

Agraarteadus
1 * XXV * 2014 : 39–47



Journal of Agricultural Science
1 * XXV * 2014 : 39–47

LIHA OKSÜDATSIOONI MEHHAANISMID NING MÕJU TOODETE OHUTUSELE JA KVALITEEDILE

MEAT OXIDATION – MECHANISMS AND INFLUENCE ON QUALITY AND SAFETY OF MEAT PRODUCTS

Tõnu Püssa

Eesti Maaülikool, Veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituut, toiduhügieeni osakond
F.R. Kreutzwaldi 58A, 51014 Tartu

Saabunud: 10.06.2014
Received:
Aktsepteeritud: 19.06.2014
Accepted:
Avaldatud veebis: 20.06.2014
Published online:
Vastutav autor: Tõnu Püssa
Corresponding author:
e-mail: pyssa@emu.ee

ABSTRACT. Meat is a foodstuff liable to (per)oxidation by different mechanisms including free radical and enzyme-catalyzed processes. Meat oxidation starts with lipids and heme and continues also with proteins. Oxidation that produces different undesirable chemical substances, such as leukotoxin diols, aldehydes, carbonylated amino acids, has significant influence on various quality and safety parameters of meat. Meat oxidation is favored by shortage of antioxidants in feed, high content of PUFAs and high comminution rate of meat, heat and light during processing, high pressure processing etc. Meat oxidation can be reduced by antioxidant supplements in feed and during processing, low temperatures, special packagings *etc.*

Keywords: meat, (per)oxidation, mechanisms, products, quality and safety, prevention

Link: http://agrt.emu.ee/pdf/2014_1_pyssa.pdf

© 2014 Akadeemiline Põllumajanduse Selts. Kõik õigused kaitstud. 2014 Estonian Academic Agricultural Society. All rights reserved.

Sissejuhatus

Liha on väga keeruline ja pidevalt muutuv erinevate kõrg- ja madalmolekulaarsete ainete süsteem, mis on kuni termilise töötluseni teatud mõttes veel "elus". Seetõttu toimuvad säilitamisel ja töötlemisel lihas mitmesugused (bio)keemilised reaktsioonid, millest paljud mõjuvad negatiivselt liha kvaliteedile ja ohutusele. Üks selliseid protsesse on (per)oksüdatsioon. Liha kalduvus oksüdatsioonile pannakse osaliselt paika juba looma aretamisel ja kasvatamisel, selle realiseerumise ulatus aga liha töötlemisel ja säilitamisel. Kuumtöötlemine, mis vabastab valkudega seondunud rauaioonid, aktiveerib heemvalgud, lagundab raku membraansüsteemid ja inaktiveerib ensüümid, kiirendab oksüdatsiooni veelgi. Oksüdatsiooni soodustab ka lihale lisatav keedusool, mis toimib raua pro-oksüdatiivse aktiivsuse suurendajana (Botsoglou *et al.*, 2013).

Mis on oksüdatsioon?

Oksüdatsioon on laias mõistes keemiline protsess, mille käigus ühelt keemiliselt osakeselt (näiteks molekulilt) võetakse elektrone, mis ühinevad teise osakesega, kusjuures esimene osake oksüdeerub ning teine redutseerub ehk taandub. Tuntud tugev oksüdeerija ehk elektronide aktseptor on molekulaarne hapnik (O_2), aga veel tugevamad on hapniku alusel toimivad osoon (O_3), vesinikperoksiid (H_2O_2) ja teised peroksiidid, lämmastikhape, väävelhape, hüpokloriidid ja permanganaadid, samuti mitmesugused vabad radikaalid ehk molekularsed osakesed, millel ühel või mitmel aatomil on üksik paardumata spinn-kvantarvuga elektron, mis otsib endale paarilist.

Vabaradikaalsele oksüdatsioonile on iseloomulikud ahelreaktsioonid. Elusorganismides tekitatakse põhiliselt mitokondrites ja monotsüütides esmased radikaalid, eeskätt superoksiid anioon-radikaal ($\bullet O_2^-$), mis seejärel viiakse üle vesinikperoksiidiks (H_2O_2) ning hüdroksüülradikaalideks ($HO\bullet$). Tänu kõrgele reaktsioonivõimele eksisteerivad vabad radikaalid enamasti ülimaldalt

konsentratsioonides (10^{-4} kuni 10^{-9} M), osaledes, eriti hüdroksüülradikaal, järgmistes protsessides (Bekhit *et al.*, 2013):

1. Lipiidide, aminohapete, vitamiinide keemiline modifitseerimine, mis võib organismidel põhjustada tervisehäireid ning initsieerida ebasoovitavaid muutusi lihaskoes, mis omakorda võivad oluliselt langetada liha kvaliteedinäitajate, nagu värvi stabiilsus, lõhn, maitse, toiteväärtus, väärtusi (Kanner, 2007).

2. Uue vaba radikaali tekitamine, mis võib kahjustada DNA-d ning ahelreaktsiooni kaudu käivitada raku lipiidide (põhiliselt vabade küllastamata rasvhapete ja kolesterooli) ning valkude intensiivse oksüdatsiooni (Bekhit *et al.*, 2013).

Elusorganismide, sh loomade ja ka nende liha, korral on eriti levinud oksüdatsiooni bioloogiline vorm, ehk mingilt molekulilt vesiniku aatomi eemaldamine vaba radikaali poolt koos uue vaba radikaali tekkega. Kuna elame hapnikurikkas keskkonnas, siis on põhilisteks oksüdeerijateks just reaktsioonivõimelised hapnikuosakesed (*reactive oxygen species* – ROS), nagu hüdroksüülradikaal või superoksiidanioon, aga vaba radikaal võib olla ka reaktsioonivõimeline lämmastik-hapnik osake (RNOS), nagu näiteks lämmastikoksiid $\cdot\text{NO}$ või peroksünitrit ONOO^- .

Vabad radikaalid jagunevad organismi suhtes endogeenseteks ehk sisetekkelisteks ja eksogeenseteks ehk välistekkelisteks. Nende rakule ja organismile kahjulikeks mõjudeks on DNA molekuli kahjustamine ning vabade polüküllastamata rasvhapete (PUFA-de), kolesterooli ja valkude koosseisus olevate aminohapete oksüdatsioon, millega võib kaasneda mõningate ensüümide inaktiveerumine (Pham-Huy *et al.*, 2008).

Oksüdatsioon pole siiski vaid ebasoovitav protsess, tal on ensüümide kontrolli all oluline osa elusraku elutegevuse juhtimises rasvhapete primaarsete oksüdatsiooniproduktide ehk endogeensete oksülipiinide (OL) kaudu.

Kuni organism elab tasakaalustab erinevate oksüdantide toimet raku kaitsesüsteem, millesse kuuluvad nii mitmed ensüümid nagu katalaas ja superoksiidi dismutaas kui ka madalmolekulaarsed antioksidandid nagu näiteks askorbiinhape (vitamiin C), tokoferool (vitamiin E) ja glutatioon. Organismi kaitset on võimalik toetada toidu või söödaga manustatavate antioksidantidega (radikaalide neelajate, metalliioonide kelateerijate või oksüdatsiooniensüümide inhibiitoritega) nagu taimsed polüfenoolid, tokoferoolid või karoteenid või fermenteeritud liha- ja piimatoodetes sisalduvad antioksidantsed peptiidid.

Terve looma redokssüsteemid on tasakaalus ning tema vereplasmas on vähe oksüdatiivse stressi biomarkereid. Looma haigestumisel viiakse süsteem tasakaalust välja, looma tapmisel aga see kaitsesüsteem hävitatakse. Rakkude lagunemine algab looma surma hetkel ning on põhjustatud kahest protsessist – autolüüsist, mis lagundab kudesid organismi enda ensüümide ja teiste sisemiste ainete abil ning bakteriaalsest roiskumisest,

milles kudesid lagundavad bakteritest pärit ensüümid. Mõlemal juhul lõhutakse rakkude ja organellide membraanid ning mitokondritest väljuvad vabad radikaalid. Samas avaneb lihaskude aegamisi oksüdatsioonile. Lipaasid ja fosfolipaasid, mis eemaldavad liitlipiidist hüdrolüüsi teel vaba rasvhappe, ning lipoksügenaasid jt oksüdeerimist kiirendavad ensüümid väljuvad raku kontrolli alt. Rakkude lõhkumisel pääsevad ka oksüdeerimiseks vajalikud hapnik ning vabad radikaalid oksüdeeruvatele molekulidele paremini ligi.

Oksüdatsioon on üks olulisemaid toiduainete, eriti liha, töötlemisel ja säilitamisel toimuvaid kahjulikke protsesse, võibolla isegi teisel kohal pärast mikrobioloogilist saastumist. Kergesti oksüdeeruvateks molekulideks lihases on:

- heem, mis kuulub põhiliselt müoglobiini, aga ka mõne teise lihasevalgu koostisse;
- lipiidid, ennekõike vabad (polü)küllastamata rasvhapped ja kolesterool;
- valgud.

Eri tüüpi molekulide oksüdatsioon on lihase omavahel tihedalt seotud (Bekhit, 2013).

Estevez ja Kava (2004) hinnangul on oksüdatsiooni negatiivsed mõjud ja neid tekitavad oksüdatsiooni-produktid:

1. Mõjud liha kvaliteedile.

- Värvuse muutus, rasvade rääsumine ning sellega seoses ebameeldiv lõhn, veesidumisvõime alane mine – põhjustajateks rasvhapetest moodustuvad aldehüüdid, valkude karbonüülproduktid, hüdroperoksiidid ja sulfoksiidid, samuti valkude ristseondumine ja agregeerumine.

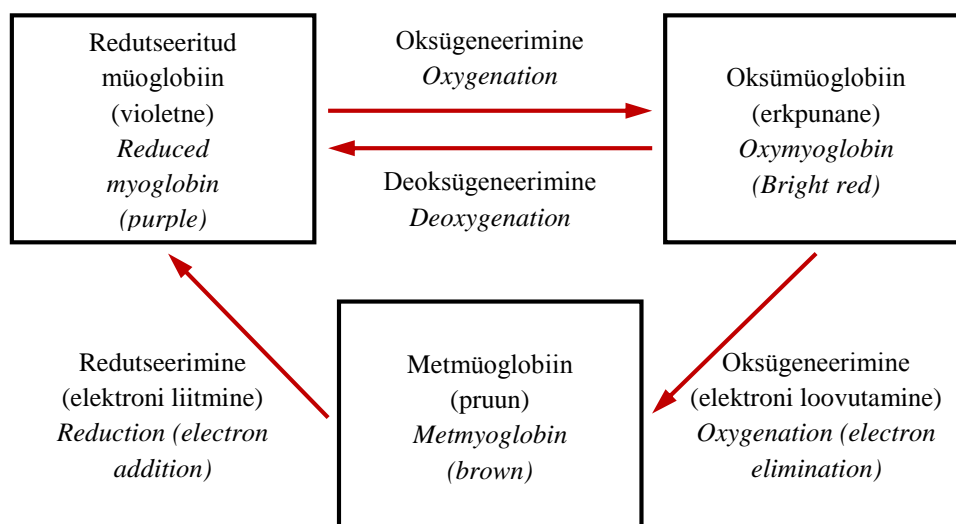
2. Mõjud liha tervislikkusele.

- Endokriinsete häirijate e hormoonsüsteemi tasakaalu rikkujate tekkimine – leukotoksiin-dioolid jt oksülipiinid.
- Mutageenide ja genotoksiliste ainete tekkimine – maloondialdehüüd (MDA).
- Normaalsete rakkude selektiivsete "tapjate" tekkimine – 4-hüdroksü-2-nonenaal (4-HNE).

Lipiidide oksüdeerumine alandab liha toiteväärtust ja sensoorseid omadusi; valkude oksüdatsioon aga muudab oluliselt nende funktsionaalseid omadusi ja ka liha tekstuuri.

Heemi oksügeneerimine ja oksüdeerimine

Lihase levinuim heemi sisaldav värviline valk, deoksmüoglobiin, muutub violetsest (müoglobiini hapnikuvaba deoksgeneeritud vorm) punaseks (oksmüoglobiini teke) hapniku liitumisel (oksgeneerumise) müoglobiini heemi rauale ning muutudes edasi rauaiooni oksüdeerumise ($\text{Fe}^{2+} - e^- \rightarrow \text{Fe}^{3+}$) tulemusena pruuniks metmüoglobiiniks (joonis 1). Nii muutub liha violetne pinnakiht viilutamise järel mõne millimeetri sügavuselt hapnikuga ühinemise tulemusena punaseks.



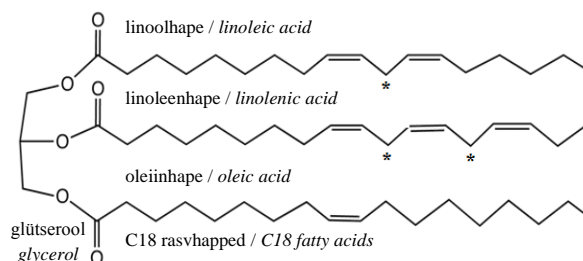
Joonis 1. Üleminekud müoglobiini eri vormide vahel
Figure 1. Transitions between different forms of myoglobin

Tekkiv punase ja pruuni ala piirpind nihkub pidevalt pinna väljapoole ning müoglobiini oksüdeerumise tõttu muutub seegi peagi pruuniks. Piirpinna saab uuesti punaseks muuta nitritiooni abil, millest tekivad NO radikaal tekitab heemiga liitumisel suhteliselt stabiilse punase nitrosomüoglobiini (MbNO) (Jacob *et al.*, 2014).

Müoglobiini oksüdatsioon põhjustab rauaioonide vabanemise heemist. Vabanenud Fe^{+++} ioonid on võimelised katalüüsima nii lipiidide (rasvhapete ja kolesterooli) kui ka valkude oksüdatsiooni lihas. Tekkivad ühendid võivad aga olla, kõrvuti rasvade N-nitroseerimisproduktidega, jämesoole vähi kõrgendatud riski allikaks. Laiaulatuslike metaanalüüside tulemused näitavad kõrgendatud vähiriski punase liha suurte koguste tarbijatel, mis võib olla tingitud liha oksüdeerumisest ebaõige töötlemise ja säilitamise käigus (Corpet, 2012). See väide vajab kindlasti põhjalikumalt uurimist.

Rasvhapete oksüdatsioon ehk rääsumine

Vabade rasvhapete oksüdatsioon ehk rääsumine, mis võib olla kas vabaradikaalne, ensüüm-katalüüsitud või mitteradikaalne mittekatalüüsitud (Niki, 2005), on üks põhilisi lihaga toimuvaid lagunemisprotsesse, mis põhjustab lihatoote lõhna, maitse, värvi ja tekstuurimuutumist ning tekitab raku- ja genotoksilisi ühendeid (Kanner, 2007). Selles protsessis tekitatud vabad radikaalid on võimelised oksüdeerima ka erinevaid vitamiine (A, E, C) ning seeläbi vähendama liha tervislikkust. Vabaradikaalselt oksüdeeruvad põhiliselt rasvade (polüküllastamata rasvhappelised osad (oleiinhape, linoolhape, linoleenhape) (joonis 2), mis on vastuvõtlikud mitokondrite ja mikrosoomide membraanide lagunemisel vabanenud radikaalide rünnakule, eriti kui rasvhapped on lipaaside ja fosfolipaaside kaasabil eelnevalt liitlipiididest eraldatud (joonis 2).



Joonis 2. Hüpotetiline triglütseriid kolme erineva 18 süsiniku aatomiga (C18) küllastamata rasvhapetega. Täpniga on märgitud metüleenrühmade ($-CH_2-$) süsinikuaatomid, mille küljest reaktsioonivõimeline radikaal võtab vesiniku aatomi, tekitades uue radikaali ning oksüdeerides selle rasvhappe.

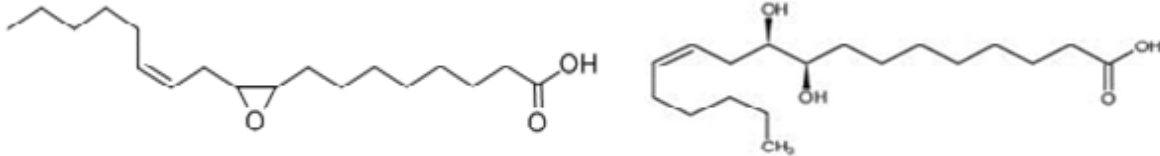
Figure 2. Hypothetic triglyceride containing three different unsaturated fatty acids with 18 carbon atoms (C18). Carbon atoms of methylenic $-CH_2-$ groups, wherefrom a radical is able to remove hydrogen atom, are marked with asterisk.

$C=C$ kaksiksidemed nõrgendavad naaber-C-H sidemeid ja delokaliseerivad vabu elektrone, mistõttu mingil radikaalil (näiteks $HO\cdot$) on vesiniku aatomit kaksiksidemete vahel asuva metüleenrühma küljest kerge eemaldada, initsieerides sel teel lipiidi oksüdatsiooni. Seejärel reageerib tekkinud uus radikaal molekulaarse hapnikuga, andes hüdroperoksiidradikaali, mis laguneb oksüdatsiooni sekundaarsete produktide, põhiliselt aldehüüdide ja ketoonide, tekkega (Min ja Ahn, 2005). Rasvhapete oksüdeerumise kiirus suureneb küllastamatuse astme (kaksiksidemete arvu) suurenedes. On hinnatud, et stearhappe (C18:0), oleiinhappe (C18:1), linoolhappe (C18:2) ning α -linoleenhappe (C18:3) oksüdatsiooni kiirused temperatuuril 25°C on suhtes 1:100:1200:2500 (Shahidi, 1992). Rasvhapete oksüdatsioonil tekkinud uued radikaalid ning mutageensed ja genotoksilised aldehüüdid nagu MDA põhjustavad ka liha valkude oksüdatsiooni (Kanner, 2007). Rääsunud rasvade suur sisaldus toidus võib põhjustada toidu kasutuse vähenemist, kõhulahtisust, kaalukadu ja juuste väljalangemist.

Vabade küllastamata rasvhapete oksüdatsioonil on kaks omavahel tihedalt seotud põhietappi:

1. etapp – oksülipiinide, kõigepealt peroksiidide, seejärel aga ensüümkatalüütiliselt hüdroperoksiidide, dieenide, epoksühapete, hüdroksühapete jne, teke.

Neid reaktsioone kiirendavad lipoksügenaasid (LOX), tsüklooksügenaasid (COX), aga ka tsütokroom P450 monoooksügenaasid (CYP450) (Niki *et al.*, 2005).



Joonis 3. Leukotoksiin (LTX) ja leukotoksiin-diool (LTXD)
Figure 3. Leukotoxin (LTX) and leukotoxin-diol (LTX-diol)

Oksülipiine leidub kõigis aeroobsetes organismides ning organismi suhtes jagatakse nad endogeenseteks ja eksogeenseteks. Endogeensed oksülipiinid, mis on rakus signaalide edasikandjad ehk sekundaarsed virgatsained, sünteesitakse rakkudes vabast polüküllastamata rasvhapetest (PUFA), enamasti linoolhapest (LA, 18:2n-6) ja arahidoonhapest (AA, 20:4n-6), mida ei säilitata tüüpiliselt kudedes, vaid vabastatakse vajaduse korral ensümaatilisel (fosfolipaasid jt) vastavast estrist. Vabade PUFA-de oksüdatiivne aktiveerimine toimub kas ensüümkatalüütilise või vabaradikaalse reaktsiooniga.

Problemaatilised eksogeensed oksülipiinid tekivad põhiliselt linoolhapest (LA – 18:2) ning jõuavad organismi toiduga, eeskätt rääsunud lihaga või ka taimeõlidega, millele pole lisatud antioksidante. Oksülipiinid liiguvad edukalt läbi biomembraanide, imendudes suhteliselt kergesti soolestikust ning jagunedes vereringe kaudu erinevatesse kudedesse ja rakkudesse. Imendunud OL molekulid võivad üle stimuleerida signaali ülekandeid Ca^{2+} -vahendatud valgu fosforüleerimiseks, mis võib viia rakkude vohamisele (kantseroogenes), kemotaksisele ja apoptoosile.

Oksülipiinide hulka kuuluvatel leukotoksiindioolidel (joonis 3) on täheldatud emaste rottide hormoon-süsteemi häirimise võimet (Markaverich *et al.*, 2007) ning mitogeenset aktiivsust koos inimese rinnavähi rakkude vohamise stimuleerimisega *in vitro* (Markaverich *et al.*, 2005). Samuti kahtlustatakse LTX-dioole tuntud tugevate keskkonnamürkide polüklooribifenüülid (PCB) poolt indutseeritud südame-veresoonkonna endoteeli funktsioneerimise häirimise võimendamises (Slim *et al.*, 2001) ning põletikueelsete tsütokiinide vabanemise suurendamises põletikulistes protsessides. LTX ja LTXD on võimelised oksüdatiivse stressi võimendamise kaudu hävitama T-rakke nekroosile ja apoptoosile sarnaste mehhanismide kaudu (Bosma-den Boer *et al.*, 2012).

Oksülipiinide sisaldust on uuritud kana, sea ja kalkuni mehhaaniliselt konditustatud lihas (*mechanically*

Selles etapis jääb polüküllastamata rasvhappe algne põhistruktuur (süsinikskelett koos karboksüülrühmaga) alles, lisatakse hapnikku sisaldavaid kõrvalrühmi (hüdroksüül-, epoksü- jt rühmad). Sel viisil tekivad ka toksilised leukotoksiinid (LTX), mille hüdrolüüsil epoksiidi hüdrolaasi juuresolekul tekivad tugevalt ja mitmekülgselt toksilised leukotoksiin-dioolid (LTXD) (joonis 3).

deboned meat – MDM) vedelikkromatograafiliselt mass-selektiivse detekteerimisega (LC-MS/MS). Rasvarikas peenestatud MDM oksüdeerub õhuhapniku ja raua ionide manulusel eriti kergesti. Teiste oksülipiinide hulgas identifitseeriti ja kvantiteeriti ka LTX-dioolid, mille kontsentratsioon oli vahemikus 20–50 ppm. Sellise MDM 100-grammise tarbimise korral keskmise inimese poolt ööpäevas on need numbrid ainult veidi madalamad kui LTX-dioolide madalaim täheldatud kahjuliku toimega doos (LOAEL) emastel rottidel (Püssa *et al.*, 2009). Seega võib MDM lisamine põhjustada oksülipiinide, sh leukotoksiin-dioolide sisalduse olulise tõusu lihatoodetes, kui MDM oksüdatsiooni ei pidurdata looduslike antioksidantide lisamisega juba MDM valmistamise ajal võimalikult madalal temperatuuril (Püssa *et al.*, 2008). LTX-dioolide ohutu ööpäevase tarbimise alampiir võib olla tegelikult veelgi madalam, sest, nagu pakendimürk bisfenool A-1 ja paljude kloororgaaniliste pestitsiidide jääkidel, lasub ka LTX-dioolidel endokriinsete häirijatena nn madala doosi mõjude ja mitte-monotoonse doos-mõju sõltuvuse kahtlus (Vandenberg *et al.*, 2012). Antud teema vajab kindlasti täiendavaid uuringuid.

2. etapp – oksülipiinide, ennekõike hüdroperoksiidide lagunemine.

Tekivad tugevasti toksilised sekundaarsed oksüdatsiooniproduktid nagu dialdehüüdid, esmajoones MDA, mis tekib kahe või enama kaksiksidemega küllastamata rasvhapete oksüdeerumisel ja 4-hüdroksü-2-nonenal, aga ka heksanaal ja 2-nonenal ning kolesterooli oksüdatsiooniproduktid ja lenduvad karbonüülühendid, alkoholid ja happed, mis põhjustavad rääsunud lihal iseloomulikke negatiivseid sensoorseid muutusi (*off-flavor*) (Utrera, 2013). Tekkivad aldehüüdid on riskifaktoriks mitmele tõsisele inimese haigusele. Näiteks on MDA mutageenne nii bakterite kui ka inimeste rakkudes, andes DNA molekuliga erinevaid adukte

(Bastide, 2011). Lisaks, kompleksi kaudu glutatiooni-ga, alandab MDA tunduvalt selle olulise kehaomase antioksidandi sisaldust rakkudes (Kanner, 2007). MDA-sisaldus, mida määratakse spektrofotomeetriselt nn tiobarbituurhappega (TBA) reageerivate ainete (TBARS) meetodil, on võetud enamasti ka erinevate objektide, sealhulgas liha rasvhapete oksüdatsiooniastme, mõõduks. Meetodil on ka rida puudusi, ta pole päris MDA-spetsiifiline ja rasvhapete oksüdatsioonil tekib mitmeid teisi lõppprodukte, millega TBA ei reageeri. On leitud, et TBARS-test on usaldatav toore liha ja kala korral, kuid töödeldud toiduainetes hindab meetod MDA-sisaldust üle (Papastergiadis *et al.*, 2012).

Lihas on eelkäsitatud etapid ja mehhanismid kombineerunud ja seetõttu võib korraga tekkida väga palju erinevaid lipiidide oksüdatsiooniprodukte.

Kolesterooli oksüdatsioon

Küllastamata rasvhapete oksüdatsioonil tekkinud vabad radikaalid oksüdeerivad lihas sisalduva kolesterooli erinevateks oksü-, keto- ja epoksü-kolesteroolideks, millest mitmel on näidatud proaterogeenset ehk ateroskleroosi tekitavat aktiivsust madala tihedusega lipoproteiidide (LDL) koosseisus. Kolesterooli oksüdatsioon võib lisaks toimuda ka ensüümkatalüütiliselt näiteks CYP450 abil. Oksükolesteroolid, mida leidub enim munades ja piimapulbris, kuid ka küpsetatud lihatoodetes, on osalised veel mitmes patofüsioloogilises protsessis nagu näiteks kopsuhaigus, maksahaigus, kantserogenees ja neurodegeneratsioon (Medina-Meza *et al.*, 2014).

Asjaolu, et α -epoksü-kolesterooli sisaldus inimese veres korreleerub hästi selle kolesteroolivormi sisaldusega tema toidus ning et α -epoksü-kolesterooli ei leitud nende inimeste verest, kelle toit sisaldas vaid oksüdeerumata kolesterooli, viitab sellele, et just toiduga omastatud oksüdeerunud kolesterool on veresoonte tervisele kahjulike oksüdeerunud lipoproteiidide allikaks inimese veres (Kanner, 2007).

Valkude oksüdatsioon

Liha rasvade oksüdatsioon kandub isegi näiliselt tahkes olekus (-18°C) säilitamisel edasi, eriti peenestatud liha valkudele – nii võivad rasvhapete sekundaarsed oksüdatsiooniproduktid oksüdeerida erinevaid aminohappeid. Lisaks võivad liha valgud oksüdeeruda ka reaktiivsete hapnikuosakeste, nii radikaalide kui ka molekulide, toimel. Valkude oksüdatsiooni tulemusena alanevad liha sensorikanäitajad (tekstuur, maitse, aroom) ning toiteväärtus. Kuna põhiliselt tekivad karbonüülühmi sisaldavad aminohapete derivaadid, siis kasutatakse valkude oksüdatsiooniastme määramiseks karbonüülühmadele spetsiifilist reaktsiooni 2,4-dinitrofenüülhüdraasiiniga (DNPH). Liha valkude oksüdatsiooni on võrreldes rasvhapete oksüdatsiooniga seni vähe uuritud ning selle mehhanismidest ja seda soodustavatest faktoritest on suhteliselt vähe teada. Siiski on selgunud, et lisaks karbonüülühenditele

(lüsiinist α -aminoadipiinhappe ja arginiinist ning proliinist γ -glutamiinhappe semialdehüüdid) tekivad valkude kuudepikkusel oksüdatsioonil -18°C juures ka karboksüülühendid (α -aminoadipiinhape) ning Schiffi-alused (Utrera ja Estevez, 2013), kusjuures heemi lagunemisel vabanenud Fe^{3+} -ioonidel on nendes protsessides oluline osa (Utrera *et al.*, 2014).

Liha oksüdeerumist soodustavad tegurid

Sellistest teguritest avaldas hiljuti ülevaate S. Sampels (2013).

"Valede" küllastamata rasvhapete kõrgendatud ja loomulike antioksidantide alandatud sisaldus loomasöödas

Liha kvaliteet ja ohutus algab juba söödast. Liha oksüdatiivne stabiilsus sõltub oluliselt erinevate küllastamata rasvhapete sisaldusest söödas, eriti just söötamise lõpp-perioodil. On leitud, et "õigete" rasvhapete allikate, nagu linaseemnete või vetikate, lisamine söödale suurendab ka nende hapete sisaldust lihas. Kalaõli söötmine suurendab oluliselt liha oksüdeeritavust võrreldes linaseemnete söötmisega, samas näidati, et 7% kalajahu lisamine söödale ei muuda liha oksüdeeritavust. Selliste antioksidantide nagu konjugeeritud linoolhape (CLA), pikaahelalised ω -3-rasvhapped, aga ka vitamiinide A ja E lähteühendite, mis kaitsevad nii *postmortem* liha heemi (värvuse stabiilsus) kui ka PUFA-sid oksüdatsiooni eest, kõrgendatud sisaldused on leitud rohusöödal olnud loomade lihas (Bekhit, 2013). Vaatamata sellele, et karjamaal peetavate lammaste lihas oli tunduvalt kõrgem monoküllastamata rasvhapete (MUFA), PUFA-de, n-3 PUFA-de ja CLA-sisaldus kui kontsentreeritud söödaga kasvanud lammastel, oksüdeerub nende liha tunduvalt aeglasmalt just E-vitamiini kõrgendatud sisalduse tõttu, vastavalt 6,42 ja 1,61 mg kg^{-1} lihase kohta (Sante-Lhoutellier *et al.*, 2008). Sama tulemuse sai veiseliha kasutades ka C. Maughan jt (2012). Tõuaretuses on senini olnud vaid kolm eesmärki – kiirem lihassassi kasv, taise ja õrnem liha. See aga võib paljudel juhtudel muuta ka liha koostist (näiteks lihasesisese rasva sisaldust) ja sellest tingitud muid liha omadusi, sealhulgas suurendada selle oksüdeeritavust. Warner jt (2010) leidsid korrelatsiooni liha värvitustumise (oksümüoglobiini/metmüoglobiini suhe) astme ja lihasesisese rasva sisalduse vahel. Sealiha tootmisel on uudsed söötmissstrateegiad, mis soodustavad PUFA-de, eriti n-3 α -linoleen-, eikosapentaeen-(EPA)- ja dokosaheksaeenihappe-(DHA)-sisalduse suurenemist lihas, viinud samuti liha oksüdatsioonikindluse alanemisele (Botsoglou *et al.*, 2013).

Metallid

Siia kuuluvad eeskätt raud, liha enda müoglobiini, hemoglobiini ja raua talletusvalgu ferritiini heemi koosseisust, aga ka vask, tsink ning raskemetallid ensüümide ja teistest metallovalkudest. Teiseks võib raud sattuda lihatoodetesse kokkupuutel töötlemis-masinatega kas hõõrdumise või happelise lahustumise

tulemusena. Kolmandaks metallide allikaks võivad olla pakendid, millest leostuvad metallide kogused on küll üliväikesed selleks, et põhjustada mingeid füsioloogilisi efekte, kuid piisavad liha rasvhapete oksüdatsiooni käivitamiseks.

Keedusool

Naatiumkloriidil (NaCl) on teatavad antioksidantsed omadused, kuid ta võib, eriti liha termilisel töötlemisel, olla ka oksüdatsiooni käivitav aine ehk pro-oksüdant (Niki *et al.*, 2005).

Liha peenestatuse aste

Mida peenemad on lihaosakesed, seda paremini pääseb hapnik kõikjale ligi. Samuti lõhutakse liha peenestamisel rakkude ja organellide membraanid ning lipiidide hüdrolyüsi ja rasvhapete oksüdeerumist soodustavad ensüümid pääsevad kergemini membraani lipiidideni. See kehtib näiteks hakklihade, eriti aga rasvarikaste lihamasside nagu näiteks MDM korral.

Valgus- ja soojusenergia

Mida kauem on lihatoode, eriti hakkliha, valguse käes ja suhteliselt kõrgel temperatuuril, seda tugevamini ta oksüdeerub. Selle vastu aitab liha võimalikult lühike valguse käes töötlemise aeg ja võimalikult madal temperatuur. Tavalised läbipaistvad kilepakendid võimaldavad küll lihatoode ahtatavat eksponeerimist, kuid ei kaitse liha valguse eest. Selleks peaks kasutama värvilisi või poolläbilaskvaid opalestseeruvaid pakendeid.

Kõrgsurvetöötlemine

Viimastel aastatel on maailmas levima hakanud värske liha kõrgsurvetöötlemine, mille kui ühe külmpastöriseerimise alaliigi eesmärgiks on liha säilitusaja pikendamine. Selle protsessi käigus inaktiveeruvad mikroobid, aga aktomüosiini ja müoglobiini denatüreerumise tõttu muutub rõhul umbes 200 MPa ka liha välimus. Veelgi kõrgematel rõhkudel hakkab aga membraanide lagunemise ning raua ionide vabanemise tõttu küllastamata lipiidide oksüdatsioon kiirenema (Bolumar *et al.*, 2014; Medina-Meza *et al.*, 2014).

Oksüdatsiooni pidurdamine lihas

Põhilisteks pidurdusmehhanismideks on vabade radikaalide neelamine, metalliioonide kelateerimine ehk komplekseerimine ning oksüdatsiooniensüümide, nagu tsüklooksoügenaasid, lipoksoügenaasid ja tsütokroomid, inhibeerimine.

S. Sampels (2013) toob välja, et oksüdatsiooni saab pidurdada järgmiste võtetega:

1. Liha säilitustemperatuuri alandamine. Rõhuv enamus (bio)keemilisi protsesse aeglustub temperatuuri alanedes. Võimalikud on järgmised võtted:

- Jahutamine (*Chilling* või *cooling*) +4°C juures.
- Super- e sügavjahutamine temperatuurile, mis on kas täpselt või õige veidi allpool näilist külmumpunkti ning on toiduproduktidel vahemikus –0.5

kuni –2.8°C. Lipiidide oksüdatsiooni pidurdamiseks on oluline see, et ei tekiks suuri jääkristalle, mis võiksid lõhkuda organellide membraane ning vabastada vabu radikaale ning ensüüme, mis kiirendavad lipiidide hüdrolyüsi ja intensiivistavad rasvhapete oksüdatsiooni. Selline parajalt madala temperatuuri ja vaakumi kombinatsioon pidurdab ka bakterite kasvu ja liha värvi muutumist.

- Külmutamine. Levinud on arvamus, et külmutamine temperatuurini –18°C ja seal säilitamine võimaldavad liha pikaajalist muutusteta hoiustamist. Tõepoolest, sel temperatuuril on nii bakterite kasv kui ka autolüütilised reaktsioonid oluliselt pidurdatud. Kuna aga külmutamine võib jääkristallide tekke tõttu lõhkuda rakumembraane, võib see samas suurendada liha küllastamata rasvhapete vabanemist membraanidest ning nende oksüdatsiooni. Nii tekivad lipiidide oksüdatsioonil sellised toksilised ühendid nagu leukotoksiindioolid, kolesterooli oksüdatsiooni produktid, MDA, lenduvad karbonüülühendid, alkoholid ja happed, mis põhjustavadki rääsunud lihal ebameeldivat lõhna (*off-flavor*) ning toksilisust. Lisaks polüküllastamata rasvhapetele alluvad lihas vabadest radikaalidest või rasvhapete oksüdatsiooniproduktidest (eriti aldehüüdid) põhjustatud oksüdatsioonile ka valgud. Tekivad karbonüül-rühmadega (C=O) valgud, millega alaneb ka liha veesidumisvõime ning sensoorsed omadused. Sel temperatuuril pole kogu lihas sisalduv vesi külmutunud ning keemilised reaktsioonid, sh oksüdatsioon, võivad, kuigi aeglustatult, siiski edasi toimuda (Utrera, Estevez, 2013; Utrera *et al.*, 2014). Temperatuurini –18°C külmutatud liha säilumisaeg toatemperatuuril on seega väga lühike ning tuleks praktiliselt kohe kuumtöödelda. On näidatud, et nendest aspektidest lähtudes on liha optimaalne säilitustemperatuur hoopis –40°C, mille juures on vedelas olekus vaid tühine osa lihas olevast veest ning ei teki väga suuri membraanidele ohtlikke kristalle (Estevez, 2011).

2. Taimsete antioksidantide lisamine.

- Tugevate taimsete antioksidantide lisamine söötadele võib säilitamisel aidata pidurdada liha oksüdeerumist ja samuti suurendada liha antibakteriaalsust. Selline antioksidantide ladestumine lihas juba looma elu kestel välistab vajaduse eksogeensete ainete lisamiseks lihale (Bahelka *et al.*, 2011; Brewer, 2011; Andrés *et al.*, 2013).

- Nende lisamine lihale enne töötlemist. Kasutusel on väga erinevad taimsed antioksidandid, vastava hiljutise ülevaate leiab näiteks artiklist Karre *et al.*, 2013.

3. Soolamine. Keedusool (NaCl) alandab vee aktiivsust ja seob seda, mistõttu alaneb ka hapniku lahustuvus vees ning ensüümide ja bakterite aktiivsus. Keedusoolaga töötlemise (*curing*) käigus lisatakse meeldiva roosa värvi säilitamiseks ja botulismi-bakterite kasvu takistamiseks lihale tavaliselt ka nitriteid, mis, asendades värske liha oksü-vormis

müoglobiin (oksümüoglobiin) hapnikku, tekitab nitrosüülmüoglobiini, andes lihale stabiilse roosa värvuse. Nitritioonid on samas ka antioksidandid. Nitraatide ja nitritite lisamise mõistlikkus lihatoodetele on olnud vaidlusteemaks juba aastaid. Leiti, et nii toiduga manustatud kui ka soolestikumikroobide poolt nitraatidest taandatud nitritioonid reageerivad organismis sekundaarsete amiinide või amiididega (rottidele anti kantserogeenseid nitroosamiine). Vähi tekitamise võimet inimestel pole nitritioonidel siiski veel tuvastatud. Lisaks võivad nitritioonid oksüdeerida vere hemoglobiini hapnikku mittesiduvaks methemoglobiiniks, tekitades organismis hapnikupuudust ehk anoksiat. Nitritioonide maksimaalselt lubatud sisaldus toidus on 200 ppm ning ADI 0,135 mg kg⁻¹. Teisalt, suure osa nitraatidest (erinevatel hinnangutel 80–90% ADI-st, mis on 3,7 mg kg⁻¹) saame hoopis rohelistest taimedest nagu kapsas või lehtsalat. Lisaks on hakanud muutuma paradigma nitritiooni füsioloogilistest toimetest. Nitritioon, olles lähteaineks ühe tähtsama signaalmolekuli lämmastikoksiidi (NO) sünteesil organismis, omab madalates kontsentratsioonides rida positiivseid toimeid, eriti südame-veresoonkonna haiguste korral (Parathasarathy, Bryan, 2012).

4. Kuivatamine ja kuivsoolamine (*dry-curing*). Ka nendel protsessidel on üldiselt prooksidatiivne toime, mille põhjustavad pikaajaline kontakt õhuga, dehüdratsioon ning nitriti puudumine. Samas säilib tootes aga oksüdeerumist soodustav ensümaatiline aktiivsus. Sellistes toodetes nagu kuivvalmistatud sink või salaami, on spetsiifilise maitse saavutamiseks teatud hulga lipiidide oksüdatsiooni ja lipolüüsi produktide manulus lausa soovitud.

5. Suitsutamine. Eelnevalt keedusoolaga töödeldud liha pikaajaline kuumsuitsutamine kõrgendatud temperatuuril initsieerib alati teatud oksüdatsiooni. Siin avalduvad mõjud on aga kompleksed erinevate pro- ja antioksidatiivsete aspektidega. Lisaks sisaldab suits alati toksilisi aineid nagu näiteks polüaromaatsed süsivesinikud (PAH).

6. Eripakendite kasutamine. Pakendid on viimastel kümnenditel oluliselt arenenud ning oksüdatsiooni aeglustamiseks on järgmised võimalused:

- pakkimine modifitseeritud atmosfääris;
- pakkimine lämmastiku atmosfääris;
- pakkimine vaakumis;
- pakkimine koos hapnikuneelajaga.

Pakendi esmaseks eesmärgiks on pidurdada bakterite kasvu ning sellega ka toote bakteriaalset riknemist. Tarbija silmale on oluline ka liha värskusele viitava ilusa punase värvi olemasolu. Selline olukord saavutatakse modifitseeritud atmosfääriga pakendis (MAP) hapniku kõrge sisaldusega, millega kaasneb süsiahapegaasilisandi bakterikasvu pidurdav toime (Esmer *et al.*, 2011). Kasutatava gaasisegu täpne koostis sõltub liha tüübist. Kõrgematel rasvasisaldustel on aga soovitatav hapnikuvaba gaasiline keskkond koos antioksidantidega nagu askorbiinhape ja/või taimsed antioksidandid (Zhou *et al.*, 2010).

Liha oksüdatsiooni uurimise tulevik

Kuna oksüdatsioon tekitab lihas mitmeid ebasoovitavaid või koguni toksilisi aineid, on oksüdatsiooni pidurdamise meetodite edasine uurimine ülioluline. Olulisemad alateemad on söötmisstrateegiate optimeerimine, mis võimaldaks suurendada taimsete antioksidantide nagu vitamiin E või polüfenoolid sisaldust lihaskoes (Bahelka *et al.*, 2011), uute efektiivsemate antioksidantide komplekside otsimine, mis toimiksid sünergiliselt ning siseneksid eelistatult just lihasrakkude kergestioksideeruvatesse lipiidsetesse membraanidesse (Kathirvel, Richards, 2009) ning oksüdatsiooniproduktide nagu oksülipiidid (eriti leukotoksiin dioolid) ja aldehüüdid tekke dünaamika ning toksilisuse mehhanismide väljaselgitamine. Teisalt ootavad arendamist modifitseeritud atmosfääriga ja muud pakendid, mis aeglustaksid liha oksüdeerumist, säilitaksid liha värvi ning teisalt ei sisaldaks lihasse migreeruvaid bisfenool A (BPA) või ftalaatide taolisi juba väikestes kogustes toksilisi ühendeid (Lee, 2010; Vandenberg *et al.*, 2012).

Kasutatud kirjandus

- Andrés, S., Tejido, M.L., Bodas, R., Morán, L., Prieto, N., Blanco, C., Giráldez, F.J. 2013. Quercetin dietary supplementation of fattening lambs at 0.2% rate reduces discolouration and microbial growth in meat during refrigerated storage. – *Meat Science*, 93, 207–212.
- Bahelka, I., Nürnberg, K., Küchenmeister, U., Lahučký, R. 2011. Chemical composition, meat quality and oxidative status of pork after supplementation of diet with vitamin E and/or vitamin E + herb extracts. – *Biotechnology in Animal Husbandry*, 27, p. 853–860.
- Bastide, N.M., Pierre, F.H., Corpet, D.E. 2011. Heme iron from meat and risk of colorectal cancer: A meta-analysis and a review of the mechanisms involved. – *Cancer Prevention Research*, 4, p. 177–184.
- Bekhit, A.E.-D., Hopkins, D.L., Fahri, F.T., Ponnampalam, E.N. 2013. Oxidative processes in muscle systems and fresh meat: Sources, markers, and remedies. – *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12, p. 565–597.
- Bolumar, T., Andersen, M.L., Orlien, V. 2014. Mechanisms of radical formation in beef and chicken meat during high pressure processing evaluated by electron spin resonance detection and the addition of antioxidants. – *Food Chemistry*, 150 p. 422–428.
- Bosma-den Boer, M.M., van Wetten, M.-L., Pruimboom, L. 2012. Chronic inflammatory diseases are stimulated by current lifestyle: how diet, stress levels and medication prevent our body from recovering. – *Nutrition and Metabolism*, 9, p. 32.
- Botsoglou, E., Govaris, A., Ambrosiadis, I., Fletouris, D., Papageorgiou, G. 2013. Effect of olive leaf (*Olea europaea* L.) extracts on protein and lipid oxidation in cooked pork meat patties enriched with *n*-3 fatty acids. – *Journal of Science of Food and Agriculture*, 94, p. 227–234.

- Brewer, M.S. 2011. Natural antioxidants: Sources, compounds, mechanisms of action and potential applications – *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 10, p. 221–247.
- Corpet, D.E. 2012. Red meat and colon cancer: Should we become vegetarians, or can we make meat safer? – *Meat Science*, 89, p. 310–316.
- Esmer, O.K., Irkin, R., Degirmencioglu, N., Degirmencioglu, A. 2011. The effects of modified atmosphere gas composition on microbiological criteria, color and oxidation values of minced beef meat. – *Meat Science*, 88, p. 221–226.
- Estévez, M. 2011. Protein carbonyls in meat systems: A review. – *Meat Science*, 89, p. 259–279.
- Estevez, M., Ventanas, S., Heinonen, M., Puolanne, E. 2011. Protein carbonylation and water-holding capacity of pork subjected to frozen storage: Effect of muscle type, premincing, and packaging. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, p. 5435–5443.
- Jacob, R.H., D'Antuono, M.F., Gilmour, A.R., Warner, R.D. 2014. Phenotypic characterisation of colour stability of lamb meat. – *Meat Science*, 96, p. 1040–1048.
- Karre, L., Lopez, K., Getty, K.J.K. 2013. Natural antioxidants in meat and poultry products. – *Meat Science*, 94, p. 220–227.
- Kathirvel, P., Richards, M.P. 2009. Mechanisms by which flavonol aglycones inhibit lipid oxidation better than glycosylated flavonols in comminuted muscle tissue. – *Food Chemistry*, 117, p. 75–82.
- Lee, K.T. 2010. Quality and safety aspects of meat products as affected by various physical manipulations of packaging materials – *Meat Science*, 86, p. 138–150.
- Markaverich, B.M., Alejandro, M., Thompson, T., Mani, S., Reyna, A., Portillo, W., Sharp, J., Turk, J., Crowley, J.R. 2007. Tetrahydrofurandiols (THF-diols), leukotoxindiols (LTX-diols), and endocrine disruption in rats. – *Environmental Health Perspectives*, 115, p. 702–708.
- Markaverich, B.M., Crowley, J.R., Alejandro, M.A., Shoulars, K., Casajuna, N., Mani, S., Sharp, J. 2005. Leukotoxin diols from ground corn cob bedding disrupt estrous cyclicity in rats and stimulate MCF-7 breast cancer cell proliferation. – *Environmental Health Perspectives*, 11, p. 1698–1704.
- Maughan, C., Tansawat, R., Cornforth, D., Ward, R., Martini, S. 2012. Development of a beef flavor lexicon and its application to compare the flavor profile and consumer acceptance of rib steaks from grass- or grain-fed cattle. – *Meat Science*, 90, p. 116–21.
- Medina-Meza, I.G., Barnaba, C., Barbosa-Cánovas, G.V. 2014. Effects of high pressure processing on lipid oxidation: A review. – *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 22, p. 1–10.
- Min, B., Ahn, D.U. 2005. Mechanism of lipid peroxidation in meat and meat products. A review. – *Food Science and Biotechnology*, 14, p. 152–163.
- Niki, E., Yasukazu, Y., Saito, Y., Noguchi, N. 2005. Lipid peroxidation: Mechanisms, inhibition, and biological effects. – *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 338, p. 668–676.
- Papastergiadis, A., Mubiru, E., Van Langenhove, H., De Meulenaer, B. 2012. Malondialdehyde measurement in oxidized foods: Evaluation of the spectrophotometric thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) test in various foods. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, p. 9589–9594.
- Parathasarathy, D.K., Bryan, N.S. 2012. Sodium nitrite: The "cure" for nitric oxide insufficiency. – *Meat Science*, 92, p. 274–279.
- Pham-Huy, L.A., He, H., Pham-Huy, C. 2008. Free radicals, antioxidants in disease and health. – *International Journal of Biomedical Science*, 4, p. 89–96.
- Püssa, T., Raudsepp, P., Toomik, P., Pällin, R., Mäeorg, U., Kuusik, S., Soidla, R., Rei, M. 2009. A study of oxidation products of free polyunsaturated fatty acids in mechanically deboned meat. – *Journal of Food Composition and Analysis*, 22, p. 307–314.
- Püssa, T., Pällin, R., Raudsepp, P., Soidla, R., Rei, M. 2008. Inhibition of lipid oxidation and dynamics of polyphenol content in mechanically deboned meat supplemented with sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) berry residues. – *Food Chemistry*, 714–721.
- Sampels, S. 2013. Chapter 6. Oxidation and antioxidants in fish and meat from farm to fork in *Agricultural and Biological Sciences*. In: *Food Industry* (ed. I Muzzalupo) <http://dx.doi.org/10.5772/53169>
- Santé-Lhoutellier, V., Engel, E., Gatellier, Ph. 2008. Assessment of the influence of diet on lamb meat oxidation. – *Food Chemistry*, 109, p. 573–579.
- Shahidi, F. 1992. Prevention of lipid oxidation in muscle foods by nitrite and nitrite-free compositions. – In: *Lipid Oxidation in Food*. American Chemical Society Symposium Series, 500 (ed. A.J.St. Angelo), Washington, DC: American Chemical Society, p. 161–182.
- Slim, R., Hammock, B.D., Toborek, M., Robertson, L.W., Newman, J.W., Morisseau, C.H.P., Watkins, B.A., Saraswathi, W., Hennig, B. 2001. The role of methyl-linoleic acid epoxide and diol metabolites in the amplified toxicity of linoleic acid and polychlorinated biphenyls to vascular endothelial cells. – *Toxicology and Applied Pharmacology*, 171, p. 184–193.
- Zhou, G.H., Xu, X.L., Liu, Y. 2010. Preservation technologies for fresh meat – A review. – *Meat Science*, 86, p. 119–128.
- Utrera, M., Parra, V., Estevez, M. 2014. Protein oxidation during frozen storage and subsequent processing of different beef muscles – *Meat Science*, 96, p. 812–820.
- Utrera, M., Estevez, M. 2013. Oxidative damage to poultry, pork, and beef during frozen storage through the analysis of novel protein oxidation markers. – *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, p. 7987–7993.

Vandenberg, L.N., Colborn, T., Hayes, T.B., Heindel, J.J., Jacobs, D.R.Jr., Lee, D.-H., Shioda, T., Soto, A.M., vom Saal, F.S., Welshons, W.V., Zoeller, T., Myers, J.P. 2012. Hormones and endocrine-disrupting chemicals: Low-dose effects and nonmonotonic dose responses. – *Endocrine Reviews*, 33, p. 378–455.

Warner, R.D, Jacob, R.H., Hocking, J., Edwards, E., McDonough, M., Pearce, K., Geesink, G., Kearney, G., Allingham, P., Hopkins, D.L., Pethick, D.W. 2010. Quality of lamb meat from the Information Nucleus Flock. – *Animal Production Science*, 50, p. 1123–1134.

Meat oxidation – mechanisms and influence on quality and safety of meat products

Tõnu Püssa

*Estonian University of Life Sciences,
Institute of Veterinary Medicine and Animal Sciences,
Department of Food Hygiene,
F.R. Kreutzwaldi 58A, 51014 Tartu*

Summary

The objective of this review article was to give a short overview of problems connected with oxidation of meat and meat products. Meat oxidation is an

undesirable process involving changes in quality and safety of meat. It starts immediately after animal slaughtering and involves heme (loss of colour and release of iron, powerful catalyst of oxidation), various lipids (chiefly free polyunsaturated fatty acids and cholesterol) and proteins by several interconnected mechanisms (free radical, enzyme catalyzed; non-radical non-catalyzed). Meat oxidation produces a number of adverse substances, such as leukotoxin diols, mono- and dialdehydes. Oxidation is accelerated by temperature, light, meat comminution, high pressure processing and so forth. Oxidation can be slowed down by addition of antioxidants either to feed or meat before processing, by lower temperatures, but using of special packaging and so forth.

Käesolev ülevaateartikkel põhineb Eesti Maaülikooli veterinaarmeditsiini ja loomakasvatuse instituudi konverentsi "Terve loom ja tervislik toit 2014" ettekandeartiklil, mida autor on hiljem parandanud ja täiendanud.