

유채 종자의 물리적 특성(II)

홍상진 Le Anh Duc 한재웅 김 훈 김유호 금동혁

Physical Properties of Rapeseed (II)

S. J. Hong L. A. Duc J. W. Han H. Kim Y. H. Kim D. H. Keum

Abstract

Some physical properties of rapeseed were measured at five moisture levels of 10.03, 14.91, 20.07, 25.06 and 30.12% (w.b.), which include frictional properties (coefficient of static friction, emptying and filling angle of repose) and aerodynamic properties (terminal velocity and drag coefficient).

The physical properties of rapeseed were evaluated as a function of seed moisture content. In the moisture content range, the coefficients of static friction, emptying and filling angle of repose increased linearly with increase of moisture content.

The maximum values of coefficients of static friction were on the acrylic surface, varied from 0.34 to 0.43; the next is on the galvanized steel, varied from 0.30 to 0.38; and the minimum were on stainless steel surface, varied from 0.27 to 0.35. Emptying and filling angle of repose varied from 26.12 to 29.62 and 23.83 to 27.05 degrees, respectively.

Terminal velocity increased linearly from 3.47 to 3.91 m/s with increase of moisture content. Drag coefficient varied from 1.84 to 1.64 as the moisture content increased. The relationship between drag coefficient and moisture content were expressed by non-linear equation.

Keywords : Rapeseed, Angle of repose, Coefficients of friction, Terminal velocity, Drag coefficient

1. 서론

바이오 디젤을 생산할 수 있는 원료로 유채종자, 대두, 팜, 코코넛, 해바라기씨 등이 있지만, 이모작이 가능하고 착유(榨油)율이 45% 이상으로 타 작물보다 높으며, 국내의 기후에서 생산이 용이한 유채 종자의 기름은 유동점이 낮아 겨울에 잘 얼지 않아 바이오 디젤 원료로서 최적의 재료로 선택되고 있다.

우리나라에서도 2007년부터 2009년까지 바이오 디젤 생산을 위한 유채생산 시범사업을 추진하고 있다. 전국 3개 지역을 시범단지로 선정하여 육종, 재배, 수확에 이르는 작업과 이것에 관련된 기계화를 진행하고 있다.

이러한 기계화 관련 연구를 수행하는데 필요한 정보중에서

물리적 특성은 건조, 저장용량, 이송시스템 등을 개발하기 위해 매우 중요한 특성으로 보고되고 있다(Baryeh, 2001; Santalla and Mascheroni, 2003).

본 연구의 목적은 국내에서 생산된 유채종자의 마찰 특성인 정지마찰계수와 안식각, 공기 역학적 특성인 종말속도 및 항력계수 등에 관련된 기초연구를 수행하여 건조, 저장, 이송 관련 기계화 기술에 필요한 정보를 제공하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 실험방법

공시재료는 2007년 6월 전라남도 영광지역에서 수확한 선

The article was submitted for publication on 2008-04-18, reviewed on 2008-05-13, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-06-10. The authors are Sang Jin Hong, Researcher, Le Anh Duc, Researcher, Jae Woong Han, Research Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, H. Kim, Researcher, Korea Food Research Institute, You Ho Kim, Senior Researcher, National Institute of Agricultural Engineering, and Dong Hyuk Keum, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University. Corresponding author: D. H. Keum, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea; E-mail: <dhkeum@skku.edu>.

망(*Brassica napus* L.) 품종의 유채 종자로 초기 함수율은 31.3%(w.b.)였다.

물리적 특성을 구명하기 위해 유채 종자는 자연건조 방법을 통하여 함수율 10.03, 14.91, 20.07, 25.06, 30.12%(w.b.) 등 5 수준의 시료로 구분하였다. 함수율 측정은 130℃-4 h-10 g 오븐법(ASAE standards, 2004)을 이용하여 측정하였다.

5수준으로 구분된 시료는 지퍼백을 2중으로 포장하여 시료 내부의 함수율 평형과 외부와의 수분이동이 없도록 하여 4℃ 저온저장고에서 1주일간 보관(Sedat et al., 2005)한 후 실험 전 상온에 24시간 동안 노출시켜 외기와 평형(ASAE standards, 2004)을 이루도록 하여 실험을 진행하였다.

1) 정지마찰계수

정지마찰계수는 그림 1과 같은 장치를 이용하여 측정하였다. 측정 평판이 수평면과 0~70° 범위로 조절 가능한 레버가 설치된 장치에 갈바늄 강판, 스테인레스 강판 및 아크릴판 등 3종의 평판을 대상으로 함수율별로 측정하였다.

정지마찰계수의 측정은 300×250×20 mm 크기의 시료 용기에 시료를 채우고 경사 조절 레버를 손으로 천천히 돌리면서 유체가 평판위에서 미끄러지는 순간 수평면과 이루는 각도를 측정하여 얻은 마찰각을 이용하여 정지마찰계수를 산출하였다.

측정은 함수율별로 5회 반복하여 측정하였으며, 반복 측정할 때마다 새로운 시료를 이용하여 측정하였다. 정지마찰계수(μ_s)는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\mu_s = \tan(\phi) \tag{1}$$

여기서, ϕ : 마찰각(°)

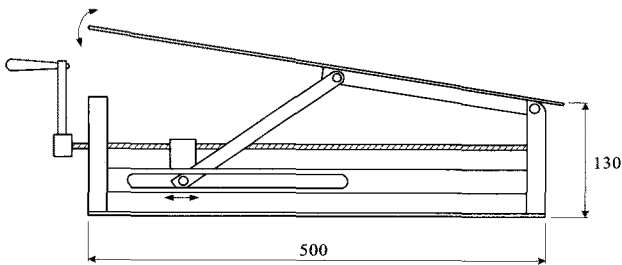


Fig. 1 Schematic diagram of equipment for determination of friction angle (unit: mm).

2) 안식각

안식각은 그림 2와 같은 실험 장치를 이용하여 측정하였다. 직육면체 형태로 구성된 실험장치의 크기는 700×400×900 mm로 내부를 쉽게 관찰할 수 있도록 옆면을 투명하게 제작

하였다. 실험 장치는 상단과 하단으로 구성되어 상단에서는 비움 안식각(emptying angle of repose)을 측정하고, 하단에서는 채움 안식각(filling angle of repose)을 측정할 수 있도록 하였다.

측정은 상단에 유체를 채우고 상단과 하단 사이에 있는 슬라이드 게이트를 열어 유체를 자유낙하 시킨다. 유체가 하단으로 자유낙하 되면서 상단에는 깔때기 모양으로 비워지고 하단에는 산 모양으로 유체가 쌓이게 된다. 이때 상단에서 나타난 깔때기 모양의 경사면과 수평면이 이루는 각도를 비움 안식각으로 측정하고, 하단에 나타난 산 모양의 경사면과 수평면이 이루는 각도를 채움 안식각으로 측정하였다. 비움 및 채움 안식각의 측정은 함수율별로 5회 반복하여 측정하였다.

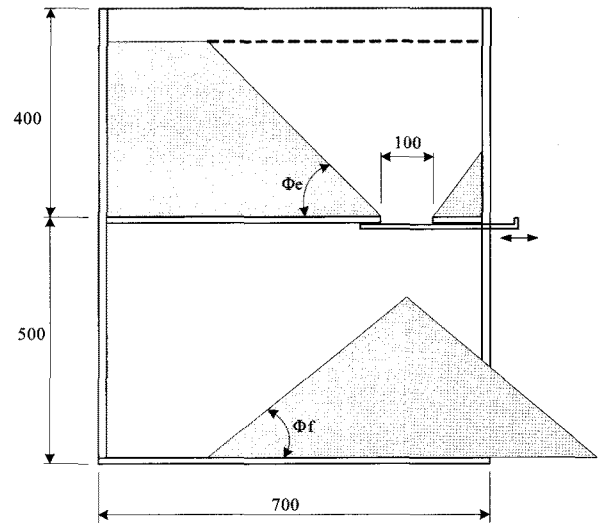


Fig. 2 Schematic diagram of equipment for determination of angle of repose (unit: mm).

3) 종말속도

종말속도는 그림 3과 같은 윈드 컬럼(wind column)을 이용하여 측정하였다. 종말속도 측정시스템은 수직직관을 이용하여 측정하였으며, 한국공업규격(KS B : 송풍기 실험방법)에 근거하여 풍동을 설계 제작하였다.

VS motor와 댐퍼로 송풍량을 조절 하였으며, 수직 풍동 내 각 지점에서의 풍속이 일정하도록 정류격자를 제작, 설치하였으며, 직경 10.0 cm의 아크릴 수직관 풍동 내에 스테인레스 망을 상, 하 2개 설치하였고, 수직 풍동의 높이를 최대 120.5 cm까지 조절할 수 있도록 직관부를 여러 개로 나누어 제작하였다. 또한, 송풍기(centrifugal type, 2.2 kW, 90 m³/min)의 송풍량을 정밀하게 제어하기 위하여 흡입 댐퍼와 VS motor를 설치하였다. 동압을 측정하여 풍속으로 환산하였으며, 동압 측정을 위하여 pitot tube와 고성능 디지털 마노미터

(2655, Yokogawa, Japan)를 이용하였다.

제작된 풍동의 성능평가는 한국공업규격(KS B : 송풍기 실험방법)에 준하여 실시하였는데 VS motor에 공급되는 전류를 조절하면서 12수준의 풍속 범위에서 각 20개 지점의 동압을 pitot tube와 고성능 디지털 마노미터로 측정하여 수직관 내의 각 지점에서의 유속분포와 조절 가능한 풍속 범위를 측정하였다.

종말속도 측정 시 외기온도는 18℃이었으며, 함수율별 5회 반복하여 측정하고 그 평균값을 이용하였다.

항력계수를 구하기 위해서 사용된 유체의 단면적은 유체의 구형률이 0.927~0.946으로 거의 구와 유사하기 때문에 유체의 평균직경을 이용하여 단면적을 계산하였다(Duc et al., 2008). 무차원 항력계수는 식 (2)를 이용하였다(Güner, 2007).

$$C_d = \frac{2mg}{v_i^2 \rho_a A} \quad (2)$$

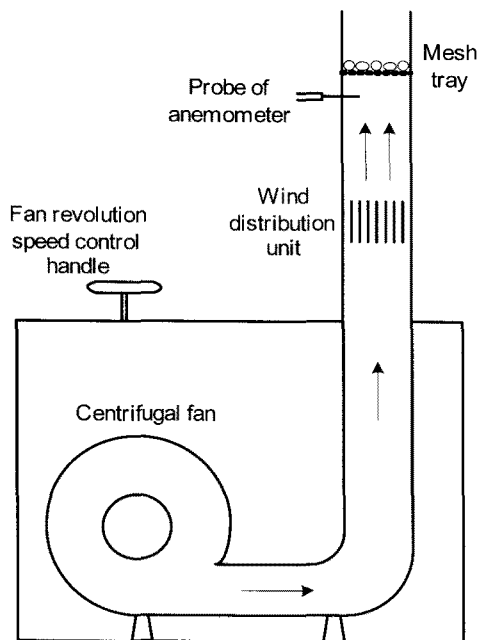


Fig. 3 Schematic diagram of wind column used for measurement of terminal velocity.

여기서, C_d : 항력계수(무차원)

m : 질량(kg)

g : 중력 가속도(m/s^2)

ρ_a : 공기 밀도(kg/m^3)

A : 단면적(m^2)

3. 결과 및 고찰

가. 정지마찰계수

정지마찰계수는 갈바늄 강판, 스테인레스 강판 및 아크릴 판 등 3종의 평판을 대상으로 5수준의 함수율별로 측정하였다. 평판별 정지마찰계수는 표 1에 나타내었다.

정지마찰계수는 측정된 평판 중 아크릴판에서 0.34~0.43으로 최대값을 나타내었으며, 갈바늄 강판은 0.30~0.38, 스테인레스 강판은 0.27~0.35 순으로 나타났다.

이와 같은 결과는 Milani 등(2007)의 호리병박씨 실험과 Baryeh(2002)의 기장 실험, Karababa(2006)의 옥수수 실험 및 Dursuna 등(2007)의 사탕무씨 실험과 유사하게 나타났다.

함수율과 정지마찰계수는 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났다으며, 각 평판별 함수율과 정지마찰계수와의 관계식은 식 (3)에서 식 (5)와 같다.

① 정지마찰계수:

+ Stainless steel

$$\mu_s = 0.2309 + 0.0041 \times M_c \quad (R^2 = 0.995) \quad (3)$$

+ Galvanized steel

$$\mu_s = 0.2498 + 0.0043 \times M_c \quad (R^2 = 0.985) \quad (4)$$

+ Acrylic

$$\mu_s = 0.2877 + 0.0048 \times M_c \quad (R^2 = 0.997) \quad (5)$$

여기서, M_c : 함수율(% w.b.)

나. 안식각

함수율이 증가함에 따라 비습 안식각은 26.12~29.62°로,

Table 1 Coefficient of static friction at different moisture contents

Moisture content, (% w.b.)	Coefficient of static friction*		
	Stainless steel sheet	Galvanized steel sheet	Acrylic sheet
10.03	0.27±0.006	0.30±0.006	0.34±0.008
14.91	0.29±0.004	0.31±0.008	0.36±0.009
20.07	0.32±0.008	0.34±0.010	0.39±0.006
25.06	0.33±0.007	0.35±0.009	0.41±0.006
30.12	0.35±0.007	0.38±0.008	0.43±0.009

*Average values of five measurements, standard deviations.

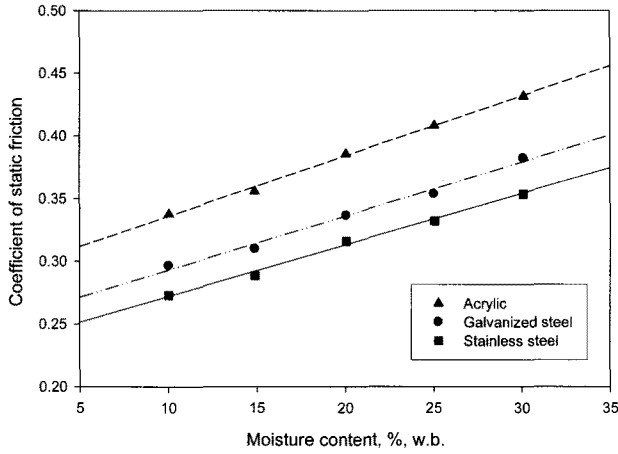


Fig. 4 Coefficient of static friction variation with moisture content.

채움 안식각도 23.83~27.05°로 모두 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 함수율인 경우 비움 안식각이 채움 안식각보다 큰 것으로 나타났으며, 각 함수율별 안식각 측정 결과는 표 2와 같다.

비움 및 채움 안식각과 함수율은 선형적인 관계를 나타내었으며 그림 5는 비움 및 채움 안식각과 함수율간의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 비움 및 채움 안식각과 함수율과의 관계식은 각각 식 (6), 식 (7)과 같다.

이와 같은 결과는 Mosoumi와 Tabil(2003)의 이집트콩 실험과

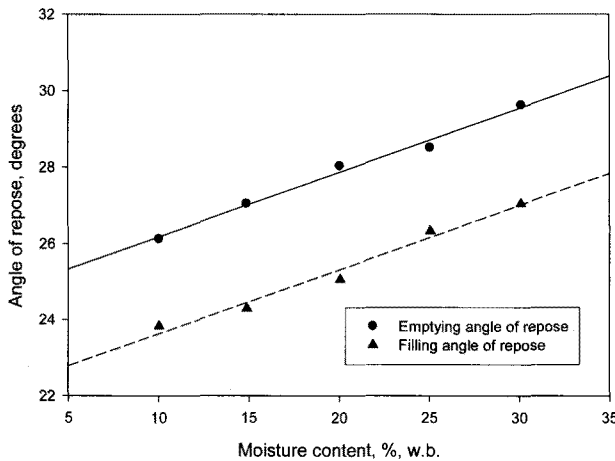


Fig. 5 Emptying and filling angle of repose variation with moisture content.

Table 2 Emptying and filling angle of repose at different moisture contents

Angle of repose (degrees)	Moisture content, (% w.b.)				
	10.03	14.91	20.07	25.06	30.12
Emptying*	26.12±0.340	27.04±0.269	28.03±0.563	28.51±0.414	29.62±0.296
Filling*	23.83±0.528	24.29±0.326	25.06±0.534	26.33±0.381	27.05±0.390

*Average values of five measurements, standard deviations.

Santalla와 Mascheroni(2003)의 해바라기씨 실험, Karababa (2006)의 옥수수 실험, Baryeh(2002)의 기장 실험 및 Dursuna 등(2007)의 사탕무씨 실험과 유사하게 나타났다.

① 비움 안식각(degrees)

$$\phi_e = 24.4917 + 0.1683 \times M_c \quad (R^2 = 0.986) \quad (6)$$

② 채움 안식각(degrees)

$$\phi_f = 21.9345 + 0.1686 \times M_c \quad (R^2 = 0.978) \quad (7)$$

다. 종말속도

함수율이 증가함에 따라 종말속도는 3.47~3.91 m/s로 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 항력계수는 1.84~1.64로 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그림 6은 함수율과 종말속도와의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 함수율별 종말속도와 항력계수의 측정 결과는 표 3에 나타내었다.

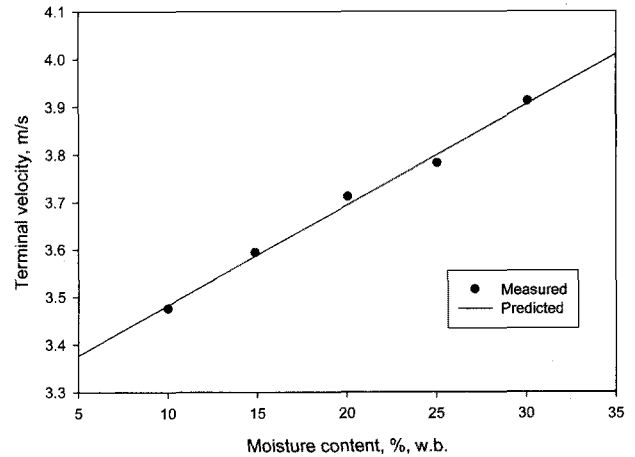


Fig. 6 Terminal velocity variation with moisture content.

본 연구의 종말속도 결과는 Khoshtaghaza와 Mehdizadeh (2006)의 밀 실험과 Júnior 등(2007)의 커피체리 및 커피콩 실험, Santalla and Mascheroni(2003)의 해바라기씨 실험, Karababa(2006)의 옥수수 실험, Baryeh(2002)의 기장 실험 및 Dursuna 등(2007)의 사탕무씨 실험과 유사하게 나타났다.

Table 3 Terminal velocity and drag coefficient at different moisture contents.

	Moisture content, (% w.b.)				
	10.03	14.91	20.07	25.06	30.12
Terminal velocity* (m/s)	3.47±0.054	3.59±0.020	3.71±0.071	3.78±0.071	3.91±0.074
Drag coefficient*	1.84±0.057	1.74±0.020	1.67±0.064	1.65±0.062	1.64±0.061

*Average values of five measurements, standard deviations.

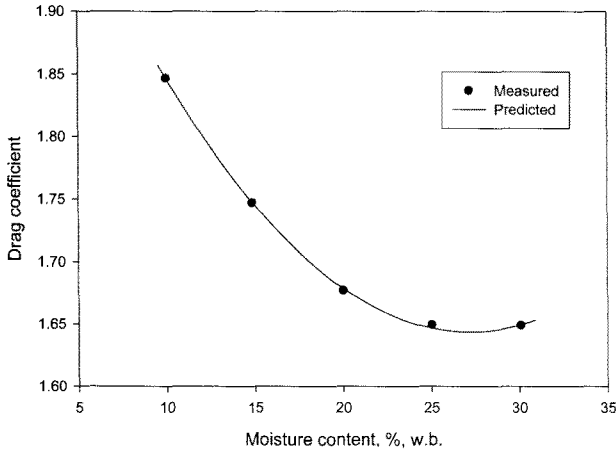


Fig. 7 Drag coefficient variation with moisture content.

또한 항력계수 결과는 Júnior 등(2007)의 커피체리 및 커피콩 실험, Santalla와 Mascheroni(2003)의 해바라기씨 실험과 유사하게 나타났다.

함수율과 종말속도와의 관계식은 식 (8)과 같으며, 함수율과 항력계수와의 관계식은 식 (9)와 같다. 그림 7은 함수율과 항력계수와의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

① 종말속도(m/s)

$$v_t = 3.2715 + 0.0211 \times M_c \quad (R^2 = 0.991) \quad (8)$$

② 항력계수

$$C_d = 2.152 - 0.0374 \times M_c + 0.0007 \times M_c^2 \quad (R^2 = 0.999) \quad (9)$$

4. 결론

본 연구는 국내에서 생산된 유채종자의 마찰 특성인 정지마찰계수와 안식각, 공기 역학적 특성인 종말속도 및 항력계수 등 물리적 특성에 관련된 기초 자료를 제공하고자 연구를 수행하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정지마찰계수는 측정된 평판 중 아크릴판에서 0.34~0.43으로 최대값을 나타내었으며, 갈바늄 강판은 0.30~

0.38, 스테인레스 강판은 0.27~0.35 순으로 나타났다.

- (2) 함수율과 마찰각 및 정지마찰계수는 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났으며, 함수율과 마찰각 및 정지마찰계수와의 관계를 회귀방정식을 이용하여 나타내었다.
- (3) 안식각은 함수율이 증가함에 따라 비움 안식각은 26.12~29.62°, 채움 안식각도 23.83~27.05°로 모두 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 동일한 함수율인 경우 비움 안식각이 채움 안식각보다 큰 것으로 나타났으며, 비움 및 채움 안식각과 함수율과의 관계를 회귀방정식을 이용하여 나타내었다.
- (5) 종말속도는 함수율이 증가함에 따라 3.47~3.91 m/s로 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.
- (6) 항력계수는 함수율이 증가함에 따라 1.84~1.64로 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 종말속도 및 항력계수와 함수율과의 관계를 회귀방정식을 이용하여 나타내었다.

참고 문헌

1. ASAE standards. 2004. Moisture measurement unground grain and seeds. ASAE S352.2:582-583.
2. Baryeh, E. A. 2001. Physical properties of bambara groundnuts. *Journal of Food Engineering* 47:321-326.
3. Baryeh, E. A. 2002. Physical properties of millet. *Journal of Food Engineering* 51:39-46.
4. Duc, L. A., J. W. Han, S. J. Hong, H. S. Choi, Y. H. Kim and D. H. Keum. 2008. Physical properties of rapeseed (I). *J. of Biosystems Engineering* 33(2):101-105. (In Korean)
5. Dursuna, I., K. M. Tugrul and E. Dursuna. 2007. Some physical properties of sugarbeet seed. *Journal of Stored Products Research* 43:149-155.
6. Güner, M. 2007. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. *Journal of Food Engineering* 80(3):904-913.
7. Júnior, P. C. A., P. C. Corrêa, F. A. C. Pinto and D. M. Queiroz. 2007. Aerodynamic properties of coffee cherries and beans. *Biosystems Engineering* 98:39-46.
8. Karababa, E. 2006. Physical properties of popcorn kernels. *Journal of Food Engineering* 72:100-107.

9. Khoshtaghaza, M. H. and R. Mehdizadeh. 2006. Aerodynamic properties of wheat kernel and straw materials. *Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal*. Vol. 8.
10. Masoumi, A. A. and L. Tabil. 2003. Physical properties of Chickpea (*C. arietinum*) cultivars. ASAE Paper No. 036058. ASAE, St. Joseph, Mich.
11. Santalla, E. M. and R. H. Mascheroni. 2003. Physical properties of high oleic sunflower seeds. *Food Science and Technology International* 9(6):435-442.
12. Sedat, C., M. Tamer, O. Hüseyin and Ö. Özden. 2005. Physical properties of rapeseed (*Brassica napus oleifera* L.). *Journal of Food Engineering* 69:61-66.