



DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI
ZSELATIN ALAPÚ ÉDESIPARI TERMÉK REOLÓGIÁJÁNAK JELLEMZÉSE

készítette:

Csima György

konzulens:

† **Dr. Fekete András DSc**

Dr. habil. Vozáry Eszter CSc

**Budapesti Corvinus Egyetem – Élelmiszertudományi Kar
Fizika-Automatika Tanszék**

Budapest, 2015.

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori iskola

tudományága: élelmiszertudományok

vezetője: **Dr. Felföldi József**

egyetemi tanár, PhD

Budapesti Corvinus Egyetem, Élelmiszertudományi Kar,

Fizika-Automatika Tanszék

Témavezetők: † **Dr. Fekete András**

professor emeritus, DSc

Budapesti Corvinus Egyetem, Élelmiszertudományi Kar,

Fizika-Automatika Tanszék

Dr. habil. Vozáry Eszter

egyetemi magántanár, PhD

Budapesti Corvinus Egyetem, Élelmiszertudományi Kar,

Fizika-Automatika Tanszék

A jelölt a Budapesti Corvinus Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, az értekezés műhelyvitájában elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, azért az értekezés nyilvános vitára bocsátható.

.....
Dr. Felföldi József PhD

Az iskolavezető jóváhagyása

.....
Dr. habil. Vozáry Eszter CSc

A témavezető jóváhagyása

1. A munka előzményei, a kitézött célok

A gumicukorka igen kedvelt édesipari termék, Fogyasztása általánosnak mondható a népesség körében korra, nemre, lakhelyre való tekintet nélkül. Ezt mi sem bizonyítja jobban, hogy ma már funkcionális élelmiszerként is forgalmazzák.

A gumicukorka minőségét elsősorban az állományi tulajdonságok határozzák meg. Az állomány vizsgálata már önmagában is érdekes terület, hiszen nehéz egy összetett, szubjektív érzetet objektív eszközökkel leírni, nemhogy modellezni. Az érzékszervi vizsgálatok során számos olyan összetett rágási tulajdonságot le tudnak írni a bírálók, amelyeket műszeresen mérni kimondottan nehéz mérnöki feladat. Mivel azonban az érzékszervi vizsgálati módszerek eredményei nehezen ültethetőek át a gyártási gyakorlatba, ezért valós ipari igény mutatkozik az állományi tulajdonságok műszeres mérhetőségére.

Munkám célja tehát a zselatin alapú gumicukorka ismert állományi tulajdonságainak objektív, reológiai módszerekkel történő leírása úgy, hogy az alkalmas legyen későbbiekben akár a szubjektív érzékszervi vizsgálatok eredményeivel való összevetésre is. Dolgozatomnak azonban nem része a műszeres és az érzékszervi állományvizsgálati eredmények összehasonlítása. Továbbá jelen dolgozat kizárólag a zselatin alapú gumicukorkák vizsgálatával foglalkozik.

Munkám további célja a gumicukorka különböző hőmérsékleteken történő tárolása során bekövetkező állományi változásainak nyomon követése Texture Profile Analysis (TPA) és Creep-Recovery Test (CRT) mérési görbék paramétereinek segítségével. Céлом a TPA görbékből meghatározni többek között a gumicukorka keménységét, kohézióját, ragacsosságát, amelyek műszeresen is jól mérhető érzékszervi tulajdonságok. Céлом továbbá olyan többemű reológiai modell illesztése, amely a CRT görbének mind a kúszási, mind a kirugózási szakaszait ugyanazon, de számértékileg legalábbis nagyon hasonló paraméterekkel tudja leírni.

2. Anyag és módszer

2.1. A gumicukorka

A kísérletekhez végig ugyanazon kiskereskedelmi forgalomban is kapható, zselatin alapú gumicukorkákat használtam. A felhasznált gumicukorkák egy nagy nemzetközi édesipari cég hazai leányvállalatának piacvezető termékei voltak. A kísérletekhez felhasznált gumicukorkákat a vizsgálatok megkezdéséig eredeti kiszerelésben és bontatlan csomagolásban tároltam fénytől védve, alacsony hőmérsékleten (hűtőszekrényben). A rövid- és hosszúidejű tárolási kísérletek mintáit is eredeti kiszerelésben, sértetlen csomagolásban tároltam adott hőmérsékleteken. A mérések során törekedtem arra, hogy a csomagolást csak közvetlenül a mérés előtt bontsam ki.

2.2. Az alkalmazott műszer és az alkalmazott vizsgálati módszerek

A méréseket a tanszéken rendelkezésemre álló Stable Micro Systems Ltd. gyártmányú TA-XT.2 állományvizsgáló készülékkel végeztem, $\varnothing=75$ mm átmérőjű, hengeres, sík nyomófelszínű alumínium mérőfejjel (gyári jel: P75). A kapott görbékéből a megfelelő jellemzőket a Texture Exponent 1.21. és az MS Office® Excel 2003, valamint Excel 2010 szoftverek segítségével számítottam ki.

A Texture Profile Analysis (TPA) általánosan elterjedt, szinte szabványosan használt módszer a különböző élelmiszerek állományi tulajdonságainak jellemzésére. Maga a TPA teszt egy, a rágást imitáló ismétléses kompressziós ciklus, melynek számos mérési paramétere tetszés szerint állítható. A mérés során az erő (illetve a nyomófeszültség), a (relatív) deformáció és az időadatok kerülnek rögzítésre. A módszer célja a minta fogyasztás során (rágás közben) érzékelt állományi tulajdonságainak objektív meghatározása és az egyes minták összehasonlítására alkalmas mennyiségi mérőszámokkal való jellemzése. Fontos hangsúlyozni, hogy a módszer ugyan szolgáltat információt a minta szerkezeti tulajdonságairól, de szerkezeti modellezésre nem alkalmas, mivel a fogyasztás során érzékelt tulajdonságokat (pl. rágósság) méri, nem a szerkezeti jellemzőket (pl. rugalmassági modulus).

A Creep-Recovery Test (CRT) összetett reológiai vizsgálati módszer, amely magában foglal egy kúszási és egy speciális relaxációs vizsgálatot is. Maga a teszt 4 lépésből áll: terhelés – kúszás – tehermentesítés – kirugózás. A kúszás során a terhelést állandó erő értéken rögzítjük meghatározott ideig (ez a kúszási idő), ez alatt mérjük a vizsgált minta deformációjának növekedését (kúszását). A kirugózás során állandó zérus erő mellett meghatározott ideig mérjük a minta deformációjának csökkenését oly módon, hogy a mérőfej hozzáér a mért mintához, de nem terheli azt. A CRT módszer célja a vizsgált minta kúszási és kirugózási görbéje alapján a minta reológiai paramétereinek meghatározása. A módszer lehetővé teszi a vizsgált minta reológiai modellezését, hiszen a különböző reológiai modellekből levezethető reológiai alapegyenletek illeszthetőek a mérési görbék pontjaira

2.3. Az elvégzett kísérletek

2.3.1. Tárolási hőmérséklet hatása a TPA és CRT görbék paramétereire

A zselatin gél lágyulási/dermedési pontja függ a zselatin koncentrációtól: 10%-os koncentráció esetén a gél lágyulási pontja 29°C körül van. A gumicukorka a tárolás során sokszor ennél magasabb hőmérsékletnek van kitéve (szállítás, polcon tárolás, otthoni elhelyezés, stb.). A kísérletek célja ezért a tárolási hőmérsékletnek a gumicukorka reológiai paramétereire való hatásának vizsgálata volt. A tárolás során nagy valószínűséggel előforduló hőmérsékleteken végeztem méréseket. A mérési sorozatban a bontatlan, gyári csomagolású mintákat tíz csoportban, különböző hőmérsékleteken (14°C, 16°C, 18°C, 20°C, 22°C, 24,5°C, 26°C, 28°C, 30°C, és 32°C) tároltam 72 órán keresztül 50%±10% relatív páratartalom mellett. A méréseket szobahőmérsékleten végeztem. Minden egyes tárolási hőmérsékleten két zacskót tároltam és a két zacskóból összesen 20 mintát mértem meg.

2.3.2. Hosszú idejű tárolási kísérlet

A kísérlet célja a tárolási körülmények (hőmérséklet, idő) hatásának vizsgálata a gumicukorka reológiai paramétereire a gyártó által vállalt minőség megőrzési idő alatt. A

bontatlan, gyári csomagolású mintákat négy csoportra osztva, négy különböző hőmérsékleten (15°C, 20°C, 25°C és 30°C) tároltam 12 hónapig keresztül (2011.06.01-től 2012.06.01-ig) hőmérséklet szabályzással ellátott 10 liter űrtartalmú hűtőládákban. A tárolás kezdetén, valamint minden tárolási hónap elején 2-2 zacskót vettem ki a hűtőládákból. Csoportonként és mérési módszerenként 30-30, összesen 3120 mintát mértem meg TPA és CRT módszerrel (4 hőmérséklet x 2 módszer x 13 alkalom x 30 ismétlés = 3120 minta).

2.3.3. CRT beállításainak vizsgálata

A kísérlet célja annak eldöntése, hogy a CRT módszer három fő paramétere közül (terhelő erő, kúszási/kirugózási idő, és deformációs sebesség) melyik a legerősebb hatású az eredményekre nézve, illetve a gumicukorka esetében mely beállítások használata a legcélszerűbb. A méréseket szobahőmérsékleten végeztem, beállításonként 3-3 ismétléssel (összesen 5 erő * 5 idő * 5 sebesség * 3 ismétlés = 375 mérés). A mért adatokból adatredukció után egy 2^3 típusú teljes faktoros kísérletterv elemzését végeztem el.

2.3.4. Reológiai modell illesztése

A kísérlet célja a gumicukorka reológiai modelljének meghatározása CRT módszer segítségével. A gumicukorkákat szobahőmérsékleten mértem meg, 20-20 ismétléssel minden mérési beállításban (5 erő * 20 ismétlés = 100 mérés). A kapott CRT görbék erő, deformáció és idő adatsoraiból kivágtam a kúszási és a kirugózási szakaszokat. Az egyes gumicukorkák terheléssel párhuzamos méretének (azaz a minta magasságának) ismeretében kiszámoltam a relatív deformáció (ϵ) változását az egyes szakaszokra. Ezekre az $\epsilon(t)$ adatsorokra négy különböző, többemeles reológiai modell (3 elemű Thomson-, 4 elemű Burgers-modell és ezek nyújtott exponenciális változatai) alapegyenlete szerinti görbékkel illesztettem mind a kúszási- mind a kirugózási szakaszokra. Az illesztett görbékkel meghatároztam a reológiai paramétereket (E_0 , E_r , η , η_v). Összehasonlítottam a kapott reológiai paraméterek értékeit a ugyanazon modell kúszási és a kirugózási szakasza között, ugyanazon modell sima és nyújtott exponenciális változata között, valamint a 3 és a 4 elemű modellek között.

3. Eredmények

3.1. Tárolási hőmérséklet hatása a TPA és CRT görbék paramétereire

A TPA paraméterek közül a keménység, az erő-deformáció arány, a ragacsosság csökkent, a kohézió alig növekedett, az erőarány változatlan volt a hőmérséklet növelésével. A CRT paraméterek közül az erő-deformáció arány csökkent a hőmérséklet növekedésével, míg a deformáció viszonyok 26°C alatt állandóak voltak, felett az E/D_{\max} arány csökkent, a P/D_{\max} és az E/P arány csökkent.

A TPA és CRT görbék leolvasott, illetve számított paraméterei azt mutatják, hogy 26°C körül megváltozik a zselatin alapú gumicukorka szerkezete. A paraméterek hőmérsékletfüggése két kivétellel mind 26°C alatt, mind 26°C felett Arrhenius-típusú exponenciális karakterisztikával volt jellemezhető, azonban az Arrhenius-típusú összefüggés paraméterei 26°C alatt és felett jelentősen különböztek, amely szerkezetváltozásra utal (lágylás/olvadáspont).

3.2. Hosszú idejű tárolási kísérlet eredményei

A hosszúidejű tárolás eredményei alapján megállapítható, hogy a gumicukorka a tárolás során keményedik (keménység, erő-deformáció arány, ragacsosság növekszik), csökken a rugalmas jellege (E/D_{\max} arány csökken) és nő a plaszticitása (P/D_{\max} és P/E arány nő). Ez a folyamat alacsony tárolási hőmérsékleten lassabban, magasabb hőmérsékleten gyorsabban zajlik. A termék a minőségét alacsony (15°C) hőmérsékleten történő tárolás során őrizte meg a legjobban.

3.3. CRT beállításainak vizsgálata

A kapott eredmények alapján egyértelmű, hogy mindhárom faktornak van hatása a mért CRT paraméterek többségére. Az is megállapítható, hogy a terhelő erő minden esetben szignifikáns hatással van a mérési eredményekre. A várakozásaimmal ellentétben a kúszási és kirugózási időnek volt a második legjelentősebb szignifikáns hatása. A deformációs sebességnek csak a kúzás mértékére volt szignifikáns hatása. A keresztthatások mértéke

nem szignifikáns. Mindegyik vizsgált paraméter esetében az illesztett többváltozós lineáris modell adekvátnak bizonyult $\alpha=0,05$ megbízhatósági szinten.

3.4. Reológiai modell illesztése

A reológiai modellek közül a nyújtott exponenciális Burgers-modell bizonyult alkalmasnak a zselatin alapú gumicukorka állományának jellemzésére. A kúszási és kirugózási szakaszból számított reológiai paraméterek értéke közel azonos volt. A β exponenciális kitevő értéke arra utal, hogy a gumicukorka jellegzetesen viszkoelasztikus állománya nem jellemezhető egyetlen retardációs és relaxációs idővel, hanem csak egy eloszlás spektrummal, amely több, különböző nagyságú retardációs és relaxációs időt is tartalmaz. A reológiai modell paraméterei (E_0 , E_r , η , η_v) a vizsgált feszültségtartományban (10-40 kPa) lineárisan függenek a terhelő feszültségtől.

3.5. Új tudományos eredmények

1. A zselatinnal készült gumicukorkák hosszú idejű tárolása során a Texture Profile Analysis (TPA) paraméterei közül a keménység (F_1 , ill. F_2), az erő-deformáció arány (F_1/D_1 , ill. F_2/D_2), valamint a ragacsosság ($F_1 \cdot (A_2/A_1)$) paraméterek értéke lineárisan növekedett. A kohézió (A_2/A_1) paraméter értéke kismértékben lineárisan csökkent, míg az erőarány (F_2/F_1) értéke független volt a tárolási idő hosszától.
2. A zselatinnal készült gumicukorkák hosszú idejű tárolása során a Texture Profile Analysis (TPA) paraméterei közül a keménység (F_1 , ill. F_2), az erő-deformáció arány (F_1/D_1 , ill. F_2/D_2), valamint a ragacsosság ($F_1 \cdot (A_2/A_1)$) paraméterek értéke a tárolási hőmérséklet növelésével exponenciálisan csökkent Arrhenius-típusú karakterisztika szerint. A kohézió (A_2/A_1) és az erőarány (F_2/F_1) paraméter értéke a tárolási hőmérséklet növelésével exponenciálisan növekedett.
3. A zselatinnal készült gumicukorkák hosszú idejű tárolása során a Creep Recovery Test (CRT) paraméterei közül az erő-deformáció arány (F/D_1 ; ill. F/D_{\max}) paraméterek értéke kismértékben lineárisan növekedett. A deformáció viszonyok (E/D_{\max} , P/D_{\max} , ill. P/E) értéke szigmoid görbével volt leírható.

4. A zselatinnal készült gumicukorkák hosszú idejű tárolása során a Creep Recovery Test (CRT) paraméterei közül az erő-deformáció arány (F/D_1 ; ill. F/D_{\max}) paraméterek értéke a tárolási hőmérséklet növelésével exponenciálisan csökkent Arrhenius-típusú karakterisztika szerint. A deformáció viszonyok (E/D_{\max} , P/D_{\max} , ill. P/E) értéke 26°C alatt állandó volt, 26°C felett exponenciálisan változott Arrhenius-típusú karakterisztika szerint.
5. A zselatinnal készült gumicukorkák esetében a hőmérsékletfüggésben 26°C -on töréspont található, ami a gumicukorka fázisátalakulásával (láguláspont) magyarázható. A gumicukorka magas szénhidrátartalma alapján a fázisátalakulás feltételezhetően másodrendű. Mind a TPA, mind a CRT paraméterek változási sebessége 26°C felett 2-3-szorosa a 26°C alatti változási sebességnek.
6. A zselatinnal készült gumicukorkákon Creep-Recovery Test (CRT) módszerrel mért görbék kúszási és kirugózási szakaszaira illesztett különböző reológiai modellgörbék statisztikai mutatói alapján a négyelemű Burgers-modell igazolhatóan sokkal jobb közelítést adott, mint a háromelemű Thomson-modell, illetve a nyújtott exponenciális modell igazolhatóan pontosabb illeszkedést adott, mint az exponenciális modell. A nyújtott exponenciális β kitevő értéke a Thomson-modellre 0,5, a Burgers-modellre 0,64. A CRT görbék kúszási és kirugózási szakaszaira illesztett reológiai modellgörbék paramétereiből visszszámolt reológiai paraméterek az egyes reológiai modellek esetében kis eltéréssel megegyeznek. Ezen megállapítások alapján a gumicukorkák komplex reológiai jellemzésére a nyújtott exponenciális Burgers-modell bizonyult a legalkalmasabbnak.
7. A gumicukorkákon mért CRT mérési görbék esetében a vizsgált terhelési feszültség tartományon belül az összes reológiai paraméter (E_0 , E_r , η , η_v) értéke lineárisan függött a terhelő feszültségtől. Ennek eredményeként a háromelemű Thomson-modell 6(+1), a négyelemű Burgers-modell 8(+1) paraméterrel jellemezhető. A nyújtott exponenciális modellek esetében a +1 paraméter a β exponenciális kitevő.

4. Következtetések és javaslatok

4.1. Következtetések

- Az elvégzett kísérletek és mérések alapján a TPA, mint dinamikus állományvizsgálati mérési módszer alkalmas a zselatin alapú gumicukorka rágási tulajdonságainak jellemzésére és ezáltal összehasonlítható a rágás érzékszervi tulajdonságaival és az érzékszervi vizsgálati eredményekkel.
- A CRT, mint statikus állományvizsgálati mérési módszer alkalmas a zselatin alapú gumicukorka reológiai viselkedésének modellezésére. A mérési görbéről leolvasott, illetve számított paraméterek jól jellemzik az állomány változását különböző tárolási körülmények között.
- A reológiai modellek közül a 4 elemű nyújtott exponenciális Burgers-modell adta a legszorosabb illeszkedést mind a kúszási, mind a kirugózási szakaszokra, így alkalmas a gumicukorka reológiai viselkedésének komplex leírására.

4.2. Javaslatok

- A TPA módszer esetében célszerűnek tűnik új, részletesebb mérések végzése az idő- és hőmérsékletfüggés vizsgálatára. Új mérési sorozat felvétele szükséges különböző nagyságú mérőfejekkel és eltérő mérőfej sebességekkel a környezeti hőmérséklet hatásának vizsgálatára.
- A hosszú idejű tárolási kísérlet alatt felvett CRT mérési görbék kúszási és kirugózási szakaszaira a nyújtott exponenciális Burgers-modell illesztése és a modell paraméterek (E_0 , E_r , η , η_v) meghatározása a zselatin alapú gumicukorka reológiai paramétereinek idő- és hőmérsékletfüggésének leírásához.
- A reológiai modellezés esetében a frakcionált kalkulus (törtkitevőjű differenciálegyenlet) alkalmazásával vizsgálható a mérési görbékre illeszthető reológiai modell. Az így nyert modellek egyenleteit illesztve a mért görbékre pontosítható a zselatin alapú gumicukorka reológiai viselkedését leíró modell.

- Mindenképpen szükséges a reológiai modellezés és a tárolás alatt megfigyelt folyamatok igazolásához az alaposabb szerkezetvizsgálat. Ehhez egyrészt DSC kalorimetriás mérések szükségesek, másrészt képalkotó módszerek (röntgen diffrakció, elektronmikroszkópos eljárások).
- Mindenképpen érdemes a kutatást kiterjeszteni más összetételű gumicukorkákra (pl. a zselatin mellett keményítőt/pektint/egyéb zselésítő anyagot is tartalmazó ún. kombinált gélek). Szóba jöhet bármilyen más félszilárd-félfolyékony (semisolid) élelmiszeripari gél vizsgálata is.

5. Publikációs lista (témakörhöz kapcsolódó)

Impakt faktoros folyóiratcikkek:

- Csima, Gy., & Vozáry, E. (2015): New results in rheological modeling of gum candy. publikálásra elfogadva: 2015.05.07., várható megjelenés: *Acta Alimentaria* 45 (3), DOI: 10.1556/AAlim.2015.5555. (IF_{2013/2014}: 0,427)
- Csima, Gy., Dénes, L.D. & Vozáry, E. (2014): A possible rheological model of gum candies. *Acta Alimentaria* 43:(Suppl. 1), pp. 36-44., DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/AAlim.43.2014.Suppl.6> (IF_{2013/2014}: 0,427)

Teljes konferenciaanyagok idegen nyelven:

- Csima, Gy., Várvolgyi, E. & Eszter Vozáry (2014): Effect of non-ideal storage conditions on candy gum quality. *International Conference of Agricultural Engineering - AgEng 2014 Zürich*. Paper C0482. (ISBN:978-0-9930236-0-6); <http://www.geyseco.es/geystiona/adjs/comunicaciones/304/C04820001.pdf>, <http://www.geyseco.es/geystiona/adjs/comunicaciones/304/P04820002.pdf>
- Csima, Gy., Vozáry, E., Yorov, T.I. & Marudova, M. (2014): Rheological model of gum candy. *International Scientific-Practical Conference "Food, Technologies & Health"*. Proceedings Book, pp. 150-155.
- Csima, Gy. & Vozáry, E. (2014): Effect of Measure Settings on Creep-Recovery Test Results of Candy Gums. *3rd International Conference of CIGR Hungarian National*

- Committee and Szent István University, Faculty of Mechanical Engineering.* In: Magó László, Kurják Zoltán, Szabó István (szerk.): Synergy 2013 - CD of Full Papers: Paper N06-4-180. (ISBN:978-963-269 359-0)
- Csima, Gy. & Vozáry, E. (2013): Modelling the Rheological Behavior of Candy Gums. *Food Science Conference 2013 - With research for the success of Darányi Program.:* Dalmadi I, Engelhardt T, Bogó-Tóth Zs, Baranyai L, Bús-Pap J, Mohácsi-Farkas Cs (szerk.): Food Science Conference 2013 - With research for the success of Darányi Program: Book of proceedings. pp. 64-67. (ISBN:978-963-503-550-2)
 - Csima, Gy., Kaszab, T. & Fekete, A. (2011): Relationship between Mechanical-Rheological and Sensory Attributes of Foods. *Synergy 2011 – II. International Conference of the CIGR Hungarian National Committee, the Faculty of Mechanical Engineering of the Szent István University, and the Agricultural Engineering.* In: Magó László, Kurják Zoltán, Szabó István (szerk.): CD of Full Papers, Paper Working Session I. Food Engineering (S2) (ISBN:978-963-269-250-0)
 - Kaszab, T., Csima, Gy., Lambert-Meretei, A. & Fekete, A. (2011): Food Texture Profile Analysis by Compression Test. *CNEUCOOP International Conference 2011.* In: CNEUCOOP International Conference 2011. Paper session 3 gyorgycsima.pdf ; http://korny.uni-corvinus.hu/cneucoop_fullpapers/s3/gyorgycsima.pdf
 - Vozáry, E., Krisán. Á.O. & Csima, Gy. (2011): Rheological Properties of Gummy Confections. *PRAE 2011 Physics - Research - Applications - Education: Proceedings of Scientific Works.* In: Dr Monika Božiková, Dr Zuzana Hlaváčová, Peter Hlaváč, František Adamovský (szerk.): 2011 Physics - Research - Applications - Education: Proceedings of Scientific Works 2011. pp. 150-154.
 - Csima, Gy., Biczó, V., Kaszab, T. & Fekete, A. (2010): Methods for the assessment of candy gum elasticity. *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR).* In: Paper p. 101167.
 - Csima, Gy., Kaszab, T. & Fekete, A. (2010): Influence of storage condition on candy gum quality. *International Conference on Agricultural Engineering.* In: Roger Genet (szerk.): International Conference on Agricultural Engineering. Paper REF478.