



## Tribological and Mechanical Properties of UHMWPE/HDPE Composites

Woo Seok Na<sup>\*</sup>, Kwang Ho Lee<sup>\*</sup>, Tae Woong Kong<sup>\*,\*\*</sup>, Jung Youn Baek<sup>\*\*\*</sup>, and Jeong Seok Oh<sup>\*,†</sup>

<sup>\*</sup>Department of Materials Engineering and Convergence Technology, ReCAPT, Gyeongsang National University, 501 Jinju-daero, Jinju 52828, Republic of Korea

<sup>\*\*</sup>Jeonnam Technopark, 1448-345, Goheungman-ro, Goheung-eup, Goheung-gun, Jeollanam-do, Republic of Korea

<sup>\*\*\*</sup>Bosung Poly-tech, 32, Nonggongdanji-gil, Beolgyo-eup, Boseong-gun, Jeollanam-do 59418, Republic of Korea

(Received December 13, 2018, Revised December 14, 2018, Accepted December 18, 2018)

**Abstract:** The influence of reinforcing UHMWPE powder on the tribological and mechanical properties of HDPE was investigated. The circularizing of UHMWPE powder was improved by high-speed rotation to enhance particle distribution and flowability. HDPE composites reinforced with UHMWPE powder in the range of 0–50 wt% were prepared by co-rotating twin screw extrusion. The abrasion resistance, plane friction coefficient, tensile strengths, and impact strengths of the composites were investigated as a function of the UHMWPE content. An increasing UHMWPE content decreased the plane friction coefficient and increased the abrasion resistance and impact strength. It is expected that HDPE composites reinforced with spherical UHMWPE powder particles can be used to improve the durability of products such as pipes in the future.

**Keywords:** HDPE, UHMWPE, friction, abrasion resistance, impact strength

### Introduction

폴리에틸렌(polyethylene, PE) 재료는 1930년대에 영국에서 처음으로 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene, LDPE)을 합성한 이후, 2차 세계대전 중 레이더 등의 군사무기의 절연 재료로 사용되면서 본격적으로 생산되기 시작하였다.<sup>1</sup> 1950년대에 지글러-나타(Ziegler-Natta) 촉매를 이용하여 합성하는 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE) 및 선형 저밀도 폴리에틸렌(linear low density polyethylene, LLDPE) 등이 개발되면서<sup>2</sup> 필름,<sup>3</sup> 용기,<sup>3</sup> 파이프 배관<sup>4</sup> 등 다양한 산업분야의 대표적인 범용 수지로 자리잡고 있다.<sup>4</sup>

초고분자량 폴리에틸렌(ultrahigh molecular weight polyethylene, UHMWPE)은 분자량이 100만 이상인 HDPE를 뜻하며 강한 소수성 및 낮은 마찰계수, 자기윤활성을 가진다.<sup>5</sup> 특히, 분자량이 50만 이상일 때 분자간의 얽힘(entanglement) 현상이 강하게 나타나 기계적 물성과 내마모성 등이 아주 강하다.<sup>6</sup> 이러한 특성으로 인해 기어(gear)나 베어링(bearing), 씰(seal) 등과 같은 마찰 및 마모 특성 관련 응용 분야에 사용되고 있다.<sup>7</sup>

UHMWPE는 녹는 점 이상에서도 분자간의 얽힘에 의해 나타나는 높은 점도로 제품 생산 시 가공성이 좋지 못하다.<sup>6,8</sup> 앞선 연구에서는 에폭시 수지에 혼합되는 충전제를 에폭시 수

지와 혼합시킨 뒤, 에폭시 복합체를 구형화하고 입도분포를 개선하여 액상 수지 내에서의 유동성 향상 및 효과적인 분산을 통해 상용성을 증가시킨 연구 결과도 있다.<sup>9</sup>

본 연구에서는 내마모성과 충격강도를 향상시키기 위해 UHMWPE 분말을 구형화하고 이를 충전한 HDPE 복합재료를 제조하여 이의 마찰, 마모 및 기계적 물성을 조사하였다.

### Experimental

#### 1. 재료

HDPE는 대한유화사의 P600BL (용융지수 0.23 g/10 min, 밀도 0.961 g/cm<sup>3</sup>), UHMWPE (평균분자량 1.5×10<sup>6</sup> g/mol, 밀도 0.94 g/cm<sup>3</sup>) 분말은 대한유화사의 VH150U를 사용하였다.

#### 2. UHMWPE 분말 구형화 처리

UHMWPE 분말의 입자 모양을 균일화 하기 위해 구형화 처리를 진행하였다. 구형화 처리는 고온 분쇄기(high temperature mill)을 이용해 이루어졌다. UHMWPE 분말을 고온 분쇄기 내에 투입하여 10분 동안 3000 rpm의 회전속도에서 처리하였다. 구형화 처리된 UHMWPE의 입도를 균일화하기 위해 분급공정을 진행하였다. 분급공정은 분말용 분급기(N-5, Seishin

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: ohjs@gnu.ac.kr

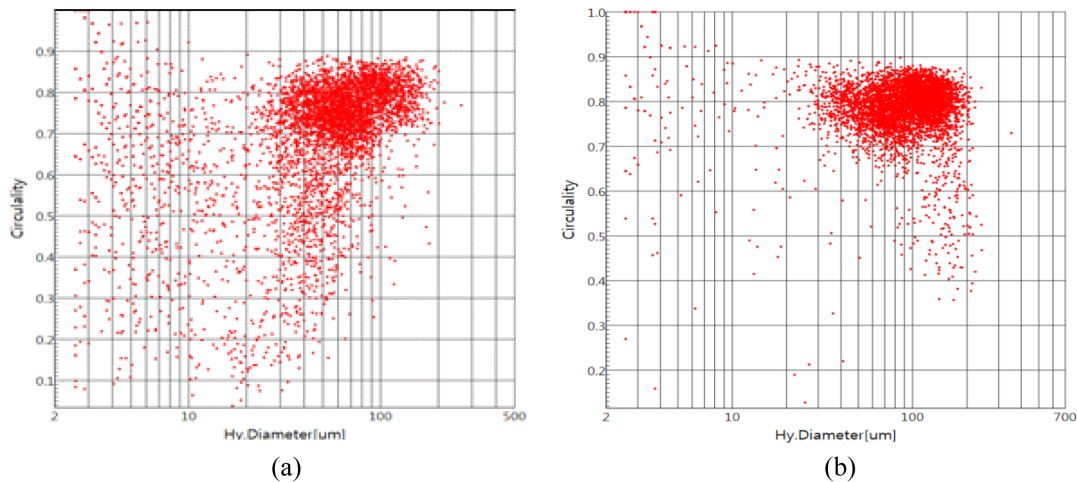


Figure 1. The circularity distribution of (a) non-circularized UHMWPE powder and (b) circularized UHMWPE powder.

Enterprise, Japan)를 이용해 이루어졌다. 분급공정을 통해 100  $\mu\text{m}$ 의 평균입도(D(0.5))를 가지는 구형 UHMWPE 분말을 획득하였다. 구형화 처리 입자에 대한 구형도 분석은 입자 이미지 분석기(PITA-3, SEISHIN, Japan)를 통해서 진행하였다. Figure 1은 입도-구형도 분포도 사진으로 입도에 따른 구형도(circularity)를 나타낸다. 구형도는 입자의 모양이 구에 얼마나 근접한가에 대한 척도로 실제 입자 모양의 경계와 같은 면적을 가지는 원의 경계와의 비를 뜻한다. 이는  $\frac{4\pi A}{P^2}$  (A: 입자의 면적, P: 입자의 둘레)의 식으로 계산한다. 1에 가까운 값일수록 구형에 가까운 입자임을 뜻한다. 본 연구에서 사용된 UHMWPE 분말은 구형화 처리 전 구형도 값이 0.6 이하 입자들이 구형화 처리 후 구형도 값이 0.7 이상을 나타내어 UHMWPE 분말이 구형화 처리가 된 것을 확인할 수 있었다. Figure 2는 입자 이미지 분석기를 통해 촬영된 구형화 처리 전과 후의 UHMWPE 분말 입자의 이미지이다. 상기 이미지를

통해 구형화 처리 후의 입자 모양이 구형화 처리 전의 입자 모양에 비해 구형이라는 사실을 알 수 있었다. 합성시 복합체를 구형화한 기존 연구와<sup>9</sup> 달리, 본 연구는 충전제를 구형화하여 혼합 시 사용 가능하도록 하였다.

### 3. 시편 제조

Table 1과 같은 배합을 twin screw extruder (BA-11, Bautek, Korea)를 사용하여 co-rotating 방식으로 혼합하였다. 사용된 screw 직경은 19 mm, L/D는 40이다. 60°C에서 24시간 동안 pre-dry를 하고 압출 온도는 zone별로 150/170/190/230/230/230/230/230°C로 설정하였다. 사출 시편은 원일유압사의 형체력 25톤 유압사출기 (WL-HV-80)를 사용하여 제조되었다. 압축 시편은 오션 과학사의 15톤 유압식 압축 성형기(COAD. 1006)를 사용하여 제조되었다. 사출 성형은 노즐부(Nozzle) 온도를 225°C로 설정하였고 냉각 시간은 65초로 설정하였다.

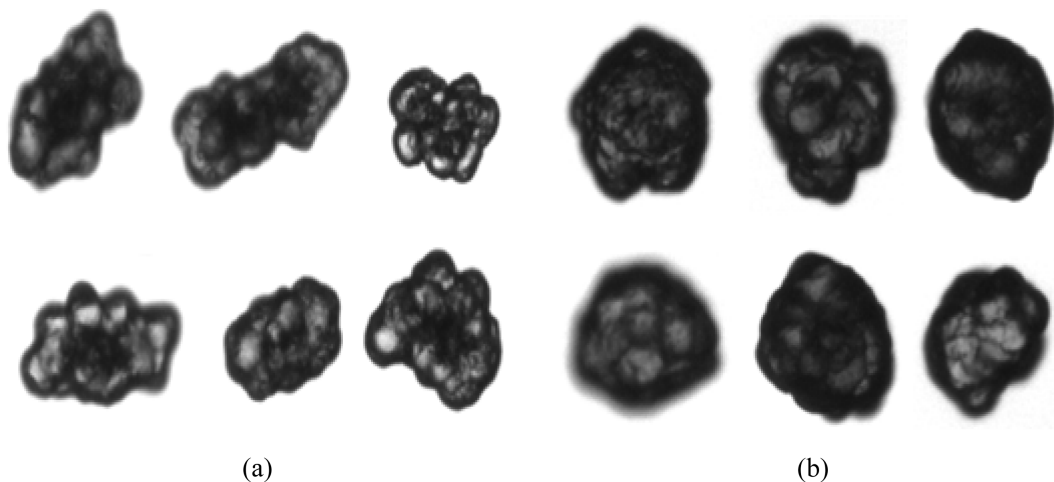


Figure 2. The particle shape images of (a) non-circularized UHMWPE powder and (b) circularized UHMWPE powder.

**Table 1.** Compositions of UHMWPE/HDPE Composites

Specimen	HDPE (wt%)	UHMWPE (wt%)
1	100	0
2	97.5	2.5
3	95	5
4	92.5	7.5
5	90	10
6	80	20
7	70	30
8	60	40
9	50	50

압축 성형 온도는 215°C로 설정되었으며, 100 bar에서 5분, 200 bar에서 5분간 총 10분 동안 가열 후 25°C로 냉각하여 제작하였다.

#### 4. 내마모성

내마모특성을 측정하기 위해 시편은 ASTM D3389에 따라 square (100×100 mm<sup>2</sup>) 형태로 제작하여 측정하였다. Tabor abrasion tester (COAD 101, 오션과학, Korea)로 CS-10 마모자, 1000 gf per wheel에서 rpm 72로 2000회 후 내마모성을 측정하였다.

#### 5. 평면마찰계수

복합재료의 평면마찰 평가는 촉감평가기(HEIDON Type 33, SHINTO Scientific, Japan)와 본 연구실에서 고안된 지그(jig)를 사용하였다. 촉감평가기는 X, Y, Z축의 로드 셀(load cell)을 통해 X, Y 양 방향의 평면 마찰과 가해진 하중을 동시에 측정할 수 있는 특징이 있다. 일정 하중과 속도를 조절할 수 있도록 지그를 자체 제작하였다.<sup>10</sup> 상기 촉감평가기를 Figure 3에 나타내었다. 시편을 지그의 부착판에 붙인 후 스테이지 위에서 원 방향으로 슬라이딩하여 X, Y축의 평면마

찰계수를 측정하였다. 이 때의 수직 하중 및 슬라이딩 속도는 각각 1 kgf, 10 mm/sec로 상온에서 진행되었다.

#### 6. 인장강도

인장 특성은 ASTM D638에 따라 시험 시편의 형상 및 치수를 type 4와 동일하게 사용하여 측정하였다. UTM (universal testing machine, Tensiometer 2000, Myungjitech, Korea)은 상온에서 50 mm/min의 인장 속도를 적용하여 인장강도를 평가하였다.

#### 7. 충격강도

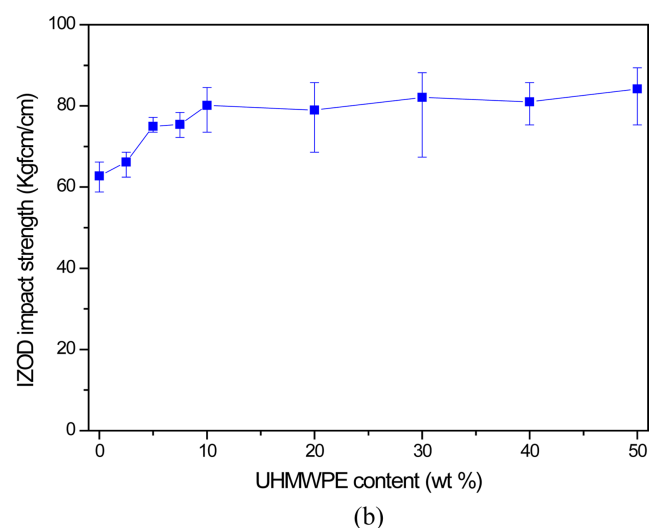
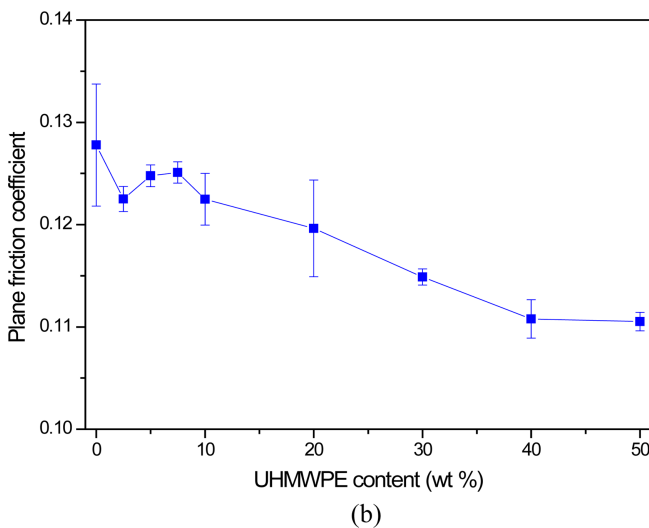
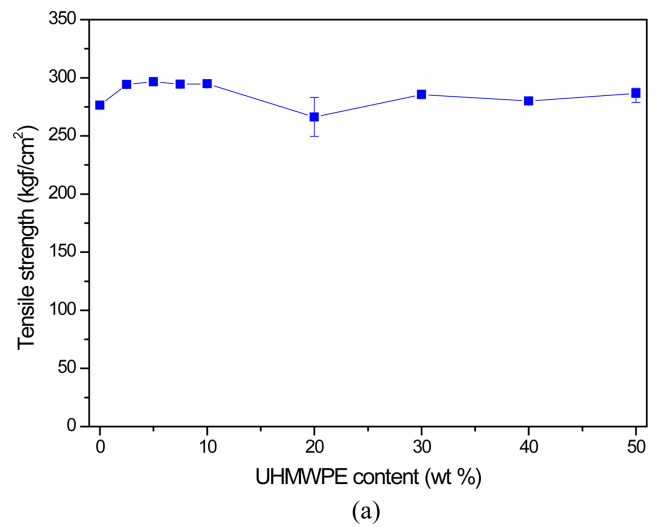
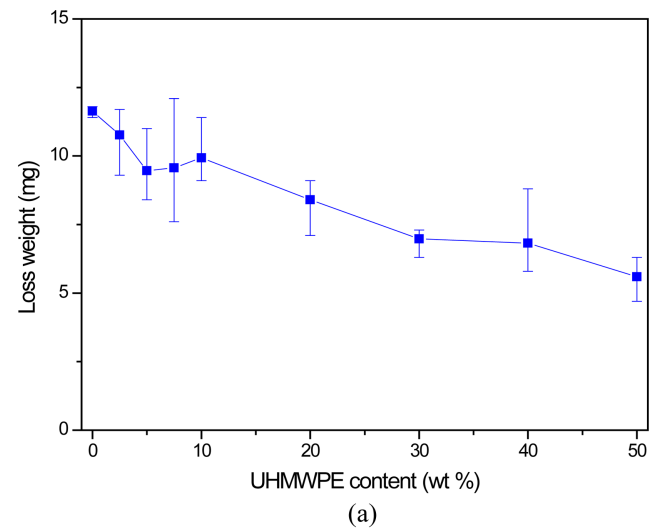
충격 특성은 ASTM D256에 따라 시험 시편의 형상 및 치수를 notched type과 동일하게 사용하여 측정하였다. IZOD Impact tester (DKI-40, KyeongDo, Korea)는 impact hammer energy를 6.8 J, impact speed를 3.5 m/s로 상온에서 충격강도를 평가하였다.

## Results and Discussion

HDPE 복합재료의 마찰 특성 측정 결과는 Figure 4에 나타내었다. UHMWPE/HDPE 복합재료의 내마모성은 UHMWPE 함량을 0~50 wt.%로 하여 미충전 HDPE 및 neat UHMWPE와 함께 비교하였다. Figure 4(a)에 나타난 바와 같이 UHMWPE/HDPE 복합재료의 경우 UHMWPE 함량이 증가함에 따라 내마모성은 향상됨을 확인할 수 있었다. UHMWPE를 5 wt.% 정도의 소량을 첨가하여 미충전 HDPE 대비 18% 개선 되어 효과적이며 50 wt.% 보강 시 52%까지 개선 되어 제품 개발 시 최적화 하여 활용 가능할 것으로 기대된다.

Tactile meter를 통해 평면 마찰계수를 측정하였다. Figure 4(b)는 UHMWPE/HDPE 복합재료의 평면 마찰계수 측정 시험 결과를 나타내었다. 일반적인 마찰계수 측정기는 X 축 하나

**Figure 3.** Tactile meter.



**Figure 4.** The tribological properties of UHMWPE/HDPE composites as a function of UHMWPE content: (a) abrasion resistance of UHMWPE/HDPE composites and (b) plane friction coefficient of UHMWPE/HDPE composites.

**Figure 5.** The mechanical properties of UHMWPE/HDPE composites as a function of UHMWPE content: (a) tensile strengths of UHMWPE/HDPE composites and (b) IZOD impact strengths of UHMWPE/HDPE composites.

의 방향에 대해서만 마찰을 측정한다. 그러나 제품상에서 이 송체에 의한 마모 발생시 실제로는 X 축과 Y 축 방향에 함께 적용되므로 두 방향을 동시에 측정하는 마찰계수 평가 방법이 필요하여 본 연구에서는 평면마찰계수를 측정하였다. UHMWPE 함량이 증가함에 따라 평면마찰계수는 감소하는 것으로 확인되었다. UHMWPE는 비극성 성질과 매끄러운 분자 사슬 구조를 지니어 낮은 전단 강도의 경계면을 가지며 이로 인해 HDPE 매트릭스에 첨가될 경우 평면마찰계수를 감소해주는 것으로 판단된다.<sup>11-14</sup>

Figure 5는 HDPE 복합재료의 기계적 강도 측정 결과이다. Figure 5(a)에서 인장강도 값은 UHMWPE의 함량에 따른 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 이는 인장강도의 저하 없이 내마모성을 향상할 수 있음을 알 수 있다.

Figure 5(b)는 UHMWPE/HDPE 복합재료의 충격강도 결과

를 나타내었다. 구형 UHMWPE 분말이 첨가됨에 따라 충격강도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. UHMWPE는 상호확산에 의해 충격 에너지 흡수 용량이 크고, 크랙(crack)이 생성되는 시간을 지연시켜주어 뛰어난 충격강도를 가진다.<sup>15,16</sup> UHMWPE의 뛰어난 충격강도 특성이 HDPE와의 좋은 상용성에 의해 효과적인 충격강도 향상을 나타낸 것으로 판단된다.<sup>17</sup> 5 wt.% 정도의 소량을 첨가하여 미충전 HDPE 대비 20% 향상되어 효과적이며 50 wt.% 충전시 최대 34%까지 개선되었다. 이는 별도의 충격 보강제 충전 없이 마찰과 충격 특성을 인장강도 저하 없이 향상시킬 수 있음을 나타낸다.

## Conclusions

HDPE의 내마모성과 충격강도 향상을 위해 UHMWPE 분

말을 충전하여 복합재료를 제조하였다. UHMWPE 입자의 균일성 및 유동성 향상을 위해 기계적 방법으로 구형화 하였다. 입자 이미지 분석기를 통해 구형화도가 0.6 이하의 값에서 0.7 이상으로 향상됨을 확인하였다. UHMWPE/HDPE 복합재료의 평면마찰계수가 감소하고 내마모성 및 충격 강도가 구형 UHMWPE 분말 함량이 증가함에 따라 향상됨을 확인 할 수 있었다. 이는 UHMWPE 하나의 충전제로 내마모성과 충격 특성이 향상되므로 향후 HDPE 파이프 등 제품의 내구성 향상에 활용될 것으로 기대된다.

## Acknowledgements

본 연구는 2017년도 한국산업기술진흥원 지역주력산업육성(R&D) 기술개발사업으로 지원으로 수행되었기에 감사드립니다(과제번호: 2017-0816).

## References

1. W.-Y. Jung and J.-I. Weon, "Characterization of Thermal Degradation for High Density Polyethylene : Mechanical and Thermal Behaviors and Long-Term Lifetime Prediction", *Polymer(Korea)*, **39**, 873 (2015).
2. S. Ronca, "Brydson's Plastics Materials", ed. by M. Gilbert, 8<sup>th</sup> Ed. p247, Elsevier Ltd., Cambridge (2017).
3. M. H. Jung, J. C. Kim, and J.-H. Chang, "Ultra High Molecular Weight Polyethylene Nanocomposite Films: Thermomechanical Property, Morphology, and Gas Permeability", *Polymer(Korea)*, **31**, 428 (2007).
4. J.-H. Lee and H.-I. Kim, "Effect of Surface Oxidation on Welding Properties of Polyethylene Pipe", *Polymer(Korea)*, **41**, 139 (2017).
5. J. Tong, Y. Ma, R. D. Arnell, and L. Ren, "Free abrasive wear behavior of UHMWPE composites filled with wollastonite fibers", *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **37**, 38 (2006).
6. F. Živić, M. Babić, S. Mitrović, D. Adamović, and S. Pelemis, "Friction Coefficient of UHMWPE During Dry Reciprocating Sliding", *Tribology in Industry*, **36**, 281 (2014).
7. S. Wannasri, S. V. Panin, L. R. Ivanova, L. A. Kornienko, and S. Piriyaon, "Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofibers", *Procedia Eng.*, **1**, 67 (2009).
8. G. Sui, W. H. Zhong, X. Ren, X. Q. Wang, and X. P. Yang, "Structure, mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/carbon nanofibers", *Mater. Chem. Phys.*, **115**, 404 (2009).
9. D.-Y. Yi, "Performance Improvement of Epoxy Resin System by the Filler Reformation", *J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **24**, 130 (2010).
10. K. H. Lee, J. S. Jung, S. W. Han, J. U. Ha, H. W. Lee, and J. S. Oh, "The Tactile Assessment of Skin Materials in Automotive Interior", *Polymer(Korea)* (in press)
11. D.-X. Li, W.-J. Li, Y. Xie, and X.-X. L., "Effects of solid lubricants on friction and wear behaviors of polyamide 6", *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 4239 (2012).
12. N. Chand, U. K. Dwivedi, and M. K. Sharma, "Development and tribological behaviour of UHMWPE filled epoxy gradient composites", *Wear*, **262**, 184 (2007).
13. C. Z. Liu, J. Q. Wu, J. Q. Li, L. Q. Ren, J. Tong, and A. D. Arnell, "Tribological behaviours of PA/UHMWPE blend under dry and lubricating condition", *Wear*, **260**, 109 (2006).
14. H.-G. Wang, L.-Q. Jian, B.-L. Pan, J.-Y. Zhang, S.-R. Yang, and H.-G. Wang, "Mechanical and Tribological Behaviors of Polyamide 66/Ultra high Molecular Weight Polyethylene Blends", *Polym. Eng. Sci.*, **47**, 738 (2007).
15. A. D. A. Lucas, J. D. Ambrósio, H. Otaguro, L. C. Costa, and J. A. M. Agnelli, "Abrasive wear of HDPE/UHMWPE blends", *Wear*, **270**, 576 (2011).
16. A. B. Boscoletto, R. Franco, M. Scapin, and M. Tavan, "An investigation on rheological and impact behaviour of high density and ultra high molecular weight polyethylene mixtures", *Eur. Polym. J.*, **33**, 97 (1997).
17. M. F. Diop, W. R. Burghardt, and J. M. Torkelson, "Well-mixed blends of HDPE and ultrahigh molecular weight polyethylene with major improvements in impact strength achieved via solid-state shear pulverization", *Polymer*, **55**, 4948 (2014).