کاربرد فناوری میدان مغناطیسی هسته ای (NMR) در پردازش مواد غذایی (مروری)

حسن کیانی[1*]، آیت محمدرزداری[2] و محمدرضا بیگی ورزنه[3]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲-دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهرکرد

۳-دانشجوی سابق کارشناسی مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشگاه جیرفت

ایمیل مکاتبه کننده: h.kiani24@gmail.com

چکیده

طیف سنجی با استفاده از تشدید مغناطیسی هسته ایکی از معمولی ترین روش های تحقیق در شیمی و بیوشیمی است. صنایع غذایی از هردو روش تشدید میدان مغناطیسی هسته و تصویر برداری با تشدید مغناطیسی برای بهبود کاربرد فرآیند تجزیه و تحلیل مواد غذایی بهره می گیرد. موضوعاتی که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل ترکیبات شیمیایی و شناخت ساختار و نقش اجزایتشکیل دهنده آنها در مواد غذایی می باشد. شناخت مواد تشکیل دهنده مواد غذایی، روش بسته بندی، تشخیص ارزش مواد غذایی، بهینه سازی پارامترهای مرتبط با پردازش مواد غذایی و بررسی کیفیت فیزیکی، شیمیایی و میکرو بیولوژیکی. همچنین به نظرات موافق و مخالف،کاربرد های خاص دستگاه تشدید مغناطیسی هسته، در تحلیل مواد غذایی مانند دلستر، پنیر، میوه جات، سبزیجات،گوشت ماهی، نوشیدنی ها و روغن ماهی و همچنین معایب و نهایتاً پیشنهاداتی برای تحقیق روی ان ام آر در صنایع غذایی اشاره می کند.

واژه‌های کلیدی: رزوناس مغناطیسی هسته ای، تصویر سازی تشدید مغناطیسی، مواد غذایی، پردازش، بسته بندی.

۱- مقدمه

NMRدر اواخر سال ۱۹٤۹ با هدف تشریح ساختار سلول ها در شیمی آلی به کار گرفته شد (Gutowsky et al 1949). کاربرد های متنوع NMR در سال ۱۹۸۰ در حوزه علوم غذایی ممنوع بود و این ابتدا به علت نداشتن تجارب کافی، قیمت بالای وسیله و عدم وجود تجهیزات لازم در NMR برای اهداف غذایی بود. کاربرد تصویر برداری از طریق NMRدر صنایع غذایی برای بررسی ترکیبات مواد غذایی چند سالی است که رواج پیدا کرده است. با پیشرفت تجهیزات NMR و به روز رسانی برنامه های آن جهت جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده ها کاربرد این وسیله در زمینه علوم غذایی رواج زیادی پیدا کرده است. تحقیقات زیادی در ارتباط با مواد غذایی با استفاده از این دستگاه در

شاخه های مختلف علوم و صنایع غذایی همچون بررسی ساختار میکرو بیولوژیکی مواد غذایی، شیمی غذا و مهندسی تولید و بسته بندی مواد غذایی همانند مورد استفاده قرار گرفته است (Nestor et al 2010). در مورد اصول و روند کار دستگاه NMR نیز مطالبی ارئه گردیده است. امروزه تجزیه و تحلیل از طریق NMR بر اساس رفتار هسته فعال آن در یک میدان مغناطیسی و از طریق پرتوهای فرکانس رادیویی در جریان سیال صورت می گیرد. عکس العمل پیچیده هسته نسبت به جریانات (به علت حرکت سطح اسپین هسته از طریق میدان مغناطیسی) نسبت به حال سکون اطلاعاتی را به دست می دهد (Novoa-Carballal et al, 2011). برطبق قابلیت ان ام آر در تصویر برداری با تشدید مغناطیسی امکان مشاهده ترکیبات درون مواد غذایی را می‌دهد MRI .نه تنها اطلاعاتی از ساختار شیمیایی و ساختار درونی مواد بلکه امکان ارائه اطلاعاتی از ترکیبات درونی مواد و تغییرات ساختاری مواد هنگامی که تحت فرآیندهای مختلف تولید و کشت قرار می گیرد(مثلاً نوع برداشت محصول و فرآیند پس از برداشت محصول) و فرآیند های پردازشی صورت گرفته در صنعت را ارائه می دهد. برای مورد اول اکنون امکان بررسی مستقیم فاکتورهای کیفی مواد غذایی میسر است اما کاربرد این دستگاه در گذشته فقط برای بررسی ویژگی های بیرونی ماده مانند رنگ ،اندازه ،شکل و لکه روی سطح صورت می گرفت (Chayaprasert, 2005).مورد دوم شناخت بهتری از تأثیر این فاکتورها روی ویژگی های شیمیایی ماده ارائه می دهد (Herrero et al , 2007).

۲-قابلیت های MRI و NMR به منظور تحلیل ترکیبات مواد غذایی

۲-۱-آب

اخیراً تحقیقات صورت گرفته در مورد کاربر د NMR بیانگر آن است که تغییرات مقدار آب موجود در گیلاس در طی شرایط فصلی (مثلاً زمستان، بهار، تابستان) بر شرایط ذخیره سازی و نگهداری این میوه تأثیر می گذارد. MRI حتی اطلاعاتی نیز در ارتباط با مقدار آب، شکل فضایی ذرات آب در بخش های مختلف آب درون گیلاس ارائه می دهد. اطلاعات زمانی این تغییرات (T1 و T2) نیز درون و بیرون هسته از طریق NMR قابل ثبت است. تغییرات T1 و T2 بیانگر تغییرات حرکات مولکول های آب و پراکندگی های درون میوه می باشد که منجر به تغییرات طی فصول (تابستان، بهار، زمستان) می شود (Ciampa et al 2010). بر اساس اطلاعات بدست آمده از مقدار آب و پخش مولکول های آب درون محصول می توان مکان جغرافیایی که محصول کشت شده است را شناسایی کرد (Sequi et al, 2007). در مطالعه دیگری تاثیرات فشار (۱۰۰ و ۲۰۰ مگا پاسکال) بر روی میوه توت فرنگی ارائه شده است (Otero, L., and Préstamo,*2009*). دقت و صحت اطلاعات حاصل از NMR از طریق روشهای تعیین مقدار آب و مطالعات مقایسه ای با روشهای دیگر صورت گرفت. Keeton et al مقدار رطوبت گوشت (مثل گوشت گوساله، مرغ با پوست و بدون استخوان، هات داگ با گوشت گوساله) را با استفاده از روش های تجزیه و تحلیلی یعنی از طریق فشار هوای خشک اجاق و همچنین با نتایج NMR مقایسه کردند. نتایج بدست آمده از رطوبت از گوشت گوساله، مرغ و خوک به ترتیب ٤٠/٤٢، ٧٤/٣٧ و ٧٣/٧٥ درصد بود که مشابه نتایج به دست آمده با دستگاه فشار هوای خشک(به ترتیب٤٠/٣٦، ٧٤/٧٥ و٧٣/٩٤ درصد) بود که نتایج دقیقاً نزدیک به هم بودند (Keeton et al, 2003).

۲-۲ چربی و اسیدهای چرب

طیف سنجی NMR برای تجزیه و تحلیل مواد چرب موجود در مواد غذایی نه تنها در تعیین مقدار کل چربی همچنین در شناخت ترکیبات اسیدهای چرب نیز موثر است. تاکنون نیز به وفور از NMR جهت بررسی مقدار و همچنین ترکیبات چرب در انواع تولیدات زراعی به کار گرفته شده است(مثلاً چربی و روغن موجود در میوه جات و سبزیجات). از سال ۱۹۹۳ به بعد NMR یک روش معمول جهت تعیین مقادیر چربی روغن جامد و چربی به کار رفته در مواد مخصوصاً در نانوایی ، شیرینی پزی و صنایع تولید روغن مارگارین به کار می رفت (Vereecken et al 2010). روش تصویر برداری گاز که در گذشته به عنوان یک روش تحلیلی برای تحلیل اسید های چرب به کار می رفت و بعد ها نیز از آن به منظور اعتبار سنجی نتایج بدست آمده از طریق NMR به کار می رود. Miyake et al (1998) از این دو روش تحلیلی برای بررسی ترکیبات اسید های چرب اشباع نشده روغن پالم، روغن زیتون، روغن گلرنگ، و روغن غلات و مقایسه مقادیر حاصل از این دو روش استفاده کردند. مقادیر حاصل از روش NMR از این روغن ها به ترتیب ۱۱/۲، ۱٤/۲، ٤۳/۷، ٦۰/۲ درصد به دست آمد.

۲-۳ آمینو اسید و پروتئین

با بررسی آمینو اسیدها، از آنها به عنوان عنصر کلیدی که روی خصوصیت موادغذایی پروتئین دار تأثیر می گذارند یاد می شود. از جمله تأثیرات آنها روی مواد غذایی، ثبات دما روی عملکرد ماده غذایی اشاره کرد. NMR هسته هیدروژن همچنین امکان بررسی کلی مقدار پروتیئن در ۱۷ نوع بذر خردل کشت زمستانه و ۲۰ گونه تخم خردل بهاره با استفاده از دستگاه تشدید مغناطیسی هسته هیدروژن به ترتیب۲۸/۲ و ۲۰/۸۲ بود (Pedersen et al 2000). در تحقیق دیگری Belton et al (1996) از NMR برای بررسی مقدار آمینو اسید در شربت و میوه جات برای بررسی میزان این ماده و مقایسه این دو ماده با هم استفاده کردند. نسبت آلانین به آرگینن در این انواع انگورها ۱/۸ بود که این عدد مطابقت با داده هایی می کرد که از روشهای دیگر بدست آمده بود. تنها تفاوت این بود که مقدار آمینو اسید نصف مقداری بود که از روش های دیگر حاصل شده بود. NMR امکان اندازه گیری سریع از ترکیبات حتی برای نمونه بزرگتر را ممکن می کند.

۳- قابلیت MRIوNMR برای تحلیل ساختار مواد

نمایش تغییرات ساختاری ذرات در مواد غذایی اخیراً در تحقیقی که توسط Mariette (2009) انجام شد وی از طیف سنجی NMR با میدان مغناطیسی کم با سرعت(۲۵ مگا هرتز) برای بررسی تغییرات ساختاری و شناخت مقادیر ترکیبات مواد استفاده کرد. Oztop et al (2010) تحقیقی را روی ژله های پروتیئنه تولید شده از شیر به عنوان یک نمونه برای تحقیق انجام دادند. طیف سنجی های حاصل از NMR جهت ارزیابی تصاویر مولکول های آب در این ژل موقع متورم شدن با یک pH در حد ۲/۵، ۷ و ۱۰ صورت گرفت. تصاویر MRI بیانگر یک تصویر فضایی مشخص از مولکول های آب در این ژل هنگام متورم شدن(فرم گرفتن) با سه عدد pH متفاوت بود. نتیجه این تحقیقات این بود که پراکندگی آب در ژل باعث تغییر ساختاری بیشتری در ژل در کمترین مقدار pH یعنی ۲۲/۵۵

در مقایسه بالاترین pH بود.این نتایج نشان داد که NMR و MRI یک تکنیک قدرتمند جهت برسی و بهبود درک عمل فرم گرفتن ژل و بررسی سایر ویژگی های مواد ابزاری مفید به شمار می رود.

٤- کاربرد NMR در بسته بندی مواد غذایی

کیفیت بسته بندی مواد،شرایط بسته بندی،اعمال روشهای مناسب و بهینه بسته بندی روی حفظ و نگهداری ماده، ذخیره سازی و ماندگاری ماده غذایی تأثیر دارد.NMR وسیله مطمئن در بررسی ویژگی های مواد بسته بندی شده و بر روند بهینه سازی بسته بندی ماده غذایی تأثیر دارند. تأثیرات اشعه گاما (در محدوده بین(۱-۱۰۰ kGy)روی پلیمر های بسته بندی شده در ماده غذایی(مانند پلی استیرن، پلی بوتادین، استیرن، اکریونیتریل، بوتادین و استیرن) از طریق NMR قابل تعیین بود (Pentimalli et al 2000). محققان به این نتیجه رسیدند که پلی استیرن یک پلیمر مفید و موثر برای مواد غذایی بسته بندی شده است که ممکن است تحت تأثیر اشعه نیز قرار گیرد.در مطالعه دیگری توسط Lamanna et al (2008)از دستگاه تشدید مغناطیسی هسته هیدروژن جهت بررسی علت کاهش تدریجی پنیر با نام روبیولا که در معرض هوا(بدون بسته بندی) قرار گرفته در یک لایه کاغذی در طی ۷ روز در شرایط اتاق(در دمای ۱۵ درجه سلسیوس)استفاده کردند. طیف سنجی ها از نمایش خروج ذرات آب از پنیر در معرض هوا طی ۷ روز و بدون بسته بندی در مقایسه با پنیری که به صورت بسته بندی نگهداری می شدند را نشان می داد. همه این یافته ها قابلیت NMR را جهت ارزیابی انواع مختلف مواد بسته بندی شده جهت حفظ ماده غذایی در شرایط ذخیره سازی مختلف و متفاوت ارائه می دهد و همچنین از آن به عنوان وسیله ای مطمئن برای انتخاب مناسب مواد بسته بندی برای مواد غذایی به کار گرفته می شود.

٥- قابلیت ان ام آر و ام آر آی جهت بررسی ارزش مواد غذایی

شناخت ارزش مواد غذایی جزء نگرانی های عمده در ارتباط با کیفیت ماده غذایی است. در گزارشات متعددی به کاربرد روشهای NMRو MRI جهت حفظ ارزش مواد در مواد غذایی مختلف اشاره شده است (Bertelli et al, 2010). این بررسی ها روی مواد غذایی متعدی همچون نوشیدنی های از جمله شیر، پنیر (Brescia et al, 2005)، گوشت گوساله (Shintu et al, 2007)، قارچ دنبلان وار(Mannina et al, 2004)، وانیل (Tenailleau et al, 2004)، پسته (Zur et al, 2008) و زعفران (Yilmaz et al 2010) صورت گرفت. از NMR جهت بررسی و تجزیه و تحلیل ترکیبات و ساختار مواد جهت بررسی با هدف ماندگاری طولانی مدت با حفظ کیفیت استفاده می شود. از این هدف نگهداری طولانی مدت مواد با حفظ کیفیت برای بررسی های قانونی و یا به هر دلیل دیگر روی مواد متعددی از جمله عسل،روغن ماهی،روغن زیتون و چای قرارگرفته است.

۱-٥- عسل

در سالهای اخیر تولید محدود عسل باعث افزایش قیمت آن شده و البته تولیدات عسل تقلبی با افزودن شربت شکر صنعتی توسط سازندگان رواج یافته است. Lolli et al (2008) از همان ابتدا یک مطالعه موردی از کاربرد تصاویر دو بعدیNMR جهت تعیین منشأ متابولیکی عسل تولید شده از یک گل شده و به کسب اطلاعات در این مورد

پرداخت. تصاویر یک بعدی بدست آمده توسط NMR به مراتب گویاتر، ساده تر، سریعتر از تصاویر دو بعدی در جهت کمک به نگه داشت عسل بدون هیچ گونه تغییر در ساختار ماده اثبات شد.

۲-۵- روغن زیتون

روغن زیتون ساده(Voos)، طی هزاران سال از اطراف دریای مدیترانه به دلیل منشأ جغرافیایی آنجا و نیز روشهای پردازش خاص خود شرکت عرضه می شود. اتحادیه اروپا قوانین و اصولی را در تولید این نوع روغن با نام Voos(روغن زیتون ناب و خالص) که به روش های تولید و ناحیه خاص تولید آن است اشاره می کند و بر اجرای قوانین در تولید محصول تکیه دارد. روش های تجزیه و تحلیلی متعددی جهت شناخت روغن زیتون تقلبی با نام Voos صورت گرفته ولی روش انگشت نگاری یا اثر انگشت روش مناسب تری در کشف مواد تقلبی بر اساس بررسی منطقه جغرافیایی رشد آن محصول است (Alonso et al, 2010). به منظور تولید محصولات تقلبی فاکتورهای متعددی هم چون تجزیه و تحلیل NMR هسته۱H 13C 31P و همچنین تحلیل عناصر غیر صابونی روغن و ترکیبات فنولیک روغن مورد مطالعه قرار گرفت.

٦- قابلیت NMR و MRI جهتبررسی مستقیم فرآیند پردازش مواد غذایی

استفاده از روشهای تجزیه و تحلیل قدیمی جهت ارزیابی مستقیم فرآیند پردازش و بهینه سازی این فرآیند بحث بر انگیز بود. چرا که این روش ها وقت گیر و به تخریب بافت ماده منجر می شد. روش های غیر تخریبی روی بافت، جهت ارزیابی کیفیت مواد غذایی را می توان به عبور نور، عبور اشعه ایکس، ارتعاش و قرار گرفتن در معرض صوت اشاره کرد. این روش ها گویای اطلاعاتی از واکنش های فیزیکی متعدد و پیچیده که سرآشپزها روی مواد غذایی انجام داده اند نیستند. استفاده از NMR جهت ارزیابی مستقیم پردازش راه حل مطمئن در این زمینه است. NMR و MRI روش موفق برای بررسی و تجزیه و تحلیل مستقیم فرآیند های زیستی در زیست شناسی است (Kara et al, 2011). مزایای این روش سرعت بالا و بدون تأخیر در تجزیه و تحلیل و ارزیابی است. اخیراً صنایع غذایی تمرکز خود را روی ارزیابی مستقیم فرآیند های مواد غذایی قرارداده اند.

همچنین برای بررسی ویژگی های فرآیند پردازش نیز اطلاعاتی ارائه میدهد. نتایج حاصل از این بررسی ها کمکی در شناخت ارزشهای صنعتی و تجاری این عصاره های خام و شناخت مقادیر دما و pH در ساختار مواد که از آنها نهایتاً به عنوان نگهدارندهی مواد غذایی استفاده می شود اجازه رشد و تولید یک محصول مصرف مشتری را می دهد(Gonera, A., and Cornillon, 2002).

۷- نتیجه گیری و پیشنهادات برای تحیقات آینده

این مقاله به این مطلب اشاره داشت که NMR روشی سودمند جهت مطالعه فرآیندهای متابولیکی و شناخت ترکیبات، واکنش های فیزیکی و شیمیایی و وسیله ای برای بررسی کیفیت مواد غذایی است. یکی از کاربرد های NMR که به نظر مهم می رسد کشف ارتباط بین غذا و حوزه سلامت است. دیگر کاربرد NMR که به نظر مهم می رسد شناسایی محل تولید ماده غذایی و بررسی مواد مغذی تأثیر گذار روی سلامتی انسان و بررسی واکنش های فیزیکی و شیمیایی مواد است. تغییر و تحولات (ارتقاء) دستگاه NMR برای بهبود دقت و حساسیت جهت شناسایی

تحلیل کمی مقادیر ضروری است. محققان تلاش های بسیاری در جهت طراحی NMR به کارگرفتند تا برای مغناطیس ها، شکل هندسی خاصی را در نظر بگیرند. محققان دیگری روش هایی جهت اندازه گیری پارامترهایی که از طریق NMR قابل محاسبه نیست مانند محاسبه جریان و ویژگی های تغییر شکل ماده را با ساخت دستگاهی به نام شتاب سنج NMR جبران کردند. هم چنین از روش های اصلاحی مانند یکی کردن NMR و MRI با دیگر وسایلی همچون طیف سنج مقاومت، دستگاه پخش نور لیزر و فراصوت برای اندازه گیری جریان در جهت توسعه NMR گام برداشتند. برای نمونه محققان، یک سیستمی مبتنی بر NMR که وسیله ای کم هزینه و جدید بود برای تسهیل کاربرد هم زمان روشهای حساسیت چندگانه روی نمونه های مشابه انجام دادند. در صنعت غذایی موانع بر سر راه ارتقاء طیف سنج NMR جهت قیمت بالا، نبودن کارشناسان مجرب ، مسائل ایمنی مرتبط با تقویت میدان مغناطیسی قابل توجه است. برای همین از دستگاه NMR و MRI با میزان کم هم به دلیل قیمت کم و تقویت بهتر، بیشتر استفاده می شود اما کاربرد ها و قابلیت های آنها محدود است. باید اشاره کرد که قابلیت های آنها امروزه هدف تحقیقات محققان است (van et al, 2002).گسترش کاربرد NMR فراتر از مواد صنعتی و بررسی کنترل کیفی در جریان است. برای اطمینان از رسیدن به داده ها و تجزیه و تحلیل ها ی دقیق، کاربران آموزش دیده نیاز به بررسی دقیق کاربرد NMR در صنایع غذایی دارند. محققان حوزه صنعت غذا با چالش هایی در جهت روش های مطلوب تحلیلی مواج هستند.یکی از این راه کارها مقایسه نتایج حاصل از این وسیله با روش های دیگر می باشد. به عبارت دیگر ترکیب کلیه روش ها و تولید یک وسیله مکمل NMR راهی نو در عرصه صنایع غذایی آشکار خواهد نمود (Marcone et al, 2013).

منابع و مآخذ

1. Alonso-Salces, R. M., Moreno-Rojas, J. M., Holland, M. V., Reniero, F., Guillou, C., andHeberger, K. 2010. “Virgin olive oil authentication by multivariate analyses of ^{1}H NMR fingerprints and $\delta^{13}C$ and δ2H data”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(9), 5586–5596.
2. Belton, P. S., Delgadillo, I., Holmes, E., Nicholls, A., Nicholson, J. K., andSpraul, M. 1996.“Use of high-field ^{1}H NMR spectroscopy for the analysis of liquid foods. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 44(6), 1483–1487.
3. Bertelli, D., Lolli, M., Papotti, G., Bortolotti, L., Serra, G., andPlessi, M. 2010. “Detection of honey adulteration by sugar syrups using one-dimensional and two-dimensional high-resolution nuclearmagnetic resonance”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(15), 8495–8501.
4. Brescia, M. A., Monfreda, M., Buccolieri, A., andCarrino, C. 2005. “Characterisation of the geograpHical origin of buffalo milk and mozzarella cheese by means of analytical and spectroscopic determinations”. Food Chemistry, 89(1), 139–147.
5. Butz, P., Hofmann, C., and Tauscher, B. 2005. “Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis”. Journal of Food Science, 70(9), R131–R141.

6. Chayaprasert, W., andStroshine, R. 2005. “Rapid sensing of internal browning in whole apples using a low-cost, low-field proton magnetic resonance sensor”. Postharvest Biology and Technology, 36(3), 291–301.
7. Chayaprasert, W., andStroshine, R. 2005. “Rapid sensing of internal browning in whole apples using a low-cost, low-field proton magnetic resonance sensor”. Postharvest Biology and Technology, 36(3), 291–301.
8. Ciampa, A., Dell'Abate, M. T., Masetti, O., Valentini, M., andSequi, P. 2010. “Seasonal chemical–pHysical changes of PGI Pachino cherry tomatoes detected by magnetic resonance imaging (MRI)”. Food Chemistry, 122(4), 1253–1260.
9. Gonera, A., andCornillon, P. 2002.“ Gelatinization of starch/gum/sugar systems studied by using DSC, NMR, and CSLM”. Starch-Starke, 54(11), 508–516.
10. Gutowsky, H. S., Kistiakowsky, G. B., Pake, G. E., and Purcell, E. M. 1949. “Structural investigations by means of nuclear magnetism”. 1. Rigid crystal lattices. Journal of Chemical PHysics, 17(10), 972–981.
11. Herrero, A. M., Cambero, M. I., Ordonez, J. A., Castejon, D., Romero de Avila, M. D., and de la Hoz, L2007. “Magnetic resonance imaging, rheological properties, and pHysicochemical characteristics of meat systems with fibrinogen and thrombin”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 55(23), 9357–9364.
12. Kara, S., Mueller, J. J., andLiese, A. 2011.“ Online analysis methods for monitoring of bioprocesses”. ChimicaOggi/ Chemistry Today, 29(2), 38–41.
13. Keeton, J. T., Hafley, B. S., Eddy, S. M., Moser, C. R., McManus, B. J., andLeffler, T. P. 2003. “Rapid determination of moisture and fat in meats by microwave and nuclear magnetic resonance analysis—PVM 1:2003”. Journal of AOAC International, 86(6), 1193–1202.
14. Lamanna, R., Piscioneri, I., Romanelli, V., and Sharma, N. 2008. “A preliminary study ofsoft cheese degradation in different packaging conditions by ^{1}H-NMR”. Magnetic Resonance in Chemistry, 46(9), 828–831.
15. Lolli, M., Bertelli, D., Plessi, M., Sabatini, A. G., andRestani, C. 2008. “Classification of Italian honeys by 2D HR-NMR”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56(4), 1298–1304.
16. Mannina, L., Cristinzio, M., Sobolev, A. P., Ragni, P., and Segre, A. 2004. “High-field nuclear magnetic resonance (NMR) study of truffles (Tuber aestivumvittadini)”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52(26), 7988–7996.
17. Marcone, M. F., Wang, S., Albabish, W., Nie, S., Somnarain, D., & Hill, A. 2013. Diverse food-based applications of nuclear magnetic resonance (NMR) technology. Food Research International, 51(2), 729-747.
18. Mariette, F.. 2009. “Investigations of food colloids by NMR and MRI”. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 14(3), 203–211
19. Miyake,Y., Yokomizo, K., andMatsuzaki, N1998.. “Determination of unsaturated fatty acid composition by high-resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy”. Journal of the American Oil Chemists' Society, 75(9), 1091–1094.
20. Nestor, G., Bankefors, J., Schlechtriem, C., Brännäs, E., Pickova, J., and Sandström, C. 2010. “High-resolution magic angle spinning NMR spectroscopy of intact Arctic char (Salvelinusalpinus) muscle. Quantitative analysis of n−3 fatty acids, EPA and DHA”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 58(20), 10799–10803.

21. Novoa-Carballal, R., Fernandez-Megia, E., Jimenez, C., andRiguera, R. 2011.NMR methods for unravelling the spectra of complex mixtures. Natural Product Reports, 28(1), 78–98.
22. Ogrinc, N., Kosir, I. J., Spangenberg, J. E., andKidric, J. 2003. “The application of NMR and MS methods for detection of adulteration of wine, fruit juices, and olive oil”. A review. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 376(4), 424–430.
23. Otero, L., andPréstamo, G. 2009. “Effects of pressure processing on strawberry studied by nuclear magnetic resonance”. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 10(4), 434–440.
24. Oztop, M. H., Rosenberg, M., Rosenberg, Y., McCarthy, K. L., and McCarthy, M. J. 2010.“ Magnetic resonance imaging (MRI) and relaxation spectrum analysis as methods to investigate swelling in whey protein gels”. Journal of Food Science, 75(8), E508–E515.
25. Pearce, K. L., Rosenvold, K., Andersen, H. J., and Hopkins, D. L. “Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes—A review”. Meat Science, 89(2), 111–124. 2011.
26. Pedersen, H., Munck, L., andEngelsen, S. 2000.“ Low-field ^{1}H nuclear magnetic resonance and chemometrics combined for simultaneous determination of water, oil, and protein contents in oilseeds”. Journal of the American Oil Chemists' Society, 77(10),1069-1077.
27. Pentimalli, M., Capitani, D., Ferrando, A., Ferri, D., Ragni, P., and Segre, A. L. 2000. “Gamma irradiation of food packaging materials: An NMR study”. Polymer, 41(8), 2871–2881.
28. Sequi, P., Dell'Abate, M. T., andValentini, M. 2007. “Identification of cherry tomatoes growth origin by means of magnetic resonance imaging”. Journal of the Science of Food and Agriculture, 87(1), 127–132.
29. Shintu, L., Caldarelli, S., andFranke, B. M. 2007. “Pre-selection of potential molecular markers for the geograpHic origin of dried beef by HR-MAS NMR spectroscopy”. Meat Science, 76(4), 700–707.
30. Tenailleau, E. J., Lancelin, P., Robins, R. J., andAkoka, S. 2004. “Authentication of the origin of vanillin using quantitative natural abundance ^{13}CNMR”. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 52(26), 7782–7787.
31. van de Velde, F., Knutsen, S. H., Usov, A. I., Rollema, H. S., andCerezo, A. S. 2002.“^{1}H and ^{13}C high resolution NMR spectroscopy of carrageenans: Application in research and industry”. Trends in Food Science and Technology, 13(3), 73–92.
32. Vereecken, J., Foubert, I., Smith, K. W., Sassano, G. J., andDewettinck, K. 2010. “Crystallization of model fat blends containing symmetric and asymmetric monounsaturated triacylglycerols”. European Journal of Lipid Science and Technology, 112(2), 233–245.
33. Yilmaz, A., Nyberg, N., Mølgaard, P., Asili, J., andJaroszewski, J. 2010. “^{1}H NMR metabolic fingerprinting of saffron extracts”. Metabolomics, 6(4), 511–517.
34. Zur, K., Heier, A., Blaas, K., andFauhl-Hassek, C. 2008. “Authenticity control of pistachios based on ^{1}H- and ^{13}C-NMR spectroscopy and multivariate statistics”. European Food Research and Technology A, 227(4), 969–977.

Applications of nuclear magnetic resonance (NMR) technology in food processing (a review)

Abstract

Nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy is one of the most common investigative techniques used by both chemists and biochemists. Food scientists have also explored the use of both NMR and MRI and continue to develop a wide range of applications for food analysis and food processing. Topics covered include chemical compositional analysis and structural identification of functional components in foods, determination of composition and formulation of packaging materials, detection of food authentication, optimization of food processing parameters, and inspection of microbiological, physical and chemical quality of foods. This review also emphasizes the pros and cons of specific NMR applications in the analysis of representative foods such as wine, cheese, fruits, vegetables, meat, fish, beverages (i.e. tomato juice and pulp, green tea, coffee) and edible oils, as well as discussing both the challenges and future opportunities in NMR applications in food science.

Keywords: Nuclear magnetic resonance, Magnetic resonance imaging, Foods, Processing, Packaging.