak ellenére, hogy az direkt kontaktálódott a sütőfelülettel. Ennek a kacsabőr azon sajátosságához lehet köze, hogy magas a zsírtartalma (főleg egyéb baromfikhoz viszonyítva) ennek hatására lassabban következik be a hőátadás, ami csökkenti a Maillard reakció intenzitását, így jelentősen kevesebb HCA keletkezett.

5.1.1. Pirolitikus heterociklikus aminok a bőr nélküli mintákban

A bőr nélkül mért pirolitikus HCA-k (harman, norharman, AαC, és Trp-P-1) koncentrációit az 1. melléklet 1. táblázata tartalmazza részletesen, ugyanezen mérési eredmények grillezési paraméterenkénti összefoglalását pedig a 10. ábra mutatja be.



Ábra 10: Bőr nélküli kacsamellminták pirolitikus HCA tartalma ng/g-ban

Elsőként vizsgáljuk a pirolitikus heterociklikus aminokat, melyek a harman, norharman, AαC, és Trp-P-1. A harman koncentrációja szignifikánsan magasabb, mint a norharmané a legtöbb minta esetében. Ez összhangban van a korábbi megállapításokkal, amelyek szerint a harman a gyakoribb pirolitikus HCA. A diagram alapján a legmagasabb harman koncentrációt a bőr nélküli kéregmintában, 230 °C-on, 15 perces hőkezelés után mértük: 158 ng/g. A norharman koncentrációja a legtöbb mintában alacsonyabb volt, a legnagyobb érték

ugyanezen mintában volt (55 ng/g), de ez még mindig jelentősen elmarad a harman koncentrációjától.

Az A α C vegyület, amely a fehérjék bomlási terméke, szintén magas koncentrációban jelent meg a kéregmintákban. Az A α C legnagyobb koncentrációja ugyancsak 230 °C-on 15 perces hőkezelést követően mértük, amely 164 ng/g-ra emelkedett. Ez jelentős mértékben magasabb, mint az átlagmintákban mért értékek. Trp-P-1 koncentrációk emelkedése szintén a grillezési idő és hőmérséklet növekedésével mutatott korrelációt. A legmagasabb értéket szintén a 230 °C-on 15 perces hőkezelés után mértük, 94 ng/g-ot.

Jól megfigyelhető, hogy a hőmérséklet és az idő növekedésével mind az átlagmintákban mind a kéregmintákban növekszik a HCA-k mennyisége. Jól látszik, hogy a legnagyobb növekedést az A α C majd a harman mutatta, és legnagyobb mennyiségben 230°C-on 15 perc sütést követően vannak jelen. Ennél sokkal kevésbé jelentős növekedést tapasztalunk a HCA koncentrációjának növekedésében norharman, és Trp-P-1 esetében. Míg harman esetében 230 °C 15 perces sütést követően 158 ng/g koncentrációt mértünk, vagy a legnagyobb adatunk A α C esetében 230°C-os 15 perces sütést követően 164 ng/g volt, addig norharman esetében ugyan ekkora hőfokon ugyan ennyi ideig sütve a mért koncentráció csak 55ng/g volt. Ugyan ez a helyzet Trp-P-1 esetében is, csak nem ilyen drasztikus a különbség.

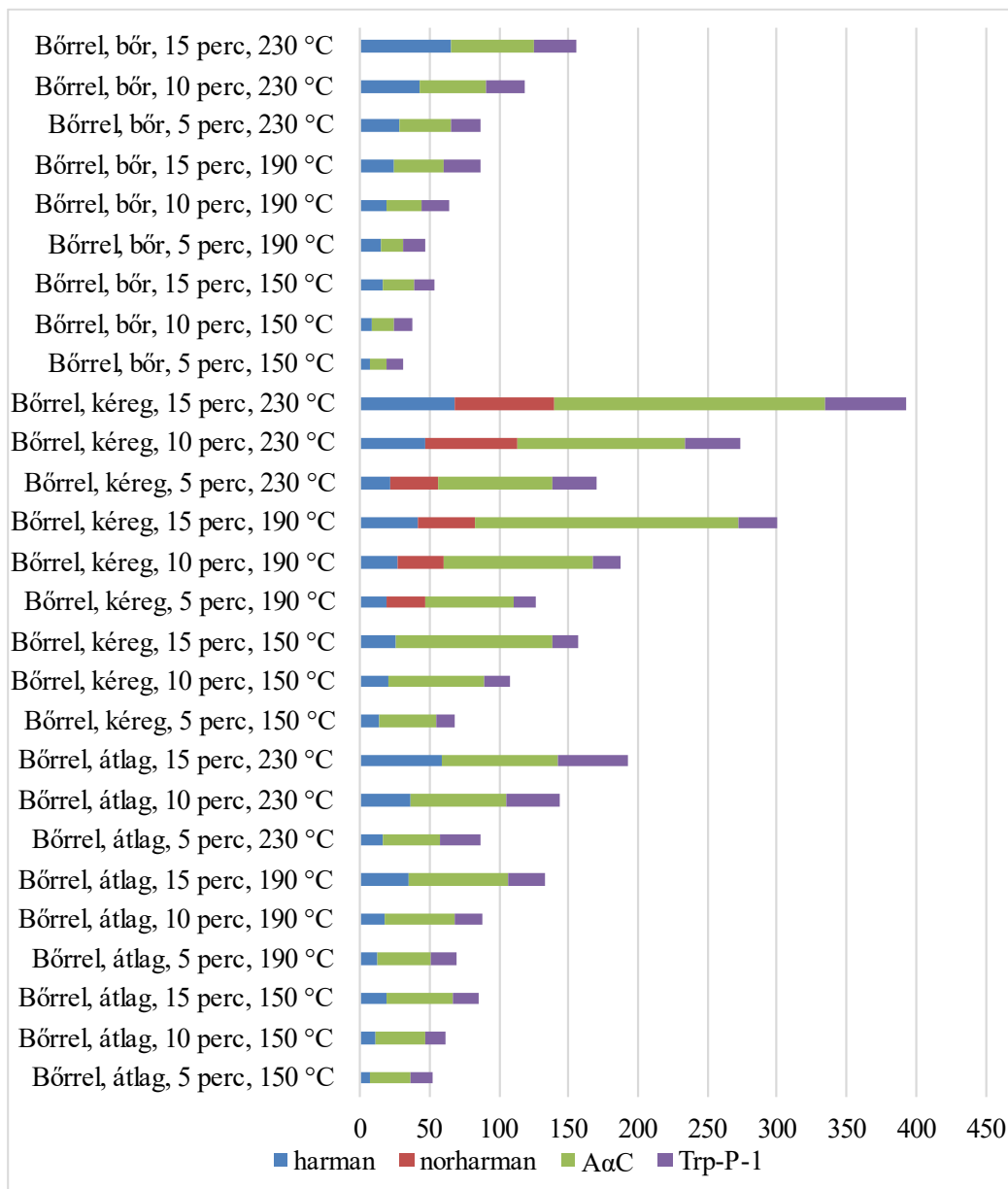
Érdekes továbbá, hogy az átlagminták esetében, míg harmant és A α C-t már 150°C-os 15 perces hőkezelést követően mértünk (4,3 ng/g és 19,2 ng/g), addig norharmant csak 190°C-os 15 perces hőkezelést követően tudtunk kimutatni (24 ng/g). Ugyan ez a tendencia figyelhető meg Trp-P-1 esetében is, csak itt már 150 °C-os 15 perces hőkezelés után is.

Kéregmintákat elemezve, ugyanígy megfigyelhető, hogy a harman és A α C koncentráció már 150°C-os 5 perces hőkezelést követően mérhető magas koncentrációt mutatnak, míg a norharman először csak 15 percnyi 150°C-os hőkezelés után mérhető, a Trp-P-1 már 10 perc után is. Ez esetben is ugyanúgy megfigyelhető, mint az átlagmintákban, hogy hosszabb ideig szükséges a hőkezelés, hogy ez a két utóbbi vegyület keletkezzen.

A kéregminták nagyobb koncentrációjú HCA-tartalmának az lehet az oka, hogy itt a hús kérge folyamatosan kontaktálódik a grillsütő lapjával, amely kedvez a HCA képződésnek.

5.1.2. Pirolitikus heterociklikus aminok bőrös mintákban

A bőrös mintákban mért pirolitikus HCA-k (harman, norharman, A α C, és Trp-P-1) koncentrációit az 1. melléklet 2. táblázata tartalmazza részletesen, ugyanezen mérési eredmények grillezési paraméterenkénti összefoglalását pedig a 11. ábra mutatja be.



Ábra 11: Bőrös kacsamellminták pirolitikus HCA tartalma ng/g-ban

A bőrös mintákban az eredmények némileg eltértek, mivel a bőr szigetelő hatása mérsékelte a közvetlen hőhatást. A bőrös mintákban a harman koncentrációi alacsonyabbak voltak, mint a bőr nélküli mintákban, de még így is jelentős növekedést mutattak a grillezési idő és hőmérséklet függvényében. A legmagasabb értéket kéregmintában mértük 230 °C-on, 15

perces hőkezelést követően (67,9 ng/g). A norharman koncentrációja a bőrös mintákban alacsonyabb volt, mint a bőr nélküli kéregmintákban, de még mindig kimutatható. A α C és Trp-P-1 vegyületeknek a koncentrációja a bőr alatt kisebb mértékben emelkedett, mint a bőr nélküli mintákban, ami alátámasztja a bőr szigetelő hatását.

Ebben az esetben is megfigyelhető, hogy mind a harman mind az A α C és a Trp-P-1 koncentráció is arányosan növekszik, ahogy növeljük a hőmérsékletet és a sütés idejének a hosszát. Legnagyobb értékű növekedést ebben az esetben is a harman és az A α C mutatja. Érdekesség, hogy harman esetében megfigyelhető, hogy míg bőr nélküli kéregminták esetében 230 °C fokos 15 perces sütést követően a mért koncentráció 158 ng/g volt, addig ugyanekkora hőmérsékleten, ugyanennyi ideig sültött bőrrel fedett kéregminta esetén ez az érték csak 67,9 ng/g volt. Ennek az oka a bőr zsírossága és védő szerepe lehet. Meglepő, hogy A α C esetében bőrrel fedett kéregminták esetében 230 °C-os 15 perces sütést követően 195,3 ng/g koncentrációt mértünk, míg ugyanezen paraméterek esetében, de bőr nélkül csak 164 ng/g-ot. De ugyan ez a tendencia megfigyelhető, ha csökkentjük a hőmérsékletet vagy a sütési időt. Valószínűleg itt a bőraljában található zsír zsírsavösszetétele kedvez a A α C képződésnek.

Érdemes kitérni arra, hogy bőrrel fedett kéregminták esetén a norharman csak 190 °C-os 5 perces sütést követően mutatott mérhető koncentrációt, ennél alacsonyabb hőmérsékleten hosszabb idejű hőkezeléssel sem volt kimutatható. Míg a bőrmintákban norharman koncentrációt még legmagasabb hőfokon (230 °C) leghosszabb ideig hőkezelve (15 perc) sem mutatott mérhető koncentrációt. Ennek a háttérben is a bőr magas zsírtartalma és védő hatása állhat, amely csökkenti a hőátadást, és késlelteti a Maillard-reakciót

5.2. Termikus heterociklikus aminok

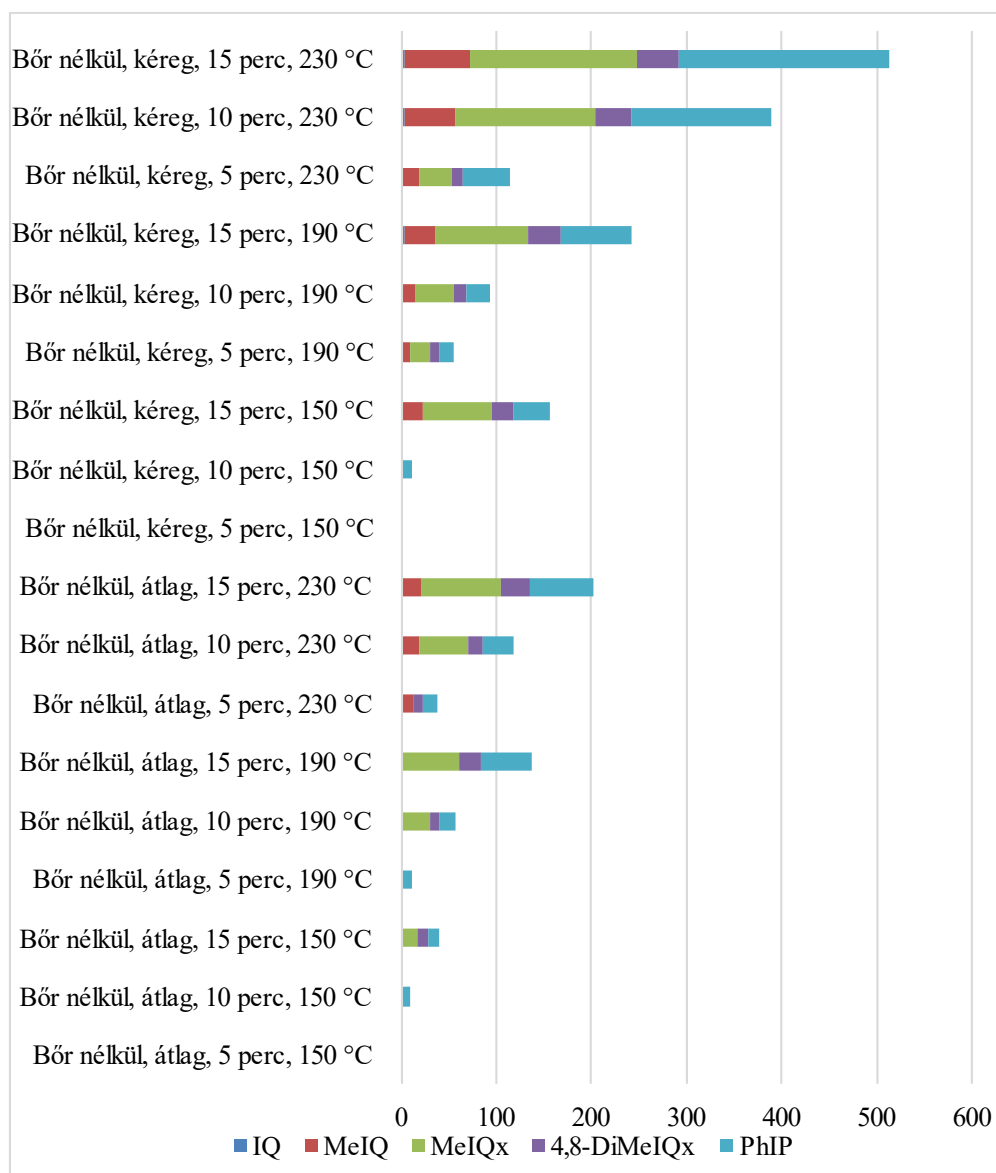
Tovább haladva megvizsgáljuk a termikus heterociklikus aminok koncentrációját bőr nélküli mintákban. Ide tartozik legfontosabbként az IQ, mivel ez a leginkább rákkeltő már alacsony koncentrációban is, MeIQ, MeIQx, 4,8-DiMeIQx és PhIP. Ezen HCA-k koncentrációinak mért értékeit az 1. melléklet 3. és 4. táblázatai tartalmazzák részletesen.

Ugyanúgy megfigyelhető, hogy általában a bőr nélküli mintákban magasabb a mért termikus HCA koncentráció. Bár érdekes, hogy például IQ esetén kéreg mintában és bőrrel fedett kéreg mintában ugyanakkora koncentrációt mértünk 230 °C-on 15 perc sütést követően. MeIQ esetében pedig bőrös és bőrrel fedett mintákban is magasabb koncentrációt mértünk

230°C-os 15 perces sütést követően, ahogyan magasabb koncentrációt mértünk bőrben, mint bőr nélküli kéregben MeIQx esetében. Ezen heterociklikus aminok keletkezésénél a mérések szerint kevésbé játszik szerepet a bőr védő hatása.

5.2.1. Termikus heterociklikus aminok bőr nélküli mintákban

A bőr nélkül mért termikus HCA-k (IQ, MeIQ, MeIQx, 4,8-diMeIQx, PhIP) koncentrációit az 1. melléklet 3. táblázata tartalmazza részletesen, ugyanezen mérési eredmények grillezési paraméterenkénti összefoglalását pedig a 12. ábra mutatja be.



Ábra 12: Bőr nélküli kacsamellminták termikus HCA tartalma ng/g-ban

IQ esetén megfigyelhetjük, hogy az első mérhető koncentrációt átlagmintákban csak 230 °C-on mutatta, de már 5 perces hőkezelés hatására is, 1,9 ng/g-ot. Ezzel szemben bőr nélküli kéregmintákban már 190 °C-on 10 perces hőkezelés hatására is 2,1 ng/g koncentrációt mértünk. A mért adatok alapján valószínűsíthető, hogy az IQ képződésénél fontosabb faktor az hőkezelés ideje (ha elérte a minimum hőmérsékletet), mint a hőmérséklet: 190 °C-on 15 percig sütve 2,9 ng/g koncentrációt mértünk, míg 230 °C-on 5 perces hőkezelés hatására a mért koncentráció csak 1,5 ng/g volt. Mivel az IQ feltételezetten egy erősen rákkeltő anyag (2A csoportba sorolt), ezért törekedni kell, hogy minél kevesebb koncentrációban legyen jelen az élelmiszerekben, így kerülni kellene 190 °C-os vagy ezen hőmérséklet feletti sütést, vagy ha még is akkor lehető legrövidebb ideig, a kéreg lekaparásával kellene fogasztani.

A többi vegyület esetében is megfigyelhető, hogy a képződésük szempontjából fontosabb, hogy mennyi ideig éri őket a hő, mint az, hogy magas legyen a hőmérséklet. MeIQ esetében kéregmintákban például 150 °C-on 15 perces hőkezelés hatására 23,5 ng/g koncentrációt mértünk, míg 190 °C-on 5 perces hőkezelés hatására csak 9,5 ng/g koncentrációt mértünk. Még szemléletesebb MeIQx vagy 4,8-DiMeIQx-et vizsgálva, ahol, ha megnézzük az átlagmintákat azon belül 150 °C-on 15 percig hőkezelteteket látjuk, hogy MeIQx esetében 17,6 ng/g koncentrációt 4,8-DiMeIQx esetében 10,6 ng/g koncentrációt mértünk, míg 190 °C-on 5 percig hőkezelve egyik vegyületnél sem volt mérhető koncentráció.

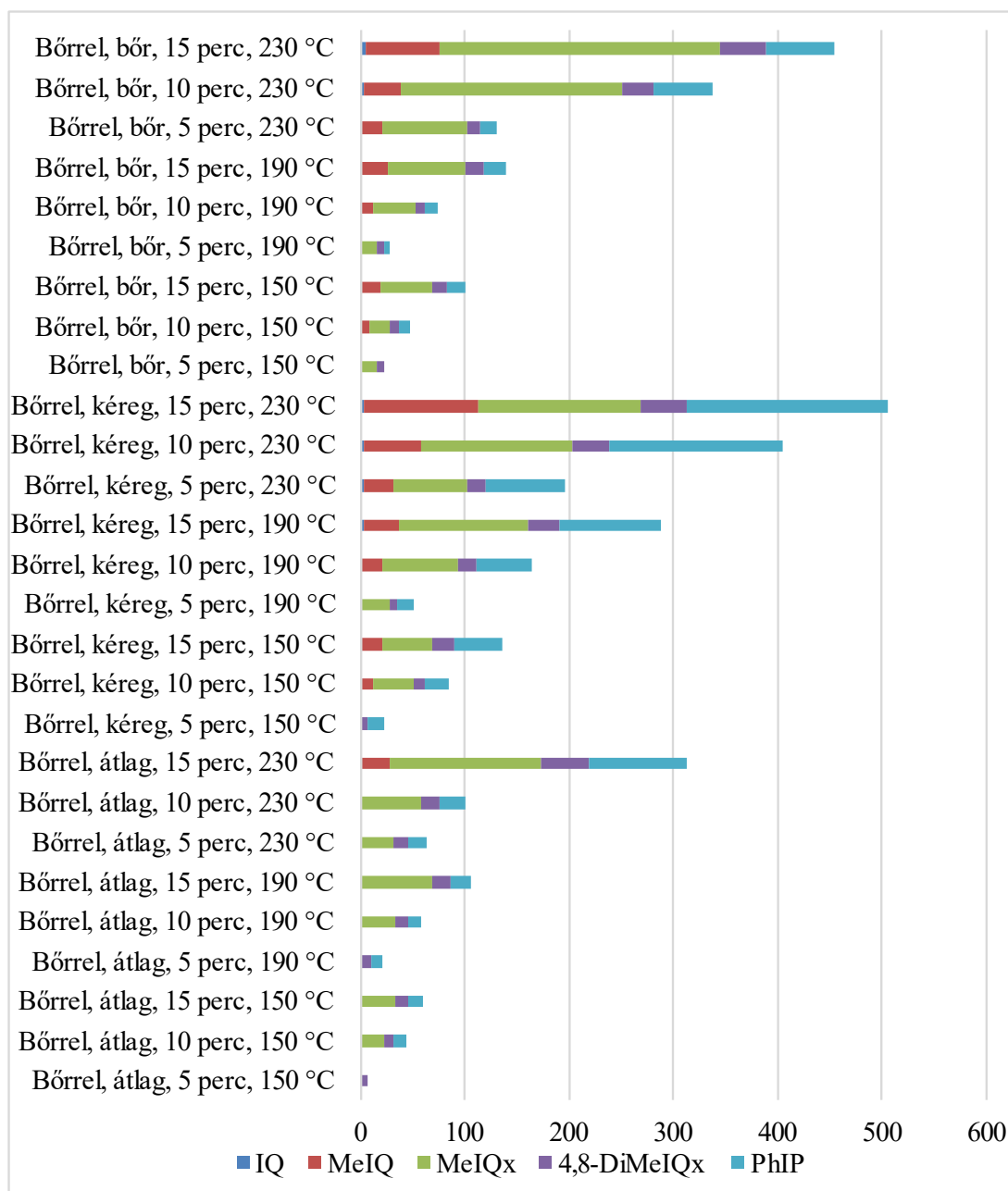
Hasonló tendencia figyelhető meg PhIP esetében is, annyi különbséggel, hogy jól láthatóan hamarabb mérhető koncentrációban keletkezik, mert már 150 °C-os 10 perces hőkezelés hatására is 9 ng/g koncentrációt tapasztaltunk. Továbbá ez a vegyület éri el a legmagasabb koncentrációkat 230 °C-on 15 percig sütve 221,5 ng/g koncentrációt mértünk, ami a legmagasabb a minták közül.

Az adatok egyértelműen mutatják, hogy a HCA-koncentrációk jelentősen növekednek a grillezési hőmérséklet emelkedésével. Például a PhIP esetében a koncentráció 15 perc után 230 °C-on elérte a kéregmintában a 521 ng/g értéket, míg ugyanezen grillezési idő alatt 190 °C-on csak 164 ng/g volt. Ez háromszoros növekedést jelent a hőmérséklet emelkedése miatt. A grillezési idő szintén erősen befolyásolja a HCA-k képződését. A hosszabb idő alatt a termikus reakciók intenzívebbek, így nagyobb koncentrációkat eredményeznek. A MeIQx például 230 °C-on 5 perc után a kéregmintában 70,9 ng/g volt, míg 15 perc után ez az érték 213,4 ng/g-ra emelkedett.

Az IQ koncentrációja alacsonyabb volt a többi vegyülethez képest, és főként a magasabb hőmérsékletű és hosszabb ideig grillezett mintákban jelent meg. Például a 15 percig, 230 °C-on hőkezelt kéregmintában 4,1 ng/g értéket mértünk. A MeIQ koncentrációja szintén viszonylag alacsony volt, de növekedést mutatott a grillezési hőmérséklet és idő függvényében. Ugyanezen mintában 71,6 ng/g volt a legmagasabb MeIQ érték. A MeIQx vegyület azonban jelentős koncentrációban jelent meg, különösen a magasabb hőmérsékletű mintákban. A 230 °C-on 15 percig hőkezelt kéregmintában elérte a 174,6 ng/g koncentrációt, ami kiemelkedő értéknek számít. 4,8-DiMeIQx a grillezési hőmérséklet növekedésével szignifikánsan emelkedett. A legmagasabb értéket ugyanezen mintában (44,2 ng/g) mértük. A PhIP volt a legnagyobb mennyiségben előforduló vegyület, különösen a hosszabb grillezési idő és magasabb hőmérséklet esetén. Ugyanezen kéregmintában (230 °C, 15 perc) mért 221 ng/g érték kiemelkedően magas.

5.2.2. Termikus heterociklikus aminok bőrös mintákban

A bőrös mintákon mért termikus HCA-k (IQ, MeIQ, MeIQx, 4,8-DiMeIQx, PhIP) koncentrációit az 1. melléklet 4. táblázata tartalmazza részletesen, ugyanezen mérési eredmények grillezési paraméterenkénti összefoglalását pedig a 13. ábra mutatja be.



Ábra 13: Bőrös kacsamellminták termikus HCA tartalma ng/g-ban

Először ugyanúgy megvizsgálva a legrákkeltőbbet, az IQ-t láthatjuk, hogy jól érvényesül a bőr védő hatása. Bőrrel fedett átlagmintákban először mérhető koncentrációt 2,2 ng/g-ot csak 230 °C-on 15 perces hőkezelés után mutatott, míg bőr nélküli átlagmintában 1,4 ng/g koncentrációhoz már ugyanezen a hőmérsékleten már 5 perc is elegendő volt. Érdekesség, hogy bőrrel fedett kéreg mintákban nincs nagy különbség adott hőmérsékleten a mért koncentrációk között. Például bőrrel fedett kéregmintában 230 °C-on sütve 15 percig 4,1 ng/g koncentrációt mértünk, pontosan ugyan annyit, mint ugyan ezen paraméterekkel bőr

nélküli kéregmintában. Továbbá bőrrel fedett kéregmintákban már az IQ koncentráció 150 °C-on 10 perc hőkezelés után mérhető volt, míg bőr nélküli kéregmintákban csak 190 °C-os 10 perces hőkezelés után volt mérhető. Ennek az oka is valószínűleg a kacsabőr zsírtartalma lehet, így kacsza grillezésnél az a legbiztonságosabb IQ szempontjából, ha eltávolítjuk sütés előtt a bőrt.

A mérések egyértelműen mutatják, hogy a HCA-koncentrációk a grillezési hőmérséklet emelkedésével szignifikánsan növekedtek a bőrös esetben is. A legnagyobb különbség a PhIP esetében figyelhető meg: 150 °C-on 15 perc után a bőrmintában a koncentráció csak 18,6 ng/g, míg 230 °C-on 15 perc után ez az érték 65,5 ng/g. Ez több mint 4-szeres növekedést jelent. Hasonló növekedés figyelhető meg a kéregminták esetében is.

Az idő szintén jelentős hatást gyakorolt a HCA-koncentrációk alakulására. A hosszabb sütési idő nagyobb koncentrációkat eredményezett, mivel több idő állt rendelkezésre a termikus reakciók lejátszódásához. Például bőrmintában a MeIQx koncentrációja 190 °C-on 5 perc alatt 16,0 ng/g, míg 15 perc alatt 75,4 ng/g, ami közel ötszörös növekedést jelent.

Az IQ koncentrációja alacsony maradt a többi vegyülethez képest, és csak magasabb hőmérsékleten, hosszabb grillezési idő alatt vált kimutathatóvá (pl. bőr mintában 15 perc-ig 230 °C-on: 4,5 ng/g).

A MeIQ koncentrációi szintén alacsonyak, de növekedést mutatnak a hőmérséklet és idő függvényében. A legmagasabb értéket a 230 °C-on 15 percig hőkezelt bőrmintában mérték, amely 71,6 ng/g volt.

A MeIQx koncentrációja jelentős növekedést mutatott a grillezési paraméterek függvényében. A legmagasabb értéket ugyenezen mintában regisztráltuk, 268,8 ng/g-mal, amely a legmagasabb érték az összes HCA között.

MeIQ, MeIQx, 4,8-DiMeIQx esetében bőrrel fedett átlag és kéregminták esetében nagyjából hasonló koncentrációkat kaptunk, mint a bőrrel nélküli kéregminták esetében például 230 °C-on 10 perces sütést követően MeIQ- ban 54,7 ng/g MeIQx-ban 143,9 ng/g, 4,8-DiMeIQx-ban pedig 36,3 ng/g koncentrációkat mértünk, míg bőrrel nem fedett mintákban MeIQ- ban 54,2 ng/g, MeIQx-ban 145,3 ng/g, 4,8-DiMeIQx-ban 38,9 ng/g koncentrációkat melyek látszódnak, hogy nagyjából megegyeznek. Ugyanez igaz bőr mintákra is, így ezen

vegyületek keletkezésénél nem tölt be védő szerepet a bőr, tehát ha ebben sütjük, érdekesebb utána nem elfogyasztani.

PhIP esetében kéreg és bőr mintákra ugyanez a tendencia figyelhető meg, azonban átlagminták esetében bőrrel fedett minták esetében magasabb koncentrációt mértünk. Ennek az okát nem volt lehetőségem részletesen kutatni, feltételezhető, hogy a kacsabőr valamely komponense a PhIP képződését segítette.

6. Következtetések

A vizsgálatok során részletesen elemeztük a különböző grillezési paraméterek hatását a kacsamell heterociklikus amin (HCA) tartalmára. Az eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a hőmérséklet és a sütési idő növekedése szignifikáns hatással van a HCA-képződés mértékére. A legnagyobb HCA-koncentrációkat 230 °C-on, 15 perces grillezési idő után mértük, különösen a kéregminták esetében.

A pirolitikus HCA-k közül a harman és az A α C voltak a legnagyobb koncentrációban jelen, míg a norharman és a Trp-P-1 koncentrációja alacsonyabb maradt. A termikus HCA-k közül a PhIP emelkedett ki, amely a legmagasabb koncentrációkat érte el, különösen a kéregmintákban. Az IQ, amely a vizsgált vegyületek közül a leginkább rákkeltő, csak magasabb hőmérsékleten és hosszabb sütési idő után vált kimutathatóvá. Ezek az eredmények összhangban állnak a korábbi irodalmi adatokkal, pl. Skog és munkatársai által végzett kutatás [12] vagy Cross és Sinha kutatásai [38], amelyek szerint a grillezés intenzitása és időtartama kulcsfontosságú a HCA-képződés szempontjából.

Az adatokból az is kiderült, hogy a bőr jelenléte jelentősen befolyásolja a HCA-képződést. A bőr védőrétege mérsékli a közvetlen hőhatást, így a bőrös mintákban alacsonyabb HCA-koncentrációkat mértünk. Érdekes azonban, hogy egyes vegyületek, például az A α C, a bőr jelenlétében magasabb koncentrációban képződtek, ami valószínűleg a bőralatti zsír összetételével és a hőátadás sajátosságaival magyarázható.

Az eredmények rámutatnak arra, hogy a grillezési paraméterek finomhangolásával jelentősen csökkenthető a HCA-képződés. Alacsonyabb hőmérsékleten és rövidebb idő alatt végzett grillezés, valamint a kéreg eltávolítása hozzájárulhat a HCA-tartalom mérsékléséhez. Azonban továbbra is figyelni kell a megfelelő hőkezelésre, mert csak így redukálhatóak megfelelően a káros mikrobák száma, mint pl. salmonella helicobacter, E-coli stb. Tehát fontos, hogy ne süssük túl a húst, de ennek ellenére legyen megfelelően hőkezelve. Továbbá a bőr jelenléte kacsahús esetében kedvezően befolyásolja a HCA-képződést [7].

A jövőbeli kutatások során érdemes lenne részletesebben vizsgálni a bőr és a zsír összetételének szerepét a HCA-képződésben. Emellett a különböző pácolási módszerek és antioxidánsok hatékonyságának feltérképezése is fontos lenne, hogy még hatékonyabb módokat találjunk a HCA-képződés minimalizálására. Továbbá, a különböző húsfajták

közötti eltérések mélyebb megértése hozzájárulhat a grillezési eljárások optimalizálásához és az egészségesebb ételkészítési gyakorlatok elterjesztéséhez.

Az eredmények gyakorlati jelentőséggel bírnak az élelmiszerbiztonság és az egészségmegőrzés szempontjából, és hozzájárulnak a grillezett húsok HCA-tartalmának csökkentéséhez irányuló törekvésekhez.

7. Összefoglalás

Méréseink célja az volt, hogy megvizsgáljuk a heterociklikus aminok (HCA-k) képződését kacsamell mintákon különböző grillezési körülmények között. A HCA-k két fő kategória szerint vizsgáltuk termikus HCA-k, amelyek az aminosavak, cukrok és kreatin közötti kémiai reakciók eredményeként keletkeznek, valamint pirolitikus HCA-k, amelyek a fehérjék hőbontása során alakulnak ki. A vizsgált HCA-k közé tartoztak a következők: IQ, MeIQx, 4,8-diMeIQx PhIP(termikus HCA-k), valamint harman és norharman AαC, Trp-P-1 (pirolitikus HCA-k). Ezen vegyületek vizsgálata azért kiemelten fontos, mert rákkeltő tulajdonságuk tudományosan bizonyított, és hőkezelés során való képződésük jelentős egészségügyi kockázatot jelenthet.

Az irodalomkutatás során áttekintettük a HCA-k keletkezését befolyásoló tényezőket és a grillezési technológiák szerepét. Az eddigi kutatások rámutattak arra, hogy a HCA-k képződése nagymértékben függ a hőmérséklettől, a sütési időtől és a hús típusától. A bőr jelenléte, a pácolás, valamint a grillezés módja szintén jelentős hatással van a HCA-koncentrációk alakulására. A vizsgálatok kiemelték, hogy a kéreg- vagy égett részekben a HCA-k koncentrációja sokszorososa lehet a belső részekhez képest. Az irodalom áttekintése alapján megerősítést nyert, hogy a termikus és pirolitikus HCA-k keletkezésének mechanizmusa eltérő, ami fontos szempont a mérési eredmények értelmezésekor.

A mérések során a kacsamell mintákat különböző grillezési hőmérsékleten (150 °C, 190 °C, 230 °C) és időtartamokkal (5, 10, 15 perc) kezeltük. A minták előkészítése során külön elemeztük a bőrös és bőr nélküli mintákat, valamint a kéreg- és belső részeket. A HCA-k detektálására és mennyiségi meghatározására LC-MS/MS (folyadékkromatográfia-tömegspektrometria) technológiát alkalmaztunk. Ez a módszer nagy érzékenysége miatt lehetővé tette a HCA-k pontos azonosítását és koncentrációjuk meghatározását. A mintaelőkészítés során SPE (szilárd fázisú extrakció) oszlopokat használtunk, amelyeken keresztül a HCA-kat elválasztottuk és dúsítottuk. Az LC-MS/MS berendezés paramétereit úgy optimalizáltuk, hogy minden vizsgált HCA egyértelműen detektálható legyen. Az adatok elemzéséhez LabSolutions® szoftvert használtunk, amely biztosította az eredmények pontosságát és reprodukálhatóságát.

Az eredmények szerint a HCA-k koncentrációja jelentősen nőtt a grillezési hőmérséklet és idő növekedésével. A pirolitikus HCA-k, különösen a harman és a norharman, magasabb

koncentrációban voltak jelen a kéregmintákban, mint a belső részekben. A termikus HCA-k közül a PhIP mutatta a legnagyobb koncentrációt, különösen a 230 °C-on, 15 percig grillezett minták esetében. Ezzel szemben az IQ, amely az egyik leginkább rákkeltő heterociklikus amin, csak néhány mintában volt jelen, és koncentrációja jellemzően alacsonyabb volt, mint a többi HCA-é. Ez összhangban áll a szakirodalommal, amely szerint az IQ főként magas hőmérsékleten és intenzív hőkezelési körülmények között képződik, azonban jelenléte nem minden minta esetében kimutatható. Érdekes megfigyelés volt, hogy a bőr jelenléte mérsékelte a HCA-képződést, mivel a bőr hőszigetelő tulajdonságai csökkentették a hús belső részének hőterhelését. Ugyanakkor a bőr közvetlen hőhatásnak kitett külső részeiben egyes HCA-k, például az IQ és az AαC, koncentrációja emelkedett. Ez arra utal, hogy a bőr egyfajta védőréteget képezhet a belső részek számára, miközben a külső részekben elősegíti a HCA-képződést.

Összességében a kutatás eredményei megerősítik, hogy a grillezési paraméterek finomhangolásával jelentősen csökkenthető a HCA-k képződése, ami hozzájárulhat a grillezett húsok fogyasztásával járó egészségügyi kockázatok mérsékléséhez. A mérések során alkalmazott LC-MS/MS technológia megbízható és precíz eszköznek bizonyult a HCA-k vizsgálatában, ami lehetővé teszi a grillezési eljárások további fejlesztését. A jövőbeli kutatások során érdemes lenne további húsfajták és különböző pácolási módszerek hatását is részletesebben elemezni.

8. Köszönetnyilvánítás

Végül de nem utolsó sorban szeretném kifejezni köszönetemet témavezetőimnek Dr. Lányi Katalin tudományos főmunkatársnak és Dr. Pleva Dánielnek, hogy lehetőséget biztosítottak számomra e téma kutatására, valamint a támogatásukért, szakmai iránymutatásukért és türelmükért, amelyet a kutatás során tanúsítottak. Külön köszönet illeti az Élelmiszer-higiéniai Tanszék munkatársait, akik hozzájárultak a tanulmány létrejöttéhez azáltal, hogy rendelkezésemre bocsátották a szaktudásukat és laboratóriumokat és a szükséges eszközöket.

9. Irodalomjegyzék

1. Aaslyng, M. D., Duedahl-Olesen, L., Jensen, K., & Meinert, L. (2013). Content of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in pork, beef, and chicken barbecued at home by Danish consumers. *Meat Science*, 93(1), 85-91.
2. Chen, B. H., & Lin, Y. S. (1997). Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons during processing of duck meat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45, 1394–1403.
3. Debreczeni, D. (2019). A pácolás hatása a rákkeltő heterociklikus aminok keletkezésére baromfihúsban. TDK dolgozat, Állatorvostudományi Egyetem, Budapest.
4. Felton, J. S., Malfatti, M. A., Knize, M. G., Salmon, C. P., Hopmans, E. C., & Wu, R. W. (1997). Health risks of heterocyclic amines. *Mutation Research*, 376, 37-41.
5. Knize, M. G., & Felton, J. S. (2004). *Formation and Human Risk of Carcinogenic Heterocyclic Amines Formed from Natural Precursors in Meat*. Nutrition Reviews, UCRL-JRNL-208240. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory.
6. Meurillon, M., & Engel, E. (2016). Mitigation strategies to reduce the impact of heterocyclic amines and other hazardous compounds in cooked meat. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 70-84.
7. Pleva, D. (2020). Az otthoni sütési-főzési eljárások hatása a baromfihúsok kémiai és mikrobiológiai biztonságára, valamint minőségi jellemzőire. PhD értekezés, Állatorvostudományi Egyetem, Budapest.
8. Polak, T., Došler, D., Žlender, B., & Gašperlin, L. (2009). Heterocyclic amines in aged and thermally treated pork longissimus dorsi muscle of normal and PSE quality. *LWT - Food Science and Technology*, 42(2), 504-513.
9. Rahman, U. U., Sahar, A., Khan, M. I., & Nadeem, M. (2014). Production of heterocyclic aromatic amines in meat: Chemistry, health risks and inhibition. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2), 229-233.

10. Salmon, C. P., Knize, M. G., & Felton, J. S. (1997). Effects of marinating on heterocyclic amine carcinogen formation in grilled chicken. *Food and Chemical Toxicology*, 35(5), 433-441.
11. Sinha, R., Knize, M. G., Salmon, C. P., Brown, E. D., Rhodes, D., & Felton, J. S. (1998). Heterocyclic amino content of pork products cooked by different methods and to varying degrees of doneness. *Food and Chemical Toxicology*, 36, 289-297.
12. Skog, K., Johansson, M. A., & Jägerstad, M. (1998). Influence of frying fat on the formation of heterocyclic amines in fried beefburgers and pan residues. *Food and Chemical Toxicology*, 33, 993-1004.
13. Chartrin, P., Bernadet, M. D., Guy, G., Mourot, J., Hocquette, J. F., & Larzul, C. (2003). Effects of intramuscular fat levels on sensory characteristics of duck breast meat. *Meat Science*, 64(1), 9-15.
14. Cortinas, L., Villaverde, C., Galobart, J., Baucells, M. D., Codony, R., & Barroeta, A. C. (2004). Fatty acid content in chicken thigh and breast as affected by dietary polyunsaturation level. *Poultry Science*, 83(7), 1155-1164.
15. Ioniță, L., Popescu-Micloșanu, E., Roibu, C., & Custură, I. (2010). Bibliographical study regarding the quails' meat quality in comparison to the chicken and duck meat. *Lucrări Științifice-Seria Zootehnie*, 56, 224-229.
16. Felton, J. S., Jägerstad, M., Knize, M. G., Skog, K., & Wakabayashi, K. (2000). Contents in foods, beverages and tobacco.
17. Dal Bosco, A., Cartoni Mancinelli, A., Vaudo, G., Cavallo, M., Castellini, C., & Mattioli, S. (2022). Indexing of fatty acids in poultry meat for its characterization in healthy human nutrition: a comprehensive application of the scientific literature and new proposals. *Nutrients*, 14(15), 3110.
18. Chartrin, P., Méteau, K., Juin, H., Bernadet, M.D., Guy, G., Larzul, C., Rémignon, H., Mourot, J., Duclos, M.J. and Baéza, E. (2006). Effects of intramuscular fat levels on sensory characteristics of duck breast meat. *Poultry Science*, 85(5), 914-922.
19. Adeola, O. (2006). Review of research in duck nutrient utilization. *International Journal of Poultry Science*, 5(3), 201-218.

20. Dal Bosco, A., Mugnai, C., Ruggeri, S., Mattioli, S., & Castellini, C. (2012). Fatty acid composition of meat and estimated indices of lipid metabolism in different poultry genotypes reared under organic system. *Poultry Science*, 91(8), 2039-2045.
21. Jägerstad, M., & Skog, K. (2005). Genotoxicity of heat-processed foods. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 574(1-2), 156-172.
22. Yang, X., Blecker, C., Liu, H., Zhang, D., & Wang, Z. (2023). Effect of plant polyphenols with different m-hydroxy and o-hydroxy groups on the inhibition of heterocyclic amines formation in roasted meat. *Food Control*, 153, 109960.
23. National Toxicology Program (NTP). (2002). Report on Carcinogens Background Document for Selected Heterocyclic Amines. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, National Toxicology Program. Retrieved from <https://ntp.niehs.nih.gov>
24. IARC (1993). *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Some Naturally Occurring Substances, Food Items and Constituents, Heterocyclic Aromatic Amines and Mycotoxins*. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer.
25. Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A. M., Fenelon, M., & Tiwari, B. (2021). Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods*, 10(9), 2340.
26. OECD-FAO (2020). OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029. https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook_19991142
27. Petrescu, D. C., Vermeir, I., & Petrescu-Mag, R. M. (2020). Consumer understanding of food quality, healthiness, and environmental impact: A cross-national perspective. *Food Quality and Preference*, 79, 103821.
28. Adzitey, Frederick (2012). Production potentials and the physicochemical composition of selected duck strains: a mini review.

29. Wild, C., Damme, K., Hartmann, J., & Brehme, G. (2019). Performance of current Peking duck breeds. *Lohmann Inform*, 53(2), 28-32.
30. Mateos, G. G., Jiménez-Moreno, E., Serrano, M. P., & Lázaro, R. P. (2012). Poultry response to high levels of dietary fiber sources varying in physical and chemical characteristics. *Poultry Science*, 91(3), 426-433.
31. Petrescu, D. C., Vermeir, I., & Petrescu-Mag, R. M. (2020). Consumer understanding of food quality, healthiness, and environmental impact: A cross-national perspective. *Food Quality and Preference*, 79, 103821.
32. Zamora, R., & Hidalgo, F. J. (2020). Formation of heterocyclic aromatic amines with the structure of aminoimidazoazarenes in food products. *Food Chemistry*, 313, 126128.
33. Wang, H., Chu, X., Du, P., et al. (2023). Unveiling heterocyclic aromatic amines in thermally processed meat products: Formation, toxicity, and strategies for reduction – A comprehensive review. *Food Chemistry: X*, 19, 100833.
34. Xu, Y., Huang, T., Huang, Y., & Huang, M. (2023). Effect of mulberry leaf (*Morus alba* L.) extract on the quality and formation of heterocyclic amines in braised muscovy duck. *Food Control*, 156, 110137.
35. Jamali, M. A., Wang, Z., Zhu, Y., & Zhang, Y. (2022). Novel water–oil mixed frying: Fried oil quality and the formation of heterocyclic amines and trans fatty acids in fried duck. *Foods*, 11(5), 626.
36. Oz, E., Aoudeh, E., Murkovic, M., Toldra, F., Gomez-Zavaglia, A., Brennan, C., Proestos, C., Zeng, M., & Oz, F. (2023). Heterocyclic aromatic amines in meat: Formation mechanisms, toxicological implications, occurrence, risk evaluation, and analytical methods. *Meat Science*, 205, 109312.
37. Zhao, T., Zhang, C., Ma, Y., & Wang, X. (2023). Effect of simultaneous application of antioxidants in oil and in chicken on heterocyclic aromatic amine formation in deep-fat fried chicken breast. *LWT - Food Science and Technology*, 187, 115287.
38. Cross, A. J., & Sinha, R. (2004). Meat-related mutagens/carcinogens in the etiology of colorectal cancer. *Environmental and molecular mutagenesis*, 44(1), 44-55.

39. Knize, M. G., Dolbeare, F. A., Carroll, K. L., Moore II, D. H., & Felton, J. S. (1994). Effect of cooking time and temperature on the heterocyclic amine content of fried beef patties. *Food and Chemical Toxicology*, 32(7), 595-603.

1. Melléklet

Táblázat 1: Bőr nélküli kacsamellminták pirolitikus HCA tartalma ng/g-ban

Minta típusa	Idő (perc)	Hőm. (°C)	harman			norharman			AαC			Trp-P-1		
átlag	5	150	4,3	±	0,05	n.q.	±	n.a.	19,2	±	0,66	n.q.	±	n.a.
átlag	10	150	8,6	±	0,13	n.q.	±	n.a.	24,6	±	0,57	n.q.	±	n.a.
átlag	15	150	14,6	±	0,55	n.q.	±	n.a.	26,4	±	0,38	13,7	±	0,39
átlag	5	190	11,2	±	0,09	n.q.	±	n.a.	31,2	±	0,86	16,8	±	0,47
átlag	10	190	16,7	±	0,37	n.q.	±	n.a.	39,9	±	0,58	26,6	±	0,61
átlag	15	190	26,7	±	1,03	24,0	±	0,72	66,7	±	1,80	39,7	±	1,22
átlag	5	230	14,8	±	0,48	7,4	±	0,18	43,2	±	1,15	24,0	±	0,72
átlag	10	230	34,9	±	0,75	19,5	±	0,53	50,7	±	0,73	39,7	±	1,09
átlag	15	230	53,7	±	0,81	25,6	±	0,38	79,1	±	1,57	44,1	±	0,73
kéreg	5	150	24,2	±	0,48	n.q.	±	n.a.	31,3	±	0,54	n.q.	±	n.a.
kéreg	10	150	44,0	±	1,05	n.q.	±	n.a.	50,8	±	1,39	14,4	±	0,47
kéreg	15	150	66,3	±	1,40	33,5	±	1,02	83,6	±	1,81	31,2	±	0,37
kéreg	5	190	29,1	±	0,69	n.q.	±	n.a.	39,1	±	1,12	25,7	±	0,35
kéreg	10	190	52,7	±	0,92	20,1	±	0,18	61,2	±	2,20	31,6	±	0,75
kéreg	15	190	95,9	±	1,00	48,9	±	1,14	109,2	±	2,30	42,7	±	0,98
kéreg	5	230	36,5	±	0,70	25,0	±	0,24	50,5	±	1,19	44,4	±	1,21
kéreg	10	230	74,3	±	1,04	51,4	±	1,06	95,5	±	2,22	73,6	±	1,81
kéreg	15	230	158,0	±	5,14	55,0	±	1,18	164,0	±	6,70	94,0	±	2,06

Táblázat 2: Bőrös kacsamellminták pirolitikus HCA tartalma ng/g-ban

Minta típusa	Idő (perc)	Hőm. (°C)	harman			norharman			AαC			Trp-P-1		
átlag	5	150	7,5	±	0,15	n.q.	±	n.a.	29,3	±	0,55	14,8	±	0,46
átlag	10	150	11,6	±	0,21	n.q.	±	n.a.	35,1	±	0,97	15,1	±	0,49
átlag	15	150	19,2	±	0,25	n.q.	±	n.a.	47,8	±	1,49	17,8	±	0,69
átlag	5	190	12,7	±	0,30	n.q.	±	n.a.	37,8	±	0,66	19,0	±	0,66
átlag	10	190	17,7	±	0,53	n.q.	±	n.a.	49,9	±	1,24	20,0	±	0,57
átlag	15	190	34,9	±	0,63	n.q.	±	n.a.	71,3	±	2,34	27,1	±	0,33
átlag	5	230	16,9	±	0,46	n.q.	±	n.a.	40,4	±	0,66	29,9	±	1,07
átlag	10	230	35,9	±	0,69	n.q.	±	n.a.	68,9	±	2,32	39,1	±	0,92
átlag	15	230	58,2	±	0,63	n.q.	±	n.a.	84,3	±	1,97	50,3	±	1,91
kéreg	5	150	14,0	±	0,38	n.q.	±	n.a.	41,0	±	0,45	13,5	±	0,25
kéreg	10	150	19,9	±	0,52	n.q.	±	n.a.	69,7	±	1,05	17,9	±	0,29
kéreg	15	150	25,8	±	0,57	n.q.	±	n.a.	112,0	±	2,12	19,2	±	0,41
kéreg	5	190	18,5	±	0,31	28,8	±	0,49	63,7	±	1,58	16,1	±	0,58
kéreg	10	190	26,7	±	0,49	33,8	±	0,66	106,4	±	2,68	20,8	±	0,57
kéreg	15	190	42,0	±	0,92	41,2	±	0,88	189,0	±	3,12	27,8	±	0,74
kéreg	5	230	22,0	±	0,40	33,6	±	0,64	82,9	±	2,65	31,1	±	0,55
kéreg	10	230	46,4	±	0,72	66,4	±	0,91	120,7	±	3,39	40,7	±	0,44
kéreg	15	230	67,9	±	0,98	71,6	±	1,23	195,3	±	5,98	57,4	±	1,11
bőr	5	150	6,7	±	0,24	n.q.	±	n.a.	12,3	±	0,19	11,4	±	0,39
bőr	10	150	8,6	±	0,17	n.q.	±	n.a.	15,9	±	0,44	12,9	±	0,48
bőr	15	150	15,9	±	0,19	n.q.	±	n.a.	23,8	±	0,62	13,8	±	0,29
bőr	5	190	15,1	±	0,48	n.q.	±	n.a.	16,3	±	0,37	15,4	±	0,22
bőr	10	190	18,8	±	0,22	n.q.	±	n.a.	24,9	±	0,80	20,1	±	0,71
bőr	15	190	25,1	±	0,71	n.q.	±	n.a.	35,7	±	0,93	25,5	±	0,64
bőr	5	230	27,7	±	0,53	n.q.	±	n.a.	38,3	±	1,08	20,8	±	0,59
bőr	10	230	42,3	±	0,56	n.q.	±	n.a.	48,9	±	0,71	27,0	±	0,55
bőr	15	230	65,0	±	1,15	n.q.	±	n.a.	59,8	±	1,02	30,4	±	0,89

Táblázat 3: Bőr nélküli kacsamellminták termikus HCA tartalma ng/g-ban

Minta típusa	Idő (perc)	Hőm. (°C)	IQ			MeIQ			MeIQx			4,8-diMeIQx			PhIP		
átlag	5	150	n.d.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.
átlag	10	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	9,0	±	0,21
átlag	15	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	17,6	±	0,55	10,6	±	0,31	11,4	±	0,22
átlag	5	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	11,0	±	0,21
átlag	10	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	31,0	±	1,04	9,8	±	0,29	16,7	±	0,46
átlag	15	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	61,0	±	1,69	23,6	±	0,63	52,5	±	1,33
átlag	5	230	1,4	±	0,02	11,8	±	0,39	n.q.	±	n.a.	8,8	±	0,22	15,9	±	0,40
átlag	10	230	1,7	±	0,04	17,1	±	0,55	51,4	±	1,48	15,7	±	0,42	32,4	±	0,51
átlag	15	230	1,9	±	0,07	19,7	±	0,68	83,2	±	2,55	30,6	±	1,20	66,9	±	2,18
kéreg	5	150	n.d.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.
kéreg	10	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	11,3	±	0,33
kéreg	15	150	n.q.	±	n.a.	23,5	±	0,76	72,4	±	2,43	22,3	±	0,64	38,0	±	1,10
kéreg	5	190	n.q.	±	n.a.	9,5	±	0,23	21,6	±	0,74	9,8	±	0,30	14,8	±	0,35
kéreg	10	190	2,1	±	0,06	13,1	±	0,32	41,0	±	0,72	12,4	±	0,32	24,8	±	0,72
kéreg	15	190	2,9	±	0,07	33,2	±	0,46	97,8	±	2,61	33,9	±	0,84	74,6	±	0,88
kéreg	5	230	1,5	±	0,03	17,9	±	0,51	33,2	±	1,02	11,8	±	0,37	49,5	±	1,26
kéreg	10	230	3,7	±	0,12	54,2	±	0,88	145,3	±	4,00	38,9	±	0,69	147,2	±	2,94
kéreg	15	230	4,1	±	0,10	68,9	±	1,10	174,6	±	3,51	44,2	±	0,55	221,5	±	3,07

Táblázat 4: Bőrös kacsamellminták termikus HCA tartalma ng/g-ban

Minta típusa	Idő (perc)	Hőm. (°C)	IQ			MeIQ			MeIQx			4,8-diMeIQx			PhIP		
átlag	5	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	6,4	±	0,09	n.q.	±	n.a.
átlag	10	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	22,3	±	0,66	9,0	±	0,26	12,8	±	0,33
átlag	15	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	32,9	±	1,03	12,4	±	0,28	14,7	±	0,28
átlag	5	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	9,5	±	0,30	11,8	±	0,17
átlag	10	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	33,7	±	1,11	11,5	±	0,23	13,3	±	0,43
átlag	15	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	69,4	±	2,34	16,3	±	0,61	19,9	±	0,52
átlag	5	230	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	31,9	±	1,01	12,9	±	0,49	18,3	±	0,23
átlag	10	230	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	58,3	±	1,59	17,2	±	0,49	25,2	±	0,69
átlag	15	230	2,2	±	0,03	25,1	±	0,52	146,6	±	1,77	44,7	±	1,41	93,6	±	2,13
kéreg	5	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	7,2	±	0,24	15,8	±	0,50
kéreg	10	150	1,4	±	0,04	11,4	±	0,49	38,3	±	1,07	9,8	±	0,27	23,1	±	0,74
kéreg	15	150	1,6	±	0,03	19,1	±	0,24	48,6	±	1,45	20,3	±	0,63	46,8	±	1,35
kéreg	5	190	1,7	±	0,04	n.q.	±	n.a.	25,6	±	0,78	8,1	±	0,27	16,3	±	0,49
kéreg	10	190	2,2	±	0,07	19,2	±	1,01	72,1	±	1,58	17,4	±	0,42	52,7	±	1,15
kéreg	15	190	2,6	±	0,05	34,3	±	0,39	123,6	±	2,37	29,4	±	1,00	97,3	±	1,07
kéreg	5	230	2,4	±	0,06	28,8	±	0,93	70,9	±	1,10	18,0	±	0,29	75,1	±	0,85
kéreg	10	230	3,7	±	0,07	54,7	±	1,03	143,9	±	2,21	36,3	±	0,78	166,8	±	2,75
kéreg	15	230	4,1	±	0,05	108,1	±	1,34	155,7	±	1,86	44,0	±	0,97	193,2	±	2,47
bőr	5	150	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	15,6	±	0,47	6,3	±	0,17	n.q.	±	n.a.
bőr	10	150	n.q.	±	n.a.	8,5	±	0,19	19,8	±	0,56	8,7	±	0,20	10,3	±	0,32
bőr	15	150	1,5	±	0,04	16,9	±	0,40	51,0	±	1,26	13,0	±	0,34	18,6	±	0,52
bőr	5	190	n.q.	±	n.a.	n.q.	±	n.a.	16,0	±	0,48	7,4	±	0,22	4,7	±	0,09
bőr	10	190	n.q.	±	n.a.	12,8	±	0,28	39,2	±	0,88	9,8	±	0,25	12,5	±	0,39
bőr	15	190	2,0	±	0,06	23,5	±	0,64	75,4	±	1,78	17,4	±	0,55	21,1	±	0,39
bőr	5	230	1,5	±	0,03	19,1	±	0,41	81,3	±	2,08	12,6	±	0,36	15,3	±	0,42
bőr	10	230	4,1	±	0,08	34,1	±	1,49	213,4	±	3,37	29,4	±	0,30	56,4	±	0,56
bőr	15	230	4,5	±	0,06	71,6	±	1,93	268,8	±	4,36	43,5	±	1,18	65,5	±	1,07